

Düzlem yüzey ısı alıcılarda tekli ve çoklu hava jetinin ısı ve akış karakteristiklerine etkisinin sayısal analizi

Numerical analysis of the effect of single and cascade air jets on heat and flow characteristics in plane surface heat sinks

Ahmet Numan ÖZAKIN^{*1,a}, Abdüssamed KABAKUŞ^{2,b}

¹ Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 25100, Erzurum

² Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 08000, Artvin

• Geliş tarihi / Received: 08.11.2021

• Düzeltilecek geliş tarihi / Received in revised form: 13.05.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 23.05.2022

Öz

Bu çalışmada, düzlem yüzey ısı alıcısı üzerinden tekli ve çoklu hava jeti ile gerçekleşen ısı transfer performansı Ansys-Fluent programı ile sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma zamandan bağımsız $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. On farklı Reynolds sayısı ($4000 \leq Re \leq 40000$), ve tekli ve çoklu nozul sayılarının düzlem ısı alıcıda ısı transferine etkileri irdelenmiştir. Analizler 40 mm nozul ısı alıcısı arası mesafede gerçekleştirilmiştir. Hava ise belirlenen Reynolds sayılarına karşılık gelen hızlarda 293.15 K sıcaklığında kontrol hacmine gönderilmiştir. Çalışmada ısı alıcısı üzerinde gerçekleşen sıcaklık dağılımını gösteren sıcaklık konturları ve ısı alıcısı yüzeyinde türbülans oluşumunun gözlemlendiği akım çizgi görüntüleri sunulmuştur. Sonuç olarak, her iki nozul çeşidinde de Reynolds sayısı arttıkça soğutma performansı artmıştır. Yaklaşık 38000 Reynolds sayısı değerine kadar tekli nozul çoklu nozula göre daha iyi bir soğutma performansı gösterirken, 38000 Reynolds sayısından sonra çoklu nozul ile daha iyi ısı transferi elde edildiği belirlenmiştir. Nusselt sayısı, en düşük Reynolds sayısında tekli nozulda çoklu nozula göre %60, en yüksek Reynolds sayısında ise çoklu nozulda tekli nozula göre %15 artış göstermiştir. Elde edilen sayısal sonuçların literatürde ayrı ayrı bulunan tekli ve çoklu hava jeti ile yapılan deneysel çalışmalarla uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Çarpan jet, Çoklu nozul, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Isı transferi

Abstract

In this study, heat transfer performance with single and cascade air jets over the plane surface heat sink was numerically investigated with Ansys-Fluent software. Numerical analyses was carried out using the time-independent $k-\epsilon$ turbulence model. The effects of ten different Reynolds numbers ($4000 \leq Re \leq 40000$) and single and cascade nozzle numbers on the heat transfer were investigated. Analyzes were carried out at a distance of 40 mm between the nozzle and the heat sink. The air, on the other hand, was sent to the control volume at a temperature of 293.15 K at velocities corresponding to the determined Reynolds numbers. In the study, temperature contours showing the temperature distribution on the heat sink and streamline images in which turbulence formation is observed on the heat sink surface are presented. As a result, cooling performance increased with increasing Reynolds number in both nozzle types. It was determined that while the single nozzle showed a better cooling performance than the cascade nozzle up to approximately 38000 Reynolds number, better heat transfer was obtained with the cascade nozzle after 38000 Reynolds number. The Nusselt number showed an increase of 60% at the lowest Reynolds number in the single nozzle compared to the cascade nozzle, and 15% in the cascade nozzle at the highest Reynolds number compared to the single nozzle. It has been observed that the numerical results obtained are compatible with the experimental studies conducted with single and cascade air jets separately in the literature.

Keywords: Impinging jet, Cascade nozzle, Computational fluid dynamics, Heat transfer

^{*a} Ahmet Numan ÖZAKIN; ahmet.ozakin@atauni.edu.tr, Tel: (0538) 935 05 26, orcid.org/0000-0002-2083-8703

^b orcid.org/0000-0002-3049-9493

1. Giriş

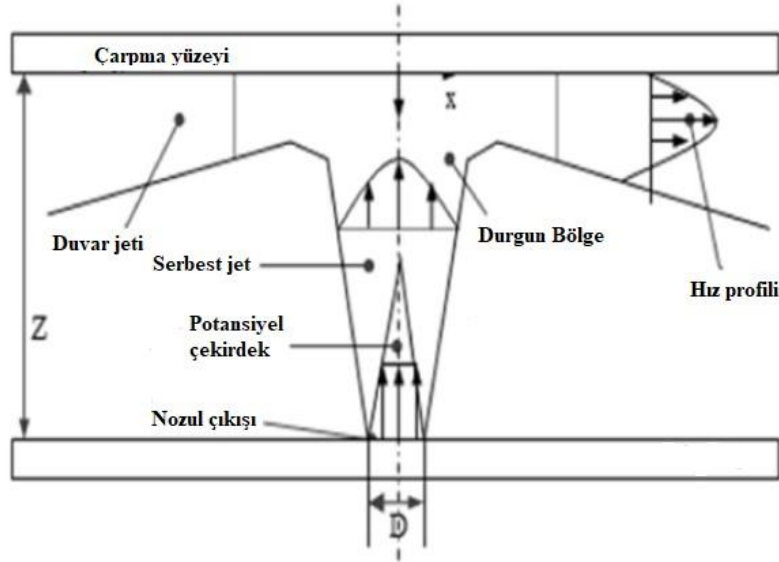
1. Introduction

Endüstride işletme sırasında ortaya çıkan ve bir takım tersinmezlikler sonucu oluşan yüksek ısı akıları sistemlerin çalışma performanslarını ve ekonomik ömürlerini olumsuz etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Yüksek ısı akılarının uzaklaştırılmasında literatürde çarpan hava jeti (Karabulut vd., 2018; Karabulut, 2019), su jeti (Baghel vd., 2021), mikro kanallar (Spizzichino vd., 2020), sprey soğutma (Yeşildal & Yakut 2017; Kabakuş vd., 2021) vb. birçok soğutma metodu kullanılmaktadır. Düşük soğutucu akışkan debisi ile yüksek ısı transfer performansı elde edebilmek için kullanılan çarpan hava jeti ile soğutma, yüksek ısı akılarının uzaklaştırılması için kurutma uygulamalarında, yüksek ısı akısı yoğunluklarına sahip mikro-elektronik çipler ve devre

elemanlarında, gaz türbinlerinde, tekstil ve kâğıt üretim endüstrisi gibi uygulama alanlarında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır (De Lemos vd., 2008; Yakut vd., 2020; Hüseyin, 2021; Dagtekin & Oztop 2008; Yakut vd., 2015).

Çarpan hava jeti ile soğutmada, farklı geometrilerdeki nozullardan gönderilen havanın yüksek ısı akısına sahip yüzeye çarptırılması sonucu, çarpma bölgesinde sınır tabakası azalır ve ısı taşınım katsayısı artar. Böylece hava jetinin çarptığı bölgede ısı transferi artarak etkin bir soğutma gerçekleşir (Hüseyin, 2021; Yakut vd., 2015).

Çarpan hava jetinde farklı türbülans karakteristiklerine sahip olan üç bölge oluşmaktadır (Şekil 1). Bunlar serbest jet bölgesi, durgun (çarpma) bölgesi ve radyal yönde akışın gerçekleştiği bölgelerdir (Chauhan & Thakur 2018).



Şekil 1. Çarpan jet oluşumu (Chauhan, 2018; Chauhan, 2012)

Figure 1. Impinging jet formation (Chauhan, 2018; Chauhan, 2012)

Çarpan jette, nozul geometrisinin (Kilic & Başkaya 2017), nozul-ısı alıcı arası mesafenin (Rim vd. 2017), jet sayısının (Husain vd., 2013), çarpma bölgesi geometrisinin (Karabulut, 2019), jet hızının (Yakut vd., 2016), vb. parametrelerin soğutma performansına etkilerinin incelendiği çalışmalar literatürde yer almaktadır. Yapılan çalışmalar deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada, düzlem plaka ısı alıcılarda, farklı Reynolds sayılarında tekli ve tasarımı yapılan çoklu nozullar için ANSYS Fluent programı ile modelleme yapılarak oluşturulan çarpan hava jetinin ısı alıcı yüzeyinden gerçekleşen ısı transferine etkileri sayısal olarak araştırılmıştır. Çoklu hava jetinin belirlenen geometrisi için Reynolds sayısının 38000 ve üstü değerlerinde

tekli hava jetinden daha iyi bir soğutma gerçekleştirdiği belirlenmiştir. Literatürde çarpan jet ile yapılan çalışmalar aşağıdaki gibidir.

Yakut vd. (Yakut & Yakut, 2020), rüzgar tüneline Taguchi yöntemi ile optimize edilmiş altıgen kanatçıklı ısı alıcılarda akış parametrelerinin belirlemek için deneysel ve sayısal bir çalışma yapmışlardır. Kanatçıklı ısı alıcının yüzeyinde oluşan dönümlü ve kararsız akışın plaka yüzeyindeki basınç değişimine etkisini $C_{p,x,y}$ basınç katsayısı değerlerini hesaplayarak deneysel ve sayısal sonuçları karşılaştırmışlardır. Deneysel ve sayısal sonuçların birbirleriyle uyumlu olduklarını ve en yüksek basınç değerinin 100 mm kanat yüksekliğinde, 9 m/sn hız değerinde ve x

yönünde 0.6 istasyonunda, y yönünde ise 0.8 istasyonunda pik yaptığını belirlemiştir.

Çalışır vd. (2017) çalışmalarında, 7x3 dikdörtgen dizimli dairesel çarpan hava jetleri ile üçgen ve kare geometriye sahip kanatçıklı ısı alıcılar üzerindeki akışı karakteristiklerini sayısal olarak incelemiştir. Reynolds sayısının, nozul- plaka arasındaki mesafenin ve kanatçık geometrisinin plaka üzerindeki akışa etkisini irdelemiştir. Kare kanatçıklı ısı alıcıda jet akışının kanat üstünde ayrıştığını ve Nusselt sayısının çarpma yüzeyinde ani düşüşe uğradığını tespit etmişlerdir. Nozul-ısı alıcı arası mesafenin $H/d=2$ olduğu durumda duvar jetlerinin daha etkili olduğu ve iki komşu jetin duvar jetlerinin etkileşime uğradığını belirlemiştir.

Karabulut ve Alnak (2021) Ansys-Fluent ile gerçekleştirdikleri sayısal çalışmalarında, iki farklı yüzey geometrisine sahip bakır ısı alıcılarda $Re=5000-11000$ aralığında, $H/D_h=3$ ile 6 değerlerinde ve jet giriş genişlikleri $D_h=0.5-1$ olmak üzere çalışma parametrelerini belirlemişler ve sonuç olarak $D_h=0.5$, $H/D_h=6$ ve $Re=5000$ için Nusselt sayısının ters yamuk yüzey geometrisine göre çatı yüzey geometrisinde yaklaşık %26 daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir.

Kılıç ve Özcan (2019), yüksek ısı akısına maruz bırakılan bir ısı alıcı üzerinden gerçekleşen ısı transferini farklı Reynolds sayıları, nanoakışkanlar, hacimsel oranlar ve parçacık çapları için sayısal olarak incelemiştir. Reynolds sayısının artışıyla ısı transferinin arttığını, ayrıca nanoakışkan partikül çapını azaltılmasıyla Nusselt sayısının arttığını belirlemiştir. Farklı hacimsel oranlardaki değişimin ısı transferinde belirgin bir artışa sebep olmadığını, en iyi ısı transfer performansının Cu-Su ile elde edildiğini belirtmişlerdir.

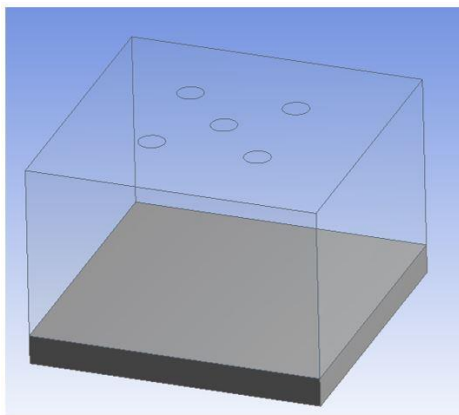
Çulun vd. (2017) çalışmalarında, plakaya çarptırılan çoklu çarpan jetlerde, jetlerin birbiriye etkileşimi sonucu ısı transferinin olumlu veya olumsuz etkilenebileceğini belirtmişlerdir. Çoklu jetlerde ısı transferini olumsuz etkileyen çapraz akışların önlenmesi için, Reynolds sayısı, jetler arası mesafe, giriş türbülans yoğunluğu ve hedef plaka orifis plakalar arası boyutsuz mesafe gibi değişken parametreler incelenerek ısı transferi üzerine etkilerini görebilmek için sayısal bir çalışma yapmışlardır. Sonuç olarak türbülans yoğunluğundan ziyade sayısal analizde kullanılan türbülans modeli seçiminin sayısal sonuçları deney sonuçlarına yaklaştırdığını ifade etmişlerdir.

Karabulut ve Alnak (2020), 1000 W/m^2 ısı akısına maruz bıraktıkları farklı geometrilerdeki bakır plakaları çarpan jet ile soğutmuşlardır. Ansys Fluent ile yaptıkları sayısal çalışmada $4000-10000$ Reynolds sayısı ve $4-10 H/D_h$ nozul ısı alıcı arası mesafede çalışmışlardır. $Re=4000$ $H/D_h=4$ için dikdörtgen desenli geometride, sur desenli geometriye göre %31.45 daha yüksek Nu sayısı elde etmişlerdir.

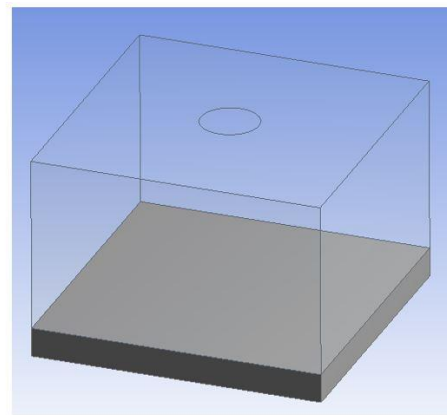
2. Materyal ve metot

2. Meterial and methods

Tekli ve çoklu hava jeti ile soğutmanın sayısal olarak modellendiği bu çalışmada 4000 ile 40000 aralığında on farklı Reynolds sayısı için sayısal analizler yapılmıştır. Isı alıcı olarak $40 \times 40 \times 5$ mm ölçülerinde 5000 serisi alüminyum malzeme kullanılmıştır. Analizler 40 mm nozul ısı alıcı arası mesafede gerçekleştirilmiştir. Hava ise belirlenen Reynolds sayılarına karşılık gelen hızlarda 293.15 K sıcaklığında kontrol hacmine gönderilmiştir. CFD çözümlerinde kullanılan geometri Şekil 2'de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2. CFD analizlerinde kullanılan geometriler. (a) Çoklu nozul, (b) Tekli nozul
Figure 2. Geometries used in CFD analysis. (a) Cascade nozzle, (b) Single nozzle

Tekli nozul çapı 10 mm olarak belirlenirken, çoklu nozulda nozul alanı tekli nozul ile eşit alana sahip her birinin çapı 4.47 mm olan beş adet nozul kullanılmıştır. Belirlenen geometriler ANSYS-Fluent 16.0 yazılımı yardımıyla modellenmiştir. Analizler aşağıda belirtilen kabuller ve sınır şartlarında gerçekleştirilmiştir.

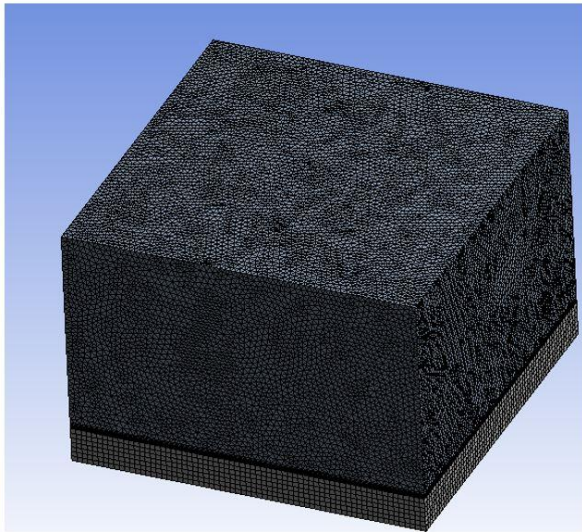
- Akışkan olarak gaz fazında ve sıkıştırılmaz hava kullanılmıştır.
- Havanın fiziksel özellikleri sabittir.
- Kontrol hacmi içerisindeki hava akışı sürekli ve düzdür.
- Kontrol hacmi kararlı olarak kabul edilmiştir.
- Yer çekimi etkileri ihmal edilmiştir.

Yukarıda belirtilen kabuller göz önünde bulundurularak analizlerde korunum denklemleri kullanılmıştır. Kütle korunumu denklemi;

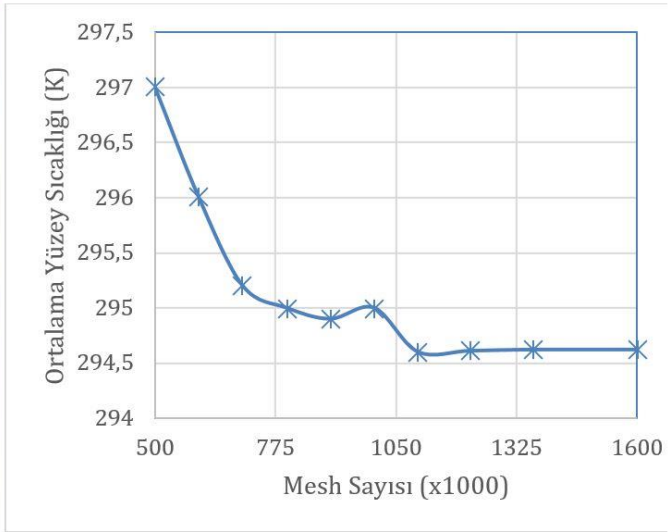
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

momentum denklemi;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \rho + \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (2)$$



(a)



(b)

Şekil 3. Kontrol hacimleri için kullanılan mesh görüntüsü (a), Tekli nozul için Mesh bağımsızlık analizi (b)
Figure 3. Mesh image used for control volumes (a), Mesh independence analysis for single nozzle (b)

Sayısal çalışmada enerji ve momentum için ikinci dereceden ayrıklaştırma, algoritma olarak “SIMPLE” basınç-hız eşleştirme algoritması kullanılarak standart basınç ile sonuçlara ulaşılmıştır.

enerjinin korunumu denklemi;

$$\rho c_v \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T + \Phi \quad (3)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Bu çalışmada kontrol hacminin alt kısmında bulunan ısı alıcıya 1000 W/m² sabit ısı akışı ve belirtilen sınır şartlarında hava hızları tanımlanarak sonuçlara ulaşılmıştır. Aynı zamanda çalışmada türbülans modeli olarak “k-ε RNG” modeli ile “Enhanced Wall Functions” şartları kullanılmıştır. Bu şartların yeterli iterasyon ve mesh elemanı şartlarının da sağlandığı durumda ısı transferi analizlerinde doğru sonuçlar verdiği belirlenmiştir (Karagoz vd., 2017).

Meshing kısmında tekli ve çoklu geometriler için oluşturulan mesh yapılarında 500000 mesh sayısından başlanıp gittikçe artırılarak yapılan mesh testlerinde sırasıyla 1365000 ve 1589000 adet mesh kullanılarak Orthogonal Quality %90-%94 arasında oluşturulmuştur. Mesh sayısında daha fazla yapılabilecek bir artışın Orthogonal Quality ve sonuçlarda değişikliğe sebep olmadığı görülmüştür. Mesh yapısı ve Mesh bağımsızlık analizi sonuçları Şekil 3’te görülmektedir.

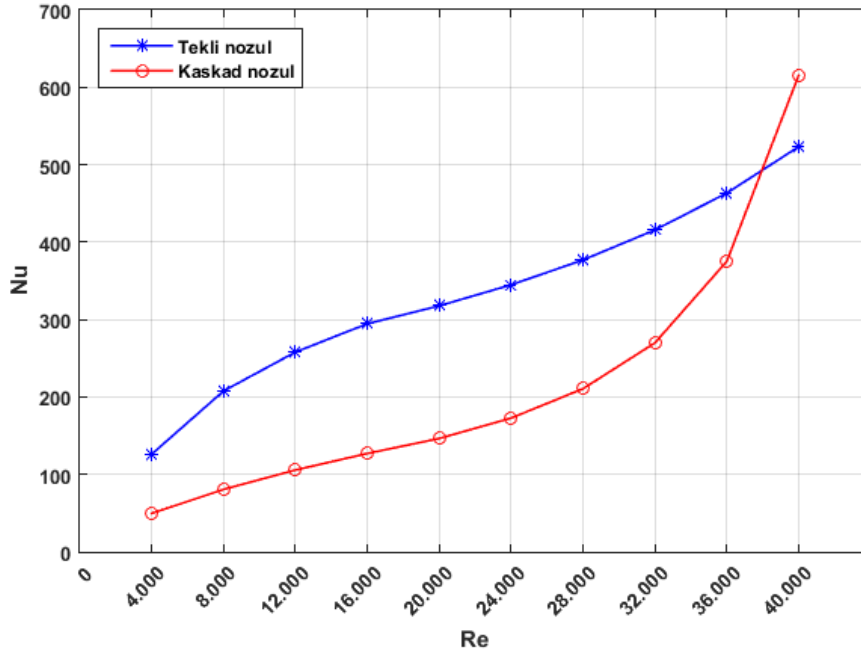
3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

Tekli ve çoklu çarpan hava jetlerinin soğutma performanslarının kıyaslanması amacıyla yapılan sayısal çalışmalarda farklı Reynolds sayıları ve nozul dizilişleri için 20 adet analiz yapılmıştır. Çoklu hava jeti ile yapılan analizlerde elde edilen Nusselt sayıları Reynolds sayısının 38000 civarına

ulaşana kadar tekli hava jetine kıyasla düşük bir performans göstermiştir. Belirtilen Reynolds sayısının üzerine çıkıldığında çoklu hava jeti tekliye kıyasla daha iyi bir performans

göstermiştir. Şekil 4'te farklı nozul dizilişleri için elde edilen Nusselt-Reynolds grafiği görülmektedir.

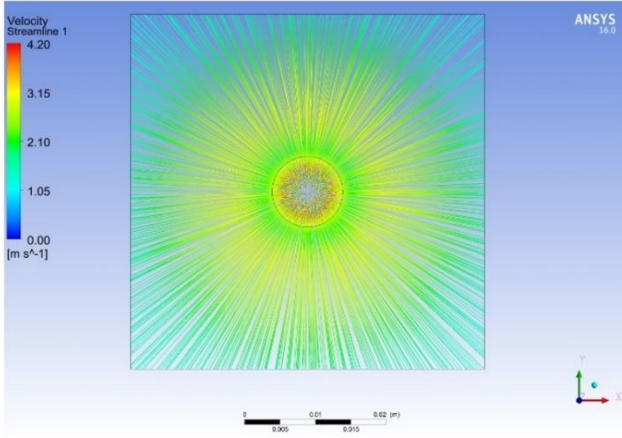


Şekil 4. Farklı Reynolds sayılarında tekli ve çoklu nozulların soğutma performansları.

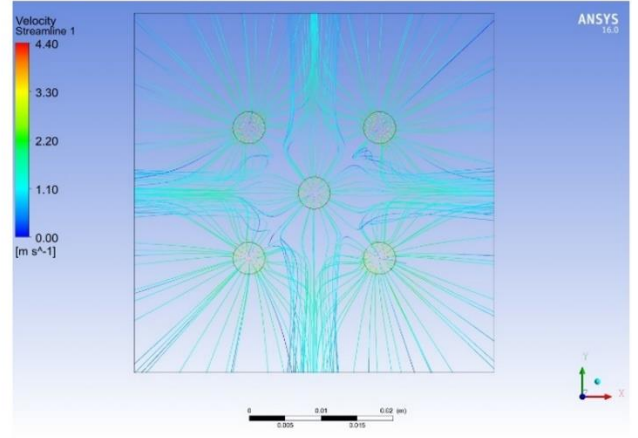
Figure 4. Cooling performances of single and cascade nozzles at different Reynolds numbers.

Tekli ve çoklu hava jetlerin soğutma performansları incelendiğinde Reynolds sayısının artışıyla Nusselt sayısında da artış gözlemlenmiştir (Şekil 4). Yaklaşık 38000 Reynolds değerine kadar tekli nozul çoklu nozula göre daha iyi bir soğutma performansı gösterirken, 38000 Reynolds sayısından sonra çoklu nozulda daha yüksek Nusselt Sayısı değeri elde edilmiştir. Çoklu hava jetinde Reynolds sayısının 38000 ve üzerinde olduğu durumda daha iyi bir performans göstermesinin sebebi, düşük Reynolds sayılarında çoklu jetle oluşturulan jetlerin birbirleriyle temas ederek girdap yapısı oluşturmaları ve yüzeye tam temas sağlanmadan ısı alıcı yüzeyini terketmesi, Reynolds sayısı kritik eşik değerini ($Re=38000$) geçtiğinde ise oluşan girdapların şiddetini artırarak bölgesel olarak türbülans oluşturmasıdır. Isı alıcı

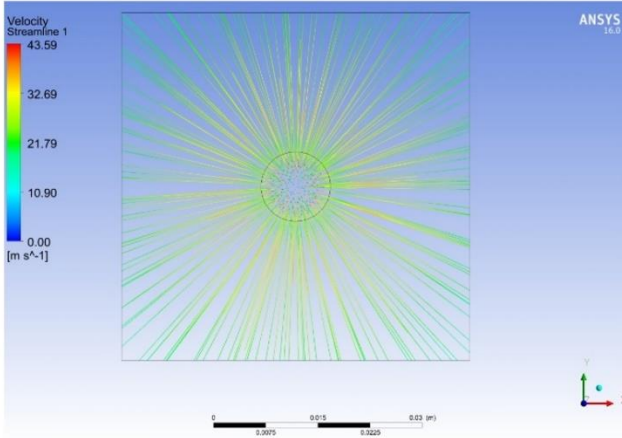
yüzeyinde oluşan şiddetli türbülans yüzeyden gerçekleşen ısı taşınımı artırarak soğutmaya olumlu etki yapmıştır (Şekil 5-6). Böylece, düşük Reynolds sayılarında çoklu nozula sahip hava jetinde sınır tabakalardaki akışın birbirine fazla karışmadan kontrol hacmini terk etmesi sebebiyle tekli nozula kıyasla daha düşük bir soğutma performansı göstermiştir. Nusselt sayısı tekli nozulda en düşük Reynolds sayısında en yüksek Reynolds sayısına göre %75, çoklu nozulda ise en düşük Reynolds sayısında en yüksek Reynolds sayısına göre %92 artış göstermiştir. Ayrıca Nusselt sayısı, en düşük Reynolds sayısında tekli nozulda çoklu nozula göre %60, en yüksek Reynolds sayısında ise çoklu nozulda tekli nozula göre %15 artış göstermiştir.



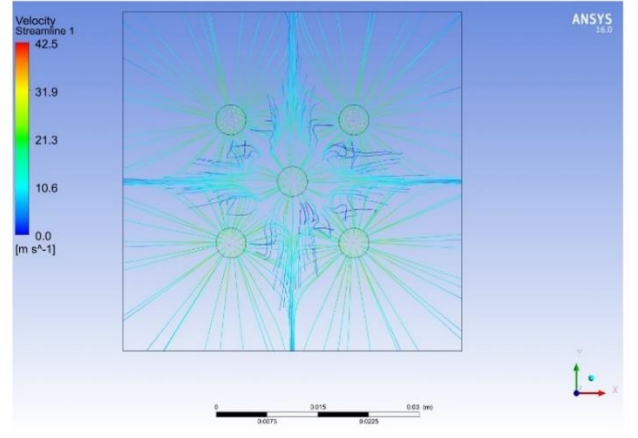
a. Re=4000, Tekli



b. Re=4000, Çoklu



c. Re=40000, Tekli



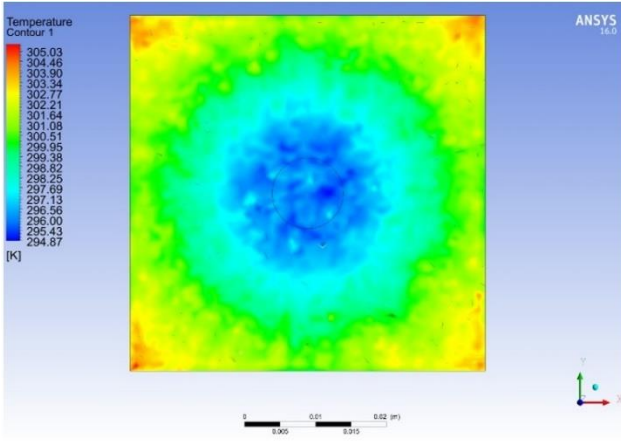
d. Re=40000, Çoklu

Şekil 5. Tekli ve çoklu hava jetlerinin 4000 ve 40000 Reynolds akış çizgileri.

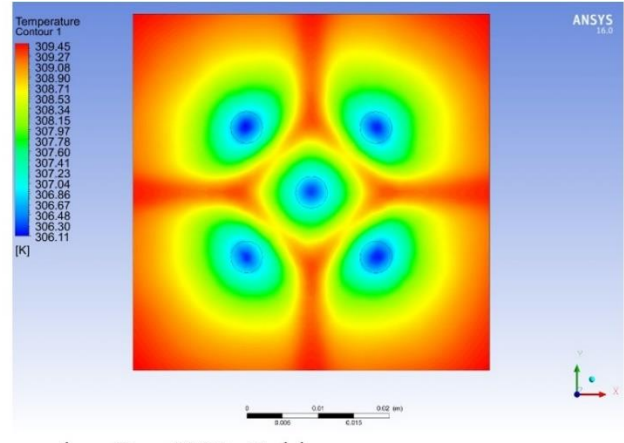
Figure 5. Streamlines of single and cascade air jets, 4000 and 40000 Reynolds.

Şekil 5 incelendiğinde tekli nozul için yapılan analizlerde (a-c) akış çizgilerinin ısı alıcı yüzeyine çarparak yüzeyi takip ederek kontrol hacminden ayrıldığı görülmektedir. Ancak çoklu hava jetinde (b-d) beş farklı girdap bölgesi bulunmaktadır. Reynolds sayısının artışı ile bu bölgelerdeki akış çizgilerinin daha sık bir formasyonda oluştuğu görülmektedir. Yüksek Reynolds sayılarında çoklu hava jetinin tekli jete göre daha iyi bir performans

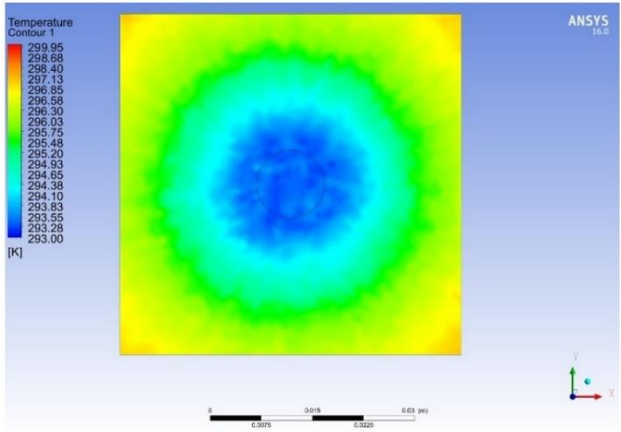
göstermesinin temel sebeplerinden birisi de oluşan girdap bölgelerinde daha sık akışa sahip olan yapıdır. Yani çoklu hava jetinde akış daha net bir şekilde dört farklı bölgeye ayrılmaktadır. Reynolds sayısının düşük olduğu durumlarda ise bu durumun tersi olarak akış ısı alıcı yüzeyinde daha az bir basınç oluşturarak yüzeyden bir miktar yükselerek difüze olmaktadır.



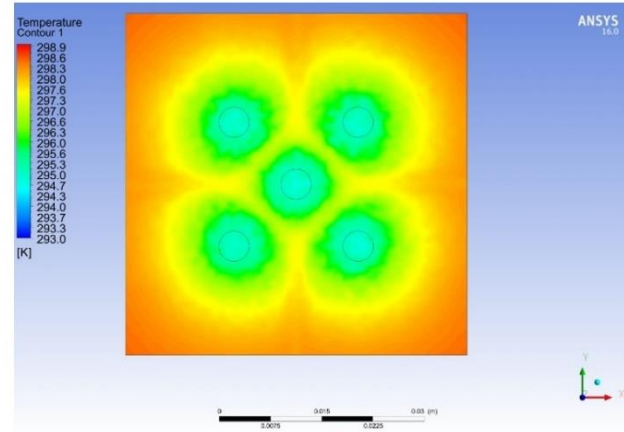
a. Re=4000, Tekli



b. Re=4000, Çoklu



c. Re=40000, Tekli



d. Re=40000, Çoklu

Şekil 6. Tekli ve çoklu hava jetlerinin 4000 ve 40000 Reynolds yüzey sıcaklık konturları.

Figure 6. Surface temperature contours of single and cascade air jets, 4000 and 40000 Reynolds obtained using optimum parameters.

Şekil 6'da görülen sıcaklık konturları incelendiğinde çoklu nozula sahip geometride tekliye kıyasla daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Çoklu hava jeti ile çalışmanın diğer bir avantajı jetin ısı alıcı yüzeyine daha fazla sayıda nozul ile gönderilerek bu homojenliğin sağlanmasıdır. Jetin ısı alıcıya çarptığı bölgelerde oluşan fazla soğutma çoklu jet için daha geniş bir alanda meydana gelmektedir.

4. Tartışma ve sonuçlar

4. Discussion and conclusions

Bu çalışmada tekli ve çoklu hava jeti ile soğutmanın farklı Reynolds sayılarındaki performansı sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma zamana bağlı olmayan (Steady-State) durumu için ve k-ε türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. On farklı Reynolds sayısı (4000-40000), ve tekli ile çoklu nozulların düzlem ısı alıcıları soğutmak için kullanılması durumunda ısı transferine etkileri irdelenmiştir. Analizler 40 mm nozul ısı alıcı arası mesafede

gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ısı alıcılar üzerindeki sıcaklık dağılımlarını gösteren sıcaklık konturları ve ısı alıcı yüzeyinde türbülans oluşumunun gözlemlendiği akım çizgi görüntüleri sunulmuştur. Sonuç olarak, her iki nozul çeşidinde de Reynolds sayısı arttıkça soğutma performansı artmıştır. Yaklaşık 38000 Reynolds değerine kadar tekli nozul çoklu nozula göre daha iyi bir soğutma performansı göstermiştir. Reynolds sayısının artırılarak 38000 Reynolds civarından sonra çoklu nozul ile daha iyi ısı transferi elde edildiği belirlenmiştir. Nusselt sayısı, en düşük Reynolds sayısında tekli nozulda çoklu nozula göre %60, en yüksek Reynolds sayısında ise çoklu nozulda tekli nozula göre %15 artış göstermiştir.

Elde edilen çalışma sonuçlarına göre, belirtilen geometrik özellikteki ısı alıcı-nozul kombinasyonlarında Reynolds sayısının 38000 kritik eşikini geçmesiyle çoklu nozul daha iyi bir performans göstermektedir. Bu durum Reynolds sayısının artmasıyla yüzeye çarpan akışın yüksek basınç sebebiyle sınır tabakanın daha fazla incilmesi (yüzey izdüşümüne karşılık gelen

nozulların tekliye göre daha fazla alanda etkili olması) ile açıklanabilir.

Yazar katkısı

Author contribution

Bu çalışmada yazarlar makaleye eşit katkıda bulunmuşlardır.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

Ansys Workbench, Fluent Software (Version 16)

Baghel, K., Sridharan, A. & Murallidharan, J. S. (2021). Heat transfer characteristics of free surface water jet impingement on a curved surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 164, 120487. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120487>

Chauhan, R., Singh, T., Thakur, N. S., Kumar, N., Kumar, R. & Kumar, A. (2018). Heat transfer augmentation in solar thermal collectors using impinging air jets: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3179-3190. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.025>

Chauhan, R. & Thakur, N. S. (2012). Heat transfer and friction characteristics of impinging jet solar air heater. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 4(4), 043121. <https://doi.org/10.1063/1.4747821>

Çalışır, T., Çalışkan, S., Kılıç, M. & Başkaya, Ş. (2017). Çarpan akışkan jetleri kullanarak kanatçıklı yüzeyler üzerindeki akış alanının sayısal olarak incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 32(1).

Çulun, P., Çelik, N. & Kapan, S., (2017). Çoklu çarpan jet uygulamalarında giriş türbülans yoğunluğunun etkisinin araştırılması. *International Conference on Multidisciplinary*,

Science, Engineering and Technology, (IMESET'17 Bitlis), Oct 27-29, Bitlis.

Dagtekin, I. & Oztop, H. F. (2008). Heat transfer due to double laminar slot jets impingement onto an isothermal wall within one side closed long duct. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35(1), 65-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.05.013>

De Lemos, M. J. & Fischer, C. (2008). Thermal analysis of an impinging jet on a plate with and without a porous layer. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 54(11), 1022-1041. <https://doi.org/10.1080/10407780802473590>

Husain, A., Kim, S. M. & Kim, K. Y. (2013). Performance analysis and design optimization of micro-jet impingement heat sink. *Heat and Mass Transfer*, 49(11), 1613-1624. <https://doi.org/10.1007/s00231-013-1202-3>

Hüseyin, K. 2021. İkili çarpan jet ile soğutulan sıcak plakanın yüzey şeklinin ısı transferine etkisinin sayısal analizi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(1), 152-163. <https://doi.org/10.29130/dubited.754908>

Kabakuş, A., Yakut, K., Özakın, A. N., & Yakut, R. (2021). Experimental determination of cooling performance on heat sinks with cone-jet electrospray mode. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(3), 665-670. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.11.004>

Karabulut, K., Alnak, D. E. & Koca, F. (2019). 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.

Karabulut, K., Alnak, D. E. & Koca, F. (2018). Analysis of cooling of the heated circle patterned surfaces by using an air jet impingement. *ICENS 4th International Conference on Engineering and Natural Science*.

Karabulut, K. (2019). Heat transfer improvement study of electronic component surfaces using air jet impingement. *Journal of Computational Electronics*, 18(4), 1259-1271.

Karabulut, K. & Alnak, D. E. (2020). Değişik şekilde tasarlanan ısıtılmış yüzeylerin hava jeti çarpmalı soğutulmasının araştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 88-98.

Karabulut, K. & Alnak, D. E. (2021). Dikdörtgen bir kanaldaki farklı desenli yüzey geometrilerinin ısı transferine olan etkilerinin incelenmesi. *Tesisat Mühendisliği*, 183, 37-49.

- Karagoz, S., Afshari, F., Yildirim, O. & Comakli, O. (2017). Experimental and numerical investigation of the cylindrical blade tube inserts effect on the heat transfer enhancement in the horizontal pipe exchangers. *Heat and Mass Transfer*, 53(9), 2769-2784. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2021-8>
- Kılıç, M. & Başkaya, Ş. (2017). Farklı geometride akış yönlendiriciler ve çarpan jet kullanarak yüksek ısı akılı bir yüzeyden olan ısı transferinin iyileştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 693-707. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.337616>
- Kılıç, M. & Özcan, O. (2019). Farklı parametreler için nanoakışkanlar ve çarpan jetlerin müşterek etkisinin sayısal incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(3), 1501-1516.
- Rim, B. K., Saïd, N. M., Bournot, H. & Le Palec, G. (2017). Effect of nozzle-to-plate spacing on the development of a plane jet impinging on a heated plate. *Heat and Mass Transfer*, 53(4), 1305-1314. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1904-4>
- Spizzichino, M., Sinibaldi, G. & Romano, G. P. (2020). Experimental investigation on fluid mechanics of micro-channel heat transfer devices. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 118, 110141. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110141>
- Yakut, R. & Yakut, K. (2020). Hava jetinin altıgen kanatlı ısı alıcıya çaptırılmasıyla elde edilen basınç katsayılarının deneysel ve nümerik olarak belirlenmesi. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 56-64.
- Yakut, K., Kabakuş, A., Yeşildal, F. & Karabey, A. (2015). Kanal akışında optimize edilmiş ısı alıcıların çarpan jetle ısı transferi ve akış karakteristikleri analizi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 31(1), 43-55.
- Yakut, R., Yakut, K., Yeşildal, F. & Karabey, A. (2016). Experimental and numerical investigations of impingement air jet for a heat sink. *Procedia Engineering*, 157, 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.33>
- Yesildal, F. & Yakut, K. (2017). Optimization of the spray cooling parameters for a heat sink by the Taguchi method. *Atomization and Sprays*, 27(12). <https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.2018019951>