

Üçlü Jet Akışlı Kanallardaki Değişik Yüzeyle Modellerin Soğuma Performanslarının Araştırılması

Koray KARABULUT

Doç. Dr.
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu
Elektrik ve Enerji
Sivas
kkarabulut@cumhuriyet.edu.tr
orcid: 0000-0001-5680-0988

Yeliz ALNAK

Arş. Gör. Dr.
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
Teknoloji Fakültesi
İmalat Mühendisliği
Sivas
yatas@cumhuriyet.edu.tr
orcid: 0000-0003-4383-3806

ÖZ

Teknolojideki hızlı gelişime paralel olarak üretilen küçük boyutlarda ve yüksek kapasiteli elektronik ürünlerdeki güvenli sıcaklık sınırları aşılabilmektedir. Çarpan jet tekniği, elektronik sistemlerde fazla ısı üreten cihazların soğutulmasında kullanılan yüksek ısı transferi performanslı gelişmiş bir soğutma teknolojisidir. Bu çalışmada, 0.75Dh jet giriş genişlikli kanallardaki kare tünel ve daire tünel modeli bakır plakalı yüzeylerin üç adet hava jeti akışı ile soğutulması sayısal olarak araştırılmıştır. Sayısal incelemeler, zamandan bağımsız ve üç boyutlu olarak enerji ve Navier-Stokes denklemlerinin $k-\epsilon$ türbülans modeli Ansys-Fluent bilgisayar programı kullanılarak çözümlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Kanalların üst ve alt yüzeyleri adyabatik olup, model yüzeylerine sabit ısı akısı uygulanmıştır. Çalışma için belirlenen Re sayısı aralığı 4000-10000 iken jet-plaka arası uzaklık (H/Dh) 3, 6 ve 10'dur. Çalışmanın sonuçları literatürde bulunan çalışmanın sayısal ve deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve birbirleriyle uyumlu oldukları belirlenmiştir. Sonuçlar, her bir model yüzeyi için ortalama Nu sayısı ve yüzey sıcaklığının değişimi olarak sunulmuştur. Ayrıca, kanaldaki tüm model yüzeyleri için ortalama Nu sayısı (Nu_0) ve jet akışların kanaldan çıkış sıcaklıkları (T_0) incelenmiştir. Farklı Re sayıları ve H/Dh oranlarında kanal boyunca jet akışın hız-akım ve sıcaklık konturu dağılımları model yüzeyleri için değerlendirilmiştir. $H/Dh=3$ ve $Re=10000$ için daire tünel modeli yüzeyin Nu_0 değerinin kare tünel modeli yüzeyden %45,31 daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

Üçlü Çarpan Hava Jeti, Desenli Yüzey, Sayısal Isı Transferi, Soğutma.

Investigation of Cooling Performance of Models with Different Surfaces in Triple Jet Flow Channels

ABSTRACT

Safe temperature limits can be exceeded in small sizes and high-capacity electronic products produced in parallel with the rapid development in technology. The impinging jet technique is an advanced cooling technology with high heat transfer performance used in the cooling of devices that produce excess heat in electronic systems. In this study, the cooling of the square tunnel and circular tunnel model copper plate surfaces in ducts with jet inlet width of 0.75Dh by three air jet flows was numerically investigated. Numerical examinations were carried out by solving the energy and Navier-Stokes equations in three-dimensional, steady, using the Ansys-Fluent computer program with the $k-\epsilon$ turbulence model. The upper and lower surfaces of the channels are adiabatic; a constant heat flux has been applied to the model surfaces. While the Re number range determined for the study is 4000-10000, the distance between the jet and the plate (H/Dh) is 3, 6 and 10. The results of the study were compared with the numerical and experimental results of the study in the literature and it was determined that they were compatible with each other. The results were presented as the mean Nu number and variation of surface temperature for each model surface. In addition, the mean Nu number (Nu_0) and exit temperatures (T_0) of the jet flows from the channel were investigated for all model surfaces in the channel. The velocity-flow and temperature contour distributions of the jet flow along the channel at different Re numbers and H/Dh ratios were evaluated for the model surfaces. For $H/Dh=3$ and $Re=10000$, the Nu_0 value of the circular tunnel model surface was determined to be 45.31% higher than the square tunnel model surface.

Keywords

Triple Impinging Air Jet, Patterned Surface, Numerical Heat Transfer, Cooling.

Geliş Tarihi : 09.02.2023
Kabul Tarihi : 15.02.2023

Karabulut, K., Alnak, Y., Üçlü Jet Akışlı Kanallardaki Değişik Yüzeyle Modellerin Soğuma Performanslarının Araştırılması, Tesisat Mühendisliği Dergisi, sayı: 194, sf. 15-27, Ocak-Şubat 2023.

1. GİRİŞ

Sürdürülebilir bir dünya için çevreye duyarlı teknolojilerin geliştirilmesi gereklidir. Nüfus artışına bağlı olarak enerji kullanımının giderek daha fazla arttığı günümüzde bu durumun ilk etkilerini küresel iklim değişikliği olarak yaşamaktayız. Bunun için mühendislik sistemlerinde sürdürülebilir enerji üretim yöntemleri ve enerjiyi verimli, tasarruflu ve çevre üzerinde daha az etkisi olacak şekilde kullanacak ürünlerin geliştirilmesinin önemi daha iyi anlaşılmaktadır. Bu konuda karşılaşılan problemlerin başında cihazların fazla ısınması gelmekte olup; bunun sonucunda güvenilir sıcaklık sınırları aşılabilmektedir. Bu sorunun giderilmesi, hem cihazdan yüksek performans almamız hem de cihazın uzun ömürlü olarak kullanılması açısından önemlidir. Çarpan jet tekniği, elektronik sistemlerde fazla ısı üreten cihazların soğutulmasında kullanılan yüksek ısı transferi performanslı gelişmiş bir soğutma teknolojisidir [1]. Çarpan jet, metallerin tavlama, gaz türbini kanatlarının soğutulması, öğütme işlemlerinde soğutma [2] ve fotovoltaik hücrelerin soğutulması gibi çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır [3]. Jet soğutma, günümüzde aynı zamanda yüksek güçlü elektronik ve fotonik ısı sistemler için uygulanabilir bir yöntem haline gelmiştir. Isı üretim oranı yüksek olan elektronik elemanlar, sürekli olarak teknolojik değişime uğradığı, boyutsal olarak küçüldüğü ve geliştiği için tek başına hava soğutması kullanılmasının gerekli ve yeterli performansı sağlayamayacağı belirlenmiştir. Çarpan jet ile soğutma sayesinde yüksek ısı akısına sahip bu cihazlardan büyük miktarlarda ısının uzaklaştırılması mümkün hale gelmektedir [4]-[5]. Çarpan jet akışıyla ilgili yapılan önceki çalışmalardan birinde, Carlogno ve Ianiro [6] Re sayısının ve jet-plaka arası uzaklığının, ısı transferi ve çarpan jetin akış yapısı üzerindeki etkisinin detaylı bir incelemesini gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla, hem ısı hem de parçacık görüntülemeli hız ölçüm tekniğini (particle image velocimetry: PIV) kullanmışlardır. Ayrıca, PIV sonuçlarının ileri hesaplama yöntemleriyle de karşılaştırmasını yapmışlardır. Argus ve ark. [7] tek bir hava jeti akışını kullanarak kanaldaki ısıtılmış blok dizilerinin soğutulmasında laminer jet akışı ve ısı transferi özelliklerini sayısal olarak araştırmışlardır. Sayısal hesaplamalarda değişken parametreler olarak, farklı jet Re sayısı, kanal yüksekliği, jet delik genişliği, çarpılan plakalar arası

uzaklık, plaka yüksekliği ve plaka ısı iletkenlik katsayısını kullanmışlardır. Genel olarak, blokların etkili bir şekilde soğutulmasının kanal yüksekliğinin azalmasına ve Re sayısının artışına bağlı olduğunu bulmuşlardır. Popovac ve Hanjalic [8] tek bir çarpan jet akışı ile ısıtılmış kübik plakanın soğutulmasını araştırmışlardır. Çalışmada ayrıca, merkezi noktası küp civarında biçimlenen akış yapılarını incelemişler ve küpün soğutulması ile akış yapıları arasında yakın bir ilişki olduğunu bulmuşlardır. Yang ve Hwang [9] yarı silindirik bir dış büküme yüzey üzerine çarpan türbülanslı bir jetin akış karakteristiklerini sayısal olarak incelemişlerdir. Re sayısı arttığında dış büküme yüzey üzerindeki hız değişiminin ve türbülans kinetik enerjinin arttığını belirlemişlerdir. Karabulut ve Alnak [10] sur ve dikdörtgen şeklinde olmak üzere iki farklı desene sahip sabit ısı akılı bakır plakalı yüzeylerin tek bir hava jeti akışı ile soğutulmasının sayısal araştırmasını yapmışlardır. Değişken parametreler olarak jet-plaka arası uzaklığı ve Re sayısını kullanmışlardır. Çalışmalarında, $Re=4000$ ve jet-plaka arası uzaklık değeri 4 için sur desenli yüzeylere göre dikdörtgen desenli yüzeylerde %31,45 daha yüksek ortalama Nu sayısı değeri elde etmişlerdir. Bir diğer çalışmada, Karabulut [11] bir tarafı açık üç tarafı kapalı dikdörtgen kanallar içerisinde ısıtılmış beşer adet ters ve düz daire şeklindeki desenli yüzeylerin hava jeti ile soğutulmasını sayısal olarak incelemiştir. Desenli yüzeylerin soğutma performansları üzerinde desen şeklinin ve jet-plaka arası mesafenin Re sayısına göre daha büyük bir öneme sahip olduğunu belirlemiştir. Mushatat [12] çarpan jetlerin ısı transferi ve türbülanslı akış özelliklerini sayısal olarak değerlendirmiş ve jetler arası mesafe ve jet Re sayısının yeniden dolaşım bölgelerini, yerel Nu sayısı ve türbülans kinetik enerjiyi önemli ölçüde etkilediğini belirlemiştir. Karabulut ve Alnak [13] dikdörtgen kesitli kanallardaki çatı ve ters yamuk şeklinde iki farklı desene sahip bakır plakalı yüzeylerin farklı jet giriş genişliklerinde tek bir hava jeti akışı ile soğutulmasını sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışma, Re sayısının 5000-11000 değerlerinde ve jet-plaka arası uzaklığın (H/D_h) 3 ve 6 oranlarında yapılmıştır. Jet giriş genişlikleri ise $0,5D_h$ ve D_h 'dir. $0,5D_h$ jet giriş genişliğinde, $H/D_h=6$ iken $Re=5000$ için ortalama Nu sayısı değerinin çatı desenli yüzeyde ters yamuk desenli yüzeyden %25,92 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Zou ve ark. [14] deneylerinde ve sayısal simülasyonlarında hava soğutma sürecinde ara yüzey ısı

transferini ve gaz akışını araştırmak için yüksek hızlı sıkıştırılmış hava çarpmasını kullanmışlardır. Numune çapının ve jet mesafesinin (jetten soğutma yüzeyine olan mesafe) akış modeli ve sıcaklık alanları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Barbosa ve ark. [15] sınırlandırılmış ve çevrelendirilmiş çoklu hava jeti çarpmasının ayrıntılı bir analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla, çoklu hava jeti çarpma sistemlerindeki jetin akış dinamikleri ve ısı transfer karakteristiklerinin bir incelemesi sunulmuşlardır. Ayrıca, bu çalışmada taşınım ısı transfer sürecini etkileyen yüzey tasarımı ve hareketi, jet eğimi ve yüksek jet sıcaklığı gibi parametreler incelenmiştir. Sonuç olarak, tekli ve çoklu jet çarpmasının ısı transferini karakterize etmek için ortalama Nu sayısı ile ilgili bağıntılar özetlenmiştir. Belarbi ve ark. [16] ise kişisel bilgisayar işlemcisinin soğutma performansını iyileştirmek amacıyla hava jeti çarpmalı kesiti dikdörtgen olan mini kanallı soğutucu bloğun ısı ve aerodinamik performanslarının deneysel araştırmasını yapmışlardır. Değişken parametreler olarak, hız profili, ısı direnç ve sıcaklık üzerinde jet çarpma mesafesinin etkisini çalışmışlardır. Ayrıca, ısı performans üzerinde mikroişlemcinin (ısı kaynağının) konumunun etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, “jet yüksekliği/çap” oranı olan $Y/D = 0,606$ 'nın en iyi soğutma performansını sergilediğini ve ısı kaynağının (merkezi işlemci ünitesi) orijinal konumundan uzunlaşmasına 10 mm uzağa yer değiştirmesinin soğutma performansını artırdığını göstermiştir. Leena ve ark. [17] sabit bir düz bakır plaka üzerine çoklu hava jeti çarpmasının ısı transferi karakteristiklerini çalışmak amacıyla deneysel ve sayısal araştırmalar yapmışlardır. Sayısal çalışma için sonlu hacim esaslı bir yazılım programı olan Ansys-Fluent yazılımı kullanırken, deneysel araştırma için bir sistem tasarlamışlardır. Simüle edilmiş bir çipin ısı transfer yüzeyi olarak tabandan ısıtılan bir bakır plaka kullanılmış olup, jetler hat içi bir düzende düzenlenmiş üç keskin kenarlı dairesel delik tarafından üretilmiştir. Isı transferi karakteristikleri üzerinde Re sayısının (4000-8000) ve jetler arası uzaklığın etkisi sayısal olarak incelenmiştir. En iyi soğutma performansını, Re sayısının 5000 olduğu durum için elde etmişlerdir. Aynı zamanda, sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçları deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla doğrulamışlardır. Bununla birlikte, soğutma ortamı olarak hava için geçerli olan Re sayısına bağlı Nu sayısı için bir bağıntı önermişlerdir.

Sunulan çalışmada, $a = 0,75D_h$ jet giriş genişlikli kanallar içerisindeki kare tünel ve daire tünel modeli bakır plakalı yüzeylerin üç adet hava jeti akışı ile soğutulmasının sayısal incelemesi yapılmıştır. Sayısal araştırma, zamandan bağımsız ve üç boyutlu olarak enerji ve Navier-Stokes denklemlerinin k-e türbülans modeli Ansys-Fluent bilgisayar programının kullanılarak çözülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, literatürde var olan çalışmalar da dikkate alınarak 50×200 mm boyutlarında ve kanal yükseklik etkisini de incelemek için farklı yüksekliklere sahip dikdörtgen şeklindeki kanallar kullanılırken, çarpan jet akışkanı olarak ise kanala giriş sıcaklığı 300 K olan hava kullanılmıştır. $0,75D_h$ jet giriş uzunluğunda jet-model plakalar arası uzaklıklar (H/D_h), modellerin geometrik şekilleri ve jet akışkanı olan havanın kanala giriş hızları (Re sayısı) değişken parametreler olarak dikkate alınmıştır. Tüm incelemelerde, desenli yüzeylere sabit 1000 W/m^2 'lik bir ısı akışı uygulanmıştır. İncelenen jet Re sayısı aralığı 4000-10000 iken jet-plaka arası uzaklığı ise 3, 6 ve $10D_h$ 'dir. Sunulan çalışmanın sayısal sonuçları, literatürde bulunan çalışmanın deneysel ve sayısal sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde oldukları görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, kare ve daire tünel olmak üzere her bir model yüzeyi için ortalama Nu sayısı ve yüzey sıcaklık değişimleri olarak sunulmuş ve birbirleriyle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Farklı H/D_h oranları için kanal boyunca jet akışın sıcaklık ve hız-akım çizgisi konturu dağılımları model yüzeyleri için incelenmiştir.

2. SAYISAL YÖNTEM

Çalışmada, üç boyutlu, zamandan bağımsız olarak farklı model yüzeyleri üzerindeki üçlü jet akışın zorlanmış taşınım ısı transferinin sayısal olarak çözümü için Ansys-Fluent programından yararlanılmıştır.

Süreklilik ve momentum denklemleri için hesaplanmanın durdurulacağı yakınsaklık ölçeği 10^{-6} iken, bu değer enerji denklemi için 10^{-7} 'dir. Simülasyonlarda düzgün dörtyüzlü ağ yapısı kullanılmıştır.

Isı transferi simülasyonlarında türbülansın doğru modellenmesi esastır. Türbülanslı akışların doğrudan sayısal simülasyonu çok zordur ve zaman alıcıdır. Sayısal modellemelerde kullanılan çeşitli türbülans modelleri bulunmaktadır. Bununla birlikte, türbülans modelleri arasında ekonomikliği ve pek

çok akış olayında kabul edilebilir doğrulukla sonuç vermesi açısından yarı ampirik bir model olan k-ε türbülans modeli yaygın olarak kullanılmaktadır. Çarpan jetlerle ilgili olarak yapılan çalışmaların birinde, Wang ve Mujumdar [18] türbülanslı jetler için düşük Re sayılı birkaç k-ε türbülans modelini test etmişlerdir. Modellerin, Nu sayısı dağılımının genel şeklini belirleyebildiğini ve büyük jet-plaka arası uzaklıklar için durma noktasında modellerin daha iyi uygulandığını saptamışlardır. Çalışmalarında, standart yüksek Re sayılı modellerle kıyaslandığında, k-ε türbülans modelinin çarpan jetlerin ısı transferi özelliklerini belirlemede iyi bir performans sergilediğini belirlemişlerdir. Ayrıca, çalışmada diğer türbülans modelleriyle karşılaştırıldığında kinetik enerji üretimini azaltmaya ve durma bölgesinde olması gereken sonuca yaklaşıldığından k-ε türbülans modelinin uygun olduğunu belirlemişlerdir. Buna göre, literatürdeki çalışmalardan elde edilen sonuçlar da göz önüne alınarak bu çalışmada sayısal hesaplamalarda desenli yüzeyler için standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

Model yüzeylerinin olduğu kanal boyunca akış ve ısı transferinin çözümüne aşağıda açıklandığı gibi gövde kuvvetinin olmadığı kararlı durum koşullarında türbülanslı akış için zaman ortalamalı kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemlerinden türetilen kısmi türevli diferansiyel denklemlerin çözümü ile ulaşılmıştır [18].

Süreklilik denklemi

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

Momentum denklemi

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

Enerji denklemi

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

Türbülans kinetik enerji denklemi

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

Türbülans kinetik enerji yutulma terimi

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

Bu denklemlerde 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 aşağıda verilmiştir [19]

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

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

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ 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 $\varepsilon = 1,3$ olarak alınmıştır [19]. Bu sabitlerin değerleri, birçok türbülanslı akış için çok sayıda veri uyumuyla sağlanmıştır.

Reynolds sayısı (Re) aşağıda verilen denklem ile hesaplanmaktadır

$$Re_k = \frac{V_\infty D_h}{\nu} \quad (8)$$

Burada D_h , jet girişinin hidrolik çapıdır.

$$D_h = \frac{4A_c}{P} = \frac{4(aW)}{2(a+W)} \quad (9)$$

Bu denklemde A_c ve P sırasıyla jet girişinin kesit alanı ve çevre uzunluklarıdır. Nusselt sayısı (Nu), taşınım ile ısı geçişinin iletimle ısı geçişine oranı olarak değerlendirilir.

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_s = h(T_\infty - T_s) \text{ ve } Nu = \frac{h D_h}{k} \quad (10)$$

Burada, h yüzey üzerindeki yerel ısı taşınım katsayısı, n yüzeye dik yöndür ve ortalama ısı taşınım katsayısı h_o , ve ortalama Nu sayısı (Nu_o) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

Ortalama ısı taşınım katsayısı

$$h_o = \frac{1}{L} \int_0^L h dx \quad (11)$$

Ortalama Nu sayısı

$$Nu_o = \frac{h_m D_h}{k} \quad (12)$$

Eşitlik (11) ve (12)'de h ve h_o sırasıyla yerel ve ortalama ısı taşınım katsayılarıdır.

3. GEOMETRİK MODEL

Şekil 1'de çalışmada kullanılan model yüzeylerinin bulunduğu kanalların sınır şartları ve boyutlarının da olduğu perspektif görünüşleri gösterilmektedir. Şekil 1 (a)'da verilen kare tünel modelde kare şekli; Şekil 1 (b)'deki daire tünel modelde ise daire şekli kanal sonuna kadar 50 mm'lik kanal genişliği boyunca devam etmektedir. Ayrıca, üçlü jet girişi Şekil 1'deki her iki kanal için gösterilmiştir. Çalışmada sabit $0.75D_h$ giriş genişliği kullanılmış olup, hidrolik çap D_h değeri 9.9 mm'dir. Kanalın boyu (L) ve genişliği (W) ise sırasıyla 300 mm ve 50 mm'dir. Jet püskürtücülerden çıkan akışkanın giriş hız aralığı 4,42-9,72 m/s iken jet girişinde uniform hız profili bulunan dikdörtgen püskürtücünün boyutları $4,95 \times 50$ mm ve $9,9 \times 50$ mm ölçülerindedir. Kanal yükseklikleri ise $3D_h$, $6D_h$ ve $10D_h$ 'dir. Kanal boyutlarına bağlı olarak iki farklı kanal içerisinde yedi adet kare ve yedi adet daire tünel modelli ardışık yüzey bulunmaktadır. Bununla birlikte, modellerin genişlik ve yükseklikleri $2D_h$ ve D_h 'dir.

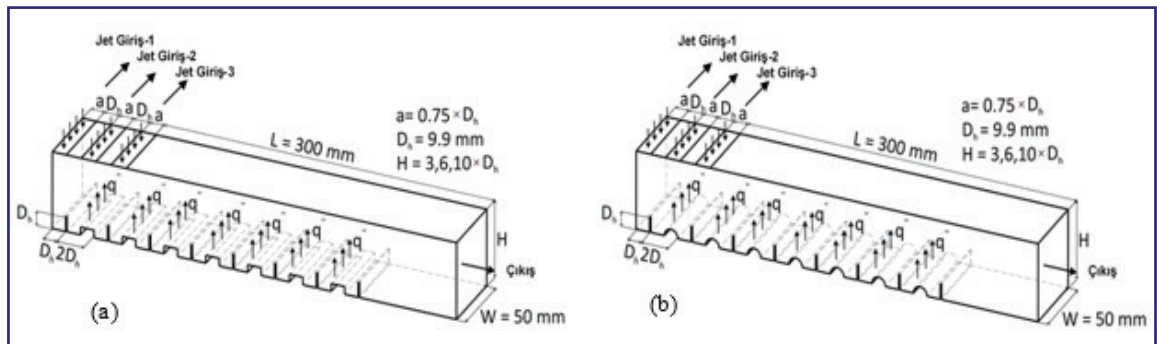
Bu çalışma şu kabuller altında gerçekleştirilmiştir:

- Kanallar için akış alanı üç boyutlu, zamandan bağımsız ve türbülanslıdır.
- Model yüzeylerinin soğutulması için kullanılan jet akışkanı sıkıştırılmaz özellikli havadır.
- Model yüzeylerine uygulanan sabit ısı akısı 1000 W/m^2 'dir.

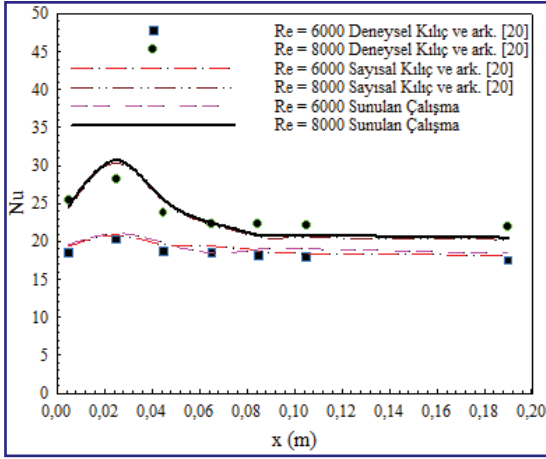
- Jet akışkanının ısı özellikleri sabittir ve kinematik viskozitesi $\nu = 15.89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, yoğunluğu $\rho = 1,1614 \text{ kg/m}^3$, özgül ısı $c_p = 1,007 \text{ kJ/kg K}$, ısı iletim katsayısı $k = 26,3 \times 10^{-3} \text{ W/m K}$ olarak alınmıştır.
- Jet akışkanı ve model yüzeylerinde ısı üretimi yoktur.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve BULGULAR

Kılıç ve ark. [20]'nin deneysel ve sayısal olarak yaptıkları çalışmalarının Nu sayısı sonuçları $H/D_h = 6$ ve $Re = 6000$ ve 8000 değerleri için bu çalışmanın sayısal sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçları Şekil 2'de gösterilmiştir. Karşılaştırma amacıyla Kılıç ve ark. [20]'nin çalışmalarında kullandıkları 200×50 mm boyutlu düz bir bakır plaka yüzeyi kullanılmıştır. $Re = 6000$ için jet çarpma bölgesindeki Nu sayısı değeri incelendiğinde Kılıç ve ark. [20]'nin deneysel sonucu ile bu çalışmanın sayısal sonucu arasındaki sapma %3,99 iken her iki çalışmanın sayısal sonuçları arasındaki sapma değerinin %1 olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, Re sayısının 8000 olduğu değer için çarpma bölgesinde türbülans yoğunluğunun artmasına bağlı olarak Kılıç ve ark. [20]'nin deneysel sonuçları ile bu çalışmanın sayısal sonuçları arasındaki sapma miktarı artarak %9,15 olmaktadır. Aynı bölgede, sayısal sonuçlar arasındaki sapma değeri ise %1,02'dir. Elde edilen bu sonuçlara göre, bu çalışmanın sayısal sonuçlarının Kılıç ve ark. [20]'nin deneysel ve sayısal sonuçlarıyla karşılaştırılabilir ve sayısal çalışmanın makul ve uygun olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 1. Sınır şartları ve boyutları verilen kanalların ve modellerin perspektif görünüşleri (a) kare tünel (b) daire tünel



Şekil 2. Sonuçların karşılaştırılması

$H/D_h = 4$ için model yüzeylerinin ortalama Nu sayıları üzerinde ağ sayısının etkisini belirlemek amacıyla kare ve daire tünel modellenli yüzeyler için yapılan ağ bağımsızlık testleri sırasıyla Tablo 1 ve 2’de sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre kare ve

daire tünel modellenli yüzeylerin bulunduğu kanal kesitleri için sırasıyla 2213537 ve 2160782 adet ağ elemanın yeterli olduğu belirlenmiştir.

Çatı ve ters yamuk desenli yüzeylere sahip kanalların ağ yapıları, desenlerin ağ şekillerini de kolaylıkla görebilmek için Şekil 3 (a) ve (b)’de yaklaşırtılarak gösterilmiştir.

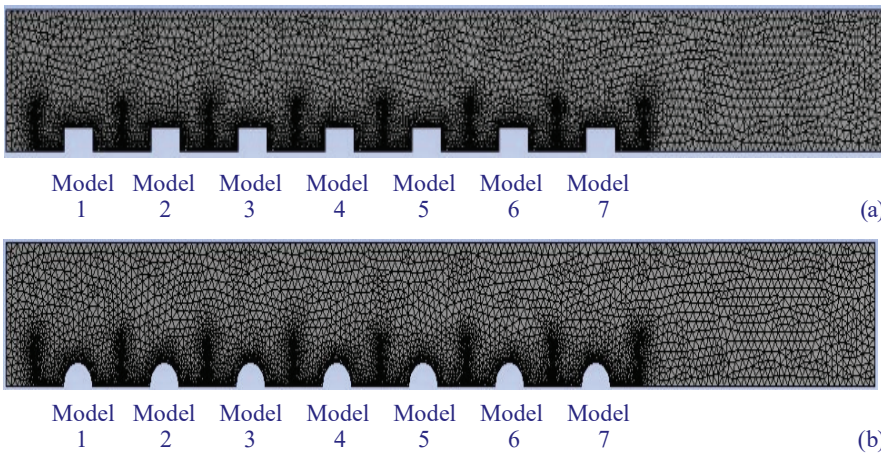
Şekil 4’de A-Kare tünel ve B-Daire tünel model yüzeylere sahip $H/D_h=3, 6$ ve 10 yükseklikli üçlü hava jeti akışlı ve $a=0.75D_h$ jet girişli kanallardaki model sıralarına göre ortalama Nu sayılarının Re sayısı ile değişimleri gösterilmektedir. Kanalların her birinde eşit ölçülerde yedişer adet desenli model yüzeyi bulunmaktadır. Üçlü jet hava akışının etki ettiği kanallarda kanal yükseklikleri (H/D_h), Re sayıları ve model yüzeylerinin şekillerine bağlı olarak jet akışları model yüzeyleri üzerinde farklı biçimlerde etki etmektedir. Buna bağlı olarak, $H/D_h=3$ ve 6 yükseklikli kanallarda en yüksek Nu sayısı değerlerine beşinci sıradaki model yüzeylerinde (Model 5) ulaşılmaktadır.

Tablo 1. Kare Tünel Modelli Kanalda Nu_o için Ağ Bağımsızlık Testinin Sonuçları

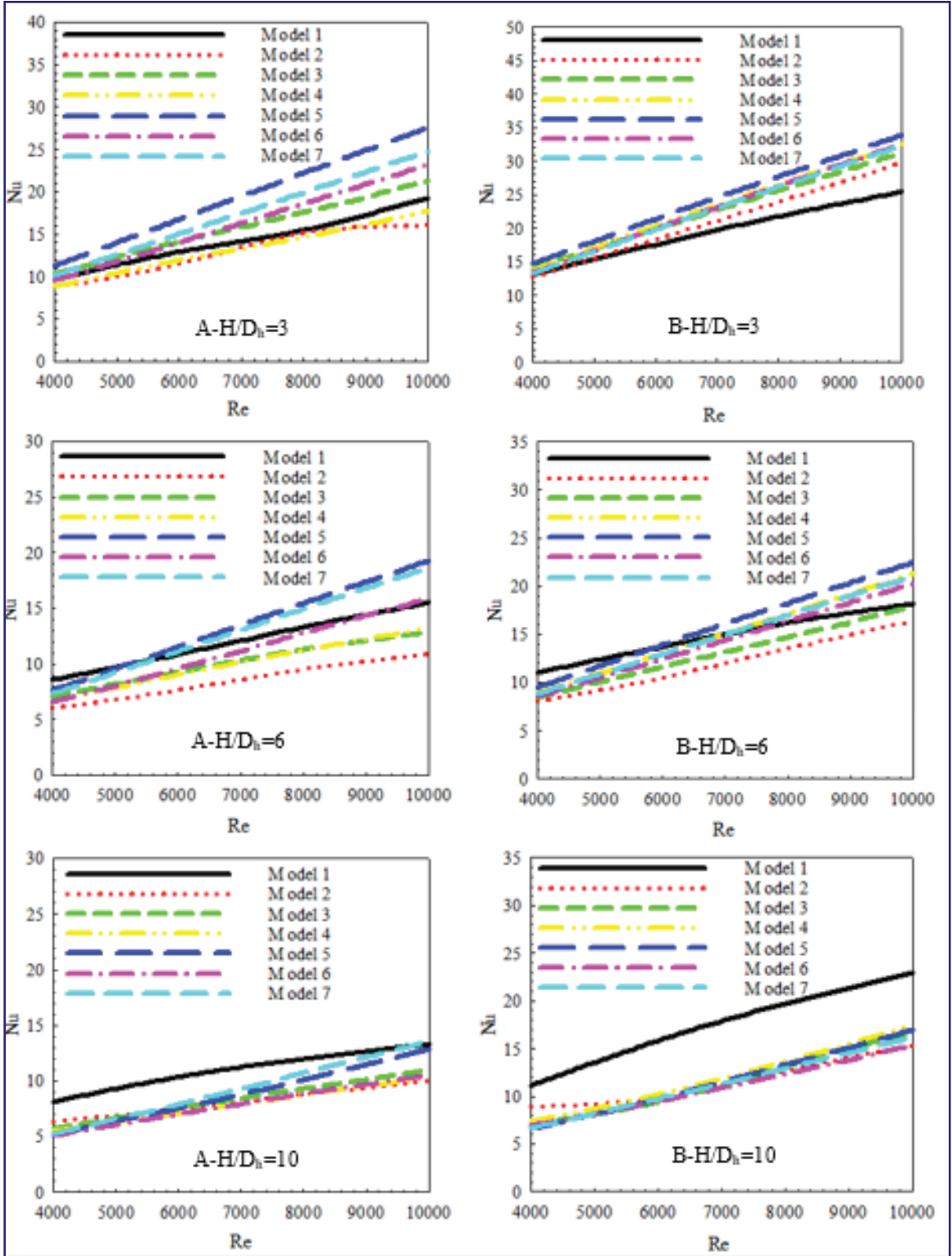
| Ağ sayısı | Nu_o Re=4000 | Nu_o Re=6000 | Nu_o Re=8000 | Nu_o Re=10000 |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 845741 | 8,41 | 12,47 | 13,54 | 17,47 |
| 2213537 | 9,62 | 13,25 | 16,81 | 20,5 |
| 2547104 | 9,61 | 13,25 | 16,81 | 20,48 |

Tablo 2. Daire Tünel Modelli Kanalda Nu_o için Ağ Bağımsızlık Testinin Sonuçları

| Ağ sayısı | Nu_o Re=4000 | Nu_o Re=6000 | Nu_o Re=8000 | Nu_o Re=10000 |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 895472 | 11,24 | 16,74 | 21,47 | 26,64 |
| 2160782 | 12,45 | 17,68 | 22,78 | 27,75 |
| 2475471 | 12,44 | 17,68 | 22,78 | 27,74 |



Şekil 3. Hesaplama kullanılan (a) kare tünel (b) daire tünel modellenli yüzeylere sahip kanalların ağ yapıları



Şekil 4. $a=0.75D_h$ giriş genişlikli ve üçlü hava jeti akışlı kanallardaki A-kare tünel B-daire tünel model yüzeylerinin kanaldaki diziliş sıralarına göre ortalama Nu sayılarının Re sayısına göre değişimleri

Ayrıca, daire tünel modellenli yüzeyler için kare tünel modellenli yüzeylere göre elde edilen Nu sayısı değerleri daha yüksektir. $H/D_h=3$ yükseklikli kanallarda $Re=8000$ için daire tünel Model 5 yüzeyinin Nu sayısının, aynı sıradaki kare tünel model yüzeyinden %24,95 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. $H/D_h=3$ yükseklikli kanallarda en düşük Nu sayılarına kare ve daire tünel modellenli yüzeyler için sırasıyla Model 2 ve Model 1'de ulaşılmaktadır. Bununla birlikte, kanal yüksekliğinin artışıyla üçlü jet etkisinin model yüzeyleri üzerinde azalması nedeniyle her iki model şekli için de Nu sayısı değerleri azalış sergilemektedir. $Re=10000$ için H/D_h 'ın 3'den 10'a çıkarılmasıyla daire tünel Model 1 için Nu sayısı %18,29 azalmaktadır. Bu azalış miktarı, kare tünel Model 1 yüzeyi için %18,52 olmaktadır. Bunun yanı sıra, kanallardaki jet akışların yüzeyler üzerindeki etkisine bağlı olarak $H/D_h=6$ 'da en düşük Nu sayıları Model 2 yüzeyinde elde edilmektedir.

Her bir jet akış için $a=0,75D_h$ jet giriş genişliğine sahip üçlü jet akışlı kanallardaki A-Kare tünel ve B-Daire tünel modellenli yüzeyler için model sıralarına göre yüzeylerin ortalama sıcaklık değişimleri farklı kanal yüksekliklerinde ($H/D_h=3, 6$ ve 10) ve Re sayılarında Şekil 5'de verilmektedir. Kanaldaki jet akışların Re sayılarının artışıyla model yüzeylerinden olan ısı transferinin artışına bağlı olarak yüzeylerin sıcaklıkları azalmaktadır. $H/D_h=3$ ve 6 için en düşük model yüzey sıcaklık değerlerine Model 5 sırası için ulaşılmaktadır. $H/D_h=10$ 'da ise her iki model yüzey şekli için Model 1' de diğer model sıralarına göre daha düşük yüzey sıcaklık değerleri elde edilmektedir. Bununla birlikte, tüm kanal yükseklikleri (H/D_h) için daire tünel model

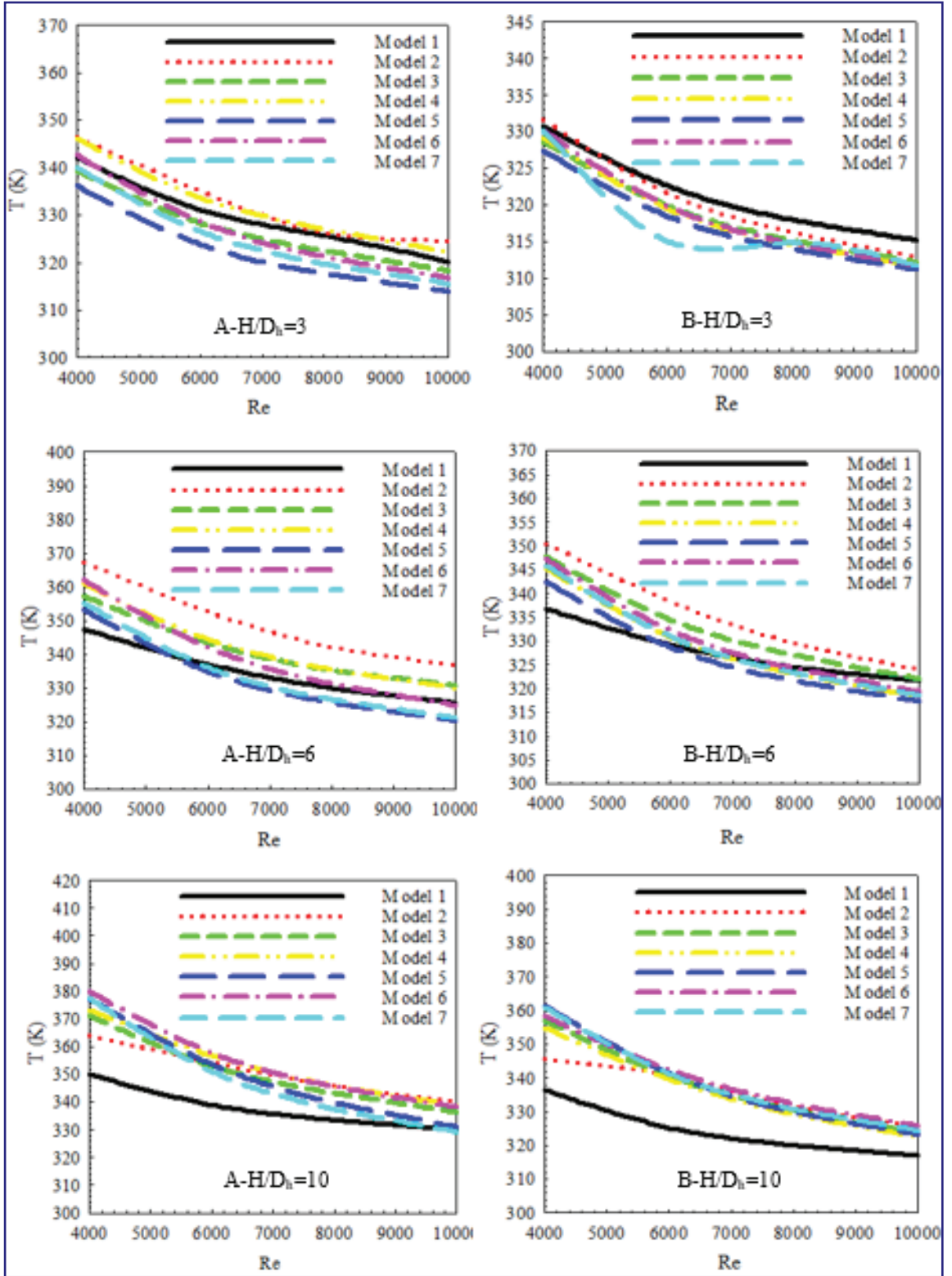
yüzeylerinde kare tünel model yüzeylerine göre daha düşük yüzey sıcaklıklarına ulaşılmaktadır. Bu durum, daire tünel model yüzeyli $a=0,75D_h$ jet giriş genişlikli üçlü jet akışlı kanallarda yüzeylerin soğuma performansının daha iyi olduğunu kanıtlamaktadır.

Tablo 3'de $a=0,75D_h$ jet giriş genişlikli ve üçlü jet akışlı kanallardaki tüm model yüzeyleri için ortalama Nu sayısı (Nu_o) ve jet akışların kanaldan çıkış sıcaklık (T_c) değerleri farklı kanal yükseklik oranları (H/D_h) ve Re sayıları için sunulmaktadır. Her iki model yüzeyli kanalda tüm H/D_h oranları için Re sayısının artışıyla Nu_o değerleri artmaktadır. Ayrıca, artan ısı transferine bağlı olarak kanallardan çıkan jet akışkanların sıcaklıkları da artmaktadır. Bunun yanı sıra, daire tünel model yüzeylerin Nu_o sayıları, kare tünel modellerden daha fazladır. $H/D_h=3$ ve $Re=10000$ için daire tünel modellenli yüzeyin Nu_o değeri, kare tünel modellenli yüzeyden %45,31 daha yüksektir. Bununla birlikte, H/D_h oranının artırılmasıyla üçlü jet akış etkisinin model yüzeyleri üzerindeki ısı transferini artırıcı etkisinin azalması nedeniyle Nu_o değerleri azalırken; jet akışkanının T_c değerleri azalmaktadır.

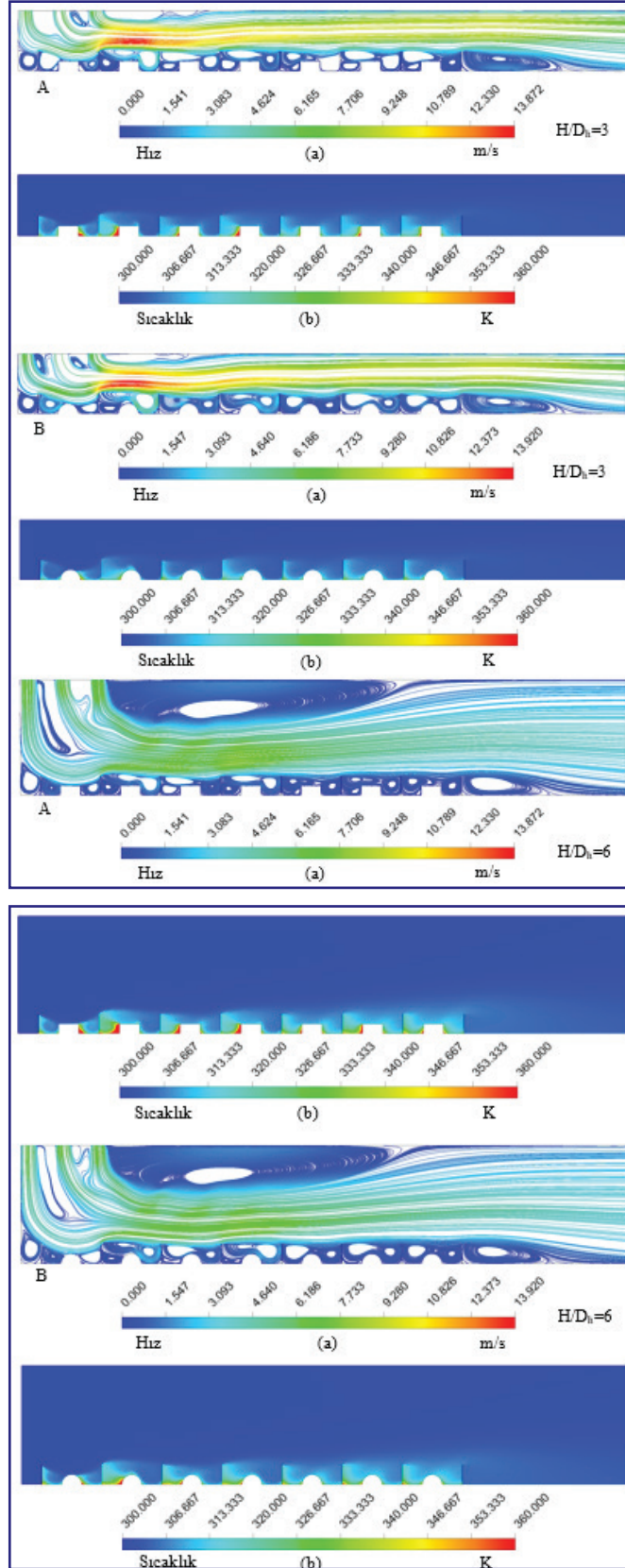
Şekil 6'da A-Kare tünel ve B-Daire tünel model yüzeyli, $a=0,75D_h$ jet giriş genişlikli ve üçlü jet akışlı kanallarda $H/D_h=3$ ve 6 yükseklik oranları ve $Re=6000$ için (a) hız-akım ve (b) sıcaklık konturu dağılımları gösterilmektedir. Kanallarda oluşan yeniden dolaşım bölgeleri akışkanın kendi içinde sirkülasyon halinde olduğu kısımlar olup; ısı transferinin azalmasına neden olarak model yüzeylerinin sıcaklıklarının artmasına sebep olmaktadır.

Tablo 3. $a=0,75D_h$ Jet Giriş Genişlikli Üçlü Jet Akışlı Farklı H/D_h Oranlı Kanallardaki Tüm Model Yüzeyleri İçin Ortalama Nu Sayısı (Nu_o) ve Jet Akışkan Çıkış Sıcaklık (T_c) değerleri

| Kare Tünel Model | $H/D_h=3$ | | $H/D_h=6$ | | $H/D_h=10$ | |
|-------------------|-----------|--------|-----------|--------|------------|--------|
| | T_c (K) | Nu_o | T_c (K) | Nu_o | T_c (K) | Nu_o |
| Re=4000 | 312,26 | 9,79 | 312,14 | 7,15 | 311,52 | 5,92 |
| Re=6000 | 311,51 | 13,77 | 311,41 | 9,89 | 311,01 | 7,87 |
| Re=8000 | 311,13 | 17,67 | 311,05 | 12,69 | 310,73 | 9,78 |
| Re=10000 | 310,9 | 21,43 | 310,84 | 15,2 | 310,59 | 11,66 |
| Daire Tünel Model | $H/D_h=3$ | | $H/D_h=6$ | | $H/D_h=10$ | |
| | T_c (K) | Nu_o | T_c (K) | Nu_o | T_c (K) | Nu_o |
| Re=4000 | 312,54 | 13,67 | 312,44 | 9,09 | 311,68 | 7,84 |
| Re=6000 | 311,69 | 19,68 | 311,64 | 12,62 | 311,13 | 10,7 |
| Re=8000 | 311,26 | 25,5 | 311,22 | 16,19 | 310,84 | 13,99 |
| Re=10000 | 311,01 | 31,14 | 310,99 | 19,67 | 310,65 | 17,3 |



Şekil 5. $a=0.75D_h$ giriş genişlikli ve üçlü hava jeti akışlı kanallardaki A-kare tünel B-daire tünel model yüzeylerinin kanaldaki diziliş sıralarına göre ortalama yüzey sıcaklıklarının Re sayısına göre değişimleri



Şekil 6. A-kare tünel ve B-daire tünel modelli yüzeylerin bulunduğu $a=0.75D_h$ giriş genişliklerindeki üçlü jet akışı kanallarında $Re=6000$ için (a) Hız-akım ve (b) Sıcaklık konturu dağılımı

Bu nedenle, yeniden dolaşım bölgelerinin yoğun olduğu özellikle model aralarında akışkan sıcaklıklarında artışlar olmaktadır. $H/D_h=3$ kanal yükseklik oranında kare tünel model yüzeyli kanalda beşinci sıradaki desende ısı transferinin daha fazla olmasına bağlı olarak soğuma performansının diğer desen sıralarına göre daha iyi olduğu sıcaklık konturu dağılımından görülebilmektedir. Bununla birlikte, aynı kanal yüksekliğinde daire tünel modelli yüzeylerde model yüzeylerindeki soğumanın daha iyi olduğu sıcaklık konturu dağılımdaki yüksek sıcaklıklı bölgelerin azalmasından anlaşılabilir. Kanal yükseklik oranı artırıldığında ($H/D_h=6$), kanallar içerisindeki yeniden dolaşım bölgelerinin büyüklükleri artmaktadır. Bu durum da jet akışlarının model yüzeyleri üzerindeki etkisini azaltarak, yüzey sıcaklıklarında artışa sebep olmaktadır. Bu nedenle, her iki model yüzeyi için de $H/D_h=3$ ile kıyaslandığında bu kanal yüksekliğinde ($H/D_h=6$) sıcaklık konturlarında yüzeylerin sıcaklıklarında yükselmeler görülmektedir.

5. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, $0.75D_h$ jet giriş genişliğindeki kanallarda bulunan sabit ısı akılı ve bakır plakalı kare tünel ve daire tünel modelli yüzeylerin üç adet jet akışı kullanılarak soğutulması ve kanallar içerisindeki akış yapıları sayısal olarak incelenmiştir. Buna göre, çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- $H/D_h=3$ ve 6 yükseklikli kanallarda en yüksek Nu sayısı değerlerine Model 5' in yüzeylerinde ulaşılmaktadır.
- -Daire tünel modelli yüzeyler için kare tünel modelli yüzeylere göre elde edilen Nu sayısı değerleri daha yüksektir.
- $H/D_h=3$ yükseklikli kanallarda $Re=8000$ için daire tünel Model 5 yüzeyinin Nu sayısının, aynı sıradaki kare tünel model yüzeyinden %24.95 daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- $H/D_h=3$ yükseklikli kanallarda en düşük Nu sayılarına kare ve daire tünel modelli yüzeyler için sırasıyla Model 2 ve Model 1'de ulaşılmaktadır.
- Kanal yüksekliğinin artışıyla üçlü jet etkisinin model yüzeyleri üzerinde azalması nedeniyle her iki model şekli için de Nu sayısı değerleri

azalış göstermektedir.

- $Re=10000$ için H/D_h 'ın 3'den 10'a çıkarılmasıyla daire tünel Model 1 için Nu sayısı %18,29 azalmaktadır. Bu azalış miktarı, kare tünel Model 1 yüzeyi için %18,52 olmaktadır.
- -Kanallardaki jet akışların yüzeyler üzerindeki etkisine bağlı olarak $H/D_h=6$ 'da en düşük Nu sayıları Model 2 yüzeyinde elde edilmektedir.
- Kanaldaki jet akışların Re sayılarının artışıyla model yüzeylerinin sıcaklıkları azalmaktadır.
- $H/D_h=3$ ve 6 için en düşük model yüzey sıcaklık değerlerine Model 5 sırası için ulaşılmaktadır. $H/D_h=10$ 'da her iki model yüzey şekli için Model 1'de diğer model sıralarına göre daha düşük yüzey sıcaklık değerleri elde edilmektedir.
- Tüm kanal yükseklikleri (H/D_h) için daire tünel model yüzeylerinde kare tünel model yüzeylerine göre daha düşük yüzey sıcaklıklarına ulaşılmaktadır. Bu durum, daire tünel model yüzeyli $a=0.75D_h$ jet giriş genişlikli üçlü jet akışlı kanallarda yüzeylerin soğuma performansının daha iyi olduğunu kanıtlamaktadır.
- Kanallardaki tüm model yüzeyleri değerlendirildiğinde daire tünel model yüzeylerin Nu sayıları, kare tünel modellerden daha fazladır.
- $H/D_h=3$ ve $Re=10000$ için daire tünel modelli yüzeyin Nu_0 değeri, kare tünel modelli yüzeyden %45.31 daha yüksektir.
- H/D_h oranının artırılmasıyla Nu_0 değerleri azalırken; jet akışkanının T_c değerleri azalmaktadır.
- Kontur dağılımları incelendiğinde kanallarda oluşan yeniden dolaşım bölgeleri nedeniyle ısı transferinin azaldığı ve model yüzeylerinin sıcaklıklarının arttığı görülebilmektedir.
- Her iki model yüzeyi için de $H/D_h=3$ ile kıyaslandığında $H/D_h=6$ kanal yüksekliğinde sıcaklık konturlarında yüzeylerin sıcaklıklarında yükselmeler görülmektedir.

Sonuç olarak, üçlü jet etkisinin en uygun şekilde yüzeyler üzerinde etkili olarak yüzeylerin soğumasını iyileştirmesi; jet akışların Re sayıları ve kanal yükseklik oranları (H/D_h) yanında soğutulacak yüzeylerin şekillerine de doğrudan bağlıdır.

SEMBOLLER

| | |
|---------------|---|
| a | : Jet giriş genişliği, mm |
| A_c | : Jet girişi kesit alanı, m^2 |
| H | : Kesiti dikdörtgen olan kanalın yüksekliği, mm |
| L | : Kesiti dikdörtgen olan kanalın boyu, mm |
| W | : Kesiti dikdörtgen olan kanalın eni, mm |
| D_h | : Kanalın hidroluk çapı, m |
| h | : Isı taşıma katsayısı, $Wm^{-2} K^{-1}$ |
| k | : Isı iletim katsayısı, $Wm^{-1} K^{-1}$ |
| V | : Akışkanın kanal girişindeki hızı, ms^{-1} |
| c_p | : Akışkanın özgül ısı, $Jkg^{-1} K^{-1}$ |
| P | : Jet giriş kesiti çevre uzunluđu, m |
| p | : Basınç, Nm^{-2} |
| q'' | : Desenli yüzeylerdeki ısı akısı, Wm^{-2} |
| T | : Sıcaklık, K |
| u_i | : x, y, z eksenlerindeki hız bileşenleri, ms^{-1} |
| Re | : Reynolds sayısı ($=V_\infty D_h/\nu$), boyutsuz |
| Nu | : Nusselt sayısı ($=h D_h/k$), boyutsuz |
| μ | : Dinamik viskozite, $kg s^{-1} m^{-1}$ |
| μ_t | : Türbülans viskozitesi, $kg s^{-1} m^{-1}$ |
| ν | : Kinematik viskozite, $m^2 s^{-1}$ |
| ρ | : Yođunluk, $kg m^{-3}$ |
| ϕ | : Viskoz kaybolma terimi, $m^2 s^{-3}$ |
| k' | : Türbülanslı akışın kinetik enerjisi, $m^2 s^{-2}$ |
| ε | : Türbülans dağılım terimi, $m^2 s^{-3}$ |

Alt İndisler

| | |
|----------|------------|
| s | : Yüzey |
| m | : Ortalama |
| ∞ | : Akışkan |

KAYNAKLAR

- [1] Kercher, D.S., Lee, J.B., Brand, O., Allen, M.G., Glezer, A. "Microjet Cooling Devices for Thermal Management of Electronic", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 26 (2), 359-366, 2003.
- [2] Babic, D., Murray, D.B., Torrance, A.A., "Mist Jet Cooling of Grinding Processes", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45, 1171-1177, 2005.
- [3] Royne, A., Dey, C., "Experimental Study of a Jet Impingement Device for Cooling of Photovoltaic Cells Under High Concentration", ANZSEZ Solar 2004: Life, the Universe and Renewables Congress, Perth, Australia, 30 November-3 December 2004.
- [4] Narumanchi, S.V.J., Amon, C.H., Murthy, J.Y., "Influence of Pulsating Submerged Liquid Jets on Chip-Level Thermal Phenomena", Transactions of the ASME, 125 (3), 354-361, 2003.
- [5] Kercher, D.S., Lee, J.B., Brand, O., Allen, M.G., Glezer, A., "Microjet Cooling Devices for Thermal Management of Electronics", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 26 (2), 359-366, 2003.

- [6] Carlomagno, G.M., Ianiro, A., "Thermo-Fluid-Dynamics of Submerged Jets Impinging at Short Nozzle-To-Plate Distance: A Review", Experimental Thermal and Fluid Science, 58, 15-35, 2014.
- [7] Argus, E., Rady, M.A., Nada, S.A., "A Numerical Investigation and Parametric Study of Cooling an Array of Multiple Protruding Heat Sources by A Laminar Slot Air Jet", International Journal of Heat and Mass Transfer, 28, 787-805, 2006.
- [8] Popovac, M., Hanjalic, K., "Large-Eddy Simulation of Flow Over a Jet-Impinged Wall Mounted Cube in A Cross Stream", International Journal of Heat and Fluid Flow, 28 (6), 1360-1378, 2007.
- [9] Yang, Y.T., Hwang, C.H., "Numerical Simulations on the Hydrodynamics of A Turbulent Slot Jet on A Semi-Cylindrical Convex Surface", Numerical Heat Transfer, 46, 995-1008, 2004.
- [10] 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.
- [11] Karabulut, K., "Heat Transfer Improvement Study of Electronic Component Surfaces Using Air Jet Impingement", Journal of Computational Electronics, 18, 1259-1271, 2019.
- [12] Mushatat, K.S., "Analysis of the Turbulent Flow and Heat Transfer of the Impingement Cooling in a Channel with Cross Flow", Engineering Science, 18 (2), 101-122, 2007.
- [13] Karabulut, K., Alnak, D.E. "Dikdörtgen Bir Kanaldaki Farklı Desenli Yüzey Geometrilerinin Isı Transferine Olan Etkilerinin İncelenmesi", Tesisat Mühendisliği, 183, 37-49, 2021.
- [14] Zou, L., Ning, L., Wang, X., Li, Z., He, L., Li, H. "Evaluation of Interfacial Heat Transfer Coefficient Based on the Experiment and Numerical Simulation in the Air-Cooling Process", Heat and Mass Transfer, 58, 337-354, 2022.
- [15] Barbosa, F.V., Teixeira, S.F.C.F., Teixeira, J.C.F. "Convection from Multiple Air Jet Impingement- A Review", Applied Thermal Engineering, 218, 119307, 2023.
- [16] Belarbi, A.A., Beriache, M., Bettahar, A., "Experimental Study of Aero-Thermal Heat Sink Performances Subjected to Impinging Air Flow", International Journal of Heat and Technology, 36 (4), 1310-1317, 2018.

- [17] Leena, R., Syamkumar, G., Prakash, M.J., “Experimental and Numerical Analyses of Multiple Jets Impingement Cooling for High-Power Electronics”, IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology, 8 (2), 210-215, 2018.
- [18] Wang, S.J., Mujumdar, A.S., “A Comparative Study of Five Low Reynolds Number $k-\epsilon$ Models for Impingement Heat Transfer”, Applied Thermal Engineering, 25, 31-44, 2005.
- [19] Saleha, N., Fadela, N., Abbas, A., “Improving Cooling Effectiveness by Use Chamfers on the Top of Electronic Components”, Microelectronics Reliability, 55, 1067-1076, 2015.
- [20] Kılıç, M., Çalışır, T., Başkaya, Ş., “Experimental and Numerical Study of Heat transfer from A Heated Flat Plate in A Rectangular Channel with An Impinging Air Jet”, Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 39 (1), 329-344, 2017.