

**TiO₂-SU NANOAKIŞKANI KULLANILAN BİRLEŞİK JET AKIŞLI KANALLARDA
KANATÇIĞIN ÇARPAN JET GİRİŞİNDEN OLAN MESAFESİNE GÖRE ISI
TRANSFERİ ARTIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ****Doğan Engin Alnak****Koray Karabulut**Sivas Cumhuriyet University, Technology Faculty, Manufacturing Engineering Department,
Sivas, Turkey.ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-0126-1483>Sivas Cumhuriyet University, Sivas Technical Sciences Vocational School, Electric and
Energy Department, Sivas, Turkey.ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-5680-0988>**Özet**

Dünya ülkelerinin yeşil enerjiye geçişinin tartışıldığı günümüzde, her türlü sektörde enerjinin elde edilme yöntemi ve kullanım miktarının azaltılması en önemli ve can alıcı konuların başında gelmektedir. Enerjinin maliyetindeki artış, özellikle ısı yoğun kullanılan sanayideki üretim maliyetlerini oldukça fazla etkilemektedir. Bununla birlikte, teknolojiye gelişimle boyutları küçülen elektronik cihazlarda birim hacim başına ısı üretimi miktarının artması; bu sektördeki ilerleme süreci için istenmeyen bir durumdur. Elektronik elemanlardan ısı transferini arttırmak için kullanılan çapraz akışlı soğutma yöntemi en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntem, soğuk akışkanın bir fan ile tüm bileşenlerin üzerine gönderilmesi ve böylece tüm elektronik bileşenlerin soğutulması prensibine dayanmaktadır. Bir başka ısı transfer yöntemi, soğuk sıvının bir lüle ile yüksek sıcaklığa sahip bir eleman üzerine yerel olarak püskürtüldüğü çarpan jet soğutmadır. Bu nedenle, tek tip soğutma yöntemi ile tüm devreyi güvenli bir şekilde tutabilecek şartlara ulaşmak zordur. Çarpan jet ve çapraz akışlı soğutma yönteminin birlikte uygulanması, yüksek soğutma kapasiteli faydalı bir durum yaratabilmektedir. Ulaşılan literatür değerlendirildiğinde, yüksek ısı transfer performansı sergileyen TiO₂-Su nanoakışkanı kullanılarak çarpan jet ve çapraz akışın birlikte uygulandığı birleşik jet akış çalışmalarının sayılarının oldukça az olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, küp ve oyuklu modellerden olan ısı transferi ve kanallardaki akış yapıları kanatçiksiz, 30° ve 60° açılı kanatçıklı birleşik jet akışlı H=3D yükseklikli kanallarda su ve TiO₂-Su nanoakışkanı kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Kanatçıklar, çarpan jet girişinden itibaren N=D ve N=2D konumlarında yerleştirilmişlerdir. Sayısal araştırma, zamandan bağımsız ve üç boyutlu olarak enerji ve Navier-Stokes denklemlerinin Ansys-Fluent programı kullanılarak k-ε türbülans modeli ile çözülerek gerçekleştirilmiştir. Kanatçık ve kanalın alt ve üst yüzeyleri adyabatik iken; model yüzeyleri 1000 W/m² sabit ısı akısına sahiptir. Akışkanlar için çalışılan Reynolds sayısı aralığı 5000-9000'dir. %2 hacimsel konsantrasyona sahip TiO₂-Su nanoakışkanın termofiziksel özellikleri literatürde bulunan denklemler yardımıyla elde edilmiştir. Çalışmanın sonuçları literatürdeki deneysel çalışma sonucu elde edilen korelasyonla karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu oldukları bulunmuştur. Sonuçlar, kanallardaki her bir küp ve oyuklu model yüzeyi için ortalama Nu sayısının değişimleri olarak analiz edilmiştir. Bununla birlikte, Re=9000 değeri için farklı kanat açıları (30° ve 60°) ve yerleşimleri (N=D ve N=2D) için TiO₂-Su nanoakışkanının hız-akım ve sıcaklık konturu dağılımları görselleştirilmiştir. Reynolds sayısının 7000 değerinde, N=D ve

N=2D ve kanallardaki tüm model yüzeyleri için su ve TiO₂-Su nanoakışkanı kullanılması durumlarında karşılaştırmalı olarak Nu_o ve T_o değerleri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, 60° açılı N=2D kanatçık konumunda TiO₂-Su nanoakışkanı kullanılan kanal için kanatçiksız ve su kullanılan kanala göre ortalama Nu sayısı (Nu_o) değerlerinin küp ve oyuklu modeller için sırasıyla %41,35 ve %38,47 arttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Birleşik Jet Akışı, Nanoakışkan, TiO₂-Su, Sayısal Isı Transferi

EVALUATION OF HEAT TRANSFER INCREASE ACCORDING TO THE DISTANCE OF THE FIN FROM THE IMPINGING JET INLET IN COMBINED JET FLOW CHANNELS USING TIO₂-WATER NANOFLUID

Abstract

Today, when the transition of world countries to green energy is discussed, the method of obtaining energy and reducing the amount of use in all kinds of sectors are among the most important and crucial issues. The increase in the cost of energy affects the production costs, especially in the heat-intensive industry. However, the increase in the amount of heat production per unit volume in electronic devices whose dimensions have decreased with the development of technology; this is undesirable for the progress process in the sector. The cross-flow cooling method, which is used to increase heat transfer from electronic elements, is one of the most widely used methods. This method is based on the principle of sending the cold fluid over all the components with a fan, thereby cooling the entire electronic components. Another method of heat transfer is impinging jet cooling where cold fluid is locally sprayed onto an element with a high temperature with a nozzle. For this reason, it is difficult to reach the conditions that can keep the whole circuit safely with a single type of cooling method. Implementing the impinging jet and cross flow cooling method together can create a beneficial situation with high cooling capacity. When the literature is evaluated, it is seen that the number of combined jet flow studies in which impinging jet and cross flow are applied together using TiO₂-Water nanofluid, which exhibits high heat transfer performance, is quite low. In this study, heat transfer and flow structures in channels, which are cube and cavity models, were numerically investigated using water and TiO₂-Water nanofluids in H=3D height channels with combined jet flow with 30° and 60° angled fins. The fins are located at N=D and N=2D positions from the impinging jet inlet. Numerical analysis was carried out by solving the energy and Navier-Stokes equations with the k-ε turbulence model using the Ansys-Fluent program in a three-dimensional and steady. While the upper and lower surfaces of the fin and channel are adiabatic; a constant heat flux of 1000 W/m² was applied to the model surfaces. The Reynolds number range studied for fluids is 5000-9000. Thermophysical properties of 2% volumetric concentration TiO₂-Water nanofluid were obtained with the help of equations found in the literature. The results of the study were compared with the correlation obtained as a result of the experimental study in the literature and the results were found to be compatible. The results were analyzed as changes in the mean Nu number for each cube and cavity model surface in the channels. However, velocity-streamline and temperature contour distributions of the TiO₂-Water nanofluid were visualized for different fin angles (30° and 60°) and placements (N=D and N=2D) for the Re=9000 value. Nu_o and T_o values were evaluated comparatively in cases where the Reynolds number is 7000, N=D and N=2D, and water and TiO₂-Water nanofluid are used for all model surfaces in the channels. As a result, it was determined that the average Nu number (Nu_o) values for

the channel using TiO₂-Water nanofluid at 60° angled N=2D fin position, compared to the channel without fins and the channel using water, increased by 41.35% and 38.47% for the cube and cavity models, respectively.

Keywords: Combined jet flow, Nanofluid, TiO₂-Water, Numerical Heat Transfer.

1. Giriş

Enerjinin maliyetindeki artış, özellikle ısı yoğun kullanılan sanayideki üretim maliyetlerini oldukça fazla etkilemektedir. Bununla birlikte, teknolojideki gelişimle boyutları küçülen elektronik cihazlarda birim hacim başına ısı üretimi miktarının artması; bu sektördeki ilerleme süreci için istenmeyen bir durumdur. Elektronik elemanlardan ısı transferini arttırmak için kullanılan çapraz akışlı soğutma yöntemi en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntem, soğuk akışkanın bir fan ile tüm bileşenlerin üzerine gönderilmesi ve böylece tüm elektronik bileşenlerin soğutulması prensibine dayanmaktadır. Bir başka ısı transfer yöntemi, soğuk sıvının bir lüle ile yüksek sıcaklığa sahip bir eleman üzerine yerel olarak püskürtüldüğü çarpan jet soğutmadır. Bu nedenle, tek tip soğutma yöntemi ile tüm devreyi güvenli bir şekilde tutabilecek şartlara ulaşmak zordur. Çarpan jet ve çapraz akışlı soğutma yönteminin birlikte uygulanması, yüksek soğutma kapasiteli faydalı bir durum yaratabilmektedir (Kılıç, 2018; Teamah ve ark., 2015).

Literatürde sadece çapraz akış veya sadece jet akışını değerlendiren birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışma için incelenen model daha çok jet akışına benzediğinden, literatür taraması daha çok jet akışına odaklanmıştır. Ancak, literatürde çarpan jetlerle ilgili birçok sayısal ve deneysel çalışma bulunmaktadır. Karabulut ve Alnak, (2020) dikdörtgen kesitli kanallarda tek bir hava jeti akımı kullanarak sur ve dikdörtgen şeklinde farklı desenlere sahip bakır levha yüzeylerinden ısı transferini sayısal olarak incelemiş olup; jet ile levha arasındaki mesafeyi (H/D_h) boyutsuz olarak 4-10 arasında almışlardır. Yaptıkları araştırma sonucunda Reynolds sayısının 4000 ve jet ile plaka arasındaki mesafenin 4 olduğu değer için dikdörtgen desenli yüzeylerde sur desenli yüzeylere göre ortalama %31,45 daha yüksek Nu sayısı değeri bulmuşlardır. Zou ve ark. (2022) deneylerinde ve sayısal simülasyonlarında hava soğutma sürecinde arayüzey ısı transferini ve gaz akışını araştırmak için yüksek hızlı sıkıştırılmış hava çarpmasını kullanmışlardır. Çalışmada, numune çapının ve jet mesafesinin akış yapısı ve sıcaklık alanı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, jet mesafesi ne kadar küçükse ara yüzey ısı transfer katsayısının o kadar büyük olduğunu göstermiştir. Demircan, (2019) elektronik devre elemanından çapraz akışlı jet ile ısı transferini sayısal olarak incelemiştir. Re sayısı ve hız oranlarının iyileştirilmesi ile ısı transferinin önemli ölçüde arttığı sonucuna varılmıştır. Sabit bir ısı akısı elemanı üzerinde çarpan hava jeti-çapraz akış birlikteliği ile ısı transferi Öztürk ve Demircan (2022) tarafından sayısal olarak incelenmiştir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada, farklı jet giriş hızı/kanal giriş hız oranları (0, 1, 2 ve 3) ve kanatçıkların farklı açıları (0°, 22.5°, 45°, 67.5° and 90°) için kanaldaki tek bir elemandan ısı transferini araştırmışlardır. Kanal yüksekliğinin jet çapına oranı sabit ve 3 alınırken; kanalda akışkan olarak hava kullanılmıştır. Giriş hızının kanal giriş hızına oranı 3 ve kanat açısı 90° olduğunda elemandan en yüksek ısı transferine ulaşıldığı belirlenmiştir.

Nanoakışkanların kullanıldığı jet çarpma çalışmaları incelendiğinde Kumar ve ark. (2021) ısı transfer oranını artırmak için jet çarpma durumunda hava profilli kolonlarla birleştirilmiş bir ısı alıcı kullanmışlardır. Bunu yaparken araştırmalarında su ve %1 konsantrasyonlu CuO-Su nanoakışkanından yararlanılmıştır. Elde ettikleri sonuçlarda, jet akışkanı olarak su akışkanı kullandıklarında ısı alıcı sıcaklığında %10'luk bir azalma; nanoakışkan kullandıklarında ise

sıcaklık düşüşünün %14 olduğunu bulmuşlardır. Selimefendigil ve Chamka (2020) bir CuO-Su nano jet kullanarak oyuk benzeri bir parça ile sabit sıcaklıklı bir yüzeyin soğutulmasında konveksiyonla ısı transferi özelliklerini sayısal olarak analiz etmeyi amaçlamışlardır. Reynolds sayısı (100-400), farklı oyuk uzunlukları (5w-40w) ve yükseklikleri (w-5w) gibi farklı değerlerde nanoparçacığın hacimsel konsantrasyonunu (%0-4) değiştirerek çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. En yüksek hacimsel konsantrasyonda su yerine nanoakışkan kullanıldığında ortalama ısı transferinin %35-46 arttığını bulmuşlardır. Abdullah ve ark. (2019) deneysel analizle alüminyum levha yüzeyine çarpan çift jetin ısı transferi üzerindeki TiO₂ nano çözelti konsantrasyonunun etkisini araştırdı. Bunun dışında çift jetin lüle mesafesi ve lüle-plaka mesafesi değişken olarak ele alınmıştır. Bu verilere dayanarak çift jetin akış yapısının ısı transferi artışını etkileyen önemli bir durum olduğunu bulmuşlardır. Datta ve ark. (2018) dışbükey bir yüzeye çarpan kapalı bir yarık jetinde Al₂O₃-Su nanoakışkanı kullanarak ısı transfer performansını araştırmak için sayısal bir simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Sistemin akış davranışını ve taşınım ısı transfer performansını araştırmak için çeşitli Reynolds sayıları ve jet ile plaka arasındaki mesafe gibi farklı parametreler dikkate alınmıştır. Jet girişi Reynolds sayısının artmasıyla ortalama Nusselt sayısının ve ısı transfer katsayısının önemli ölçüde arttığını belirlemişlerdir. Shi ve ark. (2021) nano-alüminyum katkı maddelerinin yuvarlak su jetlerinin kararsızlığı üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Yüksek hızlı gölge görüntüleme tekniği ile iki şeffaf lülenin çıkışında ve çıkışına yakın akış görselleştirmesi yapılmış ve nanoparçacık katkılarının jet kararsızlığı üzerindeki etkilerinin esas olarak viskozite artışı ve kavitasyon teşvikinden kaynaklandığı belirlenmiştir.

Literatür taramalarından da görülebileceği gibi çarpan jetler ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak, literatürde yüksek ısı transfer performansı sergileyen TiO₂-Su nanoakışkanı kullanılarak çarpan jet ve çapraz akışın birlikte uygulandığı kombine jet akış çalışmalarının sayısı oldukça azdır. Bunun yanı sıra, bu çalışmadaki gibi kanal ve model dizaynlarına da literatürde rastlanamamıştır.

Bu çalışmada, küp ve oyuklu modellerden olan ısı transferi ve kanallardaki akış yapıları kanatçiksiz, 30° ve 60° açılı kanatçıklı birleşik jet akışlı H=3D yükseklikli kanallarda su ve TiO₂-Su nanoakışkanı kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Kanatçıklar, çarpan jet girişinden N=D ve N=2D konumlarında yerleştirilmiş olup; kanatçık uzunluğu D (K)' dir. Sayısal araştırma, zamandan bağımsız ve üç boyutlu olarak enerji ve Navier-Stokes denklemlerinin Ansys-Fluent programı kullanılarak k-ε türbülans modeli ile çözülerek gerçekleştirilmiştir. Kanat ve kanalın alt ve üst yüzeyleri adyabatik iken; model yüzeyleri 1000 W/m² sabit ısı akısına sahiptir. Akışkanlar için çalışılan Reynolds sayısı aralığı 5000-9000'dir. %2 hacimsel konsantrasyona sahip TiO₂-Su nanoakışkanın termofiziksel özellikleri literatürde bulunan denklemler yardımıyla bulunmuştur. Çalışmanın sonuçları literatürdeki deneysel çalışma sonucu elde edilen korelasyonla karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu oldukları bulunmuştur. Sonuçlar, kanallardaki her bir küp ve oyuklu model yüzeyi için ortalama Nu sayısının değişimleri olarak analiz edilmiştir. Bununla birlikte, Re=9000 değeri için farklı kanat açıları ve yerleşimleri için TiO₂-Su nanoakışkanının hız-akım ve sıcaklık konturu dağılımları görselleştirilmiştir. Reynolds sayısının 7000 değerinde N=D ve N=2D için kanallardaki tüm model yüzeyleri için ve ayrı ayrı hem su hem de nanoakışkan kullanılması durumlarında Nu_{ort} ve T_{ort} değerleri araştırılmıştır.

2. Akışkanların Termofiziksel Özellikleri

Bu çalışmada kullanılan çalışma akışkanlarından olan %2 hacimsel konsantrasyonlu TiO₂-Su (Titanyum dioksit-Su) nanoakışkanının ve Su akışkanının termofiziksel özellikleri literatürde bulunan ve yaygın olarak kullanılan eşitlikler (Maxwell, 1873) yardımıyla elde edilmiş ve Tablo 1' de gösterilmiştir. Ayrıca, katı haldeki Titanyum dioksit nanoparçacıklarının termofiziksel özellikleri de literatürdeki ilgili çalışmadan alınmıştır (Mohammed ve ark., 2011).

Nanoakışkanın yoğunluğu

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_{nf} + \varphi\rho_p \quad (1)$$

Bu eşitlikte, ρ akışkanın yoğunluğunu (kg/m³), φ nanoparçacık konsantrasyonu ifade ederken, p, nf ve bf ise sırasıyla nanoparçacık, nanoakışkan ve su akışkanını belirtmektedir.

Nanoakışkanın özgül ısısı

$$c_{pnf} = (1 - \varphi)c_{pbf} + \varphi c_{pp} \quad (2)$$

Nanoakışkanın ısı iletkenliği

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_{bf} + 2(k_p - k_{bf})\varphi}{k_p + 2k_{bf} - 2(k_p - k_{bf})\varphi} k_{bf} \quad (3)$$

Nanoakışkanın viskozitesi

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2,5\varphi) \quad (4)$$

Tablo 1. Termofiziksel özellikler (30°C)

Özellikler	Su	TiO ₂	TiO ₂ -Su nanoakışkanı
k (W/mK)	0,6172	8,9538	0,64364
ρ (kg/m ³)	995,8	4250	1063,236
c_p (J/kgK)	4178,4	686,2	3952,53
μ (Ns/m ²)	803,4x10 ⁻⁶	-	0,0010531

3. Sayısal Yöntem

Model yüzeylerindeki çapraz akış-çarpan jet akışının zorlanmış taşınım ısı transferinin çözümünde Ansys-Fluent programı kullanılmıştır.

Akış ve ısı transferi, aşağıdaki gibi gövde kuvvetinin bulunmadığı sürekli, kanaldaki çapraz akış-çarpan jet akış nedeniyle gerçekleşen türbülanslı akış için kütle, momentum ve enerjinin

korunumu denklemlerinden zaman ortalamalı olarak türetilen diferansiyel denklemlerin çözümleriyle yapılmıştır (Wang ve Mujumdar, 2005; Karabulut ve Alnak, 2021).

Isı transferi süreçlerinde türbülansın doğru modellenmesi esastır. Bununla birlikte, türbülanslı akışkanların doğrudan sayısal simülasyonları çok zor olup aynı zamanda zaman alıcı bir süreçtir. Sayısal modellemelerde kullanılan çeşitli türbülans modelleri (Genç ve ark., 2009; Genç, 2010; Genç ve ark., 2011) bulunmakla birlikte, bu modeller arasında ekonomikliği ve pek çok akış olayında kabul edilebilir doğrulukla sonuç vermesi bakımından yarı ampirik bir model olan k- ε türbülans modeli yaygın olarak kullanılmaktadır (Wang ve Mujumdar, 2005). Bu nedenle, literatürdeki çalışmalardan elde edilen sonuçlar da göz önünde bulundurularak bu çalışmadaki sayısal hesaplamalarda standart k- ε türbülans modeli kullanılmıştır.

Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (5)$$

Momentum denklemi

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (6)$$

Enerji denklemi

$$\rho c_p \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - \rho c_p \overline{T' u'_i} \right] \quad (7)$$

Türbülans kinetik enerji denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (8)$$

Türbülans kinetik enerji yutulma terimi

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

Bu denklemlerde, k türbülanslı akış kinetik enerjisini, u_i x, y ve z yönlerindeki hız bileşenlerini, μ akışkanın viskozitesini, σ_k ($\sigma_k=1$) türbülanslı kinetik enerji Pr sayısını belirtmektedir. Türbülanslı kinetik enerji üretimi (G_k) ve türbülanslı akışın viskozitesini (μ_t) gösteren eşitlikler aşağıdaki gibidir (Wang ve Mujumdar, 2005; Genç ve ark., 2011).

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (10)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

Türbülans yutulma Pr sayısı σ_ε ile belirtilirken, $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$, $C_\mu=0.09$ ve $\sigma_\varepsilon=1.3$ değerlerine sahip olan eşitliklerdeki katsayılarıdır (Öztürk ve Demircan, 2022; Mohammed ve ark., 2011).

Isı taşınım katsayısı h , Eş. 12 ve Nusselt sayısı (Nu) ise Eş. 13 ile hesaplanmaktadır (Öztürk ve Demircan, 2022; Karabulut, 2019).

$$h = \frac{q''}{T_y - T_a} \quad (12)$$

$$-k_a \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_y = h(T_a - T_y) \quad \text{ve} \quad Nu = \frac{h(3m)}{k_a} \quad (13)$$

Bu eşitliklerde, T_a ve T_y sırasıyla akışkanının ve elemanın ortalama olarak yüzey sıcaklıklarını (K), k_a akışkanın ısı iletim katsayısını (W/m.K), $3m$ akışkanın temas ettiği elemanın toplam yüzey uzunluğunu (m), h ve h_m ise sırasıyla model yüzeyi boyunca noktasal ve ortalama ısı taşınım katsayısını (W/m².K), n ise yüzeye dik yön olup; model yüzeyi için ortalama Nu sayısı (Nu_m) aşağıda belirtilen eşitliklerden bulunmaktadır.

Desenli yüzey ortalama ısı taşınım katsayısı

$$h_m = \frac{1}{3m} \int_0^{3m} h dx \quad (14)$$

Desenli yüzey ortalama Nu sayısı

$$Nu_m = \frac{h_m(3m)}{k_a} \quad (15)$$

Kanalın hidrolik çapı

$$D_{kh} = \frac{4A_k}{P_k} = \frac{4(H.W)}{2(H+W)} \quad (16)$$

Bu eşitlikte, A_k ve P_k sırasıyla kanalın kesit alanı ve ıslak çevresini gösterirken, kanalın yükseklik ve genişliği ise H ve W ile temsil edilmektedir. Jet giriş çapı D , dairesel girişli jet hidrolik çapına (D_{hjet}) eşittir.

Kanalın ve jetin Re sayıları ise sırasıyla Eş. 17 ve 18 kullanılarak belirlenmektedir (Öztürk ve Demircan, 2022)

$$Re_k = \frac{\rho_a V_k D_{hk}}{\mu_a} \quad (17)$$

$$Re_j = \frac{\rho_a V_j D}{\mu_a} \quad (18)$$

Bu eşitliklerde, akışkanın kanal ve jet akış hızları sırasıyla V_k ve V_j (m/s) ile gösterilmektedir.

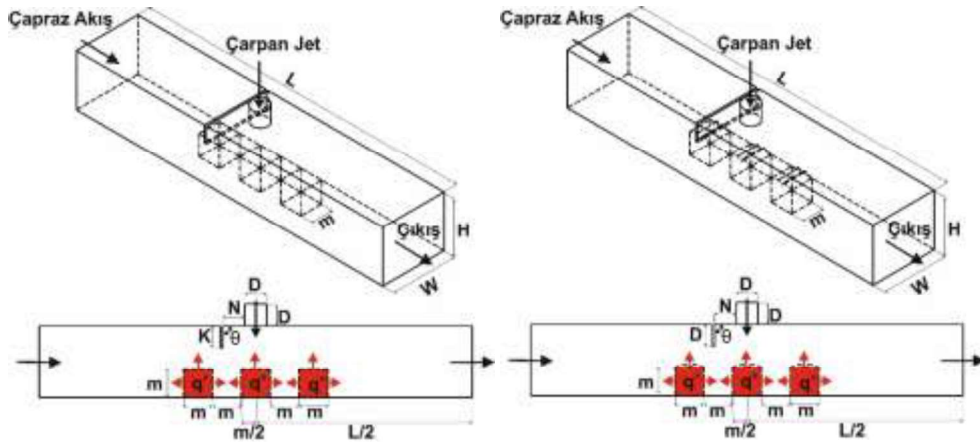
4. Model Geometrileri

Çalışmadaki çapraz akış-çarpan jet akışlı kanatçıklı kanallar ve kanallardaki dairesel küp ve oyuklu model yüzeylerine sahip elemanların ölçüleri Şekil 1 (a) ve (b)' de verilirken; kanalların boyutsal ölçüleri ise Tablo 2' de verilmiştir. Bunun yanı sıra, bu çalışmada yapılan kabuller ve sınır şartları Tablo 3' de sunulmaktadır. Ayrıca, birleşik jet akışlı kanalların sayısal hesaplamalarında kullanılan düzgün dörtyüzlü ağ yapısı Şekil 2' de gösterilmektedir.

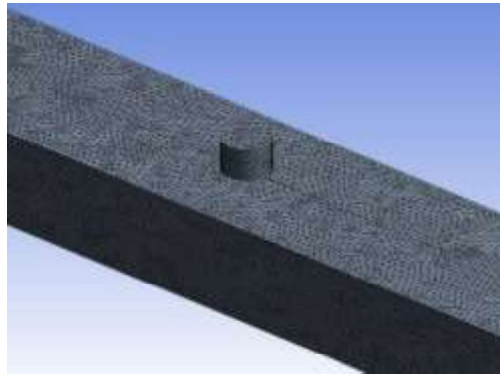
5. Bulgular ve Tartışma

Çalışmada, Şekil 3' de gösterildiği gibi sadece jet akışın olduğu durumda farklı Reynolds sayılarında incelemelerde bulunularak ulaşılan sonuçlar ile Ma ve Bergles, (1983)' in deneysel incelemeleri sonucunda ulaştıkları Eş. 19 kullanılarak ulaşılan sonuçlar karşılaştırılmış ve Ma ve Bergles, (1983)' in deneysel sonuçları ile sunulan çalışmanın sayısal sonuçlarının uyumlu ve tutarlı oldukları bulunmuştur.

$$\overline{Nu} = 1,29 Re^{0.5} Pr^{0.4} \quad (19)$$



Şekil 1. (a) küp (b) oyuklu modelli kanalların görünüşleri



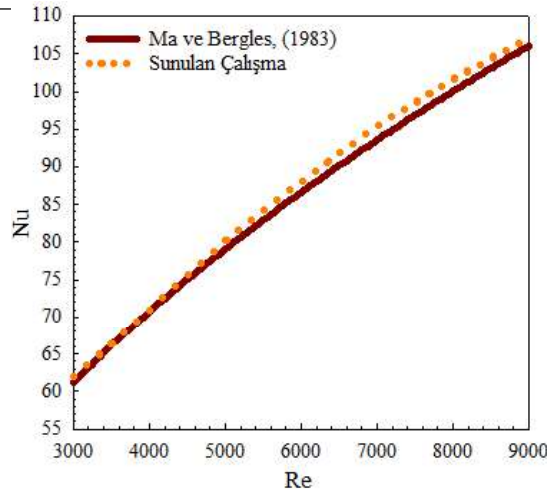
Şekil 2. Kanalda kullanılan düzgün dörtyüzlü ağ yapısının gösterimi

Tablo 2. Kanalların boyutsal ölçüleri

Değişken	Ölçü
D	15 (mm)
L	66D
W	4D
H	3D
M	20 (mm)
θ	30° ve 45°
N	D, 2D
K	D

Tablo 3. Çalışmada uygulanan sınır şartları

a)	Akış hacmi, sürekli, üç boyutlu ve türbülanslıdır
b)	Sıkıştırılmaz akışkan olarak su, %2 TiO ₂ -Su nanoakışkanı, hem jet hem de çapraz akış akışkanı olarak kullanılmışlardır
c)	Akışkanların ısı özellikleri sabit olup, sıcaklıktan bağımsızdır
d)	Kanalın ve kanatçığın yüzeyleri adyabatiktir
e)	Akışkan olarak kullanılan su, nanoakışkan ve desenli model yüzeylerinde ısı kaynağı bulunmamaktadır
f)	Kanalın çıkış basıncı, atmosfer basıncına eşit olarak alınmıştır ($P_{ç}=P_{atm}$)
g)	Kanalın çıkışındaki sıcaklık farkının ihmal edilebilecek kadar az miktarda olduğu kabul edilerek $\partial T/\partial x=0$ olarak belirlenmiştir
h)	Kanal, kanatçık ve model yüzeylerinde kaymazlık sınır şartı olduğu ve bu nedenle bahsedilen yüzeylerde tüm hız bileşeni değerlerinin sıfır olduğu kabul edilmiştir.

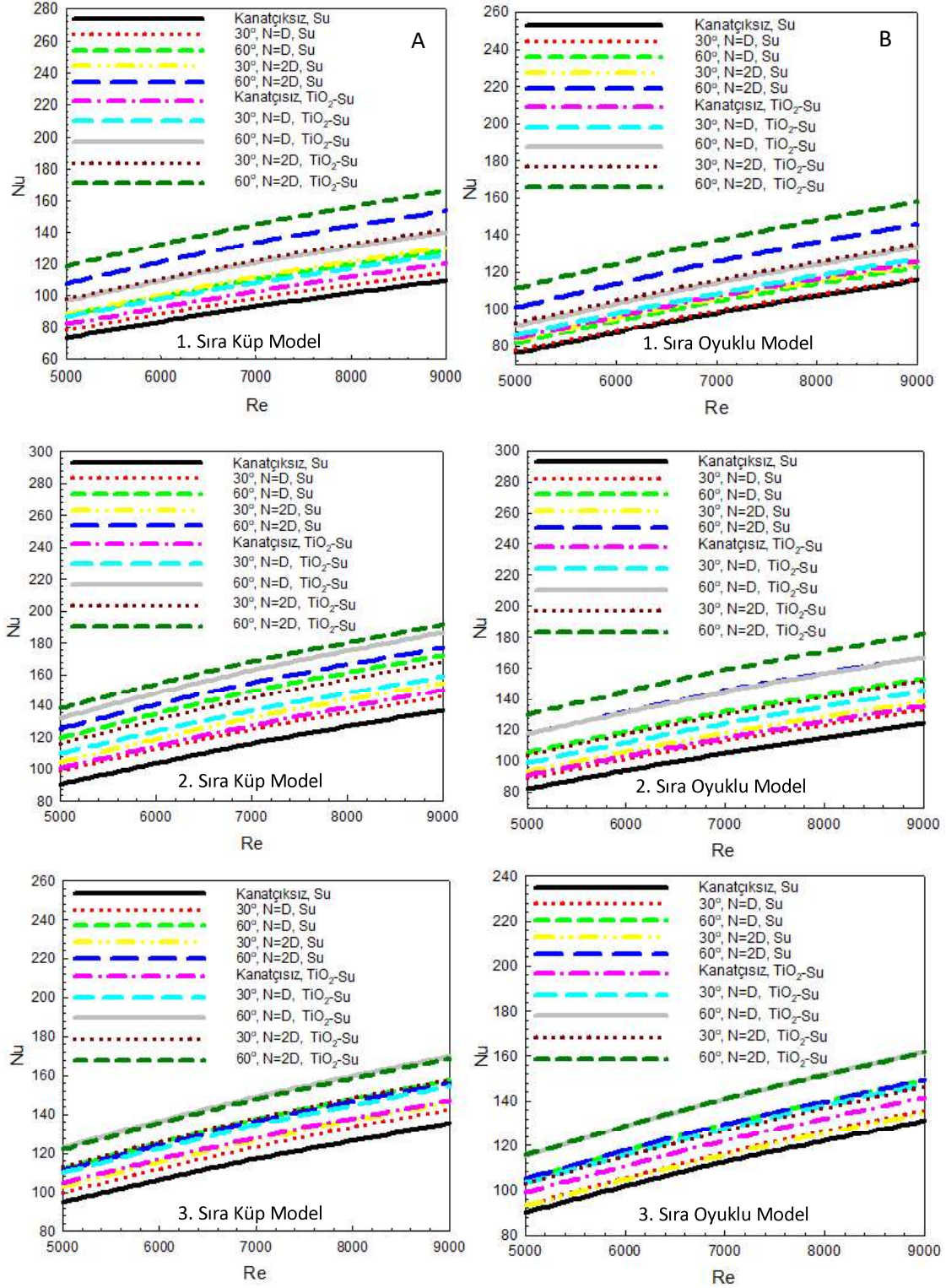

Şekil 3. Sunulan çalışma ve Ma ve Bergles (1983)'in sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4 A ve B' de çapraz akış-çarpan jet birleşik jet akışlı kanatçiksız ve 30° ve 60° açılı ve çarpan jet girişinden itibaren kanal girişine doğru $N=D$ ve $N=2D$ uzaklıklı kanatçıklı kanallarda sırasıyla küp ve oyuklu model yüzeylerinin kanaldaki dizilim sıralarına bağlı olarak Nu sayılarının değişimleri gösterilmektedir. Kanalın ilk sırasında bulunan her iki model şekli de (küp ve oyuklu model) kanatçiksız durumda çapraz akışın etkisi altındadır. Bununla birlikte, ikinci modellerden itibaren çarpan jet akışın da devreye girmesiyle birleşik jet akışı etkisi başlamaktadır. Oluşan bu birleşik jet akışı etkisi üçüncü model yüzeyleri ile birlikte azalarak kanal çıkışında son bulmaktadır. Grafiklerden de görülebildiği gibi her iki

model tipi ve model sırası için en düşük Nu sayısı değerleri kanatçıksız kanal durumunda elde edilmektedir. Kanala kanatçıgın eklenmesiyle birleşik jet akışı, model yüzeylerine yönlendirilerek ısı transferinde (Nu sayısı) artış sağlanmaktadır. Ayrıca, kanatçıgın çarpan jet girişine göre olan konumunun ($N=D$) artırılması ($N=2D$) çapraz akış-çarpan jet birlikteliğinin model yüzeylerine daha iyi yönlendirilmesiyle sonuçlandırıldığından Nu sayısı değerleri artmaktadır. Bununla birlikte, Model 1 daha çok çapraz akışın etkisi altında olduğundan kanatçık konumunun kanal girişine doğru artırılması ($N=2D$) çapraz akışı model yüzeylerine yönlendirerek Nu sayısında artışa sebebiyet vermektedir. Küp model (Model 1) için $Re=7000$ değerinde $N=D$ konumlu ve 30° kanatçık açılı kanalda su akışkanı kullanılması durumunda kanatçıksız duruma göre Nu sayısında %5,56'lık artış sağlanırken; $N=2D$ kanatçık konumunda bu artış değeri %20 olmaktadır. Aynı şartlarda, oyuklu model için ise bu değerler sırasıyla %1,18 ve %8,23' dür. %2 hacimsel konsantrasyonlu TiO_2 nanoparçacıkları ile oluşturulan nanoakışkanın kullanılması durumunda elde edilen Nu sayısı artışı değerleri daha da artmaktadır. Kanalda ikinci sırada bulunan Model 2 için yüzey şekilleri değerlendirildiğinde; çarpan jet akışı ile birlikte birleşik jet akışı etkin hale geldiğinden Nu sayılarında Model 1' e göre yükselmeler görülmektedir. Model 2 için $Re=9000$ değerinde 60° açılı ve $N=2D$ mesafesinde kanatçıklı kanallarda TiO_2 -Su nanoakışkanı için kanatçıksız ve su kullanılan küp ve oyuklu modeller için Nu sayısında sırasıyla %39,39 ve %46,52'lik artışlar elde edilmiştir. Bununla birlikte, küp model için ulaşılan Nu sayısı değerleri daha fazladır. Bunun yanı sıra, kanal sonuna doğru birleşik jet etkisinin azalması nedeniyle her iki model yüzey şekli de dahil olmak üzere Model 3 için elde edilen Nu sayısı değerleri Model 2 ile kıyaslandığında daha düşük olmaktadır. $Re=5000$ için 60° açılı ve $N=D$ mesafesinde kanatçıklı kanallarda TiO_2 -Su nanoakışkanı kullanılan Model 3 için Model 2' ye göre sırasıyla küp ve oyuklu model için Nu sayılarında %7,4 ve %1,9' luk azalmalar meydana gelmektedir.

Kanatçıksız, 30° ve 60° açılı ve $N=D$ ve $2D$ uzaklıklı kanatçıklı, su ve TiO_2 -Su nanoakışkanının kullanıldığı birleşik jet akışlı kanallarda bulunan her üç küp ve oyuklu modellerin Nu_o ve T_o değerleri N değerlerine göre $Re=7000$ için sırasıyla Tablo 4 ve 5' de verilmektedir. Kanatçıksız duruma göre her iki model yüzeyi için de kanatçık eklenmesiyle Nu_o değerleri artarken; T_o değerleri azalmaktadır. TiO_2 -Su nanoakışkanı, su akışkanına göre akışkanın ısı transfer katsayısını artırmakla birlikte; birleşik jet akışıyla yüzeylerden olan ısı transferini artırıcı etkisi daha da artmaktadır. Bunun yanı sıra, kanallara eklenen kanatçıgın konumunun $N=D$ ' den $2D$ ' ye çıkarılması çapraz akışla birlikte çarpan jet akışının da yüzeylere daha iyi yönlendirilmesini sağladığından N_o değerleri daha da artmaktadır. Özellikle 60° açılı kanatçıklı durumda bu artış, daha iyi görülebilmektedir. 60° açılı $N=2D$ kanatçık konumunda TiO_2 -Su nanoakışkanı kullanılan kanal için kanatçıksız ve su kullanılan kanala göre Nu_o değeri küp ve oyuklu modeller için sırasıyla %41,35 ve %38,47 artarken; $N=D$ için bu artış değerleri %32,4 ve %26,71 olmaktadır.

Şekil 5' de $Re=9000$ değeri için kanatçıksız, 30° ve 60° açılı ve $N=D$ ve $N=2D$ kanatçık konumlu TiO_2 -Su nanoakışkanı için (a) hız-akım ve (b) sıcaklık konturu dağılımları A-Küp ve B-Oyuklu model için sunulmaktadır. Kanatçıksız durumda kanalın girişindeki ilk sıradaki her iki model de çapraz akışın etkisi altında iken; küp model yüzeyinin üzerinde oluşan küçük yeniden dolaşım bölgesi bu model için sıcaklık konturu dağılımından da görülebildiği gibi sıcaklıkta artışa yol açmaktadır. İkinci sıradaki modellerin hemen üstünde bulunan çarpan jet akışıyla birlikte bu model civarındaki ısı transferi artarken; kanal girişinden gelen çapraz akış çarpan jet akışını kanalın son sırasındaki modele doğru sürüklemektedir. Bununla birlikte, her iki model yüzeyi etrafında ve model yüzeyleri aralarında oluşan yeniden dolaşım bölgeleri akışın kendi içinde sirkülasyon halinde olduğu bölgeler olduğundan bu kısımlarda akışkanda



Şekil 4. Su ve TiO₂-Su nanoakışkanı kullanılan kanatçksız ve farklı kanatçık açılı (θ) ve kanatçık uzaklığı (N) kanallardaki dizilim sıralarına göre A-küp ve B-oyuklu model yüzeylerinin Nu sayısı değişimleri

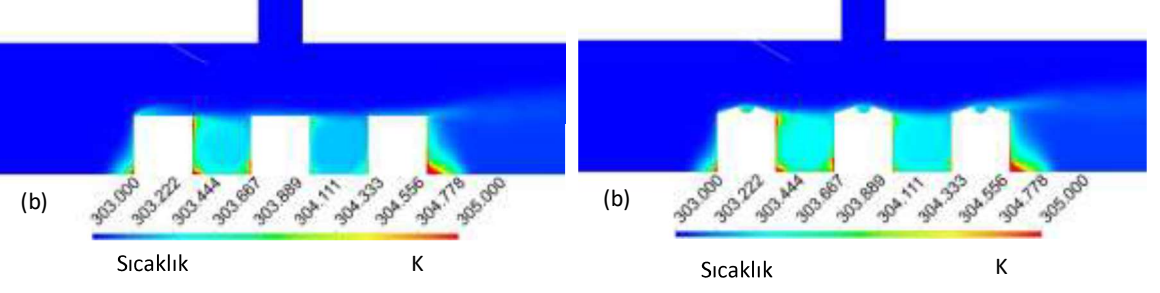
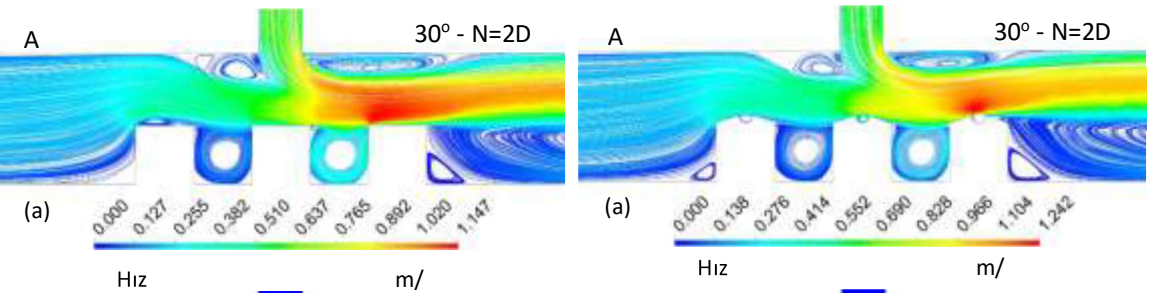
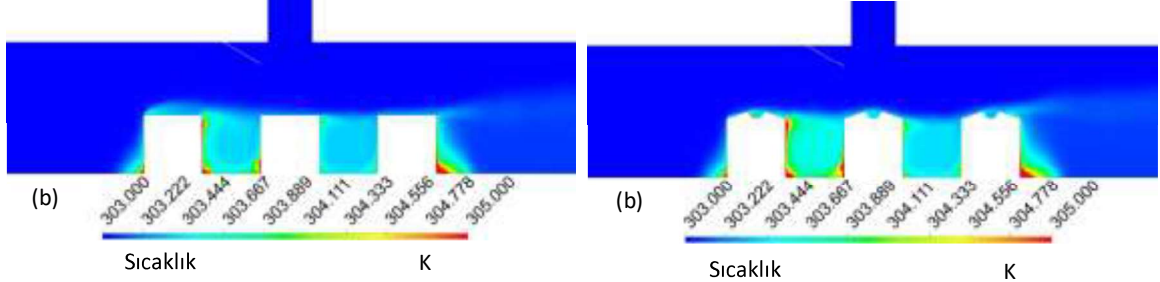
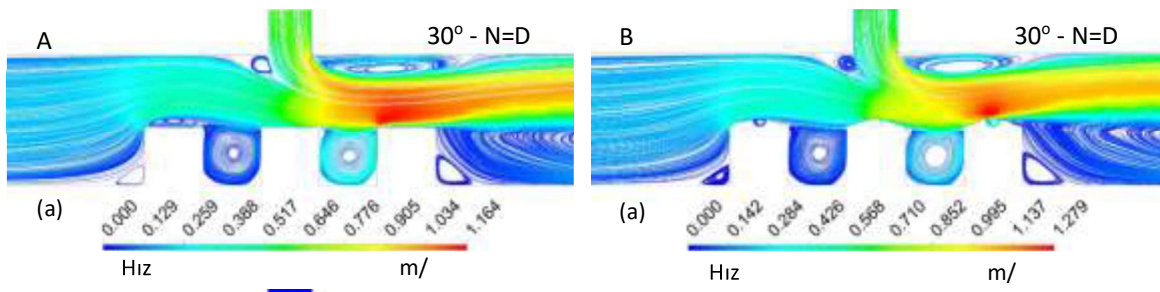
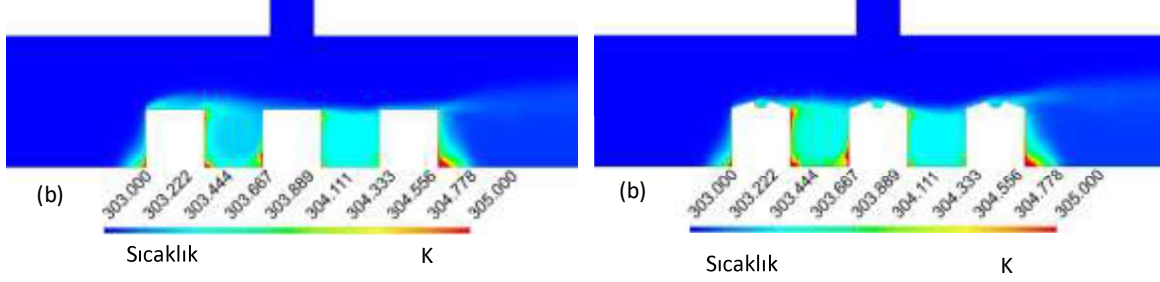
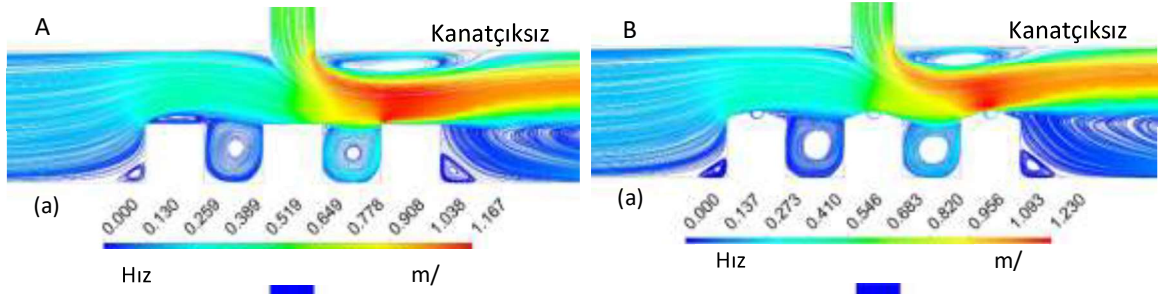
Tablo 4. Kanatçksız ve N=D kanatçık uzaklıklı ve açılı kanallardaki tüm küp ve oyuklu model yüzeylerindeki Nu_o ve T_o değışimleri

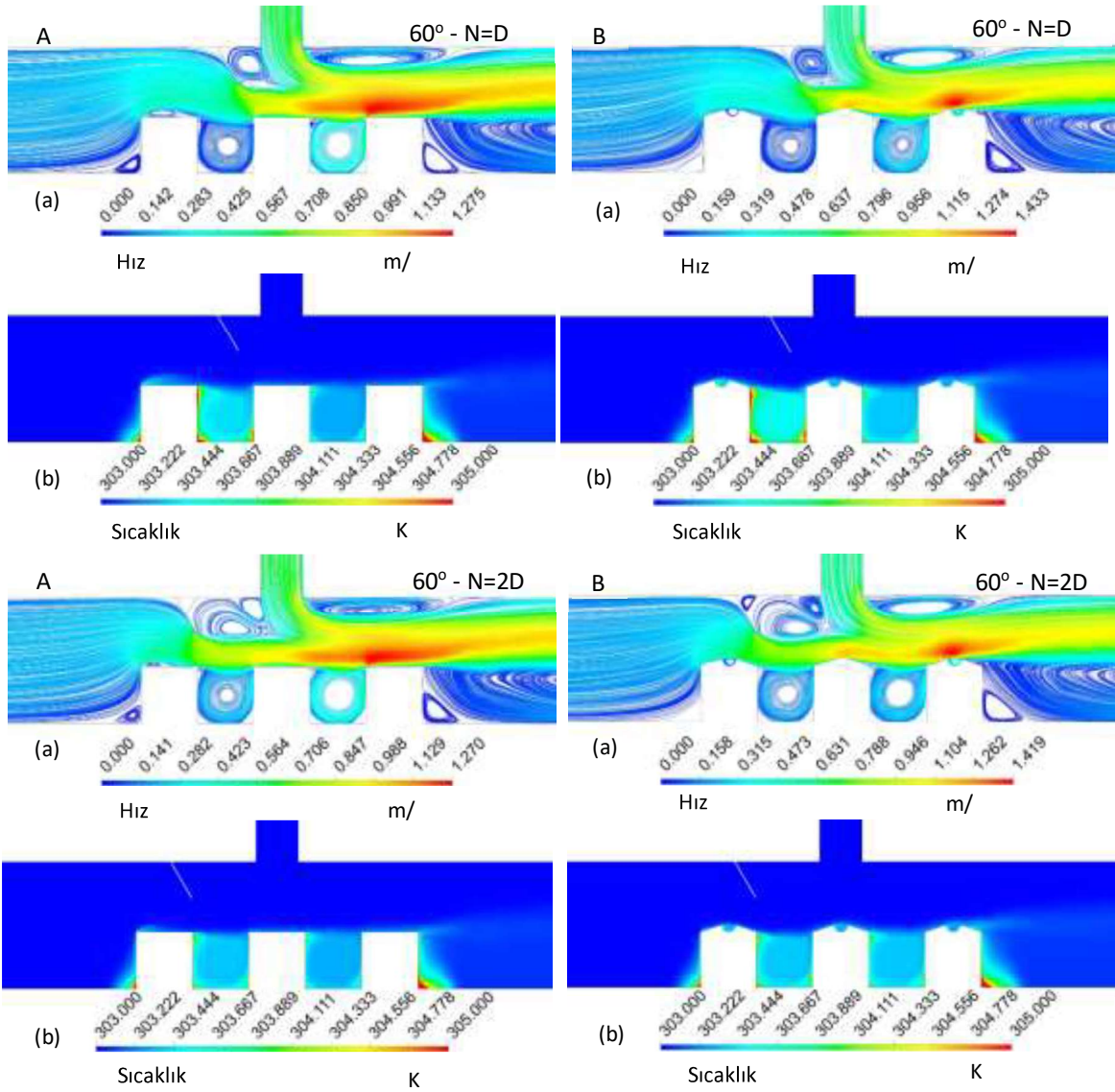
Re=7000 - K=D - N=D			H=3D	
			Küp Model	Oyuklu Model
Kanatçksız,	Su	Nu_o	108,889	105,227
30° Kanatçıklı	Su	Nu_o	115,651	109,621
60° Kanatçıklı	Su	Nu_o	132,426	121,988
Kanatçksız	TiO ₂ -Su	Nu_o	119,531	114,744
30° Kanatçıklı	TiO ₂ -Su	Nu_o	126,649	120,197
60° Kanatçıklı	TiO ₂ -Su	Nu_o	144,177	133,337
Kanatçksız,	Su	T_o (K)	305,542	305,676
30° Kanatçıklı	Su	T_o (K)	305,446	305,661
60° Kanatçıklı	Su	T_o (K)	305,073	305,259
Kanatçksız	TiO ₂ -Su	T_o (K)	305,135	305,320
30° Kanatçıklı	TiO ₂ -Su	T_o (K)	305,057	305,238
60° Kanatçıklı	TiO ₂ -Su	T_o (K)	304,739	304,894

Tablo 5. Kanatçksız ve N=2D kanatçık uzaklıklı ve açılı kanallardaki tüm küp ve oyuklu model yüzeylerindeki Nu_o ve T_o değışimleri

Re=7000 - K=D - N=2D			H=3D	
			Küp Model	Oyuklu Model
Kanatçksız,	Su	Nu_o	108,889	105,227
30° Kanatçıklı	Su	Nu_o	123,798	113,348
60° Kanatçıklı	Su	Nu_o	141,707	133,667
Kanatçksız	TiO ₂ -Su	Nu_o	119,531	114,744
30° Kanatçıklı	TiO ₂ -Su	Nu_o	135,181	124,218
60° Kanatçıklı	TiO ₂ -Su	Nu_o	153,922	145,713
Kanatçksız,	Su	T_o (K)	305,542	305,676
30° Kanatçıklı	Su	T_o (K)	305,290	305,466
60° Kanatçıklı	Su	T_o (K)	304,727	304,833
Kanatçksız	TiO ₂ -Su	T_o (K)	305,135	305,320
30° Kanatçıklı	TiO ₂ -Su	T_o (K)	304,926	305,070
60° Kanatçıklı	TiO ₂ -Su	T_o (K)	304,447	304,533

ısınma meydana gelmekte ve bu durum da yüzeyden olan ısı transferini azaltarak; soğumayı kötüleştirir. Kanallara eklenen kanatçıklar, birleşik jet akışı model yüzeyleri üzerine yönlendirerek ısı transferini artırmaktadır. Ayrıca, kanatçığın konumunun çarpan jet girişinden itibaren D'den 2D'ye çıkarılması özellikle kanal girişinden gelen akışkanın model yüzeylerine yönlendirerek çarpaz akışın da jet etkisi kazanmasını sağlamaktadır. Bu duruma, kanatçık ardında oluşan yeniden dolaşım bölgelerinin birleşik jet akışı model yüzeylerine doğru baskılması da etki etmektedir. Bunun yanı sıra, çarpan jet etkisiyle de bu akış birleşerek akışkanın etkinliğini artırmaktadır.





Şekil 5. Kanatçıksız ve farklı kanatçık uzaklıklı ve açılı kanallardaki

A. küp ve B. oyuklu modeller için (a) hız akım çizgisi (b) sıcaklık konturu dağılımları

6. Genel Sonuçlar

Bu çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Kanalın ilk sırasında bulunan her iki model (Model 1) şekli de (küpe ve oyuklu model) kanatçıksız durumda çarpaz akışın etkisi altındadır.
- İkinci modellerden itibaren (Model 2) çarpan jet akışın da devreye girmesiyle birleşik jet akışı etkisi başlamaktadır.
- Oluşan bu birleşik jet akışı etkisi üçüncü model (Model 3) yüzeyleri ile birlikte azalarak kanal çıkışında son bulmaktadır.
- Her iki model tipi ve model sırası için en düşük Nu sayısı değerleri kanatçıksız kanal durumunda elde edilmektedir.
- Kanala kanatçığın eklenmesiyle birleşik jet akışı, model yüzeylerine yönlendirilerek ısı transferinde (Nu sayısı) artış sağlanmaktadır.

- Kanatçığın çarpan jet girişine göre olan konumunun ($N=D$) artırılması ($N=2D$) çapraz akış-çarpan jet birlikteliğinin model yüzeylerine daha iyi yönlendirilmesiyle sonuçlandığından Nu sayısı değerleri artmaktadır.
- Model 1 daha çok çapraz akışın etkisi altında olduğundan kanatçık konumunun kanal girişine doğru artırılması ($N=2D$) çapraz akışı model yüzeylerine yönlendirerek Nu sayısında artışa sebebiyet vermektedir.
- Küp model (Model 1) için $Re=7000$ değerinde $N=D$ konumlu ve 30° kanatçık açılı kanalda su akışkanı kullanılması durumunda kanatçiksiz duruma göre Nu sayısında %5,56'lık artış sağlanırken; $N=2D$ kanatçık konumunda bu artış değeri %20 olmaktadır. Aynı şartlarda, oyuklu model için ise bu değerler sırasıyla %1,18 ve %8,23'dür.
- %2 hacimsel konsantrasyonlu TiO_2 nanoparçacıkları ile oluşturulan nanoakışkanın kullanılması durumunda elde edilen Nu sayısı artışı değerleri daha da artmaktadır.
- Kanalda ikinci sırada bulunan Model 2 için yüzey şekilleri değerlendirildiğinde; çarpan jet akışı ile birlikte birleşik jet akışı etkin hale geldiğinden Nu sayılarında Model 1'e göre yükselmeler görülmektedir.
- Model 2 için $Re=9000$ değerinde 60° açılı ve $N=2D$ mesafesinde kanatçıklı kanallarda TiO_2 -Su nanoakışkanı için kanatçiksiz ve su kullanılan küp ve oyuklu modeller için Nu sayısında sırasıyla %39,39 ve %46,52'lik artışlar elde edilmiştir.
- Küp model için ulaşılan Nu sayısı değerleri daha fazladır. Kanal sonuna doğru birleşik jet etkisinin azalması nedeniyle her iki model yüzey şekli de dahil olmak üzere Model 3 için elde edilen Nu sayısı değerleri Model 2 ile kıyaslandığında daha düşük olmaktadır.
- $Re=5000$ için 60° açılı ve $N=D$ mesafesinde kanatçıklı kanallarda TiO_2 -Su nanoakışkanı kullanılan Model 3 için Model 2'ye göre sırasıyla küp ve oyuklu model için Nu sayılarında %7,4 ve %1,9'luk azalmalar meydana gelmektedir.
- Kanatçiksiz duruma göre her iki model yüzeyi için de kanatçık eklenmesiyle Nu_0 değerleri artarken; T_0 değerleri azalmaktadır.
- 60° açılı $N=2D$ kanatçık konumunda TiO_2 -Su nanoakışkanı kullanılan kanal için kanatçiksiz ve su kullanılan kanala göre Nu_0 değeri küp ve oyuklu modeller için sırasıyla %41,35 ve %38,47 artarken; $N=D$ için bu artış değerleri %32,4 ve %26,71 olmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) birimi tarafından TEKNO-2021-031 proje numarası ile desteklenmiştir.

Kaynakça

- Abdullah, M. F., Zulkifli, R., Harun, Z., Abdullah, S., Wan Ghopa, W. A., Najm, A. S., Sulaiman, N. H. Impact of the TiO_2 nano solution concentration on heat transfer enhancement of the twin impingement jet of a heated aluminum plate. *Micromachines* 10, (2019), no. 176.
- Alnak, D. E., Thermohydraulic performance study of different square baffle angles in cross-corrugated channel, *Journal of Energy Storage*, 28, (2020), no. 101295.
- Datta, A., Jaiswal, A., Halder, P., Heat transfer analysis of slot jet impingement using nano-fluid on convex surface. *IOP Conf Series-Mat Sci Eng* 402, (2018), no. 012098.
- Demircan, T., Numerical Analysis of Cooling An Electronic Circuit Component with Cross Flow and Jet Combination, *Journal of Mechanics*, 35 (2019), pp. 395-404.
- Genc, M.S., Kaynak, U., Lock, G. D. Flow over an aerofoil without and with a leading-edge slat at a transitional Reynolds number, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 223, (2009), pp. 217-231.

- Genç, M. S. Numerical simulation of flow over a thin aerofoil at a high Reynolds number using a transition model, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 24, (2010), pp. 2155-2164.
- Genç, M. S., Kaynak, Ü., Yapıcı, H., Performance of transition model for predicting low Re aerofoil flows without/with single and simultaneous blowing and suction, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 30, (2011), pp. 218-235.
- Öztürk, S. M., Demircan, T., 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, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (2022), 1, pp. 57-74.
- Selimefendigil, F., Chamkha, A. J., Cooling of An Isothermal Surface Having A Cavity Component by Using Cu-Water Nano-Jet, *International Journal of Numerical Methods Heat & Fluid Flow*, 30 (2020), pp. 2169-2191.
- Karabulut, K., Heat transfer improvement study of electronic component surfaces using air jet impingement, *Journal of Computational Electronics*, 18, (2019), pp. 1259-1271.
- Karabulut, K., Alnak, D. E., Study of Cooling of the Varied Designed Warmed Surfaces with An Air Jet Impingement, *Pamukkale University Journal of Engineering Science*, 26 (2020), pp. 88-98.
- Karabulut, K., Alnak, D. E., Investigation of graphene oxide-distilled water nanofluids with consideration of heat transfer and flow structure for backward-facing step flow, *Journal of Engineering Thermophysics*, 30, (2021) 2, pp. 300-316.
- Kılıç, M., Investigation of Combined Effect of Nanofluids and Impinging Jets on Cooling of Electronic Systems, *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering Architecture*, 18 (2018), pp. 121-132.
- Kumar, D., Zunaid, M., Gautam, S., Heat Sink Analysis in Jet Impingement with Air Foil Pillars and Nanoparticles, *Materials Today: Proceedings*, 46 (2021), pp. 10752-10756.
- Ma, C. F., Bergles, A. E., Boiling jet impingement cooling of simulated microelectronic chips, *Heat Transfer in Electronic Equipment HTD*, 28, (1983), pp. 5-12.
- Mohammed, H. A., Gunnasegaran, P., Shuaib, N. H. The impact of various nanofluid types on triangular microchannels heat sink cooling performance, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 3, (2011), pp. 767-773.
- Maxwell, J. C., A treatise on electricity and magnetism, Clarendon Press, Oxford, UK, 1873.
- Shi, W., Li, F., Lin, Q., Fang, G., Experimental study on instability of round nanofluid jets at low velocity. *Exp Therm Fluid Sci* 120, (2021), no. 110253.
- Teamah, M. A., Dawood, M. M., Shehata, A., Numerical and Experimental Investigation of Flow Structure and Behavior of Nanofluids Flow Impingement on Horizontal Flat Plate, *Experimental Thermal Fluid Science*, 74 (2015), pp. 235-246.
- Wang, S. J., Mujumdar, A. S. A comparative study of five low Reynolds number k- ϵ models for impingement heat transfer, *Applied Thermal Engineering*, 25, (2005), pp. 31-44.
- 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 (2022), pp. 337-354.