

**AL₂O₃-SU NANOAKIŞKANLI ÇAPRAZ AKIŞ-ÇARPAN JET AKIŞLI KANALLARA
YERLEŞTİRİLEN KANATÇIĞIN UZUNLUK DEĞİŞİMİNİN AKIŞ YAPISI VE ISI
TRANSFERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI****Koray Karabulut****Doğan Engin Alnak**Sivas Cumhuriyet University, Sivas Technical Sciences Vocational School, Electric and
Energy Department, Sivas, Turkey.ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-5680-0988>Sivas Cumhuriyet University, Technology Faculty, Manufacturing Engineering Department,
Sivas, Turkey.ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-0126-1483>**Özet**

Son yıllarda küresel iklim değişikliğinin etkisinin hissedilmeye başlanmasıyla Avrupa ülkeleri başta olmak üzere tüm dünyada yeşil ekonomiye geçiş çalışmaları hız kazanmaya başlamıştır. Bu kapsamda, enerjinin elde edilmesinin sürdürülebilirlik bakımından değerlendirilmesi başta olmak üzere kullanımının da tasarruflu ve verimli olması hedeflenmektedir. Bunun için öncelikle, enerji yoğun kullanılan sanayi sektörü başta olmak üzere; üretilen her türlü cihaz ve ekipmanın da enerji verimliliği yüksek ve uzun ömürlü sistemler olmasına dikkat edilmektedir. Elektronik sanayi sektöründe de son yıllarda yaşanan teknolojik ilerlemeyle birlikte; boyut ve hacimlerinde küçülmeler yaşanmaktadır. Ancak, küçük hacimlerde yüksek teknoloji ürünler kullanıcılar için avantajlı olsalar da; üreticiler için birim hacimde daha fazla ısı üretilmesi anlamına gelen sıkıntılı bir durum oluşturmaktadır. Bu durum, elektronik cihazlarda daha etkin soğutma tekniklerinin kullanılmasını gerekli kılmaktadır. 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 oluşturabilmektedir. Al₂O₃-Su nanoakışkan ısı transferi araştırmalarında yoğun olarak kullanılan bir ısı transferi akışkan olması karşın; ulaşılan literatür araştırmalarında çapraz akış ve çarpan jet akışın birlikte uygulandığı jet akış çalışmalarının sayılarının oldukça az olduğu tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada, küp ve yamuk modellerden olan ısı transferi ve kanallardaki akış yapıları kanatçiksiz, 30° ve 45° açılı kanatçıklı birleşik jet akışlı kanallarda su ve Al₂O₃-Su nanoakışkan kullanılarak sayısal olarak araştırılmıştır. Kanatçıklar, çarpan jet girişinden itibaren kanala sabit N=1,5D uzaklıkta yerleştirilmiş olup; kanatçık uzunlukları K=D ve K=1,5D olarak alınmıştır. Sayısal inceleme, 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 yüzeylerine 1000 W/m² lik sabit ısı akısı uygulanmıştır. Akışkanlar için çalışılan Reynolds sayısı aralığı 5000-9000'dir. %2 hacimsel konsantrasyonlu Al₂O₃-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 yamuk model yüzeyi için kanatçık uzunluğuna bağlı olarak ortalama Nu sayısının değişimleri olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, $Re=9000$ değerinde farklı kanat açıları (30° ve 45°) ve uzunlukları ($K=D$ ve $K=1,5D$) için Al_2O_3 -Su nanoakışkanının hız-akım ve sıcaklık konturu dağılımları görselleştirilmiştir. Reynolds sayısının 9000 değerinde $K=D$ ve $K=1,5D$ ve kanallardaki tüm model yüzeyleri için su ve Al_2O_3 -Su nanoakışkanı kullanılması durumlarında karşılaştırmalı olarak ortalama Nu sayısı (Nu_o) ve model yüzey sıcaklık değerleri (T_o) değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, $Re=9000$ ' de 45° açılı ve $K=1,5D$ uzunluklu kanatçıklı kanallarda Al_2O_3 -Su nanoakışkanı kullanılması durumunda kanatçiksiz ve su akışkanı kullanılan kanallara göre Nu_o sayısında küp ve yamuk şekilli modeller için sırasıyla %18,62 ve %19,51' lik artışlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çapraz Akış-Çarpan Jet Akışı, Nanoakışkan, Al_2O_3 -Su, Kanatçık

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF LENGTH CHANGE OF FIN PLACED IN CROSS FLOW-IMPINGING JET FLOW CHANNELS WITH Al_2O_3 -WATER NANOFLUID ON FLOW STRUCTURE AND HEAT TRANSFER

Abstract

With the impact of global climate change being felt in recent years, efforts to transition to a green economy have started to gain momentum all over the world, especially in European countries. In this context, it is aimed to evaluate the production of energy in terms of sustainability; and to make its use economical and efficient. For this, first of all, especially in the energy-intensive industrial sector; Attention is paid to ensure that all kinds of devices and equipment produced are systems with high energy efficiency and long life. With the technological progress in the electronics industry sector in recent years; decrement in size and volume. However, although high-tech products in small volumes are advantageous for users; This creates a troublesome situation for producers, which means more heat is produced in unit volume. This situation necessitates the use of more effective cooling techniques in electronic devices. 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. Although Al_2O_3 -Water nanofluid is a heat transfer fluid used extensively in heat transfer research; In the literature research reached, it has been determined that the number of jet flow studies in which cross flow and impinging jet flow are applied together is quite low. In this study, heat transfer and flow structures in channels, which are cube and trapezoidal models, were investigated numerically using water and Al_2O_3 -Water nanofluids in combined jet flow channels with 30° and 45° angled fins. The fins are located at a fixed $N=1.5D$ distance from the impinging jet inlet to the channel; fin lengths are taken as $K=D$ and $K=1.5D$. Numerical analysis was carried out by solving the energy and Navier-Stokes equations with the $k-\epsilon$ 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/m^2 was applied to the model surfaces. The Reynolds number range studied for fluids is 5000-9000. Thermophysical properties of 2% volumetric concentration Al_2O_3 -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 depending on the fin length for each cube and trapezoidal model surface in the channels. In addition, velocity-streamline and temperature contour distributions of Al_2O_3 -Water nanofluid were visualized for different fin angles (30° and 45°) and lengths ($K=D$ and $K=1.5D$) of $Re=9000$. The mean Nu number (Nu_o) and model surface temperature (T_o) values were evaluated comparatively when the Reynolds number was 9000 and $K=D$ and $K=1.5D$, and water and Al_2O_3 -Water nanofluids were used for all model surfaces in the channels. As a result of the study, 18.62% and 19.51% increments in Nu_o number were obtained with Al_2O_3 -Water nanofluid used in finned channels with 45° angle and $K=1.5D$ length at $Re=9000$ compared to the finless and water-fluid channels for the cube and trapezoidal models, respectively.

Keywords: Cross Flow-Impinging Jet Flow, Nanofluid, Al_2O_3 -Water, Fin

1. Giriş

Enerjinin elde edilmesinin sürdürülebilirlik bakımından değerlendirilmesi başta olmak üzere kullanımının da tasarruflu ve verimli olması hedeflenmektedir. Bunun için öncelikle, enerji yoğun kullanılan sanayi sektörü başta olmak üzere; üretilen her türlü cihaz ve ekipmanın da enerji verimliliği yüksek ve uzun ömürlü sistemler olmasına dikkat edilmektedir. Elektronik sanayi sektöründe de son yıllarda yaşanan teknolojik ilerlemeyle birlikte; boyut ve hacimlerinde küçülmeler yaşanmaktadır. Ancak, küçük hacimlerde yüksek teknoloji ürünler kullanıcılar için avantajlı olsalar da; üreticiler için birim hacimde daha fazla ısı üretilmesi anlamına gelen sıkıntılı bir durum oluşturmaktadır. Bu durum, elektronik cihazlarda daha etkin soğutma tekniklerinin kullanılmasını gerekli kılmaktadır. 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 ara yüzey ısı transferini ve gaz akışını araştırmak için yüksek hızlı sıkıştırılmış hava çarpmasını kullanmışlardır. Çalışmada, numune çarpının 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 TiO_2 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 Al_2O_3 -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 uygulamalarda geniş yer bulan ve ısı transfer performansı iyi olan Al_2O_3 -Su nanoakışkanı kullanılarak çarpan jet ve çapraz akışın birlikte uygulandığı kombine jet akış çalışmalarının yeterli sayıda olmadığı ve bu çalışmadaki gibi ayrıntılı kanal düzenlemelerine değinilmediği görülmektedir.

Bu çalışmada, küp ve yamuk modellerden olan ısı transferi ve kanallardaki akış yapıları kanatçiksız, 30° ve 45° açılı kanatçıklı birleşik jet akışlı $H=3D$ yükseklikli kanallarda su ve Al_2O_3 -Su nanoakışkanı kullanılarak sayısal olarak araştırılmıştır. Kanatçıklar, çarpan jet girişinden $N=1,5D$ konumunda yerleştirilmiş olup; kanatçık uzunlukları $K=D$ ve $K=1,5D$

olarak alınmıştır. Sayısal araştırma, zamandan bağımsız ve üç boyutlu olarak enerji ve Navier-Stokes denklemlerinin Ansys-Fluent programı kullanılarak k-ε türbülans modeli ile çözümlenerek 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 konsantrasyonlu Al₂O₃-Su nanoakışkanın termofiziksel özellikleri literatürde bulunan denklemler yardımıyla bulunmuştur. Çalışmanın sonuçları literatürdeki deneysel çalışma sonucu elde edilen korelasyonla karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu oldukları bulunmuştur. Ayrıca, farklı kanat açıları (30° ve 45°) ve uzunlukları (K=D ve K=1,5D) için Al₂O₃-Su nanoakışkanının hız-akım ve sıcaklık konturu dağılımları görselleştirilmiştir. Reynolds sayısının 9000 değerinde K=D ve K=1,5D ve kanallardaki tüm model yüzeyleri için su ve Al₂O₃-Su nanoakışkanı kullanılması durumlarında karşılaştırmalı olarak ortalama Nu sayısı (Nu_o) ve model yüzey sıcaklık değerleri (T_o) değerlendirilmiştir.

2. Akışkanların Termofiziksel Özellikleri

Bu çalışmada kullanılan çalışma akışkanlarından olan %2 hacimsel konsantrasyonlu Al₂O₃-Su (Alüminyum oksit-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 Alüminyum oksit 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

$$c_{p,nf} = (1 - \varphi)c_{p,bf} + \varphi c_{p,p} \quad (2)$$

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 | Al ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ -Su nanoakışkanı |
|------------------------|------------------------|--------------------------------|--|
| k (W/mK) | 0,6172 | 40 | 0,6488 |
| ρ (kg/m ³) | 995,8 | 3970 | 1188,23 |
| c _p (J/kgK) | 4178,4 | 765 | 3925,47 |
| 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 ($W/m^2.K$), 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)

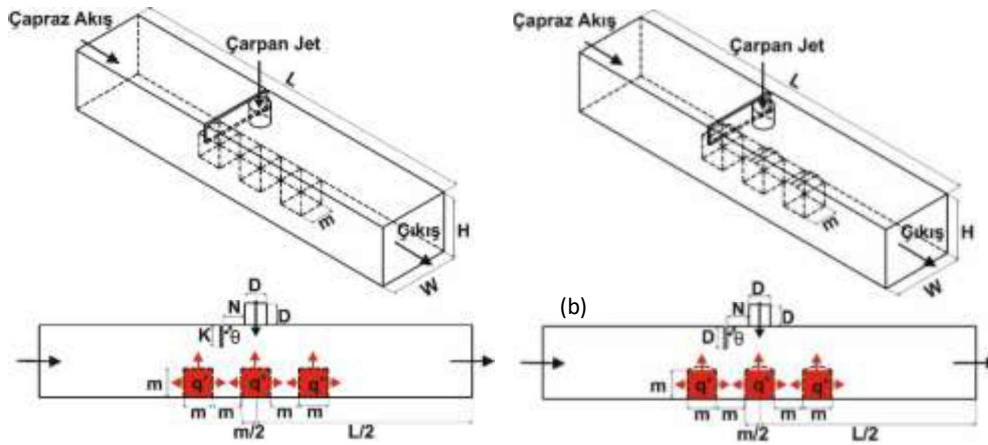
$$Re_k = \frac{\rho_a V_k D_{hk}}{\mu_a} \quad (17)$$

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

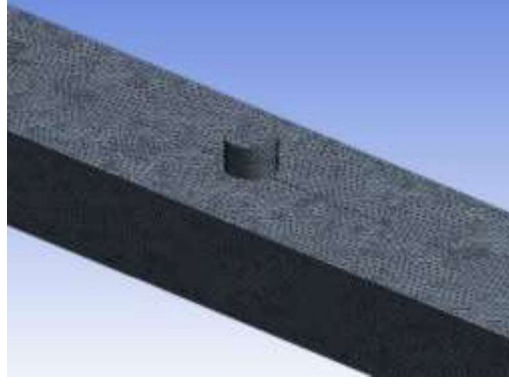
Bu eşitliklerde, akışkanın kanal ve jet akış hızları sırasıyla V_k ve V_j (m/s) ile gösterilmektedir.

4. Model Geometrileri

Çalışmadaki çapraz akış-çarpan jet akışlı kanatçıklı kanallar ve kanallardaki dairesel küp ve yamuk 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 dört yüzlü ağ yapısı Şekil 2' de gösterilmektedir.



Şekil 1. (a) küp (b) yamuk 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 | 1,5D |
| K | D, 1,5D |

Tablo 3. Çalışmada uygulanan sınır şartları

| |
|--|
| a) Akış hacmi, sürekli, üç boyutlu ve türbülanslıdır |
| b) Sıkıştırılamaz akışkan olarak su, %2 Al ₂ O ₃ -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. |

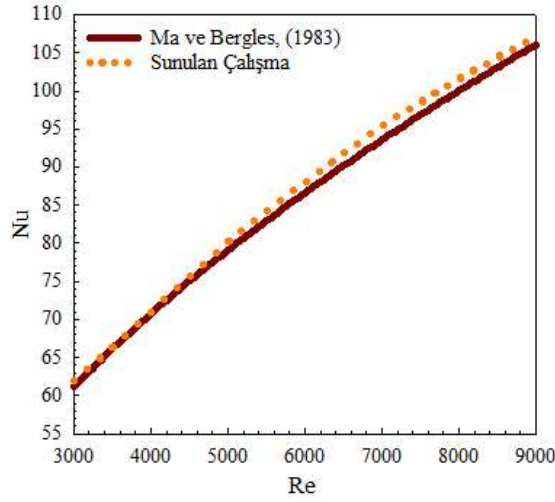
5. Bulgular ve Tartışma

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 4 A ve B' de sırasıyla çapraz akış-çarpan jet kombine akışın olduğu kanallarda bulunan küp ve yamuk modellerin kanaldaki diziliş sıralarına göre Nu sayılarının değişimleri

verilmektedir. Kanalların üst kısmında $N=1,5D$ kanatçık mesafesinde ve yatayla 30° ve 45° açılarında kanatçıklar kullanılmıştır. Kanallarda kullanılan su ve Al_2O_3 -Su nanoakışkanının çarpan jet girişinden itibaren kanatçık uzunluğunun $K=D$ ve $1,5D$ olduğu durumlardaki değişimlerine bağlı olarak ısı transferi üzerindeki etkileri incelenmektedir. Kanal girişinde ilk sırada yer alan modeller (Model 1) incelendiğinde, genel itibariyle modeller çapraz akış etkisi altındadır. Bunun yanı sıra, model yüzey şekline bağlı olarak akışkanın model üzerinde daha iyi temasta olabildiği 1. sırada bulunan yamuk model (Model 1) için yüzeydeki Nu sayısı değerlerinin; aynı sırada bulunan küp modelden daha yüksek olduğu grafiklerden görülebilmektedir. $Re=9000$ değerinde kanatçiksız durumda yamuk modelin Nu sayısı değeri, küp modelden %9,32 daha fazladır. Ancak, kanal yüzeyine kanatçık eklendiğinde çapraz akışın



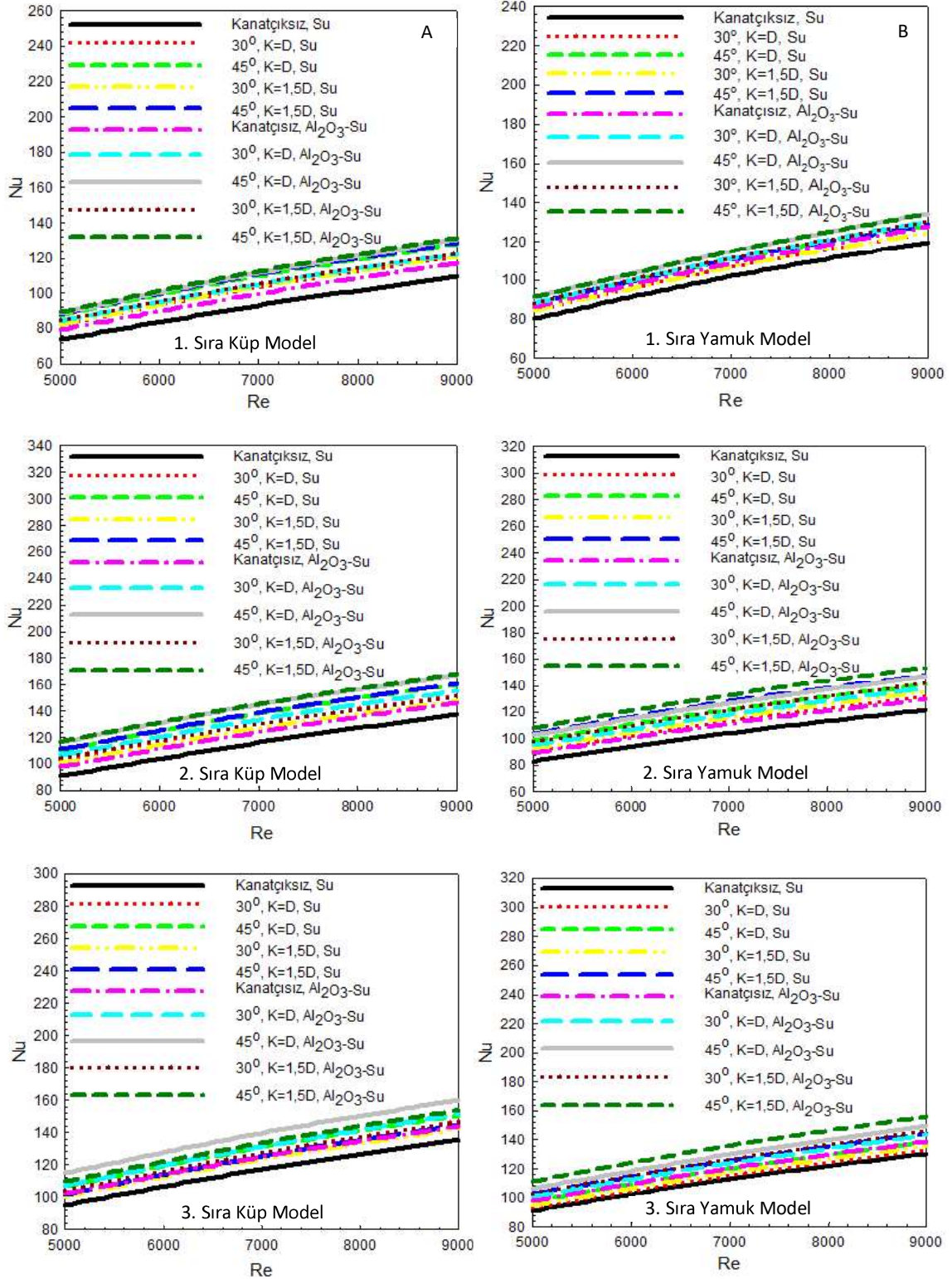
Şekil 3. Sunulan çalışma ve Ma ve Bergles, (1983)'in sonuçlarının karşılaştırılması

Model 1 yüzeylerine daha iyi yönlenebilmesi nedeniyle Nu sayısı değerleri her iki yüzey geometrisi için de artış sergilemektedir. Bununla birlikte, tüm model yüzeyleri ve model sıraları için Al_2O_3 -Su nanoakışkanının kullanımı; Nu sayısı değerlerinde artış elde edilmesini sağlamıştır. Böylece, yüzeylerden olan ısı transferi artarak; yüzeylerin soğuması iyileştirilmiştir. $Re=7000$ ve $K=D$ değerinde 30° kanatçık açılı durumda Al_2O_3 -Su nanoakışkanının, su akışkanına göre küp model için Nu sayısı artışı %12,97 iken; yamuk model için bu artış değeri %9,03 olmaktadır. 2. Sırada bulunan modeller, çapraz akışın yanında doğrudan çarpan jet akışının da etkisi altındadırlar. Dolayısıyla, elde edilen kombine jet akışı etkisi nedeniyle Model 1'e göre bu sırada bulunan (Model 2) her iki model yüzeyi için de daha yüksek Nu sayısı değerleri elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, model yüzey şeklinin etkisine bağlı olarak küp model yüzeyindeki birleşik jet akışı; yamuk model yüzeyine göre yüzey üzerinde daha fazla temasta bulunabildiğinden Nu sayısı değerleri de daha yüksektir. Ayrıca, kanatçık uzunluğunun D değerinden $1,5D$ değerine çıkarılması her iki akışkan için de (su ve nanoakışkan) yamuk model için Nu sayısı üzerinde artış şeklinde bir etki oluştururken; küp model için genel olarak azalma görülmektedir. Bu durumda kanatçığın akışta düzensizlik oluşturarak türbülanslı akım başlatması, model yüzey şeklinin değişimine bağlı olarak Nu sayısında beklenen artış etkisini her iki yüzey şekli için de gösterememektedir. Reynolds sayısının 9000 değeri için 45° açılı kanatçık ve nanoakışkan kullanımında kanatçık uzunluğunun D ' den $1,5D$ değerine çıkarılması sırasıyla küp ve yamuk modeller için Nu sayısında %0,25 ve %4,58' lik artışlar sağlanmasına neden olmuştur. Ayrıca, aynı Re sayısı ($Re=9000$) ve kanatçık kurulumunda (45° açı ve $K=1,5D$) nanoakışkanın; aynı kurulumda kanatçıklı kanaldaki su akışkanına göre Nu sayısı artış

değerleri sırasıyla küp ve yamuk model yüzeyleri için %4,36 ve %4,05 olmaktadır. Kanalin son sırasında bulunan modeller analiz edildiğinde, jet etkisinin azaldığı bu sıradaki modellerde küp model için her iki akışkanda genel olarak Nu sayısında bir azalma görülürken; yamuk model için nanoakışkan kullanılması durumunda Model 2' ye göre tüm kanatçık kurulumlarında artış elde edilmektedir. Bu durumda, yamuk modelin yüzey şekli sonucu model aralarındaki akışkanı da hareketlendirmesinin yanı sıra, nanoakışkanın suya göre artan yoğunluğu ve viskozitesi nedeniyle model yüzeyinde temasının artmasının etkili olduğu söylenebilir. Yamuk modelde, $Re=9000$ ve 45° açılı, $K=1,5D$ uzunluklu kanatçık için Model 3' ün Model 2' ye göre Nu sayısı değerinde %1,7 artış sağlanırken; aynı şartlarda küp modelde %9,27' lik azalış görülmektedir.

Tablo 4 ve 5' de $Re=9000$ için $H=3D$ kanal yüksekliğindeki kanatçiksız ve 30° ve 45° açılı, sırasıyla $K=D$ ve $K=1,5D$ kanatçık uzunluklu birleşik jet akışlı kanallarda bulunan her üç model yüzeyi için ortalama Nu sayısı (Nu_o) ve yüzey sıcaklığı (T_o) değerleri su ve Al_2O_3 -Su nanoakışkanları kullanılması durumlarında incelenmiştir. Her iki kanatçık uzunluklu kanalda da kanatçiksız duruma göre ortalama Nu sayısı (Nu_o) değerlerinde artış elde edilmektedir. $Re=9000$ için 45° açılı ve $K=1,5D$ uzunluklu kanatçıklı kanallarda Al_2O_3 -Su nanoakışkanı kullanılması durumunda; kanatçiksız ve su akışkanı kullanılan kanallara göre Nu_o sayısında küp ve yamuk şekilli modeller için sırasıyla %18,62 ve %19,51' lik artışlar elde edilmektedir. Aynı şartlarda $K=D$ kanatçık uzunluğu için bu artış değerleri sırasıyla %19,88 ve %15,95 olmaktadır. Görüldüğü gibi, kanatçık uzunluğunun değişimi model yüzey şekline göre Nu sayısında farklı artış değerlerine sebep olmaktadır. Bununla birlikte, her iki kanatçık uzunluklu kanalda da küp model için elde edilen Nu_o değerleri, yamuk modelden daha fazla olmaktadır. Ayrıca, artan Nu_o sayısı yüzeyden olan ısı transferinin artışını gösteren bir değer olarak; T_o değerlerinin de azalmasını sağlayarak soğuma performansının arttığının bir göstergesidir.

Şekil 5' de $Re=9000$ ' de Al_2O_3 -Su nanoakışkanı için kanatçiksız ve farklı kanatçık açısı (30° ve 45°) ve kanatçık uzunluklarında ($K=D$ ve $K=1,5D$) (a) hız akım çizgisi, (b) sıcaklık konturu dağılımları sergilenmektedir. Her iki model yüzeyi şekli için de kanalın girişinde ilk sırada bulunan Model 1 yüzeyleri çapraz akışın etkisi altındadır. Bununla birlikte, ikinci sırada bulunan model yüzeyinin tam üstünde olan çarpan jet akışı ile birlikte model yüzeylerinde kombine bir jet akışı etkimeye başlamaktadır. Bu etki, Model 3 yüzeyine de etki ettikten sonra kanal çıkışında son bulmaktadır. Hız akım çizgisi konturlarından da görülebildiği gibi kanallar içerisinde ve model yüzeyleri aralarında yeniden dolaşım bölgeleri oluşmaktadır. Oluşan bu yeniden dolaşım bölgeleri, akışkanın kendi içerisinde sirkülasyon halinde olduğu bölgeleri teşkil ettiğinden, sıcaklık dağılımında kanalın diğer bölgelerine göre sıcaklığın da daha fazla olduğu bölgeler olmaktadır. Ancak, kanala kanatçık eklenmesiyle çapraz akış ve çarpan jet akışı kanalın üst kısmından gitmeyip; model yüzeylerine doğru daha iyi yönlendirilebildiğinden yüzeylerde soğuma etkisi artmaktadır. 30° kanatçık açısına göre 45° açılı durumda birleşik jet akışı, model yüzeylerine daha iyi yönlendirilerek yüzeyler üzerinde akış hızı artırılabilirdiğinden soğuma etkisi de artmaktadır. Böylece, sıcaklık konturu dağılımlarından görülebildiği gibi model yüzeyleri etrafında kanaldaki diğer bölgelere göre daha sıcak olan akışkan bölgeleri azalmaktadır. Diğer taraftan, kanatçık uzunluğunun D değerinden $1,5D$ değerine çıkarılması model yüzey şekillerine de bağlı olarak akışkan içerisinde karışım etkisini artırmaktadır. Bu etki, özellikle model yüzeyleri aralarında akışkanın hareketlendirilmesi ile soğuma performansını değiştirmektedir. 45° açılı ve $1,5D$ kanatçık uzunluklu durumlarda akışkanın model yüzeyleri üzerindeki hızlanma etkisiyle olan ısı transferi sıcaklık konturu dağılımlarında görülebilmektedir.



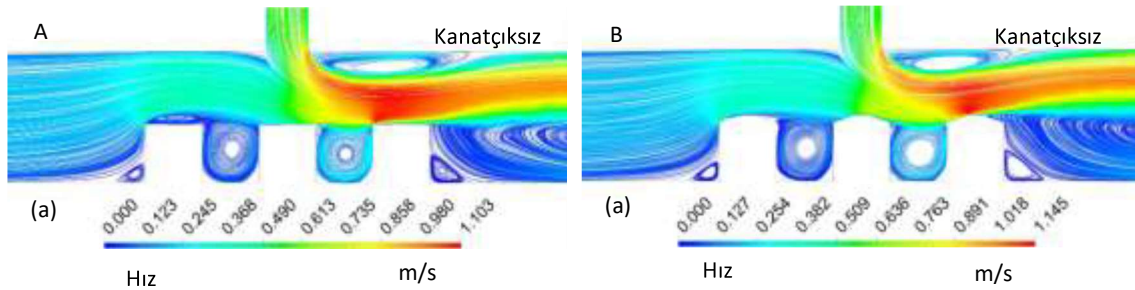
Şekil 4. Su ve Al₂O₃-Su nanoakışkanı kullanılan kanatçiksiz ve farklı kanatçık uzunluklu (K) ve açılı (θ) kanallardaki sıralanmalarına göre küp ve yamuk model yüzeylerindeki Nu sayısı değişimleri

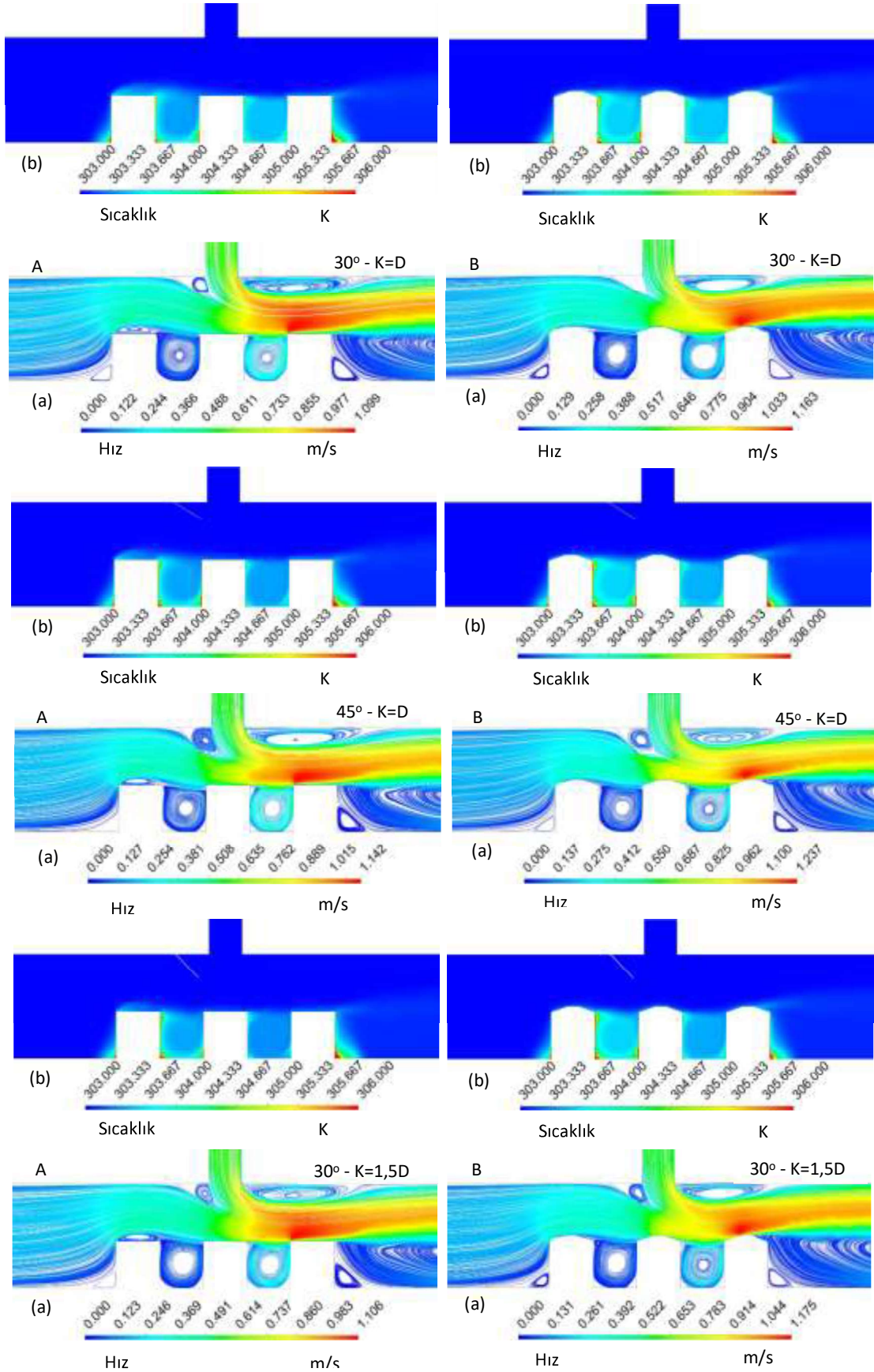
Tablo 4. Kanatçksız ve K=D kanatçık uzunluklu ve açılı kanallardaki tüm küp ve yamuk model yüzeylerindeki Nu_o ve T_o değışimleri

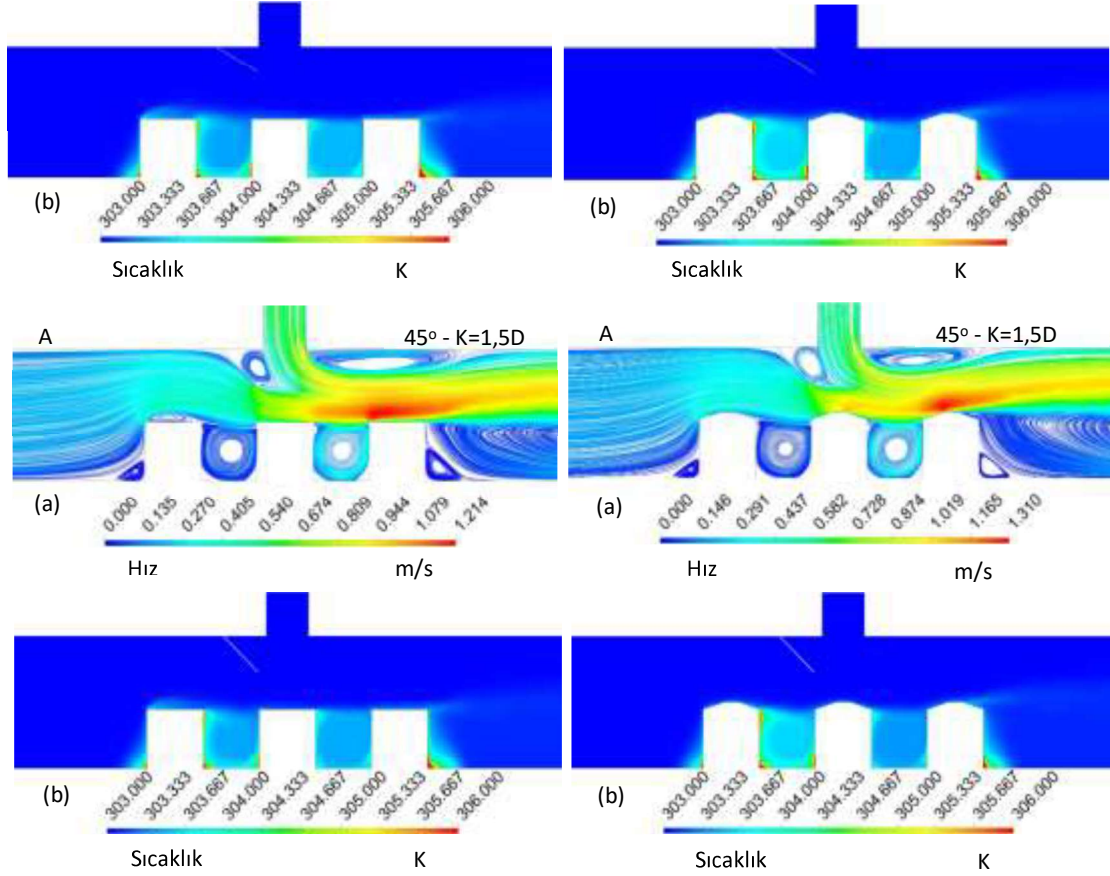
| Re=9000 - N=1,5D - K=D | | | H=3D | |
|------------------------|------------------------------------|-----------|-----------|-------------|
| | | | Küp Model | Yamuk Model |
| Kanatçksız, | Su | Nu_o | 127,421 | 123,979 |
| 30° Kanatçıklı | Su | Nu_o | 139,836 | 129,902 |
| 45° Kanatçıklı | Su | Nu_o | 146,381 | 136,166 |
| Kanatçksız | Al ₂ O ₃ -Su | Nu_o | 135,943 | 132,152 |
| 30° Kanatçıklı | Al ₂ O ₃ -Su | Nu_o | 143,109 | 137,415 |
| 45° Kanatçıklı | Al ₂ O ₃ -Su | Nu_o | 152,758 | 143,754 |
| Kanatçksız, | Su | T_o (K) | 304,955 | 305,039 |
| 30° Kanatçıklı | Su | T_o (K) | 304,857 | 304,952 |
| 45° Kanatçıklı | Su | T_o (K) | 304,686 | 304,781 |
| Kanatçksız | Al ₂ O ₃ -Su | T_o (K) | 304,698 | 304,772 |
| 30° Kanatçıklı | Al ₂ O ₃ -Su | T_o (K) | 304,638 | 304,721 |
| 45° Kanatçıklı | Al ₂ O ₃ -Su | T_o (K) | 304,552 | 304,611 |

Tablo 5. Kanatçksız ve K=1,5D kanatçık uzunluklu ve açılı kanallardaki tüm küp ve yamuk model yüzeylerindeki Nu_o ve T_o değışimleri

| Re=9000 - N=1,5D - K=1,5D | | | H=3D | |
|---------------------------|------------------------------------|-----------|-----------|-------------|
| | | | Küp Model | Yamuk Model |
| Kanatçksız, | Su | Nu_o | 127,421 | 123,979 |
| 30° Kanatçıklı | Su | Nu_o | 137,125 | 131,940 |
| 45° Kanatçıklı | Su | Nu_o | 144,887 | 140,338 |
| Kanatçksız | Al ₂ O ₃ -Su | Nu_o | 135,943 | 132,152 |
| 30° Kanatçıklı | Al ₂ O ₃ -Su | Nu_o | 140,320 | 139,578 |
| 45° Kanatçıklı | Al ₂ O ₃ -Su | Nu_o | 151,153 | 148,179 |
| Kanatçksız, | Su | T_o (K) | 304,955 | 305,039 |
| 30° Kanatçıklı | Su | T_o (K) | 304,888 | 304,918 |
| 45° Kanatçıklı | Su | T_o (K) | 304,662 | 304,712 |
| Kanatçksız | Al ₂ O ₃ -Su | T_o (K) | 304,698 | 304,772 |
| 30° Kanatçıklı | Al ₂ O ₃ -Su | T_o (K) | 304,670 | 304,688 |
| 45° Kanatçıklı | Al ₂ O ₃ -Su | T_o (K) | 304,528 | 304,542 |







Şekil 5. Kanatçıksız ve farklı kanatçık uzunluklu ve açılı kanallardaki

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

6. Genel Sonuçlar

Bu çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Model 1 incelendiğinde, genel itibariyle modeller çapraz akış etkisi altındadır. Bunun yanı sıra, model yüzey şekline bağlı olarak akışkanın model üzerinde daha iyi temasta olabildiği 1. sırada bulunan yamuk model (Model 1) için yüzeydeki Nu sayısı değerlerinin; aynı sırada bulunan küp modelden daha yüksektir.
- $Re=9000$ değerinde kanatçıksız durumda yamuk modelin Nu sayısı değeri, küp modelden %9,32 daha fazladır.
- Kanala kanatçık eklendiğinde çapraz akışın Model 1 yüzeylerine daha iyi yönlenebilmesi nedeniyle Nu sayısı değerleri her iki yüzey geometrisi için de artış sergilemektedir.
- Tüm model yüzeyleri ve model sıraları için Al_2O_3 -Su nanoakışkanının kullanımı; Nu sayısı değerlerinde artış elde edilmesini sağlamıştır.
- $Re=7000$ ve $K=D$ değerinde 30° kanatçık açılı durumda Al_2O_3 -Su nanoakışkanının, su akışkanına göre küp model için Nu sayısı artışı %12,97 iken; yamuk model için bu artış değeri %9,03 olmaktadır.
- Model 2, çapraz akışın yanında doğrudan çarpan jet akışının da etkisi altındadır. Dolayısıyla, Model 1'e göre bu sırada bulunan (Model 2) her iki model yüzeyi için de daha yüksek Nu sayısı değerleri elde edilebilmektedir.

- Bununla birlikte, model yüzey şeklinin etkisine bağlı olarak küp model yüzeyindeki birleşik jet akışı; yamuk model yüzeyine göre yüzey üzerinde daha fazla temasta bulunabildiğinden Nu sayısı değerleri de daha yüksektir.
- Kanatçık uzunluğunun D değerinden 1,5D değerine çıkarılması her iki akışkan için de (su ve nanoakışkan) yamuk model için Nu sayısı üzerinde artış şeklinde bir etki oluştururken; küp model için genel olarak azalma görülmektedir.
- Reynolds sayısının 9000 değeri için 45° açılı kanatçık ve nanoakışkan kullanımında kanatçık uzunluğunun D' den 1,5D değerine çıkarılması sırasıyla küp ve yamuk modeller için Nu sayısında %0,25 ve %4,58' lik artışlar sağlanmasına neden olmuştur.
- Model 3 analiz edildiğinde, jet etkisinin azaldığı bu sıradaki modellerde küp model için her iki akışkanda genel olarak bir azalma görülürken; yamuk model için nanoakışkan kullanılması durumunda Nu sayısında Model 2' ye göre tüm kanatçık kurulumlarında artış elde edilmektedir. - Yamuk modelde, $Re=9000$ ve 45° açılı, $K=1,5D$ uzunluklu kanatçık için Model 3' ün Model 2' ye göre Nu sayısı değerinde %1,7 artış sağlanırken; aynı şartlarda küp modelde %9,27' lik azalış görülmektedir.
- $Re=9000$ için 45° açılı ve $K=1,5D$ uzunluklu kanatçıklı kanallarda Al_2O_3 -Su nanoakışkanı kullanılması durumunda; kanatçiksız ve su akışkanı kullanılan kanallara göre Nu_o sayısında küp ve yamuk şekilli modeller için sırasıyla %18,62 ve %19,51' lik artışlar elde edilmektedir. Aynı şartlarda $K=D$ kanatçık uzunluğu için bu artış değerleri sırasıyla %19,88 ve %15,95 olmaktadır. - Her iki kanatçık uzunluklu kanalda da küp model için elde edilen Nu_o değerleri, yamuk modelden daha fazla olmaktadır.
- Artan Nu_o sayısı yüzeyden olan ısı transferinin artışını gösteren bir değer olarak; T_o değerlerinin de azalmasını sağlayarak soğuma performansının arttığının bir göstergesidir.

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 Cuo-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.