



Hareketli Bir Plakadan Olan Isı Transferinin farklı Nanoakışkanlar ve Çarpan Jetle İncelenmesi

Heat Transfer Analysis of a Moving Plate with different Nanofluids and Impinging Jet

Mustafa Kilic¹, Mine Efeoğlu¹

¹Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 01250, Adana, TÜRKİYE.

Başvuru/Received: 28/06/2021

Kabul / Accepted: 01/08/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2022

Öz

Bu çalışmada, nanoakışkanların çarpan akışkan jet tekniği ile oluşturduğu müşterek etkinin, yüksek ısı akılı hareketli bakır bir plakadan olan ısı transferine etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, literatürdeki mevcut çalışmalarını doğrulamak amacıyla temel akışkan olarak Cu-H₂O nanoakışkanın hareketsiz bir plakada farklı Reynolds sayılarında ısı transfer analizi yapılmıştır. Model sonuçları literatürdeki mevcut deneysel çalışmalarla karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. İkinci aşamasında ise hem hareketli hem de hareketsiz bir plakada Al₂O₃-H₂O nanoakışkanı kullanılarak farklı parçacık çaplarında, farklı plaka hızlarında, ısı transfer analizi yapılmıştır. Ayrıca hareketli bakır plakada, farklı tip nanoakışkan kullanılması durumunda ısı transferine olan etki de incelenmiştir. Sayısal çalışmada PHOENICS HAD programının düşük Reynolds sayılı k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak; nanoparçacık çapı D_p=40nm'den 10nm'ye azaltıldığında ortalama Nusselt sayısında %9,1'lik artış sağlandığı tespit edilmiştir. Plaka hızı V_{plaka}=0-6 m/s aralığında artırıldığında ortalama Nusselt sayısında %88,9 oranında artış sağlandığı, farklı nanoakışkanların karşılaştırılması durumunda ise, en iyi ısı transfer performansının Cu-H₂O nanoakışkanın gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Çarpan akışkan jet, Hareketli plaka, HAD, Isı transferi, Nanoakışkan.”

Abstract

In this study, the common effect of impinging fluid jet technique of nanofluids on heat transfer from a high heat flux moving copper plate was examined numerically. In the first phase of the study, heat transfer was analyzed for the basic fluid Cu-H₂O nanofluids in different Reynolds numbers on a stationary plate to confirm the current studies in the literature. The model results were compared and verified with existing experimental studies in the literature. In the second phase, heat transfer analysis was performed at different particle diameters, different plate velocities, and different volume ratios using Al₂O₃-H₂O nanofluid on both a moving and stationary plate. Furthermore, the effect of heat transfer was examined using different types of nanofluids in the moving copper plate. In the numerical study, the low Re numbered k-ε turbulence model of the PHOENICS CFD program was used. According to the study results, if the nanoparticle diameter is reduced from D_p=40 nm to 10 nm, the average Nusselt number increases by 9.1%. When the plate velocity was raised in the range of V_{plate}=0-6 m/s, the average Nusselt number increases by 88.9%. In the case of comparing different nanofluids, it is obtained that the best heat transfer performance was determined by Cu-H₂O nanofluid.

Key Words

“Impinging fluid jet, Moving plate, CFD, Heat transfer, Nanofluid.”

1. Giriş

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesi endüstriyel uygulamalarda kullanılan sistemlerin daha karmaşık yapıda olmasına sebep olmaktadır. Bu durum, sistemlerin ısı yükünü arttırmakta olup sistem arızalarına sebep olmaktadır. Bu uygulamalarda sistemin verimli ve güvenli çalışabilmesi için ısı yükünü sistemden uzaklaştırılması gerekir. Bu nedenle, yüksek ısı ve kütle transferine sahip uygulamalarda ısı transferi oldukça önemlidir (Sun vd., 2019). Isı transferi artırma yöntemlerinden biri olan nanoakışkanlar, temel akışkana (su, etilen glikol endüstriyel yağlar gibi) nano parçacıklar ilave edilerek oluşturulur. Nanopartikül kullanmanın önemli noktalarından biri, nanopartiküllerin, tek fazlı sıvının yoğunluk, viskozite ve termal iletkenlik gibi fiziksel özelliklerinde değişiklikler meydana getirmekte ve tek fazlı sıvınlardan daha yüksek bir termal iletkenliğe sahip olmasıdır. Bu sebeple, nanoakışkanların gelecekte, endüstrinin birçok alanında kullanılabileceği öngörülebilmektedir (Kakaç ve Pramuanjaroenkij, 2009).

Isı transferini arttırmak için kullanılan ve endüstride yüksek soğutma sağlayan önemli yöntemlerden birisi de çarpan jet tekniğidir. Çarpan jetler, akışkanın türbülans yoğunluğunu belirli bir bölgede yoğunlaştırarak, o bölgedeki ısı sınır tabakayı azaltır ve yüksek ısı transferi sağlar. Çarpan jet tekniği tekstil ve kâğıt ürünlerinin kurutulmasında, elektronik devre elemanlarının soğutulmasında, imalatta dokunun dondurulmasında, cam levhaların temperlenmesinde, kriyocerrahide, metallerin ısı işlemlerinde, uçak endüstrisinde buzlanmayı önlemede, türbin kanatlarının soğutulmasında kullanılmaktadır. Bununla birlikte çok sayıda endüstriyel uygulama (kâğıt ve tekstil ürünlerinin kurutulması, temperleme, metallerin ısı işlemi vb.) yüksek ısı ve kütle transferine sahip hareketli plaka ile ilgilidir (Buonomo vd., 2019). Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde nanoakışkan özelliklerinin belirlenmesine ve çarpan jetlerle ilgili akış özelliklerinin tespitine yönelik ayrı ayrı çalışmalar mevcut olmasına rağmen bu iki etkinin birlikte kullanıldığı ve ısı transferi ve akış özelliklerinin incelendiği çalışma sayısı oldukça azdır.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; nanoakışkan fikri ilk olarak Choi (1995) tarafından ortaya atılmış ve ısı transferini iyileştirdiği belirtilmiştir. Sarkar vd., (2015) ve Kasaeian vd., (2015) nanoakışkanların fiziksel ve ısı özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar yapmıştır. Suresh vd., (2011) ve Assef vd., (2014) tarafından nanoakışkanların ilk mühendislik uygulamaları yapılmıştır. Selvakumar ve Suresh (2012) elektronik sistemlerin soğutulması, Devdatta vd., (2009) bina ısıtma ve soğutma sistemleri, Ho vd., (2010) kaynama sürecinde nanoakışkanların ısı transferini iyileştirmesine yönelik araştırmalar yapmışlardır. Peyghambarzadeh vd., (2011) araç radyatöründe baz akışkan olarak saf su ve saf etilen glikole (EG) Al_2O_3 nanoartikülü eklenmesi durumunda ısı transferine olan etkiyi deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak, nanoakışkan kullanılması durumunda, baz akışkanına kıyasla yaklaşık %40'lık bir artış sağladığı ifade edilmiştir.

Lahari vd., (2018) çalışmalarında TiO_2 -ZnO/su hibrit nanoakışkanlarının farklı hacimsel oranlarının (% 0,5, %1,5, %2,0) ısı transferine etkisini bir ısı değiştiricide deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak, TiO_2 nanoakışkanının ısı iletkenliği temel akışkana kıyasla %1,5 hacimsel konsantrasyonda %14,8'lik bir artış, hacimsel konsantrasyon %2 olması durumunda %27,9'luk bir artış görülmüştür. ZnO nanoakışkanının ısı iletkenliği baz sıvısına kıyasla %1,5 hacimsel konsantrasyonda %11,5'luk bir artış, hacimsel konsantrasyon %2 olması durumunda %18,1'lik bir artış görülmüştür. Aynı hacimsel oranlarda hem ısı transfer hızında hem de ısı değiştirici etkinliğinde önemli gelişme göstermiştir. Isı değiştiricisinin termal iletkenliği ve etkinliği, TiO_2 ve ZnO hibrit nanoakışkanlarının %1,5 hacim konsantrasyonlarında sırasıyla % 40,9 ve % 13,5'lik artış sağladığı tespit edilmiştir.

Xuan ve Li (2000) Cu- su nanoakışkanı için nanopartikül hacim değişiminin, partikül çapının ve partikül geometrisinin ısı transferine olan etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak; hacimsel oran %2,5'ten %7,5'e artırılması durumunda nanoakışkan ısı iletkenlik katsayısı 1,24'ten 1,78'e arttığı tespit edilmiştir.

Khan vd., (2021) TiO_2 /su mono nanoakışkanı ile TiO_2 -Ag/su hibrit nanoakışkanın ısı iletkenliğini deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Çalışmada incelenen parametreler; farklı hacimsel konsantrasyonlar (0,1, 0,2, 0,3, 0,4) ve farklı akışkan sıcaklıkları (35°C, 40°C, 50°C, 60°C) dir. Sonuç olarak hem mono hem de hibrit nanoakışkanın, nanoakışkan sıcaklığı ve nanopartikül hacimsel konsantrasyonu artmasıyla termal iletkenliği arttığı ancak nanokompozit akışkanın ısı iletkenlik artışının, mono nanoakışkandan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. TiO_2 /su nanoakışkanı için % 4 hacimsel konsantrasyonda ve 60°C' de %18,4'lik maksimum iyileşme sağlanmıştır. Nanokompozit akışkanın 40°C'deki ısı iletkenliği, 60°C'deki mono nanoakışkanın iletkenliğiyle aynı değere sahip olduğu tespit edilmiştir.

Çarpan akışkan jetlerle ilgili çalışmalar incelendiğinde; Sharif ve Banerjee (2008) ısıtılmış hareketli bir plakaya çarpan jetin ısı transferine etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Jet çıkış Reynolds sayısı ($Re=5000-20000$), farklı plaka hızları ($U_{plaka}=0-2$ m/s) ve jet-çarpma plakası mesafesi ($H/W=6-8$) çalışmada incelenen parametrelerdir. Sayısal analiz için standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak, plakada hareket olmadığında jet plakaya çarptığında jetin her iki tarafında iki ters yönde dönen birincil girdapların oluştuğu, ancak plaka hareket ettiğinde akış çizgileri sağa doğru eğildiği belirlenmiştir. Jet Reynolds sayısı ve plaka hızının artması ortalama Nusselt sayısında önemli bir artış sağladığı tespit edilmiştir. Kilic vd., (2017) sabit ısı akıllı düz bir plakanın çarpan akışkan hava jeti yardımı ile soğutulmasını farklı parametreler için incelemiştir. $Re=4000-10000$ aralığında artırılması ortalama Nusselt sayısında % 49,5'lik bir artış sağlandığı, $H/D_h=4-10$ aralığında artırılmasında ise %17,9'luk artış sağlandığı belirlenmiştir. Kilic ve Başkaya (2017) soğutucu olarak çarpan akışkan jet kullanılan sabit ısı akıllı bir yüzeyde ısı transferinin farklı geometride akış yönlendiriciler kullanılarak iyileştirilmesini sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak; ısı transferinde akış yönlendirici kullanılmamasının, akış yönlendirici kullanılmaması durumuna göre %28'e oranında bir artış sağlayabildiği görülmüştür.

Nanoakışkan ve çarpan jetlerin müşterek etkisini inceleyen çalışmalar incelendiğinde; Buonomo vd., (2019) nanoakışkanın ısıtılmış hareketli bir yüzeye çarpıtılmasıyla oluşan ortak etkinin akış ve ısı transfer analizini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışma sıvısı olarak su ve Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanılmıştır. Sayısal model için ANSYS FLUENT paket programının k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Çalışmada, jet-hedef yüzey mesafesinin ($H/W=6-10$) iki değeri için iki geometrik yapı oluşturulmuştur. Nanopartikül konsantrasyonu $\phi=0\%-6\%$ aralığında, Reynolds sayısı $Re=5000,20000$ değerlerinde, plaka hızı $U_p=0$ m/s, 0,8 m/s, 2 m/s aralığında çalışılmıştır. Sonuç olarak; hareketli plaka çarpma noktasında yerel Nusselt sayısını önemli ölçüde azaltmıştır. Reynolds değeri ve plaka hızı arttıkça ortalama Nusselt sayısı artmıştır. Hacimsel oran ve jet-hedef yüzey mesafe oranı arttıkça yerel Nusselt sayısı da artmıştır. Nanoakışkanın kullanılması durumunda viskozitede artış meydana gelmiştir bu da hareketli plakanın daha fazla sürüklenmesine ve hareketli yüzeyden daha fazla kütle akış oranının olduğu belirlenmiştir.

Barewar vd., (2019) ZnO-su nanoakışkanının ısıtılmış bakır levha yüzeyine çarpıtılması ile ısı transfer özelliklerini farklı jet-plaka yüzey mesafesi (2-7,5) ve farklı hacim konsantrasyonunda ($\phi =\% 0,02 -\% 0,1$) deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak; ZnO nanoakışkanı için partikül konsantrasyonu arttıkça ısı transferinde artış meydana geldiği, hacimsel konsantrasyon $\phi =\% 0,1$ olması durumunda saf su ile karşılaştırıldığında ısı transferinde %51'lik bir artış görülmüştür. Jet-plaka (H/D) mesafesinin jet çarpma soğutma işleminde önemli olduğu ve ZnO nanoakışkanı $\phi =\% 0,1$ hacimsel konsantrasyonda jet-plaka mesafesi $H/D=3,5$ olması durumunda ısı transferinde maksimum iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Kilic ve Ali (2019) çalışmalarında nanoakışkanlar ve çoklu jetler kullanılması durumunda ısı transferi ve akış özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak; nanoakışkan hacim oranının $\phi =\% 2-\% 4$ aralığında artırıldığında ortalama Nusselt sayısının %10,4 arttığı, en iyi ısı transferi performansının Cu-su nanoakışkanı ile elde edildiği ve çoklu jetlerin konumlarının ısı transferinde önemli bir belirleyici olduğunu tespit etmişlerdir. Ersayın ve Selimefendigil (2013) hareketli bir plakaya Al_2O_3 -su nanoakışkanı için oluşturulan çarpan jetin, titreşimli ve titreşimli olmayan akışın ısı transferi ve akış özellikleri sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmada nanopartikül hacim oranı ($\phi=0, 2, 4, 6$), plaka hızı ($U_{plaka}=0,25, 0,5, 1,2$) Reynolds sayısı ($Re=100, 200, 400$), nanopartikül titreşim frekansı (1Hz, 2Hz, 4Hz, 8Hz) değerlerinde çalışılmıştır. Plaka hızı değişirken nanopartikül hacimsel konsantrasyonu $\phi =\% 4$ ve Reynolds değeri $Re=100$ alınmıştır. Sonuç olarak; plaka hareketsiz durumdayken çarpan jet plakanın sağ ve sol bölümlerinde simetrik iki girdap oluşturduğu ancak plaka + x yönünde hareket ettiğinde termal ve hız akım çizgilerinin sağa doğru eğildiği tespit edilmiştir. Düşük plaka hızlarında, jet akışının durma noktaları daha belirgin olduğu ve bu noktalarda Nusselt sayısının maksimum değere ulaştığı ancak artan plaka hızları için bu belirginliğin azaldığı tespit edilmiştir. Nanopartikül hacimsel konsantrasyonu arttıkça toplam ısı transfer oranının arttığı belirlenmiştir. Titreşimli jet çarpması için frekansın artması toplam ısı aktarım hızını arttırdığı tespit edilmiştir.

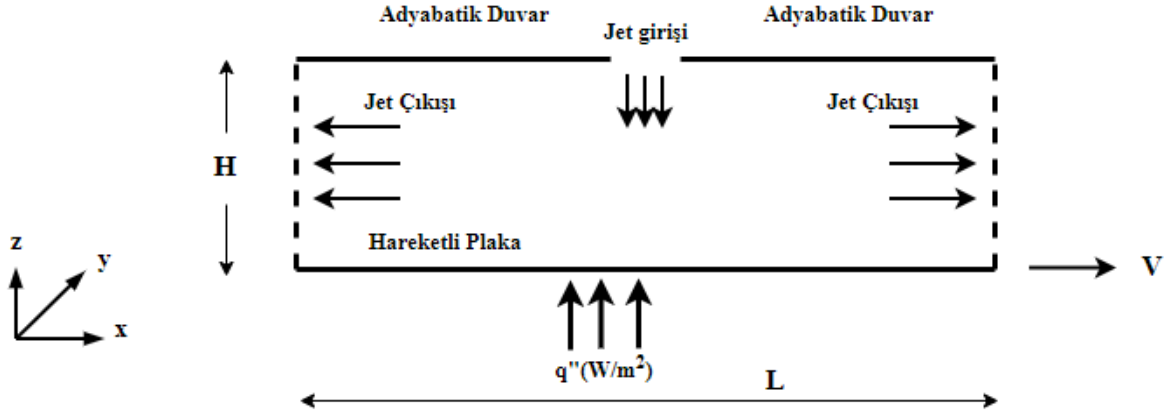
Başaran ve Selimefendigil (2013) laminar bir akış için ısıtılmış, hareketli bir plakaya çift çarpan jetlerin dikdörtgen bir kanalda ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışma sıvısı olarak su ve Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanılmıştır. Jet çıkışı Reynolds sayısı ($Re=50-200$), plaka hızı ($U_p=0,0,5,1,2$ m/s) ve nanoakışkan hacimsel oran ($\phi=0\%-6\%$) etkisi araştırılmıştır. Sayısal analiz için FLUENT paket programı kullanılmıştır. Sonuç olarak, plaka hızı arttıkça Nusselt sayısı artmıştır. Nusselt sayısındaki maksimum artış sabit plakada çarpma bölgesinin yakınında, hareketli plakada ise çıkışta elde edilmiştir. Re sayısı arttıkça, ısıl sınır tabaka incelmış ve böylece ısı transferi artmıştır. Nanopartikül hacimsel oranın artması Nusselt sayısını arttırdığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, farklı tipte nanoakışkanların, ısı transferini artırma yöntemlerinden biri olan çarpan akışkan jet tekniği ile kullanılmasıyla, hareketli bir yüzeyden olan ısı transferi artırılmaya çalışılmıştır. Literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak nanoakışkanlar, çarpan jet tekniği ile kullanılmış ve bu durumda oluşan müşterek etkinin ısı transferine etkisi, farklı parametreler için incelenmiş ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Bu çalışmadaki temel amaç; son derece karmaşık olan nanoarçacıkların temel akışkan içindeki davranışlarının belirlenmesi, nanoakışkanların çarpan jet tekniğinde kullanılması ile oluşan yoğun türbülans etkilerinin ortaya konması ve bunun ısı transferine olan etkisinin modellenmesi ve bu modelin literatürde yer alan deneysel sonuçlarla doğrulanmasıdır.

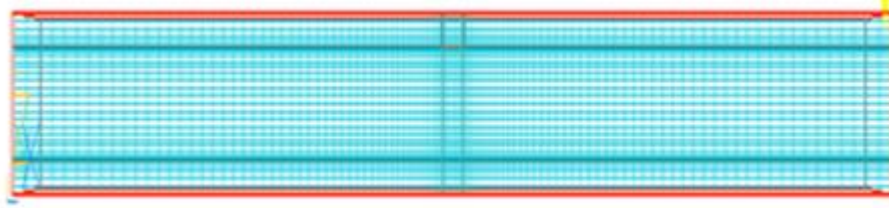
2. Materyal ve Metot

2.1 Model Geometrisi

Bu çalışmada, nanoakışkanlar kullanılarak hareketli bir plakadan olan ısı transferinin iyileştirilmesi sayısal olarak incelenmiştir. Problem zamandan bağımsız olarak çözülmüştür. Çalışmada, hedef plaka boyutları 110x40x32 cm olarak modellenmiştir. Kanal boyunca yerleştirilmiş plakanın yüzeyinde sabit ısı akısı ($q''= 222000$ W/m²) olduğu kabul edilmiştir. Sayısal analiz için farklı türbülans modelleri denenmiş ve uygulanan Reynolds değerinde deney sonuçları ile uyumlu sonuçlar elde edildiğinden, PHOENICS HAD programının düşük Re sayılı k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Kütle korunumu, momentum ve enerji denklemlerine uygun sınır şartları verilerek oluşturulan modelde ışınlı olan ısı transferi ihmal edilmiş ve sadece türbülanslı, zorlanmış taşınım olan ısı transferi dikkate alınmıştır. Şekil 1'de problemin HAD model geometrisi ve Şekil 2'de hücre yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1. HAD model geometrisi



Şekil 2. Hücre yapısı

Korunum denklemleri:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho U_i \frac{\partial U_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right] \quad (2)$$

$$\rho c_p U_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho c_p \overline{u_i T} \right] \quad (3)$$

Modelin taşıma denklemleri:

$$\rho U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\rho U_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + f_1 C_1 \mu_t \frac{\epsilon}{k} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - f_2 C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

Türbülanslı kinetik viskozite:

$$\mu_t = f_\mu C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

$$\sigma_k = 1.00; \quad \sigma_\varepsilon = 1.314; \quad C_1 = 1.44; \quad C_2 = 1.92; \quad C_\mu = 0.09 \quad (7)$$

Lam-Bramhorst düşük Reynolds sayısı k-ε modelinin sönmleme fonksiyonları aşağıdaki denklemlerde sunulmuştur.

$$f_\mu = [1 - \exp(-0.0165 Re_z)]^2 \left(1 + \frac{20.5}{Re_t} \right) \quad (8)$$

$$f_1 = \left(1 + \frac{0.05}{f_\mu} \right)^3 \quad (9)$$

$$f_2 = 1 - \exp(-Re_t^2) \quad (10)$$

Burada,

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

$$Re_z = \frac{\rho k^{1/2} z}{\mu} \quad (12)$$

Bu çalışmada kullanılan sınır şartları Tablo 1'de gösterilmiştir. Bu çalışmada; kanal çıkışında x yönündeki U,V,W hızları ile türbülans kinetik enerjisi ve yayılma oranının değişmediği, kanal çıkışından kanal içerisine bir ters akışın olmadığı ve deney düzeneğinde kanal uzunluğunun daha uzun olduğu ve çıkışın daha ileriki bir bölgeden meydana geldiği kabulü yapılmıştır.

Tablo 1. Sınır şartları.

	U(m/s)	V(m/s)	W(m/s)	T (K)	k	ε
Jet	U=0	V=0	W= W _{giriş}	T=T _{giriş}	(T ₁ W _{jet}) ²	(C _μ C _d) ^{3/4} $\frac{k^{3/2}}{L}$
Plaka	U=U _{plaka}	V=0	W=0	q"=q"yüzey	k = 0	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0$
Çıkış	$\frac{\partial U}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial V}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial W}{\partial x} = 0$	T=T _{çıkış}	$\frac{\partial k}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0$
Ön ve Arka Duvar	U=0	V=0	W=0	$\frac{\partial T}{\partial y} = 0$	--	--
Üst Duvar	U=0	V=0	W=0	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$	--	--

2.2 Matematiksel Formülasyon

Bu çalışmada iletimle ve ışınımla olan ısı kayıpları ihmal edilmiş ve yüzeyde tanımlanan ısı akısının tamamının taşınım ile akışkana geçtiği kabulü yapılmıştır.

Yüzeyden taşınım ile olan ısı transferi;

$$Q_{taşınım} = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (13)$$

Burada $Q_{tasımın}$ hedef plaka yüzeyindeki ısı değeri, h ısı taşınım katsayısı, A taşınım yüzey alanı, ΔT ($\Delta T = T_{yüzey} - T_{yığın}$) ölçülen yüzey sıcaklığı ile akışkan ortalama sıcaklığı arasındaki farktır.

Nusselt sayısı (Nu);

$$Nu = \frac{(Q_{tasımın} \cdot D_h)}{(T_{yüzey} - T_{yığın}) \cdot k_{nf}} \quad (14)$$

Burada T_s ölçülen yüzey sıcaklığı, D_h hidrolik çap ve k_{nf} ise nanoakışkan ısı iletkenlik katsayısıdır.

Ortalama Nusselt sayısı ise;

$$Nu_{ort} = \frac{h_{ort} \cdot D_h}{k_{nf}} \quad (15)$$

Reynolds sayısı (Re); akış karakteristiğinin belirlenmesinde (akışın laminar veya türbülanslı olup olmadığını belirlemek için) kullanılmaktadır. Reynolds sayısı;

$$Re = \frac{(\rho_{nf} \cdot V_{jet} \cdot D_h)}{(\mu_{nf})} \quad (16)$$

Burada ρ_{nf} nanoakışkan yoğunluğu, V_{jet} jet çıkış hızı ve μ_{nf} nanoakışkan dinamik viskozitesidir.

Nanoakışkan yoğunluğu ise (Pak ve Cho 1998) eşitliği ile hesaplanmıştır;

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi) \cdot \rho_{bf} + \varphi \cdot \rho_p \quad (17)$$

Burada ρ_{bf} temel akışkan (su) yoğunluğu, φ nanoakışkan hacimsel oranı, ρ_p ise nanoakışkan içerisindeki katı parçacıkların yoğunluğudur.

Nanoakışkan hacimsel oranı ise;

$$\varphi = \frac{1}{(1/\omega) \cdot (\rho_p - \rho_{bf})} \quad (18)$$

Burada ω nanoakışkan ile temel akışkanın yoğunlukları arasındaki farktır (Pak ve Cho 1998).

Nanoakışkan özgül ısısı ise (Wang vd., 2006);

$$C_{p_{nf}} = \frac{\varphi \cdot (\rho \cdot C_p)_p + (1 - \varphi) \cdot (\rho \cdot C_p)_f}{(\rho_{nf})} \quad (19)$$

Burada ρ_{nf} nanoakışkanın yoğunluğu, $C_{p(p)}$ parçacığın özgül ısısı, $C_{p(f)}$ temel akışkanın özgül ısısıdır.

Nanoakışkanın ısı iletim katsayısı ise (Corcione, 2011);

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1 + 4,4 Re^{0,4} Pr_{bf}^{0,66} \left[\frac{T}{T_{fr}} \right]^{10} \left[\frac{k_p}{k_{bf}} \right]^{0,03} \varphi^{0,66} \quad (20)$$

Burada Re_p nanoparçacık Reynolds sayısı ($Re_p = \frac{2\rho_{bf}k_{bf}T}{\pi\mu_{bf}^2d_p}$), φ parçacık hacimsel oranı, Pr_{bf} temel akışkan Prandtl sayısı, T nanoparçacık sıcaklığı, T_{fr} temel akışkan donma sıcaklığı, k_{bf} temel akışkanın iletim katsayısı, k_p ise nanoparçacıkların ısı iletim katsayısıdır.

Nanoakışkanın dinamik viskozitesi ise şu şekilde hesaplanmıştır (Batchelor, 1977).

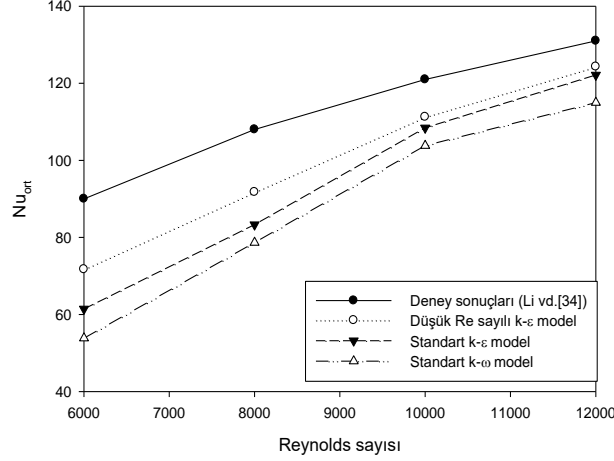
$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 + 2,5 \varphi + 4,698 \varphi^2) \quad (21)$$

Burada φ nanoakışkan hacimsel oranı, μ_{bf} ise temel akışkanın dinamik viskozitesidir.

2.3 Sayısal Sonuçların Doğrulanması

Bu çalışmada; yüzeylere yakın bölgelerde hidrodinamik sınır tabakada meydana gelebilecek değişimlerin daha iyi modellenmesi amacıyla hücre yapısı jet girişi ve bakır plakanın yüzeyinde yoğunlaştırılmıştır. Öncelikle sayısal sonuçların iterasyon sayısından ve

hücre sayısından bağımsızlaştırılması sağlanmıştır. Buna göre; iterasyon sayısı 1000 ile 5000 arasında, hücre sayısı 25 ve 34 aralığında (z yönünde) çalışılmıştır. Sonuç olarak; hücre sayısı 110x40x32 ve iterasyon sayısı 3000 olduğunda sonuçların hücre sayısından ve iterasyon sayısından bağımsız olduğu görülmüştür. Çalışmada Reynolds değerleri $Re=16000$ olarak alınmıştır. Bu sebeple, düşük Re sayılı k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar, deneysel sonuçlar (Li vd., 2012) ile karşılaştırılmış ve arasındaki farkın $Re=12000$ için %5'in altında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Düşük Re sayılı k- ϵ türbülans modeli, standart k- ϵ türbülans modeli ve standart k- ω türbülans modeli ile karşılaştırılmış ve deney sonuçlarını daha iyi bir şekilde temsil edebildiği görülmüştür. Farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sayısal sonuçların deney sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 3'te sunulmuştur.



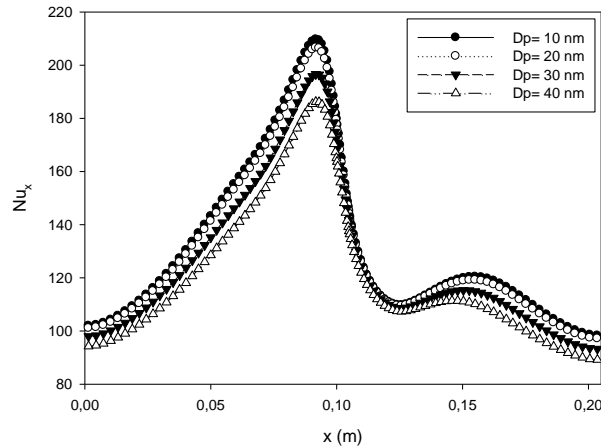
Şekil 3. Cu-H₂O nanoakışkanı için model sonuçlarının deney sonuçları ile ($\phi=1,5\%$) karşılaştırılması (Li vd., 2012).

3. Bulgular ve Tartışma

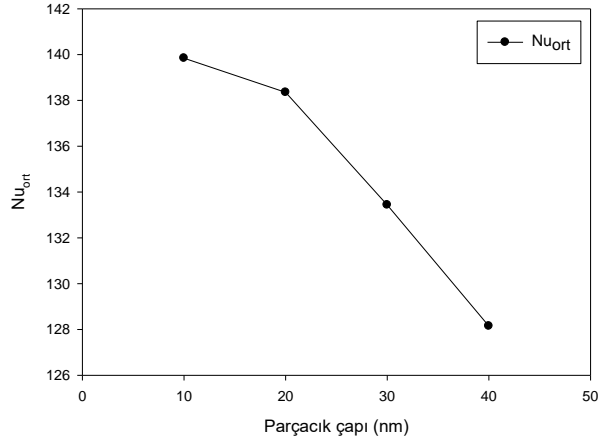
Bu bölümde sayısal sonuçlar 3 farklı parametre için incelenmiştir. Çalışmada incelenen parametrelerin sonuçları aşağıda sunulmuştur.

3.1 Al₂O₃-H₂O Nanoakışkanın Farklı Parçacık Çaplarında Isı Transferine Etkisi ($V_{plaka}=2$ m/s)

Bu parametrede Al₂O₃-H₂O nanoakışkanı kullanılarak oluşturulan bir çarpan jet için, farklı parçacık çaplarının ($D_p=10$ nm, 20 nm, 30 nm, 40 nm) ısı transferine etkisi incelenmiştir. Jet giriş sıcaklığı $T_{giriş}=20$ °C, $Re=16000$ ve plaka hızı $V_{plaka}=2$ m/s'dir. Şekil 4'te yerel Nusselt sayısını, farklı nanoparçacık çapları için değişimi gösterilmiştir. Şekil 5'te ise ortalama Nusselt sayısının değişimi sunulmuştur.

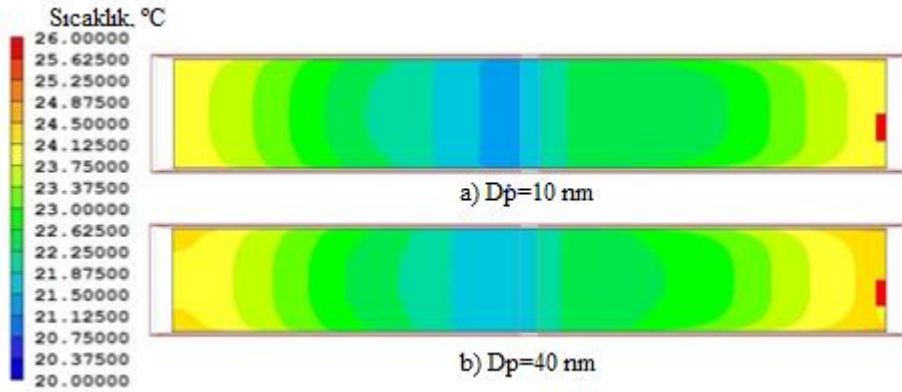


Şekil 4. Farklı parçacık çaplarının yerel Nusselt sayısına etkisi.



Şekil 5. Farklı parçacık çaplarının ortalama Nusselt sayısına etkisi.

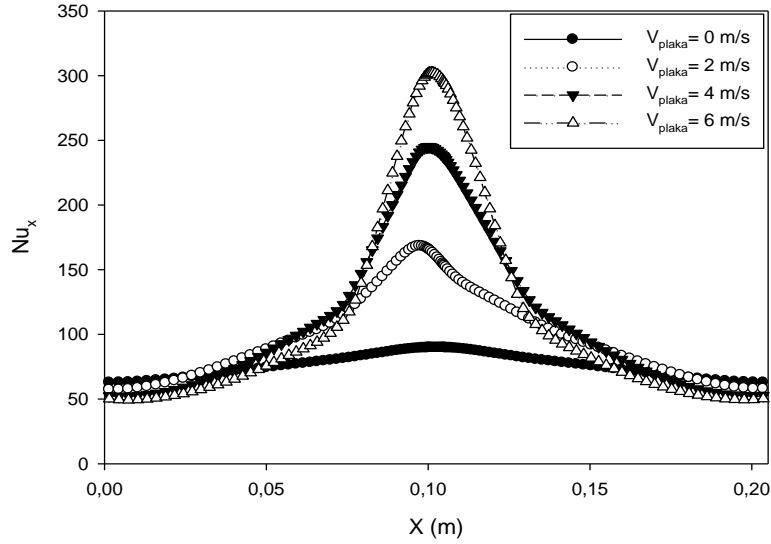
Nanoakışkan parçacık çapı azaldıkça (katı parçacık yüzey alanının artışına bağlı olarak) ortalama Nusselt sayısının arttığı ve yüzey sıcaklığının düştüğü belirlenmiştir. Ancak ortalama Nusselt sayısındaki bu artışın, azalan parçacık çapları için azalarak devam ettiği tespit edilmiştir. Parçacık çapı $D_p=40-30$ nm aralığında azaltıldığında ortalama Nusselt sayısında % 4,1'lik bir artış olduğu, $D_p=30-20$ nm aralığında azaltıldığında % 3,7'lik bir artış olduğu, $D_p=20-10$ nm aralığında azaltıldığında ise ısı transferinde % 1,1'lik bir artış olduğu belirlenmiştir. En yüksek ısı transfer artışının, $D_p=40-10$ nm aralığında azaltıldığında, ortalama Nusselt sayısında % 9,1 olarak meydana geldiği belirlenmiştir. Şekil 6'da plaka yüzeyinde oluşan sıcaklık konturları $D_p=10$ nm ve $D_p=40$ nm değerleri için gösterilmiştir.



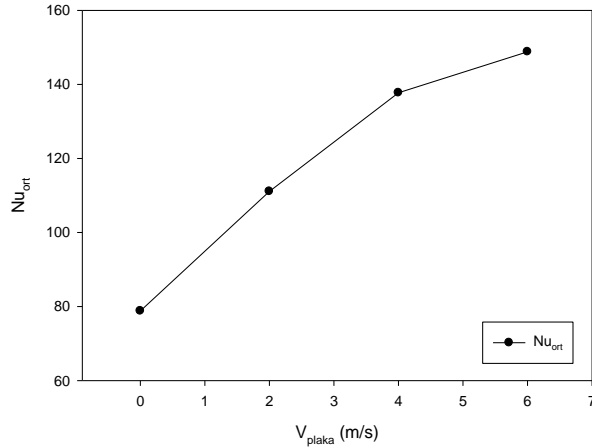
Şekil 6. Plaka Sıcaklık konturları (a) $D_p=10$ nm (b) $D_p=40$ nm

3.2 $Al_2O_3-H_2O$ Nanakışkanının Farklı Plaka Hızlarında Isı Transferine Etkisi ($V_{plaka}=0$ m/s, 2m/s, 4m/s, 6m/s)

Bu parametrede $Al_2O_3-H_2O$ nanoakışkanı kullanılarak oluşturulan bir çarpan jet için, farklı plaka hızlarının ($V_{plaka}=0$ m/s, 2m/s, 4m/s, 6m/s) ısı transferine etkisi incelenmiştir. Nanoakışkanlar $\phi=2,0$ hacimsel orandadır. Jet giriş sıcaklığı $T_{giriş}=20^\circ C$, ve Reynolds sayısı $Re=16000$ 'dir. Şekil 7'de farklı plaka hızları için elde edilen yerel Nusselt sayısının değişimi, Şekil 8'de ortalama Nusselt sayısının değişimi verilmiştir.



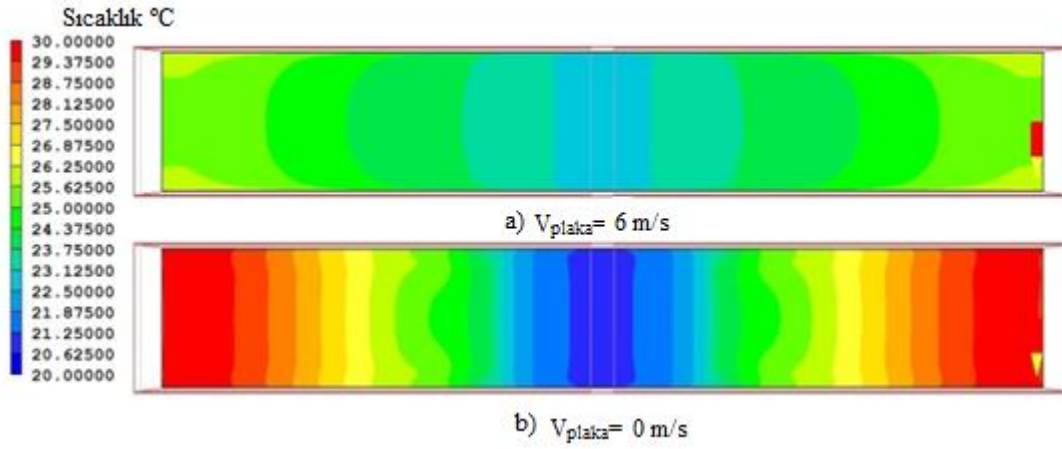
Şekil 7. Farklı plaka hızlarının yerel Nusselt sayısına etkisi.



Şekil 8. Farklı plaka hızlarının ortalama Nusselt sayısına etkisi.

Plaka hızı arttıkça özellikle çarpma bölgesinde yerel Nusselt sayısının arttığı, çarpma bölgesinde sağlanan yüksek ısı transfer etkisinin plaka hareket yönünün aksi yönünde yer değiştirdiği tespit edilmiştir. Plaka hızının artışına bağlı olarak Ortalama Nusselt sayısının (Nu_{ort}) değerinin de arttığı, ancak bu artışın azalarak devam ettiği tespit edilmiştir. Plaka hareketinin yönünde akan akışkan için, düşük hızlarda oluşan yerel Nusselt sayıları daha düşük, ters yönde oluşan yerel Nusselt sayılarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi; akışın plaka hareketine bağlı olarak hızının aynı yönde olması ve ters yönde olduğu bölgede hidrodinamik sınır tabakanın azalması ve ısı sınır tabakanın artmasından dolayı olduğu söylenebilir.

Plaka hızı arttıkça hidrodinamik sınır tabakanın arttığı dolayısıyla ısı sınır tabakanın azaldığı ve ısı taşınım katsayısının arttığı görülmüştür. Plaka hızı, $V_{plaka} = 0-2$ m/s aralığında artırıldığında Ortalama Nusselt sayısındaki artış (Nu_{ort}) % 40,9, $V_{plaka} = 2-4$ m/s aralığında artırıldığında Ortalama Nusselt sayısındaki artış (Nu_{ort}) %23,9, $V_{plaka} = 4-6$ m/s aralığında artırıldığında Ortalama Nusselt sayısındaki artış (Nu_{ort}) %8,1 olarak belirlenmiştir. Şekil 9'da farklı plaka hızları için çarpma plakası üzerinde oluşan sıcaklık konturları görülmektedir.



Şekil 9. Plaka Sıcaklık konturları a) $V_{plaka}=6$ m/s b) $V_{plaka}=0$ m/s.

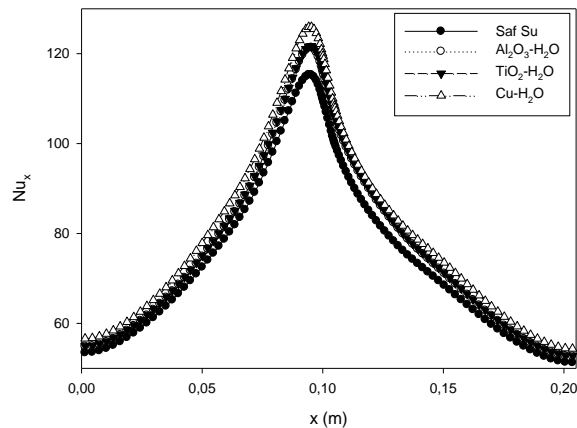
3.3 Farklı Tip Nanoakışkanların Isı Transferine Etkisi ($V_{plaka}=2$ m/s)

Bu parametrede farklı tip nanoakışkanlar kullanılarak (Cu-H₂O, Al₂O₃-H₂O, TiO₂-su ve saf su) bir çarpan jetin ısı transferine olan etkisi incelenmiştir. Nanoakışkanlar $\phi=2,0$ hacimsel orandadır. Jet giriş sıcaklığı $T_{giriş}=20^{\circ}\text{C}$, $Re=16000$ ve plaka hızı $V_{plaka}=2$ m/s'dir. Tablo 2'de 20°C 'deki nanoakışkanların termofiziksel özellikleri verilmiştir.

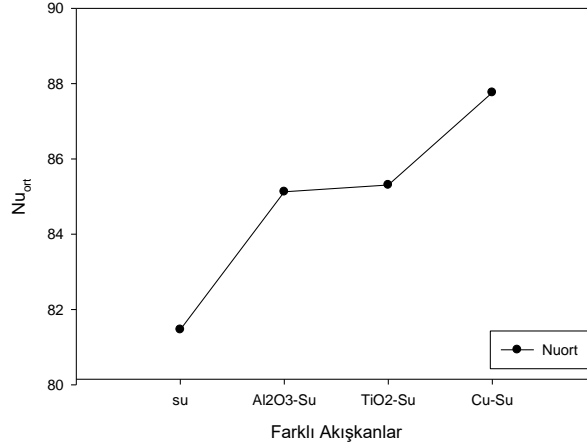
Tablo 2. 20°C 'deki nanoakışkanların termofiziksel özellikleri.

Nanoakışkan	Yoğunluk, $\rho(\text{kg/m}^3)$	Özgül ısı, $C_p, (\text{J/kgK})$	Dinamik Viskozite, $\mu(\text{Pa.s})$	Kinematik Viskozite, (m^2/s)	Isı İletim Katsayısı, $\lambda (\text{W/mK})$	Isıl Genleşme Katsayısı, $\beta (\text{m}^2/\text{s})$
Cu-H ₂ O	1316.672	3148.451	0.001099	0.000000835	0.6684	0.000161
Al ₂ O ₃ -H ₂ O	1055.836	3931.451	0.001044	0.000000989	0.6391	0.000154
TiO ₂ -H ₂ O	1063.236	3902.513	0.001044	0.000000982	0.6378	0.000153
Saf su	998.2	4182.0	0.000993	0.00000099	0.597	0.000143

Şekil 10'da farklı tip nanoakışkanlar için yerel Nusselt sayıları, Şekil 11'de farklı tip nanoakışkanların ortalama Nusselt sayısının değişimi verilmiştir.

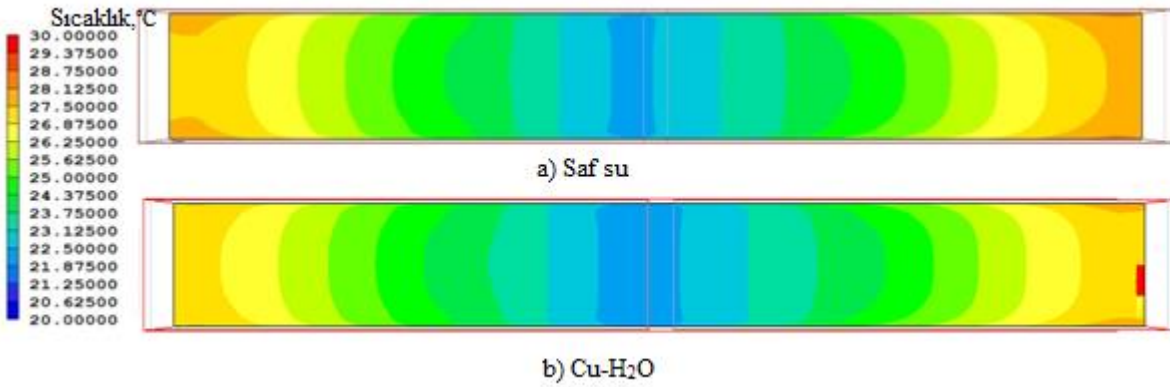


Şekil 10. Farklı nanoakışkanların yerel Nusselt sayısına etkisi.



Şekil 11. Farklı nanoakışkanların ortalama Nusselt sayısına etkisi.

Nanoakışkanların aynı hacimsel oranda ve Reynolds sayısında benzer akış özellikleri gösterdiği tespit edilmiştir. En iyi ısı transferi performansını Cu-H₂O nanoakışkanının gösterdiği belirlenmiştir. Cu-H₂O nanoakışkanı kullanılması durumunda; ortalama Nusselt sayısında TiO₂-H₂O'ye göre %2,9, Al₂O₃-H₂O nanoakışkanına göre %3,1 ve saf suya göre %7,7 artış olduğu tespit edilmiştir. Isı transferindeki en fazla artış, en yüksek ısı iletim katsayısı olan nanoakışkanda görülmüştür. Bu sebeple, nanoakışkan ısı iletim katsayısının önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir. Ayrıca konvansiyonel ısı transferi akışkanlarına göre (su), nanoakışkan kullanımının ısı transferinde belirgin bir artış sağlayabildiği tespit edilmiştir. Şekil 12'de farklı nanoakışkanlar için çarpma plakası üzerinde oluşan sıcaklık konturları gösterilmiştir. Sonuç olarak, farklı nanoakışkan kullanılması durumunda, en iyi ısı transferi performansını Cu-H₂O nanoakışkanının gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 12. Plaka Sıcaklık konturları a) Saf su, b) Cu-H₂O.

4.Sonuç

Bu çalışmada; tek bir hava jeti kullanılarak, yüksek ısı akılı hareketli bir plakadan olan ısı transferinin iyileştirilmesi farklı parametreler için (farklı parçacık çapları, farklı plaka hızları ve farklı tip nanoakışkanlar) sayısal olarak incelenmiştir. Sonuç olarak;

- Al₂O₃-H₂O nanoakışkanı kullanılması durumunda ($V_{\text{plaka}} = 2$ m/s), nanoparçacık çapı azaldıkça ortalama Nusselt sayısının arttığı ve yüzey sıcaklığının düştüğü, parçacık çapı $D_p = 40\text{nm}$ 'den $D_p = 10\text{nm}$ 'ye azaltıldığında ortalama Nusselt sayısında %9,1'lik bir artış olduğu tespit edilmiştir.
- Al₂O₃-H₂O nanoakışkanı kullanılması durumunda ($V_{\text{plaka}} = 0, 2, 4, 6$ m/s), plaka hızı arttıkça ortalama Nusselt sayısının arttığı, plaka hızı $V_{\text{plaka}} = 0$ m/s'den $V_{\text{plaka}} = 6$ m/s aralığında artırıldığında ortalama Nusselt sayısının %88,9 oranında artırılacağı tespit edilmiştir.
- Farklı nanoakışkanların kullanılması durumunda (Cu-H₂O, Al₂O₃-H₂O, TiO₂-su ve saf su) ($V_{\text{plaka}} = 2$ m/s) ise, en iyi ısı transferi performansının Cu-H₂O nanoakışkanın gösterdiği tespit edilmiştir. Cu-H₂O nanoakışkanın saf suya göre % 7,7 oranında daha iyi ısı transferi sağladığı tespit edilmiştir.

- d. Bu alanda yapılacak gelecekteki çalışmalarda; farklı nanoakışkanların (hibrit nanoakışkanlar vb.) farklı geometrilerde, farklı parametreler için ele alınarak, ısı transferine ve akış özelliklerine etkisinin incelenebileceği değerlendirilmiştir.

Referanslar

- Barewar, S. D., Tawri, S., & Chougule, S. S. (2019). Heat transfer characteristics of free nanofluid impinging jet on flat surface with different jet to plate distance: An experimental investigation. *Chemical Engineering and Processing Intensification*, vol.136, pp.1-10. doi:10.1016/j.cep.2018.12.001
- Başaran, A., & Selimefendigil, F. (2013). Numerical study of heat transfer due to twinjets impingement onto an isothermal moving plate. *Mathematical and Computational Applications*, 18(3), 340-350. doi: 10.3390/mca18030340
- Batchelor G. K. (1977). Effect of Brownian-Motion on bulk stress in a suspension of spherical-particles", *Journal of Fluid Mechanics*, vol.83(1), pp.97-117. doi:10.1017/s0022112077001062
- Buonomo, B., Manca, O., Bondareva, N. S., & Sheremet, M. A. (2019). Thermal and fluid dynamic behaviors of confined slot jets impinging on an isothermal moving surface with nanofluids. *Energies*, vol.12(11), 2074. doi:10.3390/en12112074
- Choi, S. U., & Eastman, J. A. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles (No. ANL/MSD/CP-84938; CONF-951135-29). Argonne National Lab., IL (United States).
- Corcione M. (2011). Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids. *Energy Conversion and Management*, vol. 52(1), pp. 789-793. doi:10.1016/j.enconman.2010.06.072
- Devdatta, P.K., Debendra, K.D., & Ravikanth S.V. (2009). Application of nanofluids in heating building and reducing pollution , *Applied Energy*, vol.86, pp.2566-2573.
- Ersayın, E., & Selimefendigil, F. (2013). Numerical investigation of impinging jets with nanofluids on a moving plate. *Mathematical and Computational Applications*, vol.18(3), pp.428-437.
- Ho, S.A., Hyungdae, K., Hanglin, J., Soon Ho, K., Wonpyo, & C., Moo H.K. (2010). Experimental Study Of Critical Heat Flux Enhancement During Forced Convective Flow Boiling Of Nanofluid On A Short Heated Surface, *Int.J. Multiphase Flow*, vol.36, pp.375-384.
- Kakaç, S., & Pramuanjaroenkij, A. (2009). Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.52, pp.3187-3196. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.006
- Kasaeeian, A., Eshghi, A.T., & Sameti, M. (2015). A Review on The Applications of Nanofluids in Solar Energy Systems , *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol.43, pp.584-598. doi:10.1016/j.rser.2014.11.020
- Khan, I. A. (2021). Experimental validation of enhancement in thermal conductivity of titania/water nanofluid by the addition of silver nanoparticles. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.120, 104910. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104910
- Kilic M., & Başkaya Ş. (2017). Farklı geometride akış yönlendiriciler ve çarpan jet kullanarak yüksek ısı akılı bir yüzeyden olan ısı transferinin iyileştirilmesi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol.32(3), pp.693-707. doi: 10.17341/gazimmfd.337616
- Kilic, M. (2013). Çarpmalı Akışkan Jetlerle Kanal içine Yerleştirilmiş Elemanlardan Olan Konveksiyonla Isı Transferinin Sayısal ve Deneysel Olarak incelenmesi (Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara).
- Kilic, M., & Ali, H. M. (2019). Numerical investigation of combined effect of nanofluids and multiple jets on heat transfer. *Thermal Science*, 23(5 Part B), 3165-3173. doi:10.2298/TSCI171204094K
- Kilic, M., & Ozcan, O. (2017). Numerical investigation of heat transfer and fluid flow of nanofluids with jets: *International Conference On Advances and Innovations in Engineering (ICAIE)*; pp.434-440.
- Lahari, M. C., Sai, P. S. T., Swamy, K. N., KrishnaMurthy, N., & Sharma, K. V. (2018). Investigation on heat transfer properties of water based TiO₂-ZnO nanofluids. In *IOP conference series: materials science and engineering* vol.45(1),pp.012092. doi:10.1088/1757-899X/455/1/012092

- Li., Xuan Y., & Yu F. (2012). "Experimental investigation of submerged single jet impingement using Cu-Water Nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, vol.36 (1), pp.426–433. doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.10.059
- Pak, B C., & Cho, Y. I.(1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer an International Journal*, vol.11(2), pp.151–170. doi: 10.1080/08916159808946559
- Peyghambarzadeh, S. M., Hashemabadi, S. H., Hoseini, S. M., & Jamnani, M. S. (2011). Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based nanofluids as a new coolant for car radiators. *International communications in heat and mass transfer*, vol.38(9), pp.1283-1290. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.07.001
- Sarkar, J., Ghosh, P., & Adil, A. (2015). A review on hybrid nanofluids: recent research, development and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.43, pp.164-177. doi:10.1016/j.rser.2014.11.023
- Selvakumar, P., & Suresh, S.,(2012). Convective Performance Of CuO/Water Nanofluid In An Electronic Heat Sink, *Exp., Thermal Fluid Science*,vol.40, pp.57-63. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2012.01.033
- Sharif, M. A. R., & Banerjee, A. (2009). Numerical analysis of heat transfer due to confined slot-jet impingement on a moving plate. *Applied Thermal Engineering*, vol.29(2-3), pp.532-540. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.03.011
- Sun, B., Zhang, Y., Yang, D., & Li, H. (2019). Experimental study on heat transfer characteristics of hybrid nanofluid jets. *Applied Thermal Engineering*, vol.151, pp.556-566. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.114920
- Suresh, S., Chandrasekar, S., & Sekhar, C. (2011). Experimental Studies on Heat Transfer and Friction Factor Characteristics of CuO/Water Nanofluid under Turbulent Flow in a Helically Dimpled Tube, *Exp.Thermal Fluid Sci.*, vol.35, pp.542-549. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2010.12.008
- Wang B.X., Zhou L.P., & Peng X.F. (2006). Surface and size effects on the specific heat capacity of nanoparticles, *International Journal of Thermophysics*, vol.27(1), pp.139–151.
- Xuan, Y., & Li, Q. (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and fluid flow*, vol.21(1), pp.58-64. doi: 10.1016/S0142-727X(99)00067-3