



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

DALGALI MİKRO-KANALDA NANOAKIŞKANLARIN ISI TRANSFERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

**SELMA AKÇAY
ÜNAL AKDAĞ
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ**

DALGALI MİKRO-KANALDA NANOAKIŞKANLARIN ISI TRANSFERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Numerical Investigation of Effects on Heat Transfer of Nanofluids in a Wavy Micro-channel

Selma AKÇAY
Ünal AKDAĞ

ÖZET

Bu çalışmada, simetrik dalgalı bir mikro-kanalda nanoakışkanların ısı transferi ve sürtünme faktörü üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Kartezyen koordinatlarda 3d, laminar, sürekli, sıkıştırılmaz akışlar için Navier-Stokes denklemleri sonlu hacimler yaklaşımı ile ayrıştırılmış ve iterasyonlar SIMPLE algoritması ile çözülmüştür. Çalışmalarda nanopartikül tipi, nanopartikül hacim oranı (ϕ) ve Reynolds sayısı (Re) değiştirilirken diğer parametreler sabit alınmıştır. Mikro-kanalın alt ve üst dalgalı duvarlarına sabit ısı akısı uygulanmış ve kanal boyunca ortalama Nusselt sayısı (Nu) ve sürtünme faktörü hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar dalgalı kanal ile aynı kesit alanı ve uzunluğa sahip düz bir mikro-kanal akışı ile karşılaştırılmıştır. Sayısal sonuçlar, artan Re sayılarında nanopartikül hacim oranının artması ile ısı transferi iyileşmesinin de arttığını göstermiştir ancak bu iyileşme sürtünme faktöründe de artış ile birlikte gerçekleşmiştir. Ayrıca dalgalı kanallarda ısı transferinin düz kanallara göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar boyutsuz parametrelerin bir fonksiyonu olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Dalgalı mikro-kanal, Nanoakışkan, Isı transferi, Sayısal çalışma

ABSTRACT

In this study, the effects on the heat transfer and the friction factor of nanofluids in a symmetric wavy micro-channel are investigated numerically. Navier-Stokes equations for incompressible flows, 3d, laminar, steady, in cartesian coordinates are discretized with the finite volume approach and the iterations are solved using the SIMPLE algorithm. In the studies, as the nanoparticle type, nanoparticle volume ratio (ϕ) and Reynolds number (Re) are changed the other parameters kept constant. A constant heat flux is applied to the lower and upper wavy walls of the micro-channel and the average Nusselt number (Nu) and friction factor are calculated at the channel surface. The obtained results are compared with a straight micro-channel flow having the same cross section and length with a wavy channel. Numerical results have shown that heat transfer enhancement increases with increasing nanoparticle volume ratio and Re numbers, but this enhancement is found to be accompanied with an increase in friction factor. It is also observed that the heat transfer in the wavy channels is higher than in the flat channels. The obtained numerical results are presented as a function of dimensionless parameters.

Key Words: Wavy micro-channel, Nanofluid, Heat transfer, Numerical study

1. GİRİŞ

Son yıllarda hızla gelişen mikro-elektronik sistemlerde artan güç tüketimi nedeniyle oluşan yüksek ısının bu bölgeden uzaklaştırılması için etkili ve yenilikçi soğutma yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemlerdeki cihazların minyatür hale gelmesi cihazlardaki kanal ölçülerinin de mikro boyutlu tasarlanmasını gerektirmektedir. Mikro-kanallar, mikro-akışlı cihazların bileşiminde yer alan en önemli parçalardan biridir. Bu nedenle bu kanallarda akış ve ısı transferi performansı kanal geometrisi, kanal ölçüleri, duvar ısı akısı/sıcaklığı, akışkan tipi, akış hızı gibi pek çok parametreden etkilenmektedir [1, 2].

Minyatür elektronik cihazların soğutulmasında kompakt soğutma sağlayan mikro-kanallı ısı atıcılarında akım çizgilerinin düz olması nedeniyle genellikle düz kanallar tercih edilmiştir, ancak bu düz mikro-kanallarda akış karışımının zayıf olması nedeniyle ısı transferi de yetersiz kalmaktadır. Dalgalı kanallarda akışkan karışımının daha iyi olması nedeniyle düz kanallara göre ısı transferi önemli ölçüde iyileşmektedir. Yapılan çalışmalarda optimum geometriye sahip mikro-kanal şekillerinin belirlenmesi üzerine odaklanılmış ve en az sürtünme kayıplarının olduğu ve en iyi ısı transferi performansının elde edildiği farklı hidrolik çaplardaki mikro-kanal geometrileri sunulmuştur. Dikdörtgen [3,4,5], dalgalı [6,7,8], trapez [9], üçgen [10], gibi farklı geometriye sahip mikro-kanallarda akış ve ısı transferi pek çok araştırmacı tarafından deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu mikro-kanallarda ısı transferi ve sürtünme faktörü için elde edilen sonuçlar konvansiyonel kanallar ile karşılaştırılmıştır, dalgalı kanallarda ısı transferinin daha iyi olduğu, özellikle düşük Re sayılarında sürtünme kayıplarının da azaldığı kanıtlanmıştır. Ancak Re sayısının çok geniş aralığı için yapılan çalışmalarda elde edilen ısı transferi iyileşme oranları arasında büyük farklılıklar olduğu görülmektedir [11,12,13,14]. Xi vd. [15], farklı hidrolik çaplardaki (0.3-0.8 mm) dikdörtgen kesitli swirl tip (helisel) mikro-kanallarda %30 etilen glikol kullanarak akış ve ısı transferini deneysel olarak incelemişler ve düz mikro-kanallara göre ısı transferinin yaklaşık %50 iyileştiğini gözlemlenmişlerdir. Deng vd. [16], 781 µm hidrolik çapında Ω şeklinde girintili mikro-kanal ısı atıcısında tek fazlı akış için ısı transferini deneysel ve sayısal olarak incelemişler, $150 < Re < 1100$ için dalgalı mikro-kanallarda ısı transferinin dikdörtgen kanallara göre %32 iyileştiğini belirtmişlerdir.

Mikro-akışlı cihazlarda gerekli soğutma ihtiyacını karşılamada hava soğutmalı tekniklerin yetersiz kalması sıvı soğutmalı tekniklere olan ilgiyi artırmıştır. Ana akışa nanopartiküllerin ilavesi ile elde edilen nanoakışkanların termal iletkenliği önemli derecede artırdığı bilinmektedir, bu nedenle dalgalı mikro-kanallarda soğutma uygulamalarında değişik nanoakışkanların kullanılmasını konu alan çalışmalar giderek artmaktadır. Bu çalışmalarda farklı dalga şekillerine sahip mikro-kanallar, farklı nanoakışkan tipleri, değişen partikül hacim oranlarında ve Reynolds sayısının belirli aralığında incelenmiştir [17,18]. Mikro-kanallarda nanoakışkanların akış ve ısı transferine etkilerini Manay ve Sahin [19], sabit ısı akısına sahip mikro-kanal için TiO_2/su nanoakışkanını deneysel olarak, Mohammed vd. [20], dikdörtgen kesitli mikro-kanal ısı değiştiricisinde Ag, Al_2O_3 , CuO, SiO_2 , ve TiO_2 nanoakışkanlarını üç boyutlu, sayısal olarak, Yang vd. [21], mikro-kanalda Al_2O_3/su nanoakışkanını düşük Re sayısında ($Re \leq 16$) Lattice Boltzmann Metodu (LBM) ile sayısal olarak, Nimmagadda ve Venkatasubbaiah [22], dikdörtgen kesitli bir mikro-kanalda Al_2O_3/su , Ag/su ve $Al_2O_3 + Ag/su$ şeklinde hibrit nanoakışkanların farklı Re sayılarında laminer akışını sayısal olarak, Rostami ve Abbasi [23], iki fazlı Eulerian-Lagrangian metodu ile dalgalı bir mikro-kanalda Al_2O_3/su nanoakışkanını üç boyutlu sayısal olarak, Sakanova vd. [24], dalgalı mikro-kanalda elmas/su, CuO/su ve SiO_2/su nanoakışkanlarını, partikül hacim oranları %1 - %5 ve Reynolds sayısı 99-232 aralığı için üç boyutlu sayısal olarak incelemişlerdir ve tüm bu çalışmaların sonucunda mikro-kanallarda nanoakışkan kullanımının artan Re sayısı ve artan partikül hacim oranlarında saf suya göre ısı transferini önemli derecede iyileştirdiğini, ancak basınç düşüşü ve sürtünme faktöründe de bir artış gözlemlendiğini belirtmişlerdir.

Jung vd. [25], farklı hacim konsantrasyonu için 170 µm çapında Al_2O_3/su nanoakışkanı için dikdörtgen kesitli mikro-kanalda sürtünme faktörü ve ısı transferini deneysel olarak incelemişler, %1.8 hacim konsantrasyonunda saf suya göre ısı transferinde %32 den fazla iyileşme olduğunu, Re sayısının artması ile Nu sayısının da arttığını bildirmişlerdir. Zhang vd. [26], dairesel bir mikro kanalda, 0.25%, 0.51% ve 0.77% hacim oranlarında Al_2O_3 -su nanoakışkanını sürtünme faktörü ve ısı transferini deneysel olarak araştırmışlar ve Re sayısı ve partikül hacim oranında artma ile ısı transferinde %10.6, sürtünme faktöründe ise %7.9 artış olduğunu bildirmişlerdir. Sohel vd. [27], sabit ısı akısına sahip 400 µm hidrolik çapında dairesel bakır mikro-kanal ısı atıcısının ısı performansını Al_2O_3 -su, TiO_2 -su ve

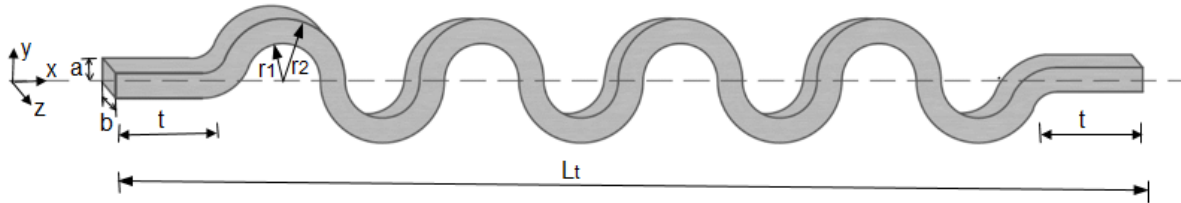
CuO–su nanoakışkan tipleri için analitik olarak incelemişler ve en yüksek ısı transferinin CuO-su nanoakışkan için elde edildiğini (13.15%) belirtmişlerdir. Azizi vd. [28], laminar akış için farklı hacim konsantrasyonlarında Cu-su nanoakışkanı kullanarak 560 µm hidrolik çapındaki silindirik mikro-kanallı ısı atıcısının soğutma performansını deneysel olarak analiz etmişler ve partikül hacim oranında artma ile Nu sayısının %23 arttığını bildirmişlerdir.

Literatür çalışmalarında, farklı dalgalı mikro-kanal geometrilerinde nanoakışkanların ısı transferine etkileri incelenmiş ancak bu çalışmada kullanılan simetrik dalgalı mikro-kanal geometrisi incelenmemiştir. Ayrıca bu çalışmada düşük Re sayılarındaki çalışmalar da oldukça azdır. Bu nedenle, bu çalışmada, simetrik dalgalı bir mikro-kanalda, farklı nanoakışkanların konvektif ısı transferine etkisi, düşük Re sayıları için ($0.5 \leq Re \leq 10$), değişen partikül hacim oranlarında sayısal olarak incelenmiştir.

2. SAYISAL ÇALIŞMA

2.1. Sayısal Model

Şekil 1'de, yapılan çalışmada kullanılan simetrik dalgalı mikro-kanalın geometrisi verilmiştir.



Şekil 1. Mikro-kanalın geometrisi

Geometride dalgalı mikro-kanalın giriş ve çıkışında $t=0.7$ mm uzunluğunda düz bir bölüm vardır. Toplam kanal uzunluğu $L_t = 13.2$ mm dir. Kare kesit alanına sahip kanalın a ve b uzunlukları 200 µm dir. Kanal 8 adet simetrik dalgalı bölümden oluşmaktadır. Geometrik parametrelerden dalganın iç eğrilik yarıçapı (r_1) 0.6 mm, dış eğrilik yarıçapı (r_2) ise 0.8 mm'dir. Kanalın üst ve alt duvarlarına sabit ısı akısı uygulanmış olup problem üç boyutlu olarak incelenmiştir.

2.2. Denklemler ve Sayısal Çözüm

Kanal içindeki akış tam gelişmiş, laminar, sıkıştırılamaz, üç boyutlu ve daimi kabul edilip akışkan Newtonien özellikte ve tek fazlı olarak düşünülmüştür. Nanopartiküller ile suyun aynı akış ve ısı şartlarında kanala girdiği kabul edilmiştir. Yerçekimi ve radyasyonla ısı transferi ihmal edilmiştir. Bu kabullere göre kullanılan eşitlikler aşağıdaki denklemlerde verilmiştir;

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho C_p u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \left(\frac{\partial T_i}{\partial x_i} \right) \right) \quad (3)$$

Problemin çözümünde HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) tabanlı Fluent 6.3 [29], paket programı kullanılmıştır. Denklemler, sonlu hacimler metodu ile ayrıştırılmış, eşitlikler SIMPLE algoritması kullanılarak çözülmüştür, taşınım ve yayılım terimleri ise ikinci dereceden ileri fark şeması kullanılarak

ayrıklaştırılmıştır. Yakınsama kriteri olarak enerji eşitlikleri için 10^{-6} , diğer eşitlikler için 10^{-3} kabul edilmiştir.

Grid bağımsızlığı için 10x10x360, 15x15x400 ve 20x20x480 grid sayılarında testler uygulanmış (Re=10) ve bu testlere göre elde edilen Nu sayıları sırasıyla 4.695, 4.776 ve 4.789 olarak hesaplanmıştır. 15x15x400 grid için hesaplanan Nu sayısı ile 20x20x480 grid için hesaplanan Nu sayısı arasında %0,28 den daha az fark olduğu gözlemlenmiş ve bu çalışmada 15x15x400 grid sayısı tercih edilmiştir. Sayısal çözüm parametreleri Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 1. Sayısal çözüm parametreleri

Reynolds sayısı: Re	Hacim oranı: ϕ (%)	Nanopartikül tipi:
0.5	0.1, 0.5, 1, 2	Al ₂ O ₃ , CuO, SiO ₂
1	0.1, 0.5, 1, 2	Al ₂ O ₃ , CuO, SiO ₂
5	0.1, 0.5, 1, 2	Al ₂ O ₃ , CuO, SiO ₂
10	0.1, 0.5, 1, 2	Al ₂ O ₃ , CuO, SiO ₂

Akışkanın kanala $T_o=297K$ sıcaklığında üniform olarak girdiği kabul edilmektedir. Kanal girişinde, "hız giriş sınır şartı" uygulanmıştır. Akış tam gelişmiş kabul edilerek ve çıkışta "dışa akış sınır şartı" uygulanmıştır. Kanalın alt ve üst dalgalı duvar yüzeylerine $q''=1000 W/m^2$ değerinde sabit ısı akısı uygulanmış ve tüm duvarlar için kaymama sınır şartı tariflenmiştir.

2.3. Nanoakışkanın fiziksel özellikleri

Nanopartiküllerin temel akışkan içine homojen bir şekilde dağıldığı kabul edilerek nanoakışkanların fiziksel özellikleri için aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır;

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_{pt} \quad (4)$$

$$c_{nf} = (1 - \phi)c_{bf} + \phi c_{pt} \quad (5)$$

$$k_{nf} = k_{bf} [4.97\phi^2 + 2.72\phi + 1] \quad (6)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} [123\phi^2 + 7.3\phi + 1] \quad (7)$$

Burada nf, bf, pt indisleri sırasıyla nanoakışkanı, temel akışkanı ve nanopartikülü göstermektedir. Nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinden özellikle ısı iletkenlik, viskozite ve özgül ısı değerinin geçerliliği için literatür çalışmalarındaki farklı eşitlikler uygulanarak test edilmiş ve bu özelliklerde %1,6'dan daha az değişme olduğu belirlenmiştir. Nanoakışkanların fiziksel özellikleri ile ilgili daha geniş bilgiye literatürden ulaşılabilir [30, 31, 32].

3. SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR

Bu çalışmada, sayısal çözümün geçerliliğini belirlemek için, Lee vd. [33], tarafından yapılan deneysel çalışmaya ait $D_h=318 \mu m$ hidrolik çapında ($194 \mu m$ genişliğinde ve $884 \mu m$ yüksekliğinde), $L=25,4 mm$ uzunluğunda dikdörtgen kesitli düz bir mikro-kanal geometrisi kullanılarak $500 \leq Re \leq 1500$ Reynolds aralığı için Nu sayısı hesaplanmıştır. Ayrıca, Stephan ve Preußer [34] tarafından sunulan korelasyonlar ile de sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ref. [33]'e ait deneysel sonuçlar ve Ref. [34]'e ait korelasyonlar ile yapılan çalışma sonuçları arasındaki uyum Şekil 2' de gösterilmiştir.

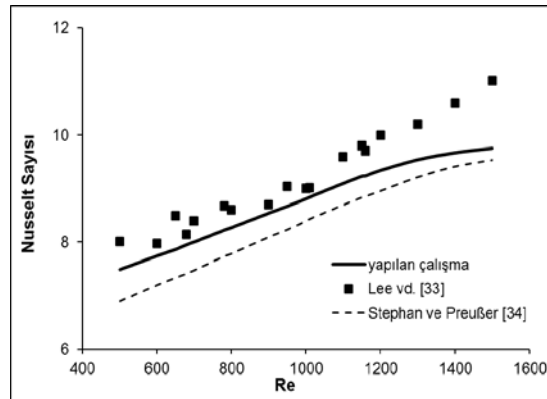
Bu çalışmada, Al_2O_3 , CuO ve SiO_2 nanoakışkanlar ile dalgalı bir mikro-kanalda sürekli akış şartlarında konvektif ısı transferi ve sürtünme faktörü sayısal olarak araştırılmıştır. Taban akışkan olarak su kullanılmıştır. Nanopartikül tipi (Al_2O_3 , CuO , SiO_2), partikül hacim oranı ($0.1 \leq \phi \leq 2$), ve Reynolds sayısı ($0.5 \leq Re \leq 10$) değiştirilmiştir. Dalgalı kanalın alt ve üst duvarlarına sabit ısı akısı uygulanmış olup kanaldaki yerel Nu sayısı Eşitlik 8' den ve ortalama Nu sayısı ise Eşitlik 9' dan hesaplanmıştır;

$$Nu_x = \frac{q'' D_h}{k(\bar{T}_{w,x} - \bar{T}_{b,x})} \quad (8)$$

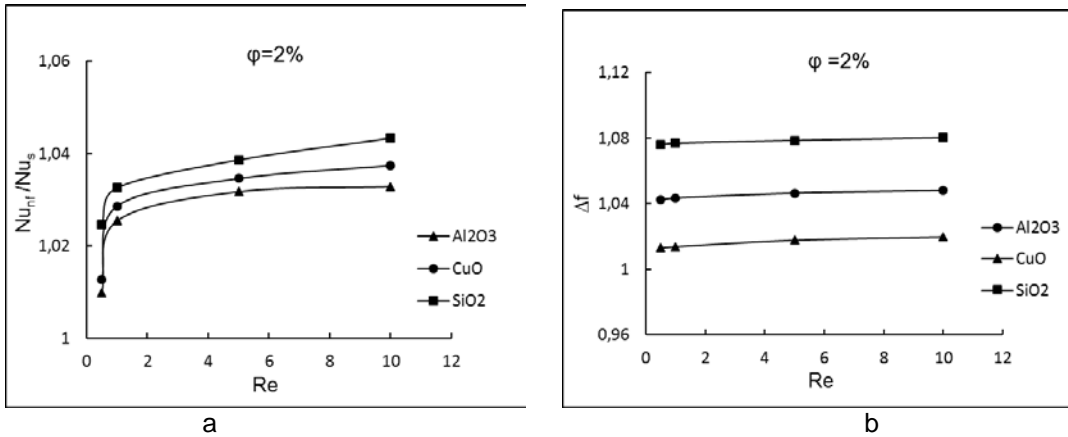
$$Nu = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx \quad (9)$$

Burada k nanoakışkanın ısı iletkenlik katsayısı, D_h hidrolik yarıçap, T_w kanalın duvar sıcaklığı ve T_b nanoakışkanın yığın akışkan sıcaklığıdır. Nusselt sayısına bağlı olarak $\eta = Nu_{nf} / Nu_s$ şeklinde ısı transferi performansı tariflenmiştir. Burada Nu_{nf} her bir nanoakışkan için hesaplanan Nu sayısıdır, Nu_s ise saf su için hesaplanan Nu sayısıdır.

Taban akışkan ile karşılaştırıldığında Re sayısına bağlı olarak nanoakışkanlar ısı transferini iyileştirmektedir. Ancak kanal akışlarında basınç düşüşü faktörü de önemli bir konudur. Nanoakışkan tipi ve partikül hacim oranına bağlı olarak kanal yüzeylerinde ve akışkan içinde meydana gelen kayma gerilmeleri önemli derecede basınç düşüşüne neden olmaktadır. Nanopartiküller akışkanın viskozitesini artırır, bu nedenle taban akışkana göre nanoakışkanların viskozite değerleri daha yüksektir. Yapılan çalışmada, mikro-kanal akışında nanoakışkanların basınç düşüşünü belirlemek için boyutsuz sürtünme faktörü $\Delta f = f_{nf}/f_s$ tanımlanmıştır. Burada f_{nf} nanoakışkanın, f_s ise taban akışkanın yüzey sürtünme değeridir.



Şekil 2. Sayısal çözümün geçerliliği

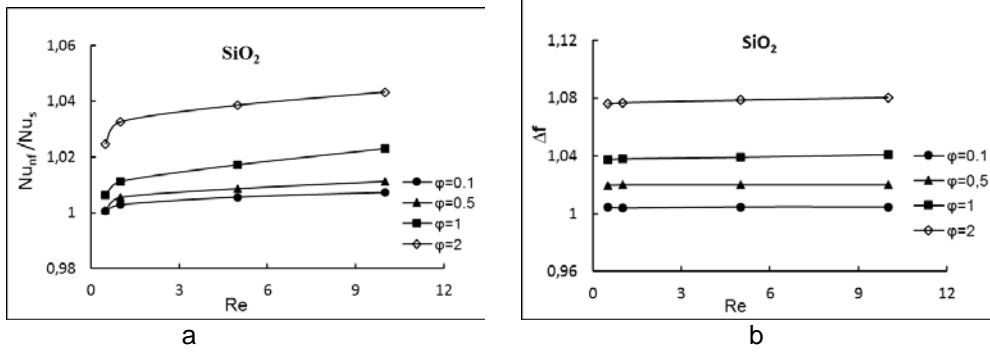


Şekil 3. a- Farklı nanoakışkanlar için Re sayısı ile ısı transferi performansının değişimi, **b-** Farklı nanoakışkanlar için Re sayısı ile sürtünme faktörünün değişimi

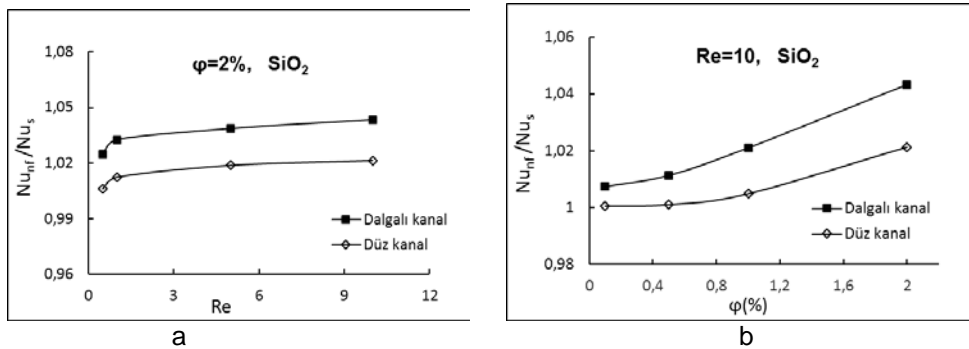
Şekil 3a'da $\varphi = 2\%$ partikül hacim oranında farklı nanoakışkanlar için Re sayısı ile ısı transferi performansının değişimi, Şekil 3b'de ise Re sayısı ile sürtünme faktörünün değişimi verilmiştir. Re sayısı artarken tüm nanoakışkanlar için ısı transferi performansı da artmıştır. SiO_2 /su nanoakışkanı diğer nanoakışkanlarla karşılaştırıldığında en yüksek ısı transferi iyileşmesi ve sürtünme faktörüne sahiptir. Çünkü SiO_2 diğer nanoakışkanlar içinde daha düşük termal iletkenliğe sahiptir, ayrıca daha düşük yoğunluğu nedeniyle ortalama hızı daha yüksektir. Sürtünme faktörünün nanoakışkan tipinden oldukça etkilendiği, en düşük sürtünme faktörünün CuO nanoakışkanı ile elde edildiği görülmektedir. Tüm nanoakışkanlar için Re sayısının artması ile sürtünme faktörü de hafif artmıştır.

Şekil 4a'da SiO_2 nanoakışkanı için farklı partikül hacim oranlarında Re sayısı ile ısı transferi performansının değişimi verilmiştir. Re sayısı artarken partikül hacim oranında artma ile ısı transferi performansı da artmaktadır, ancak düşük hacim oranlarında bu artışın daha az olduğu görülmektedir. Şekil 4b'de ise SiO_2 nanoakışkanı için farklı hacim oranlarında Re sayısı ile sürtünme faktörünün değişimi verilmiştir. Nanopartikül hacim oranında artma ile sürtünme faktörünün de oldukça arttığı görülmektedir.

Yapılan çalışmada, simetrik dalgalı kanal ile aynı kesit alanına ($D_h = 200 \mu\text{m}$) ve toplam uzunluğa ($L_t = 19.4 \text{ mm}$) sahip düz bir mikro-kanaldaki ısı transferi performansı da karşılaştırılmıştır. Bunun için en yüksek ısı transferi performansının elde edildiği nanoakışkan olan SiO_2 ve yine en iyi performansa sahip partikül hacim oranı ($\varphi = 2\%$) dikkate alınmıştır.



Şekil 4. Farklı partikül hacim oranlarında SiO_2 için Re sayısı ile a) ısı transferi performansının değişimi b) sürtünme faktörünün değişimi



Şekil 5. Dalgalı ve düz kanal için ısı transferi performansının a) Re sayısı ile değişimi, b) nanopartikül hacim oranı ile değişimi

Şekil 5a. SiO_2 -su nanoakışkanı ve $\varphi = 2\%$ partikül hacim oranı için dalgalı ve düz kanaldaki ısı transferi performansının Re sayısına göre değişimi verilmiştir. Dalgalı kanallarda ısı transferindeki iyileşmenin düz kanallara göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 5b. de ise SiO_2 nanoakışkanı ve $Re = 10$ için dalgalı ve düz kanaldaki partikül hacim oranına göre ısı transferi performansının değişimi verilmiştir.

Her iki kanalda da nanopartikül hacim oranının artması ile ısı transferi önemli derecede iyileşirken, dalgalı kanallarda bu iyileşmenin daha yüksek olduğu görülmektedir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, daimi akış şartlarında simetrik dalgalı bir mikro-kanalda ısı transferi ve sürtünme faktörü üzerinde farklı nanoakışkanların etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Isı transferi ve sürtünme faktörü üzerinde nanopartikül tipinin, partikül hacim oranının ve Reynolds sayısının etkileri analiz edilmiş ve sonuçlar düz bir mikro-kanal akışı ile de karşılaştırılmıştır. Sayısal simülasyonlar, ısı transferindeki iyileşmenin ve sürtünme faktörünün nanoakışkan tipinden ve partikül hacim oranından önemli derecede etkilendiğini, Re sayısından ise daha az etkilendiğini göstermiştir. En yüksek ısı transferi performansının ve sürtünme faktörünün artan Re sayısı ve partikül hacim oranlarında SiO₂ nanoakışkanı ile elde edildiği gözlemlenmiştir. Dalgalı mikro-kanallarda nanoakışkan kullanımı ile artan Re sayılarında ve partikül hacim oranlarında düz kanallara göre daha yüksek ısı transferi iyileşmesi elde edilmiştir. Yapılan çalışma sayısal olarak gerçekleştirilmiş olup yakın zamanda deneysel olarak incelenmesi düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1]BARKHORDARI M., ETEMAD S.GH, “Numerical study of slip flow heat transfer of non-Newtonian fluids in circular microchannels”, International Journal of Heat and Fluid Flow, 28, 2007, 1027–1033
- [2]NONINO, C., SAVINO, S., GIUDICE, S.D., MANSUTTI L., “Conjugate forced convection and heat conduction in circular microchannels”, International Journal of Heat and Fluid Flow 30, 2009, 823–830.
- [3]HARMS T.M., KAZMIERCZAK M.J., GERNER F.M., “Developing convective heat transfer in deep rectangular microchannels”, International Journal of Heat and Fluid Flow, 20, 1999, 149-157.
- [4]SUI Y., TEO C.J., LEE P.S., CHEW Y.T., SHU C., “Fluid flow and heat transfer in wavy microchannels”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 53, 2010, 2760–2772.
- [5]SAHAR, A.M., ÖZDEMİR, M.R., FAYYADH, E.M., WISSINK, J., MAHMOUD M.M., KARAYİANNİS,T.G., “Single phase flow pressure drop and heat transfer in rectangular metallic microchannels”, Applied Thermal Engineering, 93, 2016, 1324–1336
- [6]DAI, Z., FLETCHER,D.F., HAYNES,B.S., “Impact of tortuous geometry on laminar flow heat transfer in microchannels”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 83, 2015, 382–398.
- [7]ABED W.M., WHALLEY R.D., DENNIS D.J.C, POOLE R.J., “Numerical and experimental investigation of heat transfer and fluid flow characteristics in a micro-scale serpentine channel”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 88, 2015, 790–802.
- [8]Javad Rostami, Abbas Abbassi, Majid Saffar-Avval, Optimization of conjugate heat transfer in wavy walls microchannels, Applied Thermal Engineering 82, 2015, 318-328.
- [9]WANG, G., HAO, L., CHENG P., “An experimental and numerical study of forced convection in a microchannel with negligible axial heat conduction”, International Journal of Heat and Mass Transfer 52, 2009, 1070–1074.
- [10]MATHEW, B., HEGAB, H., “Experimental investigation of thermal model of parallel flow microchannel heat exchangers subjected to external heat flux” International Journal of Heat and Mass Transfer 55, 2012, 2193–2199
- [11]TOH K.C., CHEN X.Y., CHAI J.C., “Numerical computation of fluid flow and heat transfer in microchannels”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 45, 2002, 5133–5141
- [12]FANI, B., KALTEH M., ABBASSI, A., “Investigating the effect of Brownian motion and viscous dissipation on the nanofluid heat transfer in a trapezoidal microchannel heat sink”, Advanced Powder Technology, 26, 2015, 83–90
- [13]XIA,G.D., LIU, R., WANG,J., DU, M., “The characteristics of convective heat transfer inmicrochannel heat sinks using Al₂O₃ and TiO₂ nanofluids”, International Communications in Heat and Mass Transfer, 76, 2016, 256–264
- [14]ANOOP K., SADR R., YU J., KANG S., JEON S., BANERJEE D., “Experimental study of forced convective heat transfer of nanofluids in a microchannel”, International Communications in Heat and Mass Transfer, 39, 2012, 1325–1330
- [15]XI, Y., YU, J., XIE,Y., GAO, H., “Single-phase flow and heat transfer in swirl microchannels”, Experimental Thermal and Fluid Science, 34, 2010, 1309–1315.

- [16]DENG, D., WANA, W., TANG Y., SHAO, H., HUANG Y., “Experimental and numerical study of thermal enhancement in reentrant copper microchannels”, International Journal of Heat and Mass Transfer 91, 2015, 656–670
- [17]AKDAĞ Ü., AKÇAY S. and DEMİRAL D., “Heat transfer enhancement with laminar pulsating nanofluid flow in a wavy channel”, Int. Commun. Heat Mass Transfer, 59, 2014, 17–23.
- [18]HEDAYATIA, F., DOMAIRRY G., “Nanoparticle migration effects on fully developed forced convection of TiO₂–water nanofluid in a parallel plate microchannel”, Particuology 24, 2016, 96–107.
- [19]MANAY, E., SAHİN B., “The effect of microchannel height on performance of nanofluids”, International Journal of Heat and Mass Transfer 95, 2016, 307–320.
- [20]MOHAMMED H.A., BHASKARAN G., SHUAİB N.H., SAİDUR R., “Numerical study of heat transfer enhancement of counter nanofluids flow in rectangular microchannel heat exchanger”, Superlattices and Microstructures, 50, 2011, 215–233.
- [21]YANG, Y., LAİ, F., “Numerical study of flow and heat transfer characteristics of alumina-water nanofluids in a microchannel using the lattice Boltzmann method”, International Communications in Heat and Mass Transfer, 38, 2011, 607–614
- [22]NİMMAGADDA R., VENKATASUBBAIAH K., “Conjugate heat transfer analysis of micro-channel using novel hybrid nanofluids (Al₂O₃ + Ag/Water)”, European Journal of Mechanics B/Fluids, 52, 2015, 19–27.
- [23]ROSTAMİ J., ABBASSİ A., SAFFAR-AVVAL M., “Optimization of conjugate heat transfer in wavy walls microchannels”, Applied Thermal Engineering, 82, 2015, 318-328.
- [24]SAKANOVA, A., KEİAN, C.C., ZHAO,J., “ Performance improvements of microchannel heat sink using wavy channel and nanofluids”, International Journal of Heat and Mass Transfer 89, 2015, 59–74.
- [25]JUNG J., OH H., KWAK H., “Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52, 2009, 466–472.validation bak
- [26]ZHANG H., SHAO S., XU H., TIAN C., “Heat transfer and flow features of Al₂O₃- water nanofluids flowing through a circular microchannel: Experimental results and correlations”, Applied Thermal Engineering, 61, 2013, 86-92.
- [27]SOHEL M.R., SAİDUR R., SABRİ M.F.M., KAMALİSARVESTANİ M., ELİAS M.M., İJAM A., “Investigating the heat transfer performance and thermophysical properties of nanofluids in a circular micro-channel”, International Communications in Heat and Mass Transfer, 42,2013, 75–81.
- [28]AZİZİ Z., ALAMDARİ, A., MALAYERİ, M.R., “Convective heat transfer of Cu–water nanofluid in a cylindrical microchannel heat sink”, Energy Conversion and Management, 101, 2015, 515–524.
- [29]FLUENT 6.3. FLUENT user’s guide. Fluent, Inc., Lebanon, NH. 03766, USA, 2006.
- [30]KAKAC S. ve PRAMUANJAROENKİJ A., “Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids”, Int. J. Heat Mass Transfer, 52, 2009, 3187–3196.
- [31]MİNEA A.A., “Effect of microtube length on heat transfer enhancement of a water/Al₂O₃ nanofluid at high Reynolds numbers”, Int. J. Heat Mass Transfer, 62, 2013, 22–30.
- [32]PAK B.C. ve CHO Y.I., “Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles”, Experimental Heat Transfer, 11, 2, 1998, 151–170.
- [33]LEE P.S., GARİMELLA S.V., LIU D., “Investigation of heat transfer in rectangular microchannels”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 48, 2005, 1688–1704.
- [34]STEPHAN K., PREUßER P., “Warmeübergang und maximale warmestromdichte beim behaltersieden binarer und ternarer flüssigkeitsgemische”, Chem. Ing. Tech. 51, 1979, 37.

ÖZGEÇMİŞ

Selma AKÇAY

1975 yılı Kayseri doğumludur. 2000 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Bölümünü bitirmiştir. Aksaray Üniversitesinden 2015 yılında Yüksek Mühendis ünvanını almıştır. Yine Aksaray Üniversitesinde 2015 yılında başladığı Doktora eğitimine devam etmektedir. Kayseri Sağlık Müdürlüğünde Makine Yüksek Mühendisi olarak görev yapmaktadır. Isı transferi, pulsatif akış, nanoakışkanlar, hesaplamalı akışkanlar dinamiği konularında çalışmaktadır.

**Ünal AKDAĞ**

1970 yılında Aksaray'da doğmuştur. 1992 yılında Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. 1997 yılında Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisansını ve 2005 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği, Enerji programında Doktorasını tamamlamıştır. 2006 yılında Texas A&M University (ABD) de burslu araştırmacı olarak bulunmuştur. Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Bölümü Termodinamik Anabilim Dalında Prof. Dr. olarak görev yapmaktadır. Isı ve kütle geçişi, titreşimli akışta ısı geçişi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, nanoakışkanlar ve mikro akış konularında çalışmaktadır.