

# Eliptik Boru Demeti Üzerinden Geçen Nanoakışkanların Laminer Akışının Isı Transferine Etkisi

**Ünal AKDAĞ**

Prof. Dr.  
Aksaray Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Makine Mühendisliği  
Aksaray  
uakdag@gmail.com  
orcid: 0000-0002-1149-7425

**Selma AKÇAY**

Yük. Mak. Müh.  
Aksaray Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Aksaray  
selma.352@hotmail.com  
orcid: 0000-0003-2654-0702

**ÖZ**

Bu çalışmada, sabit duvar sıcaklığına sahip eliptik boru demeti üzerinden geçen CuO-su nanoakışkanın laminer akışının ısı transferine ve sürtünme faktörüne etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada, farklı kesit alanına sahip eliptik borular kademeli olarak yerleştirilmiş ve analizler iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan eşitlikler, sonlu hacimler metodu ile SIMPLE algoritması kullanılarak çözülmüştür. Sayısal incelemelerde, nanoakışkan tipi ve partikül hacim oranı ( $j$ ) sabit tutulmuş, eliptik kanalın en/boy oranı ( $AR$ ) ve Reynolds sayısı ( $Re$ ) değiştirilerek incelemeler gerçekleştirilmiştir. Bu parametrelerin ısı transferi karakteristiği ve sürtünme faktörü üzerindeki etkileri taban akışkan ile de karşılaştırılmıştır. Boru demeti üzerinden nanoakışkanların laminer akışında anlık hız ve sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Sayısal sonuçlar, ısı transferindeki iyileşmenin eliptik kanal kesitinden ve Reynolds sayısından oldukça etkilendiğini göstermiştir. Nanoakışkan kullanımı ile ısı transferinin de arttığı, ancak bu artışın sürtünme faktöründe de bir miktar artışa sebep olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek ısı transferi performansı,  $AR=1,0$  ve  $Re=1000$ 'de yaklaşık olarak %15 olarak elde edilmiştir. Çalışma sonucunda boru demetleri üzerinden nanoakışkanların laminer akışı için en iyi termo-hidrolik performansı sağlayan parametreler belirlenmiştir. En iyi termo-hidrolik performans  $Re=1000$  için  $AR=0,5$ 'te yaklaşık olarak %12 olarak elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler**

Eliptik Boru Demeti, Nanoakışkan, Isı Transferi, Sürtünme Faktörü, Sayısal Çalışma.

## The Effect on the Heat Transfer of Laminar Nanofluid Flow over the Elliptic Tube Bundle

**ABSTRACT**

In this study, the effect of the laminar flow of CuO-water nanofluids through the elliptical tube bundle with constant wall temperature on the heat transfer and friction factor are investigated numerically. In the study, elliptical tubes with different cross-sectional area are placed staggered and the analyses are carried out for two dimensions. The governing equations are solved by using SIMPLE algorithm with finite volume method (FVM). In the studies, the nanofluid type and particle volume fraction ( $j$ ) are kept constant, Reynolds number ( $Re$ ) and aspect ratio of the elliptic channel ( $AR$ ) are changed. The effects on the friction factor and the heat transfer characteristics of these parameters are also compared with the base fluid. In the laminar flow of the nanofluids over the tube bundle, instantaneous velocity and temperature distributions are obtained. Numerical results have shown that the improvement in heat transfer is highly affected by the elliptic channel cross-section and Reynolds number. It has been observed that the heat transfer increases with the use of nanofluid, but this increase also causes slightly increase in friction factor. The highest heat transfer performance is obtained as approximately 15% at  $AR=1,0$  and  $Re=1000$ . As a result of the study, the parameters providing the best thermo-hydraulic performance for the laminar flow of the nanofluids on the tube bundles are determined. The best thermo-hydraulic performance is obtained as approximately 12% for  $Re=1000$  at  $AR=0,5$ .

**Keywords**

Elliptic Tube Bundle, Nanofluid, Heat Transfer, Friction Factor, Numerical Study.

Geliş Tarihi : 10.09.2018  
Kabul Tarihi : 06.02.2019

Akdağ, Ü., Akçay, S., Eliptik Boru Demeti Üzerinden Geçen Nanoakışkanların Laminer Akışının Isı Transferine Etkisi, 14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı, sf. 770-780, 17-20 Nisan 2019.

## 1. GİRİŞ

Boru demetleri üzerinden akış, endüstride ısıtma ve soğutma gibi uygulamalarda oldukça sık kullanılmaktadır. Bu nedenle bu tür akışlarda termohidrolik performansın iyileştirilmesi için alternatif yöntemler araştırılmaktadır. Bu yöntemler daha çok pasif ısı transferi iyileştirme yöntemleri olarak bilinen boruların geometrik düzenlemeleri ve/veya akışkan ile ilgili özelliklerin iyileştirilmesi ile ilgili uygulamaları içermektedir. Isı transferi çalışmalarında temel akışkanın taşınım özelliklerinin sınırlı olması nedeni ile temel akışkana nano boyutlu parçacıklar ilave edilerek akışkanın taşınım özelliklerinin iyileştirilmesi yoluna gidilmektedir. Nanoakışkanlar ile ilgili yapılan birçok çalışmada, temel akışkana ilave edilen bu nano parçacıkların ısı transferini kayda değer bir şekilde artırdığı bildirilmiştir [1-6].

Endüstride birçok alanda yaygın olarak kullanılan çapraz akışlı, borulu ısı değiştiricilerinin boyutlarının giderek küçülmesi nedeniyle, daha kompakt ısı değiştiricilerinin tasarlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır [7]. Bu tür ısı değiştiricilerinde boru demetleri üzerinden çapraz akışla ilgili pek çok optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır. Araştırmacılar, kullanılan boruların kesitleri (dairesel, elips vs.), boru dizilimleri (sıralı, saptırılmış vs.), borular arasındaki mesafe gibi birçok geometrik parametrenin yanında, akış rejimleri (laminer, türbülanslı vs.) akışkan tipi gibi birçok parametreyi de inceleyerek en uygun tasarımın ortaya çıkması için çalışmalar yapmaktadırlar. Farklı şekillere sahip boru demetleri üzerinden zorlanmış taşınım ile ısı transferi pek çok araştırmacı tarafından deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir [8-12]. Khan vd. [13], düzgün ve saptırılmış sıralı boru demetleri üzerinden zorlanmış taşınım ile ısı transferini analitik olarak incelemişler ve çalışma sonucunda saptırılmış sıralı dizilişin, düzgün sıralı dizilişe göre ısı transferini artırdığını belirtmişlerdir. Zhang vd. [14], sabit ısı akısına sahip dairesel boru demetleri üzerinden zorlanmış taşınım ile ısı transferini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, akışın sapma açısının artmasıyla hem sürtünmenin hem de Nu sayısının arttığını belirtmişlerdir. Haitham vd. [15] boru demetleri üzerinden laminer akışta ısı transferini iki boyutlu sayısal olarak incelemişler ve düzgün sıralı dizilişe göre saptırılmış sıralı dizilişin çok daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Erdinç vd. [16], kare kesit

alanına sahip çapraz akışlı saptırılmış boru demetli ısı değiştiricilerinin ilk yatırım, işletme maliyeti ve toplam giderleri araştırarak ekonomik optimizasyon çalışması yapmışlardır ve çeşitli parametrelere göre elde edilen sonuçları grafikler şeklinde sunmuşlardır. Li vd. [17], çapraz akışta kıvrımlı oval boru demetleri üzerinden geçen akışkanın belirli Re sayısı aralığı ( $7500 \leq Re \leq 18000$ ) için hava tarafı ısı transferi ve sürtünme faktörünü deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda kıvrımlı oval kesitli boru demetleri için ısı transfer performansının dairesel kesitli boru demetlerine göre %25,5-33,3 daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Karaçavuş ve Aydın [18], dairesel kesit alanına sahip sıralı ve şaşırtmalı dizilmiş boru demetleri üzerinden çapraz akışta Nusselt sayısının değişimini RNG k-e türbülans modeli kullanarak Fluent programı ile incelemişlerdir. Programdan elde edilen n değerlerini, korelasyonlar yardımıyla hesaplanan değerler ile karşılaştırarak grafikler halinde sunmuşlardır.

Jun ve Jjin [19], sabit yüzey sıcaklığına sahip, düzgün ve saptırılmış dizilişli boru demetleri üzerinden  $Al_2O_3$  nanoakışkanların laminer zorlanmış taşınım ile ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. İnceleme sonucunda nanoakışkan kullanımının saf suya göre ısı transferini ve basınç kaybını oldukça artırdığını belirtmişlerdir. Boru demetleri üzerinden nanoakışkan akışıyla ilgili yapılan çalışmalarda Reynolds sayısı ve nanopartikül oranının artmasıyla ısı transferinin arttığı belirtilmiştir [20-22]. Wahid vd. [23], farklı geometriye sahip düzgün sıralı boru demetleri üzerinden  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanın %4 partikül hacim oranı için akış ve ısı transferini SIMPLER algoritmasını kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarını  $100 \leq Re \leq 800$  aralığı için laminer daimi akış şartlarında iki boyutlu olarak gerçekleştirmişler ve sonuçları temel akışkan ile karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda Re sayısının artması ile ısı transferinin de arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, tüm boru geometrileri için nanoakışkan kullanımının basınç düşüşünde hafif bir artış ile birlikte ısı transferini temel akışkana göre önemli derecede iyileştirdiğini bildirmişlerdir.

Boru demetleri üzerinden akışta ısı transferi ve sürtünme faktörünü etkileyen pek çok parametrenin olması nedeniyle optimum parametrelerin bulunmasına yönelik çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmada, Ahmed vd. [24], tarafından yapılan

çalışma referans alınmıştır. Referans çalışmada dairesel boru demetleri üzerinden akışta nanopartikül hacim oranı, Reynolds sayısı ve borular arasındaki mesafe gibi parametreler incelenmiştir. Mevcut çalışmada ise nanoakışkan tipi ve partikül hacim oranı sabit tutularak, saptırılmış farklı kesit alanına sahip eliptik boru demetleri üzerinden nanoakışkanın laminar akışında ısı transferi ve basınç düşüşü analiz edilmiştir. Anlık akış görüntüleri elde edilerek ısı geçiş mekanizması değerlendirilmiştir.

## 2. SAYISAL ÇALIŞMA

### 2.1. Sayısal Model

Şekil 1'de farklı kesit alanına sahip eliptik boru demeti üzerinden akış için seçilen çözüm alanlarına ait sayısal modelin geometrileri verilmiştir.

Geometride boru demetleri saptırılmış olarak düzenlenmiştir. Boru eksenleri arasındaki uzaklık düşeyde  $S_T$  ve yatayda  $S_L$  olarak ifade edilmiştir. Çözüm alanı olarak simetrik düzenlemeden dolayı hesaplamalarda Şekil 1'de görüldüğü gibi geometriyi temsil eden bir modül alınmıştır.

Elipsin yatay eksen uzunluğu  $b$ , dikey eksen uzunluğu  $a$  olarak belirlenmiş ve her üç geometri için yatay eksen uzunluğu  $b=10$  mm sabit tutularak  $a$  uzunluğu değiştirilmiştir. Daha sonra elipsin dikey eksen uzunluğunun yatay eksen uzunluğuna oranı  $AR=a/b$  şeklinde boyutsuz bir sayı tariflenmiştir. Çalışmalar,  $AR=0,5, 1,0$  ve  $1,5$  olmak üzere üç farklı kesit alanı için gerçekleştirilmiştir. Geometride kullanılan boruların  $AR=0,5, 1,0$  ve  $1,5$  için hidrolik çapları ( $D_h$ ) sırasıyla  $6,32, 10$  ve  $11,77$  olarak belirlenmiştir. Boru dizilişine esas ölçüler ise  $S_T/b=2$  ve  $S_L/b=1,5$  olarak alınmıştır. Çözüm alanı ölçüleri  $H \times L=20 \times 120$  mm dir. Elips borunun en-boy oranı hariç diğer tüm geometrik parametreler çalışma boyunca sabit tutulmuştur.

### 2.2. Denklemler ve Sayısal Çözüm

Boru demetleri üzerindeki akış, laminar, sıkıştırılamaz, iki boyutlu ve daimi kabul edilip akışkan Newtoniyen 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;

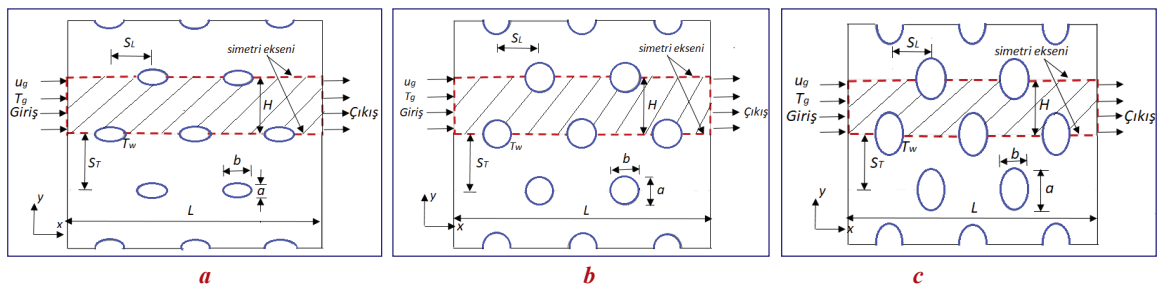
$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

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

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

Problemin çözümünde HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) tabanlı Fluent 18.2 [25], paket programı kullanılmıştır. Denklemler, sonlu hacimler metodu ile ayrıklaştırılmış, eşitlikler SIMPLE algoritması kullanılarak çözülmüştür, taşınım ve yayılım terimleri ise ikinci dereceden ileri fark şeması kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Yakınsama kriteri olarak enerji eşitlikleri için  $10^{-9}$ , diğer eşitlikler için  $10^{-6}$  kabul edilmiştir.

Ağ (grid) bağımsızlığını ve optimum eleman sayısını belirlemek amacıyla  $Re=400$  değerinde  $AR=0,5$  kesit alanı için 12587, 26154, 32027 ve 35243 eleman sayılarında,  $AR=1,0$  kesit alanı için 12587, 16283, 25581 ve 28942 eleman sayılarında ve  $AR=1,5$  kesit alanı için 5821, 11679, 14763, 28281 ve 31423 eleman sayılarında çeşitli çözümler uygulanmış ve bu çözümlere göre elde edilen  $Nu$  sayılarının  $AR=0,5, 1,0$  ve  $1,5$  için sırasıyla 32027, 25581 ve 28281 eleman sayılarından sonra, %2'den daha az değiştiği gözlemlenmiş olup çalışmada belirtilen bu eleman sayıları tercih edilmiştir.



Şekil 1. Sayısal modelin geometrisi (a-  $AR=0,5$ , b-  $AR=1$ , c-  $AR=1,5$ )

Akışkanın boru demeti üzerine  $T_g = 300$  K sıcaklığında üniform olarak girdiği kabul edilmiştir. Çözüm alanı girişinde, “hız girişi sınır şartı” tariflenmiş, çıkışta “basınçlı çıkış sınır şartı” uygulanmıştır. Boruların dış yüzeylerine  $T_w = 400$  K sabit sıcaklık sınır şartı ve kaymama sınır şartı uygulanmıştır. Çözüm alanı olarak bir modül seçildiğinden, alt ve üst sınırlar simetrik olarak tanımlanmıştır. Maksimum hız ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır;

$$u_{max} = [S_T / (S_T - D_h)] u_g \quad (4)$$

### 2.3. Nanoakışkanın Fiziksel Özellikleri

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

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

$$c_{nf} = (1 - \phi)c_{bf} + \phi c_{pt} \quad (6)$$

$$k_{nf} = k_{bf}[4,97\phi^2 + 2,72\phi + 1] \quad (7)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}[123\phi^2 + 7,3\phi + 1] \quad (8)$$

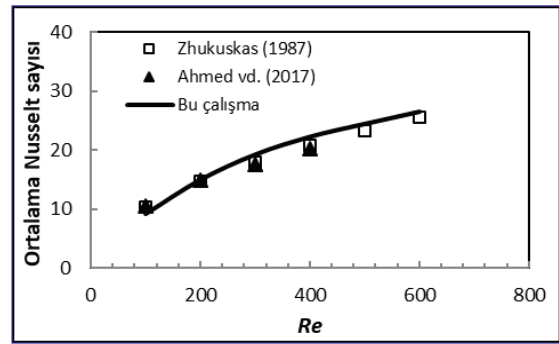
Burada  $\phi$ , nanopartikül hacim oranını (%), nf, bf, pt indisleri sırasıyla nanoakışkanı, temel akışkanı ve nanopartikülü göstermektedir. Temel akışkan olarak saf su kullanılmıştır. Tablo 1’de suyun ve kullanılan CuO nanopartikülün termo-fiziksel özellikleri verilmiştir.

Nanoakışkanın termo-fiziksel özellikleri (özellikle ısı iletkenlik, viskozite ve ısı kapasitesi) literatürdeki farklı eşitlikler kullanılarak hesaplanmış ve bu eşitliklerin, sonucu ne kadar değiştirdiği analiz edilmiştir. Elde edilen değerlerin çok fazla değişmediği (en fazla %1,58) gözlenmiştir [26-28]. Bun-

dan dolayı en yaygın kullanılan bu eşitlikler tercih edilmiştir.

### 3. SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR

Bu çalışmada, sayısal çözümün geçerliliğini belirlemek için literatürde boru demetlerinin üzerinden akış için geliştirilmiş bağıntı olan Zhukuskas [29] bağıntısı ve Ahmed, vd. [24] tarafından yapılan çalışma referans alınmış ve  $AR = 1$  (dairesel kesit alanı) için benzer geometri kullanılarak daimi akış şartları için sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 2’den de görüldüğü gibi elde edilen sonuçların literatürle iyi bir uyum sağladığı görülmüştür.



Şekil 2. Doğrulama için referans çalışmalarla yapılan karşılaştırma

Bu çalışmada, farklı kesit alanlarına sahip elips boru demetleri üzerinden geçen CuO-su, nanoakışkanın sabit partikül hacim oranı ( $\phi = \%3$ ) için  $200 \leq Re \leq 1200$  aralığında laminer daimi akış şartlarında ısı transferi, sürtünme faktörü ve termo-hidrolik performansı sayısal olarak araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan parametreler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. CuO Nanopartikülün ve Suyun Termo-Fiziksel Özellikleri

	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	c [J/kgK]	k [W/mK]	$\mu$ [kg/ms]
Su	998	4182	0,613	0,001003
CuO	6500	533	17,65	-

Tablo 2. Çalışmada Kullanılan Parametreler

Nanoakışkan türü	Hacim oranı ( $\phi$ )	Kesit alanı (AR)	Reynolds sayısı (Re)
CuO-su	%3	0.5	200, 400, 600, 800, 1000, 1200
CuO-su	%3	1.0	200, 400, 600, 800, 1000, 1200
CuO-su	%3	1.5	200, 400, 600, 800, 1000, 1200

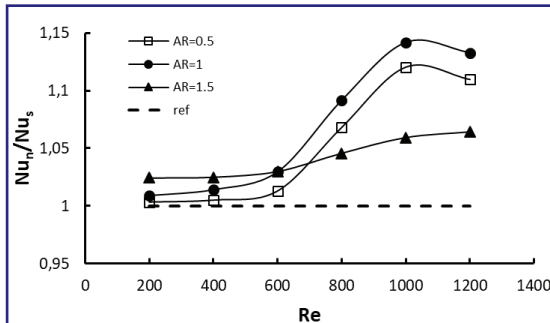
Boru demeti üzerinden nanoakışkanın akışında, boruların yüzeyinde sabit sıcaklık sınır şartı uygulanmış olup çözüm alanında yerel ve ortalama Nu sayısı ise Eşitlik (9-10) ile hesaplanmıştır.

$$Nu_x = q''D_h / [k(T_{w,x} - T_{b,x})] \quad (9)$$

$$Nu = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx \quad (10)$$

Burada k nanoakışkanın ısı iletkenlik katsayısı,  $D_h$  hidrolik yarıçap,  $T_w$  borunun duvar sıcaklığı ve  $T_b$  nanoakışkanın yığın akışkan sıcaklığıdır. Boru demetinden gerçekleşen ısı transferi performansını belirlemek için Nusselt sayısına bağlı olarak  $\eta = Nu_n / Nu_s$  şeklinde boyutsuz performans sayısı tariflenmiştir. Burada  $Nu_n$  nanoakışkan için hesaplanan ortalama Nusselt sayısını,  $Nu_s$  ise temel akışkan için hesaplanan ortalama Nusselt sayısını göstermektedir.

Şekil 3'te farklı Re sayıları ve AR değerleri için ısı transfer performansının değişimi, temel akışkan ile karşılaştırılarak gösterilmektedir. Temel akışkan ile karşılaştırıldığında her üç kesit alanı için de nanoakışkanlar, Re sayısı artışına bağlı olarak ısı transferini iyileştirmektedir. Düşük Re sayılarında ( $Re \leq 600$ ), AR= 1,5'da diğer kesit alanlarına göre daha yüksek ısı transferi performansı elde edilirken yüksek Re sayılarında ( $Re \geq 800$ ) ise AR= 1'de en iyi ısı transferi performansı elde edilmiştir. AR= 0,5 ve 1,0 için Re= 1000 değerinde ise ısı transferi performansı için bir tepe noktası oluşmuştur. En iyi ısı transferi performansı ise AR= 1,0 ve Re= 1000'de yaklaşık olarak 1,15 olarak elde edilmiştir.

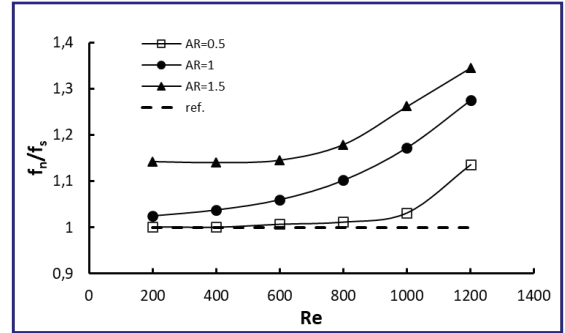


Şekil 3. Re sayısı ve farklı kesit alanları ile ısı transfer performansının değişimi

Diğer taraftan, nanoakışkan tipi, partikül çapı, partikül hacim oranı ve akışkan hızına bağlı olarak

cidar ve akışkan içinde meydana gelen kayma gerilmeleri önemli derecede basınç düşüşüne neden olmaktadır. Temel akışkana göre nanoakışkanların viskozitesinin yüksek olması nedeniyle nanoakışkan kullanarak yapılan ısı transferi iyileştirme çalışmalarında basınç düşümünün de değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, boru demeti üzerinden akan nanoakışkanın basınç düşümünü belirlemek için boyutsuz sürtünme faktörü  $r = f_n / f_s$  tanımlanmıştır. Burada  $f_n$  nanoakışkan akışında,  $f_s$  ise daimi akışta elde edilen yüzey sürtünme değerini göstermektedir.

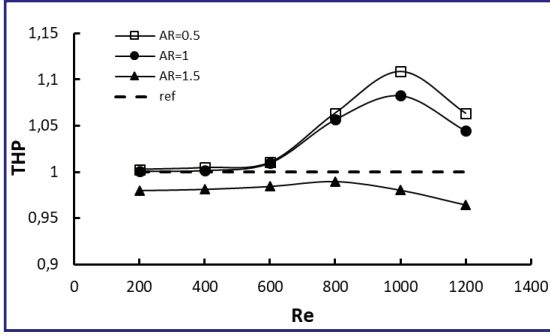
Şekil 4'te farklı Re sayıları ve AR değerleri için boyutsuz sürtünme faktörünün değişimi, temel akışkan ile karşılaştırılarak gösterilmektedir. Re sayısının artması ile sürtünme faktörü de artmaktadır. Boru yüzey alanının daha fazla olması nedeniyle AR= 1,5 değerinde en yüksek sürtünme faktörü elde edilirken AR= 0,5 değerinde ise en düşük sürtünme değeri elde edilmiştir.



Şekil 4. Re sayısı ve farklı kesit alanları ile boyutsuz sürtünme faktörünün değişimi

Isı transferindeki iyileşmeye karşılık sürtünmede meydana gelen artışın da birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bunun için, ısı transferindeki artış ifade eden ( $Nu_n / Nu_s$ ) iyileşme oranının, sürtünme faktörüne oranı ile Termo-Hidrolik Performans (THP) tanımlanmış olup (Eşitlik 11) termo-hidrolik performansın 1'den büyük olması boru demeti üzerinden akan nanoakışkanın sebep olduğu sürtünmeye rağmen ısı transferinde bir iyileşme olduğunu ifade etmektedir.

$$THP = \frac{Nu_p / Nu_s}{(f_p / f_s)^{1/3}} = \frac{\eta}{r^{1/3}} \quad (11)$$



**Şekil 5. Re sayısı ve farklı kesit alanları ile termo-hidrolik performansın değişimi**

Şekil 5'te farklı Re sayıları ve AR değerleri için termo-hidrolik performansın değişimi, temel akışkan ile karşılaştırılarak gösterilmektedir. AR= 1,5 değeri için tüm Re sayılarında termo-hidrolik performansta herhangi bir iyileşme görülmemiştir. Bunun nedeni, ısı transferi performansında artışa rağmen boru demetleri üzerinden nanoakışkan akışında sürtünme faktörünün daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Düşük Re sayılarında ( $Re \leq 600$ ) AR= 0,5 ve 1,0 için birbirine yakın değerlerde daha düşük termo-hidrolik performans değeri elde edilirken yüksek Re sayılarında ( $Re \geq 800$ ) AR= 0,5 için daha yüksek termo-hidrolik performans elde edilmiştir. En iyi termo-hidrolik performans ise Re= 1000 için AR= 0,5'te yaklaşık olarak 1,12 olarak tespit edilmiştir.

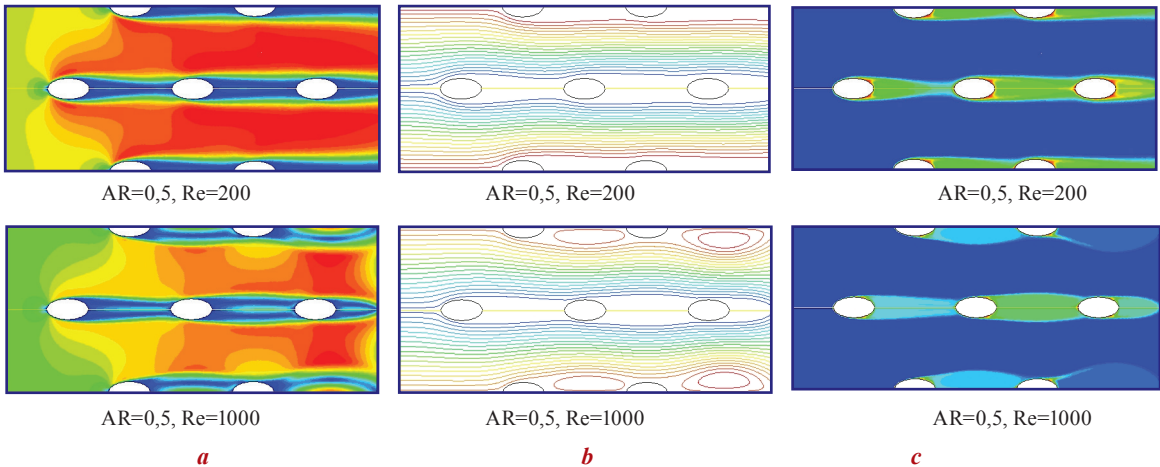
Çalışmada, farklı kesit alanlarına sahip boru demetleri üzerinden CuO-su nanoakışkanın  $\phi = \%3$  partikül hacim oranında ve  $200 \leq Re \leq 1200$  ara-

lığındaki sürekli laminer akışı için simülasyonlar yapılmış ve değişen parametrelere bağlı olarak akış ve sıcaklık alanlarına ait görüntüler elde edilmiştir. Bu çalışmada tüm AR değerleri için test edilen en düşük Re değeri ( $Re=200$ ) ile en iyi termo-hidrolik performansın elde edildiği Re değerine ( $Re=1000$ ) ait akış ve sıcaklık alanlarının görüntülerine yer verilmiştir.

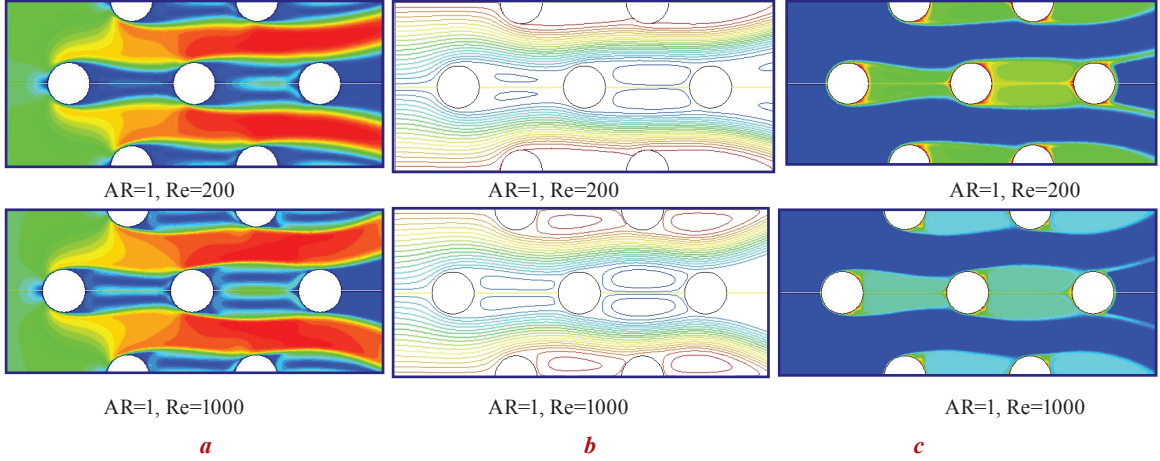
Şekil 6'da AR=0,5 için  $Re=200$  ve  $Re=1000$  değeri için elde edilen hız, akım çizgileri ve sıcaklık alanlarının görüntüleri verilmiştir. Şekil 6a ve b'de hız ve sıcaklık alanlarının Re sayısından oldukça etkilendiği açıkça görülmektedir. Hız ve akım çizgileri görüntülerinden Re sayısı arttıkça akış içerisindeki dalgalanmaların arttığı ve ikincil akış yapılarının oluştuğu görülmektedir. Bu ikincil akış yapıları ise borular arasında daha iyi akışkan karışımını sağlayarak ısı transferini iyileştirmektedir. Şekil 6c'de verilen sıcaklık görüntülerinden Re sayısı arttıkça sıcak olan boru yüzeyindeki ısı transfer hızının daha yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 7'de AR=1 için  $Re=200$  ve  $Re=1000$  değeri için elde edilen hız, akım çizgileri ve sıcaklık alanlarının görüntüleri verilmiştir. Şekil 7a ve b'den hız ve sıcaklık alanlarının Re sayısından yine çok fazla etkilendiği, Re sayısı arttıkça özellikle akış yönünde borular arasında daha büyük ikincil akış döngülerinin oluştuğu görülmektedir. Bu akış döngüleri, ısı transferi iyileşmesine önemli katkı sağlamaktadır.

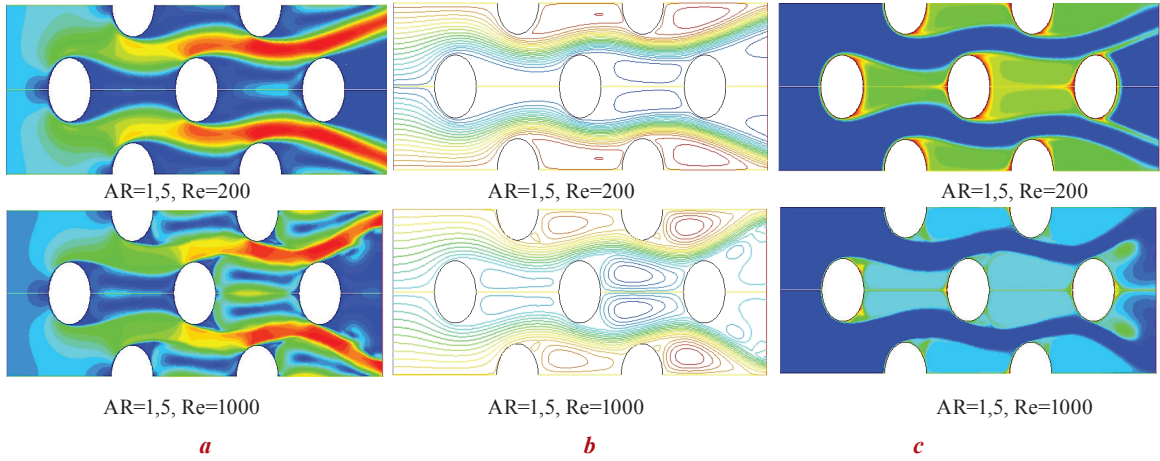
Şekil 8'de ise AR=1,5 için  $Re=200$  ve  $Re=1000$  değeri için elde edilen hız, akım çizgileri ve sıcaklık



**Şekil 6. AR= 0,5 için Re sayısı ile akış ve sıcaklık alanlarının değişimi (a- hız alanı, b- akım çizgileri, c- sıcaklık alanı)**



**Şekil 7. AR=1 için Re sayısı ile akış ve sıcaklık alanlarının değişimi (a- hız alanı, b- akım çizgileri, c- sıcaklık alanı)**



**Şekil 8. AR=1,5 için Re sayısı ile akış ve sıcaklık alanlarının değişimi (a- hız alanı, b- akım çizgileri, c- sıcaklık alanı)**

alanlarının görüntüleri verilmiştir. Şekil 8a, b ve c'den hız ve sıcaklık alanlarının Re sayısından çok fazla etkilendiği, düşük Re sayılarında bile blokaj oranının artmasından dolayı akışta dalgalanmaların olduğu ve ikincil akış yapılarının oluştuğu, yüksek Re sayılarında ise akış döngülerinin tüm akış içerisinde etkili olduğu görülmektedir. Bu yapıların tüm akış alanına yayılmasının nedeni elips geometriye sahip boruların en-boy oranındaki artıştır. Bu durum, düşük Re sayılarında AR=1,5 değerinde en yüksek ısı transferi performansının elde edilmesinin nedeni olduğunu göstermektedir. Ancak AR=1,5 değerinde artan Re sayıları ile birlikte akış içerisindeki çalkantıların artması sonucu akışkan partikülleri arasındaki etkileşimin artması ve boruların yüzey alanının daha büyük olması ne-

deniyle yüzeydeki sürtünme değerinin daha fazla olması önemli derecede basınç düşüşüne neden olmaktadır. Bu nedenle AR=1,5 değerinde artan Re sayılarında ısı transferinde artış olmasına rağmen yüksek sürtünme değerinden dolayı termo-hidrolik performansta herhangi bir iyileşme elde edilememiştir. Isı transferindeki artış ve basınç düşümü birlikte değerlendirildiğinde en iyi durum, AR=0,5 eliptik borular üzerinden akışta elde edilmektedir.

Şekil 6, 7 ve 8'de verilen tüm akış görüntülerinden boru demetleri üzerinde  $\phi = \%3$  partikül hacim oranında CuO-su nanoakışkan akışında ısı transferi ve sürtünme faktörü üzerinde boruların geometrisinin ve Re sayısının oldukça etkili olduğu görülmektedir.

## SONUÇLAR

Bu çalışmada, daimi akış şartlarında farklı kesit alanlarına sahip eliptik boru demetleri üzerinden akan nanoakışkanların ısı transferi ve sürtünme faktörü üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Sabit partikül hacim oranında ( $\phi = \%3$ ) CuO-su nanoakışkanın farklı Re sayıları için termo-hidrolik performansı analiz edilmiş ve sonuçlar saf su ile karşılaştırılmıştır. Sayısal simülasyonlar sonucunda akış alanına ait hız ve sıcaklık görüntüleri elde edilmiştir. Çalışma sonucunda, boru demetleri üzerinden akışta nanoakışkanların kullanılmasının ısı transferini iyileştirdiğini ve ısı transferindeki bu iyileşmenin ve sürtünme faktörünün eliptik kanal kesitinden ve Re sayısından oldukça etkilendiğini göstermektedir. Yapılan çalışma, boru demetleri üzerinden akışta uygun boru kesitleri ve nanoakışkan kullanılması halinde termo-hidrolik performansın etkin bir şekilde artırılabilirliğini göstermiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Li, Q., Xuan, Y., “Heat Transfer Enhancement of Nanofluids”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21, 58–64, 2000.
- [2] Heri, S.Z., Etemad S.G., Esfahany M.N., “Convective Heat Transfer of a Cu/Water Nanofluid Flowing Through a Circular Tube”, *Experimental Heat Transfer*, 22, 217–227, 2009.
- [3] Lotfi, R., Saboohi Y., Rashidi, A.M., “Numerical Study of Forced Convective Heat Transfer of Nanofluids: Comparison of Different Approaches”, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37, 74–78, 2010.
- [4] Yang, Y.T., LAI, F.H., “Numerical Study of Heat Transfer Enhancement with the Use of Nanofluids in Radial Flow Cooling System”, *International Journal Heat and Mass Transfer*, 53: 25–26, 5895–5904, 2010.
- [5] Mohammed, H.A., Bhaskaran, G., SHUAIB, N.H., Saidur, R., “Heat Transfer and Fluid Flow Characteristics in Micro Channels Heat Exchanger Using Nanofluids: A Review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 1502, 2011
- [6] Akdag U., Akcay S., Demiral D., “Heat Transfer Enhancement With Laminar Pulsating Nanofluid Flow in a Wavy Channel”, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 59, 17–23, 2014.
- [7] Alam, T., Kim, M.H., “A Comprehensive Review on Single Phase Heat Transfer Enhancement Techniques in Heat Exchanger Applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 813-839, 2018.
- [8] Atalay H. Çoban M.T., “Çapraz Akışlı Hava-Gaz Isı Değiştiricisinin Sonlu Farklar Metodu Kullanılarak Modellenmesi”, *Polyteknik Dergisi*, 21(1): 155-163, 2018.
- [9] Mangrulkar, C.K., Dhoble, A.S., Deshmukh, A.R., Mandavgane, S.A., “Numerical Investigation of Heat Transfer and Friction Factor Characteristics From in-Line Cam Shaped Tube Bank in Crossflow”, *Applied Thermal Engineering*. 110, 521–538, 2017
- [10] Lavasani, A.M., Bayat, H., Maarefdoost, T., “Experimental Study of Convective Heat Transfer From in-Line Cam Shaped Tube Bank in Crossflow”, *Applied Thermal Engineering*, 65:1–2, 85–93, 2014.
- [11] Salcedo, E., Cajas, J.C., Treviño, C., Martinez, L., “Unsteady Mixed Convection Heat Transfer From Two Confined Isothermal Circular Cylinders in Tandem: Buoyancy and Tube Spacing Effects”, *International Journal Heat and Fluid Flow*, 60, 12–30, 2016.
- [12] Gamrat, G., Marine, M.F., Person, S. L., “Numerical Study of Heat Transfer Over Banks of Rods in Small Reynolds Number Cross-Flow”, *International Journal Heat and Mass Transfer*, 51, 853–864, 2008.
- [13] Khan, W.A., Culham, J.R., Yovanovich, M.M., “Convection Heat Transfer From Tube Banks in Crossflow: Analytical Approach”, *International Journal Heat and Mass Transfer*, 49, 25–26, 4831–4838, 2006.
- [14] Zhang, L.Z., Ouyang, Y.W., Zhang, Z.G., Wang, S.F., “Oblique Fluid Flow and Convective Heat Transfer Across a Tube Bank Under Uniform Wall Heat Flux Boundary Conditions”, *International Journal Heat and Mass Transfer*, 91, 1259–1272, 2015.
- [15] Haitha, M.S., Bahaidarah, H.M.S., Anand, N.K., Chen, H.C., “A Numerical Study of Fluid Flow and Heat Transfer Over a Bank of Flat Tubes”, *Numerical Heat Transfer, Part A Appl.* 48:4, 359–385, 2005.
- [16] Erdin, M.T., Yılmaz, A., Yılmaz, T., “Çapraz Akışlı Saptırılmış Boru Demeti Isı Değiştiricilerinin Ekonomik Optimizasyonu”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2), 139-148, Aralık 2016.
- [17] Li, X., Zhu, D., Yin, Y. Liu, S., Mo, X., “Ex-



- perimental Study on Heat Transfer and Pressure Drop of Twisted Oval Tube Bundle In Cross Flow”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 99, 251-258, 2018.
- [18] Karaçavuş B., Aydın, K., “Boru Demetleri Üzerinde Çapraz Akışta Nusselt Sayısının Nümerik İncelenmesi”, 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi – 19-22 Nisan 2017/ İzmir
- [19] Jun, B.H, Jiin, Y.J., “Numerical Investigation of Nanofluids Laminar Convective Heat Transfer Through Staggered and In-Lined Tube Banks”, F.L. Gaol et al. (Eds.), *Proc. of the 2nd International Congress on CACS, AISC 144*, 483–490, 2011.
- [20] Abdel-Rehi, Z.S., “A Numerical Study of Heat Transfer and Fluid Flow Over an in-line Tube Bank”, *Energy Sources, Part A: Recov. Util. Environ. Eff.* 34 (22) 2123–2136, 2012.
- [21] Ho, C.J., Chang, C.Y., Wei, M.Y., “An Experimental Study of Forced Convection Effectiveness of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Water Nanofluid Flowing in Circular Tubes”, *International Communication Heat and Mass Transfer*, 83, 23–29, 2017.
- [22] Mangrulkar, C.K., Kriplani, V.M., “Experimental Investigation of Convective Heat Transfer Enhancement Using Alumina / Water and Copper Oxide / Water Nanofluids”, *Thermal Science*, 20, 1681–1692, 2016.
- [23] Wahid, M.A., Gholami A.A., Mohammed H.A., “Numerical Study of Fluid Flow and Heat Transfer Enhancement of Nanofluids over Tube Bank”, *Applied Mechanics and Materials*, 388, 149-155, 2013.
- [24] Ahmed, M.A., Yaseen, M.M., Yusoff, M.Z. “Numerical Study of Convective Heat Transfer From Tube Bank in Cross Flow Using Nanofluid”, *Case Studies in Thermal Engineering*, 10, 560-569, 2017.
- [25] ANSYS Fluent User Guide & Theory Guide-Release 18.2, Fluent Ansys Inc, USA, 2018
- [26] Minea, A.A., “Effect of Microtube Length on Heat Transfer Enhancement of a Water/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluid at High Reynolds Numbers”, *International Journal Heat and Mass Transfer*, 62, 22–30, 2013.
- [27] Kakac, S., Pramuanjaroenkij, A., “Review of Convective Heat Transfer Enhancement with Nanofluids”, *International Journal Heat and Mass Transfer*, 52, 3187–3196, 2009.
- [28] Pak B.C., Cho Y.I., “Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids With Sub-micron Metallic Oxide Particles”, *Experimental Heat Transfer*, 11 (2), 151–170, 1998.
- [29] Zukauskas, A., “Heat Transfer From Tubes in Cross Flow”, *Advances in Heat Transfer*, 18: 87, 1987.