



Boru demeti üzerinden geçen Al_2O_3 - su nanoakışkanın pulsatif akışının ısı transferine etkisi

Selma AKÇAY*

Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Aksaray
selma.352@hotmail.com ORCID: 0000-0003-2654-0702, Tel: (506) 645 27 47

Ünal AKDAĞ

Aksaray Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Aksaray
uakdag@gmail.com ORCID: 0000-0002-1149-7425, Tel:(506) 466 00 66

Oktay HACIHAFIZOĞLU

Trakya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Edirne
oktayh@trakya.edu.tr ORCID: 0000-0002-6487-5223, Tel: (536) 720 67 22

Doğan DEMİRAL

Aksaray Üniversitesi, Makine Mühendisliği bölümü, Aksaray
ddemiral@aksaray.edu.tr ORCID: 0000-0001-9738-7632, (543) 893 08 92

Geliş: 21.06.2018, Kabul Tarihi: 22.10.2018

Öz

Bu çalışmada, sabit duvar sıcaklığına sahip boru demetleri üzerinden geçen Al_2O_3 -su nanoakışkanın laminer pulsatif akışının ısı transferine ve sürtünme faktörüne etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada, dairesel kesitli 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 sabit tutulmuş olup, analizler Reynolds sayısının sabit bir değeri için pulsatif parametrelerin değiştirilmesi ile elde edilmiştir. Bu parametrelerin ısı transferi karakteristiği ve sürtünme faktörü üzerindeki etkileri daimi akış şartları ile karşılaştırılmıştır. Boru demeti üzerinden pulsatif akışta anlık hız ve sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Sayısal sonuçlar, ısı transferindeki iyileşmenin pulsatif parametrelerden oldukça etkilendiğini göstermiştir. Pulsatif genlik ve frekans arttıkça ısı transferinin de arttığı, ancak bu artışın sürtünme faktöründe de bir miktar artışa sebep olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda boru demetleri üzerinden nanoakışkanların pulsatif akışı için en iyi termo-hidrolik performansı sağlayan parametreler belirlenmiştir. Sonuçlar boyutsuz parametrelerin bir fonksiyonu olarak verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Boru demeti; Pulsatif akış; Nanoakışkanlar; Isı transferi; Sayısal çalışma

* Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Boru demetleri üzerinden zorlanmış taşınım ısı transferi, ısıtma ve soğutma gibi uygulamalarda en çok çalışılan temel konular arasında yer almaktadır. Endüstride ısıtma ve soğutma işlemlerinde kullanılan ısı değiştiricileri gibi cihazların ısı performansını iyileştirmek için alternatif yöntemler araştırılmaktadır. Bu yöntemlerden biri de pasif ısı transferi iyileştirme yöntemleri arasında yer alan, temel akışkana nanopartiküllerin ilavesiyle elde edilen nanoakışkanların kullanılmasıdır. Isı transferi uygulamalarında 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 araştırmada temel akışkana ilave edilen bu nano parçacıkların ısı transferini kayda değer bir şekilde artırdığı konusunda literatürde yaygın bir görüş bulunmaktadır (Li ve Xuan, 2000; Heris, vd. 2009; Yang ve Lai, 2010; Minea, 2009; Kakaç ve Pramuanjaroenkij, 2009).

Diğer taraftan özellikle çapraz akışlı borulu ısı değiştiricileri, endüstride birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda ısı üreten cihazların soğutulması gibi uygulamalarda, özellikle cihazların boyutlarının giderek küçülmesi nedeniyle, daha kompakt ısı değiştiricilerinin tasarlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır (Alam ve Kim, 2018; Mueller ve Chiou, 1988). Bu tür ısı değiştiricilerinde boru demetleri üzerinden çapraz akışla ilgili bir çok optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır. Uzmanlar, kullanılan boruların kesitleri (dairesel, elips, oval vs), boru dizilimleri (düzgün, saptırılmış sıralı vs), borular arasındaki mesafe gibi birçok geometrik parametrelerin yanında, akış rejimleri (laminer, türbülanslı vs.) akışkan tipi gibi birçok parametreyi de inceleyerek en uygun tasarımın ortaya çıkması için çaba sarfetmektedirler. Farklı şekillere sahip boru demetleri üzerinden zorlanmış taşınım ısı transferi pek çok araştırmacı tarafından deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir (Mangrulkar, vd.

2017; Lavasani, vd. 2014, Salcedo, vd. 2016; Gamrat, vd. 2008). Khan vd. (2006), düzgün ve saptırılmış sıralı boru demetleri üzerinden zorlanmış taşınım ısı transferini analitik olarak incelemişlerdir. İnceleme sonucunda saptırılmış sıralı dizilişin, düzgün sıralı dizilişe göre ısı transferini artırdığını belirtmişlerdir. Zhang vd. (2015), sabit ısı akısına sahip dairesel boru demetleri üzerinden zorlanmış taşınım ısı transferini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, akışın sapma açısının artmasıyla hem sürtünmenin hem de Nu sayısının arttığını belirtmişlerdir. Haitham vd. (2005) 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. Jun ve Jiin (2011), sabit cidar sıcaklığına sahip, düzgün ve saptırılmış dizili boru demetleri üzerinden Al_2O_3 nanoakışkanların laminer zorlanmış taşınım 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 (Abdel-Rehim, 2012; Ho, vd. 2017; Mangrulkar ve Kriplani, 2016).

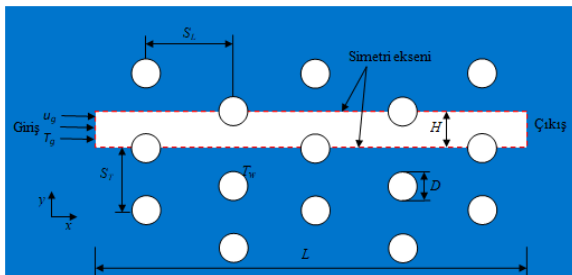
Isı transferini daha da artırmak için pasif yöntemlerin yanında aktif yöntemlere de başvurulmaktadır. Bunlardan biri, akışa periyodik salınımlar eklenerek yapılan pulsatif akış uygulamalarıdır ve son yıllarda aktif ve pasif yöntemlerin birlikte kullanıldığı sistemlerde yaygın olarak uygulanmaktadır. Pulsatif akış, daimi ve zamana bağlı hız bileşenlerinden oluşur ve ana akışa bir periyodiklik kazandırarak, akışın daha iyi karışması sağlanır (Patel ve Attal, 2016; Akdağ, 2010). Literatürde bazı geometriler için nanoakışkanların pulsatif akışında ısı transferinin kayda değer bir şekilde arttığına ilişkin çalışmalar mevcuttur (Akdağ, vd. 2014; Narrein, vd. 2016). Pulsatif akış ve nanoakışkanın birlikte kullanıldığı kanal içi akışlarla ilgili çalışmalar

bulmak mümkündür (Raghoshay, vd. 2012). Bu çalışmalarda ısı transferinin arttığı belirtilmiştir. Boru demetleri üzerinden pulsatif akış ile ilgili Konstantinidis vd. (2000; 2002) tarafından yapılan birkaç çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda düzgün dizilişli boru demetleri üzerinden akış, akış görüntüleme tekniği ile incelenmiş olup, pulsatif akışın vorteks oluşturma potansiyeli incelenmiştir. Bu durumun ısı transferinde artışa neden olacağı belirtilmiş, ancak ortaya somut bir sonuç konulmamıştır. Buradan hareketle, boru demetlerinin üzerinden nanoakışkanların pulsatif akışı ile ilgili yeterince çalışma olmaması, akış periyodikliğinden dolayı olayın fiziğinin de karmaşık olması nedeniyle bu konudaki açığı doldurmak amacıyla bu sayısal çalışma yapılmıştır. Bu konuda Ahmed, vd. (2017), tarafından yapılan çalışma referans alınmıştır. Referans çalışmada boru demetleri üzerinden akışta nanopartikül hacim oranı, Reynolds sayısı ve borular arasındaki mesafe gibi parametreler incelenmiştir. Mevcut çalışmada ise bu parametreler sabit tutularak aktif ısı transferi iyileştirme yöntemi olan pulsatif akış giriş şartı uygulanmış olup, saptırılmış boru demetleri üzerinden nanoakışkanın laminar pulsatif akışında, pulsatif akış parametrelerine bağlı olarak ısı transferi ve basınç düşüşü analiz edilmiştir. Anlık akış görüntüleri elde edilerek ısı geçiş mekanizması değerlendirilmiştir.

Sayısal Çalışma

Sayısal Model

Şekil 1'de, boru demeti üzerinden akış için seçilen çözüm alanına ait sayısal modelin geometrisi verilmiştir.



Şekil 1. Sayısal modelin geometrisi (ölçeksiz)

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

Geometride borular dairesel kesitli olup boruların çapı (D) 10mm, boru dizilişine esas ölçüler ise $S_T/D=2$ ve $S_L/D=1.5$ olarak alınmıştır. Çözüm alanı ölçüleri $H \times L=20 \times 120$ mm dir.

Sayısal Yöntem ve Sınır Şartları

Boru demeti üzerindeki akış, laminar, sıkıştırılmaz, iki boyutlu ve zamana bağlı kabul edilerek akışkan Newtonien özellikte ve tek fazlı olarak düşünülmüştür. Nanopartiküller ile suyun aynı akış ve ısı şartlarında sisteme girdiği kabul edilmiş, yerçekimi ve radyasyonla ısı transferi ihmal edilmiştir. Nanoakışkan olarak Al_2O_3 -su kullanılmış olup, nanoakışkan tipi ve partikül hacim oranı ($\phi=5\%$) değiştirilmemiştir. Bu kabullere göre korunum denklemleri aşağıda Eşitlik (1-3)'te verilmiştir.

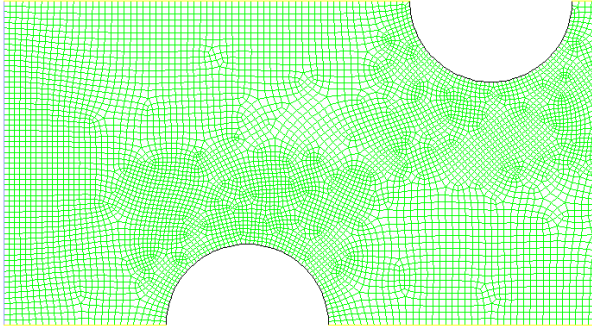
$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \nabla^2 u_j \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{1}{Re \cdot Pr} \nabla^2 T \quad (3)$$

Sayısal çözümler, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği tabanlı ANSYS Fluent 15.0 (2015) paket programı kullanılarak elde edilmiştir. Denklemlerin ayrıklaştırılmasında sonlu hacim metodu uygulanarak eşitlikler SIMPLE algoritması ile çözülmüştür. Taşınım ve yayılım terimleri ikinci dereceden ileri fark şeması ile ayrıklaştırılmıştır. Yakınsama kriteri olarak enerji eşitlikleri için 10^{-9} , diğer eşitlikler için 10^{-6} alınmıştır. Ağ (grid) bağımsızlığı için $Re=400$ değerinde 6196, 12587, 16283 ve 23769 olmak üzere çeşitli eleman sayılarında çözümler uygulanmış ve bu çözümlere göre elde edilen Nu sayılarının 12587 ağ sayısından sonra, %2 den

daha az değiştiği gözlemlenmiş ve bu çalışmada 16283 eleman sayısı tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan ağ yapısı Şekil.2' de verilmiştir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan ağ yapısı

Çalışmalar $Re=400$ sabit değeri için farklı pulsatif genlik ve pulsatif frekanslarda yapılmış olup kullanılan sayısal çözüm parametreleri Tablo.1 de verilmiştir.

Tablo 1: Sayısal çözüm parametreleri

Reynolds Sayısı (Re)	Genlik (A_o)	Frekans (Wo)
400	0.5, 0.8, 1, 1.2	$\cong 7, 10, 15, 18$
	0.5, 0.8, 1, 1.2	$\cong 7, 10, 15, 18$
	0.5, 0.8, 1, 1.2	$\cong 7, 10, 15, 18$

Akışkanın boru demeti üzerine $T_g=293K$ sıcaklığında üniform olarak girdiği kabul edilmiştir. Çözüm alanı girişinde, "hız girişi sınır şartı" tariflenmiş, çıkışta "basınçlı çıkış sınır şartı" uygulanmıştır. Boruların dış yüzeylerine $T_w=350K$ sabit sıcaklık sınır şartı ve kaymama sınır şartı uygulanmıştır. Çözüm alanı olarak bir modül seçildiğinden, alt ve üst sınırlar periyodik olarak tanımlanmıştır. Pulsatif akışı ifade eden zamana bağlı hız giriş şartı Eşitlik (4) ile verilmiştir.

$$u_g = U [1 + A_o \sin(\omega t)] \quad (4)$$

Burada, A_o pulsatif genliği, ω ise radyan cinsinden açısal hızı ifade etmektedir. Boyutsuz frekansı ifade eden boyutsuz sayılardan biri Strouhal sayısı (St) olup bu sayı daha yüksek frekans değerlerinde tercih edilmektedir. Bu çalışmada ise frekansın oldukça düşük olması nedeniyle Wo sayısı tercih edilmiştir. Açısal hızı

bağlı olarak tariflenen Womersley sayısı (Wo) (Eşitlik 5), Wo sayısı da pulsatif frekansı ifade etmektedir.

$$Wo = D \sqrt{\omega/\nu} \quad (5)$$

Burada D , dairesel kesitli boruların çapını, ω rad cinsinden açısal hızı, ν ise kinematik viskoziteyi göstermektedir.

Nanoakışkanın Termo-fiziksel Özellikleri

Nanopartiküllerin temel akışkan içine homojen bir şekilde dağıldığı ve nanoakışkanın Newtonien özellikte olduğu kabul edilmiştir. Bu şartlar altında nanoakışkanın termo-fiziksel özellikleri Eşitlik (5-8) ile hesaplanarak elde edilmiştir. Temel akışkan olarak su kullanılmıştır.

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

$$C_{nf} = (1 - \varphi)C_{bf} + \varphi C_{pt} \quad (6)$$

$$k_{nf} = k_{bf} \frac{[k_{pt} + 2k_{bf} - 2\varphi(k_{bf} - k_{pt})]}{[k_{pt} + 2k_{bf} + \varphi(k_{bf} - k_{pt})]} \quad (7)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} [123\varphi^2 + 7.3\varphi + 1] \quad (8)$$

Burada nf , pt ve bf alt indisleri sırasıyla nanoakışkan, nanopartikülü ve temel akışkanı göstermektedir. Tablo. 2'de suyun ve kullanılan nanopartiküllerin termo-fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 2: Al_2O_3 nanopartikülün ve suyun termo-fiziksel özellikleri

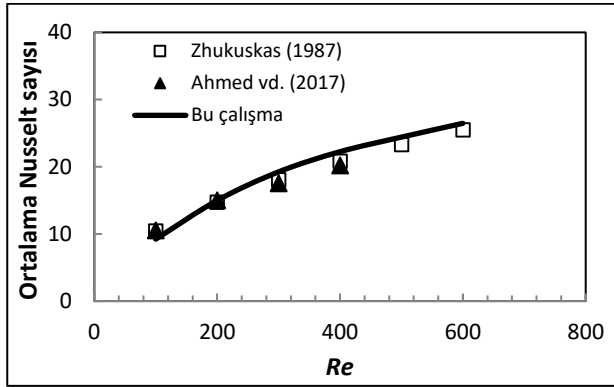
	ρ [kg/m ³]	C [j/kgK]	k [W/mK]	μ [kg/ms]
Su	998	4182	0.613	0.001003
Al₂O₃	3970	765	40	-

Nanoakışkanın termo-fiziksel özellikleri (özellikle ısıl 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 (Minea, 2009; Kakaç ve Pramuanjaroenkij, 2009). Bundan dolayı en yaygın kullanılan bu eşitlikler tercih edilmiştir.

Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada, sayısal çözümün geçerliliğini belirlemek için literatürde boru demetlerinin üzerinden akış için geliştirilmiş bağıntı olan Zhukuskas (1987) bağıntısı ve Ahmed, vd. (2017) tarafından yapılan çalışma referans alınmış ve benzer geometri kullanılarak daimi akış şartları için sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil.3'ten de görüldüğü gibi elde edilen sonuçların literatürle iyi bir uyum sağladığı görülmüştür. Bu doğrulamadan hareketle pulsatif akış şartları için çözümler yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3. Doğrulama için referans çalışmalarla yapılan karşılaştırma

Bu çalışmada, Al_2O_3 -su, nanoakışkanın sabit partikül hacim oranı için ($\phi=5\%$) pulsatif akış giriş şartlarında ısı transferi ve sürtünme faktörü sayısal olarak araştırılmıştır. Araştırmalarda pulsatif parametreler değiştirilirken nanopartikül tipi, partikül hacim oranı ve Reynolds sayısı gibi diğer parametreler sabit tutulmuştur. Boru demeti üzerinden nanoakışkanın akışında, boruların yüzeyinde sabit sıcaklık sınır şartı uygulanmış olup çözüm alanında yerel ve anlık ısı transferi katsayısı Eşitlik (9-11) ile, ortalama Nu sayısı ise Eşitlik (12) ile hesaplanmıştır.

$$Nu_x = -\frac{k_{nf}}{k_f} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \quad (9)$$

$$h_x = \frac{1}{L} \int_0^L h dx \quad (10)$$

$$h_t = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} h dt \quad (11)$$

$$Nu = \frac{1}{2\pi L} \int_0^L \int_0^{2\pi} Nu_{x,t} dt dx \quad (12)$$

Burada, 2π bir pulsatif çevrimi ifade etmektedir. Sürtünme faktörü Eşitlik (13) ile belirlenmiştir.

$$f = \frac{\Delta P}{(N_L) \rho_{nf} u_{max}^2} \quad (13)$$

Bu eşitlikte, N_L boru sıra sayısı olup, maksimum hız aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Eşitlik 14):

$$u_{max} = \frac{S_T}{S_T - D} u_g \quad (14)$$

Burada k_{nf} nanoakışkanın ısı iletim katsayısı, ρ_{nf} nanoakışkanın yoğunluğunu ve L toplam çözüm alanı uzunluğunu göstermektedir. Akış pulsatif (periyodik) olduğu için bir çevrim boyunca geçen ısı, hem zamanın hem de konumun fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Boru demetinden gerçekleşen ısı transferi performansını belirlemek için Nusselt sayısına bağlı olarak $\eta = Nu_p / Nu_s$ şeklinde boyutsuz bir sayı tariflenmiştir. Burada Nu_p pulsatif akış için hesaplanan ortalama Nusselt sayısını, Nu_s ise daimi akış için hesaplanan ortalama Nusselt sayısını göstermektedir.

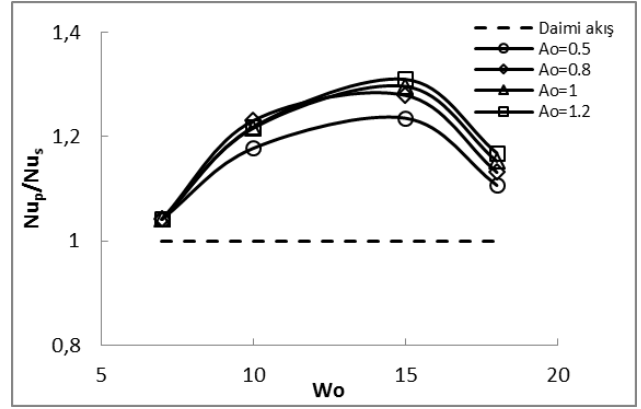
Temel akışkan ile karşılaştırıldığında nanoakışkanlar, Re sayısı ve nanopartikül hacim oranının artışına bağlı olarak ısı transferini iyileştirmektedir. Diğer taraftan, nanoakışkan tipi, partikül çapı, partikül hacim oranı ve akışkan hızına bağlı olarak cidar ve akışkan içinde meydana gelen kayma gerilmeleri önemli

derecede basınç düşüşüne neden olmaktadır. Temel akışkana göre nanoakışkanların viskozite değerlerinin daha yüksek olmasının nedeni nanopartiküllerin akışkanın viskozitesini artırmasıdır. Bundan dolayı nanoakışkan kullanarak yapılan ısı transferi iyileştirme çalışmalarında basınç düşümünün de değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, boru demeti üzerinden nanoakışkanın pulsatif akışında basınç düşümünü belirlemek için boyutsuz sürtünme faktörü $r=f_p/f_s$ tanımlanmıştır. Burada f_p pulsatif akışta, f_s ise daimi akışta elde edilen yüzey sürtünme değerini göstermektedir.

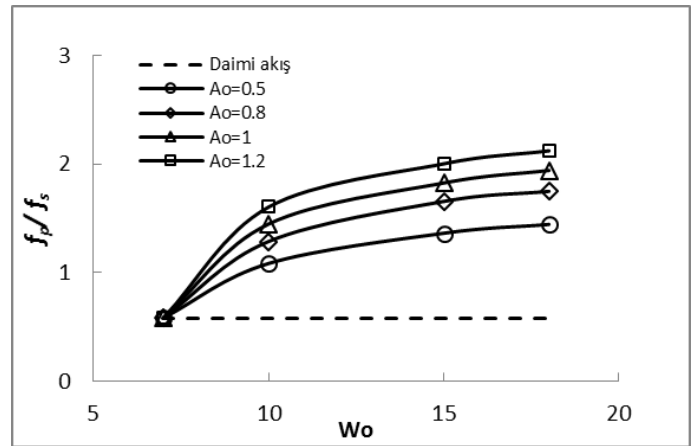
Şekil 4'te pulsatif parametrelere bağlı olarak ısı transferindeki iyileşme ve Şekil 5'te pulsatif parametrelere bağlı olarak sürtünme faktörünün değişimi verilmiştir. Sonuçlar daimi akış şartları ile de karşılaştırılmıştır.

Şekil.4'de görüldüğü gibi ısı transferinde yaklaşık %30 gibi bir iyileşme sözkonusudur. Bu iyileşme, nanoakışkanın boru demetleri üzerinden pulsatif akışındaki ısı transferinin daimi akıştaki ısı transferine oranıdır. Elde edilen sonuçlardan pulsatif parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkileri açıkça görülmektedir. Düşük genlik ve düşük frekanslar için ısı transferinde kayda değer bir artış olmamakla birlikte, yüksek genlik ve belirli bir frekans için ($Wo=15$) ısı transferinin iyileştiği ve ısı transferini maksimum yapan bir frekans olduğu anlaşılmaktadır. Bu tepe noktadan sonra frekansı daha fazla artırmanın ısı transferini azalttığı görülmektedir.

Şekil 5'te sayısal çözümlerden elde edilen sürtünme faktörünün değişimi verilmiştir. Genlik ve frekans arttıkça sürtünmelerin de arttığı görülmektedir. En yüksek genlik ve en yüksek frekansta en fazla sürtünme meydana gelmektedir. Bu parametrelerin artması akış içerisinde çalkantıların dolayısı ile akışkan molekülleri arasındaki etkileşimin artmasına sebep olmakta ve bu durum da sürtünmelerin artmasına neden olmaktadır.



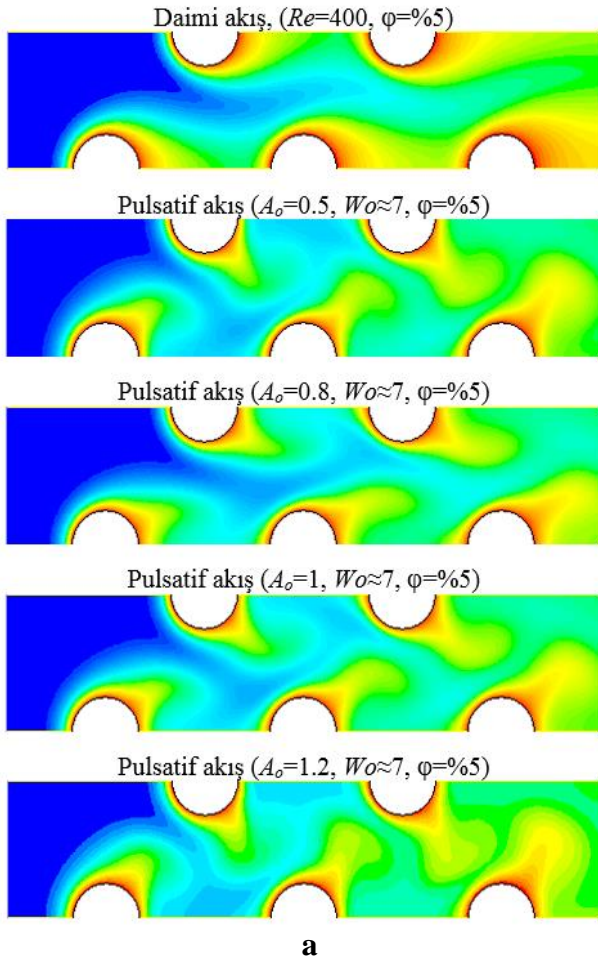
Şekil 4. Pulsatif parametreler ile ısı transferi performansının değişimi



Şekil 5. Pulsatif parametreler ile boyutsuz sürtünme faktörünün değişimi

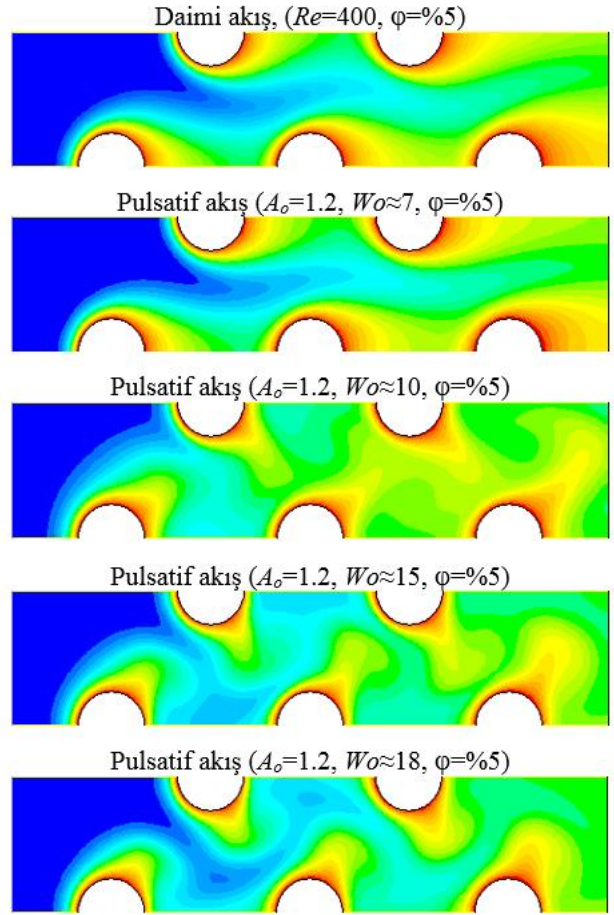
Pulsatif akışın ısı transferi üzerindeki etkilerinin anlaşılabilmesi için, Şekil 6a'da daimi akış ve Şekil 6b' de pulsatif akış için sıcaklık dağılımları verilmiştir.

Şekil 6a'da frekansın sabit tutulduğu durum için pulsatif genliğin sıcaklık dağılımı üzerindeki etkileri, Şekil 6b'de ise genliğin sabit tutulduğu durumda pulsatif frekansın sıcaklık dağılımı üzerindeki etkileri görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi düşük genlik ve frekanslarda sıcaklık dağılımı daimi akış durumuna benzerken, artan frekans ve genlikle birlikte pulsatif etkinin daha fazla hissedildiği anlaşılmaktadır.



a

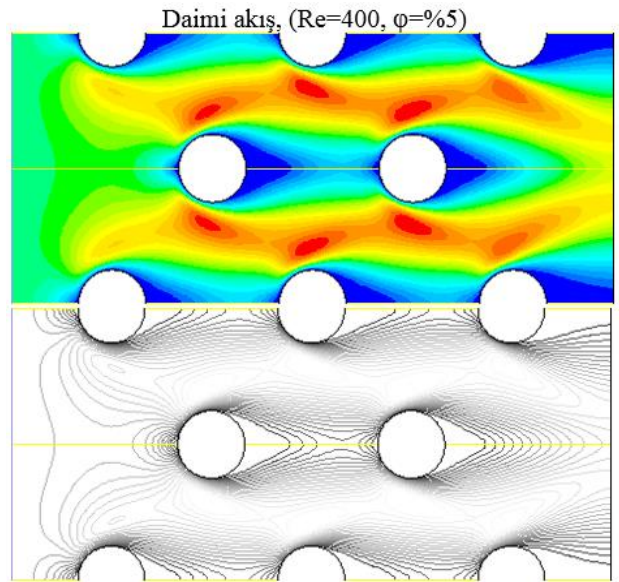
Şekil 6a. Pulsatif genlik ile sıcaklık dağılımının değişimi



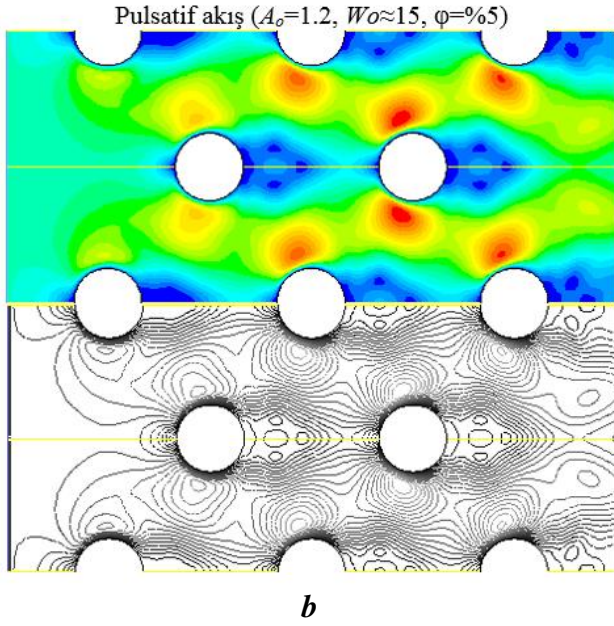
b

Şekil 6b. Pulsatif frekans ile sıcaklık dağılımının değişimi

Şekil 7'de ise pulsatif etkinin daha iyi anlaşılabilmesi için, daimi akış (Şekil 7a) ve pulsatif akış (Şekil 7b) durumu için hız dağılımları verilmiştir. Şekil 7b'de görüldüğü gibi, pulsatif akışta borular arkasında daha büyük sirkülasyon bölgeleri oluşmakta, bu oluşan sirkülasyon bölgeleri periyodik olarak hareket ederek, ana akımın geçtiği çekirdek akış bölgesini daha iç kesimlere taşımakta, akışın daha iyi karışmasını sağlamaktadır. Bu durumda soğuk akışkan ile silindir etrafındaki sıcak akışkan daha iyi karışmaktadır. Diğer taraftan, daimi akış ile karşılaştırıldığında pulsatif akışta borular etrafındaki sınır tabakanın daha ince olduğu da gözlenmektedir. Bu sebeplerden dolayı pulsatif akışın ısı transferini önemli ölçüde iyileştirdiği söylenebilir. Bu durum sayısal sonuçlarla da doğrulanmaktadır.



a

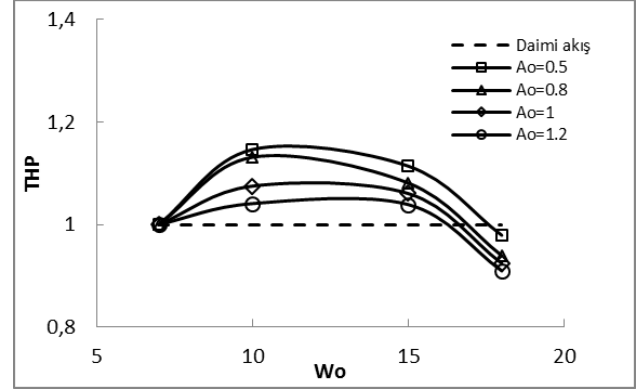


Şekil 7: Daimi akış için hız dağılımları (a)
Pulsatif akış için hız dağılımı (b)

Isı transferindeki iyileşmeye karşılık sürtünmede meydana gelen artışın da birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bunun için, ısı transferindeki artışı ifade eden (Nu_p/Nu_s) iyileşme oranının, sürtünme faktörüne oranı ile Termo-Hidrolik Performans (THP) tanımlanmış olup (Eşitlik-15) termo-hidrolik performansın 1'den büyük olması boru demeti üzerinden pulsatif akışta nanoakışkanın sebep olduğu sürtünmeye rağmen ısı transferinde bir iyileşme olduğunu ifade etmektedir.

$$THP = \frac{(Nu_p / Nu_s)}{(f_p / f_s)^{1/3}} = \frac{\eta}{r^{1/3}} \quad (15)$$

Şekil 8'de sürtünmelere rağmen pulsatif akışın ısı transferinde meydana getirdiği artışı gösteren THP değerleri verilmiştir. Düşük frekans ve genlikte termo-hidrolik performansta bir artış olmamakla birlikte, termo-hidrolik performansın maksimum olduğu bir frekans değeri olduğu görülmektedir. Yüksek genlik ve belirli bir frekansta ($Wo=10$) en iyi termo-hidrolik performansın sağlanması, pulsatif akışın sürtünmelerde bir miktar artışa sebep olsada ısı transferini kayda değer bir şekilde artırdığını göstermiştir.



Şekil 8. Termo-hidrolik performansın pulsatif parametrelere bağlı olarak değişimi

Frekans, kritik değerin ($Wo=15$) üzerinde arttıkça hem ısı transfer performansının azalması hem de sürtünme kayıplarının daha fazla artması nedeniyle termo-hidrolik performanstaki iyileşme azalmaktadır. Bu çalışmada Reynolds sayısı, nanopartikül tipi ve hacim oranı ve aynı zamanda geometrik parametreler sabit tutulmuştur. Uygun parametreler seçilmesi halinde, nanoakışkanların pulsatif akışının ısı transferini artırmada önemli bir potansiyele sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç

Bu çalışmada, kademeli düzenlemeye sahip boru demeti üzerinden nanoakışkanın laminer, pulsatif akış şartlarında akış ve ısı transferi üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Analizlerde, nanoakışkan tipi (Al_2O_3), partikül hacim oranı ($\phi=0.5$), Re sayısı ($Re=400$) ve geometrik parametreler ($S_T=2$, $S_L=1.5$) sabit tutulurken pulsatif parametreler değiştirilmiştir. Sayısal sonuçlar, ısı transferi performansının ve sürtünme faktörünün pulsatif akış parametrelerinden önemli derecede etkilendiğini, yüksek genlik ve düşük frekanslarda ısı transferi performansı artarken, artan genlik ve frekansla birlikte sürtünme faktörünün de arttığını göstermiştir. En iyi ısı transferi performansının yüksek genlik ($A_o=1.2$) ve düşük frekans ($Wo=10$) değerlerinde elde edildiği gözlemlenmiştir. Çalışma sonuçları, boru demetleri üzerinden akışta uygun parametrelerin kullanılması halinde pulsatif nanoakışkan akışının termo-hidrolik performansı etkin bir şekilde artırabileceğini

göstermiştir. Bu ısı transferi iyileştirme tekniğinin daha kompakt ısı değiştiricilerinin tasarımında kullanılabileceği tavsiye edilebilir.

Kaynaklar

- Abdel-Rehim, Z.S., (2012). 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.
- Ahmed, M. A., Yaseen, M. M., Yusoff, M. Z. (2017). Numerical study of convective heat transfer from tube bank in cross flow using nanofluid. *Case Studies in Thermal Engineering*, 10, 560-569.
- Akdag, U., (2010). Numerical investigation of pulsating flow around a discrete heater in a channel. *International Communication Heat and Mass Transfer*, 37 (7), 881-889.
- Akdag, U., Akcay, S., Demiral, D., (2014). Heat Transfer Enhancement with Laminar Pulsating Nanofluid Flow in a Wavy Channel, *International Communication Heat and Mass Transfer*, 59, 17–23.
- Alam, T., Kim, M.H., (2018). A comprehensive review on single phase heat transfer enhancement techniques in heat exchanger applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 813-839.
- ANSYS Fluent user guide & theory guide- Release 15.0, (2015). Fluent Ansys Inc, USA.
- Gamrat, G., Marinet, M.F., Person, S. L., (2008). Numerical study of heat transfer over banks of rods in small Reynolds number cross-flow, *International Journal Heat and Mass Transfer*, 51, 853–864.
- Haitham, M.S., Bahaidarah, H.M.S., Anand, N.K., Chen, H.C., (2005). 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.
- Heris, S.Z., Etemad S.G., Esfahany M.N., (2009). Convective heat transfer of a Cu/water nanofluid flowing through a circular tube, *Experimental Heat Transfer*, 22, 217–227.
- Ho, C.J., Chang, C.Y., Wei, M.Y., (2017). An experimental study of forced convection effectiveness of Al₂O₃-water nanofluid flowing in circular tubes, *International Communication Heat and Mass Transfer*, 83, 23–29.
- Jun, B.H, Jiin, Y.J., (2011). 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.
- Kakac, S., Pramuanjaroenkij, A., (2009). Review of Convective Heat Transfer Enhancement with Nanofluids”. *International Journal Heat and Mass Transfer*, 52, 3187–3196.
- Khan, W.A., Culham, J.R., Yovanovich, M.M., (2006). Convection heat transfer from tube banks in crossflow: analytical approach, *International Journal Heat and Mass Transfer*, 49, 25–26, 4831–4838.
- Konstantinidis, E., Castiglia, D., Balabani, S., Yianneskis, M., (2000). On the Flow and Vortex Shedding Characteristics of an In-Line Tube Bundle in Steady and Pulsating Crossflow,. *Chemical Engineering Research and Design*, 78 (8), 1129–1138.
- Konstantinidis, E., Balabani, S., Yianneskis, M., (2002). A study of vortex shedding in a staggered tube array for steady and pulsating cross-flow. *Journal of Fluids Engineering* 124:3, 737-746.
- Lavasani, A.M., Bayat, H., Maarefdoost, T., (2014). Experimental study of convective heat transfer from in-line cam shaped tube bank in crossflow, *Applied Thermal Engineering*, 65:1–2, 85–93.
- Li, Q., Xuan, Y. (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids, *International Journal Heat and Fluid Flow*, 21, 58–64.
- Mangrulkar, C.K., Dhoble, A.S., Deshmukh, A.R., Mandavgane, S.A., (2017). Numerical investigation of heat transfer and friction factor characteristics from in-line cam shaped tube bank in crossflow, *Applied Thermal Engineering*. 110, 521–538.
- Mangrulkar, C.K., Kriplani, V.M., (2016). Experimental investigation of convective heat transfer enhancement using alumina / water and copper oxide / water nanofluids, *Thermal Science*, 20, 1681–1692.
- Minea, A.A., (2013). Effect of microtube length on heat transfer enhancement of a water/Al₂O₃ nanofluid at high Reynolds numbers, *International Journal Heat and Mass Transfer*, 62, 22–30.
- Mueller, A.C., Chiou, J.P.. (1988). Review of various types of flow maldistribution in heat exchangers, *Heat Transfer Engineering*, 9: 2, 36-50.
- Narrein, K., Sivasankaran, S., Ganesan, P., (2016). Numerical investigation of two-phase laminar pulsating nanofluid flow in a helical microchannel, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 69: (8), 921-930.

- Patel, J.T., Attal, M.H., (2016). An Experimental Investigation of Heat Transfer Characteristics of Pulsating Flow in Pipe. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 6, 5: 1515-1521.
- Rahgoshay, M., Ranjbar, A. A., Ramiar, A. (2012). Laminar pulsating flow of nanofluids in a circular tube with isothermal wall. *International Communication Heat and Mass Transfer*, 39 (3) 463-469.
- Salcedo, E., Cajas, J.C., Treviño, C., Martínez, L., (2016). 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.
- Yang, Y.T., Lai, F.H., (2010). 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.
- Zhang, L.Z., Ouyang, Y.W., Zhang, Z.G., Wang, S.F., (2015). 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.
- Zukauskas, A., (1987). Heat transfer from tubes in cross flow, *Advances in Heat Transfer*, 18: 87.

ρ Yoğunluk [kg/m^3]
 φ Nanopartikül hacim oranı (%)

alt indisler

bf temel akışkan
 ζ çıkış
 g giriş
 nf nanoakışkan
 pt nanopartikül
 s saf su
 w duvar

Semboller

A_o Boyutsuz genlik [x_m/D]
 C Özgül ısı [J/kgK]
 D Boru çapı [mm]
 f Yüzey sürtünme değeri
 h Isı taşınım katsayısı [$\text{W/m}^2\text{K}$]
 H Çözüm alanı yüksekliği [m]
 k Isı iletim katsayısı [W/mK]
 L Toplam çözüm alanı uzunluğu [m]
 η Isı transferi performansı [Nu_p/Nu_s]
 Nu Nusselt sayısı
 Pr Prandtl sayısı [$\mu C_p/k$]
 r Boyutsuz sürtünme faktörü [f_p/f_s]
 Re max. Reynolds sayısı [$\rho u_{max}D/\mu$]
 T Sıcaklık [K]
 T_b yığın (bulk) sıcaklığı [K]
 THP Termo-hidrolik performans [$\eta/r^{1/3}$]
 u_g Giriş hızı [m/s]
 U Ortalama hız [m/s]
 Wo Womersley sayısı [$D\sqrt{\omega/\nu}$]
 x,y Koordinatlar
 μ Dinamik viskozite [kg/ms]

The effect on heat transfer of pulsating flow of the Al₂O₃-water nanofluid passing through the tube bundle

Extended abstract

In this study, the convective heat transfer characteristics of Al₂O₃-water nanofluids flow over a tube bundle under constant wall temperature and pulsating inlet flow conditions are investigated numerically. In the analyzes, the pulsating parameters were changed while the nanofluid type (Al₂O₃), particle volume ratio ($\phi=5\%$), Re number ($Re=400$) and geometric parameters ($S_T=2$, $S_L=1.5$) were fixed. The circular-tube banks with staggered arrangement is considered. The flow over the tube bundle was considered laminar, incompressible, two-dimensional and time dependent, Newtonian and single-phase. Gravity and radiation heat transfer were neglected.

Numerical solutions were obtained using the ANSYS Fluent 15.0 (2015) package program based on Computational Fluid Dynamics. The equations are solved by the SIMPLE algorithm by applying the finite volume method. The convergence criterion is 10^{-9} for energy equations and 10^{-6} for other equations. For grid independence, solutions are applied to various element numbers, and according to these solutions, 16283 elements are preferred in the study.

To determine the heat transfer performance from the tube bundle, a dimensionless number ($\eta = Nu_p / Nu_s$) is described, depending on the Nusselt number. Where Nu_p is Nusselt number calculated for the pulsating flow, and Nu_s is Nusselt number calculated for the steady flow. In order to understand the effects of pulsating flow on heat transfer, the temperature distributions are obtained for the steady flow and the pulsating flow. The figures show that the temperature distributions at low amplitudes and frequencies are similar to the steady flow conditions, but it is understood that the pulsating effect is seen more with increasing frequency and amplitude.

In this study, the dimensionless friction factor ($r = f_p / f_s$) is defined to determine the pressure drop in the pulsating flow of the nanofluid through the tube bundle. Where, f_p is the surface friction value for the pulsating flow and f_s is the surface friction value for the steady flow. It is shown that for a high amplitude

and a specific frequency ($Wo=15$), the heat transfer improved and the heat transfer maximized, while there is no significant increase for low amplitude and low frequencies. After this peak, it seems that increasing the frequency further reduces heat transfer. The variation of the friction factor obtained from numerical solutions is shown with the figures. As the amplitude and frequency increase, the friction factor increases. The increase of these parameters leads to the increase of turbulence in the flow, the more mixing of the flow, which causes the friction to increase.

In the Figures, velocity distributions are given for steady flow and pulsating flow. In Figures are seen that larger circulation zones are formed behind the tubes in the pulsating flow, and these circulation regions periodically change. In this case the cold fluid and the hot fluid around the cylinder are better mixed. On the other hand, it is observed that the boundary layer around the tubes in the pulsating flow is thinner when compared with the steady flow. For these reasons, it can be said that the pulsating flow significantly improves the heat transfer.

The thermo-hydraulic performance (THP) is defined as the ratio of the improvement in heat transfer (Nu_p / Nu_s) to the friction factor. If the thermo-hydraulic performance is greater than 1, there is an improvement in heat transfer despite frictions. Although there is no increase in thermo-hydraulic performance at low frequency and amplitude, it appears that the thermo-hydraulic performance has a specific frequency value. Providing the best thermo-hydraulic performance with a high amplitude and a certain frequency ($Wo=10$) has shown that the pulsating flow significantly increases heat transfer, even if it causes a slight increase in friction.

Numerical results show that the heat transfer performance and friction factor are significantly affected by the pulsating flow parameters. It was observed that the best heat transfer performance is obtained at high amplitude ($A_o=1.2$) and low frequency ($Wo=10$) values. The results are given as a function of dimensionless parameters. The study results show that pulsating nanofluid flow can effectively increase thermo-hydraulic performance if appropriate parameters are used in the flow through tube bundles.

Keywords: Tube bundle, Pulsating flow, Nanofluids, Heat transfer, Numerical study