

Grafen Oksit Nanoparçacıkları İçeren Nanoakışkanın Taşınım Isı Transferi ve Basınç Düşüşü Artışı Üzerindeki Etkisinin Düz Bir Boruda Deneysel Olarak Araştırılması

Koray Karabulut ^{*1}
Ertan Buyruk ²
Ferhat Kılınc ³

ÖZ

Bu çalışmada, grafen oksit (GO)-su nanoakışkanının taşınım ısı transferi üniform duvar ısı akışı dairesel bir bakır boru boyunca laminer akış için deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada, grafen oksit-su nanoakışkanının ısı transferi artışı ve basınç düşüşü özellikleri değerlendirilirken, sayısal çalışmada korunum denklemleri üç boyutlu olarak sonlu hacim yöntemi olan CFD paket programının (ANSYS 15.0-FLUENT) kullanılmasıyla tek fazlı akışkan kabulüyle çözülmüştür. Taban akışkanı olarak kullanılan saf suyun ısı transfer katsayısı ve basınç düşüşü ölçülmüş ve ilgili bağıntıdan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sayısal çalışmada elde edilen boru yüzey sıcaklık değerleri nanoakışkan için deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında ortalama %2 hata ile birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışmada, %0,01 ve %0,02 hacimsel konsantrasyonlu GO-su nanoakışkanının ısı transferi artışında ısı akışının, nanoparçacık hacimsel konsantrasyonunun ve hacimsel debinin etkileri sunulmuştur. %0,02'lik konsantrasyonda GO-su nanoakışkanının ısı taşınım katsayısı artışı değeri (h_{nf}/h_{bf}), 1,5 l/dk'lık debi ($Re=2023$) ve 2536,62 W/m² (350 W) ısı akısı değerinde %13,9 olmaktadır. Bununla birlikte, yük kaybı (h_c) ve sürtünme faktörü için en yüksek artışlar %0,02 GO ve 1,5 l/dk'lık debide sırasıyla %8,37 ve %7,95'tir. Sonuçlar, GO nanoakışkanının ısı transferi uygulamalarında geleneksel çalışma akışkanlarına iyi bir alternatif olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Nanoakışkan, grafen oksit (GO), taşınım ısı transfer katsayısı

Experimental Investigation of the Effect of Nanofluid Including Graphene-Oxide Nanoparticles on Convective Heat Transfer and Pressure Drop Enhancement in a Straight Pipe

ABSTRACT

In this paper, convective heat transfer of graphene oxide-water (Graphene oxide) nanofluid in a laminar flow through a circular copper pipe with uniform wall heat flux is investigated experimentally and numerically. In experimental investigation, it is evaluated the heat transfer characteristics and the pressure drop of the graphene oxide (GO)-water nanofluid when in numerical study, the finite volume method (ANSYS 15.0-FLUENT) is employed to solve the conservation equations (continuity, momentum and energy equations) in three dimensional domains by assuming single phase flow. The heat transfer coefficient and pressure drop of the DI (distilled)-water used as base fluid is measured and compared with the corresponding data from the correlation. The data of nanofluid for surface temperature of the tube is satisfied within a 2% error for the numerical work compared with experimental results. The effects of the heat flux, volumetric concentration and flow rate on the enhancement of the heat transfer of GO-water nanofluid with volumetric concentrations of 0,01% and 0,02% are presented in the study. The value of convective heat transfer coefficient enhancement (h_{nf}/h_{bf}) of the GO with 0,02% volumetric concentration and flow rate of 1,5 l/min ($Re=2023$) is 13,9% for the heat flux value of 2536,62 W/m² (350 W). However, the max. increases in head loss and friction factor with 0,02% GO and 1,5 l/min are 8,37% and 7,95% respectively. Finally, the results reveals that the GO-water nanofluid can be used as a good alternative conventional working fluids in heat transfer applications.

Keywords: Nanofluid, graphene oxide (GO), convective heat transfer coefficient

* İletişim Yazarı
Geliş/Received : 19.05.2017
Kabul/Accepted : 16.10.2017

¹ Yrd. Doç. Dr., Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sist. Müh. Böl., Sivas- kkarabulut@cumhuriyet.edu.tr

² Prof. Dr., Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sivas- buyruk@cumhuriyet.edu.tr

³ Yrd. Doç. Dr., Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sivas- fkilinc@cumhuriyet.edu.tr



1. GİRİŞ

Isı değiştiriciler, güneş ısıtıcıları, nükleer reaktörler, soğutucular ve hidrojen depolama üniteleri gibi ısı transferi sistemlerinin performansı temel olarak su, etilen glikol ve yağ gibi geleneksel ısı transferi akışkanlarının termofiziksel özelliklerine bağlıdır. Su, yağlar ve glikoller ise düşük ısı iletkenlikleri nedeni ile zayıf ısı transfer performansına sahiptirler. Günümüzde de akışkanların ısı transferi özelliklerini iyileştirmek için araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. İlk başlarda, mikrometre hatta milimetre boyutlu katı parçacıklar süspansiyon oluşturmak için taban akışkanlarına karıştırılmıştır. Bununla birlikte, bu büyük boyutlu katı parçacıklar, mikro kanalların tıkanması, boru hatlarının aşınması ve pratik uygulamaları kısıtlayan basınç düşüşünün artması gibi can sıkıcı sorunlara yol açmıştır. Aslında, sıvı süspansiyonlar başlarda yalnızca teorik bir ilgi alanı iken birtakım araştırmacı tarafından yapılan çalışmalar küçük başarılar göstermiştir. Parçacıkların boyutunun büyük olması ve küçük boyutlu parçacıkların üretimindeki zorluklar diğer sınırlayıcı faktörler olmuştur. Bu nedenle, Maxwell' in önderliğinde 1881 yılında başlatılan ve ısı iletkenlik değerini arttırmak için geleneksel ısı transferi akışkanlarına katı parçacıkların eklenmesi yenilikçi bir fikirdir [1, 2]. Bu akışkanların özelliklerindeki iyileşmeler kritik bir öneme sahip olduğu için nanoakışkan olarak adlandırılan yenilikçi çalışma akışkanı üzerindeki araştırmalar da son zamanlarda ilgi odağı haline gelmiştir [3, 4].

Nanoakışkan, 100 nm ve daha küçük boyuttaki metal, metal oksit, karbon nanotüp veya grafen parçacıkların genelde Newton kuralına uyan akışkanlar içerisine düşük konsantrasyonlarda eklenmesiyle oluşturulan süspansiyon şeklindeki akışkanlara denilmektedir. Nanoakışkanlar, ısı yayılım ve ısı iletkenlik gibi termofiziksel özellikleri iyileştirirken, mükemmel bir kararlılık ve taşınım ısı transfer katsayısı sağlamaktadır ve ayrıca basınç düşüşü ve pompalama gücünde taban akışkanında çok az bir artış meydana getirmektedir [5, 6, 7]. Birçok araştırmacı, çeşitli metal [5, 8] ve metal oksit nanoparçıklardan [6, 9], karbon nanotüpler [10], grafit [11] ve grafen nanoparçacıklar [12, 13] gibi karbon tabanlı nanoparçacıklardan elde edilen nanoakışkanların termofiziksel özellikleriyle ilgilenmişlerdir. Geleneksel akışkanlara nanoparçacıkların eklenmesinin ana fikrinin ısı iletkenlikte iyileştirme yapılarak çalışma akışkanının ısı transferi performansını arttırmak olduğu düşünöldüğünde, araştırmaların yüksek ısı iletkenlik özelliğine sahip yeni malzemelere doğru odaklanması normal kabul edilmektedir. Metal ve metal oksitlerle karşılaştırıldığında karbon malzemelerin yüksek ısı iletkenliği ve düşük yoğunluğu onları ilgi çekici hale getirmektedir [14,15,16,17].

Karbon tabanlı malzemelerden olan grafen, nanoteknolojinin çeşitli alanlarında yaygın bir şekilde kullanılan en yeni nanoparçacıklardan biridir. Karbon elementinin bal peteği örgölü yapısı olan grafen, iki boyutlu düzlemsel yapıların çok ender örneklerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bilim dünyasında oldukça fazla he-



yecan yaratan grafen aslında çok nadir bulunan bir malzeme değildir. Kullandığımız kurşun kalemlerin içindeki grafit, grafen tabakalarının üst üste binmesinden oluşmaktadır. Grafen, karbon atomlarının tek düzlemde altıgen yapıda dizilmesiyle oluşan iki boyutlu, bir atom kalınlığında, karbon allotropu bir yapıdır [18]. Grafen bu yapısı sayesinde olağanüstü mekanik, ısı ve elektriksel özellikler gösterdiği için çoğu araştırmacının ilgisini çekmiştir [19]. Grafen, ıyıı çok iyi ileten bir malzemedir. Tek tabakalı grafen nanotabakasının oda sıcaklığındaki ısı iletkenliği 5000 W/mK ve yüzey alanı 2630 m²/g'dır [20].

Grafenin yüksek ısı iletkenliği, diğer nano yapılarla hatta karbon nanotüplerle karşılaştırıldığında çok daha iyi bir performans sergilemektedir. Bu nedenle, grafen nanotabakaları içeren nanoakışkanların ısı performans çalışması daha fazla ilgi görmektedir. Grafen suyu sevmez özelliğe sahiptir. Grafit oksitlenerek grafen oksite dönüştüğünde ısı iletkenliği grafitten daha düşük olmaktadır. Fakat grafen oksit suyu sever özellikte olduğundan, kullanıldığı nanoakışkanda stabilite (kararlılık) artmakta ve çökme olmamaktadır [21]. Bu üstün özelliklerinden ötürü ve ayrıca grafen-oksit/su nanoakışkanı hakkında literatürdeki çalışma sayısının oldukça az olması nedeniyle deneysel olarak grafitten sentezlenen grafen oksit nanoparçacığı kullanılmıştır.

Nanoakışkanları ısı transfer sistemlerinde kullanabilmek için termofiziksel özelliklerinin yanında ısı taşınım özelliklerinin de araştırılması gerekmektedir. Farklı tiplerdeki borular boyunca akan nanoakışkanlar için taşınım ısı transfer katsayısının deneysel olarak araştırılması değişik çalışmalarda uygulanmış [22] ve oksit, nitrid, metal, elmas ve karbon tabanlı farklı tipteki parçacıklar nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılmıştır [23, 24]. Bu çalışmalardan başka, Ding vd. [15], yatay bir boru boyunca CNT tabanlı nanoakışkanların taşınım ısı transferini araştırmışlardır. Laminer akışta ve sabit duvar ısı akısı sınır şartında en yüksek taşınım ısı transfer katsayısı artışını Re=800'de 970 mm uzunluk ve 4,5 mm iç çaplı boruda kütlece %0,5 konsantrasyonda %350'nin üzerinde bulmuşlardır. Wang vd. [25] ise 0,952 mm iç çaplı boruda karbon nanotüplü nanoakışkan ile yaptıkları çalışmada %0,24'lük konsantrasyonda Re=120'de %190 artış elde etmişlerdir. Abreu vd. [26] ise 6 mm iç çap ve 1200 mm uzunluğundaki boruda 80 mm dış çap ve 20x10⁻³ nm uzunluğa sahip çok katmanlı CNT için Re=1650'de %0,25 konsantrasyon için Nu sayısında %23'lük artış elde etmişlerdir. Karabulut vd. [27] çalışmalarında, 8 mm iç çaplı ve 1830 mm uzunluklu bakır bir boruda %0,01 konsantrasyonlu MWCNT-su nanoakışkanının taşınım ısı transferi artışında ısı akısı ve hacimsel debinin etkilerini araştırmışlardır. Re=2753'te en yüksek ısı akısı değerinde taban akışkanına göre ısı taşınım katsayısında %20'lik artış elde etmişlerdir. Baby ve Ramaprabhu [28], grafen-su nanoakışkanının artan taşınım ısı transferi hakkında deneysel bir araştırma yapmışlardır. %0,05 konsantrasyon için 25 °C ve 50 °C sıcaklıklarda ısı iletkenlikte sırasıyla %16 ve %75'lik artışlar elde etmişlerdir. Ayrıca, ısı iletkenlikle karşılaştırıldığında Nusselt sayısında daha fazla



artışlar olduğunu görmüşlerdir. Üniform olarak ısıtılmış dairesel bir boruda farklı konsantrasyonlarda grafen-su nanoakışkanının türbülanslı taşınım ısı transferi Akhavan-Zanjani vd. [29] tarafından çalışılmıştır. Nusselt sayısının genellikle nanoparçacıkların eklenmesiyle azaldığını ve ısı taşınım katsayısındaki %6,04'lük en yüksek artışın $Re=10850$ 'de %0,02'lik hacimsel konsantrasyonda olduğunu saptamışlardır. Akhavan-Zanjani vd. [30] yaptıkları bir diğer çalışmada, grafen-su nanoakışkanının ısı iletkenlik, viskozite ve ısı taşınım katsayısını deneysel olarak ölçmüşler ve bu değişkenler üzerinde parçacık konsantrasyonunun ve Reynolds sayısının etkilerini araştırmışlardır. Isı taşınım katsayısını ölçmek için sabit ısı akısı sınır şartı altında iç çapı 4,2 mm, dış çapı 6 mm ve uzunluğu 2740.2 mm olan düz bir bakır boru kullanmışlardır. $Re=1850$ 'de %0,02'lik konsantrasyonda en yüksek artışları sırasıyla ısı iletkenlik için %10,3 ve ısı taşınım katsayısı için %14,2 olarak elde etmişlerdir. Mirzaei vd. [31], içerisine tel bobin yerleştirilmiş dairesel bir boru boyunca sabit ısı akısı sınır şartında grafen oksit-su nanoakışkanının ısı transferi ve basınç düşüşü özelliklerini çalışmışlardır. %0,12'lik hacimsel konsantrasyonda taşınım ısı transfer katsayısında yaklaşık %77'lik artış sağlamışlardır.

Bu çalışmada, %0,01 ve %0,02 hacimsel konsantrasyonda taban akışkanı olarak saf su kullanılarak elde edilen grafen oksit (GO)-su nanoakışkanın ısı transferi ve basınç düşüşü özelliklerini belirlemek amacıyla 20 mm iç çap, 24 mm dış çap ve 1830 mm uzunluğa sahip yatay bakır bir boruda sabit duvar ısı akısı sınır şartında laminar bir akış için deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ayrıca, sayısal hesaplama sonuçları tek fazlı akışkan kabulüyle, Navier-Stokes ve enerji denkleminin sonlu hacim yöntemi olan ANSYS Fluent-15.0 programı kullanılarak çözülmesiyle zamandan bağımsız olarak elde edilmiştir. Deneysel çalışmada 0,9 l/dk, 1,2 l/dk, 1,5 l/dk, olmak üzere üç farklı hacimsel debi ile çalışılmış ve boru dış yüzeyine uygulanan sabit ısı akısı değerleri ise 1811.873 W/m^2 (250 W) ve 2536.62 W/m^2 (350 W)'dir. Deneylerde, akışkanın boruya giriş sıcaklığı ise 30°C 'dir. Hacimsel debinin, nanoparçacık hacimsel konsantrasyonunun ve ısı akısının grafen oksit-su nanoakışkanının taşınım ısı transfer katsayısı ve basınç düşüşü üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmış ve taban akışkanı olan saf suyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, farklı debi ve ısı akısı değerlerinde h_{nf}/h_{su} ve Nu_{nf}/Nu_{su} değişimi olarak sunulmuş ve ayrıca boru duvar yüzey sıcaklığının değişimi sayısal ve deneysel karşılaştırmalı olarak da incelenmiştir.

2. DENEYSEL YÖNTEM

2.1 GO Nanoakışkanının Sentezlenmesi ve Hazırlanması

Deneylerde kullanılan GO, grafitten sentezlenerek elde edilmiştir. GO sentezlenirken grafit, nitrit ve sülfirik asit ve ayrıca sodyum nitrat, hidrojen peroksit ve potasyum permanganat gibi çeşitli kimyasallarla işleme tabi tutulmuştur. Daha sonra saf



suyla yıkanarak asitten ve kimyasallardan ayrıştırıldıktan sonra fırında kurutularak GO nanoparçacığı elde edilmiştir [32, 33]. Sentezlenen GO'den iki aşamalı yöntem (two-step method) kullanılarak GO/su nanoakışkanı hazırlanmıştır. İki aşamalı nanoakışkan hazırlama yöntemi, geniş çapta kullanılan bir işlem olup, doğrudan taban akışkanıyla nanoparçacıkların bir araya getirilmesi ve nanoparçacık kümeleşmesinin önlenmesi amacıyla ultrasonifikatör cihazıyla ultrasonik titreşimler meydana getirilerek karıştırılmasından oluşmaktadır. Bu amaçla çalışmada istenen hacimsel konsantrasyona göre GO nanoparçacığı 0,1 mg hassasiyete sahip hassas terazide tartılmıştır. Nanoparçacık tartım işleminden sonra kütle oranlar Eşitlik (1) ile hacimsel orana çevrilmiştir. Yapılan deneylerde kullanılmak üzere hacimce %0,01 ve %0,02'lik iki ayrı konsantrasyonda nanoakışkan hazırlamak amacıyla 4 lt saf suya 0,4 g ve 0,8 g GO nanoparçacığı katılmıştır. Tartım işlemi yapılan GO nanoparçacığının taban akışkanı olan saf su ile karıştırılarak elde edilen nanoakışkanın kararlılığının sağlanabilmesi için nanoakışkan 5 saat boyunca 50 Hz'lik frekansa ve 230 W'lık maksimum güce sahip ultrasonifikatör cihazında bekletilmiştir. Hazırlanan nanoakışkan kullanıldıktan sonra bekletildiğinde de 2 ay gibi uzun bir süre çökme olmadan kararlılığını koruyabilmektedir. Ayrıca nanoakışkanın kararlılığının sağlandığına gözlemsel ve Zeta potansiyel ölçümleri sonunda karar verilmektedir [34]. Bunun yanı sıra, burada anlatılan Grafen oksit (GO) sentezlenmesi ve nanoakışkanın hazırlanması işlemleri Cumhuriyet Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nde gerçekleştirilmiş olup, deneylerde kullanılan nanoakışkan buradan temin edilmiştir.

$$\frac{v_p}{v_{nf}} = \frac{v_p}{v_f + v_p} = \frac{\frac{m_p}{\rho_p}}{\frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_f}{\rho_f}} = \frac{m_p \rho_f}{m_p \rho_f + m_f \rho_p} \quad (1)$$

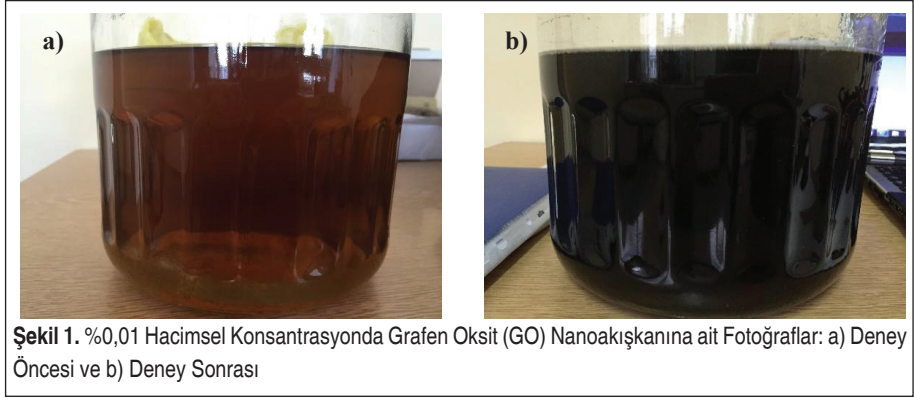
Eşitlik (1)'deki m_p , nanoparçacığın kütlesi; m_f , taban akışkanın kütlesi; ρ_f ve ρ_p ise sırasıyla taban akışkanının ve parçacığın yoğunluklarıdır.

Nanoakışkanın kararlılığının belirlenmesinde gözlemlene yöntemi dışında sık kullanılan yöntemlerden biri olan Zeta potansiyel ölçümü, parçacıkla temasta olan durgun akışkan tabakası ve taban akışkanı ortamı arasındaki yük farkıdır. Zeta potansiyel, dağılımda aynı yüklü parçacıklar arasındaki itmenin derecesini göstermektedir. Yüksek zeta potansiyelli (negatif veya pozitif) süspansiyonlar elektriksel olarak dengedeysen, düşük zeta potansiyelli süspansiyonlar pıhtılaşma veya topaklanma eğilimindedirler. Zeta potansiyeli 40-60 mV arası olan nanoakışkanların mükemmel bir kararlılığa sahip olduğuna inanılmaktadır [35]. Deneylerde kullanılan GO nanoakışkanının zeta

potansiyel değeri ise 45-65 mV aralığındadır ki bu, kararlılık kriteri değeri olan 25 mV'un oldukça üzerinde olduğu görülmektedir.

2.2 GO Nanoakışkanının Kararlılığı

Deney öncesi ve deney sonrası %0,01 hacimsel konsantrasyondaki GO nanoakışkanına ait fotoğraflar, Şekil 1a ve Şekil 1b'de gösterilmektedir. Şekil 1a ve 1b'de de görüldüğü gibi, deney sırasında havadaki oksijenle temas eden nanoakışkanın rengi kararak daha koyu bir renk almaktadır. Oksidasyon reaksiyonu sırasında hidroksil grupların GO nanoparçacıkların yüzeylerinin kenarlarına bağlanması nedeniyle GO iyi bir su sever özelliğe ve suyla iyi bir uyumluluğa sahiptir. Bu nedenle, GO/su nanoakışkanları uzun süreli kararlılık sergilemektedirler [35].



2.3 GO Nanoakışkanın Termofiziksel Özellikleri

Kütleli olarak hazırlanan nanoakışkanların viskozite ölçümleri Pro koni ve plaka gerilim kontrollü reometre ile yapılmıştır. Isıl iletkenlik ölçümü için literatürde de çok sık kullanılan sıcak tel yöntemi kullanılmış ve bu amaçla, deneysel olarak KD2 Pro ısı iletkenlik ölçer cihazı kullanılmıştır. Nanoakışkanın yoğunluk ölçümü deneysel olarak DMA 4200 yoğunluk ölçer cihazı ile yapılmıştır.

Özgül ısı, Pak ve Cho [36] tarafından önerilen analitik modellerle belirlenmiştir.

Tablo 1. 30°C Sıcaklıkta Akışkanların Termofiziksel Özellikleri

Akışkan	k (W/mK)	ρ (kg/m ³)	C _p (J/kgK)	μ (Ns/m ²)
Saf su	0,6172	995,8	4178,4	803,4x10 ⁻⁶
GO (%0,01)	0,6696	996,1	4178,4	1000x10 ⁻⁶
GO (%0,02)	0,678	996,1	4178,4	1060x10 ⁻⁶



$$c_{nf} = (1 - \phi)c_{pbf} + \phi c_{pp} \quad (2)$$

Eşitlik (2)'de nf, p ve bf sırasıyla nanoakışkan, parçacık ve taban akışkanını belirtmektedir.

Taban akışkanı olarak kullanılan saf su ve %0,01 ve %0,02 hacimsel konsantrasyondaki GO nanoakışkanlarına ait termofiziksel özellikler Tablo 1'de gösterilmektedir.

2.4 Deneysel Sistem ve Kalibrasyon

Şekil 2'de gösterilen taşınım ısı transferi ve basınç düşüşünü ölçmek için oluşturulan deneysel sistem temel olarak pompa, test bölümü, veri kaydetme bölümü, toplama tankı ve soğutma bölümünden oluşmaktadır. Test bölümündeki bakır malzemeden üretilen 1830 mm uzunluğundaki yatay borunun iç çapı 20 mm olup, boru et kalınlığı 2 mm'dir. Test kısmında boru yüzey sıcaklıklarını ölçmek amacıyla yerleştirilen kalibre edilmiş 13 adet J tipi yüzey termokuplu Şekil 3'te gösterildiği gibi, giriş kısmından belli uzaklıkta yerleştirilmiştir. Ayrıca, bakır borunun giriş ve çıkış kısımlarında akışkan sıcaklıklarını ölçmek için yine kalibre edilmiş J tipi daldırma tip termokupl kullanılmıştır. Basınç farkını ölçmek amacıyla ise test bölümünde giriş ve çıkışta 400 mbar'a kadar ölçüm yapabilen basınç sensörleri kullanılmıştır. Bakır boru, sabit ısı akısı sınır şartını sağlamak amacıyla (en fazla 500 W) ısı yükü 50 W/m olan nikel krom telden imal edilmiş rezistans ısıtıcı ile sarılmıştır. Direnç telinin üzeri çevreye olan ısı kaybını azaltmak için ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılan 15 mm kalınlıklı cam yünü ile sarılarak yalıtılmıştır. Şebekeden alınan gerilim (voltaj) değeri rezistans kontrollü ayarlanabilir güç ünitesi ile değiştirilerek, elde edilen watt değeri, priz wattmetre ile ölçülmektedir. Sisteme sağlanan debi değeri, by-pass vanası ile ayarlanarak dijital debimetreden görülmektedir. Sistemdeki debi değeri, yüzey ve akışkan giriş-çıkış sıcaklıkları, basınç değerleri veri toplama sistemi ile her 5 sn'de bir okunup bilgisayara gönderilerek veriler kayıt altına alınmaktadır. Test akışkanının sistemdeki dolaşımı sirkülasyon pompası ile sağlanmaktadır. Toplama tankı, 10 l hacminde olup paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Soğutma bölümü ise 15 l kapasiteye sahip olup, içerisinde 5,5 m boyunda ve 6 mm iç çapa sahip, soğutma yüzey alanını artırmak amacıyla spiral şekline getirilmiş bakır boru bulunmaktadır. Test akışkanı bu spiral şeklindeki bakır borudan geçerken şebeke hattından gelen ve test akışkanını soğutmakta kullanılan su, soğutma bölümündeki giriş ve çıkış kısımlarından geçerek sistemi terk etmektedir. Deney düzeneğinin bu kısmından sonra sisteme giriş yapan test akışkanının istenilen sabit sıcaklıkta sisteme girmesi sağlanmaktadır.

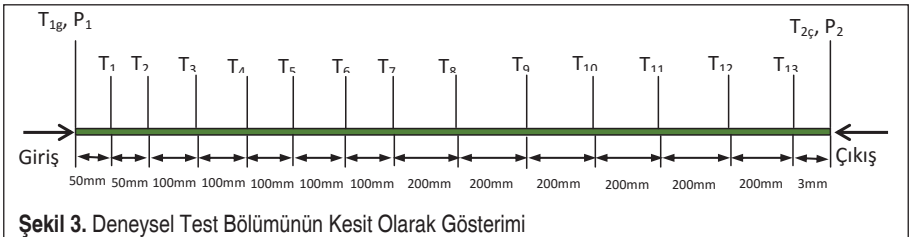
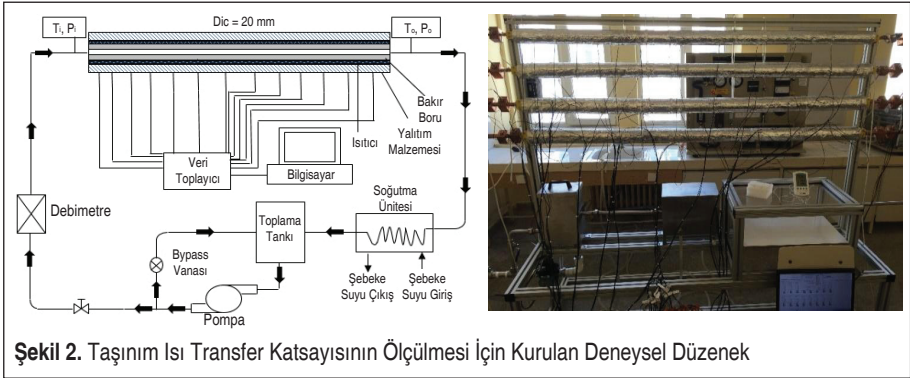
Kalibrasyon süreci için seçilen çalışma akışkanı saf sudur. Tüm deneysel sistemin güvenilirlik seviyesini artırmak için sisteme üç tip kalibrasyon testi uygulanmıştır.

1) Isıtma devresi kapalıyken sistemin kararlılığına bakılmış ve her bir termokupl arasındaki sapmanın %3'ten daha az olduğu bulunmuştur. 2) Sistemin enerji dengesi açısından kararlılığına bakmak amacıyla borunun dış yüzeyinin adyabatik olduğu varsayılarak, sistem çalışılan ısı yüklerinde (250 W, 350 W) test edilmiştir. Sisteme sağlanan enerjide ortalama olarak en fazla %8 sapma belirlenmiştir. 3) Deneysel sistem, sabit ısı akısı altında ($Re \leq 3000$) daimi akış için Shah denklemini [37] göz önüne alarak kalibre edilmiştir. Bu kalibrasyon yapılırken termokupl ve borunun dış duvarı arasındaki temas direnci ve boru duvarı boyunca iletim direnci göz önüne alınarak bu etkiyi yok etmek amacıyla yapılmıştır. Boru boyunca her bir sıcaklık ölçüm yeri için elde edilen kalibrasyon sabitleri, farklı nanoakışkanlarla deney yapılırken ilgili sıcaklık yerindeki ölçüm noktalarına uygulanmıştır. Shah denklemi gözetilerek yapılan kalibrasyonlarda bu denklemden olan deneysel sapmanın yaklaşık %6 civarında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, deneylerde kararlı koşullara ulaşılması için 25-35 dakika kadar bir zaman aralığı kadar beklenmesi gerekmektedir. Aynı zamanda zamanla bu özelliklerin değişimine bakıldığında, değişimin %0,2'nin altında olduğu görülmüştür.

2.5 Taşınım Isı Transferinin Hesaplanması

Test borusuna sağlanan ısı transferi

$$Q_{sis} = V \cdot I \quad (3)$$





Eşitlik (3)'teki V , voltaj değerini ve I ise akım değerini belirtmektedir.

Sisteme sağlanan sabit ısı akısı ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$q'' = \frac{Q_{\text{sis}}}{A_s} = \frac{Q_{\text{sis}}}{\pi D_{\text{oc}} L} \quad (4)$$

Eşitlik (4)'te, A_s , ısı transfer yüzey alanını; D_{oc} ve L ise sırasıyla, borunun dış çapını ve boru uzunluğudur.

Nanoakışkana olan ısı transferi

$$Q_{\text{nf}} = \dot{m}_{\text{nf}} c_{\text{nf}} (T_o - T_i)_{\text{nf}} \quad (5)$$

Nanoakışkanın kütledebisi

$$\dot{m}_{\text{nf}} = \rho_{\text{nf}} u_m A_c \quad (6)$$

Eşitlik (5) ve (6)'daki ρ_{nf} , nanoakışkanın yoğunluğu; u_m , nanoakışkanın ortalama hızı; c_{pnf} , nanoakışkanın özgül ısı ve A_c ise boru kesit alanıdır.

Deneyler sırasında, boru duvar sıcaklıkları, akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları, akışkanın hacimsel debisi, giriş ve çıkış basıncı ve sağlanan ısı yük ölçülmüştür.

Nanoakışkanın ısı taşınım katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$h_{\text{nf}}(x) = \frac{q''}{T_s(x) - T_{\text{mnf}}(x)} \quad (7)$$

Eşitlik (7)'de x , test bölümünün girişinden olan uzaklığı; q'' ısı akısını; $T_s(x)$, ölçülen noktasal duvar sıcaklığını simgelerken, $T_{\text{m,nf}}(x)$ ise kesit boyunca akışkanın ortalama noktasal yığın sıcaklığı olup aşağıda belirtilen denklemden elde edilmektedir.

$$T_{\text{mnf}}(x) = T_{\text{minf}} + \frac{q'' \cdot P}{\dot{m}_{\text{nf}} \cdot c_{\text{pnf}}} \cdot x \quad (8)$$

Bu denklemde $T_{\text{m,i}}$ akışkanın ortalama giriş sıcaklığını; P borunun çevre uzunluğunu; \dot{m} kütledebisini ve c_{pnf} ise özgül ısını belirtmektedir.

Eşitlik (7)'deki nanoakışkanın ısı taşınım katsayısı, Nusselt sayısı eşitliğinde kullanılmaktadır.

$$\text{Nu}_{\text{nf}}(x) = \frac{h_{\text{nf}}(x) D_{\text{ic}}}{k_{\text{nf}}} \quad (9)$$



Zorlanmış Taşınım Isı Transferi için Shah Denklemi

$$Nu = 1.953 \left(RePr \frac{D_{ic}}{x} \right)^{1/3} \quad \left(RePr \frac{D_{ic}}{x} \right) \geq 33.3 \quad (10)$$

$$Nu = 4.364 + 0.0722 \left(RePr \frac{D_{ic}}{x} \right) \quad \left(RePr \frac{D_{ic}}{x} \right) < 33.3 \quad Re \leq 3000$$

Eşitlik (10)'da D_{ic} , boru iç çapı ve k_{nf} ise akışkanın ısı iletkenliğidir.

Nanoakışkana ait Re_{nf} ve Pr_{nf} sayıları için bağıntılar aşağıdaki eşitliklerde (Eşitlik 11 ve 12) gösterilmektedir.

$$Re_{nf} = \frac{\rho_{nf} \cdot u_m \cdot D}{\mu_{nf}} \quad (11)$$

$$Pr_{nf} = \frac{c_{pnf} \mu_{nf}}{k_{nf}} \quad (12)$$

Eşitlik (11 ve 12)'deki μ_{nf} , nanoakışkanın viskozitesidir. Deneylerde basınçölçer tarafından kaydedilen değerler, sürtünme faktörünün belirlenmesinde kullanılmaktadır.

DeneySEL sürtünme faktörü

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{\rho u_m^2}{2} \right)} \quad (13)$$

ΔP_{nf} , boru giriş ve çıkışı arasındaki basınç farkıdır.

Yük kaybı

$$h_k = \frac{\Delta P}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{u_m^2}{2g} \quad (14)$$

Denklem (14)'teki g , yerçekimi ivmesi olup değeri $9,81 \text{ m/s}^2$ 'dir.

3. DENEYSEL SONUÇLAR

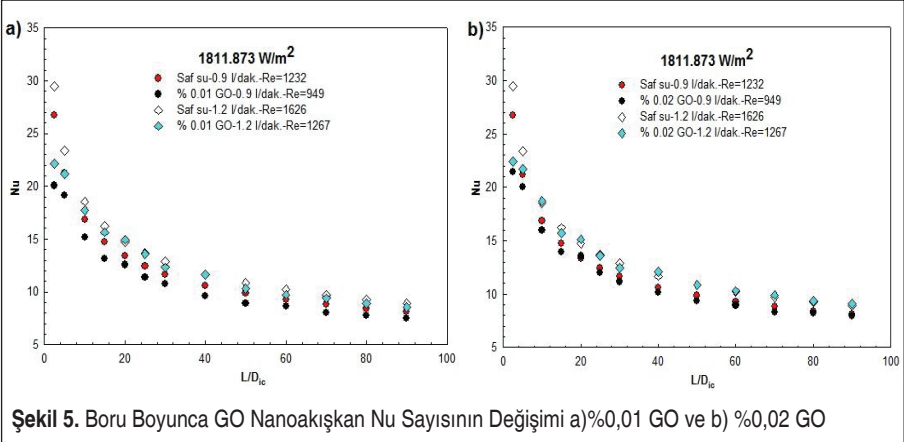
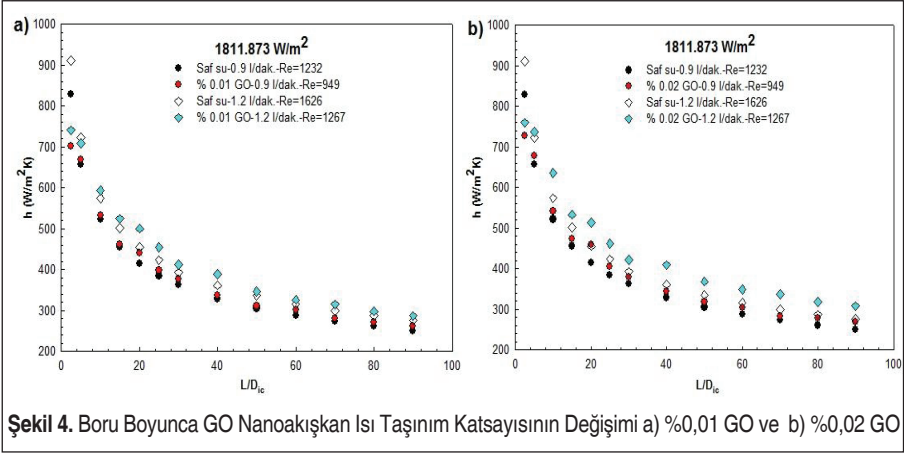
Şekil 4'te boru dış yüzeyine uygulanan üniform 1811.873 W/m^2 'lik ısı akısında $0,9 \text{ l/dk}$ ve $1,2 \text{ l/dk}$ 'lık debilerde boru boyunca ısı taşınım katsayısının değişimi; a) $\%0,01 \text{ GO}$ ve b) $\%0,02 \text{ GO}$ nanoakışkan konsantrasyonları için gösterilmektedir. Düz bir



boruda noktasal ısı taşınım katsayısı, k/δ olarak verilebilir. Buna göre, akışkan ısı iletkenliği k ve ısı sınırlama tabaka kalınlığı olan δ taşınım ısı transfer katsayısını etkileyen iki önemli değişkendir. Isı taşınım katsayısının artışı ya ısı iletkenlikteki artışa ya da ısı sınırlama tabaka kalınlığındaki azalmaya bağlıdır. Şekillerden de görüldüğü gibi, taban akışkanına (saf su) düşük konsantrasyonlarda GO nanoparçacıkların eklenmesi, özellikle giriş bölgesinde ısı taşınım katsayısında nispeten yüksek artışa yol açmaktadır. Bu durumun en önemli sebebi, eklenen nanoparçacıkların yüksek ısı iletkenliği sonucu elde edilen nanoakışkanının da ısı iletkenliğinin artmasıdır. Nanoakışkanın ısı iletkenliğindeki bu artış da ısı taşınım katsayısını artırmaktadır. Ayrıca, akıştaki katı parçacıkların karmaşık hareketi boru duvarı yüzeyinde ısı sınırlama tabaka oluşumuna etki etmektedir. Bu düzensizlik yaratıcı etkinin sonucu olarak da ısı sınırlama tabakanın gelişimi geciktirilmektedir. Bu gecikme sonucu, tam gelişmiş bölgeye göre ısı sınırlama tabaka kalınlığının daha az olduğu ısı giriş bölgesinde daha yüksek ısı taşınım katsayısı değerleri elde edilmekte ve böylece boru boyunca ortalama ısı taşınım katsayısı da artmaktadır. Şekil 4a'da, 0,9 l/dk debide ($Re=1232$) borunun girişinden $L/D_{ic}=20$ (400 mm) uzaklığında saf su için ısı taşınım katsayısı (h), $414 \text{ W/m}^2\text{K}$ iken, aynı debi ($Re=949$) ve uzaklıkta %0,01'lik hacimsel konsantrasyonda GO nanoakışkanı için $439 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'dir. Bu durum da ilgili noktadaki artış oranının %0,01'lik hacimsel konsantrasyon için %6 olduğunu göstermektedir. %0,01'lik konsantrasyonda ise boru boyunca ortalama h artışı yaklaşık %2'dir.

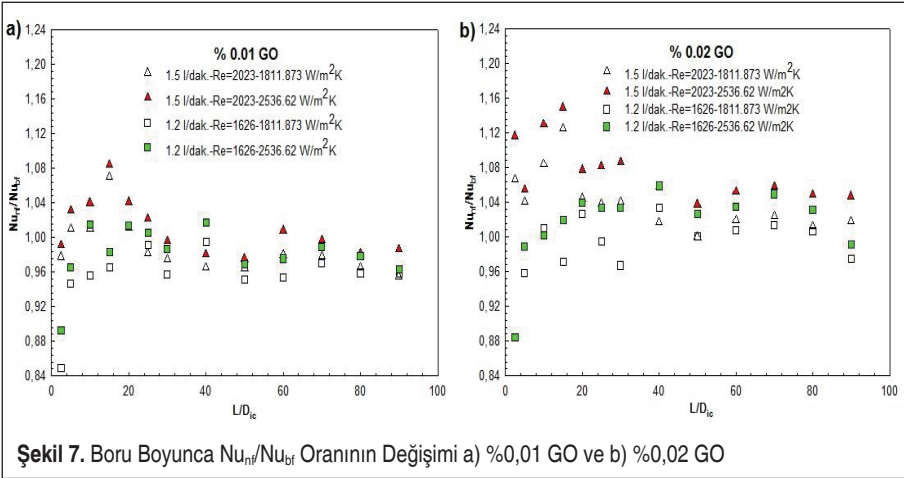
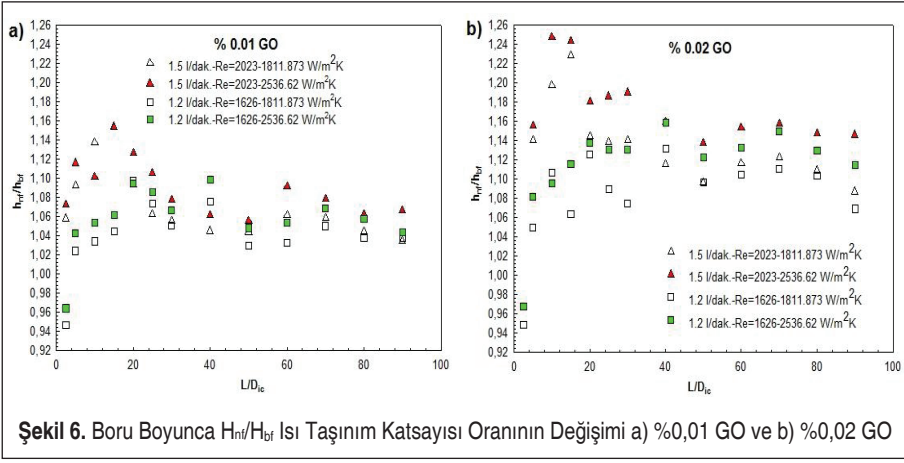
Ayrıca, yüksek nanoakışkan konsantrasyonlarında hem nanoakışkanın ısı iletkenliği, hem akışkana katılan nanoparçacıkların miktarı ve dolayısıyla ısı taşınımındaki etkin yüzey alanı hem de katı nanoparçacıkların oluşturduğu karışıklık etkisi artacaktır. Bu nedenle, beklenildiği gibi yüksek konsantrasyonlu nanoakışkanlar genellikle daha fazla ısı taşınım katsayısı değerlerine sahiptirler. Şekil 4b)'de de görülebileceği gibi yine boru girişinden $L/D_{ic}=20$ (400 mm)'lik uzaklık dikkate alınır ise %0,02'lik hacimsel konsantrasyonda, 0,9 l/dak. debide GO nanoakışkanı için bu noktadaki ısı taşınım katsayısı değeri yaklaşık %11'lik artış göstermektedir. %0,02'lik konsantrasyon, 1,2 l/dak. debi ve 1811.873 W/m^2 (250 W)'lik ısı akısında boru boyunca ortalama ısı taşınım katsayısı artışı değeri ise yaklaşık %6'dır.

Şekil 5a-b'de ise sırasıyla %0,01 GO ve %0,02 GO nanoakışkan konsantrasyonları için 1811.873 W/m^2 ısı akısında boru boyunca Nu sayılarının değişimleri gösterilmektedir. Genel olarak, saf suya katılan GO (grafen oksit) nanoparçacıkları, taban akışkanının (saf su) Nusselt sayısının artmasını sağlamaktadır. Fakat, 1811.873 W/m^2 'lik ısı akısında her iki nanoakışkan konsantrasyonunda da (%0,01 ve %0,02) ısı taşınım katsayısındaki artışın ısı iletkenlik artışından daha az olması nedeniyle taban akışkanına göre Nusselt sayısı artışı elde edilememektedir. Bunun yanı sıra, şekillerden de (Şekil 5a-b) görüldüğü gibi, %0,02'lik konsantrasyonda %0,01'lik konsantrasyona göre fazla bir Nusselt sayısı artışı sağlanamamaktadır. Bu durum %0,02'lik konsantrasyonda



%0,01'e göre daha az h (ısı taşınım katsayısı) artışı elde edildiğini göstermektedir. Buradan elde edilen sonuca göre, her nanoakışkan konsantrasyon artışının aynı şekilde doğrusal olarak ısı taşınım katsayısı artışı sağlayamadığı söylenebilir. Bu nedenle, nanoakışkanın verimli bir şekilde kullanılabilmesi için en uygun konsantrasyon oranının belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca, çalışmada kullanılan %0,02'lik GO konsantrasyonundan daha yüksek konsantrasyonda nanoakışkanının kullanılması durumunda ısı taşınım katsayısındaki artış miktarının daha da azalacağı düşünülmektedir.

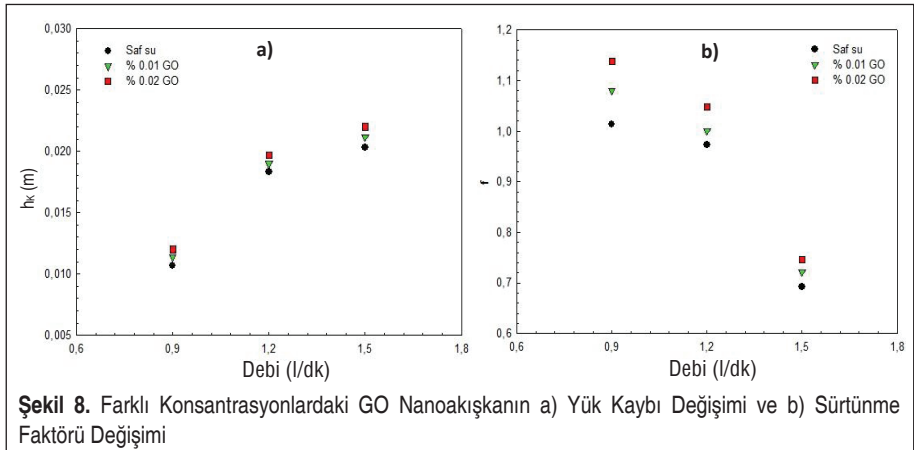
Şekil 6a-b'de boru boyunca ısı taşınım katsayısı oranının (h_{nf}/h_{bf}) ve Şekil 7a-b'de ise boru boyunca Nusselt sayısı oranının değişimi (Nu_{nf}/Nu_{bf}) sırasıyla %0,01 GO ve %0,02 GO konsantrasyonları için 1811.873 W/m² (250 W) ve 2536.62 W/m² (350 W) ısı akıları ve 1,2 l/dk ve 1,5 l/dk lık debiler için gösterilmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi, ısıl sınır tabaka kalınlığının az olduğu giriş bölgesinde daha yüksek



ısı taşınım katsayısı ve Nusselt sayısı (Şekil 7a-b) değerlerine ulaşmaktadır. Daha sonra, borunun sonuna doğru ısıl sınır tabaka kalınlığının artmasıyla (tam gelişmiş bölgede) ısı taşınım katsayısı (h) ve Nusselt sayısı (Nu) değerleri yaklaşık sabit değerlerine ulaşmaktadır. Ayrıca, her iki oran (h_{nf}/h_{bf} , Nu_{nf}/Nu_{bf}) için nanoparçacık kaynaklı karışma ve bunun sonucunda boru duvarı, taban akışkanı ve nanoparçacıklar arası artan çarpışmaların ve birim hacim başına nanoparçacıkların özgül yüzey alanının daha fazla olduğu %0,02'lik GO konsantrasyonunda daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bunun yanında, ısı akısı değerinin artışı da nanoakışkan sıcaklığının artışına sebep olarak GO nanoakışkanının ısıl iletkenliğini artırmaktadır. Ayrıca, nanoparçacıkların rastgele (Brownian) hareketleri artarak akışkan içerisinde taşınım benzeri etkileri artırması sonucu ısı taşınım katsayısı ve Nusselt sayısı oranlarını ar-

tırmıştır. %0,01 GO konsantrasyonunda, 1,5 l/dk debide 1811.873 W/m² (250 W) ısı akısında ısı taşınım katsayısında boru boyunca taban akışkanına göre artış oranı %7,2 iken aynı debide ve konsantrasyonda 2536.62 W/m² (350 W)'lik ısı akısında h 'nin artış oranı %9'a ulaşmaktadır. Debi değerinin artışı da Reynolds sayısını artırdığından, aynı şekilde nanoparçacıkların akışkan içerisindeki hareketliliğini artırarak taşınım ısı transfer katsayısı ve Nusselt sayısı üzerinde artışı artırıcı etkiye sebep olmaktadır. 1,2 l/dk debi (Re=1626) ve 1811.873 W/m² (250 W) ısı akısında %0,01'lik GO konsantrasyonunda h artışı %4,1 iken 1,5 l/dk'lık debi (Re=2023) ve aynı ısı akısı değerinde artış miktarı %7,2 olmaktadır. Bunun yanında, boru boyunca en yüksek ısı taşınım katsayısı ve Nusselt sayısı artışı değerlerine %0,02 GO konsantrasyonu için 1,5 l/dk debi (Re=2023) ve 2536.62 W/m² (350 W)'lik ısı akısında ulaşılmaktadır. Bu debi ve ısı akısı değerinde taban akışkanına göre ısı taşınım katsayısının ve Nusselt sayısının artış değerleri sırasıyla %13,9 ve %7,7 olmaktadır.

Şekil 8a-b'de sırasıyla, yük kaybı h_k , (basınç düşüşü) ve f 'in (sürtünme faktörünün) debi ile değişimi gösterilmektedir (2536.62 W/m²K). Taban akışkanına eklenen nanoparçacıklar, taban akışkanının, yani elde edilen yeni akışkan olan nanoakışkanın ısı iletkenliğini artırırken viskozitesinin de artmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak nanoakışkanın yük kaybı (h_k) ve sürtünme faktörü (f) artmaktadır. 1,2 l/dk debide %0,01 GO konsantrasyonunda yük kaybı ve sürtünme faktörü sırasıyla %3,82 ve %2,89 artarken, aynı debide fakat %0,02 GO konsantrasyonunda bu artışlar sırasıyla %7,65 ve %7,72'dir. %0,02'lik konsantrasyonda ve 1,5 l/dk'lık debide ise artış miktarları yük kaybı için %8,37'e, sürtünme faktörü %7,95'e çıkmaktadır. Fakat, nanoakışkanın verimliliği açısından baktığımızda, elde edilen ısı iletkenlik artışı etkisi, viskozitenin artışı etkisinin üstesinden gelmektedir. Ayrıca, debi arttıkça yük kaybı artarken, sürtünme faktörü ise azalmaktadır.





4. SAYISAL MODELLEME VE SONUÇLAR

Çalışmadaki yaklaşımda nanoakışkan, homojen katı-sıvı karışımı olarak kararlı bir tek fazlı akışkan olarak düşünülebilir. Katı ve sıvı arasındaki yoğunluk farkı büyük olmasına rağmen böyle küçük parçacıklar için yerçekimi nedeniyle, kayma hızları katı ve sıvı için sırasıyla 10-8 ve 10-6 mertebesindedir ve katı nanoparçacık ve sıvı arasında 100 ns olan sabit ısı transfer süresi nedeniyle taban akışkanıyla denge halinde olduğu düşünülebilir [38]. Bu çalışmadaki ortalama akışkan hızının 0,2-0,59 m/s arasında olduğu düşünüldüğünde ve nanoparçacık hızının taban akışkanınkiyle aynı olduğu kabul edildiğinde, uygulanabilen homojen akış modelinde iki fazlı sistemler tek fazlı olarak modellenebilir ve ikinci fazın varlığını karışımın fiziksel özelliklerini kullanarak hesaba katmak mantıklı bir uygulama olacaktır [39].

Geçmişte yapılan birçok çalışmada homojen akış modeli iki fazlı modelle karşılaştırıldığında, nanoakışkanların ısı transfer katsayısını daha düşük hesaplamasına rağmen [40, 41] bu sayısal çalışmaların çoğu deneysel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve nanoakışkanların ısı transferini, $\pm \%10$ 'luk bir sapmayla nanoakışkanların termo-fiziksel özelliklerine dayanarak bulunabileceğini gösteren önemli bulgular elde edilmiştir [42, 43, 44]. Bu bulgular nanoakışkanların homojen karışımlar olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Bu nedenle, bu çalışmada homojen akış modeli kullanılmıştır.

Çözümler, üç boyutlu hesaplama alanı için yapılmıştır. Sonlu hacimler yöntemi, çözülecek geometriyi parçalara bölerek bu parçaların her biri için çözüm yapma ve daha sonra bu çözümleri birleştirerek problemin genel çözümünü bulma esasına dayanır. Sonlu hacimler yöntemi, korunum denklemlerini sayısal olarak çözümlenebilen cebirsel denklem sistemlerine dönüştürmek için kontrol hacim esaslı bir teknik kullanır. Bu teknik her bir kontrol hacmi için korunum denklemlerinin integrasyonunun alınması sonucunda, değişkenler için kontrol hacmini sağlayan ayrık eşitliklerin elde edilmesini içerir. Ayrık eşitliklerin doğrusallaştırılması ile elde edilen, doğrusal denklem sistemlerinin iterasyona bağlı çözümü ile hız, basınç ve sıcaklık gibi değişkenler verilen yakınsaklık ölçüsünü sağlayıncaya kadar güncellenir. Hesaplanan geometrinin kesiti ve mesh yapısı sırasıyla Şekil 9a-b'de gösterilmektedir. 20 mm iç çap ve 1830 mm uzunluktaki hesaplama alanı yaklaşık 800.000 adet hesaplama hücresinden oluşmaktadır. Ayrıca, hesaplama alanı 815.000 adet hesaplama hücresinin olduğu sonuçla karşılaştırıldığında farkın $\%0,1$ 'den az olduğu görülmüştür. Böylece, ağ yapısının bağımsızlığı da sağlanmıştır.

Sınır şartları, giriş, çıkış ve boru dış yüzeyinde sırasıyla giriş hızı ve sıcaklığı, basınç çıkış ve sabit ısı akısıdır. Geometri boyunca akış ve ısı transferinin çözümlenmesi, zamandan bağımsız olarak kütle (süreklilik denklemi), momentum ve enerjinin

korunumu kanunlarından elde edilen kısmi türevli denklemlerin CFD paket programı (ANSYS 15.0) ile çözümlenmesi esasına dayanır ve şu şekilde yazılabilir [45, 46].

Süreklilik Denklemi

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} V_m) = 0 \quad (15)$$

Momentum Denklemi

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} V_m V_m) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_{nf} \nabla V_m) \quad (16)$$

Enerji Denklemi

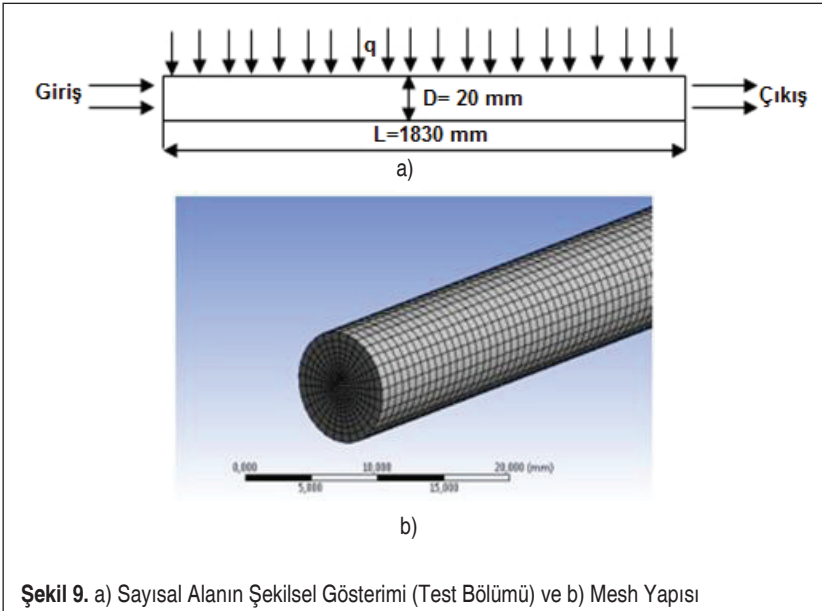
$$\nabla \cdot (\rho_{nf} c_p V_m T) = \nabla \cdot (k_{nf} \nabla T) \quad (17)$$

Bu çalışmada tek fazlı yaklaşım uygulanmıştır. Tek fazlı yaklaşımda 100 nm boyutundan daha küçük parçacıklar kullanılmaktadır.

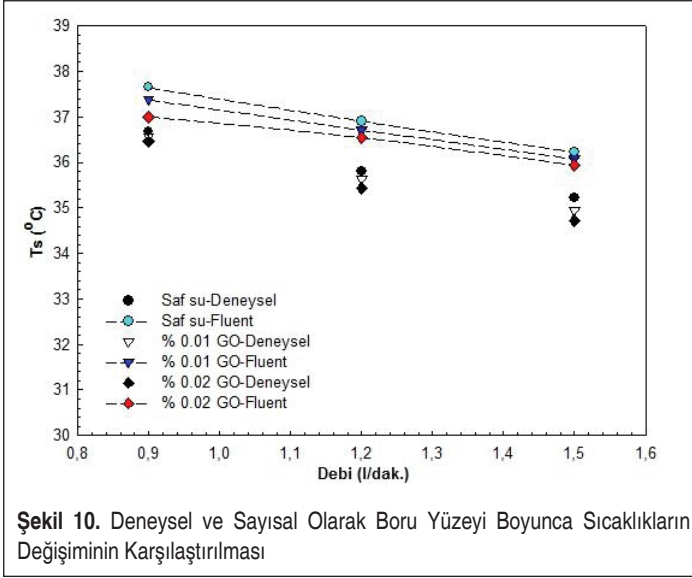
Çalışma şu kabuller altında yapılmıştır:

Borunun girişinde bütün fiziksel özellikler (hız, sıcaklık ve nanoparçacık konsantrasyonu) sabit ve üniformdur. Kullanılan akışkan sıkıştırılmazdır. Boru duvarında kaymama koşulu geçerlidir. Boru boyunca sabit ve üniform bir ısı akışı vardır. Boru çıkışında önemli fiziksel özelliklerin (hız, sıcaklık ve konsantrasyon) aksel değişimleri sıfıra eşittir.

Şekil 10, 20 mm iç çapa sahip boruda (1811.873 W/m^2) saf su, %0,01 ve %0,02 kon-



Şekil 9. a) Sayısal Alanın Şekilsel Gösterimi (Test Bölümü) ve b) Mesh Yapısı



santrasyonlarındaki GO nanoakışkanı için boru duvar yüzey sıcaklığının deneysel ve sayısal karşılaştırmasını göstermektedir. Şekilden de görülebileceği gibi, boruda nanoakışkan olduğu durumdaki duvar yüzey sıcaklığı, saf suyun olduğu duruma göre daha düşüktür. Bunun nedeni, boru duvarına çarpan nanoparçacıkların ısı enerjisi önce kendi üzerlerine alması ve daha sonra hem kendi aralarında hem de taban akışkanı molekülleriyle çarpışarak akışkana olan ısı transferini artırmalarından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, deneysel ve sayısal sonuç arasında %2 ile %5 arasında bir fark bulunduğu saptanmıştır.

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, grafen oksit (GO)-su nanoakışkanının taşınım ısı transferi üniform duvar ısı akışı dairesel bir bakır boru boyunca laminar akış için deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada ayrıca, sayısal olarak da inceleme yapılmış olup, hesaplama sonuçları konsantrasyonun çok düşük olması nedeniyle tek fazlı akışkan kabulü yapılarak, Navier-Stokes ve enerji denkleminin sonlu hacim yöntemi olan ANSYS Fluent-15.0 programı kullanılarak çözülmesiyle üç boyutlu zamandan bağımsız olarak elde edilmiştir. Sayısal çalışmada elde edilen boru yüzey sıcaklık değerleri nanoakışkan için deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında, ortalama %2 hata ile birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Grafen oksit-su nanoakışkanı taban akışkanıyla karşılaştırıldığında, belirgin bir şekilde daha yüksek ısı iletkenlik ve ısı taşınım katsayısı değerlerine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Nanoakışkanın ısı iletkenliğindeki en yüksek artış, hacimce %0,02'lik GO konsantrasyonunda %9,85'tir. Isı taşınım kat-



sayısı (h) için en yüksek artış değerine ise hacimce %0,02 GO konsantrasyonu, 1,5 l/dk debi ($Re=2023$) ve 2536.62 W/m^2 (350 W)'lık ısı akısında ulaşılmaktadır. Bu debi ve ısı akısı değerinde taban akışkanına göre ısı taşınım katsayısında %13,9'luk artış elde edilmektedir. Diğer taraftan, Nusselt sayısı nanoparçacıkların eklenmesiyle genellikle artma eğilimindedir. Fakat $1811.873 \text{ W/m}^2\text{K}$ ısı akısında 0,9 l/dk ve 1,2 l/dk'lık debilerde her iki nanoakışkan konsantrasyonunda da (%0,01 ve %0,02) ısı taşınım katsayısındaki artışın ısı iletkenlik artışından daha az olması nedeniyle taban akışkanına göre Nusselt sayısı artışı elde edilemezken, %0,02'lik GO için 2536.62 W/m^2 ısı akısında 1,2 l/dk ve özellikle 1,5 l/dk'lık debide Nusselt sayısında daha belirgin artış değerleri elde edilmektedir. Aynı zamanda, %0,02'lik GO konsantrasyonunda Nu ve h değerleri daha fazla artarken, taban akışkanına göre artış oranı bakımından %0,01'lik konsantrasyondaki değerler %0,02'lik konsantrasyona göre daha fazla olmaktadır. Bu nedenle, nanoakışkanın verimli bir şekilde kullanılabilmesi için en uygun konsantrasyon oranının belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca, çalışmada kullanılan %0,02'lik GO konsantrasyonundan daha yüksek konsantrasyonlarda nanoakışkanın kullanılması durumunda ısı taşınım katsayısı ve Nusselt sayısındaki artış oranı miktarının daha da azalacağı düşünülmektedir.

Yük kaybı (basınç düşüşü) ve sürtünme faktörü değişimi incelendiğinde, en yüksek artışlar %0,02 GO konsantrasyonu ve 1,5 l/dk debide elde edilmekte olup bu değerler sırasıyla %8,37 ve %7,95'dir. Fakat, nanoakışkanın verimliliği açısından baktığımızda elde edilen ısı iletkenlik artışı etkisi, viskozitenin artışı etkisinin üstesinden gelmekte ve böylece nanoakışkan kullanımını destekleyici etki sergilemektedir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, kullanılan 20 mm iç çaplı bakır boruda grafen oksit-su nanoakışkanının 1,2 l/dk ($Re=1626$) ve 1,5 l/dk ($Re=2023$)'lık debilerde özellikle %0,02 GO konsantrasyonu ve 2536.62 W/m^2 ısı akısında ısı transferini artırıcı potansiyeli ile ilgili sanayi dallarında kullanımı için geleneksel çalışma akışkanlarına bir alternatif olacağı söylenebilir.

Gelecek çalışmalarda, nanoakışkanda yüksek konsantrasyonlarda grafen oksit nanoparçacıklarının kullanımı için araştırmalar yapılabilir. Bu konuyla ilgili olarak, nanoakışkanın yalnızca araştırma alanı olarak kalmayıp, ısı transferi akışkanı olarak da uygulamada (elektronik soğutma sistemleri, ısı değiştirici akışkanları, güneş kolektörleri ve nükleer reaktörler vb.) kullanımının yaygınlaşması için öncelikle uzun süreli kararlılığının artırılması gerekmektedir. Bu nedenle de nanoparçacıkların sentezi ve nanoakışkanın hazırlanması aşamasında kullanılan kimyasal maddelerin kararlılığı artırırken termofiziksel özelliklerine zarar vermemesine dikkat edilmelidir.



SEMBOLLER

A	Alan (m^2)
c_p	Özgül ısı ($J/kg K$)
D	Borunun çapı (m)
f	Sürtünme faktörü
h	Isı taşınım katsayısı (W/m^2K)
I	Akım (Amper)
P	Borunun çevre uzunluğu (m)
Pr	Prandtl sayısı ($\mu c_p/k$)
Re	Reynolds sayısı ($4 \dot{m} / \pi D \mu$)
Q	Isı (W)
k	Isıl iletkenlik (W/mK)
L	Boru uzunluğu (m)
\dot{m}	Kütleli debi (kg/s)
Nu	Nusselt sayısı (hD/k)
q''	Isı akısı (W/m^2)
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
V	Voltaj (Volt)
u	Hız (m/s)
x	Borunun girişinden olan noktasal uzaklık (m)
ΔP	Basınç farkı (Pa)
Φ	Konsantrasyon (%)
μ	Viskozite (kg/m^2s)

Alt Simgeler

bf	Taban akışkanı
c	Kesit
i	Giriş
ic	İç çap
o	Çıkış
oc	Dış çap
m	Ortalama
nf	Nanoakışkan



- p Parçacık
s Boru yüzeyi

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) birimi tarafından M-505 proje numarası ile desteklenmiştir.

Ayrıca, nanoparçacık sentezi ve nanoakışkanın hazırlanması aşamasında desteğini esirgemeyen Cumhuriyet Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nin araştırma ekibindeki lisansüstü eğitimlerini gören değerli çalışma arkadaşlarımıza katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

1. **Maxwell, J. C.** 1904. A Treatise on Electricity and Magnetism, Oxford University Press, Cambridge.
2. **Gupte, S. K., Advani, S. G., Huq, P.** 1995. "Role of Micro-Convection Due to Non-Affine Motion of Particles in a Mono-Disperse Suspension," Int. J. Heat Mass Trans., vol. 38, no. 16, p. 2945-2958.
3. **Kim, S. J., Bang, I. J., Buongiorno, J., Hu, L. W.** 2007. "Surface Wettability Change During Pool Boiling of Nanofluids and its Effect on Critical Heat Flux," Int. J. Heat Mass Trans., vol. 50, no. 133, p. 4105-4116.
4. **Kwark, S. M., Kumar, R., Moreno, G., Yoo, J., You, S. M.** 2010. "Pool Boiling Characteristics of Low Concentration Nanofluids," Int. J. Heat Mass Trans., vol. 53, no. 5-6, p. 972-981.
5. **Hong, K. S., Hong, T. K., Yang, H. S.** 2006. "Thermal Conductivity of Fe Nanofluids Depending on the Cluster Size of Nanoparticles," Applied Physics Letters, vol. 88, no.3, p. 636-664.
6. **Hwan, L., Hwang, K., Janga, S., Lee, B., Kim, J., Choi, S. U. S., Choi, C.** 2008. "Effective Viscosities and Thermal Conductivities of Aqueous Nanofluids Containing Low Volume Concentrations of Al₂O₃ Nanoparticles," Int. Journal of Heat and Mass Trans., vol. 51, no. 11-12, p. 2651-2656.
7. **Jang, S. P., Choi, S. U. S.** 2007. "Effects of Various Parameters on Nanofluid Thermal Conductivity," Journal of Heat Transfer, vol. 129, no. 5, p. 617-623.
8. **Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W., Thompson, L. J.** 2001. "Anomalously Increased Effective Thermal Conductivities of Ethylene Glycol-Based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles," Applied Physics Letters, vol. 78, no. 6, p.718-720.
9. **Li, C. H., Peterson, G. P.** 2007. "The Effect of Particle Size on the Effective Thermal Conductivity of Al₂O₃-Water Nanofluids," Journal of Applied Physics, vol. 101, no. 4, p. 044312-1-044312-5.



10. **Sadri, R., Ahmadi, G., Togun, H., Dahari, M., Kazi, S. N., Sadeghinezhad, E., Zubar, N.** 2014. "An Experimental Study on Thermal Conductivity and Viscosity of Nanofluids Containing Carbon Nanotubes," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 9, no. 1, p.151.
11. **Wang, X., Xu, X., Choi, S. U. S.** 1999. "Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 13, no. 4, p. 474-480.
12. **Yu, W., Xie, H., Wang, X.** 2011. "Significant Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids Containing Graphene Nanosheets," *Phys. Lett. A*, vol. 375, p. 1323-1328.
13. **Zheng, R., Gao, J., Wang, J., Feng, S. P., Ohtani, H., Wang, J., Chen, G.** 2011. "Thermal Percolation in Stable Graphite Suspensions," *Nano Lett.*, vol. 9, no. 1, p. 188-192.
14. **Xie, H., Lee, H., Youn, W., Choi, M.** 2003. "Nanofluids Containing Multiwalled Carbon Nanotubes and Their Enhanced Thermal Conductivities", *J. Appl. Phys.*, vol. 94, no. 8, p. 4967-4971.
15. **Ding, Y., Alias, H., Wen, D., Williams, R. A.** 2006. "Heat Transfer of Aqueous Suspensions of Carbon Nanotubes (CNT Nanofluids)," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 49, no. 1, p. 240-250.
16. **Zhu, H., Zhang, C., Tang, Y., Wang, J., Ren, B., Yine, Y.** 2007. "Preparation and Thermal Conductivity of Suspensions of Graphite Nanoparticles," *Carbon*, vol. 45, no. 1, p. 226-228.
17. **Xie, H., Yu, W., Li, Y.** 2009. "Thermal Performance Enhancement in Nanofluids Containing Diamond Nanoparticles," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 42, no. 9, p. 1-5.
18. **Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S., Seal, S.** 2011. "Graphene Based Materials: Past, Present and Future," *Progress in Materials Science*, vol. 56, p. 1178-1271.
19. **Novoselov, K., Geim, A. K., Morozov, S., Jiang, D., Grigorieva, M. K. I., Dubonos, S., Firsov, A.** 2005. "Two-Dimensional Gas of Massless Dirac Fermions in Graphene," *Nature*, vol. 438, no. 7065, p. 197-200.
20. **Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F., Lau, C. N.** 2008. "Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene," *Nano Lett.*, vol. 8, no. 3, p. 902-907.
21. **Yu, W., Xie, H., Chen, L., Li, Y.** 2010. "Enhancement of Thermal Conductivity of Kerosene-Based Fe₃O₄ Nanofluids Prepared via Phase-Transfer Method," *Colloids and Surfaces A*, vol. 355, no. 1-3, p. 109-113.
22. **Yarmand, H., Gharekhani, S., Kazi, S. N., Sadeghinezhad, E., Safaei, M. R.** 2014. "Numerical Investigation of Heat Transfer Enhancement in a Rectangular Heated Pipe for Turbulent Nanofluid," *Sci. World J.*, vol. 2014, Article ID 3695939, p. 9.
23. **Shanbedi, M., Heris, S. Z., Baniadam, M., Amiri, A., Maghrebi, M.** 2012. "Investigation of Heat Transfer Characterization of EDA-MWCNT/DI-Water Nanofluid in a Two Phase Closed Thermosyphon," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 51, no. 3, p. 1423-1428.



24. **Memari, M., Golmakani, A., Dehkordi, A. M.** 2011. "Mixed-Convection Flow of Nanofluids and Regular Fluids in Vertical Porous Media with Viscous Heating," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 50, no. 15, p. 9403-9414.
25. **Wang, J., Zhu, J., Zhang, X., Chen, Y.** 2013. "Heat Transfer and Pressure Drop of Nanofluids Containing Carbon Nanotubes in Laminar Flows," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 44, p. 716-721.
26. **Abreu, B., Lamas, B., Fonseca, A., Martins, N., Oliveira, M. S. A.** 2014. "Experimental Characterization of Convective Heat Transfer with MWCNT Based Nanofluids under Laminar Flow Conditions," *Heat and Mass Transfer*, vol. 50, no. 1, p. 65-74.
27. **Karabulut, K., Yapıcı, K., Buyruk, E., Kılınc, F.** 2015. "Karbon Nanotüp İçeren Nanoakışkanın Isı Transferi Artışı ve Basınç Düşüşü Performansının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi," 20. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 2-5 Eylül 2015, Balıkesir.
28. **Baby, T. T., Ramapraphu, S.** 2011. "Enhanced Convective Heat Transfer Using Graphene Dispersed Nanofluids," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 6, no. 289, doi:10.1186/1556-276X-6-289.
29. **Akhavan-Zanjani, H., Saffar-Avval, M., Mansourkiaei, M., Ahadi, M., Sharif, F.** 2014. "Turbulent Convective Heat Transfer and Pressure Drop of Graphene-Water Nanofluid Flowing Inside a Horizontal Circular Tube," *J. Dispers. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 9, p. 1230-1240.
30. **Akhavan-Zanjani, H., Saffar-Avval, M., Mansourkiaei, M., Sharif, F., Ahadi, M.** 2016. "Experimental Investigation of Laminar Forced Convective Heat Transfer of Graphene-Water Nanofluid Inside a Circular Tube," *Int. J. Thermal Sci.*, vol. 100, p. 316-323.
31. **Mirzaei, M., Azimi, A.** 2016. "Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Graphene Oxide/Water Nanofluid in a Circular Tube Fitted with Wire Coil Insert," *Exp. Heat Trans.*, vol. 29, no. 2, p. 173-187.
32. **Hajjar, Z., Rashidi, A., Ghozatloo, A.** 2014. "Enhanced Thermal Conductivities of Graphene Oxide Nanofluids," *Int. Comm. In Heat and Mass Transfer*, vol. 57, p. 128-131.
33. **Hummers, W. S., Offeman, R. E.** 1958. "Preparation of Graphitic Oxide," *Am. Chem. Soc.*, vol. 80, no. 6, p. 1339.
34. **Karabulut, K.** 2015. "Isı Değiştiricilerde Isı Aktarımının Nanoakışkanlar Kullanılarak Arttırılması," Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
35. **Ghozatloo, A., Rashidi, A., Shariaty-Niassar, A.** 2014. "Convective Heat Transfer Enhancement of Graphene Nanofluids in Shell and Tube Heat Exchanger," *Exp. Thermal Fluid Sci.*, vol. 53, no. 2014, p. 136-141.
36. **Pak, B. C., Cho, Y. I.** 1998. "Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles," *Exp. Heat Trans.*, vol. 11, no. 2, p. 151-170.
37. **Shah, R. K.** 1975. "Thermal Entry Length Solutions for the Circular Tube and Parallel



Plates,” In. Proceedings of the 3rd National Heat Mass Transfer Conference, 11-13 December 1975, Bombai-India.

38. **Buongiorno, J.** 2006. “Convective Transport in Nanofluid,” *J. Heat Transfer*, vol. 128, no. 3, p. 240-250.
39. **Awad, M. M., Muzychka, Y. S.** 2008. “Effective Property Models for Homogeneous Two Phase Flows,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 33, no. 1, p. 106-113.
40. **Bianco, V., Chiacchio, F., Manca, O., Nardini, S.** 2009. “Numerical Investigation of Nanofluids Forced Convection in Circular Tubes,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, no. 17-18, p. 3632-3642.
41. **Ebrahimnia-Bajestan, E., Niazmand, H., Duangthongsuk, W., Wongwises, S.** 2011. “Numerical Investigation of Effective Parameters in Convective Heat Transfer of Nanofluids Flowing under a Laminar Flow Regime,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 54, no. 19-20, p. 4376-4388.
42. **Rea, U., Mckrell, T., Hu, L. W., Buongiorno, J.** 2009. “Laminar Convective Heat Transfer and Viscous Pressure Loss of Alumina-Water and Zirconia-Water Nanofluids,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 52, no. 7-8, p. 2042-2048.
43. **Williams, W., Buongiorno, J., Hu, L. W.** 2008. “Experimental Investigation of Turbulent Convective Heat Transfer and Pressure Loss of Alumina/Water and Zirconia/Water Nanoparticle Colloids (Nanofluids) in Horizontal Tubes,” *J. Heat Transfer*, vol. 130, no. 4, p. 412-419.
44. **Escher, W., Brunswiler, T., Shalkeich, N., Shalkevich, A., Burgi, T., Michel, B., Oulikakos, D.** 2011. “On the Cooling of Electronics with Nanofluids,” *J. Heat Transfer*, vol. 133, no. 5, p. 1-11.
45. **Izadi, M., Behzadmehr, A., Jalali-Vahid, D.** 2009. “Numerical Study of Developing Laminar Forced Convection of a Nanofluid in an Annulus,” *Int J. Therm. Sci.*, vol. 48, p. 2119-2129.
46. **FLUENT User’s Guide.** 2003. Fluent Inc., Lebanon, NH.