



Farklı Çaplara Sahip Dairesel Borularda Grafen Oksit (GO)-Saf Su Nanoakışkanı Kullanımının Isı Transferi Artışı Üzerindeki Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Experimental Investigation of the Effect of Graphene Oxide (GO)-Distilled Water Nanofluid Usage on Heat Transfer Increment In Circular Tubes Having Different Diameters

Koray Karabulut^{1*}, Ertan Buyruk², Ferhat Kılınç²

¹Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 58140 Sivas, TÜRKİYE

²Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 58140 Sivas, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 12/04/2018

Kabul/Accepted: 21/11/2018

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2019

Öz

Bu çalışmada, %0,01 hacimsel konsantrasyonlu grafen oksit (GO)-saf su nanoakışkanının taşınım ısı transferi ve basınç düşüşü artışı iç çapları 12 mm ve 16 mm olan, 1830 mm uzunluğa sahip sabit duvar ısı akımlı dairesel bakır düz borularda deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, çalışmada sayısal hesaplamalar tek fazlı akışkan kabulüyle Navier-Stokes ve enerji denkleminin sonlu hacimler yöntemi olan ANSYS-FLUENT programı kullanılarak çözümlenmesiyle üç boyutlu ve zamandan bağımsız olarak yapılmıştır. Hacimsel debinin, ısı akısının ve boru çapının GO-saf su nanoakışkanının taşınım ısı transfer katsayısı ve basınç düşüşü üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmış ve saf su için elde edilen ısı taşınım katsayısı değerleri ilgili bağıntılardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, farklı çaplı borular için farklı debi ve ısı akısı değerlerinde ısı taşınım katsayısı ve Nusselt sayısı değerlerinin değişimleri olarak sunulmuş ve ayrıca boruların duvar yüzey sıcaklık ve ısı taşınım katsayısı değerlerinin değişimleri sayısal ve deneysel karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, nanoakışkanın h ve Nu sayısı değerlerinin hacimsel debi ve ısı akısındaki artışla arttığını ve en yüksek artış değerlerine 16 mm iç çaplı boruda ulaşıldığını göstermektedir. 16 mm iç çaplı boru için GO-saf su nanoakışkanının ortalama ısı taşınım katsayısı artış değeri 1,5 L/dak. lık debi (Re=1981) ve 3043,94 W/m² lik (350 W) ısı akısı değerinde %34,88 olmaktadır.

Anahtar Kelimeler

“Nanoakışkan, grafen oksit, taşınım ısı transfer katsayısı, basınç düşüşü”

Abstract

In this study, increment of convective heat transfer and pressure drop of graphene oxide (GO)-distilled water nanofluid with volumetric concentration of 0,01% in circular copper straight tubes having inner diameters of 12 mm and 16 mm, length of 1830 mm and with constant wall heat flux was experimentally investigated. In addition, numerical calculations were performed as three-dimensional and steady by solving Navier-Stokes and energy equation using ANSYS-FLUENT program which is the finite volumes method with the assuming of single phase fluid. The effects of volumetric flow rate, heat flux and diameter of the tube were experimentally researched on the convective heat transfer coefficient and the pressure drop of the GO-distilled water nanofluid and the obtained values of convective heat transfer coefficient for the distilled water were compared with determined results from corresponding correlations. Results were presented as the variation of convective heat transfer coefficient and Nu number values at the values of different flow rates and heat fluxes for different tube diameters. And also, the variations of wall surface temperature and convective heat transfer coefficient values of the tubes were examined as numerical and experimental comparison. The obtained results showed that h and Nusselt number values of nanofluid increased with increasing of volumetric flow rate and heat flux and the highest increment values were reached at the pipe with 16 mm inner diameter. The increment value of average convective heat transfer coefficient of the GO-distilled water nanofluid was 34,88% at the flow rate of 1,5 L/min. (Re=1981) and the heat flux of 3043,94 W/m² (350 W) for the tube with 16 mm inner diameter.

Key Words

“Nanofluid, graphen oxide, convective heat transfer coefficient, pressure drop”

1. GİRİŞ

Enerji dönüşümü uygulamalarında kullanılan ısı değiştiriciler, güneş ısıtıcıları, nükleer reaktörler, soğutucular ve hidrojen depolama üniteleri gibi sistemlerin ısı performansları temel olarak su, etilen glikol ve yağ gibi geleneksel ısı transferi akışkanlarının termofiziksel özelliklerine bağlıdır. Bununla birlikte, su, yağlar ve glikoller sahip oldukları düşük ısı iletkenlikleri nedeniyle zayıf ısı transferi performansı sergilemektedirler. Günümüzde de bu doğrultuda akışkanların ısı transferi özelliklerini iyileştirmek amacıyla araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bunun yanı sıra, katı malzemeler, sıvılardan daha yüksek ısı iletkenlik değerlerine sahip olduklarından sıvıya eklenen katı parçacıklar kullanılan (taban) akışkanının ısı iletkenliğini ve ısı transferi performansını artırmaktadırlar (Trisaksri ve Wongwises, 2007). İlk başlarda, mikrometre hatta milimetre boyutlu katı parçacıklar süspansiyon oluşturmak için taban akışkanlarına karıştırılmıştır. Buna ek olarak, nanoparçacıklara kıyasla büyük boyutlu olan bu katı parçacıklar, boru hatlarını aşındırıcı etkide bulunması, mikro kanallarda tıkanmalara yol açması ve basınç düşüşünü artırması gibi uygulamada kısıtlayıcı birtakım istenmeyen sonuçlara sebep olmaktadır. Bunun yanında, parçacıkların büyük boyuta sahip olması ve üretim aşamasında küçük boyutlu parçacıklarda yaşanan zorluklar uygulamayı kısıtlayıcı diğer faktörler olmuştur. Bununla birlikte, başlangıçta yalnızca teorik bir ilgi alanı olan sıvı süspansiyon şeklindeki karışımlar araştırmacıların yaptıkları deneysel çalışmalar neticesinde gelecek vaat edici etkiler gösterdiği belirlenmiştir. Bu sebeple, 1881 yılında Maxwell' in öncülüğünde başlatılan ve ısı iletkenlik değerini artırmak amacıyla geleneksel ısı transferi akışkanlarına katı parçacıkların eklenmesi düşüncesi yeni bir fikirdir (Maxwell, 1904), (Gupte vd., 1995). Bu akışkanların özelliklerindeki iyileşmeler son derece kritik bir öneme sahip olduğu için nanoakışkan olarak adlandırılan yenilikçi çalışma akışkanları üzerindeki araştırmalar da son zamanlarda ilgi odağı haline gelmiştir (Kim vd., 2007), (Kwark vd., 2010).

Nanoakışkan, 100 nm ve daha küçük boyuttaki metal, metal oksit, tek ve çok katmanlı karbon nanotüp, grafit, grafen, grafen oksit, grafen nano ribbon gibi parçacıkların genelde deformasyon hızının kayma gerilmesi ile doğru orantılı olarak değiştiği 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 transferi katsayısı değerleri sağlamaktadırlar ve ayrıca basınç düşüşü ve pompalama gücünde taban akışkanına göre çok az bir artış meydana getirmektedirler (Hong vd., 2006), (Hwan vd., 2008). Araştırmacıların birçoğu, karbon nanotüpler (Sadri vd., 2014), grafit (Wang vd., 1999) ve grafen nanoparçacıklar (Yu vd., 2011), (Zheng vd., 2011) gibi karbon tabanlı ve metal (Cu, Fe) ((Hong vd., 2006), (Eastman vd., 2001)) ve metal oksit (Al_2O_3) (Hwan vd., 2008), (Turgut vd., 2016) gibi çeşitli nanoparçacıkların kullanılmasıyla elde edilen nanoakışkanların termofiziksel özelliklerini incelemiştirler. Geleneksel olarak kullanılan akışkanlara nanoparçacıkların eklenerek yeni akışkan elde edilmesi düşüncesinin ısı iletkenlikte iyileşme sağlanarak akışkanın ısı transferi performansını artırmak amacıyla olduğu düşünüldüğünde nanoakışkanlar üzerinde yoğun olarak araştırma yapılması olağan kabul edilmektedir. Metal ve metal oksitlerle karşılaştırıldığında karbon kökenli malzemeler yüksek ısı iletkenliğe ve düşük yoğunluğa sahip oldukları için daha çok ilgi görmektedirler (Xie vd., 2003).

Nanoteknolojinin çeşitli alanlarında geniş çapta kullanılan en yeni parçacıklarından biri olan grafen, karbon kökenli bir malzemedir. İki boyutlu düzlemsel yapıların çok ender örneklerinden biri olarak kabul edilen grafen, karbon elementinin bal peteği örgülü yapısıdır. Grafen, bilim dünyası için heyecan verici bir etkiye sahip olmakla birlikte aslında çok nadir bulunan bir malzeme özelliğine sahip değildir. Günlük hayatta da kullandığımız kurşun kalemlerin içinde bulunan grafit, grafen tabakalarının üst üste binmesinden meydana gelmektedir. Grafen, karbon atomlarının tek düzlemde farklı şekilde dizilmesiyle oluşmuş iki boyutlu, bir atom kalınlığında altıgen bir yapısıdır (Singh vd., 2011). Grafen bu yapısı sayesinde olağanüstü mekanik, ısı ve elektriksel özellikler göstermektedir ve bu sebeple çoğu araştırmacı için ilgi odağı haline gelmiştir (Novoselov vd., 2005). Grafen, ısı iletkenliği çok iyi olan bir malzemedir. Tek tabakalı grafen nanoparçacığının oda sıcaklığındaki ısı iletkenliği, 5000 W/mK ve yüzey alanı 2630 m²/g' dır (Balandin vd., 2008).

Grafenin yüksek ısı iletkenliği, diğer nano parçacıklarla ve hatta karbon nanotüplerle karşılaştırıldığında çok daha iyi bir performans sergilemektedir. Bu nedenle, grafen nanoparçacıkları içeren nanoakışkanların ısı transferi çalışması diğer nanoakışkan türlerine göre çok 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 çökelme olmamaktadır (Yu vd., 2011). Bu üstün özelliklerinden ötürü ve ayrıca grafen oksit-saf su nanoakışkanı hakkında literatürdeki çalışma sayısının oldukça az olması nedeniyle bu çalışmada deneysel olarak grafitten sentezlenen grafen oksit nanoparçacığı kullanılmıştır.

Efektif ısı iletkenlikteki artış, yoğunluk, özgül ısı ve viskozitedeki değişimler nanoakışkanın iyileştirilmiş ısı transfer davranışının önemli belirtileridir (Celeta vd., 2013). Bununla birlikte, ısı transfer akışkanı olarak nanoakışkanın net katkısı basınç düşüşü ve ısı taşınım katsayısı artışıyla belirlenir. Artan ısı taşınım katsayısının bir sonucu olarak nanoakışkanlar, ısı transfer ekipmanlarının boyutunda ve dolayısıyla ağırlığında azalmaya olanak tanır. Buna bağlı olarak, enerji ve yakıt verimliliğinde artışa ve emisyonlarda ise azalmaya yol açarlar. Diğer taraftan, nanoparçacıkların eklenmesiyle taban akışkanının yoğunluk ve viskozitesindeki artış, basınç düşüşüne katkıda bulunmaktadır. Bunun sonucunda, yüksek bir pompalama gücü gereksinimi doğmaktadır (Kebinski vd., 2008), (Moghari vd., 2015). Bu sebeple, nanoakışkanın kullanımı esnasındaki basınç düşüşü bir nanoakışkanın kullanılması ve ekonomik olarak değerlendirilmesi açısından ayrıca büyük bir öneme sahiptir.

Farklı boyutlardaki borularda kullanılan nanoakışkanların ısı taşınım katsayılarının deneysel olarak araştırılması çeşitli çalışmalarda yer bulmuş (Yarmand vd., 2014) ve bu çalışmalarda oksitleri, nitritleri, metalleri, elmas ve karbon tabanlı olmak üzere çeşitli nanoparçacıkların kullanılmasıyla elde edilen nanoakışkanlar kullanılmıştır (Shanbedi vd., 2012). Bu çalışmalardan başka, Ding vd., (2006) yatay bir boru boyunca CNT (karbon nanotüp)-su tabanlı nanoakışkanların taşınım ısı transferini incelemişlerdir. Laminer akışta ve sabit duvar ısı akısı sınır şartında ve $Re=800$ ' de en yüksek h artışını 970 mm uzunluk ve 4,5 mm iç çaplı boruda kütlece %0,5 konsantrasyonda %350' nin üzerinde olduğunu bulmuşlardır. Wang vd., (2013) ise 0,952 mm iç çaplı ve 949,5 mm uzunluklu boruda $Re=120$ ' de hacimsel olarak %0,24' lük çok katmanlı karbon nanotüp nanoparçacık kullanarak hazırladıkları nanoakışkan ile yaptıkları deneyde ısı taşınım katsayısında %190' lük artış elde etmişlerdir. Karabulut vd., (2015) çalışmalarında 8 mm iç çaplı ve 1830 mm uzunluklu bakır bir boruda %0,01 hacimsel konsantrasyonlu çok katmanlı karbon nanotüp (MWCNT)-saf su nanoakışkanının taşınım ısı transferi artışında ısı akısı ve hacimsel debinin etkilerini araştırmışlardır. $Re=2753$ ' de boruya uygulanan 500 W' lik ısı yükü değerinde taban akışkanına göre ısı taşınım katsayısı değerinde %20' lik artış elde etmişlerdir. Bununla birlikte, 1,8 L/dak. debide 500 W ısı yükünde taban akışkanına göre basınç kaybında %5,6' lik artış olduğunu bulmuşlardır. Karabulut vd., (2018), yaptıkları bir diğer çalışmada 20 mm iç çaplı boruda hacimsel olarak %0,01 ve %0,02' lik GO konsantrasyonunda saf su ile hazırladıkları nanoakışkanları kullanarak ısı taşınım katsayısı ve basınç düşüşü artışında ısı akısının, nanoparçacık hacimsel konsantrasyonunun ve hacimsel debinin etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Hacimsel %0,02-GO-saf su nanoakışkan konsantrasyonunda 1,5 L/dak. debi ve 350 W ısı yükünde saf suya göre ısı taşınım katsayısında ve basınç kaybında sırasıyla %13,9 ve %8,37' lik artış sağlandığını bulmuşlardır. Chen vd., (2008), nanoparçacık olarak titanat nanotüp ile kütlece %0,5, %1 ve %2,5 konsantrasyonlarda su ile hazırladıkları nanoakışkanların ısı iletkenliğini, reolojik davranışını ve zorlanmış ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Kütlece %2,5' luk nanoakışkan konsantrasyonu için 25 °C ve 40 °C' de sırasıyla %3 ve %5' lik ısı iletkenlik artış değerlerine ulaşmışlardır. Isıl iletkenlik artış değerleri ile kıyaslandığında kayma gerilmesi arttığında viskozitesinde azalma gösteren titanat nanotüp nanoakışkanı ile daha yüksek ısı taşınım katsayısı değerleri elde etmişlerdir. 3,9 mm çaplı ve 2 m uzunluklu bir boruda yaptıkları deneylerinde sırasıyla kütlece %0,5, %1 ve %2,5' luk konsantrasyonlarda $x/D=50,4$ ' lük uzaklıkta ısı taşınım katsayısında %11,8, %23,5 ve %24,9' luk artış değerleri sağlamışlardır. Baby ve Ramaprabhu (2011), grafen-su nanoakışkanının taşınım ısı transferi artışı hakkında deneysel bir araştırma yapmışlardır. %0,05 hacimsel konsantrasyon için 25 °C ve 50 °C' lik sıcaklıklarda ısı iletkenlik katsayısı değerinde sırasıyla %16 ve %75' lik artışlar elde etmişlerdir. Ayrıca, ısı iletkenlik katsayısı değeri ile karşılaştırıldığında Nu sayısı değerinde daha fazla artış olduğunu görmüşlerdir. Üiform olarak ısıtılmış dairesel bir boruda farklı hacimsel konsantrasyonlarda grafen-su nanoakışkanının türbülanslı taşınım ısı transferi Akhavan-Zanjani vd., (2014) tarafından araştırılmıştır. Nu sayısı değerinin genellikle nanoparçacıkların eklenmesiyle azaldığını ve h değerindeki %6,04' lük en yüksek artışın $Re=10850$ ' de %0,02' lik hacimsel konsantrasyonda olduğunu saptamışlardır. Ayrıca, yine aynı konsantrasyon değerinde (%0,02) $Re=9310$ ' da suya göre %0,8 ile en yüksek basınç düşüşü artışını elde edilmiştir. Bununla birlikte, Re sayısının artışıyla basınç düşüşünün arttığı ve sürtünme faktörünün ise azaldığı görülmüştür. Akhavan-Zanjani vd., (2016), yaptıkları bir diğer çalışmada, laminer akışlı üniform ısı akılı 4,2 mm iç çaplı dairesel bir boru boyunca grafen-su nanoakışkanının taşınım ısı transfer katsayısını deneysel olarak incelemişlerdir. %0,02' lik hacimsel konsantrasyonda k için %10,3 ve h için de $Re=1850$ ' de %14,2 ile en yüksek artış değerlerini elde etmişlerdir. Ghosatloo vd., (2014) bir gövde borulu ısı değiştiricisinde laminer akış için grafen nanoakışkanının h değeri üzerinde sıcaklık ve konsantrasyonun etkisini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, 38 °C sıcaklıkta %0,1' lik kütle konsantrasyonda saf suyla karşılaştırıldığında %35,6' lik h artışı belirlemişlerdir. Anvari vd., (2019), çalışmalarında çapraz akışlı mikro kanallı ısı değiştiricisinde sıcak akışkan olarak kayma gerilmesi ile kayma hızının doğrusal olarak değişmediği non-newtonian bir akışkan olan karboksimetil selüloz (CMC) ve kütlece %0,05-0,15' lik tek tabakalı karbon nanotüp (SWCNT) ile hazırlanmış oldukları nanoakışkanın ısı transferini ve basınç düşüşünü deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma parametreleri olarak Reynolds sayısının, kütle konsantrasyonunun, sıcak ve soğuk akışkan giriş sıcaklıklarının etkilerini incelemişlerdir. Debi ve konsantrasyonun artışıyla ısı transferi ve basınç düşüşünün arttığını belirlerken, kullanılan sistemin fizibilitesini değerlendirmek için önerilerde bulunmuşlardır. Sadeghinezhad vd., (2015), sabit ısı akılı paslanmaz çelikten imal edilmiş 10 mm iç çaplı düz bir boruda akan grafen mikrolevha (GNP)-su nanoakışkanının ısı transfer özellikleri ve basınç düşüşünü deneysel olarak incelemişlerdir. GNP-su nanoakışkanının %0,025-0,1' lik hacimsel konsantrasyonları arasında h değerinde saf suya göre %13-160 arasında artış elde ederlerken, Nu sayısı değerinde %3-83 arası artış saptamışlardır. Ayrıca, basınç düşüşü değerinde %0,4-14,6 arası artış bulmuşlardır.

Literatürde var olan çalışmalar incelendiğinde, oldukça üstün mekanik, elektriksel ve ısı özelliklere sahip olan karbon tabanlı grafenden elde edilen grafen oksit nanoparçacığının kullanılmasıyla elde edilen nanoakışkanın taşınım ısı transferi ve düz bir borudaki basınç kaybı özellikleri üzerine yapılan çalışmaların çok sınırlı sayıda olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, literatürdeki çalışmalarda nanoakışkanların yalnızca bir boru çapı içerisindeki ısı davranışları incelenmiş olup, farklı boru çapları için yapılan bir kıyaslamaya henüz rastlanmamıştır. Üstün özelliklere sahip olan grafen oksit-su nanoakışkanından uygulamada özellikle ısıtma ve soğutma işlemlerinde etkin bir şekilde faydalanabilmesi için farklı boru çaplarındaki ısı davranışlarının dikkatli bir şekilde araştırılması gerekmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada %0,01' lik hacimsel konsantrasyonlu GO ve taban akışkanı olarak saf su kullanılarak elde edilen GO-saf su nanoakışkanının ısı transferi artışı ve basınç düşüşü etkileri sırasıyla iç çapları 12 mm ve 16 mm, cidar kalınlıkları ise 2 mm (dış çapları ise 16 mm ve 20 mm) olan 1830 mm uzunluğa sahip sabit duvar ısı akılı bakır düz borularda deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, çalışmada konsantrasyonun çok düşük olması nedeniyle sayısal çözümler tek fazlı akışkan kabulüyle Navier-Stokes ve enerji denklemlerinin sonlu hacimler yöntemi temelli ANSYS-FLUENT programı kullanılarak üç boyutlu ve zamandan bağımsız olarak çözülmesiyle elde edilmiştir. Deneysel çalışmada 0,9 L/dak., 1,2

L/dak. ve 1,5 L/dak. olmak üzere üç farklı hacimsel debi ile çalışılmış olup, boru duvarı dış yüzeyine uygulanan sabit ısı yükleri ise 250 W ve 350 W' dir. Deneylerde kullanılan akışkanlar, borulara 30 °C giriş sıcaklığında girmektedir. Bununla birlikte, %0.01 hacimsel konsantrasyonlu GO-su nanoakışkanının taşınım ısı transferi ve basınç düşüşü üzerinde boru çapının, hacimsel debinin ve ısı akısının etkileri deneysel olarak incelenmiş ve geleneksel akışkan olan saf su ile karşılaştırılması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, incelenen farklı çaplardaki iki boru için farklı hacimsel debi ve ısı akısı değerlerinde h ve Nu sayısının değişimleri olarak sunulmuş ve ayrıca boru duvar yüzey sıcaklığının debi ile değişimleri de deneysel ve sayısal karşılaştırılmalı olarak da değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra, GO-su nanoakışkanına ait basınç düşüşü ve sürtünme faktörü değişimi de taban akışkanı olarak kullanılan saf suyla da karşılaştırılarak incelenmiştir.

2. DENEYSEL İNCELEME

2.1. Nanoparçacık Sentezi ve Nanoakışkanın Elde Edilmesi

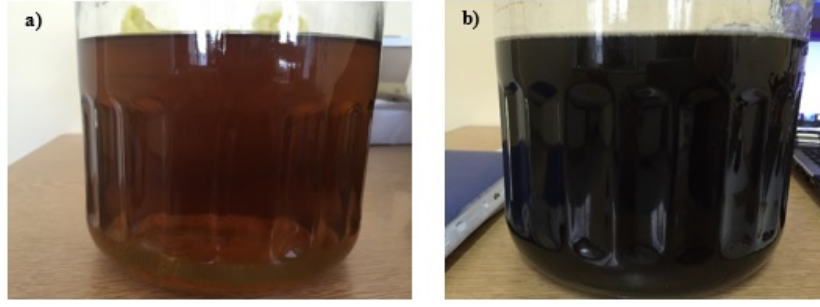
Çalışmada kullanılan GO, grafitten sentezlenerek elde edilmiştir. GO sentezlenirken grafit, nitrit ve sülfirik asit ve ayrıca sodyum nitrat, hidrojen peroksit ve potasyum permanganat gibi çeşitli kimyasallarla işleme tabi tutulmuştur. Bu işlemde sonra grafit, saf sudan geçirilerek asitten ve kimyasallardan arındırılmış ve sonrasında kurutma fırınında kurutularak GO nanoparçacığı hazır hale getirilmiştir (Hajjar vd., 2014), (William vd., 1958). Sentezlenen GO' den iki aşamalı nanoakışkan hazırlama yöntemi kullanılarak GO-saf su nanoakışkanı elde edilmiştir. Geniş ölçüde nanoakışkan hazırlama yöntemi olarak kullanılan iki aşamalı yöntem, doğrudan nanoparçacıkların taban akışkanının karıştırılması ve ultrasonik ses dalgalarının elde edildiği ultrasonifikatör cihazı kullanılarak nanoparçacık kümeleşmesinin önlenmesinden ibarettir. Bu amaçla çalışmada istenen hacimsel konsantrasyona göre GO nanoparçacığı 0,1 mg hassasiyete sahip hassas terazide tartılmıştır. Nanoparçacık tartım işleminden sonra kütle oranlar Eş. 1 ile hacimsel orana çevrilmiştir. Yapılan deneylerde kullanılmak üzere hacimsel %0,01' lik konsantrasyonda nanoakışkan hazırlamak amacıyla 4 L saf suya 0,4 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' lik maksimum güce sahip ultrasonifikatör cihazında bekletilerek ses dalgalarına maruz bırakılmıştır. Elde edilen nanoakışkan, deneylerden sonra iki ay gibi uzun bir süre herhangi bir çökme olmadan kararlılığını koruyabilmektedir. Bununla birlikte, nanoakışkanın kararlılık sürecine Zeta potansiyel değeri ölçümleri ve gözlemsel olarak takibi sonucunda karar verilmiştir (Karabulut, 2015). Nanoakışkanın kararlılığının belirlenmesinde gözleme yöntemi dışında sık kullanılan yöntemlerden biri olan Zeta potansiyel ölçümü, parçacıkla temasta olan durgun akışkan tabakası ve taban akışkanı ortamı arasındaki elektriksel yük farkıdır. Zeta potansiyel, dağılımda aynı yüklü parçacıklar arasındaki itmenin derecesini göstermektedir. Yüksek zeta potansiyeline sahip olan (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 (Ghozatloo vd., 2014). Deneylerde kullanılan GO-saf su nanoakışkanının Zeta potansiyel değeri ise 45-65 mV aralığında olmakta olup, kararlılık kriteri değeri olan 25 mV' un oldukça üzerinde olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, burada değinilen GO' in sentezlenmesi ve nanoakışkanın hazırlanması işlemleri Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde gerçekleştirilmiş olup, deneylerde kullanılan nanoakışkan buradan temin edilmiştir.

$$\frac{V_p}{V_{nf}} = \frac{V_p}{V_{bf} + V_p} = \frac{\frac{m_p}{\rho_p}}{\frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_{bf}}{\rho_{bf}}} = \frac{m_p \rho_{bf}}{m_p \rho_{bf} + m_{bf} \rho_p} \quad (1)$$

Eş. 1' deki, m_p nanoparçacığın kütlesi, m_{bf} taban akışkanın kütlesi, ρ_{bf} ve ρ_p ise sırasıyla taban akışkanının ve nanoparçacığın yoğunluklarıdır.

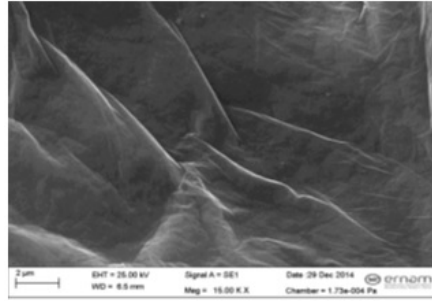
2.2. GO-Saf Su Nanoakışkanının Kararlılığı

Deney öncesi ve deney sonrası %0,01 hacimsel konsantrasyondaki GO-saf su nanoakışkanına ait fotoğraflar, sırasıyla Şekil 1.a ve Şekil 1.b' de gösterilmektedir. Şekil 1.a ve 1.b' de de görüldüğü gibi deney sırasında havadaki oksijenle temas eden nanoakışkanın rengi karararak daha koyu bir renk almaktadır. Hidroksil molekülü gruplarının (OH⁻), oksidasyon reaksiyonu sırasında GO nanoparçacıklarının yüzeylerinin kenarlarına bağlanması nedeniyle GO iyi bir su sever özelliğe ve suyla iyi bir uyumluluğa sahip olmaktadır (Ghozatloo vd., 2014). Bu nedenle, GO-saf su nanoakışkanı uzun süreli bir kararlılık göstermektedir. Şekil 2' de deneylerde kullanılan GO nanoparçacığına ait taramalı elektron mikroskopundan (SEM) elde edilen görüntü gösterilmektedir (Eravcu, 2016).



Şekil 1. %0,01 hacimsel konsantrasyonlu grafen oksit (GO)-saf su nanoakışkanına ait fotoğraflar

a) deney öncesi b) deney sonrası



Şekil 2. GO' in mikroskop (SEM) ile elde edilen görüntüsü [35]

2.3. GO-Saf Su Nanoakışkanın Termofiziksel Özellikleri

Kütlesel olarak hazırlanan nanoakışkanın viskozite ölçümleri Pro koni ve plaka gerilim kontrollü reometre ile gerçekleştirilmiştir. Nanoakışkanın, ısıl iletkenlik ölçümü ise KD2 tip Pro ısıl iletkenlik ölçer cihazı kullanılarak yapılmıştır. Nanoakışkanın yoğunluk ölçümü için ise DMA 4200 tip yoğunlukölçer cihazı kullanılmıştır.

Özgül ısı, Pak ve Cho (1998) tarafından önerilen analitik modellerle belirlenmiştir.

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

Eş. 2' de nf, p ve bf sırasıyla nanoakışkan, parçacık ve taban akışkanını belirtmektedir. Konsantrasyonun çok düşük olması nedeniyle (%0,01) hesaplama sonucu nanoakışkan için elde edilen özgül ısı değeri ile suyun sahip olduğu değer birbirine çok yakın bulunduğundan, eşit olarak alınmıştır.

Nanoakışkan ve saf suyun deneysel olarak elde edilen termofiziksel özellikleri Tablo 1' de gösterilmektedir.

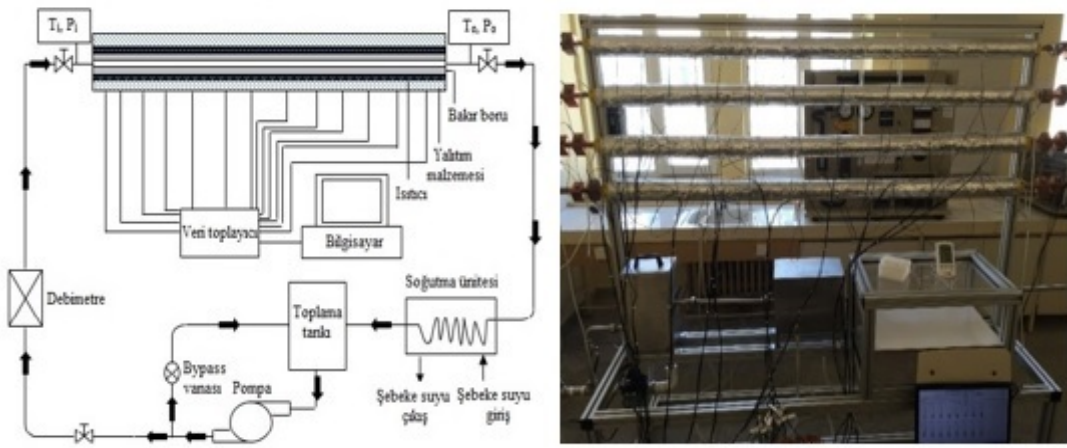
Tablo 1. 30 °C' de akışkanların deneysel termofiziksel özellikleri

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-saf su (%0,01)	0,6696	996,1	4178,4	1000x10 ⁻⁶

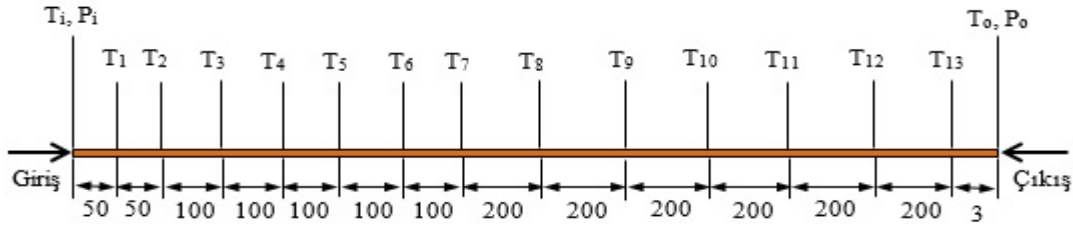
2.4. Deneysel Sistem ve Kalibrasyon Testi

GO-saf su nanoakışkanının taşınım ısı transfer katsayısı ve basınç düşüşü değerini ölçmek amacıyla oluşturulan ve temel olarak pompa, test bölümü, veri kaydetme bölümü, toplama tankı ve soğutma bölümünden oluşan deneysel sistem Şekil 3' de gösterilmektedir. Test bölümünde bulunan bakır malzemeden üretilen 1830 mm uzunluğundaki yatay boruların iç çapları 12 mm

ve 16 mm olup, boruların cidar kalınlıkları ise 2 mm' dir. Bununla birlikte, test kısmında boru yüzey sıcaklıklarını ölçmek amacıyla kalibre edilmiş 13 adet J tipi yüzey termokupulu Şekil 4' de gösterildiği gibi giriş kısmından itibaren mm cinsinden belirlenen uzaklıklarda yerleştirilmiştir. Ayrıca bakır borunun giriş ve çıkış kısımlarında akışkan sıcaklıklarını ölçmek amacıyla yine kalibre edilmiş J tipi daldırma tip termokupl kullanılmıştır. Yine, test bölümünün giriş ve çıkışında basınç farkını ölçmek için en yüksek 400 mbar' a kadar ölçüm yapabilen basınç sensörleri kullanılmıştır. Bakır boru, sabit ısı akısı sınır şartını sağlamak amacıyla ısı yükü 50 W/m olan nikel krom telden üretilmiş rezistans ısıtıcı ile sarılmıştır. Direnç telinin üzeri çevreye olan ısı kaybını azaltmak için ise ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılan 15 mm kalınlıklı cam yünü ile sarılarak yalıtılmıştır. Şebekeden alınan voltaj değeri, direnç kontrollü ayarlanabilir güç ünitesi ile kontrol edilerek, elde edilen watt değeri priz wattmetre ile ölçülmüştür. Sisteme sağlanan debi değeri, by-pass vanası ile ayarlanarak dijital debimetreden takip edilmiştir. Sistemdeki debi değeri, yüzey ve akışkan giriş-çıkış sıcaklıkları, giriş ve çıkıştaki basınç değerleri veri toplama sistemi ile her 5 sn' de bir okunup bilgisayara gönderilerek veriler kayıt altına alınmıştır. Test akışkanının (nanoakışkan ve saf su) sistemdeki dolaşımı sirkülasyon pompası ile sağlanmıştır. Sirkülasyon pompası kademeli olup, sıcaklığa karşı dayanıklıdır. Toplama tankı, paslanmaz çelikten üretilmiş ve 10 L' lik hacme sahiptir. 15 L kapasiteye sahip olan soğutma bölümü içerisinde yüzey alanını artırmak amacıyla spiral şekline getirilmiş 5,5 m boyunda ve 6 mm iç çaplı bakır boru bulunmaktadır. Nanoakışkan bu spiral şeklindeki bakır borudan geçerken, şebeke hattından gelen ve nanoakışkanı soğutmada kullanılan şebeke suyu soğutma bölümündeki giriş ve çıkış kısımlarından geçerek sistemi terk etmektedir. Böylece, deney düzeneğinin soğutma kısmından sonra sisteme giriş yapan nanoakışkanın istenilen sabit sıcaklıkta olması sağlanmaktadır.



Şekil 3. Deney sistemi



Şekil 4. Test bölümü ve termokupulların yerleşimi

Deney sisteminin kalibrasyon işlemi için seçilen çalışma akışkanı saf sudur. Tüm deneysel sistemin güvenilirlik seviyesini artırmak için sisteme üç tip kalibrasyon testi uygulanmıştır.

1) Isıtma devresi kapalıyken sistemdeki termokupullar tarafından ölçülen sıcaklık değerleri arasındaki farklılıklara bakılmış ve her bir termokuplun ölçtüğü sıcaklık değerinin birbirinden olan sapmasının %3' den daha az olduğu bulunmuştur. 2) Sistemin enerji dengesi açısından kararlılığına bakmak amacıyla borunun dış yüzeyinin adyabatik (yalıtılmış yani dış ortama (çevreye) ısı transferi olmadığı) olduğu varsayılarak sistem çalışılan ısı yüklerinde (250 W, 350 W) test edilmiştir. Bu test sonucunda, sisteme sağlanan ısı enerjisi ile sistemden alınan ısı enerjisi arasında ortalama olarak en fazla %8' lik bir sapma belirlenmiştir. 3) Deneysel sistem, Abreu vd., (2014)' nin de çalışmalarında kullandıkları gibi $Re \leq 3000$ ve sabit ısı akısı sınır şartı altında daimi akış için Shah denklemini (Shah, 1975) ve $Re > 3000$ için Gnielinski denklemini (Gnielinski, 1976) göz önüne alarak kalibre edilmiştir. Bu kalibrasyonlar, 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, nanoakışkanla deney yapılırken ilgili sıcaklık yerindeki ölçüm noktalarına uygulanmıştır. Shah ve Gnielinski denklemleri gözetilerek yapılan kalibrasyonlarda bu denklemlerden olan deneysel sapmanın yaklaşık %6 civarında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, deneylerde kararlı (sürekli rejim) yani zamanla sıcaklık değişiminin olmadığı koşullara ulaşılması için 25-35 dakikalık bir

zaman aralığı kadar beklenilmesi gerekmiştir. Bununla birlikte, deneyler sırasında zamanla sıcaklık değerlerinin değişimlerine bakıldığında değişimin %0,2' nin altında olduğu görülmüştür.

Zorlanmış taşınım ısı transferi için Shah denklemi

$$Nu(x) = 1,953 \left(Re Pr \frac{D_d}{x} \right) \quad \left(Re Pr \frac{D_d}{x} \geq 33,3 \right) \quad (3)$$

$$Nu(x) = 4,364 + \left(Re Pr \frac{D_d}{x} \right) \quad \left(Re Pr \frac{D_d}{x} < 33,3 \right)$$

Kalibrasyon işlemlerinde $Re \leq 3000$ için Eş. 3' deki Shah denklemi (Shah, 1975) kullanılırken, $Re > 3000$ için ise Eş. 4' deki Gnielinski denklemi (Gnielinski, 1976) dikkate alınmıştır.

12 mm iç çaplı boruda yalnızca 1,5 L/dak. debi değerinde ($Re=3352$) kalibrasyon işleminde kullanılan akışkan (saf su) için $Re > 3000$ iken, 16 mm iç çaplı boruda çalışılan her üç debi (0,9 L/dak., ($Re=1541$) 1,2 L/dak. ($Re=2174$) ve 1,5 L/dak. ($Re=2520$)) değeri için de $Re < 3000$ ' dir. Ayrıca, akışkan tipleri, boru iç çapları ve debi değerlerine göre Reynolds sayısı değerleri Tablo 2' de gösterilmektedir.

Tablo 2. Farklı debi, akışkan tipi ve boru çaplarına göre Re sayısı değerleri

Reynolds Sayısı (Re)						
Boru iç çapı (mm)	12			16		
	Debi (L/dak.)			Debi (L/dak.)		
Akışkan tipi	0,9	1,2	1,5	0,9	1,2	1,5
Saf su	2043	2692	3352	1541	2174	2520
%0,01 GO-saf su nanoakışkanı	1580	2111	2641	1185	1583	1981

Zorlanmış taşınım ısı transferi için Gnielinski denklemi

$$Nu(x) = \frac{f/8(Re-1000)Pr}{1+12,7\sqrt{f/8}(Pr^{2/3}-1)} \left[1 + \left(\frac{D_d}{x} \right)^{2/3} \right] \quad (4)$$

Eş. 4' deki f, Filonenko denklemiyle Eş. 5' de hesaplanan sürtünme faktörüdür.

$$f = \frac{1}{(1,82 \log Re - 1,64)^2} \quad (5)$$

2.5. Taşınım Isı Transferinin Hesaplanması

Test borusuna sağlanan ısı enerjisi

$$Q = VI \quad (6)$$

Eş. 6' daki V gerilim değerini, I ise akım değerini belirtmektedir.

Test borusuna sağlanan sabit ısı akısı ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$q'' = \frac{Q}{A_s} = \frac{Q}{\pi D_d L} \quad (7)$$

Eş. 7' de, A_s ısı transfer yüzey alanını, D_d ve L ise sırasıyla borunun dış çapı ve uzunluğudur.

Akışkana olan ısı transferi

$$Q = \dot{m}c_p(T_g - T_g) \quad (8)$$

Akışkanın kütleli debisi

$$\dot{m} = \rho u_m A_c \quad (9)$$

Eş. 8 ve 9' daki, ρ akışkanın yoğunluğu, u_m akışkanın ortalama hızı, c_p ise akışkanın özgül ısısı, A_c ise boru kesit alanı, T_g ve T_g ise sırasıyla akışkanın boruya giriş ve borudan çıkış sıcaklıklarıdır.

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

Akışkanın ısı taşınım katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir

$$h(x) = \frac{q''}{T_s(x) - T_m(x)} \quad (10)$$

Eş. 10' da x test bölümünün giriş kısmından itibaren olan uzaklığı, q'' ısı akısını, $T_s(x)$ ölçülen noktasal duvar yüzey sıcaklığını simgelerken, $T_m(x)$ ise kesit boyunca akışkanın ortalama noktasal ortalama sıcaklığı olup aşağıda belirtilen Eş. 11' den elde edilmektedir.

$$T_m(x) = T_{m,g} + \frac{q''P}{\dot{m}c_p} x \quad (11)$$

Bu eşitlikte, $T_{m,g}$ akışkanın ortalama giriş sıcaklığını, P borunun çevre uzunluğunu, \dot{m} akışkanın kütleli debisini, c_p ise akışkanın özgül ısısını belirtmektedir.

Eş. 10' dan elde edilen ısı taşınım katsayısı, Eş. 12'de akışkanın Nusselt sayısını bulmak için kullanılmaktadır.

$$Nu(x) = \frac{h(x)D_d}{k} \quad (12)$$

Burada D_i borunun iç çapı iken k akışkanın ısı iletkenliğini belirtmektedir.

Akışkana ait Re ve Pr sayıları için bağıntılar aşağıdaki eşitliklerde (Eş. 13 ve 14) gösterilmektedir.

$$Re = \frac{\rho u_m D_i}{\mu} \quad (13)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (14)$$

Eş. 13 ve 14' deki, μ akışkanın viskozitesidir.

Deneysel basınçölçer tarafından kaydedilen değerler, sürtünme faktörünün belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Deneysel sürtünme faktörü

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{D_i}\right) \left(\frac{\rho u_m^2}{2}\right)} \quad (15)$$

Burada ΔP boru giriş ve çıkışı arasındaki basınç farkıdır.

Yük kaybı

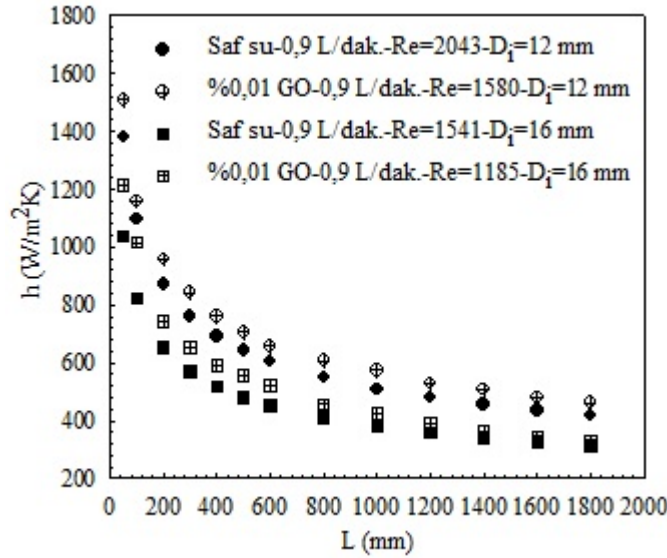
$$h_k = \frac{\Delta P}{\rho g} = f \frac{L}{D_i} \frac{u_m^2}{2g} \quad (16)$$

Eş. 16' daki g yerçekimi ivmesi olup değeri $9,81 \text{ m/s}^2$ dir.

2.6. Deneysel Sonuçlar

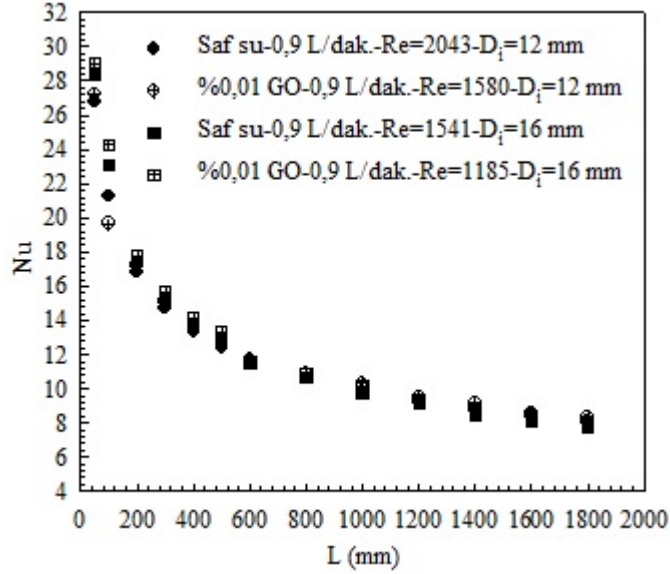
Şekil 5' de 250 W ısı yükü, 0,9 L/dak. debide taban akışkanı olan saf su ve %0,01 hacimsel konsantrasyona sahip GO-su nanoakışkanı için 12 mm ve 16 mm iç çaplı borular boyunca ısı taşınım katsayısının değişimi gösterilmektedir. Borulara uygulanan aynı ısı yükü değerinde (250 W), çapı daha büyük olan boruya etkiyen ısı akışı değeri daha düşük olmaktadır. Bu nedenle, 12 mm çaplı boru için boru boyunca noktasal ısı taşınım katsayısı değerleri daha yüksektir. Fakat, bununla birlikte Şekil 5' deki grafik incelendiğinde 12 mm iç çaplı boruda %0,01' lik konsantrasyondaki nanoakışkan için saf suya göre boru boyunca ortalama ısı taşınım katsayısı değerinde %10,14' lük artış elde edilirken, bu artış değeri 16 mm iç çaplı boruda %14,33 değerine ulaşmaktadır. Bu duruma, boru çapının artışına bağlı olarak ısı akışının azalması nedeniyle nanoakışkanın cidardan boru merkezine doğru sıcaklık değişiminin azalması sebep olmaktadır. Bunun sonucunda, nanoparçacıkların boru cidarı çevresinden borunun merkezine doğru hareketi azalmaktadır (Hedayati ve Domairry, 2016). Bunun yanı sıra, boru cidarı yakınında nanoparçacıkların hem kendi aralarında hem de boru cidarı ve taban akışkanı olan saf suyla yoğun etkileşimleri neticesinde (Ranjbarzadeh vd., 2017) 16 mm iç çaplı boruda aynı ısı yükünde daha fazla ısı taşınım katsayısı artışı elde edildiği düşünülmektedir. Ayrıca, literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde çalışmalardan birinde (Akhavan-Zanjani vd., 2016), grafen-su nanoakışkanı için %0,02' lik konsantrasyonda 4,2 mm iç çaplı boru için $Re=1850$ ' de ısı taşınım katsayısı değerinde %14,2'lik bir artış sağlanmıştır. Bu nedenle elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu oldukları ifade edilebilmektedir. Aynı zamanda, yapılan literatür araştırmasında, bu çalışmada kullanılmış olan %0,01 GO-su nanoakışkanı gibi oldukça düşük konsantrasyon değerlerine rastlanamamış ve birebir aynı boru çapı değerine de ulaşamadığından çalışmadaki konsantrasyon ve boru çapı değerlerine en yakın literatürde bulunan nanoakışkan sonuçları ile kıyaslama yapılabilmektedir.

12 mm ve 16 mm iç çaplı borularda 250 W ısı yükünde 0,9 L/dak. debide %0,01 hacimsel GO konsantrasyonlu nanoakışkan için boru boyunca Nusselt sayısı değerinin değişimi Şekil 6' da gösterilmektedir. Nusselt sayısının değişimi, tanımı gereği ($Nu=hD/k$) ısı taşınım katsayısı harici ısı iletkenlik katsayısı (k) ve boru çapına (D) da bağlıdır. Fakat, Nusselt sayısının artışında etkin değişken olan ısı iletkenlik katsayısının artışı Şekil 6' da da görülebildiği gibi değişim üzerinde oldukça fazla etkiye sahiptir. Bu nedenle, ısı taşınım katsayısı için elde edilen artış değerlerine Nusselt sayısı değerlerinde ulaşılacaktır. 12 mm iç çaplı boruda boru boyunca elde edilen ortalama artış değeri %1,22 iken, 16 mm iç çaplı boru için bu artış değerinin ancak %2,81' e çıkabildiği belirlenmiştir. Literatürde de benzer sonuçlara ulaşılmakta olup, Sadeghinezhad vd., (2015) tarafından yapılan çalışmada GNP ile hazırladıkları %0,025' lik hacimsel konsantrasyonlu nanoakışkanda Nusselt sayısı değerinde %3 lük artış elde edilirken, %0,02' lik hacimsel konsantrasyonda grafen-su nanoakışkanı ile Akhavan-Zanjani vd., (2015)' nin yaptıkları deneyde boru boyunca elde ettikleri artış değerini yaklaşık %2,1 civarında bulmuşlardır. Ayrıca, Mikkola vd., (2018) farklı konsantrasyonlarda SiO_2 ve Al_2O_3 ile Reynolds' in 2000-6000 arasında değişen değerlerinde yaptıkları deneylerde de suya göre benzer artış değerleri elde etmişlerdir.



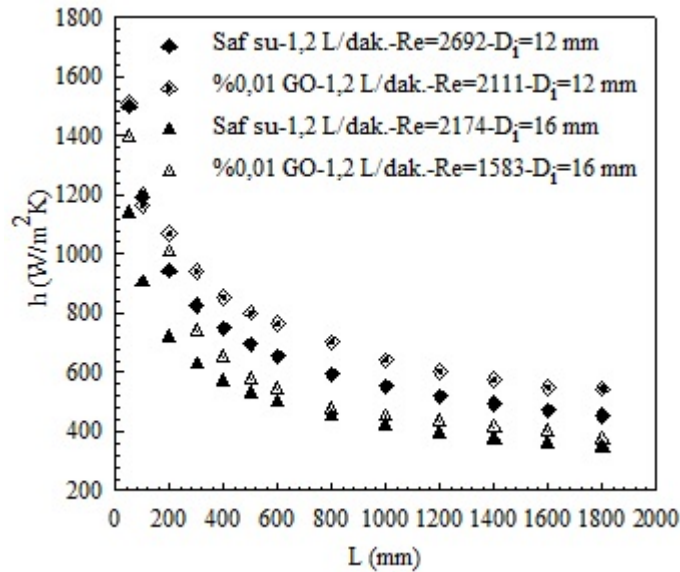
Şekil 5. Farklı iç çaplı borular için 250 W ısı yükü ve 0,9 L/dak. debide boru boyunca ısı taşınım katsayısının değişimi

Şekil 7' de 1,2 L/dak. debi ve 250 W ($2717,8 \text{ W/m}^2$, $2174,24 \text{ W/m}^2$ sırasıyla 12 mm ve 16 mm' lik borular için ısı akıları) ısı yükünde 12 mm ve 16 mm iç çapa sahip borular boyunca ısı taşınım katsayısı değerinin değişimi %0,01'lik hacimsel konsantrasyonda GO-su nanoakışkanı ve taban akışkanı için ayrı ayrı gösterilmektedir. Debinin artışı, Reynolds sayısını artırdığından nanoparçacıkların karışma etkisini de artırmaktadır. Bunun sonucunda, boru cidarı ve nanoakışkandaki nanoparçacıklar arası artan etkileşimler ile ısı transferi de artmaktadır. 12 mm iç çaplı boru için boru boyunca ısı taşınım katsayısının ortalama artış miktarı %10,74 iken bu değer 16 mm iç çaplı boru için %18,16' ya ulaşmaktadır. Mojarrad vd., (2014), 12,4 mm iç çapa sahip bir boruda $Re=2300$ ' de taban akışkanı su olan hacimsel %0,25' lik Al-su nanoakışkanı için ısı taşınım katsayısı değerinde %13' lük bir artış elde etmişlerdir. Nanoakışkanda kullanılan Al nanoparçacık konsantrasyonu göz önüne alındığında bu çalışmada kullanılan %0,01'lik hacimsel GO konsantrasyonu ile incelenen çalışmadaki çap ölçüsü olarak da birbirine yakın olan boru ile karşılaştırıldığında daha iyi bir ısı taşınım katsayısı artışı elde edildiği görülmektedir.

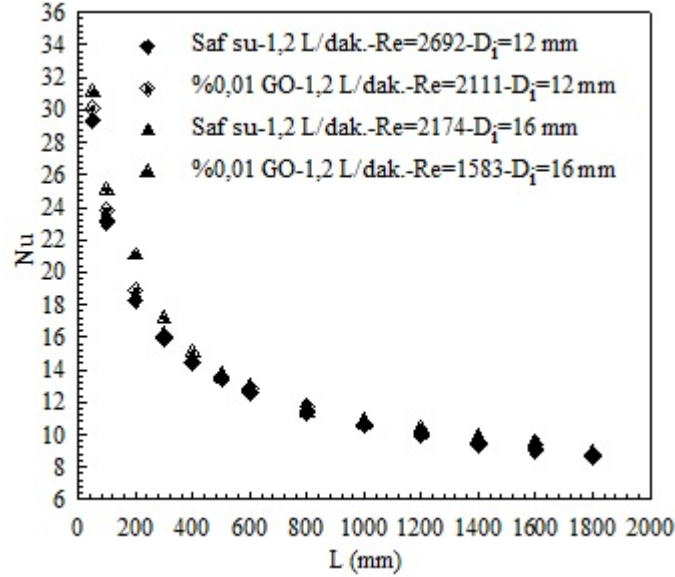


Şekil 6. Farklı iç çaplardaki borular için 250 W ısı yükü ve 0,9 L/dak. debide boru boyunca Nusselt sayısı değerinin değişimi

1,2 L/dak. debi ve sabit 250 W ısı yükünde farklı çaplardaki borular boyunca akan nanoakışkan ve taban akışkanı için elde edilen Nu sayısı değişimi Şekil 8' de verilmektedir. Nusselt sayısı, genel itibariyle artma eğiliminde olup ısı iletkenlik katsayısında elde edilen artış miktarı bu artışı sınırlamaktadır. 12 mm' lik boru için Nu sayısı değerinin ortalama artışı %1,94 iken bu artış değeri 16 mm' lik boruda %3,84' e ulaşmaktadır. Literatürde Sadeghinezhad vd., (2015), %0,025 konsantrasyonlu GNP-su ile hazırladıkları nanoakışkanda Nusselt sayısı değerinde ancak %3 lük bir artış elde edebilmişlerdir. Benzer sonuçlara diğer araştırmacılar (Akhavan-Zanjani vd., 2016, Mikkola vd., 2018) tarafından da ulaşılmaktadır. Isı iletkenlik katsayısının, Nusselt sayısı değerinin artışı üzerindeki bu sınırlayıcı etkisinden ancak daha yüksek debi (Reynolds sayısı) değerlerine çıkılınca uzaklaşmakta ve böylece daha belirgin Nu sayısı artış değerleri elde edilebilmektedir.

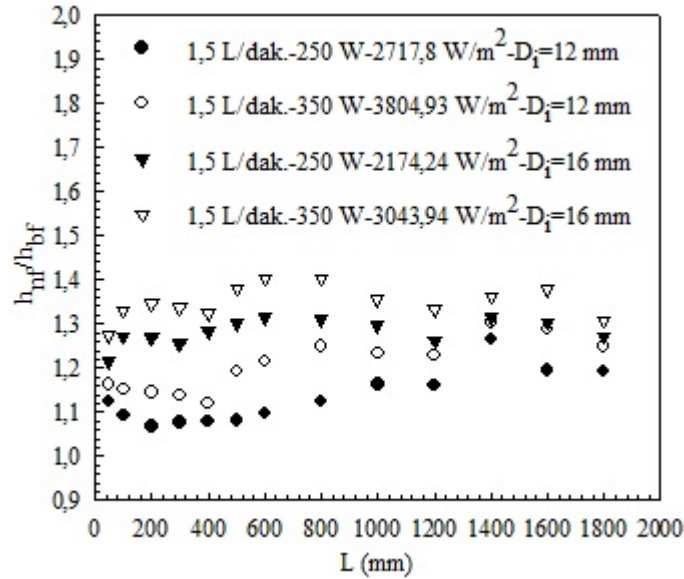


Şekil 7. Farklı iç çaplardaki borular için 250 W ısı yükü ve 1,2 L/dak. debide boru boyunca ısı taşınım katsayısı değerinin değişimi



Şekil 8. Farklı iç çaplardaki borular için 250 W ısı yükü ve 1,2 L/dak. debide boru boyunca Nusselt sayısı değerinin değişimi

Şekil 9’ da 1,5 L/dak. debi için 250 W ve 350 W ($3804,93 \text{ W/m}^2$ - $3043,94 \text{ W/m}^2$ sırasıyla 12 mm ve 16 mm’ lik borular için ısı akıları) lık ısı yüklerinde farklı çaplardaki borular için h_{nf}/h_{bf} ısı taşınım katsayısının artışı gösterilmektedir. Yüksek debi değerlerinde nanoparçacıkların boru içerisindeki dağılım etkileri ve düzensiz hareketleri yoğunlaşmakta ve böylece nanoparçacıkların hem kendi aralarında hem de boru cidarıyla olan çarpışmaları artmaktadır. Bunun sonucu olarak yüksek ısı transfer oranları elde edilmektedir. Bu nedenle, 1,5 L/dak.’ lık debide akışkan hızına bağlı olarak Reynolds sayısının artmasıyla 0,9 L/dak. ve 1,2 L/dak.’ lık debilere göre daha fazla ısı taşınım katsayısı artış oranı elde edilmektedir. 250 W ısı yükünde 12 mm iç çaplı boru boyunca ısı taşınım katsayısının ortalama artış oranı %13,17 iken bu değer 16 mm iç çaplı boru için %20,5’e çıkmaktadır. 350 W ısı yükünde ise artış oranı daha da artarak 12 mm ve 16 mm’ lik çaplar için sırasıyla %28,2 ve %34,88’ e ulaşmaktadır. 16 mm iç çapa sahip boru için elde edilen bu daha fazla artış miktarı, çapın artışıyla ısı akısının azalmasına bağlı olarak boru cidarında sıcaklık değişimi kaynaklı nanoparçacıkların boru merkezine doğru olan hareketlerinin azalması sebebiyledir. Literatürde farklı nanoparçacıklar ile bu çalışmada ulaşılan artış oranlarına yakın değerlere ulaşılmakla birlikte bunun için daha yüksek konsantrasyonlarda nanoakışkanlar kullanılmıştır. Bu çalışmalardan birinde Sundar vd., (2012), 14 mm iç çaplı boruda hacimsel %0,6 konsantrasyonda Fe_3O_4 -su nanoakışkanı kullanarak ısı taşınım katsayısında %30,96 artış elde etmişlerdir. Diğer bir çalışmada ise Mojarrad vd., (2014), 12,4 mm iç çaplı boruda hacimsel %1’ lik konsantrasyonda Al-su nanoakışkanında %24’ lük ısı taşınım katsayısı artış değerine ulaşmışlardır.

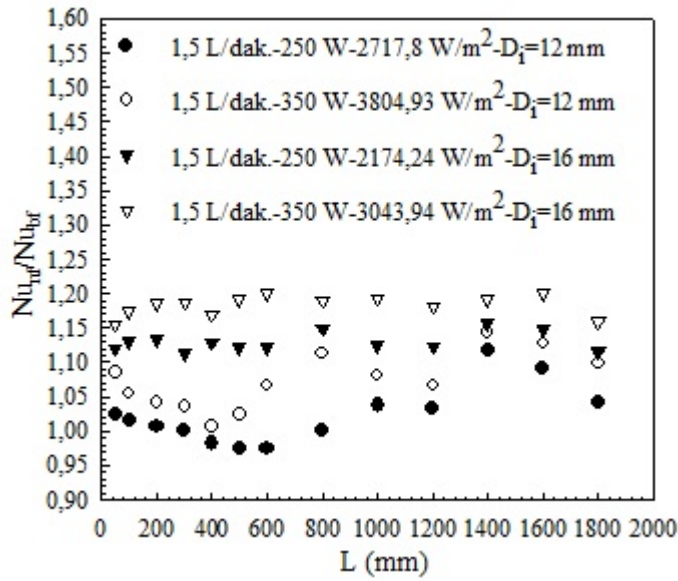


Şekil 9. Farklı iç çaplardaki borular için 250 W ve 350 W ısı yüklerinde ve 1,5 L/dak. debide boru boyunca h_{nf}/h_{bf} değişimi

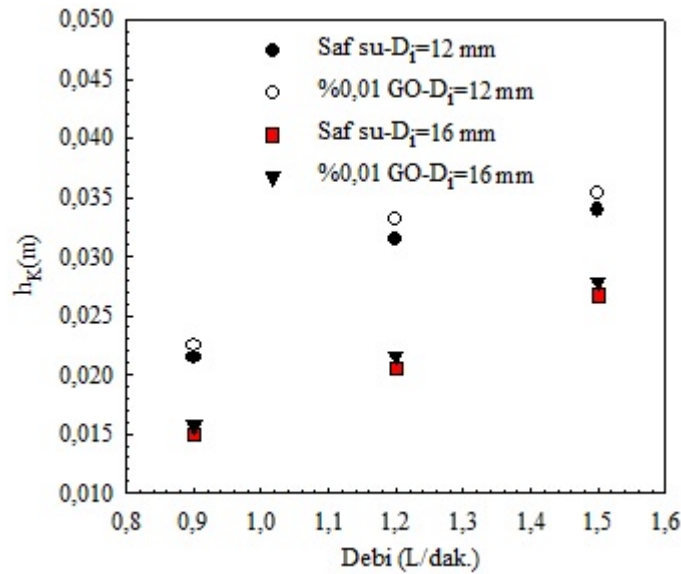
12 mm ve 16 mm iç çaplı borular için 1,5 L/dak.’ lık debide iki farklı ısı yükünde boru boyunca Nusselt sayısının artışı (Nu_{nf}/Nu_{bf}) Şekil 10’ da gösterilmektedir. Her iki çaptaki boru için Nusselt sayısı değeri genel itibariyle artmakla birlikte, 16 mm iç çaplı boruda daha fazla artış miktarı elde edilmektedir. 250 W ısı yükü için 12 mm çaplı boruda boru boyunca ortalama olarak %2,31’ lik artış miktarı elde edilirken, 16 mm için %12,98’ e ulaşmaktadır. Bununla birlikte, 350 W ısı yükünde 12 mm ve 16 mm çaplı

borular için sırasıyla taban akışkanına göre ortalama %7,24 ve %18,32' lik Nusselt sayısı değeri artış oranları elde edilmektedir. Benzer olarak, 10 mm iç çaplı boruda hacimsel %0,1' lik konsantrasyonda Al_2O_3 -Cu-su hibrit nanoakışkan ile Nu sayısı değerinde %13,56' lık bir artış elde edilebilmiştir (Suresh vd., 2012). Başka bir çalışmada ise 16 mm iç çaplı boruda %1' lik TiO_2 -su nanoakışkan ile Nu sayısı değerinde %26' lık artış elde edilirken (Azmi vd., 2014), 10 mm iç çaplı boruda hacimsel %0,025' lik GNP-su nanoakışkan kullanılarak Nusselt sayısı değerinde %3'lük artış sağlanmıştır (Sadeghinezhad vd., 2015).

12 mm ve 16 mm iç çaplı borularda hacimsel %0,01 GO-saf su konsantrasyonlu nanoakışkan ve saf su için deneysel olarak elde edilen basınç düşüşü değerleri, borulama sistemlerinin analizlerinde sıklıkla kullanılan ve borudaki sürtünmeden kaynaklanan kayıpları yenmek için akışkanın pompa tarafından çıkarılması gereken ilave yüksekliği temsil eden yük kaybı cinsinden (h_K) ifade edilmiş olup debi ile değişimi Şekil 11' de gösterilmektedir. Saf suya eklenen nanoparçacıklar nanoakışkanın ısıl iletkenliğinde ve buna bağlı olarak ısı taşınım katsayısında artış elde edilmesini sağlarken, akışkanın boru içindeki akışına engel oluşturdukları için basınç kaybını da artırmaktadırlar. 1,5 L/dak. debide % 0,01 GO hacimsel konsantrasyonundaki nanoakışkan için saf suya göre yük kaybındaki artış 12 mm iç çaplı boruda %4,42 iken, 16 mm çaplı boru için %4,1 olmaktadır. Isı taşınım katsayısı için elde edilen artış oranları göz önüne alındığında, nanoakışkanın yük kaybı değeri için ulaşılan bu değerlerin önemsenmeyecek kadar küçük oldukları düşünülmektedir. Bununla birlikte, Azari vd., (2013), 7,8 mm iç çaplı bir boruda hacimsel %0,05' lik TiO_2 -su konsantrasyonundaki nanoakışkanda basınç kaybı değerinde %15' lik artış elde ederlerken, Sadeghinezhad vd., (2015) ise 10 mm iç çaplı boru için hacimsel %0,1' lik GNR-su nanoakışkan için basınç kaybındaki artış miktarını %14,6 olarak belirlemişlerdir. Görüldüğü gibi konsantrasyonun artışı, yoğunluk ve viskozitenin artmasına sebep olarak basınç kaybı değerini de artırmaktadır.

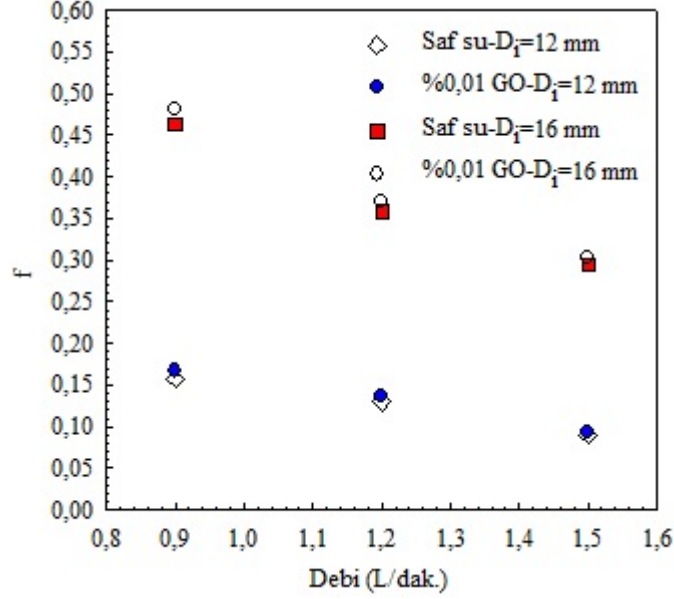


Şekil 10. Farklı iç çaplardaki borular için 250 W ve 350 W ısı yüklerinde ve 1,5 L/dak. debide boru boyunca Nu_{nf}/Nu_{bf} değişimi



Şekil 11. Farklı iç çaplardaki borular için basınç yük kaybının debi ile değişimi (250 W)

Şekil 12’ de 12 mm ve 16 mm çaplara sahip borular için saf su ve hacimsel %0,01 konsantrasyonlu GO-saf su nanoakışkanına ait deneysel sürtünme faktörünün (f) debi ile değişimi gösterilmektedir. Viskoz etkiler sonucu oluşan ve sürtünme kuvvetlerini belirten boyutsuz bir sayı olan f , 16 mm çaplı boruda 12 mm çaplı boruya göre daha yüksek değerlerde olmakla birlikte debinin artışıyla azalmaktadır. Bununla birlikte, nanoakışkan için f değerlerinin saf sudan daha yüksek olduğu Şekil 12’ den görülebilmektedir. 1,5 L/dak. debide 16 mm çaplı boruda f in saf suya göre artış oranı %2,71 iken 12 mm çaplı boru için ise %3,91 olmaktadır.



Şekil 12. Farklı iç çaplardaki borular için sürtünme faktörünün debi ile değişimi (250 W)

2.7. Sayısal Modelleme ve Sonuçları

Bu çalışmadaki yaklaşımda nanoakışkan, homojen katı-sıvı karışımı kararlı bir akışkan olarak düşünülebilir. Katı ve sıvı arasındaki yoğunluk farkı büyük olmasına rağmen bu boyuttaki küçük parçacıklar için yerçekimi nedeniyle kayma hızları katı ve sıvı için sırasıyla 10^{-8} ve 10^{-6} mertebesinde ve katı nanoparçacık ve sıvı arasında 100 ns olan sabit ısı transfer süresi nedeniyle taban akışkanıyla denge halinde olduğu düşünülebilir (Buongiorno, 2006). Bu çalışmada kullanılan ortalama akışkan hızının 0.2-0.59 m/s arasında olduğu dikkate alındığında ve nanoparçacık ve taban akışkanı hızlarının aynı olduğu kabul edildiğinde uygulanabilen bir yöntem olan homojen akış modelinde iki fazlı sistemler tek fazlı olarak değerlendirilebilmekte ve ikinci faz karışımın fiziksel özelliklerini kullanarak hesaba katıldığından mantıklı bir uygulama olmaktadır (Awad ve Muzychka, 2008).

Daha önce yapılan birçok çalışmada, homojen akış modeli iki fazlı modelle kıyaslandığında nanoakışkanlara ait ısı taşınım katsayısı değerleri daha düşük hesaplanmasına karşın (Bianco vd., 2009, Ebrahimiya-Bajestan vd., 2011) bu sayısal çalışmaların sonuçları deneysel çalışmalarinkilerle karşılaştırıldığında nanoakışkanların ısı taşınım katsayılarını $\pm\%10$ ’ luk bir sapma değeriyle termodinamik özelliklerini temel alarak elde edilebileceğini kanıtlayan önemli bulgular bulunmuştur (Rea vd., 2009, Escher vd., 2011). Bu çalışmada da 12 mm ve 16 mm olmak üzere farklı çaplı borular için sayısal sonuçların deneysel sonuçlardan sapma miktarları sırasıyla %2,2 ve %4 olmaktadır. Homojen tek fazlı akış modeli için sayısal çalışmalarda nanoakışkanların yoğunluk, viskozite, ısıl iletkenlik gibi termodinamik özellik değerleri nanoakışkanın su gibi tek fazlı akışkan davranışı gösterdiği kabul edilerek veri girişi yapılmaktadır. Oysaki, nanoakışkanın durgun halinde de akışkan içindeki nanoparçacıkların literatürde de sık kullanılan ve Brownian hareketi olarak adlandırılan kendi içlerinde rastgele hareketleri mevcut olup, bu hareketler de akışkan içinde mikro taşınım hareketlerine sebep olmaktadır. Ayrıca, sayısal hesaplamalarda girişi yapılan termodinamik özellik değerleri sabit sıcaklıktaki değerler olup, akışkanın ısıtıldığı sistemlerde bu değerler de sıcaklıkla değişmektedir. Bunlara bağlı olarak sayısal hesaplamalarla deneysel hesaplamalar arasında sapmalar bulunmaktadır. Ancak, bu çalışmadaki %0,01 gibi oldukça düşük konsantrasyonlarda çalışıldığında deneysel sonuçlardan olan sapma miktarı azaldığından nanoakışkanın homojen tek fazlı akışkan olarak kabul edilmesinin uygun olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada homojen akış modeli kullanılmıştır.

Çözümler, üç boyutlu hesaplama alanı için yapılmıştır. Çalışmanın sayısal kısmında kullanılan sonlu hacimler yöntemi, öncelikle çözülecek geometriyi kısımlara ayırarak bu kısımların her biri için çözüm yapma ve daha sonra elde edilen bu çözümleri birleştirerek problemin genel çözümünü bulma temellidir. Sonlu hacimler yönteminde korunum denklemlerinin sayısal olarak çözümlenebilecek cebirsel denklem sistemlerine dönüştürülmesinde kontrol hacmi temelli bir yöntem kullanılır. Bu yöntem, 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 12 mm iç çaplı boru için sırasıyla Şekil 13a’ ve 13b’ de gösterilmektedir. Şekil 14’ de farklı çaplı borular için boru yüzey sıcaklığının debi ile değişimine göre mesh sayısının bağımsızlık testinin sonuçları verilmektedir. 12 mm çaplı boruda 689103, 700500 ve 710202 adet mesh sayısı uygulanmışken, 16 mm çaplı boruda uygulanan

mesh sayıları ise 730052, 740000 ve 750000' dir. Şekil 14' deki grafikten de görülebildiği gibi 12 mm ve 16 mm iç çaplı borular için sırasıyla 700500 ve 740000 adet meshten sonra mesh sayısının 710202 ve 750000 değerlerine artırılmasının sıcaklık değişimi üzerindeki etkisi oldukça azalmakta ve bu etki her iki boru çapı için %0,1' den daha az olmaktadır. Bu nedenle, 12 mm ve 16 mm iç çap ve 1830 mm uzunluktaki hesaplama alanları için sırasıyla 700500 ve 740000 adet mesh sayısının yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

Sınır şartları, giriş, çıkış ve boru dış yüzeyinde sırasıyla giriş hızı ve sıcaklığı, çıkış ve sabit ısı akısıdır. Geometri boyunca akış ve ısı transferinin çözümlenmesi, zamandan bağımsız olarak süreklilik, momentum ve enerjinin korunumu kanunlarından elde edilen kısmi türevli denklemlerin CFD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) paket programı (ANSYS-FLUENT) ile çözümlenmesi esasına dayanır ve şu şekilde yazılabilir (Izadi vd., 2009, Fluent, 2003).

Süreklilik denklemi

$$\nabla(u_m) = 0 \quad (17)$$

Momentum denklemi

$$\nabla \rho(u_m u_m) = -\nabla P + \nabla \mu (\nabla u_m) \quad (18)$$

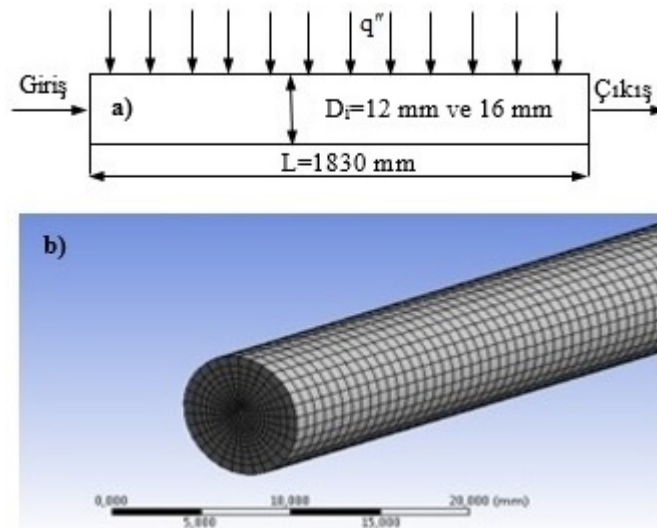
Enerji denklemi

$$\nabla \rho c_p (u_m T) = \nabla k (\nabla T) \quad (19)$$

Bu çalışmada tek fazlı yaklaşım uygulandığından sayısal çözümlemede bu denklemler nanoakışkan için de kullanılabilir.

Çalışma şu kabuller altında yapılmıştır:

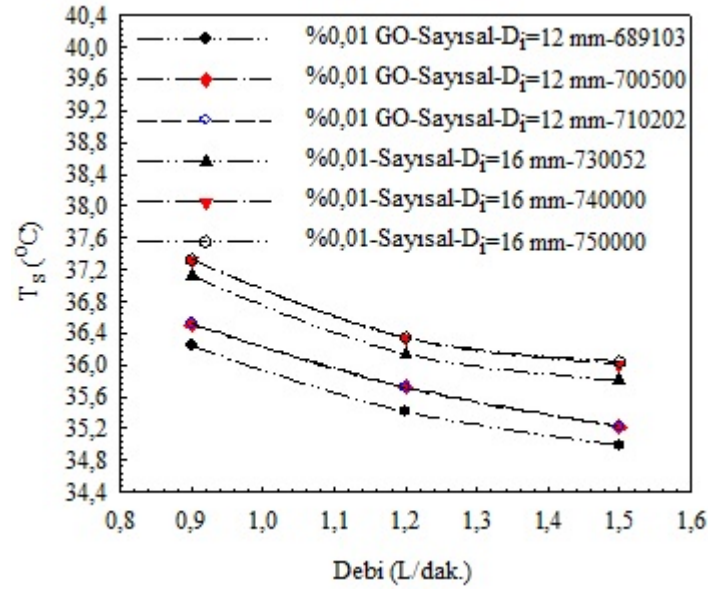
- Borunun girişinde bütün fiziksel özellikler (hız, sıcaklık ve nanoparçacık konsantrasyonu) sabit ve üniyormdur.
- Kullanılan akışkan sıkıştırılmazdır.
- Boru duvarında kaymama koşulu geçerlidir.
- Boru boyunca sabit ve üniyorm bir ısı akısı vardır.
- Boru çıkışında önemli fiziksel özelliklerin (hız, sıcaklık ve konsantrasyon) aksenal değişimleri sıfıra eşittir.



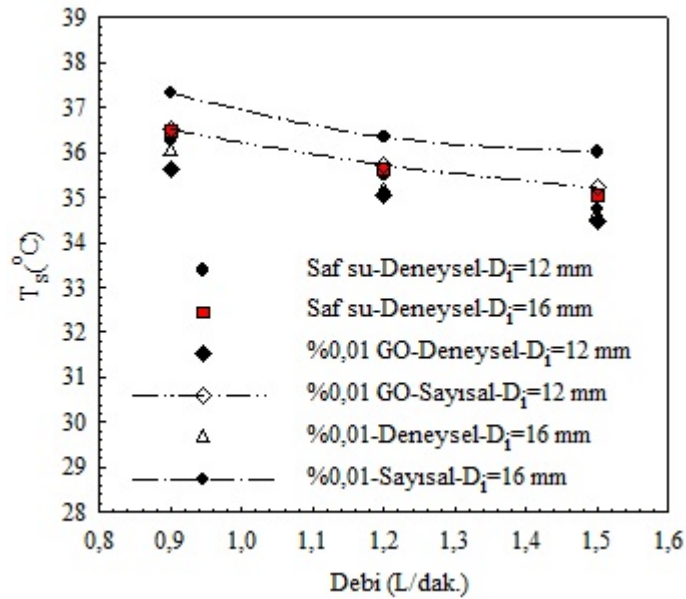
Şekil 13. a) Hesaplama alanı b) Mesh yapısı

Şekil 15’ de farklı çaplardaki boruların yüzey sıcaklıklarının deneysel ve sayısal olarak debi ile değişimi gösterilmektedir. 12 mm çap için 1,5 L/dak. debide %0,01’ lik GO konsantrasyonunda deneysel ve sayısal sonuçlar arasında yaklaşık %2,2’ lik bir fark olduğu gözlenirken, 16 mm çaplı boru için aynı koşullarda bu fark %4’ e ulaşmaktadır. 16 mm çaplı boruda elde edilen bu farkın deneyler sırasındaki ısı kayıplarından olduğu düşünülmektedir. Debi değeri arttıkça akışkana olan ısı transferi arttığından boru boyunca ortalama sıcaklık değerleri azalırken, nanoakışkan için saf suya göre daha düşük yüzey sıcaklık değerleri elde edilmektedir. Ayrıca, nanoakışkanın çalışılan konsantrasyonu için (%0,01 GO) sayısal çalışmada homojen karışım tek fazlı akışkan olarak modellemek sonuçlarda nispeten fazla bir farka yol açmadığından kabul edilebilir olduğu düşünülmektedir.

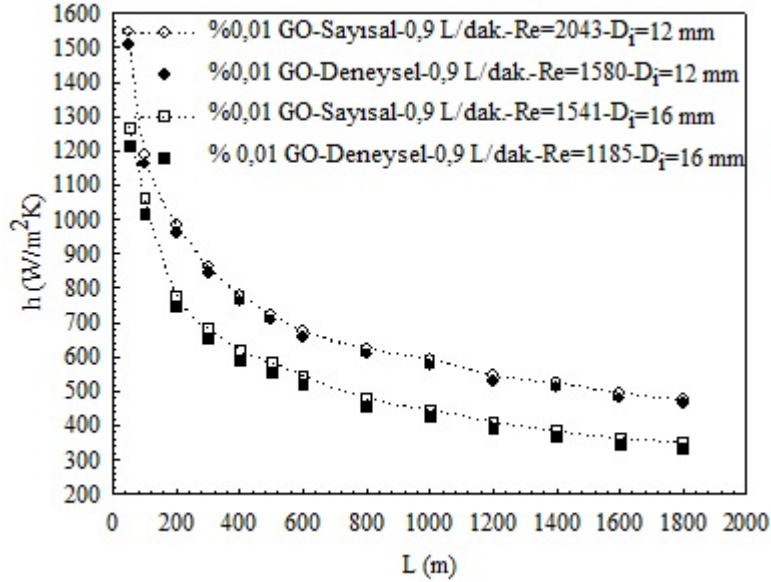
12 mm ve 16 mm iç çaplı borular için 0,9 L/dak. debi ve 250 W ısı yükünde %0,01 GO hacimsel konsantrasyonundaki nanoakışkan için boru boyunca sayısal ve deneysel olarak ısı taşınım katsayısının değişimi Şekil 16’ da sunulmaktadır. Boru yüzeyi ve nanoakışkan arasındaki sıcaklık farkının azalmasına bağlı olarak boru boyunca ısı taşınım katsayısı değeri azalırken, 12 mm iç çaplı boruda deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki sapma miktarının ortalama olarak yaklaşık %2,4 olduğu bulunurken, 16 mm iç çaplı boru için bu değer yaklaşık olarak %4,45 olmaktadır. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasında elde edilen bu sapma değerlerinin deneyler sırasında meydana gelen ısı kayıpları ve nanoakışkan içindeki nanoparçacıkların hareketlerine bağlı olarak boru boyunca elde edilen sıcaklık değişimlerinden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 14. Mesh sayısına göre boru yüzey sıcaklıklarının debi ile değişimi (250 W)



Şekil 15. Deneysel ve sayısal boru yüzey sıcaklıklarının debi ile değişimi (250 W)



Şekil 16. Deneysel ve sayısal olarak ısı taşınım katsayısının boru boyunca değişimi (250 W)

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada, %0,01 hacimsel konsantrasyonlu GO-saf su nanoakışkanının taşınım ısı transferi ve basınç düşüşü (yük kaybı) sabit duvar ısı akılı 12 mm ve 16 mm iç çaplı dairesel bakır borular boyunca deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, ayrıca sayısal olarak da inceleme yapılmış olup hesaplama sonuçları konsantrasyonun çok düşük olması nedeniyle tek fazlı akışkan kabulü yapılarak momentum ve enerji denkleminin sonlu hacim yöntemi olan ANSYS-FLUENT programı kullanılarak çözülmesiyle üç boyutlu zamandan bağımsız olarak elde edilmiştir.

Farklı çaplardaki borular boyunca taban akışkanı olan saf suyun ve nanoakışkanın ısı taşınım katsayısı ve basınç düşüşü deneysel olarak ölçülmüştür. Borulara uygulanan sabit ısı yükleri, çapın artışına bağlı olarak farklı ısı akısı değerleri almakta ve böylece hem boru içindeki akışkanın sıcaklık değişimine hem de nanoparçacıkların hareketlerine etki etmektedir. 16 mm iç çaplı boruda çalışılan tüm debilerde (0,9 L/dak., 1,2 L/dak. ve 1,5 L/dak.) ve ısı yüklerinde (250 W ve 350 W), 12 mm iç çaplı boruya göre nanoparçacıkların boru merkezine olan hareketlerinin azalması ve boru cidarına yakın nanoparçacıkların birbirleriyle, boru cidarı ve taban akışkanı molekülleriyle olan hareketlerinin yoğunlaşması nedeniyle ısı taşınım katsayısı ve Nusselt sayısı değerlerinde daha yüksek artışlar elde edilmesini sağladığı sonucuna varılmaktadır. 0,9 L/dak. debide, 250 W ısı yükünde 12 mm iç çaplı boru boyunca taban akışkanı olan saf suya göre ısı taşınım katsayısının ortalama artışı %10,14 iken 16 mm çaplı boruda bu artış değeri %14,33'e çıkmaktadır. Nusselt sayısı değerinde ise nanoakışkanın ısı iletkenliğindeki artış nedeniyle daha az artış oranları elde edildiği görülmektedir. Bu artışlar, 12 mm ve 16 mm iç çaplı borular için sırasıyla %1,22 ve %2,81 olmaktadır. Debinin (Reynolds sayısı) artışıyla nanoparçacıkların karmaşık hareketleri artmakta ve daha fazla h ve Nu sayısı artış değerleri elde edilmektedir. Bu artış miktarı, 1,5 L/dak. debi ve 350 W ısı yükünde 16 mm çaplı boru için ısı taşınım katsayısı değerinde %34,88 ve Nu sayısı değerinde ise %18,32'ye ulaşmaktadır.

Nanoakışkanların ısı transferi uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılabilmesi için ısı taşınım katsayısı artışı yanında yük kaybı artışı değerleri de göz önünde bulundurularak birlikte değerlendirilmelidir. Saf suya eklenen nanoparçacıklar, nanoakışkanın yük kaybını artırırken, elde edilen ısı iletkenlik artışı (taban akışkanına göre %8,49' luk artış) ve buna bağlı olarak ulaşılan ısı taşınım katsayısı artış değeri yük kaybının artışına göre daha fazla olduğu için (12 mm ve 16 mm iç çaplı borular için 1,5 L/dak. debide yük kaybı artışı sırasıyla taban akışkanına göre %4,42 ve %4,1) çalışmada değerlendirilen nanoakışkandan ısı transferi uygulamalarında yararlanılabileceği söylenebilir.

Ayrıca, sayısal çalışmadan elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışmanın sonuçları karşılaştırıldığında %0,01'lik hacimsel GO konsantrasyonunda 16 mm iç çaplı boru ve 1,5 L/dak.'lık debide boru yüzey sıcaklığında ulaşılan %4' lük en yüksek sapma ve yine aynı çaplı boruda 0,9 L/dak. debide boru boyunca ısı taşınım katsayısında elde edilen %4,45' lik sapma değeri ile nanoakışkanın homojen karışımı tek fazlı akışkan olarak kabul edilebileceği düşünülmektedir.

Yukarıda da açıklandığı gibi çalışılan en düşük debi olan 0,9 L/dak.' da ve 250 W ısı yükünde dahi 12 mm iç çaplı boru boyunca saf suya göre ısı taşınım katsayısının ortalama artışı %10,14 iken 16 mm çaplı boruda bu artış değeri %14,33'e çıkmaktadır. Bu değerler yanında, aynı zamanda 12 mm ve 16 mm çaplı borular için 0,9 L/dak. debi ve 250 W ısı yükünde %0,01' lik hacimsel GO konsantrasyonlu nanoakışkanlarda ısı taşınım katsayısı değeri için deneysel ve sayısal sonuçlar arasında sırasıyla yaklaşık %2,4 ve %4,45' lik farklar bulunması %0,01 gibi çok düşük hacimsel konsantrasyonda (4 L saf suya 0,4 g GO nanoparçacığı) GO-su nanoakışkanın geleneksel ısı transferi akışkanlarına iyi bir alternatif olarak kullanılabilceğini gösterirken; ısı transferi uygulamalarında kullanılan ısı akısının, debinin ve özellikle de boru çapının nanoparçacıkların boru kesitindeki hareketlerini doğrudan etkilediğinin ve bu konuya özel önem verilmesi gerektiğinin bir kanıtı olarak görülebilir.

Bunun yanı sıra, gelecek çalışmalarda nanoakışkanların 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 de olabildiğince zarar vermemesine ayrıca dikkat edilmelidir.

SİMGELER

A	Alan (m^2)
c_p	Özgül ısı ($J/kg K$)
D	Boru çapı (m)
f	Sürtünme faktörü
g	Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
h	Isı taşınım katsayısı (W/m^2K)
h_K	Yük kaybı (m)
I	Akım (Amper)
k	Isıl iletkenlik katsayısı (W/mK)
L	Boru uzunluğu (m)
\dot{m}	Kütleli debi (kg/s)
Nu	Nusselt sayısı
P	Borunun çevre uzunluğu (m)
Pr	Prandtl sayısı
q	Isı akısı (W/m^2)
Q	Isı yükü (W)
Re	Reynolds sayısı
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
V	Gerilim (Volt)
u	Hız (m/s)
x	Borunun girişinden olan noktasal uzaklık (m)
ΔP	Basınç farkı (Pa)
φ	Konsantrasyon (%)
μ	Viskozite (kg/m^2s)

Alt indis

bf	Taban akışkanı
c	Kesit
ç	Çıkış
d	Dış
g	Giriş
i	İç
nf	Nanoakışkan
p	Parçacık
m	Ortalama
m,g	Ortalama giriş
s	Yüzey

TEŞEKKÜR

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

REFERANSLAR

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*, 50(1), 65-74.

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, *Journal of Dispersion Science and Technology*, 35(9), 1230-1240.

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, *International Journal of Thermal Science*, 100, 316-323.

- Anvari, A.R., Javaherdeh, K., Emami-Meibodi, M. (2019). Investigation of heat transfer and pressure drop of non-newtonian nanofluid performance through micro channels heat exchanger (MCHE) in cross-flow configuration. *Journal of Nanofluids*, 8(3), 631-639.
- Azari, A., Kalbasi, M., Derakhshandeh, M., Rahimi, M. (2013). An experimental study on nanofluids convective heat transfer through a straight tube under constant heat flux, *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 21, 1082-1088.
- Azmi, V. H., Sharma, K. V., Sarma, P. K., Mamat, R., Anuar, S. (2014). Comparison of convective heat transfer coefficient and friction factor of TiO₂ nanofluid flow in a tube with twisted tape inserts, *International Journal of Thermal Science*, 81, 84-93.
- Azmi, V. H., Sharma, K. V., Sarma, P. K., Mamat, R., Najafi, G. (2014). Heat transfer and friction factor of water based TiO₂ and SiO₂ nanofluids under turbulent flow in a tube, *International Communications Heat and Mass Transfer*, 59, 30-38.
- Awad, M. M., Muzychka, Y. S. (2008). Effective property models for homogeneous two phase flows, *Experimental Thermal Fluid Science*, 33(1), 106-113.
- Baby, T. T., Ramapraphu, S. (2011). Enhanced convective heat transfer using graphene dispersed nanofluids, *Nanoscale Research Letters*, 6(289), 1-9.
- Balandin, A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F., Lau, C. N. (2008). Superior thermal conductivity of single-layer graphene, *Nano Letters*, 8(3), 902-907.
- Bianco, V., Chiacchio, F., Manca, O., Nardini, S. (2009). Numerical investigation of nanofluids forced convection in circular tubes, *Applied Thermal Engineering*, 29(17-18), 3632-3642.
- Buongiorno, J. (2006). Convective transport in nanofluid, *Journal of Heat Transfer*, 128(3), 240-250.
- Celeta, G. P., D'Annibale, F., Mariani, A., Saraceno, L., D'Amato, R., Bubbico, R. (2013). Heat transfer in water based SiC and TiO₂ nanofluids, *Heat Transfer Engineering*, 34(13), 1060-1072.
- Chen, H., Yang, W., He, Y., Ding, Y., Zhang, L., Tan, C., Lapkin, A.A., Bavykin, D.V. (2008). Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of titanate nanotubes (nanofluids). *Powder Technology*, 183(1), 63-72.
- Ding, Y., Alias, H., Wen, D., Williams, R. A. (2006). Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 240-250.
- 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*, 78 (6), 718-720.
- 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, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(19-20), 4376-4388.
- Eravcu, F. (2016). Karbon Tabanlı Nanomalzemelerin Sentezi, Karakterizasyonu, Reolojisi, Isıl İletkenliği ve Kararlılığı, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, 2016.
- Escher, W., Brunschweiler, T., Shalkevich, N., Shalkevich, A., Burgi, T., Michel, B., Oulrikakos, D. (2011). On the cooling of electronics with nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, 133(5), 1-11.
- FLUENT User's Guide, (2003). Fluent Inc, Lebanon, NH.
- 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. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38 (16), 2945-2958.
- Ghozatloo, A., Rashidi, A., Niassar, M. S. (2014). Convective heat transfer enhancement of graphene nanofluids in shell and tube heat exchanger, *Experimental Thermal Fluid Science*, 53, 136-141.

- Ghozatloo, A., Rashidi, A., Shariaty-Niassar, M. (2014). Convective heat transfer enhancement of graphene nanofluids in shell and tube heat exchanger, *Experimental Thermal Fluid Science*, 53, 136-141.
- Gnielinski, V. (1976). New equations for heat transfer in turbulent pipe and channel flow, *International Chemical Engineering*, 16(2), 359-368.
- Hajjar, Z., Rashidi, A., Ghozatloo, A. (2014). Enhanced thermal conductivities of graphene oxide nanofluids, *International Communication Heat and Mass Transfer*, 57, 128-131.
- Hedayati, F., Domairry, G. (2016). Nanoparticle migration effects on fully developed forced convection of TiO₂-water nanofluid in a parallel plate microchannel, *Particuology*, 24, 96-107.
- 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*, 88, 1-3.
- 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, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 2651-2656.
- Izadi, M., Behzadmehr, A., Jalali-Vahid, D. (2009). Numerical study of developing laminar forced convection of a nanofluid in an annulus, *International Journal of Thermal Science*, 48, 2119-2129.
- Karabulut, K., Yapıcı, K., Buyruk, E., Kılınc, F. (2015). Karbon nanotüp içeren nanoakışkanın ısı transferi artışı ve basınç düşüşü performansının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi. 20. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 96-105, 02-5 Eylül, Balıkesir.
- Karabulut, K. (2015). Isı Değiştiricilerde Isı Aktarımının Nanoakışkanlar Kullanılarak Arttırılması, Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas.
- Karabulut, K., Buyruk, E., Kılınc, F. (2018). Grafen oksit nanoparçacıkları içeren nanoakışkanın taşınım ısı transferi ve basınç düşüşü artışı üzerindeki etkisinin düz bir boruda deneysel olarak araştırılması. *Mühendis ve Makina*, 59(690), 45-67.
- Kebllinski, P., Prasher, R., Eapen, J. (2008). Thermal conductance of nanofluid: is the controversy over?, *Journal of Nanoparticle Research*, 10(7), 1089-1097.
- 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, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50 (133), 4105- 4116.
- Kwark, S. M., Kumar, R., Moreno, G., Yoo, J., You, S. M. (2010). Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53 (5-6), 972-981.
- Maxwell, J.C. (1904). *A treatise on electricity and magnetism* (2nd ed.). Oxford Clarendon Press, Cambridge, England.
- Mikkola, V., Puupponen, S., Granbohm, H., Saari, K., Ala-Nissira, T., Seppela, A. (2018). Influence of particle properties on convective heat transfer of nanofluids, *International Journal of Thermal Science*, 124, 187-195.
- Moghari, R. M., Talebi, F., Rafee, R., Shariat, M. (2015). Numerical study of pressure drop and thermal characteristics of Al₂O₃-water nanofluid flow in horizontal annulus, *Heat Transfer Engineering*, 36(2), 166-177.
- Mojarrad, M. S., Keshavarz, A., Ziabasharhagh, M., Raznahan, M. M. (2014). Experimental investigation on heat transfer enhancement of alumina/water and alumina/water-ethylene glycol nanofluids in thermally developing laminar flow, *Experimental Thermal Fluid Science*, 53, 111-118.
- 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*, 438, 197-200.
- Pak, B. C., Cho, Y. I. (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer*, 11(2), 151-170.

- Ranjbarzadeh, R., Karimipour, A., Afrand, M., Homayoon, A., Isfahani, M., Shirmeshan, A. (2017). Empirical analysis of heat and friction factor of water/graphene oxide nanofluid flow in turbulent regime through an isothermal pipe, *Applied Thermal Engineering*, 126, 538-547.
- 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. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(7-8), 2042-2048.
- Shanbedi, M., Heris, S. Z., Baniadam, M., Amiri, A., Maghrebi, M. (2012). Investigation of heat transfer characterization of edamcwt/di-water nanofluid in a two phase closed thermosyphon, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(3), 1423-1428.
- Shah, R. K. (1975). Thermal entry length solutions for the circular tube and parallel plates, 3rd National Heat Mass Transfer Conference, 11-13 December, Bombay-India.
- Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S., Seal, S. (2011). Graphene based materials: past, present and future, *Progress In Materials Science*, 56, 1178-1271.
- Sundar, L. S., Kumar, N. T. R., Naik, M. T. (2012). Effect of full length twisted tape inserts on heat transfer and friction factor enhancement with Fe₃O₄ magnetic nanofluid inside a plain tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 2761-2768.
- Suresh, S., Venkitaraj, K. P., Selvakumar, P., Chandrasekar, M. (2012). Effect of Al₂O₃-Cu/water hybrid nanofluid in heat transfer, *Experimental Thermal Fluid Science*, 38, 54-60.
- Sadeghinezhad, E., Togun, H., Mehrali, M., Nejad, P. S., Latibari, S. T., Abdulrazzaq, T., Kazi, S. N., Metselaar, H. S. C. (2015). An experimental and numerical investigation of heat transfer enhancement for graphene nanoplatelets nanofluids in turbulent flow conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 81, 41-51.
- Sadri, R., Ahmadi, G., Togun, H., Dahari, M., Kazi, S. N., Sadeghinezhad, E., Zubir, N. (2014). An experimental study on thermal conductivity and viscosity of nanofluids containing carbon nanotubes, *Nanoscale Research Letters*, 9(1), 151.
- Trisaksri, V., & Wongwises, S. (2007). Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(3), 512-523.
- Turgut, A., Saglanmak, S., Doganay, S. (2016). Experimental investigation on thermal conductivity and viscosity of nanofluids: particle size effect, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (1), 95-103.
- Wang, J., Zhu, J., Zhang, X., Chen, Y. (2013). Heat transfer and pressure drop of nanofluids containing carbon nanotubes in laminar flows, *Experimental Thermal Fluid Science*, 44, 716-721.
- Wang, X., Xu, X., Choi, S. U. S. (1999). Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 13, 474-480.
- William, S., Hummers, J. R., Richard, E. O. (1958). Preparation of graphitic oxide, *Journal of the American Chemical Society*, 80(6), 1339.
- Xie, H., Lee, H., Youn, W., Choi, M. (2003). Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities, *Journal of Applied Physics*, 94(8), 4967-4971.
- Yu, W., Xie, H., Wang, X. (2011). Significant thermal conductivity enhancement for nanofluids containing graphene nanosheets, *Physics Letters A*, 375, 1323-1328.
- 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, *Scientific World Journal*, 1-9, Article ID 3695939.
- Zheng, R., Gao, J., Wang, J., Feng, S. P., Ohtani, H., Wang, J., Chen, G. (2011). Thermal percolation in stable graphite suspensions, *Nano Letters*, 9(1), 188-192.