

## Çoklu Mikrokanallarda Ferroakışkanların Isı Transferi ve Basınç Düşümü Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi

Eyüphan MANAY<sup>1</sup>

**ÖZET:** Bu çalışmada su bazlı ferroakışkanların sabit ısı akısı sınır şartlarında dikdörtgen kesite sahip çoklu mikrokanallarda ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri araştırılmıştır.  $Fe_2O_3$ , NiO nano partiküllerinin temel akışkan olarak seçilen saf su içerisinde iki farklı hacimsel oranda ( $\phi=0.0025$  ve  $0.005$ ) katılmasıyla ferroakışkanlar hazırlanmış ve Reynolds sayısı, partikül hacimsel oran gibi parametrelerin ısı transferi ve basınç düşümüne etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Laminar akış ve kararlı hal şartlarında, ısı transferi artan partikül hacimsel konsantrasyonu ile artmıştır. Saf suya göre ısı transferinde minimum % 8.6, maksimum % 31.6 oranında artış sağlanmıştır. Temel akışkan içerisine süspansiyon edilen nano partiküller sürtünme faktöründe saf suya göre en az %16.4, en çok % 36.1 artış meydana getirmiştir. Partikül hacimsel konsantrasyonun %0.25'ten %0.5'e artırılması toplam ısı transferi iyileştirmesinde en az %6.8, en çok %8.9 oranında artışa neden olmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Ferroakışkan,  $Fe_2O_3$ , NiO, ısı transferi, mikrokanal, nanoakışkan.

## Experimental Investigation of Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Ferrofluids in Multiple Microchannels

**ABSTRACT:** In this study, heat transfer and pressure drop characteristics of water based ferrofluids in multiple microchannels with rectangular cross section under constant heat flux boundary conditions were investigated. Ferrofluids were prepared by the addition of  $Fe_2O_3$ , NiO nano particles into pure water chosen as base fluid in two different volumetric ratios ( $\phi=0.0025$  and  $0.005$ ), and the effects of parameters like Reynolds number, particle volume fraction on heat transfer and pressure drop characteristics were analyzed experimentally. Under laminar flow and steady state conditions, heat transfer increased with increasing particle volumetric concentration. Minimum 8.6% and maximum 31.6% enhancement in heat transfer was obtained according to pure water. Nano particles suspended into the base liquid caused minimum 16.4 % and maximum 36.1% increase in friction factor according to pure water. Increasing particle volume concentration from 0.25% to 0.5% yielded 6.8% and 8.9% increase in total heat transfer enhancement.

**Keywords:** Ferrofluid,  $Fe_2O_3$ , NiO, heat transfer, microchannel, nanofluid.

<sup>1</sup> Eyüphan MANAY (0000-0002-5456-8756), Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye  
Sorumlu yazar/Corresponding Author: Eyüphan MANAY, emanay@erzurum.edu.tr

## GİRİŞ

Mikro boyuttaki kanallar küçük boyut ve düşük ağırlıkları, iş akışkan miktarının düşük olması ve yüksek ısı akıları nedeniyle MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) teknolojisinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Ancak, mikrokanalların MEMS teknolojisinde kullanımını cazip kılan avantajlarının yanı sıra küçük hidrolik çap, basınç düşümü, çift fazlı akışlarda kavitasyon ve akış analizi için kullanılacak teorilerin belirsizliği gibi birtakım dezavantajları da söz konusudur (Manay, 2012; Manay et al., 2012). 1981 yılında minyatür HVAC sistemlerinde çalışabileceği düşünülen küçük ölçekli kanallar (Canay, 2007) ile temeli atılan mikrokanallar ile ilgili çalışmaların sayısı ve kapsamı yukarıda sıralanan avantaj ve dezavantajlarından dolayı gittikçe artmaktadır.

Elektronik cihazlar tarafından üretilen yüksek ısı akılarının etkin bir yöntemle ve hızlı bir biçimde ortamdan transfer edilmeleri performansları ve ömürleri açısından oldukça önemlidir. Bu durum mikrokanalların yüksek ısı transfer yüzey alanı-hacim oranı ilişkileri, küçük boyutları, kullanılan akışkan miktarının az olması gibi nedenlerden dolayı önemli bir alternatif olmalarına yol açmıştır. Mikrokanallarda ısı transferini etkileyen parametrelerle ilgili literatürde deneysel ve sayısal birçok çalışma mevcuttur (Manay, 2014).

Lee et al., (2005) dikdörtgen mikrokanallarda ısı transferi için kullanılan klasik teorilerin geçerliliğinin araştırılması için 10 adet paralel mikrokanalın farklı görünüş oranları için deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Owhaib and Palm (2004) R134a'nın dairesel mikrokanallarda tek fazlı zorlanmış taşınım ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Gunnasegaran et al., (2010) su akışı ve ısı transferi karakteristiklerini üç boyutlu olarak laminar rejim ve kararlı hal şartlarında kanal geometri etkisini incelemek için sayısal bir çalışma yürütmüşlerdir.

Su bazlı  $Al_2O_3$ , CuO ve  $TiO_2$  nanoakışkanlarının farklı yüzdelerde (%0.5-5) kullanıldığı sayısal çalışmada Hung and Yan (2012) çift katlı mikrokanalda  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanın en iyi soğutma performansını sergilediği görülmüştür. Lee and Mudawar (2007)  $Al_2O_3$  partiküllü su ve HFE7100 tabanlı nano akışkanları kullanarak tek ve iki faz için mikro kanallarda ısı transferini incelemişlerdir. Kare kesitli mikro kanallarda  $Al_2O_3$  partiküllü nano akışkanların farklı hacimsel oranlarına

ait zorlanmış ısı taşınımı Jung et al., (2009) tarafından araştırılmıştır.

Mikro kanallı soğutucunun soğutma performansı farklı nanopartikül hacimsel oranları için Jang and Choi (2006) tarafından sayısal olarak araştırılmıştır. Mohammed et al., (2011) mikro kanallı ısı eşanjörlerinde farklı tipte dört nano akışkan ve her nano akışkanın farklı hacimsel oranlarını ve Reynolds sayısını değiştirerek ısı transferi ve akış karakteristiklerinin nasıl değiştiğini araştırmışlardır.

Literatürde ferroakışkanların mikrokanallardaki ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri ile ilgili de bazı çalışmalar yürütülmüştür. Kurtoğlu et al. (2014) sabit ısı sınır şartlarında mikro bir boruda %0-%5 hacimsel oranlardaki  $Fe_3O_4$  ferroakışkanların ısı transferi performansını incelemişlerdir. Deneysel olarak yürütülen çalışmada ferroakışkanların kullanımıyla yüzey sıcaklığında önemli oranda azalma meydana geldiği ve artan nanopartikül konsantrasyonu ile ısı transferinde iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir. Sengupta and Ghoshdastidar (2017) hidrodinamik olarak gelişmiş laminar ferroakışkan akışını paralel plakalı mikro ve makro kanallarda sayısal olarak modellemişlerdir. Nanopartikül konsantrasyonunun artan aksel mesafe ile duvarlarda arttığı ve artan ısı akısı ile nanopartikül konsantrasyonunun duvarlarda azaldığı sonucuna varılmıştır.

Ferroakışkanların manyetik alan duyarlılıklarından faydalanılarak akış alanı manipüle edilebilmektedir. Haricen uygulanan manyetik alanlarda ferroakışkanların ısı transferi performanslarının incelenmesine yönelik literatürde çalışmalar mevcuttur. Avsec et al. (2011) ferroakışkanların mikrokanallardaki hareketi ve entropi üretimi için ferromanyetik kuvvetler içeren akışlara ait model geliştirmişlerdir. Sonuçlar entropi üretiminin mikrokanallardaki elektrokinetik sıvı taşınımında pratik bir öneme sahip olduğunu göstermiştir. Xuan et al. (2007) mikrokanallarda ferroakışkan akışında ısı transferi ve akışı simüle etmek için Laattice-Boltzmann metodunu kullanarak modeller geliştirmişlerdir. Akışa dik yöndeki bir manyetik alan gradyeninin sıcaklık ve manyetik alan oryantasyonuna bağlı olarak ısı transferini artırıp azaltabileceği sonucuna varılmıştır. Gui et al. (2018) dış bir manyetik alan etkisi altındaki mikrokanallarda ferroakışkanların ısı transferini farklı hacimsel oranlar için incelemişlerdir. Ferroakışkanların hacimsel partikül oranının artışı ısı transferini arttırmıştır.

Ayrıca, artan manyetik akının ısı transferi iyileşmesini azalttığı gözlemlenmiştir. Mohammadpourfard (2012) ferroakışkanların akış ve ısı transferi karakteristiklerini uniform olmayan manyetik alanda sayısal olarak incelemiştir. Negatif gradyenli bir manyetik alanın ısı transferini arttırdığı ve bu artışın kanal görünüş oranına bağlı olduğu belirtilmiştir.

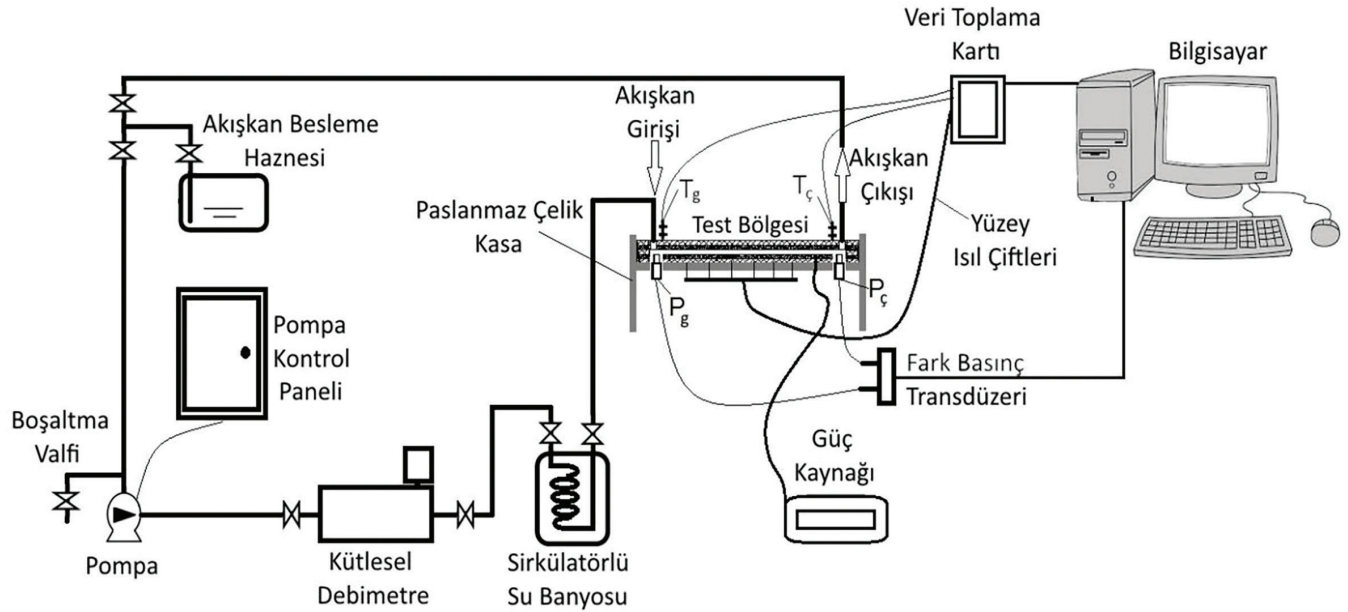
Mikrokanallarda ısı transferi ve basınç düşümü, nanoakışkanların mikrokanallardaki ısı performanslarıyla ilgili yukarıda bahsedilemeyen

ve literatürde yer alan çok sayıda çalışma vardır. Ancak, ferroakışkanların mikrokanallardaki ısı performansı ile ilgili bildiğimiz kadarıyla az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada, oksit tabanlı nanoakışkanlara göre daha yüksek ısı iletkenliğe sahip ferrit tabanlı ferroakışkanların dikdörtgen kesitli çoklu mikrokanallarda laminar akışta zorlanmış taşınım ile ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Mikrokanal yüksekliğinin ve partikül hacimsel oranının ısı performans üzerine etkileri araştırılmıştır.

## MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, içerisinde farklı hacimsel oranlarda nanoakışkan geçen mikro kanallarda akış ve ısı transferi karakteristikleri incelenmiştir. Çalışmanın yürütüldüğü deney düzeneğinin şematiği Şekil 1'de sunulmuştur. Şekilden görüldüğü üzere deney sistemi, alüminyum ısı alıcı içerisinde yerleştirilen 6 mm çapında, 4.5 mm uzunluğunda ve her biri 100 Watt gücünde kartuş (cartridge) ısıtıcılarla sabit ısı akışı uygulanan mikrokanallar, sistemde ısınan akışkanı soğutmak için kullanılmak üzere soğutma ünitesi, fark basınç sensörü, doğru akım güç kaynağı, pozitif yer değiştirmeli pompa ve debimetreden oluşmaktadır.

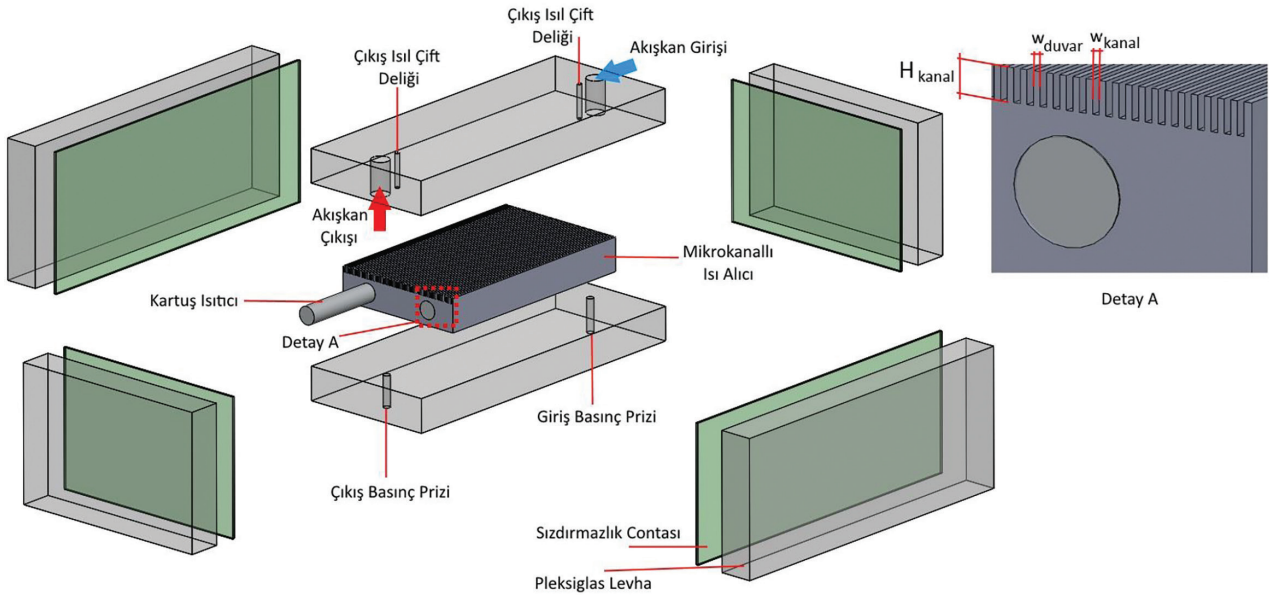
Akışkan sirkülasyon ünitesi borular, test bölgesi, debimetre ve pompadan meydana gelmektedir. Atımsız akış (pulseless flow) sağlayan, partiküllerin topaklanmasını artırmayan, granüler akışlar için uygun kendinden invertörlü ve pozitif yer değiştirmeli pompa kullanılmıştır. Akış debisi 0-6 l/h aralığında invertör yardımıyla değiştirilebilmektedir. Ayrıca, sistemde 0-10 l/h aralığında  $\pm 0.05$  hassasiyetle okuma yapabilen kütleli (coriolis) tip debimetre kullanılmıştır. Kütleli debimetreler çok düşük hızlardaki akışları dahi yüksek hassasiyetle okuyabildikleri için özellikle mikrokanal akışları gibi hassas akışlar için oldukça elverişlidirler (Manay, 2014).



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematiği

Test bölgesinde bulunan mikrokanallara ısıtıcı kartuşlar yardımıyla sabit ısı akısı uygulanmıştır. Test bölgesinde mikrokanallı ısı alıcı dışında, ısıtıcı elemanlar, termoelemanlar, çelik kasa ve plexiglass malzemeler bulunmaktadır. Termoelemanların oluşturduğu gerilim ve akım değerleri bilgisayara bağlı olan veri kazanç ve kontrol kartı ile sıcaklık verilerine dönüştürülmüş ve kaydedilmiştir. Veri okuma ve örnekleme için Visidaq isimli yazılım kullanılmıştır. Şekil 2’de test bölgesinde kullanılan mikrokanal test modülünün detayları sunulmuştur. Mikrokanal test modülü; mikrokanal, ısıtıcı ve plexiglass levhalardan oluşmaktadır. Mikrokanallı ısı alıcı plexiglass levhalar

içerisine alınarak modül haline getirilmiştir (Şekil 2). Arasına sızdırmazlık ve termal yalıtım görevi üstlenen contalar yerleştirilen plexiglass levhalar paslanmaz çelik malzemeden imal edilen kasa içerisine yerleştirilmiştir. Sıkıştırma elemanları yardımıyla parçaların birbirine alttan, yanlardan ve üstten sıkı bir biçimde bağlanmaları sağlanmıştır. Test bölgesinin modül halinde oluşturulması farklı geometrideki mikrokanallı ısı alıcının değiştirilebilmesine olanak sağlamaktadır. Test bölgesinde kullanılmak üzere kanal yüksekliği 1mm ve genişliği  $300\mu\text{m}$  olan dikdörtgen kesitli çoklu mikrokanallı ısı alıcı alüminyum malzemeden imal ettirilmiştir (Şekil 2, Detay A).



Şekil 2. Mikrokanal test modülü ve mikrokanal detayları

Test modülünü üst kısımlarından giriş ve çıkış haznesinde akışkan giriş ve çıkış sıcaklıklarını ölçmek için iki adet T-tipi ısıl çift, benzer şekilde giriş ve çıkış arasındaki diferansiyel basıncı ölçmek için iki adet basınç prizi yerleştirilmiştir. Ayrıca, alt yüzey sıcaklıklarını ölçmek için alüminyum bloğa yüzey sıcaklık okumalarında kullanılan termo elemanlar için 9 adet delik açılmıştır. Mikrokanal alt cidarına sabit ısı akısı uygulayabilmek için her biri 6 mm çapında, 100 Watt gücünde ve 45 mm uzunluğunda 2 adet ısıtıcı kartuş rezistans alüminyum blok içerisine yerleştirilmiştir. Deneyler önce saf su ile sonra farklı hacimsel oranlardaki  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , NiO ferroakışkanları ile yapılmıştır. Sisteme güç vermeden önce akışkan besleme tankına doldurularak, pompa çalıştırılmış ve istenilen

en yüksek Reynolds sayısı değerine ulaşıldıktan sonra sisteme ısı enerjisi verilmiştir. Verilen ısı miktarı güç kaynağı yardımıyla belirlenmiştir. Bilgisayarda karttan alınan sıcaklık değerleri takip edilerek sistemin kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Sistem kararlı hale ulaştıktan sonra veriler kaydedilerek, akış şartları bir alt debi değerine ayarlanmış ve son debi değerine kadar deneyler tekrarlanmıştır.

### DeneySEL Materyal ve Nanoakışkanın Hazırlanması

Nanoakışkan nano boyuttaki partiküllerin temel akışkan içerisine süspansiyon edilerek oluşturulan katı-sıvı karışımıdır. Bu karışımın nanoakışkan olarak tanımlanabilmesi için içerisinde topaklanmanın

ve zamanla çökelmenin olmaması gerekir. Ayrıca, hazırlanan katı-sıvı karışımda kullanılan partiküller temelakışkanınkimyasalözelliklerini değiştirmemelidir. Nanoakışkanın hazırlama metodolojisi özetle; nano partiküllerin temel akışkan içerisine süspansiyonun kararlı hale getirilmesi, ultrasonik titreşime maruz bırakılması ve hazırlanan nanoakışkanın termal

özelliklerinin belirlenmesinden oluşmaktadır. Nanoakışkanların hazırlanması için öncelikle her bir partikül hacimsel oran için süspansiyon edilmesi gereken nanopartikül kütlelerinin belirlenmesi gerekir. Aşağıdaki formüller toplam akışkan hacmi içindeki nanopartikülün kütlelerini belirlemek için kullanılmıştır (Şahin et al., 2013; Manay and Şahin, 2016; Manay and Şahin, 2017).

$$Cv = \frac{\rho_n - \rho_l}{\rho_p - \rho_l} \quad (1)$$

Eşitlik 1'den bulunur ve Eşitlik 2'de yerine yazılarak,

$$\rho_n = \frac{m_n}{V_n} \quad (2)$$

$m_n$  hesaplanır.

$$Cm = Cv \frac{\rho_p}{\rho_n} \quad (3)$$

Eşitlik 3'ten  $Cm$  hesaplanır ve

$$m_p = Cm.m_n \quad (4)$$

Eşitlik 4'te yerine yazılarak  $m_p$  hesaplanır.

$$m_{su} = m_n - m_p \quad (5)$$

$$\rho_{su} = \frac{m_{su}}{V_{su}} \quad (6)$$

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (7)$$

5 ve 6 numaralı eşitliklerden suyun hacmi, 7 numaralı eşitlikten ise partikülün hacmi hesaplanır. Nanoakışkan hazırlanırken iki adım metodu

kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda  $Fe_2O_3$ ,  $NiO$  nanopartikülleri için süspansiyona katılan miktarlar Çizelge 1'de verilmiştir.

$$k_e = \frac{1}{4} [(3\phi - 1)k_p + (2 - 3\phi)k_l] + \frac{k_l}{4} \sqrt{\Delta} \quad (8)$$



$$\Delta = [(3\phi - 1)^2 (k_p / k_l)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2)(k_p / k_l)] \quad (9)$$

$$k_e = k_l [1 + 2.25\phi + 2.27\phi^2] \quad (10)$$

**Çizelge 1.** Farklı nanoakışkan hacimsel oranları için hesaplanan kütleler

Hacimsel Oran (%)	$\rho_{\text{Fe}_2\text{O}_3.\text{NiO}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{su}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{nanoakışkan}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$V_{\text{nanoakışkan}}$ (mL)	$m_{\text{nanoakışkan}}$ (g)	$C_m$	$m_{\text{Fe}_2\text{O}_3.\text{NiO}}$ (g)
0.0025	5368	989.7	1000.645	100	100.0645	0.013411	1.3421
0.005	5368	989.7	1011.592	100	101.1591	0.026532	2.6842

### Termofiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

Nanoakışkanın yoğunluğu ( $\rho_{n,f}$ ) hassas terazi yardımıyla belli bir hacminin ağırlığının belirlenmesiyle elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan  $\text{Fe}_2\text{O}_3.\text{NiO}$  nanopartiküller nano toz halinde SIGMA-ALDRICH firmasından tedarik edilmiştir. Nanoakışkanların termal iletkenlik ölçümleri Linseis firmasına ait THB ısı iletkenlik ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçülen ısı iletkenlikler literatürde yaygın olarak kullanılan Bruggeman (Eşitlik 8) ve Lu-Lin (Eşitlik

10) ısı iletkenlik modelleriyle karşılaştırılmıştır. Deneysel ölçümler ve modellerden elde edilen ısı iletkenlik sonuçları Şekil 3a'da sunulmuştur. Şekil 3a'dan görüldüğü üzere deneysel olarak ölçülen termal iletkenlik değerleri literatürde aynı sıcaklık aralığında çalışılmış Aytuğ (2018) sonuçları ile, Bruggeman ve Lu-Lin modelleriyle karşılaştırılmıştır. Sentezlenen Ferroakışkanların ısı iletkenlik değerlerinin modellerden ve oksit nanoakışkanların ısı iletkenlik değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir.

$$\mu_{n,f} = (1 + 7.5\phi + 123\phi^2)\mu_w \quad (11)$$

$$\mu_{n,f} = \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}}\mu_w \quad (12)$$

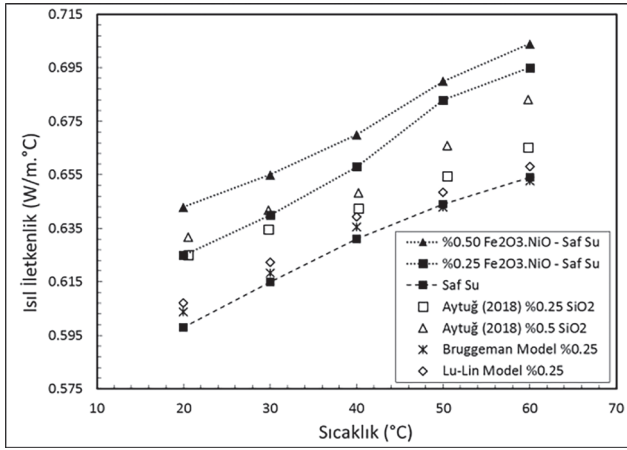
$$\rho C_p = (1 - \phi) \rho_l C_{Pl} + \phi \rho_p C_{Pp} \quad (13)$$

Ayrıca,  $\text{Fe}_2\text{O}_3.\text{NiO}$ -su nanoakışkanının ısı iletkenlik değerleri saf suyun ısı iletkenlik değerleriyle de karşılaştırılmıştır. Nano boyuttaki  $\text{Fe}_2\text{O}_3.\text{NiO}$  partiküllerin saf su içerisine süspansiyon edilmesi ısı iletkenlikte önemli ölçüde artışa neden olmuştur. Artan hacimsel oran ısı iletkenliği artırmıştır. %0.25  $\text{Fe}_2\text{O}_3.\text{NiO}$ -su nanoakışkanının ısı iletkenliği Aytuğ (2018)'in %0.25'lik  $\text{SiO}_2$ -su nanoakışkanından %4.3, %0.5'lik hacimsel oranda ise %1.7 daha yüksektir. Temel akışkan içerisine süspansiyon edilen nano partiküller akışkan içerisinde rastlantısal hareketler

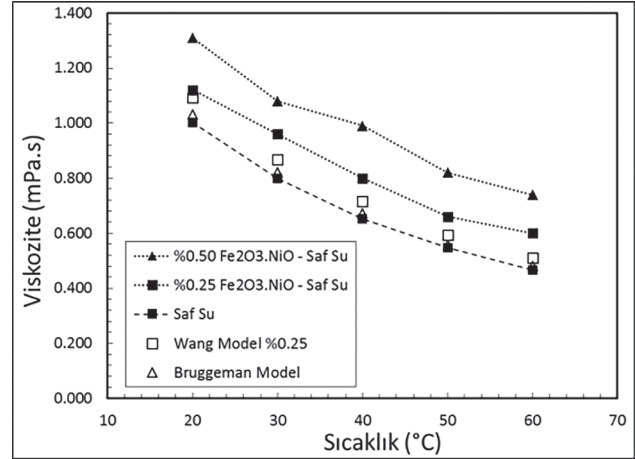
(Brownian hareketi) yaparak ısı iletkenliğinin artmasına neden olurlar. Ayrıca, partiküller ile akışkan arasında meydana gelen sıvı katmanlaşması da ısı iletkenliğinin temel akışkana göre artmasına neden olmaktadır. Ferrit tabanlı nano partiküllerin ısı iletkenliğinin  $\text{SiO}_2$  nano partiküllerinden daha yüksek olması aynı partikül hacimsel oranda Aytuğ (2018) sonuçlarından daha yüksek değerler elde edilmesini sağlamıştır. Hazırlanan nanoakışkanların viskozite ölçümleri A&D marka SV-10 model vibroviskozimetre ile gerçekleştirilmiştir. Nanoakışkanların viskozite ölçüm

sonuçları Wang (Eşitlik 11) ve Brinkmann (Eşitlik 12) korelasyonları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3b'den görüldüğü üzere viskozite değerleri partikül hacimsel konsantrasyonunun artması ile artmaktadır. Aynı kayma

gerilmesi değerinde, artan partikül hacimsel oran ile deformasyon hızı azalmakta ve bu durum görünür viskozitenin artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla artan partikül hacimsel oran ile viskozite artmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 3. (a) Isıl iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi ve literatürle karşılaştırılması, (b) Viskozite değerlerinin sıcaklıkla değişimi ve literatürle karşılaştırılması

Özgül ısının hesaplanması için literatürde sıklıkla kullanılan özgül ısı modeli kullanılmıştır (Şahin et al., 2013, Manay and Şahin, 2016, Manay and Şahin, 2017). Eşitlik 13'de  $C_{pl}$  temel akışkanın,  $C_{pp}$  ise nanopartikülün özgül ısısıdır.

$$Q = VI \quad (14)$$

Eşitlik 15'de  $A_s$  ısı transferi yüzey alanı,  $Q$  ısı gücü göstermektedir. Ortalama ısı taşınım katsayısı Eşitlik 15 ile hesap edilir.

$$h = \frac{Q}{A_s (T_s - ((T_g + T_c)/2))} \quad (15)$$

Nusselt sayısı Eş. 16 ile hesaplanır.

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (16)$$

Reynolds sayısı Eş. 17 kullanılarak hesaplanır.

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad (17)$$

Dikdörtgen mikrokanallardaki sürtünme faktörü Eşitlik 18 ile hesaplanabilir. Eşitlik 18'deki  $D_h$  mikrokanalın hidrolik çapı,  $L$  tam gelişme uzunluğu,

$$f = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho U^2} = \frac{\Delta P}{2\rho U^2} D_h/L \quad (18)$$

Tam gelişmiş basınç düşümünü tayin etmek için sadece uzunlukları farklı olan ancak diğer parametreleri tamamen aynı olan iki adet kanal kullanılmaktadır. Uzun mikrokanala ait parametreler  $u$  ile kısa mikrokanala ait parametreler  $k$  ile gösterilmiştir. İki mikrokanalda kanal boyunca meydana gelen toplam basınç düşümleri

$$\Delta P_{ölç} = P_{gir} - P_{çık} \quad (19)$$

$$\Delta P_{kayıp} = \Delta P_{gir} + \Delta P_{hid} + \Delta P_{çık} \quad (20)$$

Tam gelişmiş uzunluk boyunca basınç kaybı Eşitlik 21 ile hesap edilir.

$$\Delta P = \Delta P_{ölç,u} - \Delta P_{ölç,k} \quad (21)$$

Eşitlik 21'de uzun ile kısa kanalın toplam basınç düşümlerinin farkının alınmasıyla giriş-çıkış haznelerindeki basınç kaybı ve hidrodinamik gelişme uzunluğu boyunca

$\rho$  nanoakışkanın yoğunluğu ve  $V$  de nanoakışkanın ortalama hızıdır.

sırasıyla  $\Delta P_{ölç,u}$  ve  $\Delta P_{ölç,k}$  ile gösterilmekte ve Eşitlik 19 ile bulunmaktadır. Mikrokanal test modülünde meydana gelen kayıplar Eşitlik 20 ile de gösterildiği gibi kanal giriş-çıkış haznelerinde ve gelişme uzunluğu boyunca meydana gelen basınç kaybıdır.

meydana gelen basınç kayıpları elimine edilmiş olur. Böylece, tam gelişmiş uzunluk boyunca meydana gelen basınç düşümü hesap edilmiş olur.

### Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmalarda hatanın belirlenmesi oldukça önemlidir. Literatürde deneysel sonuçların hata analizi için hassas bir yöntem Kline and McClinton (1953) tarafından önerilmiştir. İlgili eşitlikler

kullanılarak elde edilen belirsizlik analiz değerleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Çizelgeden görüldüğü üzere en yüksek belirsizlik %5.11 ile sürtünme faktörü için elde edilmiştir. Sürtünme faktöründe en önemli bağımsız değişken ise debidir.

Çizelge 2. Belirsizlik analizi

Parametre	Re	Nu	f
Belirsizlik (%)	3.69	4.12	5.11



## BULGULAR VE TARTIŞMA

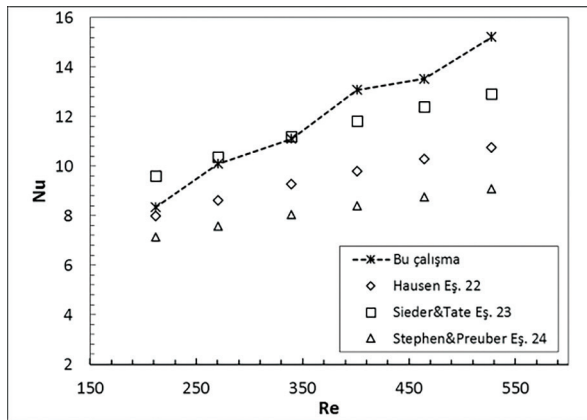
Kullanılan mikrokanallı ısı alıcı sistemin doğrulaması için literatürde iyi bilinen modellerle karşılaştırma yapılmıştır. Mikrokanallarda saf su kullanılması durumunda sonuçlar Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü açısından incelenmiştir. Reynolds sayısının 150 ile 550 arasında olduğu çalışmada ısı transferi sonuçları Hausen (Eşitlik 22), Sieder&Tate (Eşitlik 23) ve Stephan&Preuber (Eşitlik 24) korelasyonları ile karşılaştırılmıştır. Eşitlik 22 ile verilen Hausen korelasyonu laminar akışta, sabit ısı akısı sınır şartında ve termal olarak gelişen akışlar için

kullanılmaktadır. Sieder&Tate (Eşitlik 23) korelasyonu Reynolds sayısının 2200'den küçük olduğu hem termal olarak gelişen hem de hidrodinamik olarak gelişen akışlar için kullanılmaktadır. Stephan&Preuber eşitliği de Sieder&Tate gibi hem termal olarak hem de hidrodinamik olarak gelişen akışlar için kullanılmaktadır ve Prandtl sayısının 0.7 ile 7 arasındaki değerleri için geçerlidir. Shah and London korelasyonu termal olarak gelişen akışta ve sabit duvar ısı akısı şartlarında geçerlidir. Şekil 4a incelendiğinde mikrokanalda saf su ile elde edilen deneysel sonuçların modellerle uyum sağladığı görülmektedir.

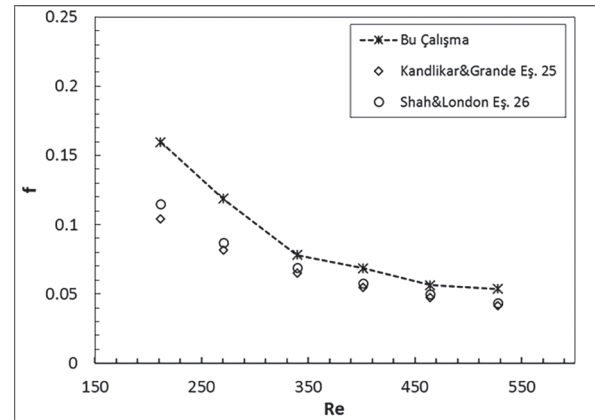
$$Nu = 3.66 + \frac{0.19(RePrD/L)^{0.8}}{1 + 0.117(RePrD/L)^{0.467}} \quad (22)$$

$$Nu = 1.86(RePrD/L)^{1/3} \left( \frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (23)$$

$$Nu = 4.364 + \frac{0.086(RePrD/L)^{1.33}}{1 + 0.1Pr(ReD/L)^{0.83}} \quad (24)$$



(a)



(b)

Şekil 4. (a) Nusselt sayısının literatürdeki modellerle karşılaştırılması,

(b) Sürtünme faktörünün literatürdeki modellerle karşılaştırılması

Şekil 4b'de saf suya ait sürtünme faktörüne ait deneysel sonuçların literatürdeki mevcut korelasyonlar ile karşılaştırılması yer almaktadır. Deneysel sonuçlar Kandlikar ve Grande (Eşitlik 25) ve Shah and London

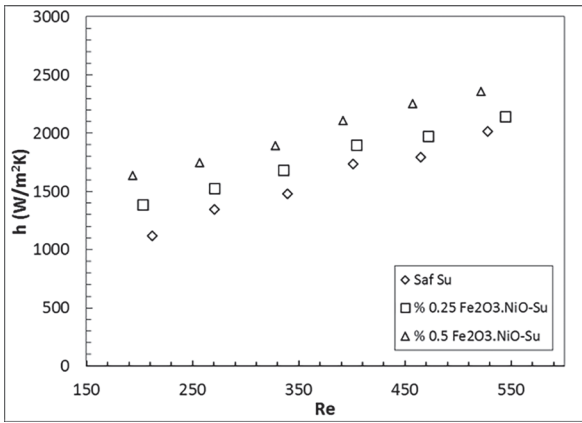
(Eşitlik 26) korelasyonları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde saf suya ait deneysel sürtünme faktörü sonuçlarının Eşitlik 25 ve 26 ile elde edilen verilerle iyi bir uyumun olduğu görülmektedir.

$$f = (96/\text{Re})(1 - (3.5553\alpha) + (1.9476\alpha^2) - (1.7012\alpha^3) + (0.9564\alpha^4) - (0.2537\alpha^5)) \quad (25)$$

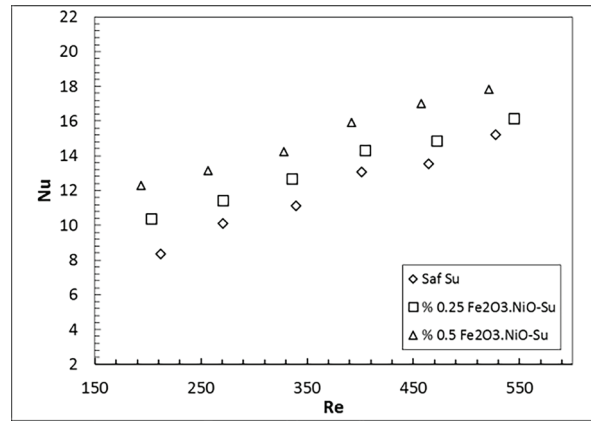
$$f = (22.03/\text{Re}) \left( \frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.58} \quad (26)$$

Şekil 5a'da hem saf ve su-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.NiO nanoakışkanlarının ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimleri sunulmuştur. Akış alanına nano boyutta manyetik partiküllerin eklenmesi ısı transferinde ciddi miktarda artışa yol açmıştır. Isı transferi artan partikül hacimsel konsantrasyonu ile artmaktadır. Saf suya göre minimum % 8.6, maksimum % 31.6 oranında artış sağlanmıştır. Partikül hacimsel konsantrasyonunun %0.25'den %0.5'e kadar artırılması %12.5 ile %20.1 arasında artış sağlanmıştır. Şekil 5b'de Nusselt

sayının Reynolds sayısı ile değişimi verilmektedir. Isı taşınım katsayısınıninkine benzer bir davranış Nusselt sayısında da görülmektedir. En yüksek Nusselt sayısı %0.5 hacimsel oranda su-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.NiO nanoakışkanının kullanıldığı durumda elde edilmiştir. Nano boyuttaki partiküllerin eklenmesi ile sağlanan ısıl iletkenlikteki artış nedeniyle viskoz alt tabaka içerisinde moleküler hareket ile meydana gelen ısı transferi artmaktadır. Bu durum artan partikül hacimsel oran ile ısı transferinin artmasına neden olmaktadır.

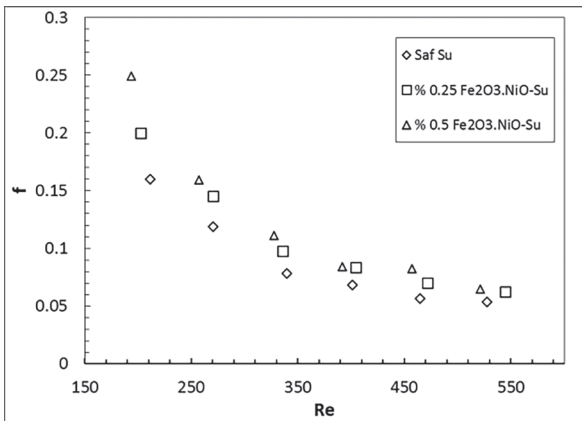


(a)

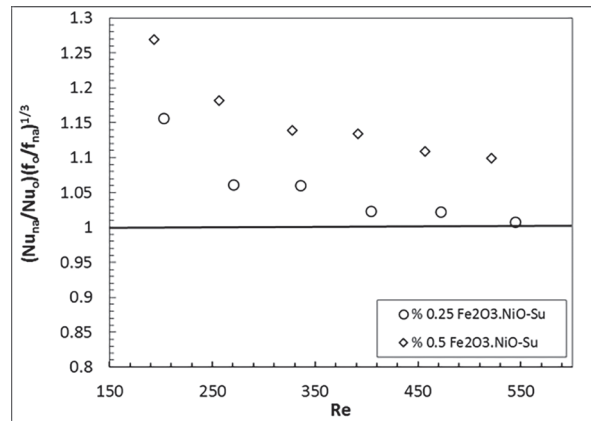


(b)

Şekil 5. (a) Farklı hacimsel konsantrasyonlarda ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi, (b) Farklı hacimsel konsantrasyonlarda Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi



(a)



(b)

Şekil 6. Farklı hacimsel konsantrasyonlarda sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi, (b) Toplam ısı transferi iyileştirmesinin Reynolds sayısı ile değişimi

Sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimleri Şekil 6a'da sunulmuştur. Reynolds sayısı arttıkça sürtünme faktörü azalmaktadır. Nano boyuttaki ( $d < 50\text{nm}$ )  $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{NiO}$  partiküllerinin akış alanına eklenmesiyle sürtünme faktöründe en yüksek değer %0.5 hacimsel konsantrasyonlarında görülmektedir. Temel akışkan olarak seçilen saf su içerisine katılan nano partiküller saf suya göre sürtünme faktöründe en az %16.4, en çok % 36.1 artış meydana getirmiştir. Artan hacimsel oranla birlikte artan viskozite sürtünme faktörünün saf suyunkine göre daha yüksek olmasına neden olmuştur. Isı transferi iyileştirme çalışmalarında incelenen her bir durumun ısı transferinde meydana getirdiği artışa karşılık basınç düşümünü ne kadar artırdığının bilinmesi gerekir. Böylece incelenen durumların toplamda ısı transferi açısından fayda sağlayıp sağlamadığı anlaşılabilir. Şekil 6b'de toplam ısı transferi iyileştirmesinin Reynolds sayısı ile değişimleri sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde bütün durumlar için ısı transferi iyileştirmesinin sağlandığı görülmektedir. Bunun nedeni nanoakışkanların ısı transferindeki artışının basınç düşümündeki artışından daha baskın olmasıdır. En yüksek toplam ısı transferi iyileştirmesi %0.5'lik  $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{NiO}$ -su nanoakışkanının kullanıldığı durumlarda elde edilmiştir. Partikül hacimsel konsantrasyonunun %0.25'ten %0.5'e artırılması

toplam ısı transferi iyileştirmesinde en az %6.8, en çok %8.9 oranında artışa neden olmuştur.

## SONUÇ

Bu çalışmada, ferrit tabanlı ferroakışkanların dikdörtgen kesitli çoklu mikrokanallarda laminar akışta zorlanmış taşınım ile ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen önemli çıkarımlar aşağıda sunulmuştur.

Isı transferi artan partikül hacimsel konsantrasyonu ile artmıştır. Saf suya göre minimum % 8.6, maksimum % 31.6 oranında artış sağlanmıştır. Temel akışkan olarak seçilen saf su içerisine katılan nano partiküller saf suya göre sürtünme faktöründe en az %16.4, en çok % 36.1 artış meydana getirmiştir. Artan hacimsel oranla birlikte artan viskozite sürtünme faktörünün saf suyunkine göre daha yüksek olmasına neden olmuştur. En yüksek toplam ısı transferi iyileştirmesi %0.5'lik  $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{NiO}$ -su nanoakışkanının kullanıldığı durumlarda elde edilmiştir. Partikül hacimsel konsantrasyonunun %0.25'ten %0.5'e artırılması toplam ısı transferi iyileştirmesinde en az %6.8, en çok %8.9 oranında artışa neden olmuştur.

## KAYNAKLAR

- Avsec J, Vırtic P, Naterer G, 2011. Nanofluid and ferrofluid slip flow in rectangular and circular microchannels and minichannels. *Przeglad Elektrotechniczny*, 87 (3): 5-8.
- Canay A, 2007. Mikrokanallarda ısı transferi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 122s.
- Dilek EF, 2008. Nanoakışkanların hazırlanması ve ısı iletkenliklerinin belirlenmesi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 97s.
- Gui NGJ, Stanley C, Nguyen NT, Rosengarten G, 2018. Ferrofluids for heat transfer enhancement under an external magnetic field. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 123: 110-121.
- Gunnasegaran P, Mohammed HA, Shuaib NH, Saidur R, 2010. The effect of geometrical parameters on heat transfer characteristics of microchannels heat sink with different shapes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37: 1078-1086.
- Jang SP, Choi SUS, 2006. Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 26: 2457-2463.
- Jung JY, Oh HS, Kwak HY, 2009. Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52: 466-472.
- Kline SJ, McClintock FA, 1953. Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*, 75(1):3-8.
- Kurtoğlu E, Kaya A, Gözüaçık D, Acar HFY, Koşar A, 2014. Experimental Study on Convective Heat Transfer Performance of Iron Oxide Based Ferrofluids in Microtubes. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 6 (3):1-7.
- Lee J, Mudawar I, 2007. Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50: 452-463.
- Lee PS, Garimella SV, Liu D, 2005. Investigation of heat transfer in rectangular microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48: 1688-1704.
- Manay E, 2012. Mikrokanallarda nanoakışkanların kullanımı. *Mühendis ve Makine*, 53 (627): 38-42.
- Manay E, 2014. Mikrokanallarda nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşümü karakteristiklerinin araştırılması. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 142s.
- Manay E, Sahin B, Gelis K, Yılmaz M, 2012. Thermal Performance Analysis of Nanofluids in Microchannel Heat Sinks. *WASET*, 67: 100-105.
- Manay E, Sahin B, 2016. The effect of microchannel height on performance of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 95: 307-320.

- Manay E, Sahin B, 2017. Heat Transfer and Pressure Drop of Nanofluids in a Microchannel Heat Sink. *Heat Transfer Engineering*, 38(5): 510-522.
- Mohammadpourfard M, 2012. Numerical Study of Ferrofluid Flow and Heat Transfer in the Presence of a Non-uniform Magnetic Field in Rectangular Microchannels. *Heat Transfer—Asian Research*, 41 (4): 302-317.
- Mohammed HA, Bhaskaran G, Shuaib NH, Abu-Mulaweh HI, 2011. Influence of nanofluids on parallel flow square microchannel heat exchanger performance. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(1): 1-9.
- Owhaib W, Palm B, 2004. Experimental investigation of single-phase convective heat transfer in circular microchannels. *Experimental thermal and fluid science*, 28: 105-110.
- Özer A, 2018. Çoklu mikrokanallarda nanoakışkanların karma taşımın ısı performanslarının incelenmesi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 141s.
- Sengupta A, Ghoshdastidar PS, 2017. Heat Transfer Enhancement in Ferrofluids Flow in Micro and Macro Parallel Plate Channels: A Comparative Numerical Study. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 10 (2):1-9.
- Şahin B, Comaklı K, Comaklı O, Yılmaz M, 2006. Nanoakışkanlarla ısı transferinin iyileştirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 47(559): 29-34.
- Şahin B, Gedik GG, Manay E, Karagoz S, 2013. Experimental investigation of heat transfer and pressure drop characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 50: 21-28.
- Xuan Y, Li Q, Ye M, 2007. Investigations of convective heat transfer in ferrofluid microflows using lattice-Boltzmann approach. *International Journal of Thermal Sciences*, 46: 105–111.