



Düz Bir Mikrokanal İçerisindeki Hibrid Nanoakışkanın Akış ve Isıl Karakteristiklerinin İncelenmesi

Hakan Türker¹, Elif Büyük Ögüt^{2*}

¹ Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilimdalı, Kocaeli, Türkiye (ORCID: 0000-0002-2111-8492), hakan-turker@hotmail.com

^{2*} Kocaeli Üniversitesi, Hereke Asım Kocabıyık MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Kocaeli, Türkiye (ORCID: 0000-0002-5647-4040), elif.ogut@kocaeli.edu.tr

(1st International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences ICEANS 2022, May 10-13, 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1112755)

ATIF/REFERENCE: Türker, H., Ögüt, E.B. (2022). Düz Bir Mikrokanal İçerisindeki Hibrid Nanoakışkanın Akış ve Isıl Karakteristiklerinin İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (36), 255-261.

Öz

Bu çalışmada düz bir mikrokanal içerisindeki hibrid nanoakışkanın ısı ve akış karakteristikleri incelenmiştir. Bunun için hibrid nanoakışkanlar kullanılmıştır. Baz sıvıya nanoakışkan kullanımı ile suyun ısıl iletkenliği artırılarak ısı transferinde iyileştirmeler sağlanmaktadır. Birden fazla nanopartikülün çeşitli hacim fraksiyonlarında baz sıvıya ilave edilmesi ile hibrid nanoakışkan kavramı ortaya çıkmaktadır. Bu sayede tek çeşit partikül ile elde edemediğimiz ısıl verim artışını elde etme fırsatı yakalamaktayız. Çalışmada baz akışkan olarak su kullanılmış olup nanopartikül olarak Al_2O_3 ve CuO kullanılmıştır. Hacim fraksiyonu olarak %1, %2, %3, %4, %5 oranlarında baz akışkana nanopartikül ilave edilmiştir. Laminer akış rejiminde gerçekleştirilen sayısal çalışmada Reynolds sayıları 100, 300, 700, 1000 olarak ele alınmıştır. Bu çalışmada sonlu hacimler metoduna dayanan ANSYS Fluent yazılımı kullanılmıştır. Analizler tek fazlı akış yöntemi esasına göre yapılmıştır. Sonuçlar değişen Re sayısı aralığında Nusselt Sayısı, ısı taşınım katsayısı ve basınç düşümü grafikleri ile sunulmuştur. Re sayısının artması ve baz akışkan içerisindeki nanopartikülün hacimsel fraksiyon oranının artması ile taşınım katsayısı önemli bir şekilde artmıştır. Artan Re sayılarında bu etki daha da belirgin hale gelmektedir. Artan hacim fraksiyonlarında Nu sayısında bir azalma söz konusu olmaktadır. Ortalama Nu sayısındaki bu azalma, suya nanopartikül ilave edilmesi sonucunda akışkanın ısı iletim katsayısında meydana gelen artışın, akışın ısı taşınım katsayısında meydana gelen artıştan daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Baz akışkan içerisindeki nanopartikül oranının artması ile basınç düşümü artmaktadır. Basınç düşümündeki bu duruma sebebiyet veren ise viskozitede meydana gelen artıştır.

Anahtar Kelimeler: Hibrid nanoakışkan, ANSYS Fluent, Mikrokanal, Laminer akış, Isı transferi.

Investigation of Flow and Thermal Characteristics of Hybrid Nanofluid in a Straight Microchannel

Abstract

In this study, the thermal and flow characteristics of the hybrid nanofluid in a straight microchannel were investigated. For this, hybrid nanofluids were used. Improvements in heat transfer are provided by increasing the thermal conductivity of water with the use of nanofluids in the base fluid. By adding more than one nanoparticle in various volume fractions to the base liquid, the concept of hybrid nanofluid emerges. In this way, we have the opportunity to achieve the increase in thermal efficiency that we cannot achieve with a single type of particle. In the study, water was used as the base fluid and Al_2O_3 and CuO were used as nanoparticles. Nanoparticles were added to the base fluid as volume fractions of 1%, 2%, 3%, 4%, and 5%. In the numerical study performed in the laminar flow regime, Reynolds numbers are considered as 100, 300, 700, 1000. In this study, ANSYS Fluent software based on the finite volume method was used. Analyzes were made on the basis of single-phase flow method. The results are presented with Nusselt Number, heat transfer coefficient and pressure drop graphs in varying Re number ranges. The convection coefficient increased significantly with the increase of the Re number and the increase in the volume fraction ratio of the nanoparticle in the base fluid. This effect becomes more pronounced with increasing Re numbers. There is a decrease in Nu number with increasing volume fractions. This decrease in the average Nu number is due to the fact that the increase in the heat transfer coefficient of the fluid as a result of adding nanoparticles to the water is greater than the increase in the heat transfer coefficient of the flow. The pressure drop increases with the increase of the nanoparticle ratio in the base fluid. The reason for this situation in pressure drop is the increase in viscosity.

Keywords: Hybrid nanofluid, ANSYS Fluent, Microchannel, Laminar flow, Heat transfer.

1. Giriş

İmalat sektöründeki Ar-Ge faaliyetleri neticesinde ısı değiştiriciler ebat olarak mikro boyutta imal edilmeye başlanmıştır. Hidrolik çapı 1-100 µm arasında değere sahip olan kanallar mikro kanal olarak adlandırılmaktadır. Kullanım ömrünün uzun olması, hafif olması, daha ucuz olmaları sebebiyle mikro ölçekli kanallardan oluşan sistemler literatür ve pratikteki üstünlükleri dolayısıyla mühendislikte kendine önemli bir yer açmıştır. Mikro kanallar 2000'li yılların başında itibaren kullanımı git gide yaygınlaşmaya başlamıştır. Mikro kanallar geleneksel kanallar ve boru akışlarına kıyasla daha verimli bir ısı transferi mekanizmasına sahiptir. Günümüzde elektronik bileşenler ve cihazların soğutulması üzerine birçok deneysel ve sayısal çalışmanın yapıldığı, dünya çapında sürekli olarak araştırma geliştirme konusunda ilgi uyandıran bir konudur. Mikro ölçekteki kanallar ve borulardaki akışların geleneksel kanallar ve borular ile kıyaslanması, ısı transferi mekanizmaları arasındaki farklılıklar, bu farklılıkların kanunlar ile çözümlenmeye çalışılması ve bunun mikro ölçekteki ısı değiştiricilerinin tasarımının geliştirilmesinde kullanılması düşüncesi bu alanda çok fazla sayıda araştırma yapılmasına sebebiyet vermiş ve tüm bunların neticesi olarak yeni teknolojilerin gelişimi için oldukça faydalı olmuştur. Mikro kanalların kullanıldığı birçok endüstriyel uygulama alanı mevcuttur. Mikro elektromekanik sistemlerin (MEMS) soğutulması oldukça mühim bir husustur. Bu sistemler büyük ölçüde ısı açığa çıkarmaktadır. Geleneksel soğutma yöntemleri ve ısı transferi mekanizmaları bu sistemleri soğutmada yetersiz kalmaktadır. Isı transferi mekanizmalarında verimi artırma yöntemleri aktif ve pasif olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Pasif yöntemler genellikle yüzey alanının artırılması, akış alanı içerisine kanatçık yerleştirilmesi, akışkanın termofiziksel özelliklerinin değiştirilmesi gibi durumları içerirken aktif yöntemler de dışarıdan cebri bir temas söz konusudur. Mikro boyuttaki kanallar küçük boyut ve ağırlıkları, akışkan debisinin düşük olması ve yüksek ısı akıları nedeniyle MEMS teknolojisinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Ancak mikro kanalların MEMS teknolojisinde kullanımını cazip kılan avantajlarının yanı sıra küçük hidrolik çap, basınç düşümü, çift fazlı akışlarda kaviteasyon ve akış analizi için kullanılacak teorilerin belirsizliği gibi birtakım dezavantajları da söz konusudur. Isınma probleminin ortaya çıktığı önemli endüstriyel uygulamalardan birisi de elektronik cihazların yarı iletken bileşenleridir.

Vinoth ve Sachuthananthan [1] yaptıkları çalışmada yeni tasarlanmış beşgen, üçgen kesitlere sahip eğik kanatlı bir mikro kanallı ısı alıcının ısı transferi ve akış özellikleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada nanoakışkan ve hibrid nanoakışkan ayrı ayrı kullanılmıştır. Kullanılan nanoakışkanlar; CuO-Su, Al₂O₃-Su olmakla beraber Al₂O₃-CuO/Su hibrid nanoakışkanı kullanılarak deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deneysel sonuçlar eğik kanatlı beşgen mikro kanallı geometride, üçgen kanatlı geometri ile karşılaştırıldığında, beşgen kanallı geometri için ısı transfer hızının ve basınç düşüşünün sırasıyla %12,3 ve %16,5 arttığını bildirmişlerdir. Buna ilaveten hibrid nanoakışkan kullanımının daha yüksek ısı transfer hızları ortaya çıkardığı görülmüştür. Pompa gücü hibrid nanoakışkan ve nanoakışkan arasında % 4,1'lik bir sapma göstermiştir.

Krishna ve ark. [2] dairesel mikro kanallı bir ısı alıcıda soğutucu akışkan olarak hibrid nanoakışkanın laminar akışı için ısı transferi ve basınç düşüşü özelliklerinin incelenmesi için sayısal bir çalışma yürütmüşlerdir. Soğutucunun performansı, %1

ile %3 arasında değişen hacim fraksiyonlarında ve farklı kütleli debiler için çok duvarlı karbon nano tüpler (MWCNT)-CuO/Su bazlı hibrid nanoakışkan kullanarak inceleme yapmışlardır. Reynolds sayısının pompalama gücü ve ısı transfer hızı üzerindeki etkisi, MWCNT-CuO/Su bazlı hibrid nanoakışkanların farklı karışım oranları için incelenmiş ve MWCNT/Su ve CuO/Su hibrid olmayan nanoakışkanlar (mono nanoakışkan) için benzer çalışmalar yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre hibrid nanoakışkanların mono nanoakışkanlara göre ısı transferinde bir artış olduğunu ve ısı transferinin hacim fraksiyonundaki artışla arttığını göstermektedir. Nusselt sayısındaki maksimum artışı, hibrid MWCNT-CuO/Su nanoakışkanının %3 hacim fraksiyonunda olduğunu bulmuşlardır. Sırasıyla CuO/Su ve MWCNT/Su mono nanoakışkanları ile karşılaştırıldığında %4,68 ve %12,64'lük bir artış olduğunu bildirmişlerdir. Basınç düşüşü sonuçlarında ise hibrid MWCNT-CuO/Su nanoakışkanının CuO/Su nanoakışkanlarına kıyasla daha az basınç düşüşüne sahip olduğunu ve suya kıyasla 300 Pa'lık bir basınç düşüşü artışının bulunduğunu ifade etmişlerdir. Bu sonuçlar ile mononanoakışkanlar ve suya kıyasla hibrid nanoakışkanlarla pompalama gücünde önemli bir artış olmadığını bildirmişlerdir.

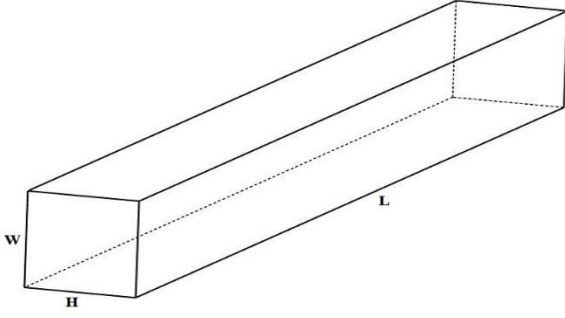
Zargartalebi ve Azaiez [3] nanopartikül özelliklerinin soğutma performansı üzerindeki etkilerini, iki bileşenli bir nanoakışkan modeli kullanarak incelemişlerdir. Nanopartikül dağılımının ısı transferi üzerinde önemli etkilere sahip olduğu ve homojen nanoakışkan modellerinden farklı bir davranış sergilediğini ifade etmişlerdir. Nanoparçacıkların ısı transferi üzerindeki etkisinin akış rejimine bağlı olduğunu bildirmişlerdir. Nanoakışkan viskozitesinin de ısı transferinin iyileştirilmesi üzerinde olumsuz etkileri olduğunu göstermişlerdir ve bu etkinin atalet kuvvetleri arttıkça daha da çoğaldığını bildirmişlerdir.

Sadiq Al-Baghdadi ve ark. [4] kanal içerisinde farklı nanopartikül kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada SiO₂, Al₂O₃ ve CuO'in baz akışkana ilavesi ile ortaya çıkan nanoakışkanlar arasındaki ısı ve akış karakteristiklerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre Al₂O₃ ve CuO, SiO₂'ye kıyasla daha üstün bir verim ortaya koymuştur. Al₂O₃ ve CuO, suya ve SiO₂ ye göre ısı taşınım katsayısında daha yüksek değerler ortaya çıkarırken Nu sayısında düşüş meydana geldiğini bildirmişlerdir.

Martinez ve ark. [5] sabit kesitli, farklı yükseklikteki dikdörtgen mikro kanallarda su bazlı bir nanoakışkanın laminar üç boyutlu akışını incelemişlerdir. Bunun yanı sıra mikro kanallarla ısı alıcıların termal ve hidrolik performansı üzerinde dağılmış TiO₂ nanopartiküllerinin konsantrasyonunu analiz etmişlerdir. Çalışma ile birlikte sürtünme faktörü, nusselt sayısı, taşınım ısı transfer katsayısı ve sıcak duvarın ortalama sıcaklığı belirlenmiştir. Sonuçlar hem nanoakışkanların kullanımının hem de mikrokanal yüksekliğinin azaltılmasının, düşük Reynolds sayılarında ısı transferini olumlu yönde etkilediğini bildirmişlerdir.

2. Materyal ve Metot

Mevcut çalışma düz mikrokanal geometrisine sahip bir kanalda farklı Re sayılarında ve farklı hacim fraksiyonlarındaki hibrid nanoakışkanın ısı ve akış karakteristikleri için sayısal bir çalışma olarak ele alınmıştır. ANSYS Fluent 2019 R3 yazılımı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Suyun ve nanoakışkanın oluşturduğu akışkan tek faz olarak ele alınmıştır. Baz akışkan olarak su kullanılmıştır. Nanopartikül olarak Al₂O₃ ve CuO kullanılmıştır. Ele alınan düz mikrokanal geometrisi Şekil 1 de sunulmuştur.



Şekil 1. Düz mikrokanal geometrisi

Mikrokanal tasarım ölçüleri Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Mikrokanal tasarım ölçüleri

Hidrolik Çap (D _h)	W	H	L
[m μ]	[m μ]	[m μ]	[mm]
100	100	100	40

2.1. Yönetici Denklemler ve Matematiksel Modelleme

Sıkıştırılmaz akış için süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

x momentum denklemi;

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \nabla^2 u \quad (2)$$

y momentum denklemi;

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \nabla^2 v \quad (3)$$

z momentum denklemi;

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \nabla^2 w + g\beta(T - T_0) \quad (4)$$

Enerji denklemi;

$$u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{1}{\text{RePr}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

Mevcut çalışmada makro sistemlerde kullanılan eşitliklerin geçerli olabilmesi için Knudsen Sayısının (Kn) hesaplanması gerekmektedir. Kn sayısı Denklem 6 ile ifade edilmiştir.

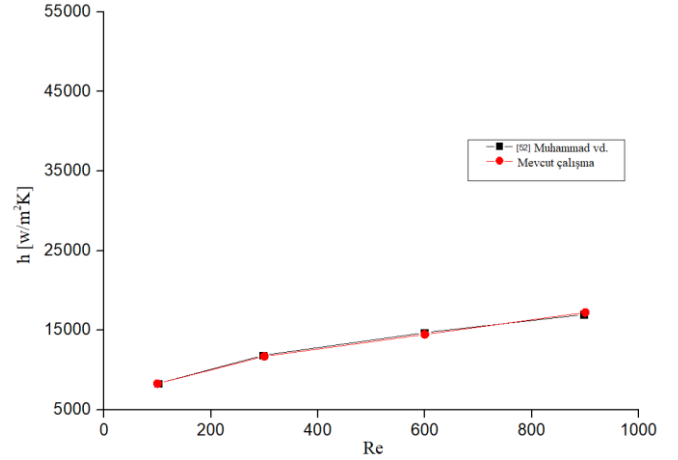
$$\text{Kn} = \frac{\lambda}{L} \quad (6)$$

Burada λ ortalama serbest yolu L karakteristik uzunluğu ifade etmektedir [6].

Suyun moleküler ortalama serbest yolu (λ) 0,278 nm’dir. Karakteristik uzunluk, hesaplamalarda hidrolik çap olarak ele alınmıştır. Kn sayısı, baz sıvı moleküllerinin molekül ortalama serbest yolunun karakteristik uzunluğa oranı olarak tanımlanmaktadır. Kn sayısı Denklem 6 ile hesaplanarak su için bu değer 1.39×10^{-6} olarak hesaplanmıştır. Kn $< 10^{-3}$ sınırları içerisinde, sürekli akış rejimi geçerli olmaktadır. Kn $< 10^{-3}$ aralığında akışkan hareketi kayma sınır koşulları ihmal edilerek Navier-Stokes denklemleri kullanılabilir. Akış sıkıştırılmaz, sürekli ve üç boyutlu olarak ele alınmıştır. Termofiziksel özelliklerin sıcaklıkla ve zamanla değişmediği varsayımı yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında yapılan modellemenin, ısı transferi ve akışkanlar mekaniği modellemesinin doğruluğunu kıyaslamak

adına literatürden doğruluğunu deneysel bir çalışma ile pekiştirmiş nümerik bir analizden faydalanılmıştır. Bu çalışmada araştırmacılar nanoakışkanın düz ve dalgalı mikrolanallarda davranışını ve verimini incelemişlerdir [7].



Şekil 2. Mevcut çalışmanın doğrulanması

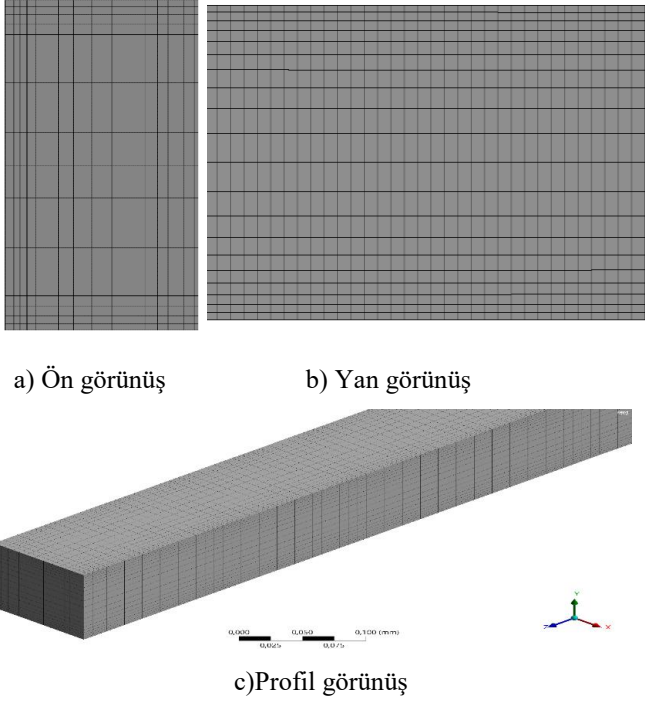
ANSYS Fluent paket programında yapılan analizlerden elde edilen verilerin doğruluğunu ispatlamak amacıyla daha önce yayınlanmış ve kabul görmüş çalışmanın sonuçlarıyla kıyaslama yapılmış ve Şekil 2’de sunulmuştur. Sonuçların birbiri ile oldukça uyumlu olduğu grafikten de açıkça görülebilmektedir. Yapılan bu çalışmada sonuçların ağdan bağımsız olduğunu belirlemek için farklı ağ yapı ve sayılarındaki analiz sonuçları Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Ağ bağımsızlığı

Hücre sayısı	Basınç düşümü (ΔP)[Pa]	ΔP (%)
0098640	22484,17	-
0242400	22593,94	0,485815
0428480	22620,58	0,117789
0721440	22655,62	0,154631
1014220	22670,14	0,064070
1520760	22672,17	0,008975
3200000	22689,10	0,074604

Yapılan ağdan bağımsızlık testine göre Tablo 2. incelendiğinde hücre sayısı 1520760 olan model ile hücre sayısı 1014220 olan model arasındaki farkın %0,008975 olduğu görülmüştür ki bu değer oldukça küçük bir değerdir. Hücre sayısı 3200000 olan model ile hücre sayısı 1520760 olan model arasındaki fark ise 0,074604 olarak bulunmuştur. Buradaki fark %0,008975 ten daha fazladır. Fakat buna rağmen bu değer oldukça küçüktür ve hücre sayısı 2 katına çıkarıldığında bu değer elde edilmiştir. Yani hücre sayısının 2 katına çıkarılması ile basınç düşümü sadece 16 Pa kadar değişmiştir. Tüm bu sebeplerden dolayı yapılan analizler 1520760 hücre adetine ait olan modellemeye göre yapılması uygun bulunmuştur.

Modellemede kullanılan ağ yapısı Şekil 3 ile ifade edilmiştir.



Şekil 3. Düz mikrokanaalın hücrelere ayrılmış görünümü

Bu çalışma kapsamında ele alınan sistemde baz akışkan olarak su kullanılmıştır. Nanopartikül olarak Al_2O_3 ve CuO kullanılmış olup, eşit miktarda suya ilave edilmiştir. Yani suya karıştırılan toplam hacim fraksiyonunun yarısını Al_2O_3 diğer yarısını ise CuO oluşturmaktadır. Suya karıştırılan nanopartikül hacim fraksiyonları %1, %2, %3, %4 ve %5 olarak ele alınmıştır. Suyun ve kullanılan nanopartiküllerin termofiziksel özellikleri 25 °C için Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Su, Al_2O_3 ve CuO termofiziksel özellikleri [8], [9]

	Yoğunluk(ρ) [kg/m ³]	Özgül ısı (C_p) [J/kg.K]	Termal İletkenlik (k) [W/m.K]	Dinamik viskozite (μ) [kg/m s]
Su	997,1	4189	0,613	$8,91 \times 10^{-4}$
Al_2O_3	3600	765	36	-
CuO	6500	533	17,65	-

2.2. Hibrid Nanoakışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Tayini ve Yönetici Denklemler

Bu çalışma kapsamında kullanılan nanopartiküllerin suda homojen olarak dağıldığı kabulü yapılmış olup, iş akışkanı tek faz olarak ele alınmıştır. Çift faz ve tek fazlı modellemeler üzerine birçok araştırma yapılmış olup, deneysel ve sayısal karşılaştırmalı sonuçları literatürde mevcuttur. Hibrid nanoakışkanın termofiziksel özelliklerinin tayini için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır [10], [11].

Mevcut çalışmada klasik iki fazlı akış formülasyonları kullanılarak akışkanların etkin yoğunluğu hesaplanmıştır. Yoğunluğun sıcaklıkla değişmediği varsayımı yapılmıştır.

$$\rho_{hnf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_{np} \quad (7)$$

Denklem 7 ile hibrid nanoakışkanın yoğunluğu ifade edilmiştir. Burada ρ_{hnf} hibrid nanoakışkanın yoğunluğu, ϕ hacim fraksiyonu, ρ_f baz akışkanın yoğunluğu ve ρ_{np} hibrid nanopartiküllerinin yoğunluğudur.

$$(\rho C_p)_{hnf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_{np} \quad (8)$$

Denklem 8 ile hibrid nanoakışkanın özgül ısı hesaplanmıştır.

$$\mu_{hnf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2,5}} \quad (9)$$

Viskozite Brinkman modeli kullanılarak belirlenmiştir. Denklem 9 ile ifade edilen eşitlikte μ_{hnf} hibrid nanoakışkanın viskozitesi ve μ_f baz akışkanın viskozitesidir.

$$k_{hnf} = \frac{k_{np} + (n-1)k_f - (n-1)(k_f - k_{np})\phi}{k_{np} + (n-1)k_f + (k_f - k_{np})\phi} \quad (10)$$

Termal iletkenlik Hamilton ve Crosser denklemi ile hesaplanmıştır. Denklem 10 ile ifade edilen eşitlikte k_{hnf} hibrid nanoakışkanın ısı iletim katsayısı, k_{np} hibrid nanopartikülün ısı iletim katsayısı, n şekil faktörü, k_f baz akışkanın ısı iletim katsayısıdır.

Al_2O_3 ve CuO 'nun Denklem (7-10) ile ifade edilen termofiziksel özellikleri aşağıdaki denklemler ile ifade edilmektedir.

$$\phi = \phi_{Al_2O_3} + \phi_{CuO} \quad (11)$$

$$\rho_{np} = \frac{\phi_{Al_2O_3}\rho_{Al_2O_3} + \phi_{CuO}\rho_{CuO}}{\phi} \quad (12)$$

$$k_{np} = \frac{\phi_{Al_2O_3}k_{Al_2O_3} + \phi_{CuO}k_{CuO}}{\phi} \quad (13)$$

$$(\rho C_p)_{np} = \frac{\phi_{Al_2O_3}(\rho C_p)_{Al_2O_3} + \phi_{CuO}(\rho C_p)_{CuO}}{\phi} \quad (14)$$

Nanoakışkan, içeriğinde hem katı hem de sıvı faz barındıran çift-fazlı bir karışımdır. Fakat, nanoakışkanın içerisinde bulunan katı nanopartikül boyutları genellikle 100 nm'den daha küçük (mevcut çalışmada 29-45 nm) olan nanopartiküllerden oluşmaktadır. Nanoakışkan içerisindeki nanopartikül boyutları 100 nm'den daha küçük olduğundan, nanoakışkan bir karışım gibi değil saf bir akışkan gibi davranmaktadır. Bundan dolayı nanoakışkan akışı tek fazlı akış denklemleri kullanılarak modellenilebilir [12].

Yönetici denklemler kütle, momentum ve enerjinin korunumu temellerine dayanarak oluşmaktadır. Bu çalışma kapsamında, akış üç boyutlu, sürekli, laminar ve sıkıştırılmaz akışkanın özellikleri sıcaklıktan bağımsız, viskoz yayılım etkileri ve radyasyon etkileri ihmal edilebilir olduğu kabulleri yapılarak ele alınmıştır.

Ortalama ısı taşınım katsayısı değeri Denklem 15 ile tayin edilmiştir.

$$h = \frac{Q}{T_w - \frac{T_{giriş} + T_{çıkış}}{2}} \quad (15)$$

Denklem 15 ile ifade edilen eşitlikte h ısı taşınım katsayısı, Q birim alan başına meydana gelen ısı transferi yani ısı akışı, T_w akışkan ve mikrokanaal cidarı arayüzündeki duvar sıcaklığı, $T_{giriş}$ giriş sıcaklığı ve son olarak $T_{çıkış}$ iş akışkanının mikrokanaalı terk ettiği sıcaklıktır.

Nusselt sayısı Denklem 16, Reynolds sayısı Denklem 17 ile tayin edilmiştir.

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

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

2.3. Başlangıç ve Sınır Şartlarının Tayini

Yönetici denklemlerin uygun bir şekilde çözülebilmesi için ele alınan problemin ısı transferi ve akışkanlar mekaniği temellerine göre uygun bir şekilde sınır şartlarının ve başlangıç koşullarının verilmesi gerekmektedir. Mikrokanaalın alt yüzeyi için sınır şartı

olarak sabit ısı akısı altında 1000 W/m^2 olarak nüfuz ettiği düşünülmüştür. Mikrokanalın diğer üç yüzeyine ise adyabatik sınır şartı tanımlanmıştır. Akış rejimi olarak laminar akış şartlarında gerçekleştiği Re sayısının 100 ile 1000 arasında değiştiği kabul edilmiştir. Akışkanın mikrokanala giriş sıcaklığı 25°C olarak ele alınmıştır.

Mikrokanal girişi için;

$$\mathbf{u} = \frac{\mu Re}{\rho D_h}, \mathbf{v} = \mathbf{0}, \mathbf{w} = \mathbf{0} \text{ ve } T_{\text{akışkan}} = 25^\circ\text{C}$$

Mikrokanal çıkışı için;

$$P_{\text{etkin}} = P_{\text{etkin, çıkış}} = 0$$

Mikrokanalın alt cidarı için;

$$\mathbf{u} = \mathbf{0}, \mathbf{v} = \mathbf{0}, \mathbf{w} = \mathbf{0}, T_{\text{cidar}} = T_{\text{akışkan}} \text{ ve}$$

$$\dot{q}'' = -k_{\text{cidar}} \frac{\partial T_{\text{cidar}}}{\partial n} = 1000 \text{ W/m}^2$$

Mikrokanalın adyabatik kenarları için;

$$\mathbf{u} = \mathbf{0}, \mathbf{v} = \mathbf{0}, \mathbf{w} = \mathbf{0}, T_{\text{cidar}} = T_{\text{akışkan}}$$

$$\dot{q}'' = -k_{\text{cidar}} \frac{\partial T_{\text{cidar}}}{\partial n} = 0,$$

olarak belirlenmiştir.

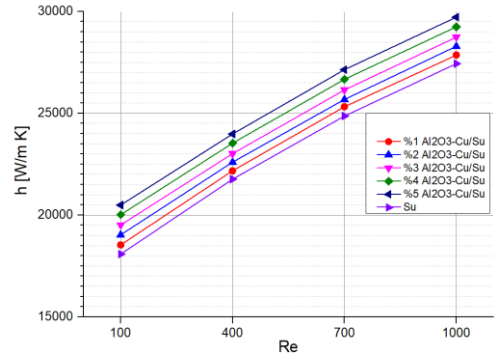
2.4. Fluent İçin Matematiksel Modelin Oluşturulması

Bu çalışma kapsamında ele alınan sistemin sayısal analizi için ANSYS Fluent yazılımı kullanılmıştır. Sonlu hacimler metoduna göre hesaplamalar yapılmıştır. Sınır şartları, kullanılan yönetici denklemler, hesaplamalı akışkanlar dinamiği esasına göre çözülmüştür. Fluent için oluşturulan hücre yapıları dikdörtgen şeklinde olup Şekil 3'de sunulmuştur. Sınır tabaka ayrımalarının yakalanabilmesi için cidara yakın bölgelerde daha sık ağ yapısı oluşturulmuştur.

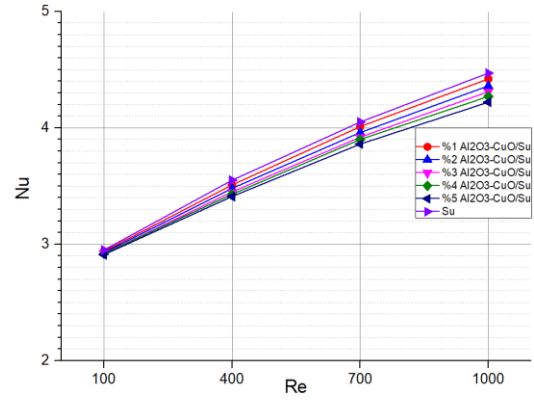
Akış sıkıştırılmaz kabul edilmiştir. Bunu yanında akış sürekli ve daimi olarak ele alındığı için çözümler basınç tabanlı çözücü kullanarak hesaplamalar yapılmıştır. Korunum denklemleri ayrıklaştırılmasında 'second under upwind' metodu ve akış çözümlenmesinde Green-Gauss hücre yöntemi, basınç-hız ayrıklaştırılmasında SIMPLE algoritması uygulanmıştır.

3. Araştırma Sonuçları Ve Tartışma

Düz bir mikrokanalın Re sayısının ve hacim fraksiyonunun farklı değerleri için ortalama ısı taşınım katsayısı Şekil 4 ile sunulmuştur. Grafikten de açıkça görüleceği gibi Re sayısının artması ve baz akışkan içerisindeki nanopartikülün hacimce oranının artması ile taşınım katsayısı bariz bir şekilde artmıştır. Re sayısının artırılması ile bu fark daha da artmaktadır. Bu beklenen bir durumdur, çünkü Re sayısının artması cidar ile iş akışkanı olan sıvı arasındaki etkileşimi arttırarak konvektif ısı transfer etkilerini arttırmaktadır. Re=100 için ısı taşınım katsayısında su için %11,73 değerinde bir artış sağlanmıştır. Bu değer Re=1000 için %7,68 değerinde bir artış sağlanmıştır.



Şekil 4. Isı taşınım katsayısının Re sayısına bağlı olarak farklı hacim fraksiyonlarına göre değişimi

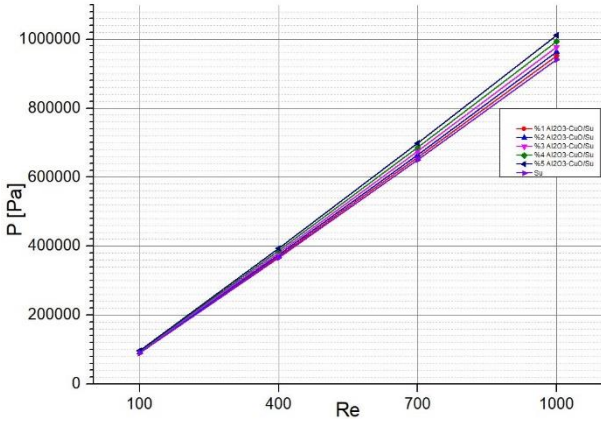


Şekil 5. Nu sayısının Re sayısına bağlı olarak farklı hacim fraksiyonlarına göre değişimi

Düz mikrokanalın Re sayısının ve hacim fraksiyonunun farklı değerleri için ortalama Nusselt sayısı Şekil 5' de sunulmuştur. Grafikten de anlaşılacağı üzere sabit Re sayısında hacim fraksiyonunun artması ile Nusselt sayısı düşmektedir. En yüksek Nusselt sayısı değeri su için elde edilmiştir. Re=100 için su ve %5'lik nanopartikül eklenmesi kıyaslanacak olursa %1,35 gibi bir azalma söz konusudur. Re=1000 değeri için ise Nu sayısındaki bu azalma %5,59 olmaktadır. Ortalama Nusselt sayısındaki bu azalma, suya nanopartikül ilave edilmesi sonucunda akışkanın ısı iletim katsayısında meydana gelen artışın, akışın ısı taşınım katsayısında meydana gelen artıştan daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

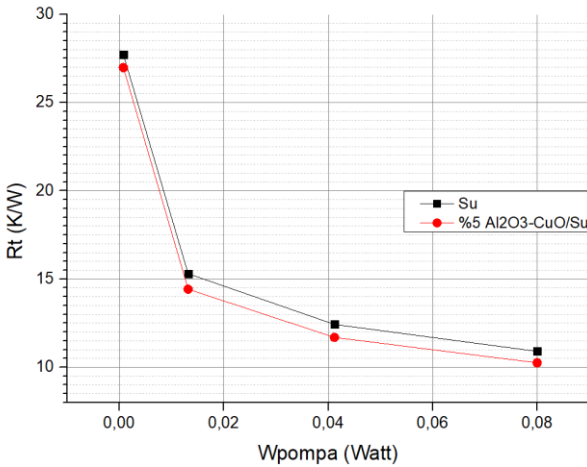
Tablo 4. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CuO}$ nanopartikülü ilavesi ile suyun ısı iletim katsayısı ve ısı taşınım katsayısında meydana gelen yüzdesel değişimler

φ (%)	Δk (%)	Δh (%)
1	2,69	2,42
2	5,4	4,95
3	7,95	7,30
4	10,38	9,65
5	12,8	11,73



Şekil 6. Basınç düşümünün Re sayısına bağlı olarak farklı hacim fraksiyonlarına göre değişimi

Düz mikrokanala Al_2O_3-CuO/Su hibrid nanoakışkanının farklı hacim fraksiyonlarında ilavesinin, Re sayısına bağlı olarak basınç düşümü Şekil 6. ile sunulmuştur. Baz akışkan içerisindeki nanopartikül oranının artması ile basınç düşümü artmaktadır. Basınç düşümündeki bu duruma sebebiyet veren ise viskozitede meydana gelen artıştır. $Re=100$ için baz akışkan ve hibrid nanoakışkan ilavesi ile basınç düşümü %6,84 oranında artmıştır. $Re=1000$ için ise bu değer %6,95 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7. Baz akışkan ve maksimum hacim fraksiyonunda pompalama gücüne karşılık gelen ısı direnç değerleri

Analiz sonuçlarından anlaşılacağı üzere, su ve hibrid nanoakışkan kıyaslaması yapıldığında nanopartikül ilavesi akışın ısı taşınım katsayısını artırarak ısı performansının iyileşmesine neden olurken, buna paralel olarak akışkanın viskozite değerini arttırmasından dolayı basınç düşümünü arttırarak hidrodinamik açıdan olumsuz bir etken sergilemektedir. Bu şartlar altında baz akışkana ilave edilen nanopartikülün genel anlamda olumlu ya da olumsuz sonuçlanıp sonuçlanmadığını anlamak için belirli bir pompalama gücüne tekabül eden ısı direnç değerleri iyi bir yol göstericidir. Şekil 7'den de görüleceği üzere baz akışkana nanopartikül ilavesi ile ısı direnç azalmaktadır. Belirli bir pompalama gücünde hibrid nanoakışkan daha düşük ısı direnç gösterdiği için hidrodinamik olarak baz akışkandan daha üstün bir konumdadır.

4. Sonuç

Bu çalışmada düz bir mikrokanal içerisinde akan hibrid nanoakışkanın ısı ve akış karakteristikleri incelenmiştir. Tek fazlı akış analizinden elde edilen sonuçlara göre, Al_2O_3-CuO/Su hibrid nanoakışkanının, nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte, akışın ısı taşınım katsayısı değeri artarken, aynı zamanda akışın basınç düşümü değerinin de arttığı görülmüştür. Bu durumda hangi parametrenin daha baskın olduğunun yani mikrokanaldaki akış için performansı yorumlamak adına belirli bir pompalama gücündeki ısı direnç hesaplanmıştır. Baz akışkana nanopartikül ilavesi ile belirli bir pompalama gücünde ısı direncin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Buda yapılan çalışmayla baz akışkana hibrid nanoakışkan ilavesinin hidrodinamik performansa olumlu yönde etki gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Kaynakça

- [1] R. Vinoth and B. Sachuthanathan, "Flow and heat transfer behavior of hybrid nanofluid through microchannel with two different channels", International Communications in Heat and Mass Transfer, v.123, pp.105194, 2021.
- [2] V. M. Krishna, M. Kumar, O. Mahesh, P. S. Kumar, "Numerical investigation of heat transfer and pressure drop for cooling of microchannel heat sink using MWCNT-CuO-Water hybrid nanofluid with different mixture ratio", Materials Today: Proceedings, 969-974, 2021.
- [3] M. Zargartalebi, J. Azaiez, "Heat transfer analysis of nanofluid based microchannel heat sink", International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 1233-1242.
- [4] M. A R Sadiq Al-Baghdadi, Z. M H Noor, A. Zeiny, A. Burns and D. Wen "CFD Analysis of a Nanofluid-Based Microchannel Heat Sink", Thermal Science and Engineering Progress, vol. 20 p. 100685, 2020
- [5] V.A. Martínez, D.A. Vasco, C. M. García-Herrera, R. Ortega-Aguilera, " Numerical study of TiO_2 -based nanofluids flow in microchannel heat sinks: Effect of the Reynolds number and the microchannel height", Applied Thermal Engineering, v.161, pp.114130, 2019.
- [6] S. Savithiri, A. Pattamatta, S.K. Das, "Scaling analysis for the investigation of slip mechanisms in nanofluids", Nanoscale Research Letters, v.6, pp. 471, 2011.
- [7] M.Z. Khan, M.Y. Younis, N. Akram, B. Akbar, U.A. Rajput, R. A. Bhutta, E. Uddin, M. A. Jamil, F.P.G. Márquez, F. B. Zahid, " Investigation of heat transfer in wavy and dual wavy micro-channel heat sink using alumina nanoparticles", Case Studies in Thermal Engineering, v.28, 101515, 2021
- [8] F. Ahmed, M. A. Abir, M. Fuad, F. Akter, P.K. Bhowmik, S.B. Alam, D. Kumar, "Numerical investigation of the thermo-hydraulic performance of water-based nanofluids in a dimpled channel flow using Al_2O_3 , CuO, and hybrid Al_2O_3-CuO as nanoparticles" Heat Transfer, 1-26, 2021.
- [9] R. S. Vajjha, D. K. Das and D. P. Kulkarni, "Development of new correlations for convective heat transfer and friction factor in turbulent regime for nanofluids", International Journal of Heat and Mass Transfer, v.53, pp.4607-4618, 2010.
- [10] I. Behroyan, P. Ganesan, S. He, S. Sivasankaran, "Turbulent forced convection of Cu-water nanofluid: CFD model comparison", International Communications in Heat and Mass Transfer, v.67, pp.163-172, 2015.

- [11] E. Aminian, H. Moghadasi, H. Saffari, “Magnetic field effects on forced convection flow of a hybrid nanofluid in a cylinder filled with porous media: a numerical study”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v.141, pp. 2019-2031, 2020.
- [12] Uysal C., “Dikdörtgen Kesitli Mikrokanallarda ZnO-Etilen Glikol Nanoakışkanının Akış ve Isı Transferi Karakteristiklerinin Sayısal Olarak Modellenmesi”, Doktora Tezi, 2016, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.