



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Borulu bir ısı değiştiricide kullanılan nanoakışkanların ısı ve hidrolik performansa olan etkisinin sayısal olarak incelenmesi

Numerical investigation of the effect of nanofluids used in a tube heat exchanger on thermal and hydraulic performance

Yazar(lar) (Author(s)): Elif Büyük ÖĐÜT¹, Seda DİLKI²

ORCID¹: 0000-0002-5647-4040

ORCID²: 0000-0001-7983-0952

To cite to this article: Öğüt E.B. ve Dilki S., “Borulu Bir Isı Değiştiricide Kullanılan Nanoakışkanların Isıl ve Hidrolik Performansa Olan Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi”, *Journal of Polytechnic*, 27(1): 313-328,(2024).

Bu makaleye řu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Öğüt E.B. ve Dilki S., “Borulu Bir Isı Değiştiricide Kullanılan Nanoakışkanların Isıl ve Hidrolik Performansa Olan Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 27(1): 313-328,(2024).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1011690

Borulu Bir Isı Değiştiricide Kullanılan Nanoakışkanların Isıl ve Hidrolik Performansa Olan Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi

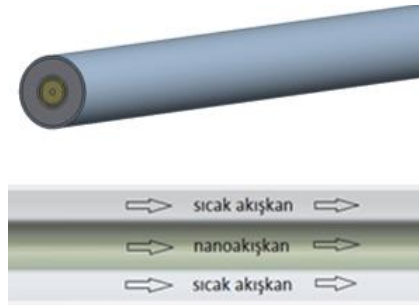
Numerical Investigation of The Effect Of Nanofluids Used In A Tube Heat Exchanger on Thermal And Hydraulic Performance

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Paralel ve Zıt Akışlı Isı Değiştirici/Parallel and Counter Flow Tubular Heat Exchanger
- ❖ Al_2O_3 -Etilen Glikol/Su ve SiO_2 -Etilen Glikol/Su Nanoakışkanları/ Al_2O_3 -Ethylene Glycol/Water and SiO_2 -Ethylene Glycol/Water Nanofluids

Grafik Özet (Graphical Abstract)

İç borudaki nanoakışkan ile dış borudaki temel akışkan arasında ısı transferi sağlanmaktadır./Heat transfer is provided between the nanofluid in the inner tube and the base fluid in the outer tube.



Şekil. Sayısal Modelin Genel Görünümü./Figure. General View of the Numerical Model

Amaç (Aim)

Nanoakışkan kullanarak ısı transferinin iyileştirilmesi./Improvement of heat transfer using nanofluid.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Eş merkezli, iç içe borulu, paralel ve zıt akışlı bir ısı değiştiricinin sayısal analizi gerçekteştirilmiştir./Numerical analysis of a concentric, concentric tube, parallel and counter flow heat exchanger has been carried out.

Özgünlük (Originality)

Daha önceden yapılan çalışmalarda tek bir temel akışkan seçilmiş olup bu çalışmada hem su hem de etilen glikolün saf ve farklı oranlardaki karışım oranlarının etkisi, ayrıca farklı nanopartikül Al_2O_3 ve SiO_2 etkilerinin borulu bir ısı değiştiricide hem paralel hem de zıt akış üzerinde ısıl ve hidrodinamik performansının bir arada gösterildiği çalışmaya rastlanılmamasından dolayı literatüre önemli katkı sağlanacağı düşünölmektedir./In previous studies, only one base fluid was selected, and in this study, the effect of mixing ratios of both pure and different ratios of water and ethylene glycol, as well as the effects of different nanoparticles Al_2O_3 and SiO_2 , in a tubular heat exchanger, combined thermal and hydrodynamic performance on both parallel and counter flow. It is thought that a significant contribution to the literature will be made due to the absence of a study shown in the literature.

Bulgular (Findings)

Al_2O_3 -Etilen Glikol nanoakışkanı, paralel akışa, temel akışkan su ve nanoparçacık SiO_2 kullanımına göre %15,4 oranında ısı transferinde iyileşme sağlamıştır./ Al_2O_3 -Ethylene Glycol nanofluid provided 15,4% improvement in heat transfer compared to parallel flow, base fluid water and nanoparticle SiO_2 usage.

Sonuç (Conclusion)

Isı değiştiricide temel akışkan olarak su yerine Al_2O_3 -Etilen Glikol ve SiO_2 -Etilen Glikol nanoakışkanları kullanılarak ısıl ve hidrolik performansında iyileşme gözlemlenmiştir./ An improvement in thermal and hydraulic performance was observed by using Al_2O_3 -Ethylene Glycol and SiO_2 - Ethylene Glycol nanofluids instead of water as the base fluid in the tubular heat exchanger.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Borulu Bir Isı Değiştiricide Kullanılan Nanoakışkanların Isıl ve Hidrolik Performansa Olan Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Elif Büyük ÖĞÜT^{1*}, Seda DİLKİ²

¹ Kocaeli Üniversitesi, Hereke Asım Kocabıyık MYO, Kocaeli, Türkiye

² Pavotek A.Ş., Teknopark Arge Binaları, Kurtköy-Pendik, İstanbul, Türkiye

(Geliş/Received : 18.10.2021 ; Kabul/Accepted : 12.01.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 31.01.2023)

ÖZ

Enerji dünyanın kritik kaynaklarının başında gelmektedir. Bu sebeple enerji tasarrufu ve verimlilik önemli bir çalışma konusudur. Enerji tasarrufunun sağlanabilmesi için ısı transferinin iyileştirilmesi ile ısı değiştiricilerin kompaktlığı gibi ihtiyaçların doğması ile ısı değiştiricilerde kullanılan geleneksel akışkanların yerine ısı transferi iyileştirmesini sağlayacak yeni akışkan arayışı sebebiyle literatürde teorik ve deneysel çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada ısı transferi iyileştirmesinin sağlanmasında verimli sonuçların elde edildiği Al₂O₃ ve SiO₂ nanoparçacıklarının düşük katı hacim yerine yüksek katı hacim oranlarında ve temel akışkan etilen glikol-su karışımlarının oranları değiştirilerek farklı hacimsel debilerde sıcak ve soğuk akışkanların kullanıldığı, eş merkezli, iç içe borulu, paralel ve zıt akışlı bir ısı değiştiricinin ısı ve hidrolik performansı sayısal olarak incelenmiştir. Sıcak akışkan tarafında su, soğuk akışkan tarafında %0:100, %40:60, %60:40 ve %100:0 olmak üzere farklı oranlardaki etilen glikol-su karışımı içerisine %0, %2, %4, %6 katı hacim konsantrasyonlarında ve farklı Reynolds sayılarında (6000 – 8000 – 12000 – 16000 - 20000) Al₂O₃ ve SiO₂ nanoparçacıkların eklenmesiyle elde edilen nanoakışkanlar kullanılmıştır. Sayısal çalışmaların sonuçlarına göre, zıt akış altında sıcak akışkan olan suyun sabit hacimsel debi değeri 3 l/dk, nanoakışkanların sabit hacimsel debi değeri 0,9 l/dk ve Reynolds sayısı 20000 alındığında, %6 katı hacim oranı için Al₂O₃-%100:0 EG/su ve SiO₂-%100:0 EG/su nanoakışkanlarının Nusselt sayısında, %0:100 EG/su oranına kıyasla sırasıyla %15,4 ve %9,1 oranında artış olmuştur. Sonuçlar, zıt akışlı bir ısı değiştiricideki basınç düşümünün yüksek değerlerde olmasının yanında, Isı değiştirici performansının paralel akışa göre daha iyi olduğunu, nanoakışkanın içerdiği katı hacim oranının artmasıyla Nusselt sayısının arttığını ve Al₂O₃-%100:0 EG/su nanoakışkanının hem %0:100 EG/su oranına hem de SiO₂- %100:0 EG/su nanoakışkanına göre ısı değiştiricinin performansını arttırmada daha etkili olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Nanoakışkan, borulu ısı değiştirici, ısı transferi, HAD.

Numerical Investigation of The Effect of Nanofluids Used in A Tube Heat Exchanger on Thermal and Hydraulic Performance

ABSTRACT

Energy is one of the world's critical resources. For this reason, energy saving and efficiency is an important study subject. In order to save energy, there are theoretical and experimental studies in the literature due to the need for the improvement of heat transfer and the compactness of the heat exchangers, and the search for new fluids that will provide heat transfer improvement instead of the traditional fluids used in heat exchangers. In this study, the nanofluids obtained by changing the ratios of Al₂O₃ and SiO₂ high nanoparticles volume fraction instead of low nanoparticles volume fraction and by changing the ratios of the base fluid ethylene glycol-water mixtures, where efficient results were obtained in providing heat transfer improvement, the thermal and hydraulic performance of a concentric, intertwined, parallel and counter flow in a tubular heat exchanger, using hot and cold fluids at different volumetric flows, was investigated numerically. Water on the hot fluid side, 0:100%, 40:60%, 60:40% and 100:0% on the cold fluid side, into different ratios of EG-water at 0%, 2%, 4%, 6% nanoparticles volume fractions and different Reynolds numbers (6000 – 8000 – 12000 – 16000 - 20000) nanofluids obtained by adding Al₂O₃ and SiO₂ nanoparticles were used. According to the results of numerical studies, when the fixed volumetric flow value of hot fluid water is 3 l/min, the constant volumetric flow value of nanofluids is 0.9 l/min and Reynolds number 20000, Al₂O₃-100:0% EG/water and SiO₂-100:0% EG/water. The Nusselt number of nanofluids increased by 15.4% and 9.1%, respectively, compared to 0:100% EG/water. The results showed that the pressure drop in a counter flow tubular heat exchanger is high, as well as the heat exchanger performance is better than the parallel flow, the Nusselt number increases with the solid volume concentration contained in the nanofluid, and both the 0:100% ratio and the SiO₂ of the Al₂O₃-100:0% EG/water nanofluid. SiO₂ -100:0% EG/water indicates that it is more effective in increasing the performance of the heat exchanger compared to nanofluid.

Keywords: Nanofluid, tubular heat exchanger, heat transfer, CFD

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : elif.ogut@kocaeli.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Isı değiştiriciler santral, klima, petrokimya endüstrisi, soğutma, proses endüstrisi, güneş enerjili su ısıtıcı, kimyasal reaktörler ve nükleer reaktör gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Isı değiştiricilerinin ısı transfer performansının artırılması enerji tasarrufu sağlayabilir, işlem süresini kısaltabilir, termal performansı iyileştirebilir ve çalışma ömrünü uzatabilir. Isı transfer uygulamaları için yüksek performanslı termal sistemlere olan talebe bağlı olarak, bu sistemlerin ısı transfer davranışına ilişkin pratik uygulamaları için ısı transfer verimliliğine yönelik çalışmalar yapılmakta ve yöntemler geliştirilmektedir. Genişletilmiş yüzeylerin kullanılması, ısı transfer yüzeylerine titreşim uygulanması, mikrokanalların kullanılması gibi yöntemler uygulanmaktadır. Isı geçişini iyileştirme tekniklerinin uygulanmasıyla ısı geçişinde önemli ölçüde iyileştirme sağlanmasına rağmen, yüksek basınç kaybı ve düşük debi değerlerinin ortaya çıkması kaçınılmazdır. Bir ısı değiştiricinin görevi; ısıtma, soğutma, atık ısı enerji geri kazanımı gibi ısı aktarımını gerçekleştirmek olsa da, arzu edilen en az işletme masrafiyle daha az basınç kaybı ile daha çok ısı geçişinin daha yüksek debilerde aynı zamanda gerçekleşmesidir. Bu amaçla uygulanan aktif tekniklerin kendi başına yeterli olmadığı sonucuna varılmış ve pasif tekniklerden biri olan ısı değiştiricilerinde su, etilen glikol, motor yağı gibi düşük termal iletkenliğe sahip soğutucu akışkanların özelliklerinin değiştirilmesi kavramı ortaya çıkmıştır. Bir akışkanın termodinamik özelliklerinden ısı iletkenliğinin artırılması, ısı transfer verimliliğini artırabilir. Bu sebeple o akışkana ısı iletkenliği yüksek küçük katı parçacıklar eklenerek çalışmalar yapılmıştır. Öncelikle milimetre ve mikrometre boyutlarında metal ve metal oksit katı parçacıklar eklenerek başlanmış ve parçacıkların çökmesi, kanalların tıkanması ve kanal duvarlarında erozyon gibi önemli dezavantajlar gözlemlenmiştir. Bu dezavantajlar temel akışkanlara katı parçacık süspansiyonunun pratik uygulamasını engellemektedir. Ancak son yıllarda nano teknoloji alanındaki gelişmeler sayesinde uygulanan bu yöntem yeni bir boyut kazandırılmıştır ve yeni teknoloji sayesinde 100 nm (100×10^9 m) 'nin altında nanoparçacıklar elde edilerek, temel akışkanlara belirli hacimsel oranlarda karıştırılmasıyla yeni akışkanlar elde edilmiştir. Bu akışkanlar, ilk olarak 1995 yılında Choi tarafından nanoakışkanlar (nanofluids) olarak adlandırılmıştır [1]. Nanoakışkanlarda nanoparçacıklar o kadar küçüktür ki; temel akışkanın içinde kolayca akışkanlaşır, katı-sıvı karışımından ziyade tek fazlı bir akışkan gibi davranır, kanalların tıkanması ve kanal duvarlarında erozyon gibi sistemin verimliliğini düşüren etkiler meydana getirmez. Süspansiyonun stabilitesinin sağlanabilmesi için, uygun dağıtıcılar kullanılarak parçacıkların çökmesinin önlenilebileceği gösterilmiştir. Böylece mikrokanallarda nanoakışkanların kullanılması da mümkün olmaktadır [2, 3]. Yapılan çalışmalar nanoparçacıkların cinsi, hacimsel oranı, şekli, boyutu, yüzey alanı ile nanoakışkanların ısı iletkenliğinin arttığını ortaya koymuştur.

Nanoparçacıkların, temel akışkanın sadece ısı iletim katsayısını değiştirmediği aynı zamanda nanoakışkanın akış yapısına da etkide bulunduğu elde edilen önemli sonuçlardan biridir [4-6]. Nanometre boyutlarındaki parçacıklarla yapılan ilk çalışma Argonne National Laboratory tarafından yürütülmüş, farklı nanometre boyundaki parçacıkların eklenmesiyle elde edilen yeni akışkanları nanoakışkan olarak tanımlayan ilk araştırmacı Choi olmuştur. Nanoakışkanların ısı transferi iyileştirmesi konusunda bir potansiyele sahip olduğu görülmüş ve bu alanda çalışmalar hızla artarak geniş bir literatür oluşmuştur. Choi vd. [7]. tarafından yapılan çalışmada, temel akışkan su, makine yağı, etilen glikol içerisine eklenen Al_2O_3 ve Cu nanoparçacıklarını kullanarak akışkanların ısı iletkenliğini hesaplamışlardır. Deneysel sonuçlara göre, nanoakışkanların ısı iletkenliklerinin temel akışkanlara bağlı olarak artış göstermekte olduğunu ifade etmişlerdir. Literatürde nanoakışkanlar ve nanoakışkanların ısı değiştiricilerindeki kullanımı ile ilgili yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar mevcuttur. Bunlardan Farajollahi vd. [8] borulu bir ısı değiştirici için, Al_2O_3 ve TiO_2 nanoakışkanlarının performansını incelemişlerdir. Temel akışkana kıyasla ısı transfer iyileştirme kapasitelerinin yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Zamzaman vd. [9] yaptıkları çalışmada Al_2O_3 -EG ve CuO- EG nanoakışkanlarının konvektif ısı taşınımını temel akışkan EG ile karşılaştırmışlar ve artan sıcaklık ve nanoparçacık konsantrasyonu ile zorlanmış ısı transfer katsayısının arttığını gözlemlemişlerdir. Pantzalia vd [10] plakalı bir ısı değiştiricide türbülanslı akışta CuO-su nanoakışkanı için deneysel ve sayısal bir çalışma yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, ısı iletkenlik, suya göre yaklaşık % 10 artmıştır ve belirli bir ısı yükü için, gerekli olan nanoakışkan hacimsel debisinin, daha düşük basınç düşümüne neden olan suyunkinden daha düşük olduğunu göstermektedir. Abed vd. [11] dalgalı trapez plakalı bir ısı değiştiricideki türbülanslı bir akışta Al_2O_3 , CuO, SiO_2 ve ZnO – su nanoakışkanı için sayısal çalışma yapmışlardır. % 4 hacim konsantrasyonunda 20 nm çapındaki nanopartiküller için ortalama Nusselt sayısında % 10 artış olmuştur. Ancak elde edilen sonuçlar kıyaslandığında SiO_2 ile hazırlanan nanoakışkanların en büyük Nusselt sayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bir diğer çalışmada ise Tiwari vd [12] plakalı bir ısı değiştiricide CeO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 ve SiO_2 -su nanoakışkanlarının ısı iletkenliklerini deneysel olarak farklı debi ve konsantrasyonlar altında karşılaştırılmışlardır. CeO_2 -su nanoakışkanının diğer nanoakışkanlara göre düşük optimum konsantrasyonda en iyi performansı verdiğini ifade etmişlerdir. Aghabozorg vd [13] tarafından gövde borulu bir ısı değiştiricide, Fe_2O_3 , CNT % 0.1 hacim oranında nanoparçacık katı hacim oranında laminar ve türbülanslı akış için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Isı transfer katsayısı, su ile karşılaştırıldığında, sırasıyla % 13,54 ve % 27,69 artmış olduğunu görmüşlerdir. Laminer ve türbülanslı her akış rejimi için nanoakışkanın konvektif ısı transfer katsayısının yüksek olduğu sonucuna

varmışlardır. Kim vd. [14] dairesel düz bir tüp içinde laminer ve türbülanslı akış için sabit ısı akısı altında nanoakışkanların ısı ve hidrolik davranışlarını incelemiştir. Temel akışkanlara kıyasla, konvektif ısı transfer katsayısında laminer akışta % 15, türbülanslı akışta % 20 artış olduğu bildirilmiştir. Ayrıca laminer akışta ısı sınırlı tabakanın baskın, türbülanslı akışta ise ısı iletkenliğin baskın olduğunu gözlemlemişlerdir. Liu vd [15] eğimli bir ısı borusunda, % 1 hacim oranında su temelli CuO nanoakışkanının termal performansını incelenmişlerdir. Isı borusunun eğim açısı ve çalışma basıncı üzerine olan etkilerine odaklanmışlar ve eğim açısının termal performansta ve CuO-su nanoakışkanının ise su ile karşılaştırıldığında ısı transferini iyileştirmede büyük rolü olduğunu gözlemlemişlerdir. Bir diğer çalışmada ise Heris vd. [16] dairesel bir boruda, Al₂O₃-su için % 0,2, 1, 2, 2,5 CuO-su için % 3 hacim oranlarında laminer akışı deneysel olarak incelenmişlerdir. Peclet sayısının artmasıyla ısı taşınım katsayısının arttığı ve en yüksek ısı transfer hızının Al₂O₃-su nanoakışkanında olduğunu gözlemlenmişlerdir. Pak ve Cho [17] dairesel bir borudaki türbülanslı akışta % 3 hacim oranında Al₂O₃-su ve TiO₂-su nanoakışkanlarının ısı ve hidrolik performanslarını incelemişlerdir. Çalışılan nanoakışkanların su temel akışkanına göre daha düşük ısı taşınım katsayısına sahip olduğu ve artan hacim konsantrasyonu ile nanoakışkanların suya kıyasla viskozitelerinin daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Humenic vd. [18] çift tüplü sarmal ısı değiştiricide, 24 nm boyutunda CuO ve TiO₂ nanopartiküllerin eklenmesiyle elde edilen CuO-su ve TiO₂-su nanoakışkanlarının laminer akış altında ısı transfer karakteristiklerinin belirlenmesi için sayısal çalışma yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, nanoakışkanın ısı transferi hızının saf sudan % 14 daha fazla olduğunu göstermektedir. Alasadi vd. [19] zıt akışlı gövde borulu bir ısı değiştiricide türbülanslı akış altında Al₂O₃-su nanoakışkanının ısı transfer performansını deneysel olarak incelenmişlerdir. Taşınım ısı transferi katsayısının, aynı kütleli debi ve sıcaklıktaki temel akışkan sudan daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca taşınım ısı transferi katsayısının, kütleli debinin artması ile artacağı ve aynı zamanda ısı transferi katsayısının da Al₂O₃-su nanoakışkanının hacimsel konsantrasyonunun artmasıyla arttığını, fakat hacimsel konsantrasyon artışının nanoakışkanın viskozitesini artırmasından dolayı, sürtünme faktöründe de bir artış olduğunu ve buna bağlı olarak basınç düşümünün arttığını gözlemlemişlerdir.

Son yıllarda, borulu ısı değiştiricileri üzerine Parameswar vd. [20] temel akışkan su olan nanopartikül olarak Al₂O₃ kullanılan nanoakışkanın farklı hacim konsantrasyonlarında ısı transfer katsayısı ve etkinliğini deneysel olarak ölçmüşlerdir. Nanopartiküllerin tüm temel akışkanlarda dağılımının ısı transfer katsayısını ve etkinliği arttırdığı ve partikül hacim konsantrasyonunun artmasıyla daha da arttığını gözlemlemişlerdir. Ding vd. [21] her ikisi de pürüzsüz ve oluklu bir çift borulu ısı değiştiricisi modellemiştir. TiO₂-H₂O

nanoakışkanlarının ısı transferi ve akış özellikleri sayısal simülasyonlar kullanılarak incelenmiştir. Keya vd. [22] tarafından sabit bir hızla üst kapağın hareketli olduğu, çift borulu bir ısı değiştiricide karışık konveksiyon sayısal olarak incelenmiştir. Sınır koşulları ve yönetici denklemler boyutsuz formda Galerkin ağırlıklı kalıntıya dayalı bir sonlu eleman metodolojisi aracılığıyla oluşturulmuş çözülmüştür. Singh ve Sarkar [23] bu derleme çalışmalarında mono nanoakışkanların yanı sıra hibrit nanoakışkanların karakterizasyonu ve termodinamik özelliklerini kısaca özetlemişlerdir. Nanoakışkanlar kullanan borulu (boru- tüp ve kabuk-tüp) ısı değiştiricilerinin fiziksel mekanizmaları, ısı transferi ve basınç düşüşü özellikleri ve çeşitli mühendislik uygulamaları sunulmuştur. Nanoakışkanlar kullanan borulu ısı değiştiricilerinde nanopartikül konsantrasyonunun optimum sınıra kadar artmasıyla temel akışkanla karşılaştırıldığında ısı transfer katsayısında artış sergilediğini ifade etmişlerdir. Son yıllarda yine hibrit nanoakışkan kullanımının ısı değiştiricilerdeki etkilerini inceleyen deneysel ve nümerik çalışmalarda mevcuttur [24, 25]. Kumar vd. [26], su, parafin ve etilen glikol bazlı Al₂O₃ nanoakışkanının ısı transfer etkilerini araştırmışlardır. Isı transfer katsayısı, tam gelişmiş koşullar altında laminer ve türbülanslı akış için kabuk ve borulu ısı değiştirici kullanılarak deneysel olarak ölçülmüştür.

Bu çalışmanın amacı farklı temel akışkanların içerisine çeşitli nanoparçacıkların eklenmesiyle elde edilen nanoakışkanların farklı parametreleri için, borulu bir ısı değiştiricide, paralel ve zıt akış altında gösterdiği ısı transferi karakteristiklerinin sayısal olarak incelenmesi sonucu en iyi ısı transferi iyileşmesinin elde edildiği sonuçların karşılaştırılarak literatüre ve gelecek vadeden nanoakışkanların mühendislik uygulamalarındaki kullanımına katkı sağlamaktır.

2. TEORİK MODEL (THEORETICAL MODEL)

Bu çalışmada, sıcak akışkan olarak su, soğuk akışkan olarak % 0:100, % 40:60, % 60:40 ve % 100:0 olmak üzere farklı oranlarda etilen glikol-su karışımli temel akışkanın, % 0, % 2, % 4, % 6 farklı hacim konsantrasyonlarında Al₂O₃ ve SiO₂ nanoparçacıklarının eklenmesiyle elde edilen nanoakışkanların kullanıldığı, borulu bir ısı değiştiricide paralel ve zıt akış için ısı transferi karakteristiklerini ve ısı transferinin iyileştirilmesini incelenmiştir. Çalışma, sayısal tabanlı parametrik bir çözümlerdir. ANSYS 16.0 paket programı kullanılarak, Design Modeler ara yüzünde üç boyutlu geometri oluşturulmuş ve sayısal analizler ANSYS Fluent programında gerçekleştirilmiştir. Momentum ve enerji denklemleri ikinci mertebeden Upwind yaklaşımı ile, basınç-hız denklemi ise SIMPLE algoritmasıyla çözülmüştür. Realizable k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

2.1 Korunum Denklemleri (Conservation Equations)

Sayısal analizlerde akış koşulları ve ısı transferi için; kararlı hal, sıkıştırılmaz ve Newton tipi, türbülanslı akış,

viskoz ısıtmanın ihmal kabulleri yapılarak tek fazlı model yaklaşımı ile korunum denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [27];

Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi;

$$\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left((v + v_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (2)$$

Enerji denklemi;

$$\frac{\partial u_i T}{\partial x_i} = \rho \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\frac{v}{Pr} + \frac{v_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

u ortalama hızı, ρ yoğunluğu, Pr Prandtl sayısını, Pr_t türbülanslı Prandtl sayısını (0.85) ve v kinematik viskoziteyi temsil etmektedir.

Analizlerde türbülanslı akış için kullanılan realizable k - ε modelindeki taşınım denklemleri aşağıda verilmiştir. Boru cidarı yakınındaki hesaplamaların doğru yapılabilmesi için iyileştirilmiş duvar fonksiyonu kullanılmıştır.

Türbülanslı kinetik enerji k denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$\frac{\partial u_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \Gamma - \varepsilon \quad (4)$$

Türbülanslı enerji dağılımı ε denklemi aşağıda verilmiştir ;

$$\frac{\partial u_i \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + c_1 \Gamma \varepsilon - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} \quad (5)$$

Γ ortalama hız gradyanına bağlı türbülanslı kinetik enerji üretimini temsil etmekte olup, Eş. 6'da verilmiştir.

$$\Gamma = -u_i u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (6)$$

Türbülanslı kinematik viskozite denklemi Eş.7'de verilmiştir ;

$$v_t = c \frac{k^2}{\mu \varepsilon} \quad (7)$$

k - ε modeli için ampirik sabitler ;

$$c_1 = \max[0,43\mu/(\mu_t+5)]; c_2=1,9; \sigma_k=1,0; \sigma_\varepsilon=1,2$$

μ dinamik viskoziteyi, σ_k ve σ_ε sırasıyla k ve ε için Prandtl sayısını temsil etmektedir.

Çalışmada, nanoakışkanların termofiziksel özelliklerini belirlemek için literatürde yer alan korelasyonlar

kullanılmıştır. Viskozite tarafından küresel parçacıklar için önerilen Brinkman [28] modeli kullanılmıştır;

$$\mu_{nf} = \frac{1}{(1-\phi)^{2,5}} \mu_{bf} \quad (8)$$

Nanoakışkanın yoğunluğu, ısıl kapasitesi, ısıl genleşme katsayısı sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [29].

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (9)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho C_p)_{bf} + \phi(\rho C_p)_p \quad (10)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1-\phi)\rho_{bf}\beta_{bf} + \phi\rho_p\beta_p \quad (11)$$

Nanoakışkanın ısıl difüzivitesi aşağıdaki gibidir.

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (12)$$

Bu denklemlerde ϕ katı hacim oranını, nf , bf ve p alt indisleri sırasıyla nanoakışkanı, temel akışkanı ve katı parçacığı ifade eder.

Çalışmada nanoakışkanın ısıl iletkenlik katsayısını hesaplamak için Yu ve Choi [30] modeli kullanılmıştır;

$$k_{nf} = k_{bf} \frac{k_p + 2k_{bf} + 2(k_p - k_{bf})(1+\eta)^3 \phi}{k_p + 2k_{bf} - (k_p - k_{bf})(1+\eta)^3 \phi} \quad (13)$$

2.2 Isı Transferi Hesaplamaları (Heat Transfer Calculations)

Isı değiştiricilerinin ısı transferi hesaplarının ve analizlerinin yapılabilmesi için temel kabuller yapılmıştır; Isı değişiminin sürekli rejimde olduğu, farklı katı hacim oranlarında farklı ısıl iletkenlik katsayıları altında ısı değiştirici boyunca toplam ısı geçiş katsayısının sabit olduğu, ısı değiştiricinin ortama karşı yalıtılmış olduğu, ısı değiştirici içinde bir ısı üretimi olmadığı, Akışkanların özgül ısıları ve fiziksel özelliklerinin sabit olduğu, ısı değiştirici içinde belirli bir kesit boyunca akışkan sıcaklığının aynı olduğu, ısı değiştirici yüzey malzemesinde akışkanların hareketi doğrultusunda iletimle bir ısı geçişi olmadığıdır.

2.2.1 İç boru akışkanı (Inner pipe fluid)

Termodinamiğin birinci kanunu sıcak akışkandan (su) olan ısı transfer miktarının, soğuk akışkana (nanoakışkan) olan ısı transfer miktarına eşit olmasını gerektirir. Buna göre sıcak akışkan ile soğuk akışkan arasındaki ısı transferi miktarı hesaplamaları Eş. 14, 15, 16 ve 17 'de verilmiştir;

$$\dot{Q}_{soğ} = \dot{m}_{soğ} C_{p,soğ} (T_{soğ,çıkan} - T_{soğ,giren}) \quad (14)$$

$$\dot{Q}_{sic} = \dot{m}_{sic} C_{p,sic} (T_{sic,giren} - T_{sic,çıkan}) \quad (15)$$

$$\dot{m}_{soğ} = \rho_{soğ} A_{içboru} V_{soğ} \quad (16)$$

$$\dot{m}_{sic} = \rho_{sic} A_{dışboru} V_{sic} \quad (17)$$

Hacimsel debi genel denklemi Eş.18 'de verilmiştir;

$$\dot{V} = A_{boru} V_{akışkan} \quad (18)$$

İç ve dış borunun alan hesaplamaları Eş.19 ve Eş. 20 'de verilmiştir;

$$A_{içboru} = \frac{\pi(D_{i,o}^2)}{4} \quad (19)$$

$$A_{dışboru} = \frac{\pi(D_{o,i}^2 - D_{i,o}^2)}{4} \quad (20)$$

Isı transfer miktarı Newton soğutma kanununa benzer şekilde de ifade edilebilir. İlgili denklemler Eş. 21, 22 ve 23 'de verilmiştir;

$$\dot{Q} = UA_s \Delta T_m \quad (21)$$

$$A_s = \pi D_i L \quad (22)$$

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)} \quad (23)$$

Paralel akış için, logaritmik sıcaklık farkı denklemleri Eş. 24 ve Eş. 25 'de verilmiştir;

$$\Delta T_1 = T_{sic, giren} - T_{soğ, giren} \quad (24)$$

$$\Delta T_2 = T_{sic, çıkan} - T_{soğ, çıkan} \quad (25)$$

Zıt akış için, logaritmik sıcaklık farkı Eş.26 ve Eş.27'de verilmiştir;

$$\Delta T_1 = T_{sic, giren} - T_{soğ, çıkan} \quad (26)$$

$$\Delta T_2 = T_{sic, çıkan} - T_{soğ, giren} \quad (27)$$

$T_{sic, giren}$ sıcak akışkan olan suyun giriş sıcaklığını, $T_{sic, çıkan}$ sıcak akışkan olan suyun çıkış sıcaklığını, $T_{soğ, giren}$ soğuk akışkan olan nanoakışkanın giriş sıcaklığını, $T_{soğ, çıkan}$ soğuk akışkan olan nanoakışkanın çıkış sıcaklığını ifade etmektedir.

2.2.2. Dış boru akışkanı (Outer pipe fluid)

Hidrolik çap iç boru için kendi iç çapına, dış boru için ise dış borunun iç çapı ile iç borunun dış çapının farkına eşittir. Buna göre, iç ve dış hidrolik çap Eş. 28 ve Eş. 29 'da verilmiştir;

$$D_{i,h} = D_{i,o} \quad (28)$$

$$D_{o,h} = D_{o,i} - D_{i,o} \quad (29)$$

$D_{i,h}$ iç borunun hidrolik çapını, $D_{o,h}$ dış borunun hidrolik çapını temsil etmektedir.

Dış boru tarafındaki sıcak suyun Nusselt sayısı Eş.30'daki Petukhov modeli esas alınarak hesaplanmıştır [31]. Isı taşınım katsayısı h_o , Eş. 31' deki gibi ifade edilmektedir. Bu modelin parametresi olan Eş.32'de

verilen, pürüzsüz borular için türbülanslı akışta sürtünme faktörü eşitliği kullanılmıştır. Daha sonra Eş.33 'den iç boru tarafındaki nanoakışkanın ısı taşınım katsayısı h_i hesaplanmış ve nanoakışkanın Nusselt sayısı Eş.34 ile elde edilmiştir;

$$Nu_{bf} = \frac{(f/8)RePr}{1,07 + 12,7(f/8)^{0,5}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (30)$$

$0,5 \leq Pr \leq 2000$

$$10^4 < Re < 5 \times 10^6$$

$$h_o = \frac{Nu_{bf} k_{bf}}{D_{o,h}} \quad (31)$$

$$f = (0,790 \ln Re - 1,64)^{-2} \quad 3000 < Re < 5 \times 10^6 \quad (32)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \quad (33)$$

$$Nu_{nf} = \frac{h_i D_{i,h}}{k_{nf}} \quad (34)$$

Boyutsuz Reynolds sayısı ve Prandtl sayısı genel denklemleri Eş.35 ve Eş.36'da sunulmuştur;

$$Re = \frac{\rho V_{ort} D_h}{\mu} \quad (35)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (36)$$

Boru içi akışlarda akışkan sürtünmesi basınç düşümüne neden olur. Akışkanın μ viskozitesi, borunun pürüzlü veya pürüzsüz olması, kirlilik gibi etkenler basınç düşümü ile doğru orantılıdır.

Basınç düşümü hesaplamalarında kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiştir;

Sürtünme katsayısı (Fanning sürtünme faktörü) genel denklemi Eş. 37 'de verilmiştir;

$$C_f = 2\tau_w \left(\frac{\rho}{V_{ort}^2} \right) \quad (37)$$

Basınç düşümü genel denklemi Eş.38 'de verilmiştir;

$$\Delta P = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho V_{ort}^2}{2} \quad (38)$$

f sürtünme katsayısını ($f=4C_f$), L borunun uzunluğunu, D_h hidrolik çapı, ρ akışkanın yoğunluğunu, V_{ort} akışkanın ortalama hızını ifade etmektedir.

Isı değiştiricilerinin ısı performanslarının bir ölçütü olan ε boyutsuz ısı değiştiricinin etkinliği yani verimliliği olarak ifade edilmektedir. 0 ile 1 arasında değişir, geçiş birimi sayısına (NTU), ısı kapasite oranlarına (c), akışım düzenine ve geometriye bağlıdır. ε ısı değiştiricinin ısı performanslarının bir ölçütü olarak ifade edilmekte ve sıcak akışkandan soğuk akışkana geçen ısı transferi miktarının, olası maksimum ısı transferine oranı olarak

gösterilmektedir. Buna göre ısı değiştiricinin etkinliği Eş.39 'da verilmiştir;

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{Q_{\max}} \quad (39)$$

c ısı kapasite oranı, ısı kapasitesi küçük olan akışkanın C_{\min} değerinin, ısı kapasitesi büyük olan akışkanın C_{\max} değerine oranıdır. 1 veya 1'den küçük bir değere sahip olup, Eş.40 'da verilmiştir;

$$c = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{(mC_p)_{\min}}{(mC_p)_{\max}} \quad (40)$$

Geçiş birimi sayısı NTU, Eş. 41 'de verilmiştir;

$$NTU = \frac{UA_s}{C_{\min}} \quad (41)$$

Çalışmadaki borulu ısı değiştirici için, paralel ve zıt akış düzenine bağlı, geliştirilmiş ε ısı değiştirici etkinliği ve NTU geçiş birim sayısı bağıntıları Çizelge 1'de verilmiştir.

3. SAYISAL ANALİZ (NUMERICAL ANALYSIS)

Bu çalışmada; iç boruda farklı katı hacim konsantrasyonlarında % 0:100, % 40:60, % 60:40 ve % 100:0 olmak üzere farklı oranlarda etilen glikol-su karışımı temel akışkanın, % 0, % 2, % 4, % 6 farklı hacim konsantrasyonlarında ve 0,1, 0,3, 0,5, 0,7 ve 0,9 l/dk hacimsel debi değerlerindeki nanoakışkanların, dış boruda ise 1 l/dk ve 3 l/dk farklı debilerde sıcak suyun olduğu adyabatik bir ısı değiştiricideki ısı transferini iyileştirmek için farklı parametrelerin uygulandığı türbülanslı akış ve zorlanmış taşınım, paralel ve zıt akış düzeninde ısı transferi iyileşmesinin en iyi olduğu şartlar için nanoakışkanların ısı performansları araştırılmıştır. Nanoparçacık etkilerinin incelenmesi için, Al_2O_3 ve SiO_2 nanoparçacıkları seçilmiştir. Analizler için ANSYS Fluent 16.0 paket programı kullanılmış olup, üç boyutlu geometri Design Modeler ara yüzünde, sayısal analizler ise Fluent ara yüzünde yapılmıştır. Momentum ve enerji denklemleri ikinci mertebeden Upwind yaklaşımı, basınç-hız denklemi ise SIMPLE algoritmasıyla çözülmüş olup, tam gelişmiş türbülans altında yapılan analizlerde μ_t türbülans viskozitesinin hesaplanmasında diğer türbülans modellerine göre, hız profillerinin tahmininde parametreler değiştiğinde daha hızlı ve en yakın sonuçları veren realizable k- ε modeli kullanılmıştır. Tüm değişkenler için yakınsama aralığı 10^{-6} ya ulaştığında çözümlerin yakınsadığı kabul edilmiş ve üniform grid sistemi kullanılmıştır.

Isıl iletkenlik modeli olarak Yu ve Choi [30], viskozite modeli olarak Brinkman [28] modelinden yararlanılmıştır.

Analizlerde temel akışkan olarak kullanılan farklı oranlardaki etilen glikol - su karışımı ile Al_2O_3 , SiO_2 nanopartiküllerinin termofiziksel özellikleri 25°C oda sıcaklığındaki değerleri Çizelge 2'de verilmiştir [32].

3.1 Geometrinin Oluşturulması (Creation of Geometry)

Borulu ısı değiştirici gerçek boyutlarıyla çizilerek analiz öncesi modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de geometrisi verilmiştir.

Analizi yapılan borulu ısı değiştiricinin geometrik ölçü ve malzeme bilgileri Çizelge 3'de detaylı olarak verilmiştir.

3.2 Sayısal Çözümün Doğrulanması (Validation of Numerical Solution)

ANSYS Fluent 16.0 paket programında yapılan analizlerden elde edilen verilerin doğruluğunu ispatlamak amacıyla daha önce yayınlanmış ve kabul görmüş çalışmanın sonuçlarıyla kıyaslama yapılmıştır.

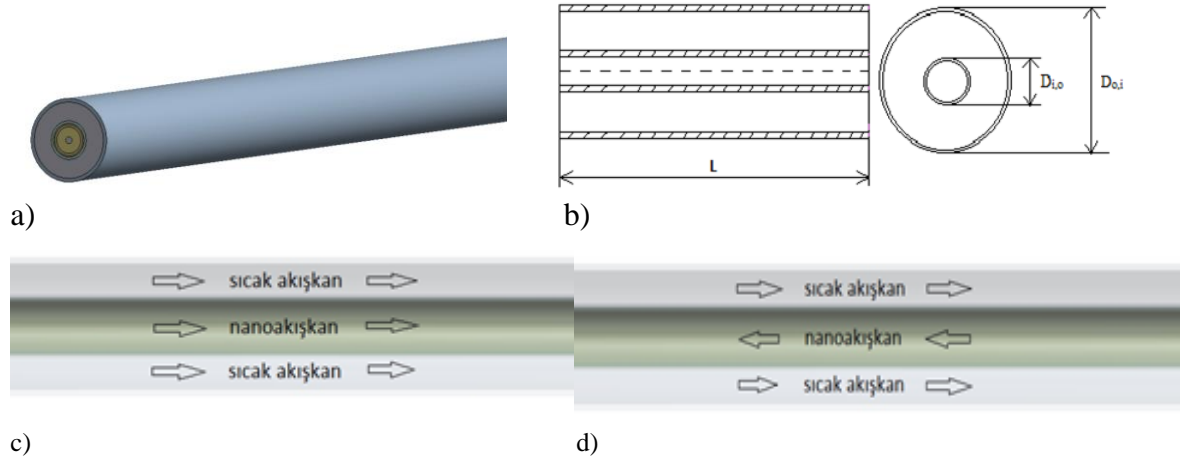
Mevcut çalışmanın doğruluğunu test etmek için Baby ve Johnson [33]'nin yapmış olduğu çalışma sonuçlarıyla bir kıyaslama yapılmıştır. Çalışmada, zıt akış altında borulu bir ısı değiştiricide, dış boruda sıcak su, iç boruda Al_2O_3 -su nanoakışkanının olduğu, farklı hacim konsantrasyonlarındaki ısı transferi artışının zorlanmış taşınım üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bahsedilen sayısal çalışma ile mevcut çalışmanın sonuçlarının doğrulanması amacıyla, 0,5 l/dk ve 0,9 l/dk farklı hacimsel debilerdeki, % 0, % 2 ve % 4 nanoparçacık katı hacim konsantrasyonlarında nanoakışkanın Nusselt değerleri, hacimsel debisi 1 l/dk ve 3 l/dk olan sıcak su kullanılarak elde edilmiş ve Şekil 2'de sunulmuştur. % 0,4 ila % 7,5 aralığında hata yüzdesi ile sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Çizelge 1. Isı değiştirici etkinliği ve NTU bağıntıları (Heat exchanger efficiency and NTU relations)

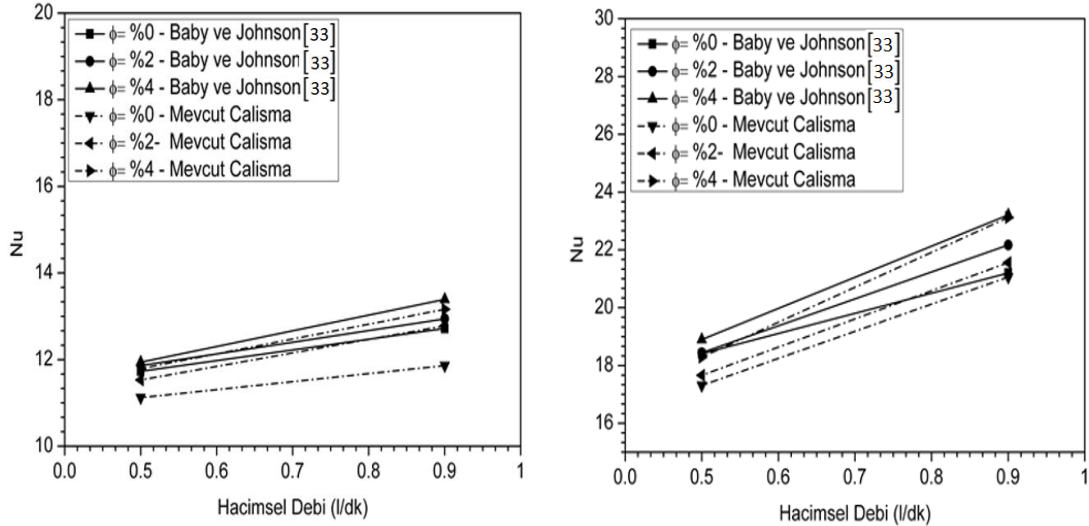
Akış	Isı değiştirici etkinlik bağıntısı	NTU bağıntısı
Paralel akış	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1+c)]}{1+c}$	$NTU = -\frac{\ln[1-\varepsilon(1+c)]}{1+c}$
Zıt akış	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1-c)]}{1 - c \exp[-NTU(1-c)]}$	$NTU = \frac{1}{c-1} \ln\left(\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon c-1}\right)$

Çizelge 2. Termofiziksel özellikler (Thermophysical properties)

Özellik	% 0:100 EG/su	% 40:60 EG/su	% 60:40 EG/su	% 100:0 EG/su	SiO ₂	Al ₂ O ₃
ρ (kg/m ³)	997,1	1057,6	1083,8	1132	2220	3970
C _p (J/kgK)	4180	3485	3106	2349	745	765
k (W/mK)	0,613	0,408	0,336	0,258	1,4	40
μ (kg/m.s)	0,000891	0,0025	0,0045	0,0151	-	-
β (1/K)	0,00021	0,0003	0,0004	0,00057	1,4594	0,000024

**Şekil 1.** Sayısal modelin; (a) genel görünümü, (b) radyal görünümü, (c) paralel akış aksel kesiti, (d) zıt akış aksel kesiti
(The numerical model; (a) general view, (b) radial view, (c) parallel flow axial section, (d) opposite flow axial section)**Çizelge 3.** Borulu ısı değiştiricinin geometrik özellikleri (Geometric characteristics of the tube heat exchanger)

Genel özellikler	İç Boru	Dış Boru
Boru dış çapı (mm)	6,05	16,05
Boru iç çapı (mm)	6	16
Boru uzunluğu (mm)	1000	1000
Boru et kalınlığı (mm)	0,5	0,5
D _h hidrolik çap (mm)	6	10
A _c kesit alanı (mm ²)	0,02826	0,0785
A _s Isı transfer yüzey alanı (mm ²)	18,84	50,24
Boru malzemesi	Paslanmaz çelik	Paslanmaz çelik
İçinden akan akışkan	Nanoakışkanlar	Sıcak su



a)

(b)

Şekil 2. Mevcut çalışma ile literatür çalışmasının sabit 1 l/dk (a) ve 3 l/dk (b) sıcak su hacimsel debi değerleri için Nu değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of Nu values for constant a) 1 l / min and b) 3 l / min hot water volumetric flow rates of the current study and the literature study)

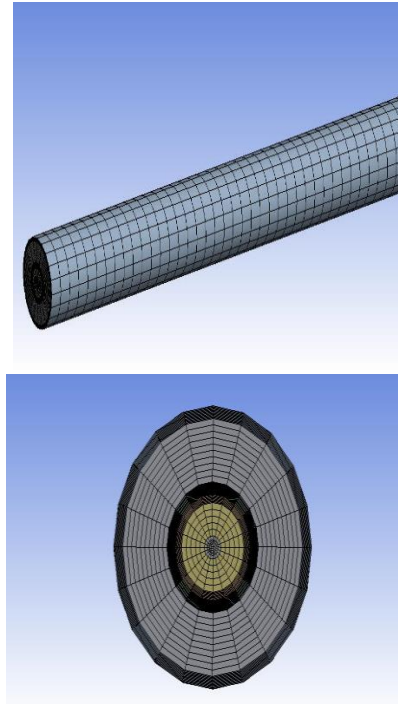
3.3 Ağ Bağımsızlığının İspatlanması (Proof of Meshsize Independence)

Bu çalışmada modelin akış alanına ait uygun ağ yapısının seçilmesi amacıyla beş farklı ağ göz önünde bulundurulmuştur ve Patch Conforming Tetrahedrons seçilmiştir. Nanoakışkanın sınır şartı 0,5 l/dk giriş hacimsel debi altında her durumda nanoakışkanın çıkış sıcaklığı için birbirine yakın değerler elde edilmiştir. Çizelge 4’de verilen sonuçlardan M4 için ağ yapısının ve sayısından bağımsızlığının elde edildiği sonucuna varılmıştır. Şekil 3’de çalışılan üç boyutlu geometrinin mesh yapısı verilmiştir.

Çizelge 4. Ağ bağımsızlığı (Meshsize independence)

Ağ yapısı	Çıkış Sıcaklıkları (K)
M1-328800	332,55
M2-560320	330,43
M3-752630	325,87
M4-875638	324,45
M5-250678	324,33

Probleme analizlerin çözümünde kullanılan sınır koşulları Çizelge 5’ de özetlenmiştir.



Şekil 3. Modelin çözüm ağı yapısı (Solution meshsize structure of the model)

Çizelge 5. Sınır koşulları (Boundary conditions)

Sıcak akışkan	Su
Soğuk akışkan	Nanoakışkan
Temel akışkan	Su, etilen glikol (EG)
Nanopartikül	Al ₂ O ₃ ve SiO ₂
Sıcak su giriş sıcaklığı (K)	353 K
Nanoakışkan giriş sıcaklığı (K)	301 K
Sıcak su hacimsel debi (l/dk)	1, 3
Nanoakışkan hacimsel debi (l/dk)	0,1, 0,3, 0,5, 0,7, 0,9
Nanoakışkan katı hacim oranı	%0, %2, %4, %6

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

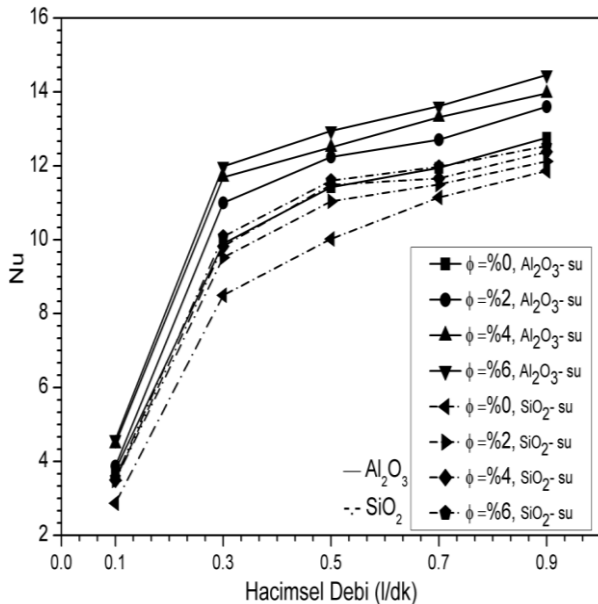
4.1 Zıt Akış: Al₂O₃- su ve SiO₂-su (Counter Flow: Al₂O₃- water and SiO₂-water)

Zıt akış altında, dış boru tarafında akan sıcak suyun hacimsel debisi önce 1 l/dk daha sonra 3 l/dk değerinde sabit tutularak, iç borudaki Al₂O₃-su ve SiO₂-su, nanoakışkanlarının hacimsel debi değerleri 0,1, 0,3, 0,5, 0,7 ve 0,9 l/dk için, %0, %2, %4, %6 katı hacim konsantrasyonlarında elde edilen Nu değerleri Şekil 4 'de sunulmuştur. Sonuçlar, nanoakışkanlardan k ısıl iletkenliği yüksek olan nanoakışkanların, Nu değerlerinin de daha yüksek olduğunu göstermektedir. Buna bağlı olarak, Nu değerleri Al₂O₃-su nanoakışkanının, SiO₂-su nanoakışkanından daha

yüksek olduğu görülmektedir. Ancak bu sonuç sadece iletkenlik ve taşınım katsayılarına bağlı değildir. Katı hacim oranı, hacimsel debinin artışı, Brownian hareketi ve nanoakışkanların ısı transfer özelliklerini artıran yüksek Reynolds sayısındaki gelişmiş türbülans gibi diğer faktörler de Nu değerlerinin artışında etkilidir.

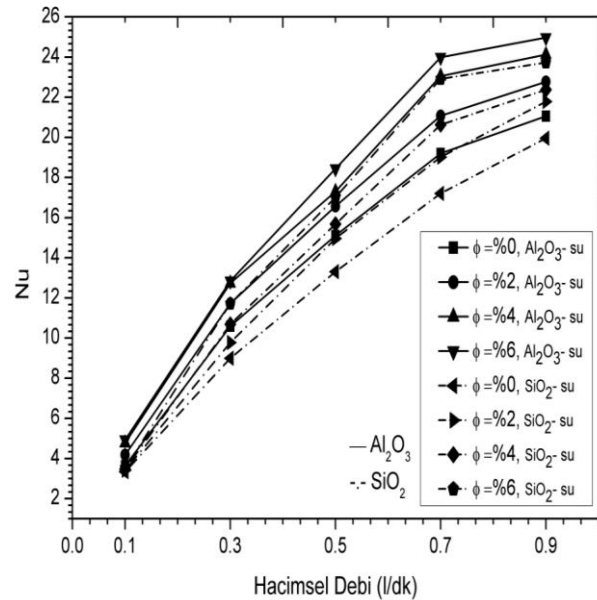
Şekil 5'de basınç düşümü değerleri verilmiştir. Nanoakışkan içindeki katı hacim oranının ve hacimsel debinin artışıyla basınç düşümü artmaktadır. Ancak basınç düşümü, temel akışkanın hacimsel debisinin artışıyla çok fazla bir değişim sergilememektedir. Al₂O₃-su nanoakışkanı için yoğunluk değerleri SiO₂-su nanoakışkanından daha yüksektir. Yoğunluk ve hıza bağlı gelişen türbülans dolayısı basınç düşümü değerleri artmaktadır.

Şekil 6'da ϵ etkinlik değerleri sunulmuştur. Isı değiştiricinin ϵ etkinliği nanoparçacık katı hacim oranı ve sıcak suyun hacimsel debisine bağlı olarak artmakta ancak nanoakışkanın hacimsel debisi arttıkça azalmaktadır. Bunun nedeni nanoakışkanın içindeki nanoparçacıkların hızın etkisiyle sıcak su ile aralarındaki ısı transferinin azalması ve soğutmanın amaçlandığı çıkış sıcaklığının daha düşük olmasıdır. Al₂O₃-su nanoakışkanı kullanıldığında ısıl iletkenliğin ve h taşınım katsayısının yüksek olması sebebiyle, nanoakışkan sıcak akışkandan daha yüksek değerlerde ısı transfer edebilmekte ancak akışkanın hızı arttıkça akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın azalmaktadır.

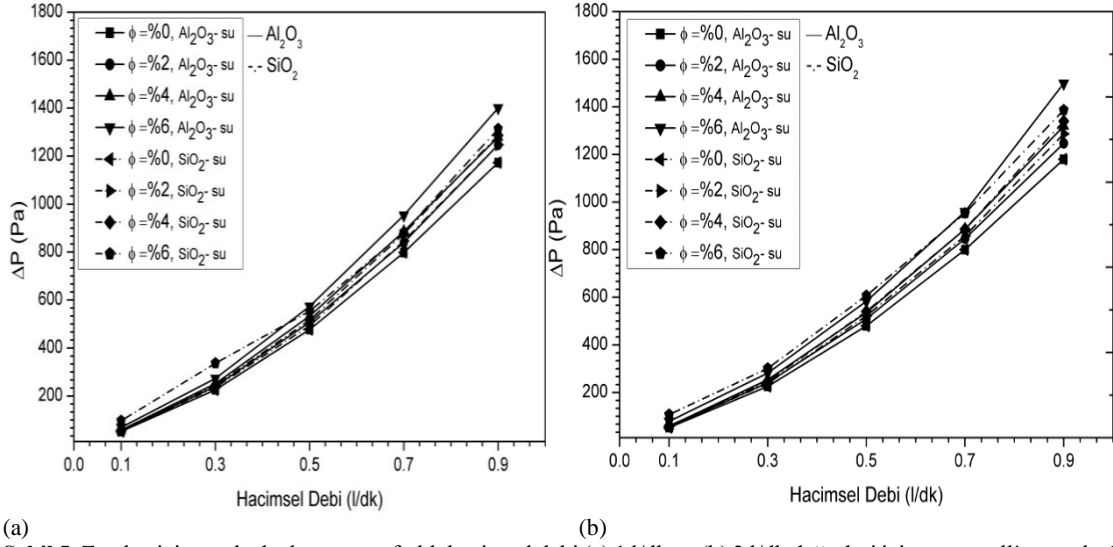


a)

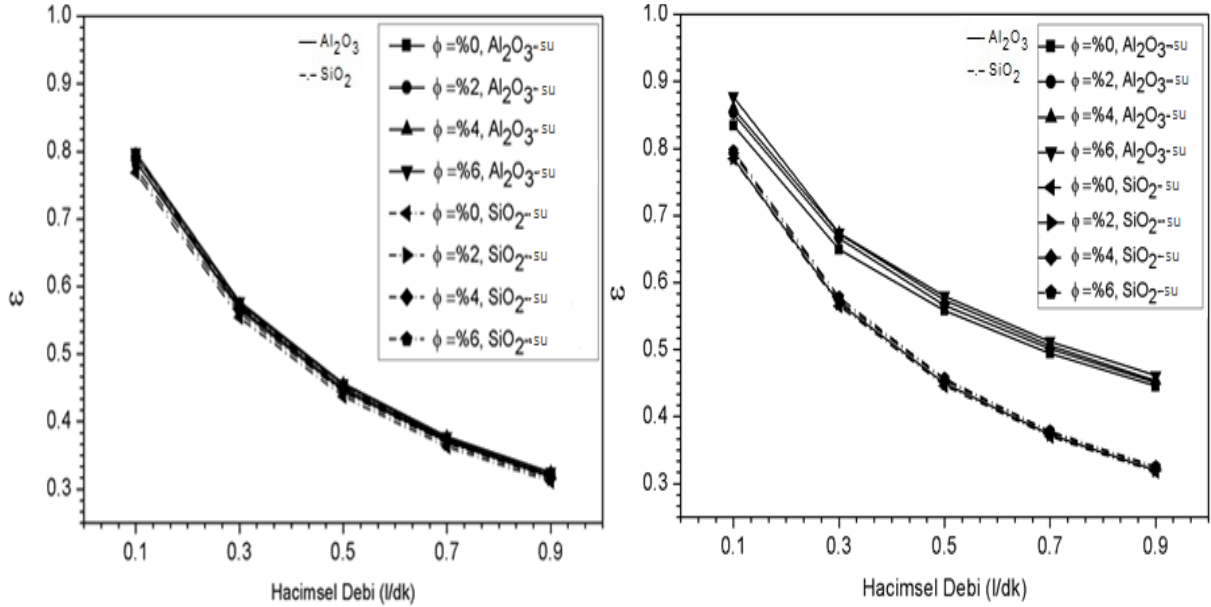
Şekil 4. Zıt akış için sıcak akışkan suyun farklı hacimsel debi (a) 1 l/dk ve (b) 3 l/dk değerleri için, farklı su temelli nanoakışkanların farklı katı hacim konsantrasyonlarında ve hacimsel debilerde Nu değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of the Nu values of different water-based nanofluids at different solid volume concentrations and volumetric flow rates for counter flow (a) 1 l/min and (b) 3 l/min)



b)



(a) (b)
Şekil 5. Zıt akış için sıcak akışkan suyun farklı hacimsel debi (a) 1 l/dk ve (b) 3 l/dk değerleri için, su temelli nanoakışkanların farklı katı hacim konsantrasyonlarında ve hacimsel debilerde basınç düşümü değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of pressure drop values of water-based nanofluids at different solid volume concentrations and volumetric flow rates for different volumetric flow rates of 1 l/min (a) and 3 l/min (b) of hot fluid water for counter flow)



a) b)
Şekil 6. Zıt akış için sıcak akışkan suyun farklı hacimsel debi (a) 1 l/dk ve (b) 3 l/dk değerleri için, farklı su temelli nanoakışkanların farklı katı hacim konsantrasyonlarında ve hacimsel debilerde etkinlik değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of the effectiveness values of different water-based nanofluids at different solid volume concentrations and volumetric flow rates for different volumetric flow rates of 1 l/min (a) and 3 l/min (b) of hot fluid water for counter flow)

4.2 Zıt ve Paralel Akış Karşılaştırması: Al₂O₃- EG ve SiO₂- EG (Counter and Parallel Flow Comparison: Al₂O₃- EG and SiO₂- EG)

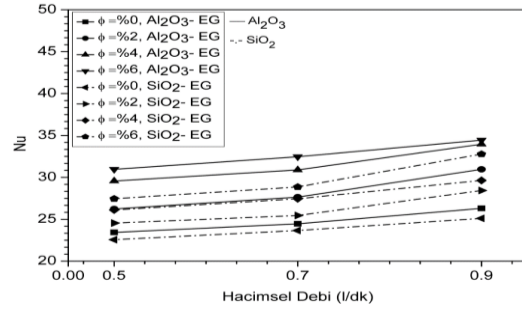
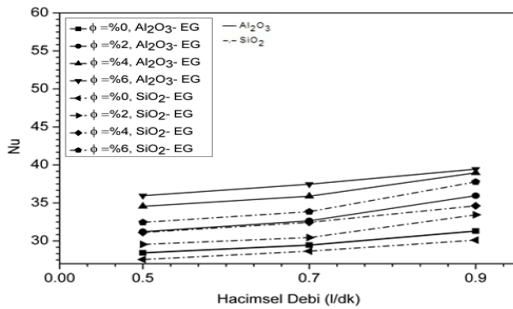
Zıt ve paralel akış altında, dış boru tarafında akan sıcak suyun hacimsel debisi önce 1 l/dk daha sonra 3 l/dk değerinde sabit tutularak, iç borudaki Al₂O₃-EG ve SiO₂-EG nanoakışkanlarının hacimsel debi değerleri 0,5, 0,7 ve 0,9 l/dk için, %0, %2, %4, %6 katı hacim konsantrasyonlarında elde edilen Nu değerleri Şekil 7 'de sunulmuştur. Temel akışkan olarak etilen glikol ele alındığında Nu değerleri, diğer etikol glikol-su karışımı oranlarına kıyasla daha yüksektir. EG temelli

nanoakışkan su ve su- EG temelli nanoakışkanlara göre daha yüksek ısıl iletkenlik katsayısına sahiptir. SiO₂ nanoparçacıklarına kıyasla daha yüksek ısıl iletkenliği olan Al₂O₃ nanoparçacıklarından oluşan EG temelli nanoakışkanlarda daha yüksek Nusselt değerleri görülmektedir. Hem dış boruda akan sıcak suyun hem de iç borudaki nanoakışkanın hacimsel debisinin artışı, ısı transfer miktarını artırmaktadır. Zıt akıştaki Nusselt sayısı değeri paralel akıştakine göre daha yüksektir. Buda ısı geçişi mekanizmalarında zıt akış modelinin kullanımının daha etkin olacağını göstermektedir. Paralel akışta nanoakışkanın içinde bulunan nanoparçacıkların

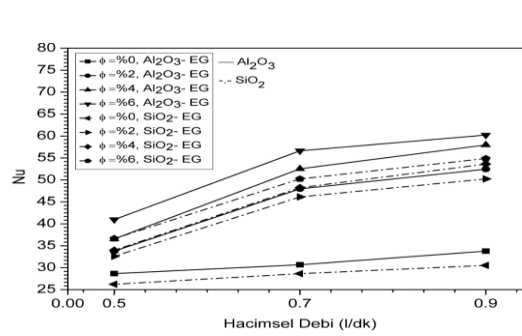
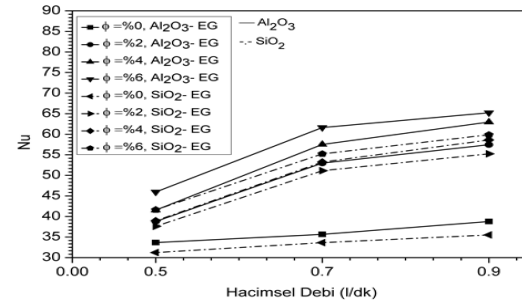
Brownian hareketine bağlı akışkan molekülleri ile aralarındaki ısı transferi miktarı zıt akışta olduğu gibi sirkülasyon ve girdaplar ısı transferi alışverişini aksel ve radyal yönde iletimi yüksek seviyededir. Isı değiştiricinin ısı performansını etkileyen çıkış sıcaklığıdır. Zıt akışlı bir ısı değiştiricideki borularda akan akışkanların çıkış sıcaklıkları arasındaki fark, paralel akışa göre daha yüksektir ve çıkış sıcaklığının daha düşük olması iyi bir soğutma olduğunun göstergesidir.

Şekil 8’de zıt ve paralel akış için basınç düşümü değerleri verilmiştir. Etilen-glikolün temel akışkan içindeki oranının artışına bağlı olarak yoğunluk artışıyla beraber basınç düşümü artmaktadır. Temel akışkan içindeki katı hacim oranının ve yoğunluğun artışıyla beraber basınç düşümü artmaktadır. Ayrıca nanoakışkanın hacimsel debisi arttıkça basınç düşümü de artmaktadır. Al_2O_3 -EG nanoakışkanına kıyasla SiO_2 -EG nanoakışkanının basınç düşümünün daha az olduğu gözlemlenmiştir. Al_2O_3 nanoparçacıklarının yoğunluğu, SiO_2 nanoparçacıklarına nazaran daha yüksektir. Buna bağlı olarak hız arttıkça iç borudaki türbülans artmakta, boru içi sürtünme katsayısı azalmakta ve basınç düşümü artmaktadır. Basınç düşümlerinin paralel akışta, zıt akışa göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ancak ısı transferinin iyileştirilmesinin yanında, basınç düşümü de etkilemektedir.

Şekil 9’ da zıt ve paralel akış için ϵ etkinlik değerleri sunulmuştur. Isı değiştiricinin ϵ etkinliği, sadece etilen glikol kullanıldığında diğer etilen glikol-su karışımı oranlarına kıyasla artmaktadır. Nanoparçacık katı hacim oranı, kullanılan nanoparçacık, temel akışkan etilen glikol-su karışım oranına ve dış borudaki sıcak suyun hacimsel debisine bağlı olarak artmakta ancak nanoakışkanın hacimsel debisi arttıkça azalmaktadır. Zıt akıştaki etkinlik değeri paralel akışa göre daha yüksektir.

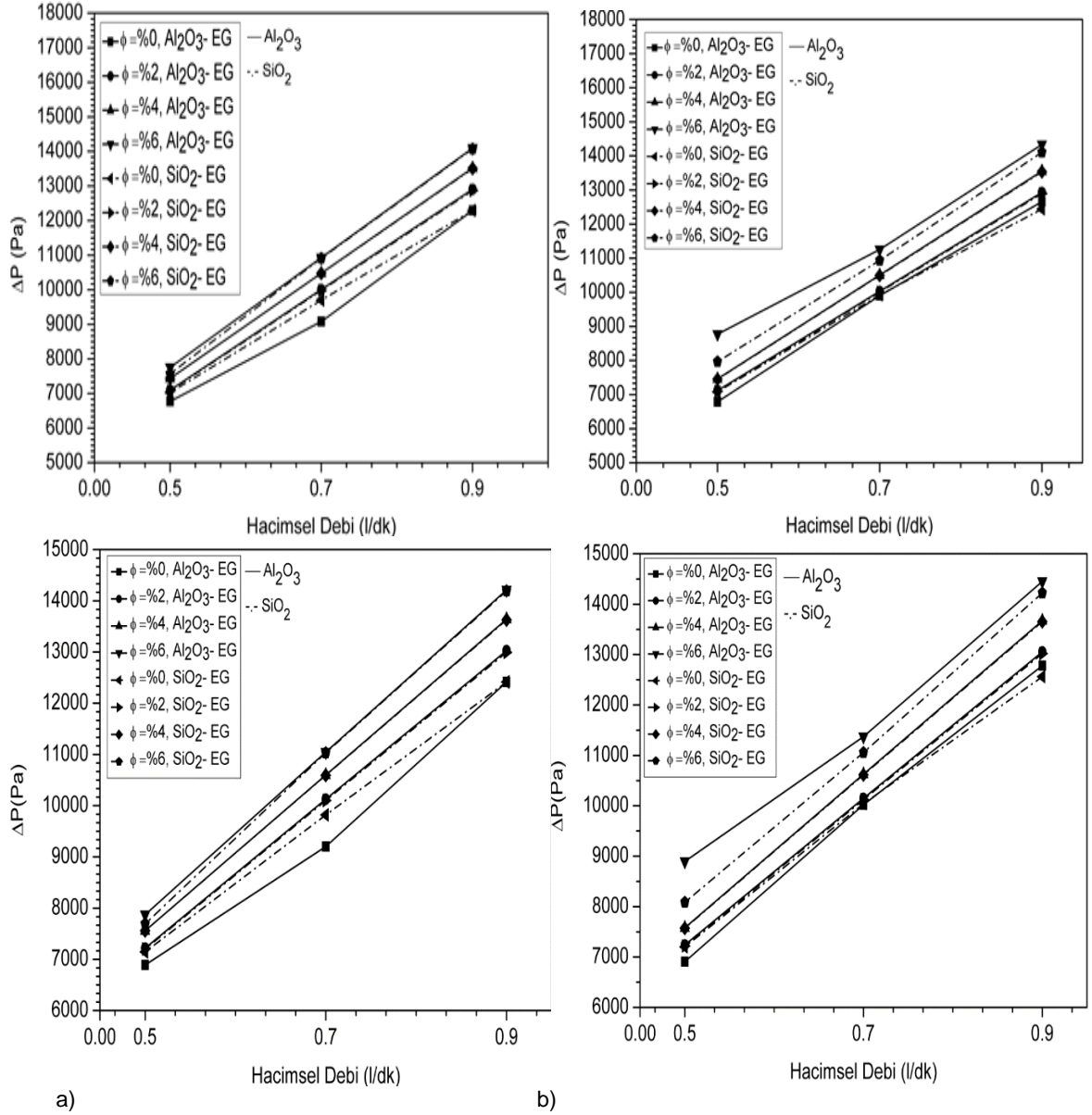


a)

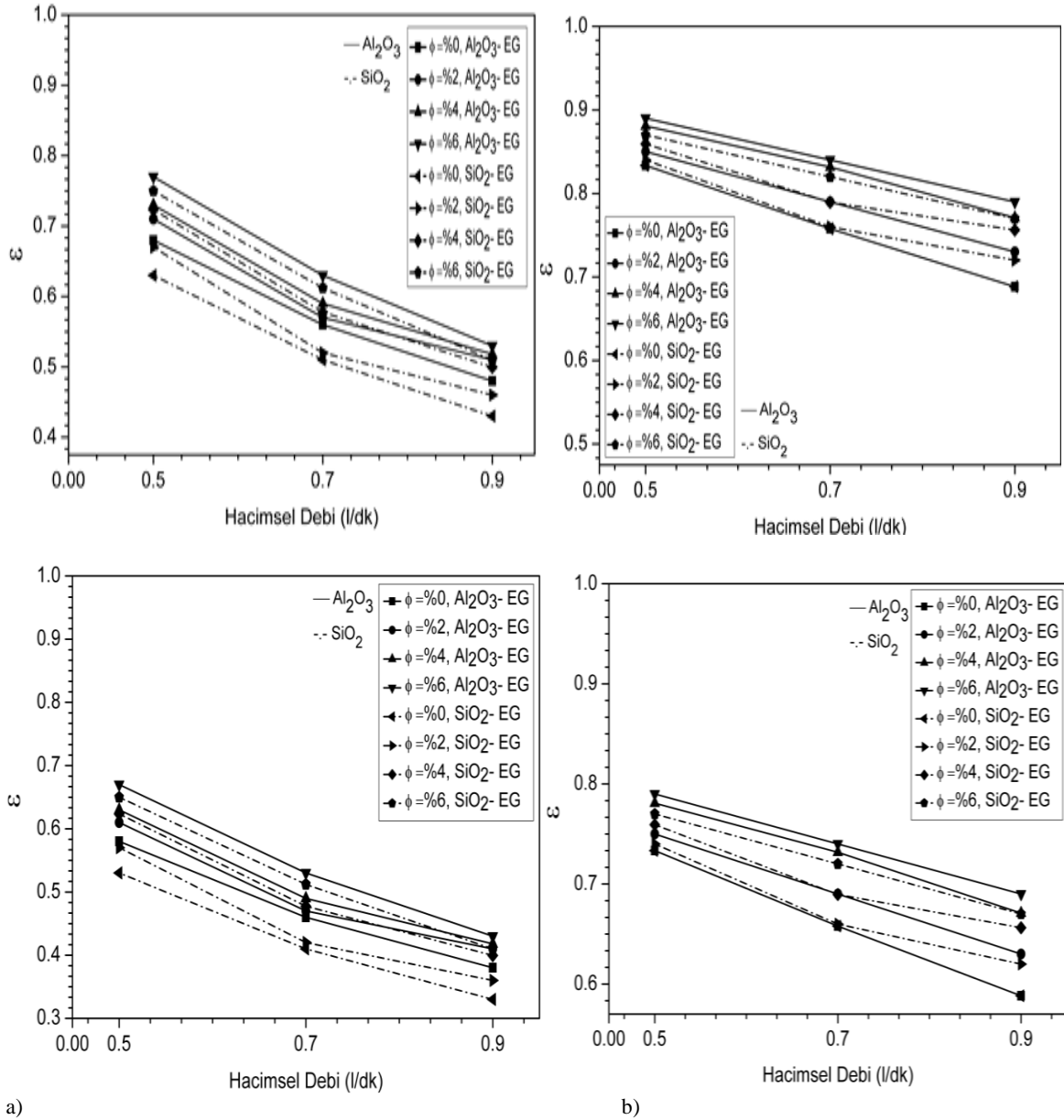


b)

Şekil 7. Zıt (üst) ve paralel (alt) akış için sıcak akışkan suyun farklı hacimsel debi 1 l/dk (a) ve 3 l/dk (b) değerleri için, Al_2O_3 -EG ve SiO_2 -EG nanoakışkanlarının 0,5, 0,7 ve 0,9 l/dk hacimsel debi değerleri ve farklı katı hacim konsantrasyonlarında Nu değerlerinin karşılaştırılması (Different volumetric flow rates of hot fluid water for opposed (top) and parallel (bottom) flows are 1 l/min (a) and 3 l/min (b) values of Al_2O_3 -EG and SiO_2 -EG nanofluids 0.5, 0.7 and 0.9 l/min volumetric flow rate values and comparison of Nu values at different solid volume concentrations)



Şekil 8. Zıt (üst) ve paralel (alt) akış için sıcak akışkan suyun farklı hacimsel debi (a) 1 l/dk ve (b) 3 l/dk değerleri için, Al₂O₃-EG ve SiO₂-EG nanoakışkanlarının 0,5, 0,7 ve 0,9 l/dk hacimsel debi değerleri ve farklı katı hacim konsantrasyonlarında basınç düşümü değerlerinin karşılaştırılması (For opposite (top) and parallel (bottom) flows, different volumetric flow rates of hot fluid water (a) 1 l / min and (b) 3 l / min values, Al₂O₃-EG and SiO₂-EG nanofluids 0.5, 0.7 and 0.9 l / min volumetric flow rate values and comparison of pressure drop values at different solid volume concentrations)



Şekil 9. Zıt (üst) ve paralel (alt) akış için sıcak akışkan suyun farklı hacimsel debi 1 l/dk (a) ve 3 l/dk (b) değerleri için, Al_2O_3 -EG ve SiO_2 -EG nanoakışkanlarının 0,5, 0,7 ve 0,9 l/dk hacimsel debi değerleri ve farklı katı hacim konsantrasyonlarında etkinlik değerlerinin karşılaştırılması (Different volumetric flow rates of hot fluid water for opposed (top) and parallel (bottom) flows are 1 l / min (a) and 3 l / min (b) values of Al_2O_3 -EG and SiO_2 -EG nanofluids 0.5, 0.7 and 0.9 l / min volumetric flow rate values and comparison of efficiency values at different solid volume concentrations)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, borulu ısı değiştiricide temel akışkan olarak %0:100, %60:40, %40:60 ve %100:0 oranlarındaki EG-su karışımli temel akışkan ile Al_2O_3 ve SiO_2 nanoparçacıklarının %0, %2, %4, %6 katı hacim konsantrasyonlarındaki nanoakışkanlar kullanılarak ısı ve hidrolik performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma türbülanslı akış koşullarında yapılmıştır. Elde edilen çalışmalar sonucunda, ısı değiştiricinin Nusselt sayısı, basınç düşümü, etkinlik değerleri, zıt ve paralel akış düzeni, sıcak akışkan ve nanoakışkanın hacimsel debileri, nanoakışkan türü ve nanoparçacık katı hacim

konsantrasyon oranı ile değişimleri irdelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Nanoakışkanların ısı transferine olan etkisi incelendiğinde, temel akışkana nanoparçacık eklenmesiyle ve nanoparçacıkların katı hacim oranının artırılmasıyla, ısı transferinin arttığı görülmüştür. Etilen Glikol- Su karışımli nanoakışkanalarda Etilen Glikol oranı arttıkça, Nusselt sayısının değeri de artmaktadır.

Nanoparçacık türü incelendiğinde, SiO_2 nanoparçacıklarının kullanıldığı nanoakışkanların ısı transferinin iyileştirilmesinde, daha yüksek ısı

iletkenliğe sahip Al_2O_3 nanoparçacık içeren nanoakışkana göre daha az etkin olduğu sonuca varılarak, en uygun Al_2O_3 nanoparçacıklarının içeren nanoakışkan olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı parametreler altında temel akışkan cinsi incelendiğinde; etilen glikol-su karışım oranları % 0:100, % 40:60, % 60:40 ve % 100:0 şeklinde değiştirildiğinde, Etilen Glikol oranı arttığında Nusselt sayısının değeride artmaktadır. Temel akışkan olarak etilen glikol kullanıldığında, su temelli nanoakışkanlara göre, ısı değiştiricinin ısı performansını artırmada daha etkili olduğunu göstermektedir. En yüksek ısı değiştirici etkinlik değeri, Al_2O_3 -EG kullanılan çalışmalardan elde edilmiştir. Ancak ısı transferi artarken, basınç düşümünün çok yüksek değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu ısı değiştiricinin kompakt olmayan ve yüksek pompa gücüne ihtiyaç duyan bir tasarım olması gerektiğini göstermektedir.

Zıt akışta, sıcak suyun sabit hacimsel debi değeri 1 l/dk ve nanoakışkanın hacimsel debi değeri 0,5 l/dk alındığında, %2 katı hacim konsantrasyonu için Al_2O_3 -su ve SiO_2 -su nanoakışkanlarının Nu değerlerinde, su yerine nanoakışkan kullanılmasıyla sırasıyla %8,2 ve %6,1 oranında artış olurken, aynı şartlar altında paralel akışta sırasıyla % 7,2 ve % 5,6 oranında artış olmuştur. Aynı parametreler altında, zıt akışta, etilen glikol-su karışım oranı değiştirilerek elde edilen Al_2O_3 -%60:40 EG/su ve Al_2O_3 -%40:60 EG/su nanoakışkanları için, Al_2O_3 -%60:40 EG/su nanoakışkanın Nusselt değerinde, Al_2O_3 -%40:60 EG/su nanoakışkanına kıyasla %12,1 oranında artış olurken, paralel akışta %11,3 oranında artış olmuştur. Aynı parametreler altında, zıt akışta, etilen glikol-su karışım oranı değiştirilerek elde edilen SiO_2 -%60:40 EG/su ve SiO_2 -%40:60 EG/su nanoakışkanları için, SiO_2 -%60:40 EG/su nanoakışkanının Nusselt değerinde, SiO_2 -%40:60 EG/su nanoakışkanına kıyasla %9,3 oranında artış olurken, paralel akışta %7,6 oranında artış olduğu gözlemlenmiştir.

Zıt akışta, sıcak su ve nanoakışkanların sabit hacimsel debi değerleri ve nanoakışkanların katı hacim konsantrasyonları artırıldığında, sıcak akışkan su için sabit hacimsel debi değeri 3 l/dk ve nanoakışkanların sabit hacimsel debi değeri 0,9 l/dk ve %6 katı hacim konsantrasyon değeri alındığında, Al_2O_3 -EG ve SiO_2 -EG nanoakışkanlarının Nu değerlerinde, su kullanılmasına kıyasla sırasıyla, %15,4 ve %9,1 oranında artış olurken, aynı şartlar altında paralel akışta sırasıyla % 12,3 ve % 8,52 oranında artış olduğu görülmüştür.

Isı değiştirici, zıt akış düzeninde tasarlandığında, paralel akışa göre daha iyi ısı performans göstermiştir. Bunun sebebi ise, ısı değiştiricinin ısı performansını etkileyen çıkış sıcaklığıdır. Zıt akışlı bir ısı değiştiricide borularda akan akışkanların çıkış sıcaklıkları arasındaki fark, paralel akışa göre daha yüksektir ve çıkış sıcaklığının daha düşük olması iyi bir soğutma olduğunun göstergesidir. Nu değerlerinin artışının yanında, basınç düşümlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Ancak ısı transferinin iyileştirilmesinin yanında, basınç düşümünü de etkilemiştir.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

ΔP	: Basınç değişimi, (Pa)
M	: Temel akışkan mol kütlesi, (g/mol)
L	: Boru uzunluğu, (mm)
f	: Darcy sürtünme faktörü
h_o	: Dış boru ısı taşınım katsayısı, (W/m ² K)
$D_{o,o}$: Dış boru dış çap, (mm)
$D_{o,i}$: Dış boru iç çap, (mm)
$D_{o,h}$: Dış boru hidrolik çapı (mm)
ε	: Etkinlik
C_f	: Fanning sürtünme faktörü
V	: Hacimsel debi, (l/dk)
A_s	: Isı transferi kesit alanı, (m ²)
β	: Isıl genleşme katsayısı
k	: Isıl iletkenlik katsayısı, (W/mK)
h_i	: İç boru ısı taşınım katsayısı, (W/m ² K)
$D_{i,o}$: İç boru dış çap, (mm)
$D_{i,i}$: İç boru iç çap, (mm)
$D_{i,h}$: İç boru hidrolik çapı (mm)
ϕ	: Katı hacim oranı
ΔT_m	: Logaritmik ortalama sıcaklık farkı, (K)
d	: Nanoparçacık çapı, (nm)
Nu	: Nusselt sayısı
V_{ort}	: Ortalama hız (m/s)
C_p	: Özgül ısı, (kJ/kg K)
Pr	: Prandtl sayısı
Re	: Reynolds sayısı
\dot{Q}_{sic}	: Sıcak akışkandan olan ısı transferi miktarı, (W)
\dot{m}_{sic}	: Sıcak akışkanın debisi, (kg/m.s)
T	: Sıcaklık, (K)
$\dot{Q}_{soğ}$: Soğuk akışkandan olan ısı transferi miktarı, (W)
$\dot{m}_{soğ}$: Soğuk akışkanın debisi, (kg/m.s)
κ	: Stefan-Boltzmann sabiti, $1,381 \times 10^{-23}$ (J/K)
U	: Toplam ısı transfer katsayısı, (W/m ² K)
μ	: Viskozite, (kg/m.s)
ρ	: Yoğunluk, (kg/m ³)
τ_w	: Yüzey gerilimi (kg/s ²)

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Elif ÖĞÜT: Analizlerde kullanılacak materyal ve yöntemleri belirlemiş, sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Seda DİLKİ: Analizleri yapmış ve analiz çıktılarını oluşturmuştur.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Choi S.U.S., Eastman J.A., "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles", Argonne National Lab., ANL/MSD/CP-84938, (1995).
- [2] Chein R. and Chuang J., "Experimental microchannel heat sink performance studies using nanofluids", *International Journal of Thermal Sciences*, 46,(1): 57-66, (2007).
- [3] Lee J. and Mudawar I., "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, (2007).
- [4] Trisaksri V. and Wongwises S., "Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(3), 512-523, (2007).
- [5] Wang X. and Mujumdar A.S., "Heat transfer characteristics of nanofluids: a review", *International Journal of Thermal Sciences*, 46, 11-19, (2007).
- [6] Daungthongsuk W. and Wongwises S., "A critical review of convective heat transfer of nanofluids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 797-817, (2007).
- [7] Choi S.U.S., Wang X. and Xu X., Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture, *Journals of Thermophysics and Heat Transfer*, 13(4), 474-480, (1999).
- [8] Farajollahi B., Etemad S.G., Hojjat M., "Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53 12-17, (2010).
- [9] Zamzamin S., Oskouie N., Doosthoseini A., Joneidi A., "Experimental investigation of forced convective heat transfer coefficient in nanofluids of Al₂O₃/EG and CuO/EG in a double pipe and plate heat exchangers under turbulent flow", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(3), 495-502, (2011).
- [10] Pantzalia M.N., Kanarisa A.G., Antoniadis K.D., Mouza A.A., Paras S.V., "Effect of nanofluids on the performance of a miniature plate heat exchanger with modulated surface", *International Journal Heat and Fluid Flow*, 30, 691-699, (2009).
- [11] Abed A.M., Alghoul M.A., Sopian K., Mohammed H.A. and Majidi H., "Design characteristics of corrugated trapezoidal plate heat exchangers using nanofluids", *Chemical Engineering and Processing*, 87, 88-103, (2015).
- [12] Tiwari A. K., Ghosh P. and Sarkar J., "Performance comparison of the Plate Heat Exchanger using Different Nanofluids", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 49, 141-151, (2013).
- [13] Aghabozorg M.H., Rashidi A. and Mohammadi S., *Experimental Thermal and Fluid Science*, 72, 182-189, (2016).
- [14] Kim, D., et al., "Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions", *Current Applied Physics*, 9(2), 119-123, (2009).
- [15] Liu Z.H., Li Y.Y., Bao R., "Thermal performance of inclined grooved heat pipes using nanofluid", *International Journal of Thermal Sciences*, 49(9), 1680-1687, (2010).
- [16] Heris S.Z., Esfahany M.N., Etemad S.G., "Experimental investigation of convective heat transfer of Al₂O₃/water nanofluid in a circular tube", *International Journal Heat and Fluid Flow*, 28, 203-210, (2007).
- [17] Pak B.C., Cho Y.I., "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles", *Experimental Heat Transfer an International Journal*, 11(2), 151-170, (1998).
- [18] Huminic G., Huminic A., Morjan I., Dumitrache F., "Experimental study of the thermal performance of thermosiphon heat pipe using iron oxide nanoparticles", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(1-3): 656-661, (2011).
- [19] Alasadi M., Albadr J., Tayal S., "Heat transfer through heat exchanger using Al₂O₃ nanofluid at different concentrations", *Case Studies in Thermal Engineering*, 1, 38-44, (2013).
- [20] Parameswara B., Nageswara V., Ramana Murthy Naidu S.C.V., Veeraiyah T., "Heat Transfer Enhancement in Double Pipe Heat Exchanger by Alumina - Water Nanofluid", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 5, (3), 4060-4064, (2018).
- [21] Ding Z., Qi C., Luo T., Wang Y., Tu J., Wang C., "Numerical simulation of nanofluids forced convection in a corrugated double-pipe heat exchanger", *Can. J. Chem. Eng.*, 1-11, <https://doi.org/10.1002/cjce.24267> (2021).
- [22] Keya S.T., Yeasmin S., Rahman M.M., Karim M.F., Amin M.R., "Mixed convection heat transfer in a lid-driven enclosure with a double-pipe heat exchanger", *International Journal of Thermofluids*, 13, 100131, (2022).
- [23] Singh S.K., Sarkar J., "Improvement in energy performance of tubular heat exchangers using nanofluids a review", *Current Nanoscience*, 16, 136-156, (2020).
- [24] Gurbuz E.Y., Özen A., Varyenli H.İ., Khanlari A., Tuncer A.D., "A comparative study on utilizing hybrid-type nanofluid in plate heat exchangers with different number of plates", *Journal of the Brazilian Society of Mech. Sci. and Eng.*, 42, 10, (2020).
- [25] Çiftçi E., Sözen A., ve Karaman E., "TiO₂ içeren nanoakışkan kullanımının ısı borusu performansına etkisinin deneysel olarak incelenmesi", *Politeknik Dergisi*, 19(3): 367-376, (2016).
- [26] Kumar N., Sonawane S.S., Sonawane S.H., "Experimental study of thermal conductivity, heat transfer and friction factor of Al₂O₃ based nanofluid", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 90, 1-10, (2018).
- [27] ANSYS Fluent User's Guide Canonsburg, Fluent Inc., (2013).
- [28] Brinkman H.C., "The viscosity of concentrated suspensions and solutions", *Journal of Chemical Physics*, 4, 571-581, (1952).
- [29] Xuan, Y. and Roetzel, W., "conceptions for heat transfer correlation of nanofluids", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 43,3701-3707, (2000).
- [30] Yu W. and Choi S.U.S., "The role of interfacial layer in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated maxwell model", *J Nanoparticles Res.*, 5, 167-171, (2003).

- [31] Pethukov B.S., “Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties”, *Advances in Heat Transfer*, 6,503- 565, (1970).
- [32] Dilki, S., “*Borulu Isı Değiştiricilerinde Kullanılan Nanoakışkanların Isı Transfer Karakteristiklerinin Sayısal Olarak İncelenmesi*”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, (2020).
- [33] Baby S., Jonhson J., “Numerical investigation on the heat transfer characteristics of alumina-water nanofluid in a double pipe heat exchanger”, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 5(3),3976-3983, (2018)