

Grafen-Demir Oksit Hibrit Nanoakışkanlarının Isıl ve Hidrolik Performanslarının Sayısal Olarak İncelenmesi

Orhan KEKLİKİOĞLU¹, Veysel ÖZCEYHAN^{*2}

¹ Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, KAYSERİ

^{*2} Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 01.03.2021, Kabul / Accepted: 17.08.2021, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2021)

Anahtar Kelimeler

Isı transferi iyileştirme,
Nanoakışkanlar,
Basınç düşümü,
Termohidrolik performans

Öz: Bu çalışmada dairesel kesite sahip düz bir ısı değiştirici borusu içerisinde %0.5-1 aralığında altı farklı hacimsel karışım oranına sahip Grafen-Demir Oksit-Su hibrit nanoakışkanının türbülanslı akım koşullarında termohidrolik performansı sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma tek fazlı akış için, sabit yüzey ısı akısı uygulanarak 10000-50000 Reynolds sayısı aralığında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda Grafen-Demir Oksit-Su hibrit nanoakışkan kullanımının ısı transferinde etkili bir artış sağladığı, bunun yanında, sürtünme katsayısında ise radikal bir değişikliğe sebep olmadığı tespit edilmiştir. Nanoakışkan hacimsel karışım oranının artmasıyla birlikte termohidrolik performans katsayısında ciddi bir artış elde edilirken, artan Reynolds sayısı ile birlikte termohidrolik performans katsayısının düşüş gösteren bir eğilim gösterdiği elde edilmiştir. Grafen-Demir Oksit-Su hibrit nanoakışkan kullanımıyla yalnızca taban akışkan olan su kullanımına oranla Nusselt sayısında elde edilen en yüksek artış %24 olarak gerçekleşirken, sürtünme katsayısındaki artış en yüksek % 9 olarak elde edilmiştir. Elde edilen en yüksek termohidrolik performans katsayısı, %1 Grafen-Demir Oksit-Su hibrit nanoakışkan kullanımında 10000 Reynolds sayısı için 1.20 olarak gerçekleşmiştir.

Numerical Investigation of Thermal and Hydraulic Performance of Graphene and Iron Oxide Hybrid Nanofluids

Keywords

Heat transfer enhancement,
Nanofluids,
Pressure drop,
Thermohydraulic
performance

Abstract: In this study, the thermohydraulic performance of the Graphene-Iron Oxide-Water hybrid nanofluid with six different volumetric fractions in the range of 0.5-1% in a circular-sectioned smooth heat exchanger tube under turbulent flow conditions was numerically investigated. Numerical study was carried out for single phase flow by applying constant surface heat flux in the range of 10000-50000 Reynolds number. In the results, it has been obtained that the use of Graphene-Iron Oxide-Water hybrid nanofluid provides an effective increase in heat transfer, but does not cause a radical change in the friction factor. It was found that the thermohydraulic performance increased significantly with the increase in the nanofluid volumetric fraction, while the thermohydraulic performance showed a decreasing trend with increasing Reynolds number. With the use of Graphene-Iron Oxide-Water hybrid nanofluid, the highest increase in Nusselt number was 24% compared to water, which is the base fluid, while the highest increase in friction coefficient was 9%. The highest thermohydraulic performance coefficient obtained was 1.20 for the Reynolds number of 10000 and using 1% Graphene-Iron Oxide-Water hybrid nanofluid.

*İlgili Yazar, email: ozceyhan@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Karmaşık mühendislik sistemlerinde sıcaklık kontrolü, enerjinin verimli kullanılabilirliğini artırmasının yanında bu sistemlerin bütünü ya da sistemde yer alan elemanların tekil olarak kullanım ömürlerini uzatmakla birlikte, çalışma stabilizasyonu da sağlamaktadır. Sıcaklık kontrolünün sağlanmasında en sık kullanılan mühendislik sistemlerinden bir tanesi olan ısı değiştiricilerinin performanslarının artırılması, bağlı bulunduğu sistemin verimini doğrudan etkilemektedir. Bu kapsamda araştırmacılar ısı değiştiricilerinin ısı transferi kabiliyetlerini

arttırmak amacıyla çeşitli çalışmalar yapmaktadırlar. Bu çalışmalar, yoğunlukla pasif metot olarak bilinen ve kolay kuruluma sahip, bakım masrafı gerektirmeyen, dışarıdan herhangi bir enerji girişine ihtiyaç duymayan ve daha yüksek verimli ısı değiştiricisi tasarlanmasında kullanılan teknikler üzerinedir. Pasif yöntemler kullanılarak ısı değiştiricilerinin termal verimlerinin artırılması çalışmalarına ek olarak, son yıllarda nanoteknolojik mühendislik uygulamalarının karmaşık sistemlere adaptasyonu ile birlikte, ısı değiştiricilerinde nanoakışkanların kullanımı hızla yaygınlaşmakta, temel ısı transfer akışkanı olan su, mono etilen glikol, propilen glikol, yağ vb. akışkanların yerine nanopartikül içeren akışkanların kullanılması dikkat çekmektedir.

Nanopartiküllerin temel akışkan tiplerinde uygulanmasında ki birincil hedef, akışkanın içerisine ısı iletim katsayısı yüksek katı faz yapısına sahip tanecikler eklenerek akışkan tipinin ortalama ısı transfer katsayısını artırmak ve bu hedef doğrultusunda sistemlerden ısı yükü çekmek ya da ısı yükün geri dönüşümünü sağlayarak ısı kaybını azalmaktadır. Aynı zamanda akışkan içerisine eklenen katı partiküller, akışkanın ısı iletim katsayısını artırmakla birlikte akış içerisinde çalkantı oluşumuna, yüzey alanının artmasına, partiküllerin birbiri ile çarpışarak mikro-taşınım karakteristiğini geliştirmesine ve dolayısıyla ısı transfer hızının artmasına katkı sağlamaktadır [1]. Nanopartiküllerin temel akışkanlara karıştırılması ile elde edilen nanoakışkanların, termodinamik özelliklerinin su, yağ, etilen glikol gibi geleneksel akışkanlara oranla gelişmiş olması ısı transferi iyileştirmesi konusu üzerine yapılan çalışmalarda nanoakışkan kullanımını artırmıştır. Bu çalışmalara bakıldığında çok çeşitli nanopartikül tipleri (Al_2O_3 , TiO_2 , CuO , SiO_2 , ZnO , GO , Fe_3O_4 , GnP vd.) olan metaller, oksitler ve nanokarbon tüpler kullanıldığı görülmektedir [2].

Nanoakışkan kullanımı üzerine yapılan ısı ve hidrolik performans araştırma çalışmaları 2017 yılı ile birlikte çeşitlenmeye başlamış ve Grafen nanopartikülü ile birlikte farklı bir partikülün hibrit olarak kullanılmasına yönelik çalışmaların tamamı 2017 yılından sonra yapılan çalışmalardan oluşmaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda Ghosatloo vd. [3] iç içe borulu bir ısı değiştiricisinde üç farklı ağırlık oranına sahip % 0.05, 0.075, 0.1 grafen-su nanoakışkanı kullanarak hem ısı iletkenlik katsayısındaki artışı hem de taşınım gerçekleşen ısı transferi miktarındaki artışı incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda, ısı transfer katsayısında artan grafen nanopartikül ağırlık oranı ile arttığı % 0.1 ağırlık oranında ısı transfer katsayısında % 23.9 artış elde edildiği ifade edilmiştir. Sadeghinezhad vd. [4] %0.025 – 0.1 aralığında değişen ağırlık oranlarına sahip grafen-su nanoakışkanı üzerine yaptıkları çalışmada, 5000-22,000 Reynolds sayısı aralığında bir boru içerisinde termal performans analizi gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda grafen nanopartikülü kullanımıyla ısı transfer katsayısı ve Nusselt sayısında önemli artış sağladığı belirtilmiştir. Selvam vd. [5] bir otomobil radyatöründe su-etilen glikol baz akışkanı içerisine, hacimsel konsantrasyon oranı %0.1–0.5 aralığında değişen grafen nanopartikülleri ekleyerek, ısı transfer katsayısındaki iyileşme miktarına olan etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda ısı transfer katsayısında yaklaşık % 104 oranında iyileşme sağlandığı belirtilmiştir. Sarafraz vd. [6] (%0.025–0.1) aralığında ağırlık oranı kullanarak grafen-su nanoakışkanının bir mikrokanal içerisinde ısı transferine olan etkisini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre ısı transferi iyileştirme değeri 1.89, Reynolds sayısının en düşük değeri aldığı 25039 sayısında ve kullanılan en yüksek ağırlık oranı % 0.1 değerinde elde edilmiştir. Askari vd. [7] 2017 yılında yaptığı deneysel incelemede Fe_3O_4 / Grafen nanopartiküllerini tekil ve hibrit olarak %0.1, 0.2, 1.0 ağırlık oranlarında su taban akışkanına ekleyerek, 2000-5000 Reynolds sayısı aralığında nanopartikül içermeyen akışta akışında termal özelliklerini tespit etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre ısı iletkenlik katsayısında taban akışkana göre %14-32 aralığında iyileşme elde edilmiştir. Buna ek olarak 4248 Reynolds sayısında Demir Oksit-Su nanoakışkanı için %8.5 Demir Oksit/Grafen hibrit nanoakışkanı için ise %14.5 ısı transfer katsayısında artış tespit edilmiştir. 2017 yılında yapılan bir diğer çalışmada Yarmand vd. [8] 2017 yılında Grafen nanopartikülü ve Platin nanopartikülünü hibrit olarak kullandıkları deney sisteminde 17,500 Reynolds sayısı ve %0.1 ağırlık konsantrasyonunda yalnızca Grafen nanopartikülünün kullanıldığı nanoakışkan sonuçlarına kıyasla %28.48 Nusselt sayısında iyileşme elde edildiğini belirtmiştir. Ortaya çıkan bu iyileşmenin nanokompozit (hibrit) yapıların sinerjetik etkisinin ve termal iletkenliğin yükselmesinin bir sonucu olduğu ifade edilmiştir. Aynı konfigürasyon sonuçlarına göre ısı transfer katsayısının %49.16 oranında arttığı, bu artışta ise nanokompozit yapının nanoakışkanın termodinamik özelliklerini daha iyi duruma getirmesinin ve nanoakışkanın Brownian hareketinin etkili olduğu belirtilmiştir. 2019 yılında yapılan çalışmalarında Bahiraei vd.[9] sayısal olarak Grafen ve Platin nanopartiküllerinin kullanıldığı nanoakışkan alanı içerisinde üç farklı bükülmüş şerit eleman kullanarak ısı transferine olan etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada bir deney borusu içerisinde üç farklı büküm oranında ve bir adet tekil ve iki adet ikili (zıt ve aynı yönlü) kullanım şeklinde konfigürasyonları oluşturulan bükülmüş şerit elemanların, nanoakışkan ile kullanılmasının suya göre çok daha verimli olduğu ifade edilmiştir. Boru içerisinde birbirine zıt biçimde yerleştirilen bükülmüş şerit eleman ile hibrit nanoakışkan kullanımının akış içerisindeki çalkantıyı artırmasından dolayı ısı transferini iyileştirme konusunda diğer modellere göre daha üstün olduğu ifade edilmiş ve en yüksek konsantrasyon oranı olan %0.1 nanoakışkan kullanımında ve 2.5 büküm oranında Nusselt sayısının suyun kullanıldığı ve iç eleman içermeyen akışa göre yaklaşık 2.1 kat artırıldığı rapor edilmiştir. Bahiraei vd.[10] bir diğer çalışmalarında entropi üretim analizini, Grafen ve Platin nanopartiküllerinin kullanıldığı nanoakışkan alanı içerisinde zıt ve aynı yönlü ikili bükülmüş şerit elemanlar kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda taban akışkan yerine nanoakışkan kullanımının entropi üretimini dolayısıyla tersinmezlikleri azalttığı ifade edilmiş ve kullanılan zıt yönlü bükülmüş şerit elemanın sınır tabakayı daha iyi parçaladığından

dolayı entropi üretimini %10 oranında düşürdüğü belirtilmiştir. Bahiraei vd.[11] gerçekleştirdikleri son çalışmalarında iç içe borulu bir ısı değiştiricisi modelinde Grafen-Platin hibrit nanoakışkanı ile birlikte dikey engeller kullanarak ısı transferindeki iyileştirme miktarını analiz etmişlerdir. Bu çalışma neticesinde ısı transferini iyileştirme açısından en iyi performans gösteren modelin, engeller arası mesafenin en kısa olduğu, engel yüksekliğinin en uzun olduğu ve hibrit nanoakışkan karışım oranının en yüksek olduğu model olduğu belirtilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmalardan anlaşılacağı üzere ısı transferi iyileştirme üzerine gerçekleştirilen Grafen nanopartikülü ile Demir Oksit nanopartikülünün birlikte kullanıldığı çalışmalar henüz çok yeni ve sınırlı sayıdadır. Grafen ve Demir Oksit nanopartikülü genellikle hibrit olarak enerji depolama ve kompozit malzeme çalışmalarında kullanılmıştır. Bu çalışmalardan Wang ve Liu [12] tarafından derlenen makalede Grafen ve Demir Oksit hibrit kullanımının enerji depolamada etkisi incelenmiş, Demir Oksit nanopartikülünün düşük stabiliteye ve iletkenliğe sahip olmasından dolayı ortaya çıkan problemlerin, Grafen nanopartikülünün stabilitesinin ve iletkenliğinin görece çok daha yüksek olmasıyla önüne geçildiği ve aynı zamanda Grafen nanopartikülünün stabilitesi ve diğer termofiziksel özelliklerinin de Demir Oksit ile birlikte hibrit kullanımında iyileştiği ifade edilmiştir. Lu vd.[13] tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışma da Demir Oksit nanopartikülünün düşük maliyet, yüksek miktarda bulunurluk gibi diğer nanopartiküllere oranla belirli üstünlüklere sahip olsa da, düşük iletkenlik değeri, çökelmeye eğimli yapısı nedeniyle uygulama da zayıflıklara sahip olduğu belirtilmiştir. Bu zayıflıkları giderebilmek amacıyla 2 boyutlu yapısı ve benzersiz atom kalınlığı, yüksek yüzey alanı, yüksek stabilite ve daha iyi termofiziksel özellikleriyle dikkat çeken Grafen nanopartikülü ile hibrit kullanımının ön plana çıkması gerektiği vurgulanmış ve bu nanopartiküllerden oluşan hibrit yapıların birçok alanda kullanılmasının gerekliliği ifade edilmiştir. Tüm bunlara ek olarak bu çalışma sonucunda Demir Oksit ve Grafen nanopartiküllerin farklı geometrik yapılarla sahip olmasının ayrıca bir avantaj sağlayacağı ifade edilmiş, hibrit kullanım ile birlikte Grafen nanopartikülü plakaları arasında yer alacak olan Demir Oksit nanopartiküllerin Grafen nanopartikülünün çökmesini geciktireceği belirtilmiştir. Tekil ve hibrit nanoakışkanlar üzerine yapılan bir diğer incelemede Sylwia Wcislik [14] hibrit nanoakışkan modellerinde, düşük maliyete sahip nanopartikül ve görece daha yüksek maliyete sahip nanopartiküllerin birlikte kullanılmasıyla termofiziksel özellikler açısından değerli sonuçlar elde edilirken, yüksek maliyet problemlerinin de önüne geçildiği ifade edilmiştir.

Grafen nanopartikülü son yıllarda ısı transferi konusunda üzerine araştırma yapılan partiküller arasında yer almaktadır. Grafen nanopartikülü diğer metal oksit ve metal nanopartiküllere oranla yüksek termal iletkenliğe (yaklaşık 3000W/mK[15]) ve yine diğer nanopartiküllere oranla daha yüksek stabilizasyon yeteneğine sahip olmasından dolayı [16] bu çalışmada kullanılan ilk partikül olmuştur. Grafen nanopartikülü ile birlikte hibrit olarak kullanılacak olan Demir Oksit nanopartikülü ise ısı transferi iyileştirme çalışmasında hibrit biçimde yalnızca bir çalışmada laminer akım koşullarında kullanılmış olmasından ve manyetik özellik göstermesinden dolayı kimya, mekanik, ilaç eklentileri, elektromanyetik ve biyomedikal alanlarındaki uygulamalarda yapılan çalışmalarda Grafen nanopartikülü ile birlikte uyumlu bir biçimde kullanıldığı rapor edildiğinden[17-21], tercih edilen ikinci metal-oksit nanopartikül olmuştur.

Gerçekleştirilen çalışmada termal iletkenliğinin çok yüksek olduğu bilinen Grafen nanopartikülü ve su, etilen glikol, yağ vb. temel akışkanlara göre çok daha yüksek termal iletkenlik özelliğine sahip Demir Oksit nanopartikülünün hibrit olarak kullanılmış olması hem temel akışkanının ısı iletim katsayısını artırarak ısı transfer hızını iyileştirmekte, hem de Grafen ve Demir Oksit nanoparçacıkları Brownian hareketine bağlı olarak akışkan içerisinde rastgele dağılım gösterip birbirleri ile çarpışarak enerjinin aktarılmasını sağlamaktadır. Bunun yanında hibrit nanopartiküller ısı transfer yüzey alanını artırmalarından ve mikro taşınım karakteristiği taşınmalarından dolayı akış alanı içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımının oluşmasında etkin rol oynamaktadır. Yukarıda incelenen çalışmalarda kullanılan nanoakışkan hacim oranlarının genellikle %0.5 ve daha düşük oranlarda olduğu tespit edilmiş ve çoğunlukla laminer akım koşullarında ısıl ve hidrolik performans incelemesi yapılmıştır. Bu çalışmalardan farklı olarak % 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 ve 1 hacim oranlarında Grafen ve Demir Oksit nanopartikülleri hibrit olarak kullanılarak, türbülanslı akım koşullarında performans analizi gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metod

2.1. Sayısal yöntem

Bu çalışmada sayısal analizler için ANSYS Fluent 18'de sonlu hacimler metodu uygulanarak çözüm elde edilmiştir. Tek fazlı akış şartı tanımlanarak gerçekleştirilen analizlerde türbülans modeli olarak $k - \epsilon$ RNG(Re-Normalisation Group) modeli seçilmiş, basınç ve hız arasındaki ilişkiyi değerlendirebilmek için SIMPLE algoritma düzeni, konveksiyonun değerlendirilmesi için ise QUICK düzeni kullanılmıştır. Süreklilik, hız, enerji, k ve ϵ değerleri için yakınsama kriteri 1×10^{-5} olarak değerlendirilmiştir. Türbülans modelleri arasında hassas çözüm sağlayabilen $k - \epsilon$ RNG modeli temel olarak üç korunum eşitliği kullanılmaktadır ve bunlar sırasıyla Eşitlik 1, 2 ve 3'de verilmiştir[22].

Kütlenin korunumu:

$$\nabla(\rho\vec{V}) = 0 \quad (1)$$

Momentumun korunumu:

$$\nabla(\rho\vec{V}\vec{V}) = -\nabla P + \nabla(\mu\nabla\vec{V}) \quad (2)$$

Enerjinin korunumu:

$$\nabla(\rho c_p \vec{V}T) = \nabla(k\nabla T) \quad (3)$$

Kullanılan çözüm metodu RNG için ise taşınım eşitlikleri k ve ϵ için sırasıyla Eşitlik 4 ve 5'de verilmiştir [18].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_m + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (5)$$

Bu eşitliklerde G_k hız gradyanından kaynaklanan G_b ise kaldırma kuvvetlerinden kaynaklanan türbülans kinetik enerjinin üretim değerini simgeler. α_k ve α_ϵ sırasıyla k ve ϵ için ters etkili Prandtl sayıları olarak ifade edilirken, S_k ve S_ϵ kullanıcı tarafından girilebilen kaynak verileri olarak tanımlanmıştır. Modelde kullanılan sabitlerin değerleri ise $C_\mu = 0:0845$; $C_{1\epsilon} = 1:42$; $C_{2\epsilon} = 1:68$; $\beta = 0:012$; $\eta_0 = 4:38$ olarak verilmiştir [22].

2.2. Sayısal çalışma modeli ve sınır şartları

Gerçekleştirilen bu çalışmada Şekil 1.'de verilen 3 boyutlu boru Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği çözümü için model kabul edilerek analizler yapılmıştır. Geometrik model üç ana parçadan oluşan dairesel bir borudan oluşmakla birlikte, boru içerisinde akışın hidrodinamik olarak gelişebilmesi için hidrodinamik gelişme bölgesi, üzerine sabit ısı akısı uygulanan test bölgesi ve akışkan çıkışında oluşacak geri akımların etkilerinin engellenmesi için ise çıkış bölgesini içermektedir.



Şekil 1. Sayısal çalışma modeli

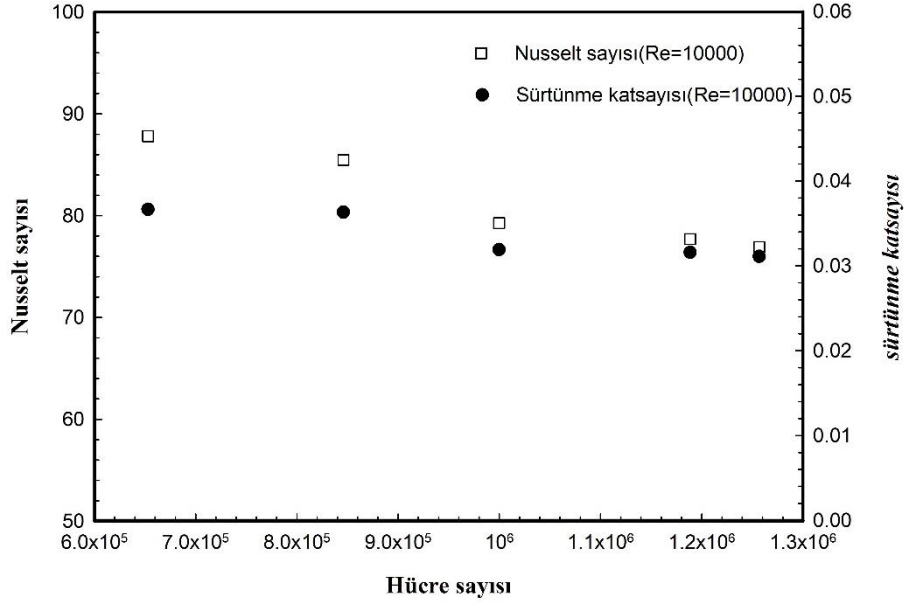
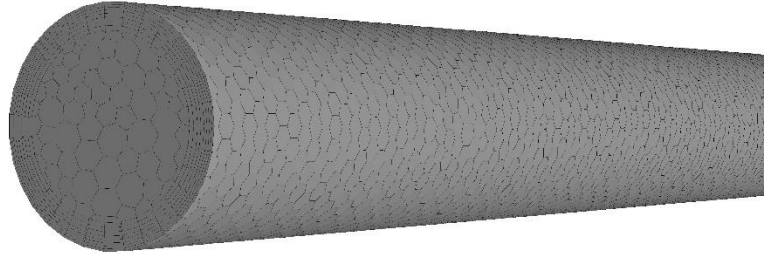
Şekil 1'de verilen sayısal alan modeli boru çapı(D) 10 mm, gelişme bölgesi, test bölgesi ve çıkış bölgesi uzunlukları sırasıyla 100mm (10D), 1000mm ve 50mm(5D) olacak şekilde tasarlanmıştır. Test bölgesi üzerinde 20 kW/m² değerinde sabit ısı akısı uygulanmış ve Reynolds sayısı çalışma aralığı türbülanslı akım koşullarının sağlanması ve uygulamalarda kullanılan akışkan hızı değerlerine de uygun olması için 10000-50000 olarak belirlenmiştir. Grafen-Demir Oksit-Su hibrit nanoakışkan hacim oranları ise, %50 Grafen ve %50 Demir Oksit olacak şekilde, literatürde görece daha düşük rastlanılan % 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 ve 1 olarak belirlenmiştir.

2.3. Ağ bağımsızlığı

Sayısal analiz içeren çalışmaların sonuçlarının doğruluğunun değerlendirilebilmesi için sayısal alan modeli için ağ bağımsızlığının irdelenmiş olması gerekmektedir. Bu çalışma da Şekil 1'de verilen akış alanı için ağ yapısı ve sayısı incelenmiştir ve bu ağ yapısına ilişkin parametreler ve değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Gerçekleştirilen incelemede hücre büyüklüğünün 0.57 değerinden daha düşük olduğu ağ yapısında Nusselt sayısının ve sürtünme katsayısının %2'den daha düşük oranda etkilendiği Şekil 2'de verilen ve 10000 Reynolds sayısı için çeşitli hücre sayılarında gerçekleştirilen ağ bağımsızlığı analizi neticesinde tespit edilmiştir. Bu nedenle, tüm analizler için Şekil 3'de gösterilen, hücre boyutu 0.57 mm ve hücre sayısı 1.18 milyon olan ağ modeli oluşturulmuştur.

Tablo 1. Ağ yapısı parametreleri.

Ağ modeli parametresi	Parametre değeri
Sınır tabaka özellikleri	Yapı: İlk katman kalınlığı Eleman boyutu:1e-0004 Maksimum katman sayısı:10
Geometri ağ yapısı	Büyütme faktörü:1.1 Biçim: Eleman boyutu Eleman boyutu:1e-0003 Boyut fonksiyonu:Uniform Büyütme faktörü:1.2
Ağ yapısı	Çok yüzlü(Polyhedra)

**Şekil 2.** Ağ bağımsızlığı analiz sonuçları**Şekil 3.** Ağ yapısı

Oluşturulan ağ yapısında daha hızlı ve hassas çözüm sağlanabilmesi amacıyla çok yüzlü(polyhedra) ağ modeli seçilmiştir. Isıl ve sınır hız tabaka içerisindeki akış etkilerinin daha kusursuz hesaplanabilmesi için sınır tabaka bölgesinde ağ yoğunluğu artırılarak, doğru çözüm geliştirilebilmesi için ağ modellerinde kontrol edilmesi gereken bir parametre olan y^+ değeri sınır tabaka bölgesinde olması gerektiği gibi $y^+ < 5$ [23] şartını sağlayarak $y^+ \approx 2$ olarak gerçekleştirilmiştir.

2.3. Nanoakışkan termofiziksel özellikleri

Nanoakışkanların ısı iletkenlik, özgül ısı, yoğunluk ve viskoziteden oluşan termofiziksel özellikleri birçok deneysel çalışmada sıcaklık, pH ve hacimsel/ağırlıksal karışım oranları gibi değişken parametrelere göre farklı teknikler ve ölçüm cihazları kullanılarak tespit edilmiştir [24-29]. Bu çalışmalar sonucunda çeşitli parametrelere bağlı olarak nanoakışkanların termofiziksel özellikleri için eşitlikler geliştirilmiştir. Bu çalışmada da geliştirilen bu eşitliklerden faydalanılarak nanoakışkanların termofiziksel özellikleri aşağıda verilen eşitliklerde olduğu gibi hesaplanmıştır.

Hibrit nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin hesaplanmasında Anjali ve Suriya [30] tarafından verilen yoğunluk, özgül ısı, ısı iletkenlik ve dinamik viskozite denklemleri Eşitlik 6., 7., 8. ve 9.'da sırasıyla verilmiştir.

$$\rho_{hnf} = [(1 - \phi_2)\{(1 - \phi_1)\rho_f + \phi_1\rho_{s1}\} + \phi_2\rho_{s2}] \quad (6)$$

$$(\rho Cp)_{hnf} = [(1 - \phi_2)[(1 - \phi_1)(\rho Cp)_f + \phi_1(\rho Cp)_{s1}] + \phi_2(\rho Cp)_{s2}] \quad (7)$$

$$\frac{K_{hnf}}{K_{bf}} = \frac{K_{s2} + (n - 1)K_{bf} - (n - 1)\phi_2(K_{bf} - K_{s2})}{K_{s2} + (n - 1)K_{bf} + \phi_2(K_{bf} - K_{s2})} \quad (8)$$

$$\mu_{hnf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi_1)^{2.5}(1 - \phi_2)^{2.5}} \quad (9)$$

Hibrit nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin hesaplanmasında kullanılan nanopartiküllere ve temel akışkana ilişkin termofiziksel özellikler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Nanopartikül termofiziksel özellikleri.

Özellikler	Grafen Nanopartikül [31]	Demir Oksit Nanopartikül [32]	Su
Isı İletim Katsayısı (W/mK)	3000	17.65	0.6
Özgül Isı(J/kgK)	790	104	4182
Yoğunluk(kg/m ³)	2250	5180	998.2
Dinamik viskozite (kg/ms)	-	-	1.003E-03

2.3. Hesaplama Metodu

Hibrit nanoakışkanlara ilişkin termofiziksel özelliklerin hesaplanması ile birlikte, bu özellikler ANSYS Fluent 18 programında tanımlayarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler neticesinde elde edilen verilere göre Reynolds sayısı, Nusselt sayısı, sürtünme faktörü ve termohidrolik performans katsayısı aşağıdaki eşitliklere göre hesaplanmıştır. Buna göre Reynolds sayısı Eşitlik 10.’da verildiği gibi hesaplanmıştır.

$$Re = \frac{\rho DV}{\mu} \quad (10)$$

Eşitlikte ρ ve μ sırasıyla, hibrit nanoakışkan yoğunluğunu ve dinamik viskozitesini, D akış alanı ıslak çapını, V ise ortalama akışkan hızını simgelemektedir. Isı taşınım katsayısı ise Eşitlik 11.’de verildiği gibi hesaplanmıştır, q' akış alanı üzerine uygulanan ısı akısını simgelerken, ΔT akış alanı yüzey sıcaklığı ile akışkan ortalama sıcaklığının farkını simgelemektedir.

$$h = \frac{q'}{\Delta T} \quad (11)$$

Isı taşınım katsayısı hesaplandıktan sonra Nusselt sayısı Eşitlik 12.’de verildiği gibi hesaplanmıştır, k hibrit nanoakışkanın ısı iletkenliğini simgelemektedir.

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (12)$$

Bir diğer boyutsuz parametre olan sürtünme katsayısı ise Eşitlik 13.’e göre hesaplanmıştır.

$$f = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho V^2 \frac{L}{D}} \quad (13)$$

Eşitlik 13.’de verilen ΔP test bölgesine giriş ve çıkıştaki akışkan basınç farkını, L ise test bölgesi uzunluğunu simgelemektedir.

$$\eta = (Nu_{nf}/Nu_b)(f_b/f_{nf})^{1/3} \quad (14)$$

Isı transferi iyileştirme yöntemlerinin termohidrolik performanslarının belirlenmesinde kullanılan termohidrolik performans katsayısı Eşitlik 14.’de verildiği gibi hesaplanmıştır.

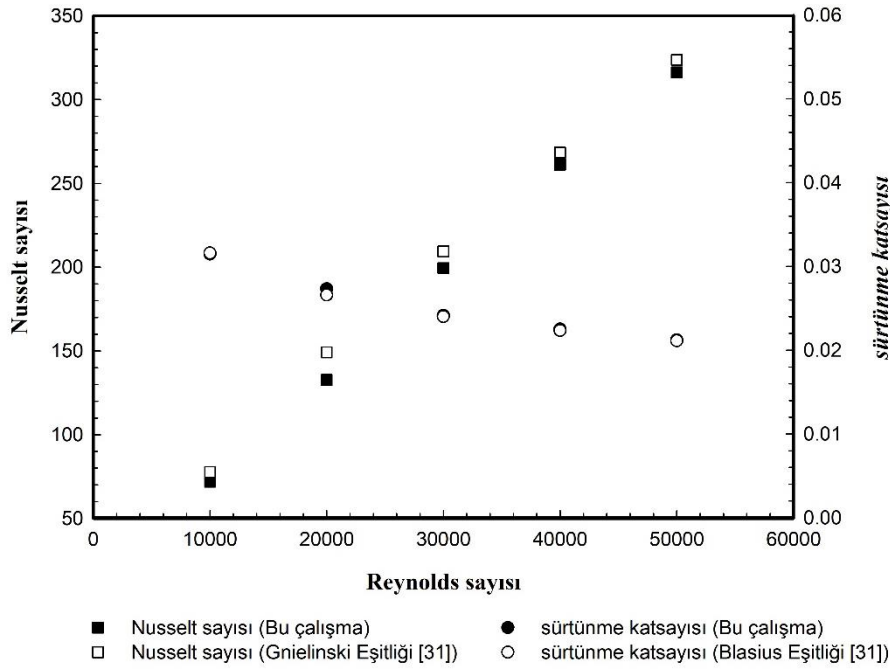
3. Bulgular

3.1. Çalışma metodunun doğrulanması

Sayısal çalışmalarda ağ yapısı, değer okuma yöntemi ve hesaplama metodu gibi parametrelere göre elde edilen sonuçlar değişebildiği gibi, bu parametrelerin değerlendirilmesinde uygulanan analojinin sonuçları daha önceden sonuçları kesin kabul gören eşitliklerle karşılaştırılarak çalışmanın doğrulama işleminin yapılması gerekir. Bu çalışmada yalnızca su akışkanı kullanılan analiz sonuçları Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü için literatürde yer alan sırasıyla Eşitlik 15. ve 16.'da verilen Gnielinski [31] ve Blasius [31] eşitlikleri ile kıyaslanmıştır.

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1.07 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (15)$$

$$f = 0.316Re^{-0.25} \quad (16)$$



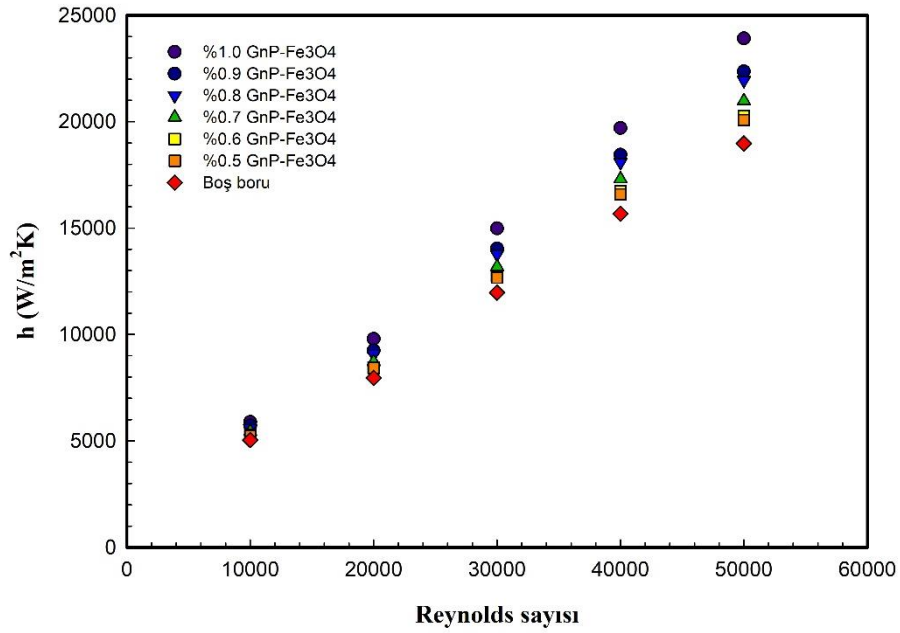
Şekil 4. Sayısal çalışma sonuçlarının doğrulanması

Şekil 4.'de görüldüğü üzere hem Nusselt sayısı hem de sürtünme faktörü literatürde sıkça kullanılan eşitlikler ile karşılaştırılmış ve bu karşılaştırma sonucunda farklı Reynolds sayılarında sayısal çalışma verileri ile eşitliklerden elde edilen değerlerin birbiri ile örtüştüğü, elde edilen grafik dağılımında yaklaşık aynı karakteristiği sağladıkları tespit edilmiştir. Bu dağılımda sayısal çalışma sonucunda elde edilen değerler ve eşitliklerden elde edilen değerler arasındaki en yüksek sapma oranı Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü için sırasıyla %9.2 ve %5.6 olmuştur. Elde edilen sapma oranı daha önce yapılan çalışmalarda belirtildiği üzere %20'nin altında gerçekleşerek literatüre uygunluk göstermiştir[33,34].

3.2. Isı transferi ve basınç düşümü bulguları

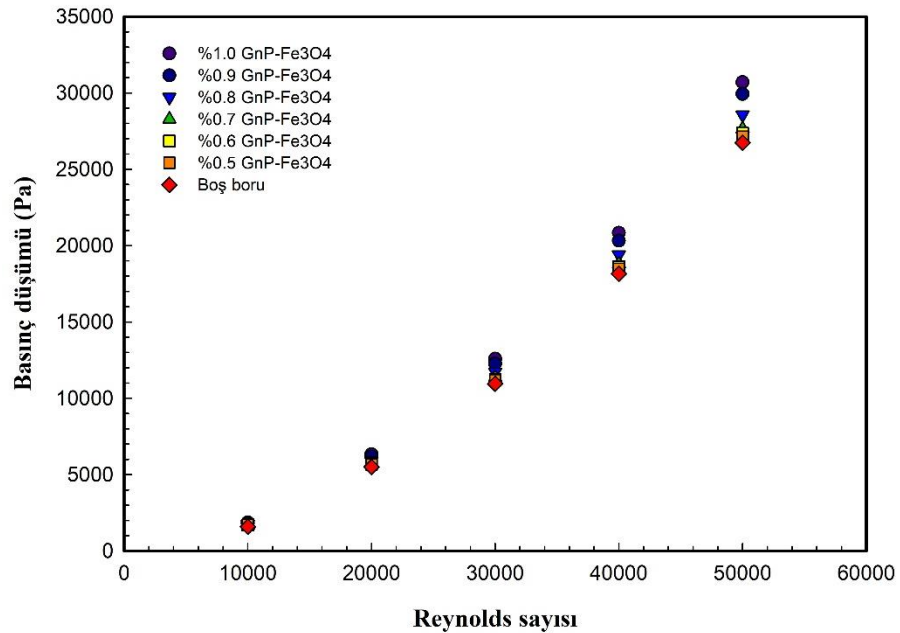
Çalışmanın bu bölümünde hibrit nanoakışkan hacimsel oranlarının ısı ve hidrolik performans üzerine etkilerini tespit etmek için taşınımla ısı transfer katsayısı, basınç düşümü, Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünün Reynolds sayısına bağlı değişimleri incelenmiştir.

Nanoakışkanlar ile ilgili yapılan çalışmalarda ısı transferindeki artışı değerlendirebilmek için taşınımla gerçekleşen ısı transferi katsayısının değişiminin incelenmesi gerekmektedir. Isı transferi değişiminde önemli bir parametre olan Nusselt sayısı hem ısı iletkenliğe hem de taşınımla olan ısı transferi kat sayısına bağlı olarak değiştiği ve nanoakışkan kullanımı taban akışkanın ısı iletkenlik katsayısını artırma eğilimi gösterdiği için bu çalışmalarda ısı transferi katsayısının ayrıca incelenmesinin önemi ortaya çıkmaktadır.



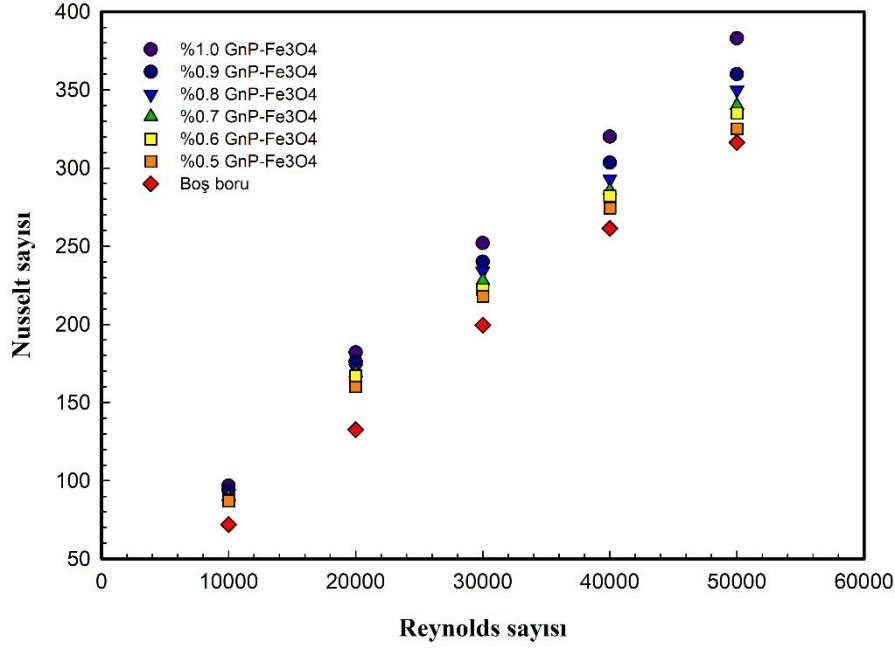
Şekil 5. Farklı hibrit nanoakışkan hacim oranlarında ısı transfer katsayısının Reynolds sayısına bağlı değişimi

Şekil 5.'de verildiği gibi taşınım ile olan ısı transfer katsayısı Reynolds sayısının artmasıyla birlikte artış gösteren bir eğilim izlemiştir. Hibrit nanoakışkan hacim oranının artması ile birlikte ısı transfer katsayısının artış gösterdiği yine Şekil 5.'den anlaşılmaktadır. Isı taşınım katsayısının en yüksek değerleri %1 hibrit nanoakışkan hacim oranında tespit edilirken, en düşük taşınım katsayısı değerleri % 0.5 hacimsel oranda gerçekleştiği elde edilmiştir. Buna göre % 1 hacimsel karışıma sahip GnP-Fe3O4-Su nanoakışkanı kullanılmasıyla elde edilen en yüksek ısı taşınım katsayısı, 50000 Reynolds sayısında su taban akışkanına oranla 1.26 kat artış göstererek gerçekleşmiştir. Bu oran aynı Reynolds sayısı değerinde % 0.5 hacim oranı için ise 1.06 kat olarak gerçekleşmiştir.



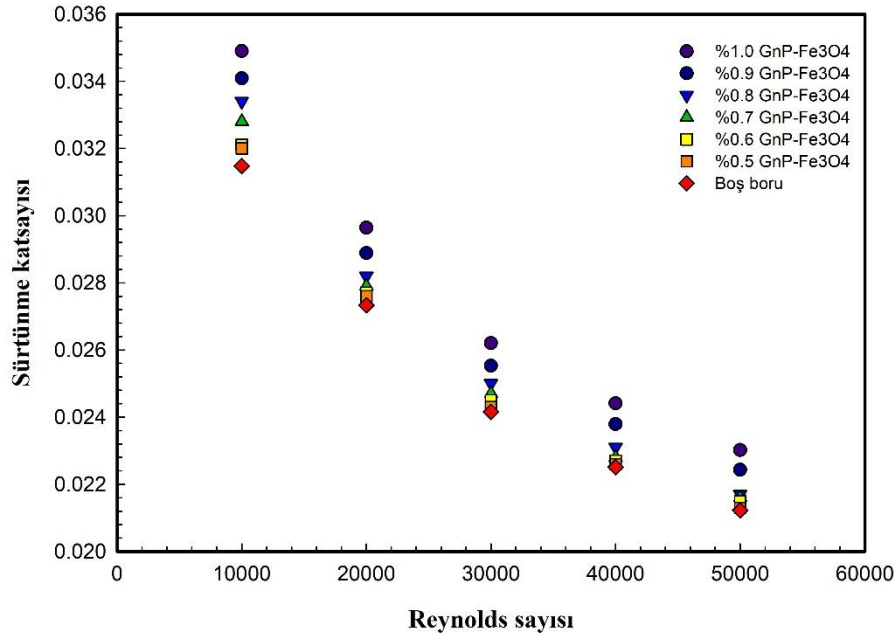
Şekil 6. Farklı hibrit nanoakışkan hacim oranlarında basınç düşümünün Reynolds sayısına bağlı değişimi

Nanoakışkan kullanımı ile birlikte hidrolik performansın ortaya konulmasında araştırılan önemli parametrelerden bir tanesi boru giriş ve çıkışında ölçülen basınçların farkından hesaplanan basınç düşümdür. Şekil 6.'de basınç düşümünün nanoakışkan hacimsel karışıma göre verilen grafikte, artan nanoakışkan hacim oranının ve Reynolds sayısının basınç düşümünü artırdığı görülmektedir. Elde edilen verilere göre basınç düşümünde taban akışkana oranla en yüksek artış % 1 hacimsel karışıma sahip GnP-Fe3O4-Su nanoakışkanı kullanılması durumunda ortalama olarak 1.14 kat olduğu tespit edilmiştir. Bu oran % 0.9, 0.8, 0.7, 0.6 ve 0.5 hacimsel karışımlarında sırasıyla 1.11, 1.06, 1.04, 1.02 ve 1.01 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 7. Farklı hibrit nanoakışkan hacim oranlarında basınç düşümünün Reynolds sayısına bağlı değişimi

Şekil 7.'de Görüldüğü üzere Nusselt sayısı Reynolds sayısının artması ile birlikte, beklenildiği gibi artan bir eğilim izlemiştir. Hibrit nanoakışkan hacimsel karışım oranı ise yine Nusselt sayısına pozitif bir katkı sağlamış ve karışım oranı ile birlikte artış göstermesini sağlamıştır. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek Nusselt sayısı değerleri %1 hacimsel karışım oranında tespit edilirken en düşük Nusselt sayısı değerleri ise % 0.5 hacimsel karışım oranında tespit edilmiştir. Buna göre elde edilen en yüksek ve en düşük Nusselt sayısı değeri 50000 Reynolds sayısında sırasıyla % 1 ve % 0.5 hibrit nanoakışkan hacimsel karışım oranında 392 ve 332 olarak tespit edilmiştir. Aynı Reynolds sayısı değerinde yalnızca taban akışkan olan suyun kullanıldığı analiz sonuçlarında ise en yüksek Nusselt sayısı değeri 316 olarak tespit edilmiştir. Bu veriler ışığında hibrit nanoakışkan kullanılması durumunda Nusselt sayısının taban akışkan olan su kullanılmasına oranla % 5-24 aralığında iyileşme gösterdiği ortaya konulmuştur.



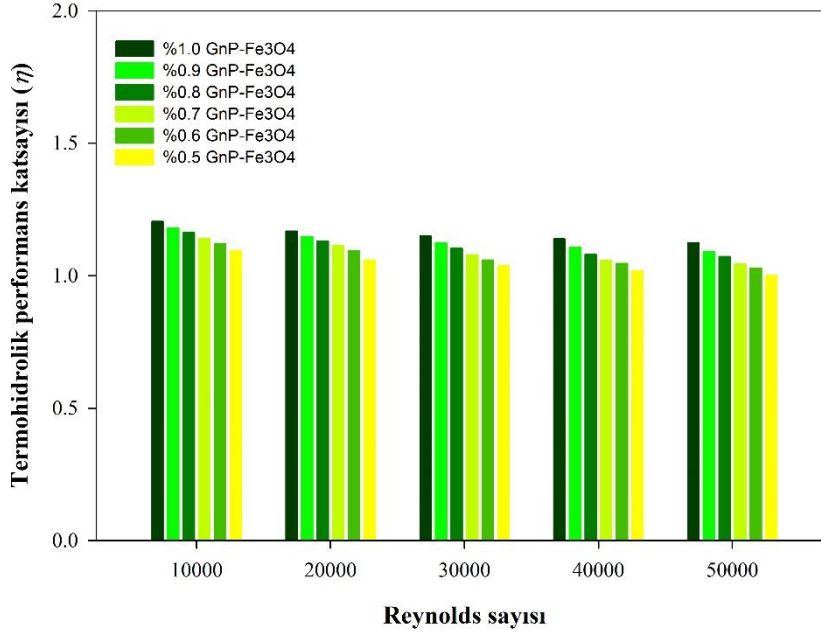
Şekil 8. Farklı hibrit nanoakışkan hacim oranlarında basınç düşümünün Reynolds sayısına bağlı değişimi

Şekil 8.'de nanoakışkan hacimsel karışım oranlarının sürtünme katsayısına üzerine etkisi Reynolds sayısına bağlı olarak verilmiştir. Sürtünme katsayısı nanoakışkan hacimsel karışım oranının artmasıyla birlikte artış gösterirken, bunun aksine Reynolds sayısının artması ile birlikte düşen bir eğilim izlemektedir. Elde edilen sonuçlara göre sürtünme katsayısı değerleri hibrit nanoakışkan kullanımıyla, taban akışkan olan su kullanımına oranla radikal bir değişiklik göstermemiştir. Buna göre en düşük Reynolds sayısı olan 10000 değerinde % 1 hibrit nanoakışkan kullanımı, su akışkanına oranla en fazla % 9 oranında sürtünme katsayısı artışına sebep olmuştur. Yüzde 0.5 hibrit

nanoakışkan kullanımında ise su taban akışkanına oranla sürtünme faktörü artış oranı tüm Reynolds sayıları için % 3'ün altında gerçekleşmiştir.

3.3. Termohidrolik performans katsayısı bulguları

Isı transferi iyileştirme teknikleri kullanılan ısı sistemlerde, uygulanan teknikler ısı transferinde iyileşme sağlarken aynı zamanda sürtünme ve hidrolik kayıplara sebep olmakta ve basınç düşümünü artırmaktadır. Basınç düşümünün artması ile birlikte daha fazla pompalama gücüne ihtiyaç duyulurken bu ihtiyacı karşılamak amacıyla tüketilen enerji, ısı transferini iyileştirme yoluyla elde edilen enerjinin daha da üzerinde gerçekleşebilmektedir. Bu nedenle ısı transferi iyileştirme tekniklerinin uygulandığı sistemlerde net enerji kazancını ifade etmek için termohidrolik performans katsayısı Webb R.L. [35] tarafından geliştirilmiştir.



Şekil 9. Farklı hibrit nanoakışkan hacim oranlarında termohidrolik performans katsayısının Reynolds sayısına bağlı değişimi

Termohidrolik performans katsayısının 1 değerinin üzerinde gerçekleşmesi durumunda uygulanan iyileştirme metodunun avantajlı olduğu ifade edilmektedir [35]. Buna göre Şekil 9.'de görüldüğü üzere gerçekleştirilen kullanılan tüm Grafen-Demir Oksit-Su hibrit nanoakışkan modelleri için termohidrolik performans katsayısı 1 değerinin üzerinde çıkarak, kullanılan yöntemin ısı ve hidrolik açıdan avantajlı olduğu sonucunu ortaya koymuştur. En fazla iyileşmenin tüm Reynolds sayıları için % 1 hacimsel karışım oranında elde edildiği Şekil 9'den anlaşılabilir. Birlikte, en yüksek termohidrolik performans katsayısı %1 hacimsel karışım oranında, 10000 Reynolds sayısında 1.20 olarak elde edilmiştir. Nanoakışkan hacimsel karışım oranının azalmasıyla düşüş gösteren termohidrolik performans katsayısı, Reynolds sayısının artmasıyla da benzer bir eğilim göstererek daha düşük gerçekleşmiştir. Buna göre en düşük termohidrolik performans katsayısı en yüksek Reynolds sayısında, en düşük hacimsel karışım oranı olan % 0.5 değerinde 1.0013 olarak tespit edilmiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Gerçekleştirilen çalışma neticesinde aşağıda sıralanan önemli bulgulara ulaşılmıştır.

- Isıtma ve soğutma yapan sistemlerde Grafen-Demir Oksit-Su nanoakışkanı kullanılması termohidrolik performansın iyileştirilmesi açısından etkili bir ısı transferi iyileştirme tekniğidir. Buna ek olarak Grafen-Demir Oksit-Su hibrit nanoakışkanının, bu çalışmada kullanılan fiziksel şartlarda ve sınır şartlarında daha önce bir ısı değiştiricisi borusunda kullanılmaması ile bu etkili tekniğin önemi de bu çalışma ile birlikte ortaya konulmuştur.
- Bunun çalışmada ısı iletkenlik katsayısı yüksek, ticari üretimi daha güç ve maliyeti yüksek olan Grafen nanopartikülü ile ısı iletkenliği ve maliyeti görece daha düşük ve daha yüksek üretim oranlarına sahip Demir Oksit nanopartikülün birlikte hibrit olarak kullanılmasıyla da, hem termofiziksel özellik hem de mali açıdan bir denge oluşturularak termohidrolik performans katsayısında yüksek değerlere ulaşılabildiği ortaya konulmuştur.
- Nanoakışkan içerisindeki nanopartikül tanecikleri yoğunluk ve viskozite gibi akışkanların termofiziksel özelliklerinin değişmesine ve dolayısıyla taban akışkana oranla basınç düşümünün de değişiklik göstermesine sebep olmaktadır. Basınç düşümündeki bu artışın, ısı transferindeki artışa kıyasla daha

yüksek çıkması termohidrolik performansı olumsuz etkilerken, aksine ısı transferindeki artışın daha yüksek gerçekleşmesi ise kullanılan yöntemin termohidrolik açıdan avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır. Buna göre elde edilen çalışma sonuçlarında uygulanan tüm konfigürasyonlarda ısı transferindeki artış, basınç düşümündeki artışa oranla daha yüksek düzeyde gerçekleşmiş ve termohidrolik performans katsayısının tüm modellerde 1 değerinin üstünde olmasını sağlamıştır.

- Bu çalışma sonuçlarında en yüksek ve Nusselt sayısı değeri 50000 Reynolds sayısında % 1 hibrit nanoakışkan hacimsel karışım oranında 392 olarak tespit edilirken sürtünme katsayısındaki artış oranı en yüksek % 9 olarak elde edilmiştir. En yüksek termohidrolik performans katsayısı ise %1 hacimsel karışım oranında, 10000 Reynolds sayısında 1.20 olarak elde edilerek yaklaşık % 20 oranında bir iyileşme sağlanmıştır. Bu iyileşme oranı nanoakışkan hacimsel karışım oranının artması ile artış göstermektedir, bu sonuç karışım içerisindeki hibrit nanopartiküllerin, akışkanın ısı iletim katsayısını artırmakla birlikte akış içerisinde çalkantı oluşumuna, yüzey alanının artmasına, partiküllerin birbiri ile çarpışarak mikrotaşınım karakteristiğini geliştirmesine ve dolayısıyla ısı transfer hızının artmasına katkı sağladığını ortaya koymaktadır.
- Uygulamada ısı transfer akışkanı olarak hibrit nanoakışkanların seçilmesi, ısı transferi iyileştirme kabiliyeti açısından önem arz etmektedir. Bu çalışma sonuçlarından anlaşılacağı üzere Grafen-Demir Oksit-Su nanoakışkanı üstün termofiziksel özelliklere sahip olması nedeniyle etkili bir ısı transfer akışkanı olarak ortaya çıkarken, tekil kullanıma oranla ekonomik bir model olarak değerlendirilme potansiyeline sahiptir.

Teşekkür

Tüm yazarlar Erciyes Üniversitesi'ne bu çalışmanın yürütülmesinde kullanılan gerekli altyapıyı sağlaması nedeniyle teşekkür eder.

Kaynakça

- [1] Ozerinç, S., Kakaç, S., Yazıcıoğlu, A.G., 2010. Enhanced Thermal Conductivity of Nano- Fluids: A State-of-the-Art Review. *Microfluid Nanofluid*, 8(2), 145-170.
- [2] Mehrali, M., Sadeghinezhad, E., Latibari, S., Kazi, S., Mehrali, M., Zubir, MNBM., Metselaar, HSC., 2014. Investigation of Thermal Conductivity and Rheological Properties of Nanofluids Containing Graphene Nanoplatelets. *Nanoscale Research Letters*, 9(1), 15.
- [3] Ghozatloo, A., Rashidi, A., ve Shariaty-Niassar, M., 2014. Convective heat transfer enhancement of graphene nanofluids in shell and tube heat exchanger, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 53,136 – 141.
- [4] Sadeghinezhad, E., Mehrali, M., Tahan Latibari, S., Mehrali, M., Kazi, S.N., Oon, C.S., ve Metselaar, H.S.C., 2014. Experimental Investigation of Convective Heat Transfer Using Graphene Nanoplatelet Based Nanofluids under Turbulent Flow Conditions, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(31),12455–12465.
- [5] Selvam, C., Raja, R.S., Lal, D.M., ve Harish, S., 2017. Overall heat transfer coefficient improvement of an automobile radiator with graphene based suspensions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115,580 – 588.
- [6] Sarafraz, M., Yang, B., Pourmehran, O., Arjomandi, M., ve Ghomashchi, R., 2019. Fluid and heat transfer characteristics of aqueous graphene nanoplatelet (GNP) nanofluid in a microchannel, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 107,24 – 33.
- [7] Askari, S., Koolivand, H., Pourkhalil, M., Lotfi, R., Rashidi, A.,2017. Investigation of Fe₃O₄/Graphene nanohybrid heat transfer properties: Experimental approach. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 87, 30-39
- [8] Yarmand, H., Zulkifli, N., Gharekhani, S., Shirazi, S., Alrashed, A., Azlin Bin Ali, M., Dahari, M., Kazi, S.N.,2017. Convective heat transfer enhancement with graphene nanoplatelet/platinum hybrid nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 88, 120-125
- [9] Bahiraei, M., Mazaheri, N., Hassanzamani, S.M., 2019. Efficacy of a new graphene–platinum nanofluid in tubes fitted with single and twin twisted tapes regarding counter and co-swirling flows for efficient use of energy. *International Journal of Mechanical Sciences*, 150, 290–303.

- [10] Bahiraei, M., Mazaheri, N., Aliee, F., 2019. Second law analysis of a hybrid nanofluid in tubes equipped with double twisted tape inserts. *Powder Technology*, 345, 692–703
- [11] Bahiraei, M., Mazaheri, N., Rizehvandi, A., 2019. Application of a hybrid nanofluid containing graphene nanoplatelet–platinum composite powder in a triple-tube heat exchanger equipped with inserted ribs. *Applied Thermal Engineering*, 149, 588-601
- [12] Zongyuan, W., Chang-Jun, L., 2014. Preparation and application of iron oxide/graphene based composites for electrochemical energy storage and energy conversion devices: Current status and perspective. *Nano Energy* 11, 277–293.
- [13] W. Lu, X. Guo, B. Yang, S. Wang, Y. Liu, H. Yao, C.-S. Liu, H. Pang. 2019. Synthesis and Applications of Graphene/Iron(III) Oxide Composites. *ChemElectroChem*, 6, 4922-4948.
- [14] Wciślik, S. 2020. Efficient Stabilization of Mono and Hybrid Nanofluids. *Energies*, 13, 3793.
- [15] Potenza, M., Cataldo, A., Bovesecchi, G., Corasaniti, S., Coppa, P., Bellucci, S., 2017. Graphene nanoplatelets: Thermal diffusivity and thermal conductivity by the flash method. *AIP Advances*, 7, 1-15.
- [16] Manikandan, S. P., Baskar, R., 2018. Assessment of the Influence of Graphene Nanoparticles on Thermal Conductivity of Graphene/Water Nanofluids Using Factorial Design of Experiments. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 62(3), 317-322.
- [17] Yongsheng, F., Haiqun, C., Xiaoqiang, S., Xin, W., 2012. Combination of cobalt ferrite and graphene: High-performance and recyclable visible-light photocatalysis. *Applied Catalysis B: Environmental*, 111, 280–287.
- [18] Adrian M.T. S. ve Sonia A.C. 2016. *Advances in Carbon Nanostructures*. ss 3-37. Oxana Vasilievna, K., Beatriz Ortega, G., Boris Ildusovich, K., Ubaldo Ortiz, M., ed. 2016. *Magnetic-Graphene-Based Nanocomposites and Respective Applications*, InTech Open, Londra.
- [19] Guangshuo, W., Yingying, M., Zhiyong, W., Min, Q., 2016. Development of multifunctional cobalt ferrite/graphene oxide nanocomposites for magnetic resonance imaging and controlled drug delivery. *Chemical Engineering Journal*, 289, 150–160.
- [20] Peng, E., Choo, ES., Chandrasekharan, P., vd. 2012. Synthesis of manganese ferrite/graphene oxide nanocomposites for biomedical applications, *Small*, 8(23), 3620-3630.
- [21] Bhattacharyya, R., Prakash, O., Roy, S. vd. 2019. Graphene oxide-ferrite hybrid framework as enhanced broadband absorption in gigahertz frequencies, *Sci Rep* 9, 12111.
- [22] Fluent, 2016. *ANSYS Fluent V.17.0 User Guide*, Fluent Corporation, Lebanon, New Hampshire.
- [23] Salim, S.M., Cheah, S.C. 2009. Wall y^+ Strategy for Dealing with Wall-bounded Turbulent Flows. *International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, 18-20 Mart, Hong Kong, 2165-2170.
- [24] Munish, G., Vinay, S., Rajesh, K., Zafar, S., 2017. A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 638-670.
- [25] Keklikcioglu Cakmak, N., Zafar, S., L. Syam, S., Ziad, M. A., Arun K. T. 2020. Preparation, characterization, stability, and thermal conductivity of rGO-Fe₃O₄-TiO₂ hybrid nanofluid: An experimental study. *Powder Technology*, 372, 235-245.
- [26] Keklikcioglu Cakmak, N. 2020. The impact of surfactants on the stability and thermal conductivity of graphene oxide de-ionized water nanofluids. *Journal of Thermal Analysis Calorimetry*, 139, 1895–1902.
- [27] Keklikcioglu, O., Dagdevir, T., Ozceyhan, V., 2019. Heat transfer and pressure drop investigation of graphene nanoplatelet-water and titanium dioxide-water nanofluids in a horizontal tube. *Applied Thermal Engineering*, 162, 114256.
- [28] Pak, B. C., Cho, Y. I., 2007. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, 11, 151-170.

- [29] Buongiorno, J., 2006. Convective transport in nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, 128, 240-250.
- [30] Anjali Devi, SP., Suriya U.D.S. (2016). Numerical investigation of hydromagnetic hybrid Cu-Al₂O₃/water nanofluid flow over a permeable stretching sheet with suction. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 17, 249-257.
- [31] Keklikcioglu, O., 2020. İçerisinde Grafen katkılı nanoakışkan ve konik iç eleman kullanılan boruda termohidrolik performans ve entropi üretiminin incelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 191s, Kayseri.
- [32] Krishna Varma, K.P.V., Kishore, P.S., Durga Prasad, P.V., 2017. Enhancement of Heat Transfer Using Fe₃O₄ / Water Nanofluid with Varying Cut-Radius Twisted Tape Inserts. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12, 7088-7095.
- [33] Jensen, M.K., Vlakancic, A., 1999. Experimental investigation of turbulent heat transfer and fluid flow in internally finned tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 1343-1351.
- [34] Zhang, L., Xiong, W., Zheng, J., Liang, Z., Xie, S., 2021. Numerical analysis of heat transfer enhancement and flow characteristics inside cross-combined ellipsoidal dimple tubes. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 100937.
- [35] Webb, R.L., 1981. Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 24, 715-726.