

Article Arrival Date

16.08.2022

Article Type

Research Article

Article Published Date

20.03.2023

**GO-SU NANOAKIŞKANININ ÇALIŞMA ŞARTLARINA BAĞLI OLARAK  
ENTROPİ ÜRETİMİ VE EKSERJİ KAZANIMININ ARAŞTIRILMASI  
INVESTIGATION OF ENTROPY GENERATION AND EXERGY GAIN OF  
GO-WATER NANOFLUID DEPENDING ON WORKING CONDITIONS**

**Koray KARABULUT**

Doç. Dr., Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Sivas/Türkiye, ORCID: 0000-0001-5680-0988

**Nihat OCAK**

Makine Yük. Müh., Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Bilimi ve Teknolojisi Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sivas/Türkiye,  
ORCID: 0000-0002-9317-678X

## ÖZET

Bir ısı sistemini entropi ve ekserji analizi, sistemin en uygun çalışma şartlarını belirlemek için kullanılabilir en güçlü araçlardan biridir. Ekserji, kullanılabilirliğin bir ölçüsü iken; sistemdeki entropi üretimi kullanılabilirliği yani ekserjiyi azaltmaktadır. Bu nedenle, entropi ve ekserji birbirine zıt iki olgudur ve sistemin yüksek verimli olarak çalışabilmesi için kontrol altında tutulmaları gerekmektedir. Bu çalışmada, GO (Grafen Oksit)-Su nanoakışkanı kullanılan sabit ısı yüklü, 12 mm iç çaplı ve 1830 mm uzunluklu bakır düz bir borudan oluşan deneysel bir ısı sisteminin entropi üretimi ve ekserji kazanımı analizi gerçekleştirilmiştir. Bakır boruya uygulanan ısı yükleri 250 W ve 350 W iken, boruda akan akışkanların debi değerleri 0,9 l/dak., 1,2 l/dak., 1,5 l/dak. ve 1,8 l/dak.'dır. Sistemde çalışma akışkanları olarak %0,01 ve %0,02 hacimsel konsantrasyona sahip GO-Su nanoakışkanı ve saf su kullanılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, literatürde bulunan farklı nanoakışkanlarla yapılan çalışmalarla kıyaslanmış ve sonuçların mantıklı ve tutarlı oldukları belirlenmiştir. Çalışmada değişken parametreler olarak; nanoakışkan konsantrasyonu, akışkan debisi ve boruya uygulanan ısı yükü kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları, 12 mm iç çaplı bakır boru uzunluğu boyunca ısı ve sürtünme entropi üretimi, çıkış ekserjisi ve 2. yasa veriminin değişimleri olarak ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiş ve en uygun çalışma şartları belirlenmiştir. Sonuçlar, 250 W ısı yükünde ve 0,9 l/dak.'lık debide boru boyunca ortalama olarak %0,02 GO-Su nanoakışkan konsantrasyonunda %0,01 GO-Su nanoakışkan konsantrasyonuna göre entropi üretiminde %93,43'lük azalma olduğunu göstermiştir. Ayrıca, 1,8 l/dak.'lık debide 0,9 l/dak.'lık debi değerine göre %0,01 GO-Su nanoakışkanının ekserjisi %58 daha fazla olup; 1,8 l/dak.'lık debide nanoakışkanın ikinci yasa veriminin 0,9 l/dak. debi değerinden %7,15 daha fazla olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Entropi üretimi, Ekserji kazanımı, GO-Su nanoakışkanı, 2. yasa verimi.

## ABSTRACT

Entropy and exergy analysis of a thermal system is one of the most powerful tools that can be used to determine the optimum operating conditions of the system. While exergy is a measure of usability; entropy production in the system reduces the usability, that is, the exergy. Therefore, entropy and exergy are two opposite phenomena and they must be kept under control in order for the system to operate with high efficiency. In this study, entropy generation and exergy gain analysis of an experimental thermal system consisting of a copper straight pipe with a constant heat load, 12 mm

inner diameter and 1830 mm length using GO (Graphene Oxide)-Water nanofluid was performed. While the heat loads applied to the copper pipe were 250 W and 350 W, the flow rates of the fluids flowing in the pipe were 0.9 l/min., 1.2 l/min., 1.5 l/min. and 1.8 l/min. GO-Water nanofluid with 0.01% and 0.02% volumetric concentrations and distilled water were used as working fluids in the system. The results obtained from this study were compared with the studies conducted with different nanofluids in the literature and it was determined that the results were reasonable and consistent. As variable parameters in the study; nanofluid concentration, fluid flow rate and thermal load applied to the pipe were used. The results of the study were evaluated in detail as the variations of thermal and friction entropy generation, output exergy and the 2<sup>nd</sup> law efficiency along the length of the 12 mm inner diameter copper pipe, and the most suitable working conditions were determined. The results showed a 93.43% reduction in entropy production at an average of 0.02% GO-Water nanofluid concentration along the pipe at 250 W heat load and 0.9 l/min flow rate compared to 0.01% GO-Water nanofluid concentration. In addition, the exergy of 0.01% GO-Water nanofluid is 58% higher at a flow rate of 1.8 l/min compared to a flow rate of 0.9 l/min; it has determined that 2<sup>nd</sup> law efficiency of the nanofluid is 7.15% higher than the flow rate value of 0.9 l/min at a flow rate of 1.8 l/min.

**Keywords:** Entropy generation, Exergy gain, GO-Water nanofluid, 2<sup>nd</sup> law efficiency

## 1. GİRİŞ

Artan enerji kullanımı ve enerji kaynaklarının verimsiz değerlendirilmesi araştırmacıları ısı transferi üzerinde çalışmaya zorlamıştır. Bununla birlikte, araştırmacılar ayrıca ısı performansını iyileştirilmesi ve sistemin basınç kayıplarının azaltılmasına yönelik çalışmalara da yönelmişlerdir. Isı transfer oranları ile ilgili özellikler araştırılmış ve ısı sistemlerinin verimliliğini arttırmanın daha iyi bir yolunu bulmak için hala çalışılmaktadır.

Son zamanlarda, araştırmacılar su, etilen glikol, yağlar vb. gibi geleneksel akışkanların termofiziksel özelliklerini iyileştirmeye çalışmaktadırlar. Geleneksel çalışma akışkanlarının ısı iletkenliği, bu akışkanlara ısı iletkenliği yüksek nanometre boyutundaki katı parçacıkların eklenmesiyle arttırılmaktadır. Birçok araştırmacı, boyutları 1 nm ile 100 nm arasında değişen, metaller (Cu, Al, Ag, Au vb.), metal oksitler (CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO, TiO<sub>2</sub> vb.), karbon bazlı malzemeleri (grafit, grafen, karbon nanotüp) kullanmaktadırlar (Wen ve ark., 2009; Saidur ve ark., 2011; Godson ve ark., 2010).

Grafen, olağanüstü mekanik, termal ve elektriksel özellikler sergilemekte ve bu nedenle birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir (Novoselov ve ark., 2005). Grafen suyu sevmez. Grafen okside (GO) oksitlendiğinde, termal iletkenliği grafitten daha düşüktür. Ancak GO su benzeri bir özelliğe sahiptir, kullanılan nanoakışkanın kararlılığı yükselir ve çökme olmaz (Yu ve ark., 2010).

Termodinamiğin ikinci yasası, işin dönüşümü sırasında kaybedilen enerjinin dönüşüm miktarı olan entropi ile ifade edilir. Hem fiziksel hem de kimyasal tüm süreçler, sistemin entropisini en üst düzeye çıkarmaya çalışır, yani kullanılabilir enerjiyi azaltma eğilimindedir. Termodinamiğin ikinci yasasına göre, bir süreçte meydana gelen entropi üretimi, kaybolan iş ve kullanılmayan enerji ile ilişkilidir (Bejan, 1996). Bu nedenle sistemler için entropi üretiminin minimum seviyede tutulması esastır. Entropi, diğer bir deyişle, tersinmezlik, ısı transferi ve viskoz sürtünme tarafından üretilen ısının neden olduğu etkilerdir (Singh ve ark., 2010).

Bejan (1979) tarafından tanımlanan entropi üretimi minimizasyon yöntemi, akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve termodinamiğin bir kombinasyonudur. Günümüzde akışkan akışı ve ısı transferinin sürtünme ve ısı transferi değerlendirmesi (Ji ve ark., 2016; Herwig ve Wenterodt, 2011; Schmandt ve Herwig, 2011), ısı borusu ve soğutma sistemlerinin optimizasyonu (Khalkhali ve ark., 1999; Myat ve ark., 2011), iki fazlı doğal dönüşüm çevrimlerinin performans iyileştirmesi gibi birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır (Goudarzi ve Talebi, 2015). Ayrıca birçok araştırmacı, termal sistemin optimum tasarım durumunu keşfetmek için entropi üretimini araştırmıştır. Mahmud ve Fraser (2002) kanaldaki akışkandaki entropi üretimini araştırmış ve enerji denkleminde viskoz ısıtma faktörünü ihmal etmiş ancak entropi denkleminde dikkate almıştır. Mahmud ve Fraser (2003), başka bir

çalışmada, gözenekli ortamlarda akışın tersinmezliğini analitik olarak ifade etmişlerdir. Leong ve ark., (2012) analitik çalışmasında sırasıyla 2-10 m uzunluk ve 0,01-0,03 m çapında dairesel bir boruda laminer koşullarda hacimce %0-7  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanı ve türbülanslı ve hacimce % 0-4  $TiO_2$ -su nanoakışkanı için entropi üretiminin %6,4 azaldığını belirlemiştir. Moghaddami ve ark., (2012) 1 m uzunluğunda ve 6 mm çapında radyal bir boruda hacimce %1-4  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanı için yaptıkları sayısal çalışmalarında toplam entropi üretiminde %15'lik bir azalma elde ederken, termal entropi üretiminde bu azalma oranı %25 olmuştur.  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanının kullanıldığı başka bir çalışmada, Karami ve ark., (2012), 45,7 cm uzunluğunda ve 0,457 cm iç çapı olan dairesel bir boruda %0,6 hacimsel nanoakışkan konsantrasyonu için entropi üretiminde %6' lık bir azalma belirlemiştir. Hussien ve ark., (2019), 300  $\mu m$  iç çaplı ve 0.27 m uzunluğunda pirinçten yapılmış bir boruda, MWCNT/GNP-DW hibrit nanoakışkan için  $Re=200$ 'de termal entropi üretimi için maksimum %37.5'lik bir azalma bulmuşlardır. Mehrali ve ark., (2015), çalışmalarında GNP (Grafen nano plaka) - su nanoakışkanını kullanarak laminer akış koşulları altında dairesel bir borudaki entropi üretimini analiz etmişlerdir. Çalışmada, ağırlıkça %0.025-%0.1 aralığında nanoparçacık konsantrasyonu kullanılmış ve konsantrasyon artışı ile toplam entropi üretiminin azaldığını saptamışlardır. Ji ve ark., (2017) dairesel bir boruda tam gelişmiş türbülanslı akış için RANS türbülans modelini kullanarak  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanının entropi üretim analizini sayısal olarak gerçekleştirmişlerdir. Korei ve Benissaad (2021) üç boyutlu 90° dirsek yoluyla  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanının entropi üretimini analiz etmişlerdir. Hacimce %2 nanoparçacık konsantrasyonu için  $Re=10000$ ' de minimum toplam entropi üretimini elde etmişlerdir. Taşkesen ve ark., (2021) laminer akış koşullarında 16 mm hidrolik çapa ve 1,5 m uzunluğa sahip çeşitli kanal geometrilerinde  $Fe_3O_4$ -su nanoakışkanlarının entropi üretimini araştırmışlardır. Hacimce %5'lik nanoakışkanın suya göre %12,1 daha düşük entropi üretim oranı sunduğunu, hacimce %2'nin ise %5,5 daha düşük, hacimce %1'in suya göre %2,9 daha düşük entropi üretimi olduğunu belirlemiştir. Keklikcioğlu (2021) türbülanslı akış koşullarında bir ısı eşanjör borusunda %0,5 - 1 aralığında altı farklı hacimsel fraksiyona sahip grafen-demir oksit-su hibrit nanoakışkanın entropi üretim analizini sayısal olarak araştırmıştır. Sonuçlar, entropi üretiminin hibrit nanoakışkan hacim konsantrasyonunun artmasıyla azalan bir eğilim sergilediğini göstermiştir.

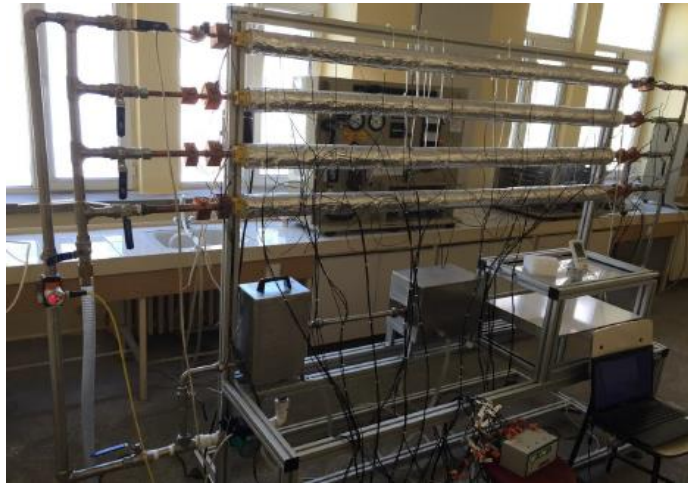
Belirli bir durumda ve miktarda enerjinin pratik çalışma potansiyeli gibi bir özelliği tanımlamak çok yardımcı olacaktır. Bu özellik, kullanılabilirlik veya kullanılabilir enerji olarak da bilinen ekserjidir. Kütle ve enerji korunan özellikler iken ve ekserji enerji ile aynı birimde olmasına rağmen korunmayan bir özelliktir. Madde veya enerjinin tüm dönüşümlerinde her zaman ekserji kaybı vardır. Ekserji kaybı, toplam entropi üretimi ile doğrudan ilişkilidir (Szargut ve ark., 1988).

Ekserji analizi, enerji kayıplarının boyutunu, şeklini ve yerini doğru bir şekilde belirlediği için enerjiyi ve kaynakları verimli kullanmak için faydalı bir analiz yöntemidir. Ekserji analizi, ekserji yıkımının ve ekserji kayıplarının meydana geldiği süreçleri ve bölgeleri belirler. Bir ekserji analizi yapmanın amacı, doğanın sınırları içinde termodinamik mükemmellik derecesini ölçmektir. Bu bağlamda literatürde şimdiye kadar farklı alanlarda ekserji analizleri üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. Ekserji analizi daha çok kimyasal işlemlere ve ısı eşanjörlerine uygulanmıştır. Ancak ısı değiştiricili sistemlerde nanoakışkanların kullanıldığı ekserji analizleri oldukça sınırlıdır. Khaleduzzaman ve ark., (2016) deneysel çalışmalarında, 94mmx94mmx20mm boyutlarındaki bir kanalda 1.0-1.5 l/dak. arasında bir akış hızında %0,1  $TiO_2$ -su nanoakışkanı için çıkış ekserjisinde %87'lik bir artış elde etmişlerdir. Başka bir çalışmada, Khaleduzzaman ve ark., (2014) deneysel olarak hacimce %0,1-0,25 konsantrasyon aralığında  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanı için 50 mm uzunluğunda ve 0,8 mm yüksekliğinde ve 0,5 mm genişliğinde mini kanal soğutucusunda çıkış ekserjisinde %60,86 artışa ulaşmışlardır. Pandey ve Nema (2012) 2-5 l/dak. akış hızı aralığında bir plakalı ısı eşanjöründe hacimce %2-4  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanı ile %8,6 boyutsuz ekserji kaybı elde etmişlerdir. Ahammed ve ark., (2016) çok portlu mini kanallı ısı eşanjöründe hacimce % 0,1'lik  $Al_2O_3$ -su, Grafen-su ve Grafen- $Al_2O_3$ -su hibrit nanoakışkanın ısı transferi ve ekserji analizini gerçekleştirmiştir. Çalışılan nanoakışkanlar arasında, Grafen-su nanoakışkanının, ısı transferi ve ekserjik analiz açısından daha iyi üretkenlik gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır.

Bir termal sistemin optimum tasarımına yönelik modern yaklaşım, termodinamiğin ikinci yasasına dayanmaktadır. Özellikle entropi üretimi, bir sistemin üretkenliğini yorumlamak için bir değişken olarak kullanılmaktadır. Optimum tasarım, en düşük entropi üretimine sahip sistem olarak kabul edilmektedir. Entropi üretiminin minimum olduğu koşulları belirlemenin en doğru yolu, entropi üretimi analizi yapmaktan geçmektedir. Ancak, literatüre ve edindiğimiz bilgilere göre, farklı çalışma koşullarına ve sabit ısı yüküne sahip borularda GO-Su nanoakışkanının kapsamlı bir entropi ve ekserji incelemesi bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmadaki deneysel ısı sistemde GO-Su nanoakışkanının entropi üretimi ve ekserji analizleri, sabit ısı yüklü 12 mm iç çapa sahip düz bakır bir boruda gerçekleştirilmiştir. Boruya uygulanan ısı yükleri 250 W ve 350 W iken, borulardaki akışkan debi değerleri aralığı 0,9 l/dak.-1,8 l/dak.'dır. Borularda çalışma akışkanları olarak %0,01 ve %0,02 konsantrasyonlu GO-Su nanoakışkanı ve saf su kullanılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen entropi ve ekserji analiz sonuçları, literatürde farklı nanoakışkanların kullanıldığı çalışmalarla karşılaştırılmış ve sonuçların mantıklı ve tutarlı olduğu görülmüştür. Bu çalışmanın temel amacı, uygulanan deneysel koşullar altında termodinamiğin ikinci yasa analizi ile entropi üretimini en aza indirecek en uygun koşulları belirlemek ve buna göre ikinci yasa verimlerini karşılaştırmaktır. Çalışmanın sonuçları, 12 mm iç çapa sahip boruda farklı GO-Su nanoakışkanı konsantrasyonlarında ısı ve sürtünme entropi üretimi, çıkış ekserji oranı ve 2. Yasa verimi olarak sunulmuştur.

## 2. DENEYSEL SİSTEM

Bu çalışmada, Şekil 1'de verilen deney sisteminde kullanılan 12 mm iç çapa ve sabit ısı yüküne sahip bakır borudaki GO-Su nanoakışkanının entropi ve ekserji analizleri yapılmıştır. Deney tesisatı temel olarak test bölümü (12 mm iç çaplı boru), veri kayıt bölümü, toplama tankı, pompa ve soğutma bölümünden oluşmaktadır. Toplama tankından alınan test sıvısı bir pompa ile ana hatta pompalandıktan sonra debimetreden geçerek 12 mm çaplı borulardan oluşan test bölümüne ulaşır. Akış hızı bir vana ile kontrol edilebilen ve istenilen sıcaklığa ulaştıktan sonra bu borudan geçen belirli bir sıcaklıktaki akışkan, sabit bir giriş sıcaklığı elde etmek için şehir suyu ile soğutulan spiral şekilli bakır borudan oluşan soğutucudan geçerek toplama tankına geri döner. Ayrıca, 12 mm çaplı boru deney sisteminde üstten 2. Sırada bulunan borudur.



Şekil 1. Entropi ve ekserji analizi yapılan borunun deneysel sistemi

### 2.1 Nanoakışkanın Hazırlanması

Bu çalışmanın deneysel kısmında grafitten sentezlenen GO nanoparçacığı kullanılmıştır. GO nanoparçacığı sentezlenirken grafit bazı kimyasallarla işleme alınmıştır. Bu işlemde sonra grafit, asitlerden ve kimyasallardan ayrılması için damıtılmış sudan geçirildi ve daha sonra GO nanoparçacıkları elde etmek için bir fırında kurutuldu (Hajjar ve ark. 2014; Hummers ve Offeman, 1958). GO-Su nanoakışkanı, sentezlenen GO nanoparçacığı kullanılarak iki aşamalı bir nanoakışkan



hazırlama yöntemi ile elde edilmiştir. Deneylerde kütleleri 0,4 g ve 0,8 g olan GO nanoparçacıkları kullanılarak sırasıyla %0,01 ve %0,02 hacimsel konsantrasyonlarda GO-Su nanoakışkanları elde edilmiştir.

Nanoakışkandaki hacimsel nanoparçacık konsantrasyonu Denklem (1) ile hesaplanmaktadır.

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

Denk. (1)' de  $m_p$  nanoparçacık kütlesi,  $m_{bf}$  su kütlesi ve  $\rho_{bf}$  ve  $\rho_p$  sırasıyla su ve nanoparçacığın yoğunluklarıdır.

## 2.2 GO-Su Nanoakışkanının Termofiziksel Özellikleri

Hazırlanan nanoakışkanın viskozite ölçümleri Malvern Kinexus Pro koni ve plaka gerilim kontrollü reometre ile yapılmıştır. Isıl iletkenlik katsayısının ölçümü, literatürde sıkça kullanılan sıcak tel yöntemi ile KD2 Pro ısıl iletkenlik ölçer kullanılarak yapılmıştır. Nanoakışkanın yoğunluk ölçümleri Anton-Paar DMA 4200 Yoğunluk Ölçer ile deneysel olarak yapılmıştır. Bununla birlikte, nanoakışkanın özgül ısı değeri, Pak ve Cho (1998) tarafından önerilen analitik model sonucunda Denklem (2) ile elde edilmiştir.

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

Denk. (2)' deki p, nf ve bf sırasıyla partikül, nanoakışkan ve baz akışkanı ifade etmektedir. Ayrıca konsantrasyonun düşük olması nedeniyle nanoakışkanın hesaplanması sonucunda elde edilen özgül ısı değeri, suya yakın olduğu için birbirine eşit alınmıştır.

Nanoakışkanın ve saf suyun özgül ısı dışında diğer termofiziksel özellikleri deneysel olarak elde edilmiş ve Tablo 1'de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Akışkanların termofiziksel özellikleri

Akışkan	k (W/mK)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kgK)	$\mu$ (Ns/m <sup>2</sup> )
Saf su	0,6172	995,8	4178,4	803,4x10 <sup>-6</sup>
GO-Su (0.01%)	0,6696	996,1	4178,4	1000x10 <sup>-6</sup>
GO-Su (0.02%)	0,678	996,1	4178,4	1060x10 <sup>-6</sup>

## 2.3 Isı Transferi Hesabı

Test bölümüne sağlanan ısı yükü Denk. (3) ile hesaplanmaktadır.

$$Q = VI \quad (3)$$

Denklem (3)' deki  $V$  ve  $I$  voltaj ve akım değerini ifade etmektedir.

Test borusuna sağlanan ısı akısı Denk. (4) ile bulunmaktadır.

$$q'' = \frac{Q}{A_s} = \frac{Q}{\pi D_e L} \quad (4)$$

Bu denklemdeki,  $A_s$  ısı transferi yüzey alanını,  $L$  ve  $D_e$  ise borunun uzunluğu ve dış çapıdır.

Akışkana olan ısı transferi Denk. (5) ile gösterilmektedir.

$$Q_f = n h_c p (T_o - T_i) \quad (5)$$

Denk. (6)' da akışkanın kütleli debisi belirtilmektedir.

$$\dot{m} = \rho u_m A_c \quad (6)$$

Bu denklemlerdeki,  $\rho$ ,  $u_m$ ,  $c_p$  ve  $A_c$  sırasıyla akışkanın yoğunluğunu, ortalama hızını, özgül ısısını ve test borusunun kesit alanını ifade ederken;  $T_o$  ve  $T_i$  ise akışkanın borudan çıkış sıcaklığını ve boruya giriş sıcaklığını göstermektedir.

Taşıma ısı transfer katsayısı, aşağıdaki Denk. (7) ile ifade edilmektedir.

$$h_{(x)} = \frac{q''}{T_{s(x)} - T_{m(x)}} \quad (7)$$

Bu denklemdeki,  $x$  borunun girişinden olan mesafeyi belirtirken;  $T_{s(x)}$  ve  $T_{m(x)}$  ise sırasıyla ölçüm yapılan noktadaki boru yüzey sıcaklığını ve kesit alanı boyunca ortalama kütleli akış ortalama sıcaklığını ifade etmektedir. Bununla birlikte,  $T_{m(x)}$  aşağıdaki Denk. (8) ile hesaplanmaktadır.

$$T_{m(x)} = T_{m,i} + \frac{q'' P}{\dot{m} c_p} x \quad (8)$$

Bu denklemdeki,  $T_{m,i}$  ve  $P$  sırasıyla ortalama akış giriş sıcaklığını (30 °C) ve borunun çevresini vermektedir.

Denk. (7) ile elde edilen taşıma ısı transfer katsayısı Denk. (9)' daki boru uzunluğu boyunca Nu sayısına ulaşmak için kullanılmaktadır.

$$Nu_{(x)} = \frac{h_{(x)} D_i}{k} \quad (9)$$

Burada,  $D_i$  borunun iç çapı,  $k$  akışkanın ısıl iletkenliğidir.

Reynolds sayısı (Re), Denk. (10) ile gösterilmektedir.

Re sayısı

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

Deneyler sırasında, basınç ölçümleri ile ulaşılan değerler, sürtünme faktörü ( $f$ )' i elde etmek için kullanılır. Deneysel  $f$  Denk. (11) ile aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

Deneysel sürtünme faktörü

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{D_i}\right) \left(\frac{\rho u_m^2}{2}\right)} \quad (11)$$

## 2.4 Entropi hesabı

Sabit ısı akısına sahip düz bir boruda akışkan akışı sırasında ısı transferi ve akışkan sürtünmesinden kaynaklanan entropi üretim hızı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Singh ve ark., 2010).

Isıl entropi

$$S_{Türetim(x)} = \frac{q''^2 \pi D_i x}{Nu_{(x)} k T_{ort(x)}} \quad (12)$$

Sürtünme entropisi

$$S_{Füretim(x)} = \frac{32m\dot{c}_p f x}{\rho^2 T_{ort(x)} \pi^2 D_i^5} \quad (13)$$

Denk. (12) ve (13)' de  $D_i$  borunun giriş çapı iken,  $x$  yüzey termokupllarının boru girişinden olan mesafesidir.  $\rho$  ise akışkan yoğunluğudur.

Denklem (13)' deki  $T_{ort(x)}$  aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$T_{ort(x)} = \frac{T_i - T_{m(x)}}{\ln\left(\frac{T_i}{T_{m(x)}}\right)} \quad (14)$$

## 2.5 Ekserji Hesabı

Çıkış ekserjisi, Denk. (15) ile hesaplanmaktadır (Narendran ve ark., 2018).

$$E_{çıkış} = m\dot{c}_p \left[ (T_o - T_{ort}) - T_{ortam} \ln\left(\frac{T_o}{T_{ortam}}\right) \right] \quad (15)$$

Burada,  $E_{çıkış}$  çıkıştaki ekserji,  $T_o$  çıkıştaki akışkan sıcaklığı,  $T_{ortam}$  deneyin yapıldığı laboratuvar şartlarındaki ortam sıcaklığı olup; ekserji hesaplamalarında 22 °C olarak alınmıştır.

Giriş ekserjisini hesaplamak için aşağıda verilen Denk. (16) kullanılmıştır.

$$E_{giriş} = m\dot{c}_p \left[ (T_i - T_{ortam}) - T_{ortam} \ln\left(\frac{T_i}{T_{ortam}}\right) \right] \quad (16)$$

Sistemin 2. yasa verimi Denk. (17)' den aşağıdaki gibi elde edilebilmektedir.

$$\eta = \frac{E_{çıkış}}{E_{giriş} + E_e} \quad (17)$$

Burada,  $\eta$  verimi,  $E_e$  ise sisteme sağlanan elektrik ekserjisini belirtmektedir.

Akışkanın sabit bir ısı yükü ile ısıtılması için borunun etrafına sarılan nikel krom tel ısıtıcı sayesinde sisteme sağlanan elektrik ekserjisi Denk. (18) ile hesaplanmaktadır.

$$E_e = \left[ 1 - \left( \frac{T_{ortam}}{T_{ort}} \right) \right] Q_f \quad (18)$$

## 3. BULGU VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmadaki çıkış ekserjisi sonuçlarının doğru ve kabul edilebilir olduğunu kanıtlamak için bu çalışmanın sonuçları (Tablo 2); Ahammed ve ark., (2016)' nın (Tablo 3) sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Ahammed ve ark., (2016) çalışmalarında su ve %0,1 hacimsel konsantrasyonda Grafen-su ve  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanlarını kullanmışlardır. Çalışmalarında Re sayısı aralığı 200-1000 iken sistemdeki hidrolik çap 1,184 mm'dir. Elde edilen maksimum çıkış ekserjisi, 200 Re sayısında grafen, alüminyum oksit-su ( $Al_2O_3$ -su) nanoakışkan ve su için sırasıyla 26,06 W, 22,33 W ve 20,57 W' dır. Bu sonuçların, daha düşük GO-Su nanoakışkan (%0,01) konsantrasyonunda ve daha yüksek Re sayılarında çalışılan sunulan çalışmadaki ekserji değerleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bu

uyumlu sonuçlara literatürde incelenen çalışmalarda entropi değerleri için de ulaşılmış ve entropi grafiklerinin yorumlanmasında tartışılmış ve incelenmiştir.

**Tablo 2.** Farklı Re sayılarında akışkanların çıkış ekserji değerleri

Re	Saf su	Re	%0,01 GO-Su
2043	16,39	1580	17,35
2692	19	2111	20,26
3352	22,86	2641	23,92
3945	26,39	3171	27,48

Şekil 2' de 250 W ısı yüküne sahip 12 mm iç çaplı ve 1,83 m boyundaki bakır düz boru boyunca %0,01 GO-Su nanoakışkanının ısı entropi üretiminin ( $S_{Türetim}$ ) değişimi debi değişimine (Re sayısına) bağlı olarak gösterilmektedir. Entropinin azalması, ısı geçişinin (Nusselt sayısının) artışıyla sonuçlanmaktadır. Bu bağlamda, debinin artışı, nanoakışkana olan ısı transferini artırarak; ısı entropi üretiminin azalmasını sağlamaktadır. Şekil 2' de görüldüğü gibi en düşük entropi üretimi 1,5 l/dak debiye sahip olan nanoakışkan için elde edilirken; en yüksek ısı entropi üretimi ise 0,9 l/dak'lık debi değerinde görülmektedir. 0,9 l/dak ve 1,2 l/dak'lık debilerde boru boyunca ortalama olarak 1,5 l/dak'lık debi değerine göre ısı entropi üretiminde sırasıyla %170 ve %147'lik artışlar bulunmaktadır. Artan akışkan hareketliliği nanoakışkanın boru cidarıyla olan etkileşimini artırarak ısı geçişini iyileştirmektedir.

**Tablo 3.** Farklı Re sayılarında Ahammed ve ark., (2016)'nın çıkış ekserjisi değerleri

Re	Saf su	%0,1 Grafen-Su	%0,1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Su
200	20,57	26,06	22,33
400	20	24,39	21,37
600	19	23,74	20,57
800	18,48	23,45	19,86
1000	18,13	22,81	19,57

Boru boyunca farklı debilerde ve 250 W ısı yükünde %0,01 ve %0,02 hacimsel konsantrasyonlarda GO-Su nanoakışkanının ısı entropi üretimi ( $S_{Türetim}$ ) değişimleri Şekil 3' de verilmektedir. Nanoakışkanın konsantrasyon değerinin artması, ısı geçişine katılan nanoparçacık sayısının artmasını sağlamaktadır. Bu da, sabit ısı yüküne sahip (250 W) bakır boru yüzeyinden nanoakışkana olan ısı transferini artırmaktadır. Bu nedenle, %0,02 GO-Su nanoakışkanın boru boyunca  $S_{Türetim}$  değeri, %0,01 konsantrasyonlu olan GO-Su nanoakışkanından daha düşüktür. 0,9 l/dak'lık debide boru boyunca ortalama olarak %0,02'lik nanoakışkan konsantrasyonunda %0,01'lik nanoakışkan konsantrasyonuna göre entropi üretiminde %93,43'lük azalma sağlanmaktadır. Bununla birlikte, nanoparçacık konsantrasyonu yanında debi değerinin artışı da entropi üretimi azalışını daha da azaltmaktadır.

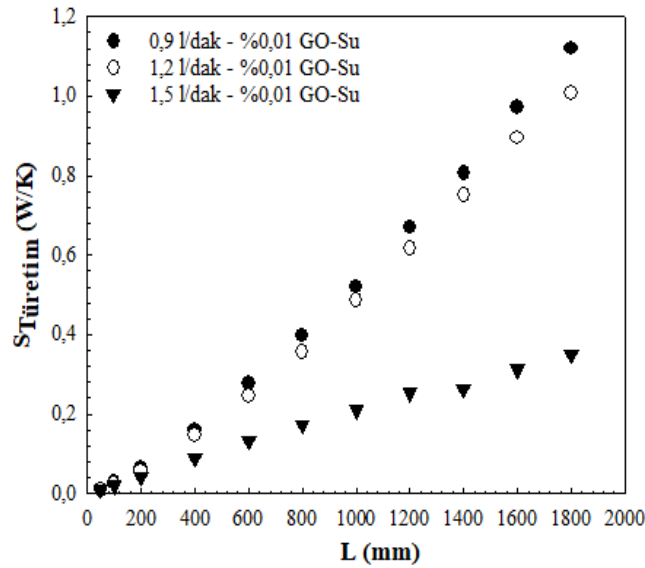
Şekil 4' de %0,02 konsantrasyona sahip GO-Su nanoakışkanı için boru boyunca farklı debilerde (0,9 l/dak ve 1,2 l/dak) ve farklı ısı yüklerinde (250 W ve 350 W)  $S_{Türetim}$ 'in değişimi sunulmaktadır. Entropi üretimi artışının temel nedenlerinden biri, ısı geçişidir. Bir sisteme olan ısı geçişi, sistemin entropisini artırmaktadır. Bu nedenle, Şekil 4' de de görülebildiği gibi her iki debi değerinde de 350 W'lık ısı yükünde 250 W'lık ısı yüküne göre elde edilen ısı entropi üretim miktarı daha fazladır. Boru boyunca 1,2 l/dak debi değerinde ve 350 W ısı yükünde 250 W ısı yüküne göre ısı entropi



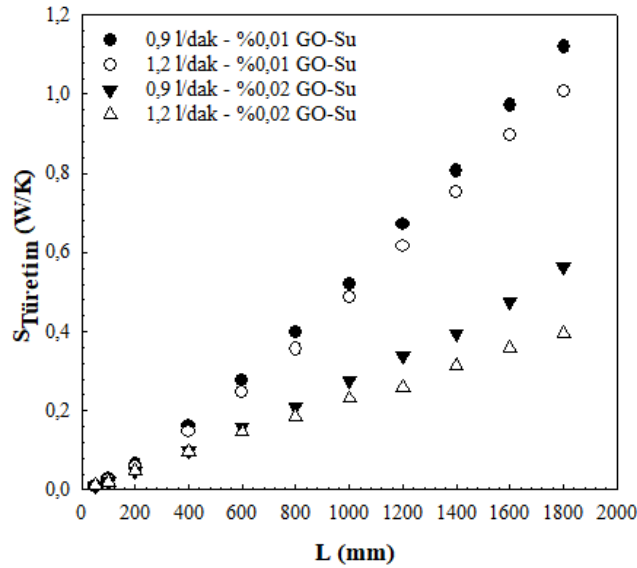
üretiminde %47' lik artış bulunmaktadır. Ayrıca, entropi üretimi miktarı her iki ısı yükü için de debi değerinin artışına bağlı olarak azalış sergilemektedir.

Boru boyunca farklı debilerde ve 250 W ısı yükünde %0,01 GO-Su nanoakışkanı için sürtünme entropisinin değişimi Şekil 5' de gösterilmektedir. Hem boru cidarı hem de nanoparçacıklar arası etkileşime bağlı olarak gelişen sürtünme entropisi debinin artışıyla yükselmektedir. Buna bağlı olarak 1,5 l/dak'lık debide en yüksek sürtünme entropisi elde edilirken; en düşük entropi değerleri ise boru boyunca 0,9 l/dak'lık debide görülmektedir. Boru boyunca ortalama olarak 0,9 l/dak ve 1,2 l/dak'lık debilerde 1,5 l/dak'lık debiye göre  $S_{Füretim}$  değerlerinde sırasıyla %77 ve %49' luk azalışlar elde edilmektedir.

Şekil 6' da borudaki debi değerine bağlı olarak saf su ve %0,01 GO-Su nanoakışkanının çıkış ( $E_{çıkış}$ ) ekserjisinin değişimi görülmektedir. Ekserji kullanılabilirliğin bir ölçüsüdür. Entropinin artışı, kullanılabilirliği yani ekserjiyi azaltmaktadır. Bu nedenle, entropi ve ekserji birbirine zıt iki olgudur. Debinin artışı, ısı transferini artırıcı etki yaparak akışkanın kullanılabilirliğini artırmaktadır. Bunun yanında sürtünme entropi üretimini ise artırmaktadır (Şekil 5). Bunun yanı sıra, Şekil 6' da da görüldüğü gibi nanoakışkandaki nanoparçacıkların ısı transferini artırıcı etkisiyle, saf suya göre nanoakışkanın kullanılabilirliği artmaktadır. 1,8 l/dak'lık debide 0,9 l/dak'lık debi değerine göre %0,01 GO-Su nanoakışkanının kullanılabilirliği %58 daha fazladır.



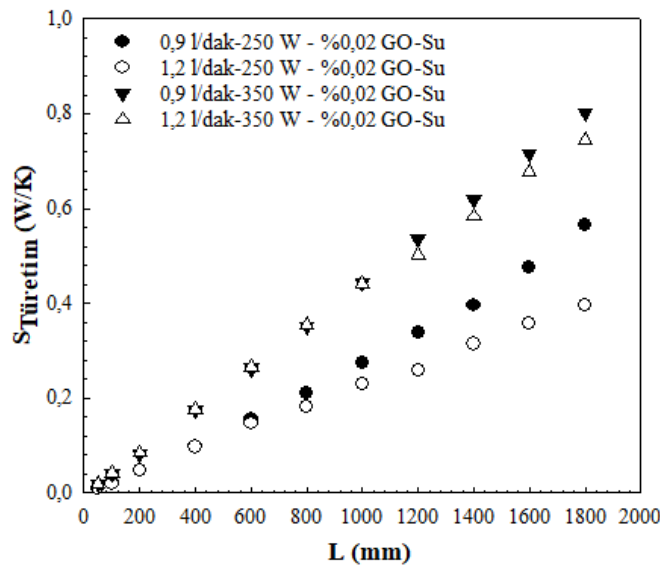
Şekil 2. 250 W ısı yükünde boru boyunca farklı debilerde %0,01 GO-Su nanoakışkanının ısı entropi üretiminin değişimi



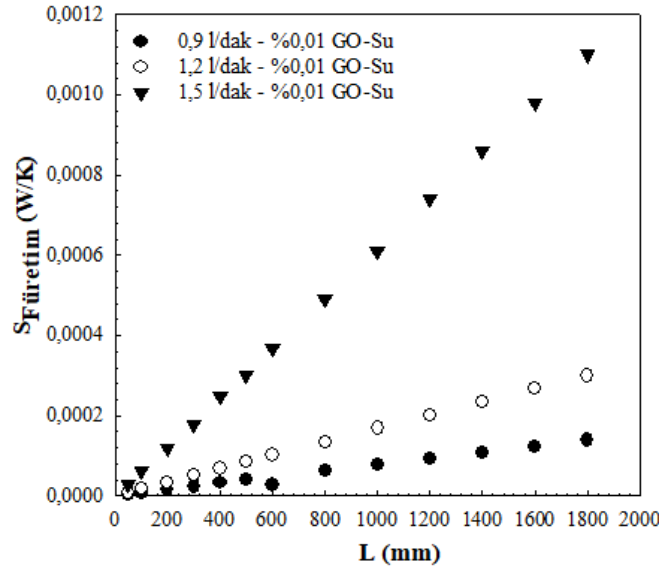
**Şekil 3.** 250 W ısı yükünde boru boyunca farklı debilerde %0,01 ve %0,02 hacimsel konsantrasyonlu GO-Su nanoakışkanının ısı entropi üretiminin değişimi

Şekil 7' de boru boyunca farklı debilerde akışkanların 250 W ısı yükünde ikinci yasa verimlerinin ( $\eta$ ) değişimleri sergilenmektedir. İkinci yasa verimi, akışkanın çıkış ekserjisinin; giriş ekserjisi ve elektrik ekserjisi nedeniyle sisteme sağlanan ekserjinin toplamının oranıdır. İkinci yasa verimi ( $\eta$ ), debinin artışıyla ve akışkana eklenen nanoparçacıklar nedeniyle artan ısı geçişine bağlı olarak elde edilen çıkış ekserjisinin artışıyla artmaktadır. Bu nedenle, saf suya göre nanoakışkanın ikinci yasa verimi daha fazla iken; 1,8 l/dak'lık debide nanoakışkanın ikinci yasa verimi %97,15 iken 0,9 l/dak'lık debide %90 olmaktadır.

10



**Şekil 4.** %0,02 GO-Su nanoakışkanı için farklı debilerde ve ısı yüklerinde (250 W ve 350 W) boru boyunca ısı entropi üretiminin değişimi

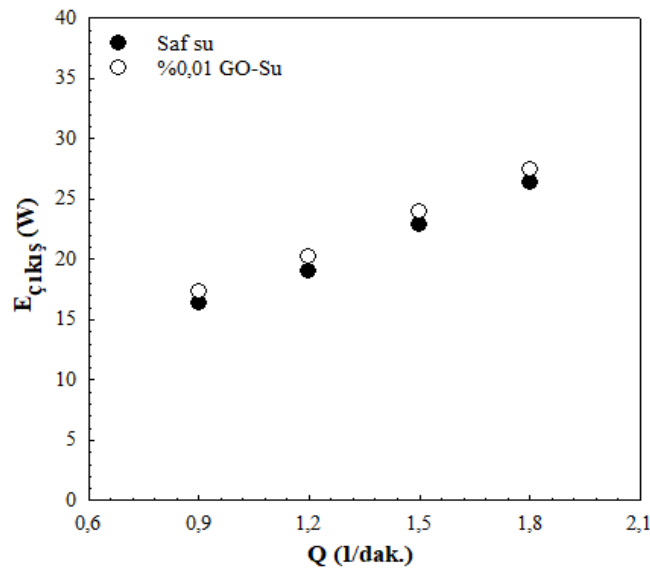


Şekil 5. 250 W ısı yükünde %0,01 GO-Su nanoakışkanı için farklı debilerde boru boyunca sürtünme entropi üretiminin ( $S_{Füretim}$ ) değişimi

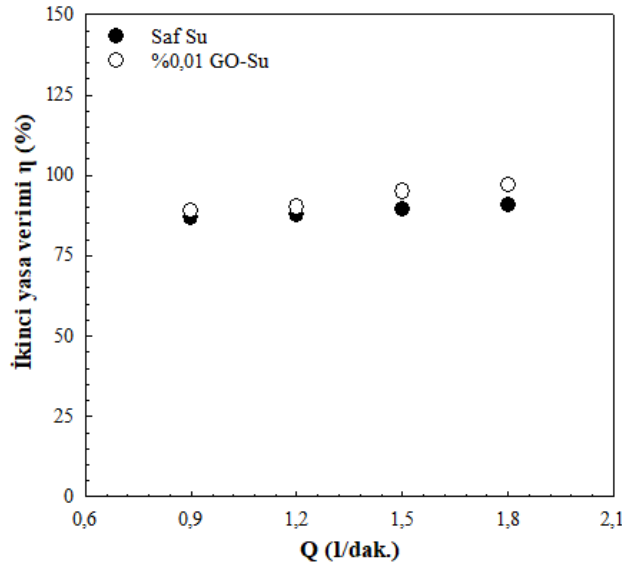
#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, iç çapı 12 mm olan ve sabit ısı yüküne sahip yatay bakır bir boruda hacimsel konsantrasyonları %0,01 ve %0,02 olan Su (saf) ve GO-Su nanoakışkanının entropi ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylece, kullanılan bakır boruda çalışılan nanoakışkan konsantrasyonlarında en düşük entropi ve dolayısıyla en yüksek ekserjili kullanım koşulları belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Debinin artışı, nanoakışkana olan ısı transferini artırarak; ısı entropi üretiminin azalmasını sağlamaktadır.
- En düşük entropi üretimi 1,5 l/dak debiye sahip olan nanoakışkan için elde edilirken; en yüksek entropi üretimi ise 0,9 l/dak'lık debi değerinde görülmektedir.
- 0,9 l/dak ve 1,2 l/dak'lık debilerde boru boyunca ortalama olarak 1,5 l/dak'lık debi değerine göre ısı entropi üretiminde sırasıyla %170 ve %147'lik artışlar bulunmaktadır.



Şekil 6. 250 W ısı yükünde debi değerine göre akışkanların çıkış ekserjisinin ( $E_{çıkış}$ ) değişimi



Şekil 7. 250 W ısı yükünde debi değerine göre akışkanların ikinci yasa verimlerinin ( $\eta$ ) değişimi

- %0,02 GO-Su nanoakışkanın boru boyunca  $S_{Türetim}$  değeri, %0,01 konsantrasyonlu olan GO-Su nanoakışkanından daha düşüktür.

- 0,9 l/dak'lık debide boru boyunca ortalama olarak %0,02'lik nanoakışkan konsantrasyonunda %0,01'lik nanoakışkan konsantrasyonuna göre entropi üretiminde %93,43'lük azalma sağlanmaktadır. Bununla birlikte, nanoparçacık konsantrasyonu yanında debi değerinin artışı da entropi üretimi azalışını daha da azaltmaktadır.

-350 W'lık ısı yükünde 250 W'lık ısı yüküne göre elde edilen ısı entropi üretim miktarı daha fazladır. Boru boyunca 1,2 l/dak debi değerinde ve 350 W ısı yükünde 250 W ısı yüküne göre ısı entropi üretiminde %47'lik artış bulunmaktadır.

- Boru boyunca ortalama olarak 0,9 l/dak ve 1,2 l/dak'lık debilerde 1,5 l/dak'lık debiye göre  $S_{Füretim}$  değerlerinde %77 ve %49'lük azalışlar elde edilmektedir.

- Nanoakışkandaki nanoparçacıkların ısı transferini artırıcı etkisiyle, saf suya göre nanoakışkanın kullanılabilirliği artmaktadır. 1,8 l/dak'lık debide 0,9 l/dak'lık debi değerine göre %0,01 GO-Su nanoakışkanının kullanılabilirliği %58 daha fazladır.

- Saf suya göre nanoakışkanın ikinci yasa verimi daha fazla olmakla birlikte; 1,8 l/dak'lık debide nanoakışkanın ikinci yasa verimi %97,15 iken 0,9 l/dak'lık debide %90 olmaktadır.

Sonuç olarak, hacimsel debideki artış ısı entropi üretim miktarını azaltırken, sürtünme entropi üretim miktarını artırmaktadır. Ayrıca boruya uygulanan ısı yükünün artması da entropi üretimini artırmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada da görüldüğü gibi düşük konsantrasyonlarda GO-Su nanoakışkanının kullanılması bile saf suya kıyasla entropi üretimini azaltarak; ısı sistemin ekserjisini artıracak ve böylece enerjinin verimli kullanımını sağlayarak küresel ısınmaya olumlu katkı sağlayacaktır.

## SEMBOLLER

- A Alan,  $m^2$   
 $c_p$  Özgül ısı,  $J kg^{-1} K^{-1}$   
D Boru çapı, m  
E Ekserji, W  
f Sürtünme faktörü, boyutsuz

h	Isı taşınım katsayısı, $W m^{-2}K^{-1}$
I	Akım, Amper
k	Isı iletim katsayısı, $W m^{-1}K^{-1}$
L	Boru boyu, m
$\dot{m}$	Kütleli debi, $kg s^{-1}$
Nu	Nusselt sayısı, boyutsuz
P	Borunun çevre uzunluğu, m
S	Entropi, $W K^{-1}$
$q''$	Isı akısı, $W m^{-2}$
Q	Isı yükü, W
Re	Reynolds sayısı, boyutsuz
T	Sıcaklık, °C
V	Voltaj, Volt
u	Hız, $m s^{-1}$
x	Test bölümünün girişinden olan uzaklık, m
$\Delta P$	Basınç düşüşü, Pa
$\mu$	Viskozite, $kg m^{-2}s^{-1}$
$\phi$	Konsantrasyon, %
$\rho$	Yoğunluk, $kg m^{-3}$
$\eta$	2. Yasa verimi, %

### Alt İndisler

bf	Temel akışkan
c	Kesit
e	Dış
f	Akışkan
nf	Nanoakışkan
p	Parçacık
m	Ortalama
m,i	Ortalama giriş
s	Yüzey

### KAYNAKÇA

Ahamed, N., Asirvatham, L.G., Wongwises, S. (2016). Entropy generation analysis of graphene-alumina hybrid nanofluid in multiport minichannel heat exchanger coupled with thermoelectric cooler. *Int J Heat Mass Transfer*, 103: 1084-1097.

Bejan, A. (1979). A study of entropy generation in fundamental convective heat transfer. *J Heat Transfer*, 101: 718-725.



- Bejan, A. (1996). Entropy generation minimization, the method of thermodynamic optimization of finite-size systems and finite-time processes, *J Appl Phys.*, 79: 1191.
- Godson, L., Raja, B., Lal, D.M., Wongwises, S. (2010). Enhancement of heat transfer using nanofluids-an overview. *Renew Sust Energy Rev.*, 14: 629-641.
- Goudarzi, N., Talebi, S. (2015). Improving performance of two-phase natural circulation loops by reducing of entropy generation. *Energy*, 93: 882-899.
- Hajjar, Z., Rashidi, A., Ghozatloo, A. (2014). Enhanced thermal conductivities of graphene oxide nanofluids. *Int Comm Int Heat and Mass Trans.*, 57: 128-131.
- Herwig, H., Wenterodt, T. (2011). Second law analysis of momentum and heat transfer in unit operations. *Int J Heat Mass Transfer*, 54: 1323-1330.
- Hummers, W.S., Offeman, R.E. (1958). Preparation of graphitic oxide. *J Am Chem Soc.*, 80: 1339.
- Hussien, A.A., Abdullah, M.Z., Yusop, N. Md., Al-Kouz, W., Mahmoudi, E., Mehrali, M. (2019). Heat transfer and entropy generation abilities of MWCNTs/GNPs hybrid nanofluids in microtubes. *Entropy*, 21: 480.
- Ji, Y., Zhang, H.C., Tong, J.F., Wang, X.W., Wang, H., Zhang, Y.N. (2016). Entropy assessment on direct contact condensation of subsonic steam jets in a water tank through numerical investigation. *Entropy*, 18: 21.
- Ji, Y., Zhang, H.C., Yang Shi, L. (2017). Entropy generation analysis and performance evaluation of turbulent forced convective heat transfer to nanofluids. *Entropy*, 19: 108.
- Karami, M., Shirani, E., Avara, A. (2012). Analysis of entropy generation, pumping power and tube wall temperature in aqueous suspensions of alumina particles. *Heat Transfer Res*, 43: 327-342.
- Keklikcioğlu, O. (2021). Entropy generation analysis of a heat exchanger tube with graphene-iron oxide hybrid nanofluid. *Eur J Sci Tech.*, 24: 398-404.
- Khalkhali, H., Faghri, A., Zuo, Z.J. (1999). Entropy generation in a heat pipe system. *Appl Therm Eng.*, 19: 1027-1043.
- Khaleduzzaman, S.S., Sohel, M.R., Saidur, R., Mahbubul, I.M., Shahrul, I.M., Akash, B.A., Selvaraj, J. (2014). Energy and exergy analysis of alumina–water nanofluid for an electronic liquid cooling system. *Int Commun Heat Mass Transfer*, 57: 118-127.
- Khaleduzzaman, S.S., Sohel, M.R., Mahbubul, I.M., Saidur, R., Selvaraj, J. (2016). Exergy and entropy generation analysis of TiO<sub>2</sub>-Water nanofluid flow through the water block as an electronic device. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 101: 104-111.
- Korei, Z., Benissaad, S. (2021). Turbulent forced convection and entropy analysis of a nanofluid through a 3D 90° elbow using a two-phase approach. *Heat Transfer*, 50: 1-31.
- Leong, K.Y., Saidur, R., Mahlia, T.M.I., Yau, Y.H. (2012). Entropy generation analysis of nanofluid flow in a circular tube subjected to constant wall temperature. *Int Commun Heat Mass Transfer*, 39: 1169-1175.
- Mahmud, S., Fraser, R.A. (2002). Thermodynamic analysis of flow and heat transfer inside channel with two parallel plates. *Exergy An Int J.*, 2: 140-146.
- Mahmud, S., Fraser, R.A. (2003). The second law analysis in fundamental convective heat transfer problems. *Int J Thermal Sci.*, 42: 177-186.
- Mehrali, M., Sadeghinezhad, E., Rosen, M.A., Akhiani, A.R., Latibari, S.T., Mehrali, M., Cornelis Metselaar, H.S. (2015). Heat transfer and entropy generation for laminar forced convection flow of graphene nanoplatelets nanofluids in a horizontal tube. *Int Comm Heat and Mass Transfer*, 66: 23-31.

- Moghaddami, M., Shahidi, S., Siavashi, M. (2012). Entropy generation analysis of nanofluid flow in turbulent and laminar regimes. *J Comput Theor Nanosci*, 9: 1586-1595.
- Myat, A., Thu, K., Kim, Y.D., Chakraborty, A., Chun, W., Ng, K.C. (2011). A second law analysis and entropy generation minimization of an absorption chiller. *Appl Therm Eng.*, 31: 2405-2413.
- Narendran, G., Bhat Mithilesh, M., Akshay, L., Arumuga Perumal, D. (2018). Experimental analysis on exergy studies of flow through a minichannel using TiO<sub>2</sub>/Water nanofluids. *Therm Sci Eng Prog.*, 8: 93-104.
- Novoselov, K., Geim, A.K., Morozov, S., Jiang, D., Grigorieva, M.K.I., Dubonos, S., Firsov, A. (2005). Two-dimensional gas of massless dirac fermions in graphene. *Nature*, 438: 197-200.
- Pak, B.C., Cho, Y.I. (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, 11: 151-170.
- Pandey, S.D., Nem, V.K. (2012). Experimental analysis of heat transfer and friction factor of nanofluid as a coolant in a corrugated plate heat exchanger. *Exp Therm Fluid Sci.*, 38: 248-256.
- Saidur, R., Leong, K.Y., Mohammad, H.A. (2011). A review on applications and challenges of nanofluids. *Renew Sust Energy Rev.*, 15: 1646-1668.
- Schmandt, B., Herwig, H. (2011). Loss coefficients in laminar flows: essential for the design of micro flow systems. *PAMM*, 11: 27-30.
- Singh, P.K., Anoop, K.B., Sundararajan, T., Das, S.K. (2010). Entropy generation due to flow and heat transfer in nanofluids. *Int J Heat Mass Transfer*, 53: 4757-4767.
- Szargut, J., Morri, D.R., Steward, F.R. (1988). Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes. Hemisphere Pubs., New York, USA.
- Taskesen, E., Tekir, M., Gedik, E., Arslan, K. (2021). Numerical investigation of laminar forced convection and entropy generation of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/water nanofluids in different cross-sectioned channel geometries. *J Therm Eng.*, 7: 1752-1767.
- Yu, W., Xie, H., Chen, L., Li, Y. (2010). Enhancement of thermal conductivity of kerosene-based Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluids prepared via phase-transfer method. *Colloids and Surfaces A*, 355: 109-113.
- Wen, D., Lin, G., Vafaei, S., Zhang, K. (2009). Review of nanofluids for heat transfer applications. *Particuology*, 7: 141-150.