



Mini ve Makro Borularda Entropi Üretiminin İkinci Yasa Temelli Karşılaştırmalı Analizi

Second Law-Based Comparative Analysis of Entropy Generation in Mini and Macro Tubes

Orhan YILDIRIM^{1*}, Şendoğan KARAGÖZ²

¹ Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye, orhan.yildirim@atauni.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8780-1297>

² Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye, skaragoz@atauni.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2618-8788>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 9 Ekim 2025
Revizyon 27 Ekim 2025
Kabul 30 Ekim 2025
Online 24 Mart 2026

Anahtar Kelimeler:

Entropi üretimi, Bejan sayısı, Mini borular, Makro borular, İkinci yasa analizi

ÖZ

Bu çalışmada, farklı çaplara sahip iki boruda (13.7 mm makro boru ve 2.74 mm mini boru) suyun zorlanmış konveksiyon altındaki ısı transferi ve entropi üretimi davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Termodinamiğin ikinci yasası esas alınarak yapılan analizlerde; ısı transferine bağlı entropi üretimi, sürtünme kaynaklı entropi üretimi ve toplam entropi üretimi hesaplanmıştır. Ayrıca sistem performansı Bejan Sayısı ve Entropi Sayısı gibi ikinci yasa göstergeleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Reynolds sayısı aralığı yaklaşık 6000–17000 arasında değişen deneysel çalışmalarda hem mini hem de makro borularda artan Reynolds ile birlikte ısı transferi kaynaklı entropi üretim değerinin azaldığı, buna karşın mini boruda sürtünme kaynaklı entropi üretimi'nin belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Makro borularda ısı transferine bağlı entropi üretimi Re arttıkça 0,15'ten 0,067'ye düşerken, mini borularda bu değerler çok daha düşüktür; örneğin $Re = 6000$ 'de $3,57 \times 10^{-5}$ W/K, $Re = 17000$ 'de ise $1,5 \times 10^{-5}$ W/K seviyesindedir. Toplam entropi üretimi incelendiğinde, makro boruda Reynolds sayısı arttıkça entropi üretimi azalırken, mini boruda bu değerin sürekli arttığı tespit edilmiştir. Bejan sayısı analizleri, mini boruda entropi üretiminin büyük ölçüde sürtünmeye dayalı olduğunu; makro boruda ise ısı transferi etkisinin daha baskın kaldığını ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, özellikle mini borularda yüksek yüzey-hacim oranının ısı transferini iyileştirmesine rağmen, sürtünme kaynaklı kayıpların ikinci yasa verimliliğini olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Bu nedenle, optimum sistem tasarımı için hem termal hem de viskoz etkilerin dikkate alındığı çok bileşenli bir yaklaşım önerilmiştir. Çalışma, borularda ikinci yasa temelli optimizasyonun önemini vurgulamakta ve bu alanda yapılacak ileri düzey tasarımlara temel teşkil etmektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 October 2025
Received in revised form 27 October 2025
Accepted 30 October 2025
Available online 24 March 2026

Keywords:

Entropy production, Bejan number, Mini tubes, Macro tubes, Second law analysis

ABSTRACT

In this study, the behavior of heat transfer and entropy generation under forced convection was experimentally investigated in two tubes of different diameters: a 13.7 mm macro tube and a 2.74 mm mini tube. Based on the second law of thermodynamics, entropy generation due to heat transfer, frictional entropy generation, and total entropy generation were calculated. System performance was also evaluated using second-law indicators such as the Bejan number and Entropy number. Experimental studies conducted in a Reynolds number range of approximately 6000–17000 revealed that while the dimensionless entropy generation due to heat transfer decreased with increasing Re in both tubes, the frictional entropy generation significantly increased in the mini tube. In macro channels, entropy generation due to heat transfer decreases with increasing Reynolds number, dropping from approximately 0.15 to 0.067 as Re reaches 17000. In contrast, significantly lower values are observed in mini channels; for instance, at $Re = 6000$, entropy generation is around 3.57×10^{-5} W/K, and it decreases to about 1.5×10^{-5} W/K at $Re = 17000$. Total entropy generation decreased with increasing Reynolds in the macro tube but continuously increased in the mini tube. Bejan number analysis showed that frictional effects dominate entropy generation in the mini tube, whereas heat transfer is more dominant in the macro tube. Although high surface-to-volume ratio in mini tubes enhances heat transfer, it also leads to greater frictional losses, reducing second-law efficiency. Therefore, a multi-objective design approach considering both thermal and viscous effects is recommended for system optimization.

Doi: 10.24012/dumf.1800310

* Sorumlu Yazar

Giriş

Enerji sistemlerinin termodinamik analizi, mühendislik uygulamalarında verimliliği artırmak ve kayıpları minimize etmek amacıyla temel bir değerlendirme aracıdır. Geleneksel olarak birinci yasa analizleri, enerji korunumu üzerinden yapılmakta olup, sistemin giriş-çıkış enerji miktarlarını dikkate alır. Ancak bu analizler, sistemin içinde meydana gelen geri dönüşümsüzlükleri göz ardı ettiği için sınırlı bir bakış açısı sunmaktadır. Bu nedenle, son yıllarda enerji sistemlerinin değerlendirilmesinde termodinamiğin ikinci yasasına dayalı analizler ön plana çıkmıştır. Bu yaklaşımda, sistemde oluşan entropi üretimi geri dönüşümsüzlüklerin bir ölçüsü olarak kabul edilmekte ve sistemin gerçek verimliliği hakkında daha doğru bilgi sağlamaktadır [1-2].

Entropi üretimi genel olarak iki temel kaynaktan ortaya çıkmaktadır: ısı transferi sırasında oluşan sıcaklık farkları ve akışkanın kanal duvarlarıyla sürtünmesi sonucu meydana gelen viskoz kayıplar. Dolayısıyla hem ısı geçişi hem de akış direnci sistemin toplam entropi üretimini belirleyen kritik parametrelerdir. Bejan (1996) tarafından önerilen Entropy Generation Minimization (EGM) yaklaşımı, mühendislik sistemlerinin entropi üretimi üzerinden optimize edilmesini hedeflemekte ve ikinci yasa analizine dayalı tasarım prensipleri geliştirilmesine olanak sunmaktadır [3].

Literatürde, akışkan olarak saf su kullanılan ısı değişim sistemlerinde farklı boru çaplarının entropi üretimi üzerindeki etkisi kapsamlı biçimde incelenmiştir. Özellikle makro borular ($\varnothing 13.7$ mm) ile mini/mikro borular ($\varnothing 2.74$ mm) arasında geometrik farkların, akış karakteristikleri (laminer-türbülans geçişi, sınır tabaka gelişimi) ve ısı transferi mekanizmaları üzerindeki etkisi entropi üretimini önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Örneğin López-Núñez ve arkadaşları, saf su ve nanoakışkanlarla yapılan çalışmalarında entropi üretiminin boru çapına, akış hızına ve sıcaklık gradyanına bağlı olarak belirgin farklılıklar gösterdiğini raporlamışlardır [4]. Bu nedenle boru çapı küçüldükçe, ısı transferiyle ilişkili faydalı entropi üretimi azalabilirken, akışkan sürtünmesine dayalı zararlı entropi üretimi artış gösterebilir. Bu durum sistem tasarımı açısından önemli optimizasyon kararlarını beraberinde getirir. Entropi üretimi genellikle mikro ve mini ölçekli borularda yapılan çalışmalarla analiz edilmektedir. Bu tür sistemler, kompakt ısı eşanjörleri, mikrokanal soğutucular, biyomedikal mikroakışkanlar ve elektronik cihazların ısı yönetimi gibi alanlarda geniş uygulama alanına sahiptir. Mini borular, yüksek yüzey-hacim oranı sayesinde ısı transferi açısından avantaj sağlarken, aynı zamanda sürtünmeye bağlı viskoz kayıpların da artmasına neden olmaktadır. Niazi ve Xu (2020), mikrobiyal ölçekteki borularda akışkanın duvarla etkileşiminin daha yoğun olduğunu ve bu durumun entropi üretimini belirgin şekilde artırdığını göstermiştir [5]. Benzer şekilde, Fadodun ve arkadaşları (2022), miniborularda türbülanslı akışa geçişin daha erken gerçekleştiğini ve bu durumun akış rejimi duyarlılığını artırdığını vurgulamaktadır [6]. Yüzey pürüzlülüğü ve boru geometrisindeki değişiklikler de entropi üretimini etkileyen önemli unsurlardır. Özellikle kıvrımlı veya konik yapıya sahip miniborularda, yüzey şekli viskoz kaynaklı entropi üretimini artırırken, aynı zamanda ısı transfer sürecine müdahale edebilir. Ayrıca, nanoparçacık içeren akışkanların miniboru sistemlerinde daha belirgin bir

etki gösterdiği, entropi üretiminin bu akışkan türlerine karşı daha hassas olduğu belirtilmektedir [6].

Yang vd., (2024), 3 mm çapındaki bir mini-anneler kanalda yapılan deneysel ve sayısal çalışmada, makro kanallara göre daha düşük entropi üretimi ile daha homojen sıcaklık ve hız dağılımı gözlemlemişlerdir [7]. Benzer şekilde, Li ve Kleinstreuer (2010), mikrokanallarda saf suyun farklı Re sayılarındaki laminar akışını incelemiş ve en düşük entropi üretimi için optimal akış koşullarının belirlenebileceğini göstermiştir [8]. Ayrıca, minikanallarda sürtünmeye bağlı entropi üretiminin önemli ölçüde arttığı, buna karşın termal entropi üretiminin düşebileceği belirtilmiştir [9]. Bu tür bulgular, kanal çapının entropi üretimi üzerindeki etkisinin sadece geometrik değil, aynı zamanda akış rejimi ve sıcaklık koşullarıyla da bağlantılı olduğunu göstermektedir [10].

Bu çalışmada kullanılan akışkan saf su olup, tek fazlı, sıkıştırılmaz ve Newtonyen özellikleri ile mühendislik uygulamalarında en yaygın kullanılan referans akışkanlardan biridir. Su, yüksek özgül ısı kapasitesi ve termal iletkenliği nedeniyle zorlanmış konveksiyon sistemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir [11]. Ayrıca, deneysel sistemin karakteristiği gereği, bu çalışmada faz değişimi, türbülans modellemesi veya nanofluid katkısı gibi etkiler söz konusu değildir; sistem tek fazlı su akışı temelinde değerlendirilmiştir. Literatürde su bazlı deneysel çalışmalar arasında Manay vd. (2018), mikrokanallarda artan Re sayısının entropi üretimi üzerindeki etkisini deneysel olarak analiz etmiş ve düşük Re rejimlerinde ısı transferi kaynaklı entropi üretiminin daha baskın olduğunu ortaya koymuştur [9]. Mikro boyutlu sistemlerde boyut küçüldükçe, viskoz etki artmasına rağmen toplam entropi üretimi azalabilir [12].

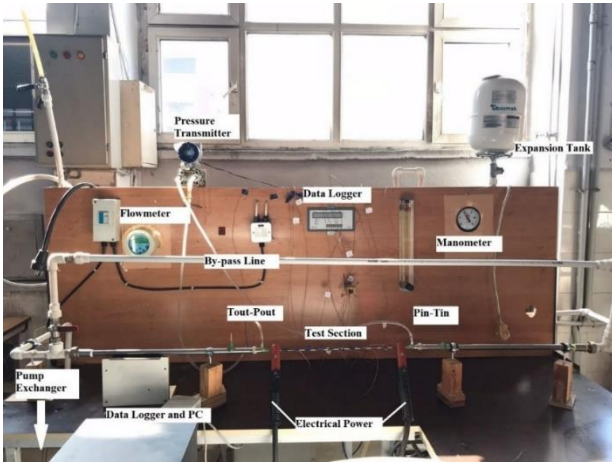
Bu çalışmanın amacı, farklı çaplara sahip (13,7 mm ve 2,74 mm) borularda su ile zorlanmış konveksiyon altında gerçekleşen ısı transferi ve entropi üretimini ikinci yasa temelli olarak karşılaştırmalı biçimde incelemektir. Isı transferine bağlı entropi üretimi, sürtünme kaynaklı entropi üretimi, toplam entropi üretimi, Bejan Sayısı ve Entropi Üretim Sayısı gibi ikinci yasa göstergeleri analiz edilerek, boru çapı ve akış koşullarının sistemin termodinamik verimliliği üzerindeki etkileri deneysel olarak ortaya konmuştur. Literatürdeki çalışmaların çoğu teorik veya sayısal modellere dayanırken, bu çalışma doğrudan deneysel verilere dayalı olması açısından özgünlük taşımaktadır. Özellikle mini borularda sürtünme kaynaklı entropi üretiminin Reynolds sayısına bağlı değişimini ve optimal Re aralığını sistematik biçimde ortaya koymasıyla, mini boru sistemlerinin ikinci yasa temelli tasarımı için deneysel bir temel sunmaktadır.

Materyal ve Yöntem

Bu çalışma da türbülanslı akış rejiminde çalışan dairesel borulu bir ısı değiştiricide meydana gelen entropi üretiminin etkilerini incelemektedir. Deney düzeneği, Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilen kapalı devre bir sistem olarak tasarlanmış ve kurulmuştur. Sistem; pompa ile sağlanan akışkan sirkülasyonu, ısıtma elemanları, sıcaklık ve basınç sensörleri ile veri toplama ekipmanlarından oluşmaktadır [13]. Deneysel çalışmada kullanılan makro boru test bölümü, iç çapı 13.7 mm, dış çapı 17 mm ve uzunluğu 1020 mm olan yatay bir krom-nikel borudan oluşmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Makro Boru Deney Sistemi



Şekil 2. Mini Boru Deney Sistemi [16]

Mini boru ve makro boruda da test sisteminin ana boru hattı 12.7 mm çapındadır. Mini borunun test bölgesinde ise iç çapı 2.74 mm Cr-Ni (316L paslanmaz çelik) mini boru yer almaktadır ve 370 mm uzunluğundadır (Şekil 2). Makro ve mini boruda Deneyler, 6000 ila 17000 aralığındaki beş farklı Re sayısında gerçekleştirilmiştir. Mini boruda, sırasıyla 50, 60, 70, 80, 90 ve 100 l/h Makro Boruda 500-1000 l/h hacimsel debilere karşılık gelmektedir. Mini boruda 20 W, Makro Boru da ise 500 W değerinde güç verilmiştir. DeneySEL düzeneğin ayrıntılı görünümü Şekil 2’de sunulmuştur.

DeneySEL çalışmada dolaşım akışkanı olarak su tercih edilmiş ve akış, santrifüj tip bir pompa ile sağlanmıştır. Türbülanslı akış rejimini elde etmek amacıyla Re sayısı 5000 ile 17000 arasında değiştirilecek şekilde debi ayarlanmıştır. Test borusu, dış yüzeyine sarılan elektriksel direnç teli ile düzgün bir şekilde ısıtılmıştır. Uygulanan elektrik gücü, bir güç kaynağı aracılığıyla ayarlanmış ve ölçülmüştür. Isı kayıplarını en aza indirmek amacıyla test bölümü yalıtılmıştır (Şekil 1). Sıcaklık ölçümleri, test borusunun dış yüzeyine yerleştirilen T tipi termokupl ile yapılmıştır. Ayrıca, akışkanın giriş ve çıkış noktalarına da birer termokupl yerleştirilmiştir. Ölçülen sıcaklık verileri veri kayıt cihazına aktarılmış ve doğruluğu artırmak amacıyla her ölçüm 60 saniyelik örnekleme süresi boyunca ortalanarak değerlendirilmiştir. Basınç kayıpları ise test bölümünün uç noktalarına bağlanan U borulu manometre ile belirlenmiştir. Deney sırasında kaydedilen parametreler; giriş ve çıkış sıcaklıkları, boru yüzey sıcaklıkları, test bölümündeki basınç farkı, hacimsel debi ve uygulanan elektrik gücü olarak

listelenmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan ölçüm cihazlarının hata payları şu şekildedir: Tüm termokupl $\pm\%1$ hassasiyete sahiptir. Akışkan sıcaklıklarının kaydedilmesinde kullanılan veri kayıt cihazının hassasiyeti $\pm\%0,5$ ’tir. Sistemdeki sirkülasyon pompası $\pm\%1$ hassasiyetle çalışmaktadır. Akışölçer, basınç transmitteri ve diğer kontrol ekipmanları ise çalışma koşullarının belirlenen tolerans aralıkları içerisinde sabit kalmasını sağlayacak şekilde seçilmiştir.

Aşağıdaki termodinamik performans göstergeleri değerlendirilmiştir [1,13-16]. *Nusselt sayısı* (Nu) ve *Reynolds sayısı* (Re), Isı transferinin artırılmasını değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır (Eş.1). Boyutsuz Re sayısı ise Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (1)$$

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \quad (2)$$

Sürtünme katsayısı (f): Hidrolik direnç hesaplamalarında kullanılmıştır (Eş. 3).

$$f = \frac{2\Delta p D_h}{\rho u^2 L} \quad (3)$$

Burada, L boru uzunluğu (m), f sürtünme katsayısı, D boru iç çapı (m), ΔP basınç kaybı (bar), Re sayısı, μ dinamik viskozite (kg/ms), ρ yoğunluk (kg/m³), u akış hızı (m/s), k ise akışkanın ısı iletkenliği (W/m·K) olarak tanımlanmıştır. Deneyler sonucu elde edilen Nu - f değerleri tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1. Boru tiplerine göre Nu - f karşılaştırılması

	Re	Nu	f
Makro Boru	17073	127	0,0415
	13715	108	0,0499
	11180	93	0,0624
	8520	76	0,0831
	5726	56	0,1245
Mini Boru [16]	17073	163	0,0414
	13715	135	0,0427
	11180	114	0,0438
	8520	92	0,0463
	5726	69	0,0483

Isı transferi ve akışkan sürtünmesine bağlı geri dönüşümsüzlükler, entropi üretimine katkıda bulunmuştur [13]. Sınırlı sıcaklık farkları, ısı geçişinden kaynaklanan entropi üretimini teşvik ederken, viskoz etkilerden doğan sürtünme kaynaklı geri dönüşümsüzlükler de üretimi artırmıştır [17]. Toplam entropi üretimi (Eş.4), Bejan (2001) tarafından tanımlanan Eşitlik 6’ya göre hesaplanmıştır [2].

Toplam entropi üretim hızı ısı transferi ve sürtünme kaynaklı kayıplardan kaynaklanmaktadır (Eş. 4).

$$\begin{aligned} S'_{\text{gen,total}} &= S'_{\text{gen,ht}} + S'_{\text{gen,ff}} \\ &= q'^2 / (\pi k T_b^2 Nu) \\ &\quad + 32m^3 f / (\pi^2 \rho^2 T_b D_h^5) \end{aligned} \quad (4)$$

Toplam entropi üretimi, $S'_{\text{gen,total}}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] olarak ifade edilmiştir. Isı transferine bağlı entropi üretimi $S'_{\text{gen,ht}}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], sürtünmeye bağlı geri dönüşümsüzlüklerden kaynaklanan entropi üretimi ise $S'_{\text{gen,ff}}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] olarak tanımlanmıştır. Birim uzunluk başına ısı transferi q' [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$], ısı iletim katsayısı k [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], akışkan yoğunluğu ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], ve hidrolik çap ise D_h [m] olarak gösterilmiştir.

Entropi üretim sayısı (N_s), Normalize edilmiş entropi üretimini temsil eder (Eş. 5). Bejan sayısı (Be), Termal geri dönüşümsüzlüklerin toplam entropi üretimi içindeki payını değerlendirmek için kullanılır (Eş. 6–7).

$$N_s = \frac{S'_{\text{gen,total}}}{k} \quad (5)$$

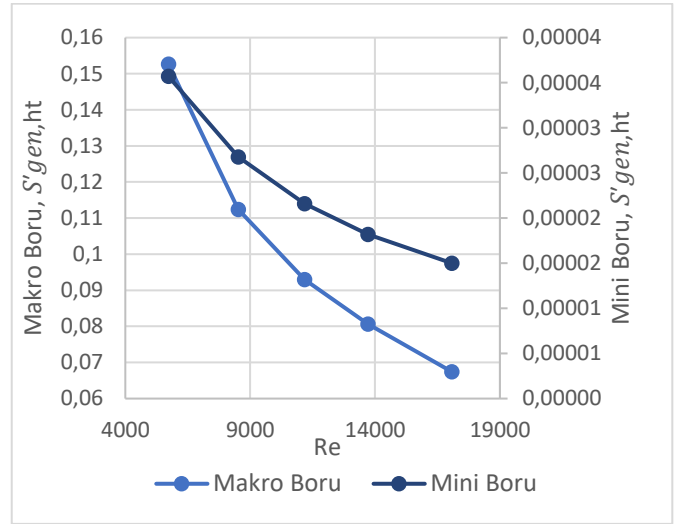
$$Be = \frac{N_{\text{ht}}}{N_s} \quad (6)$$

$$N_{\text{ht}} = \frac{S'_{\text{gen,ht}}}{k} \quad (7)$$

Araştırma Bulguları ve Tartışma

Bu bölümde, su akışkanını kullanılarak farklı çaplara (13,7 mm ve 2,74 mm) sahip makro ve mini borularda zorlanmış konveksiyon altında gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen veriler sunulmaktadır. Analizler hem ısı transferi performansına hem de termodinamiğin ikinci yasası kapsamında entropi üretimine odaklanmıştır. Özellikle, ısı transferine bağlı entropi üretimi sürtünme kaynaklı entropi üretimi, toplam entropi üretimi, Entropi Sayısı (N_s) ve Bejan Sayısı (Be) gibi parametreler incelenerek, farklı Re sayılarının bu göstergeler üzerindeki etkisi detaylı olarak değerlendirilmiştir.

Isı transferine bağlı entropi üretimi



Şekil 3. Isı Transferine Bağlı Borularda Entropi Üretimi

Isı transferiyle çalışan sistemlerde, ısı akışının yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa olan geçişi kaçınılmaz olarak entropi üretimine neden olur. Bu entropi üretimi, doğrudan sistemin ikinci yasa verimliliğini etkileyen bir kayıp mekanizmasıdır. Dolayısıyla, ısı transferinden kaynaklanan entropi üretimi, özellikle mikro ve mini kanal uygulamalarında sistem tasarımına yön veren temel parametrelerden biridir. Şekil 3’de, makro boru (13.7 mm) ve

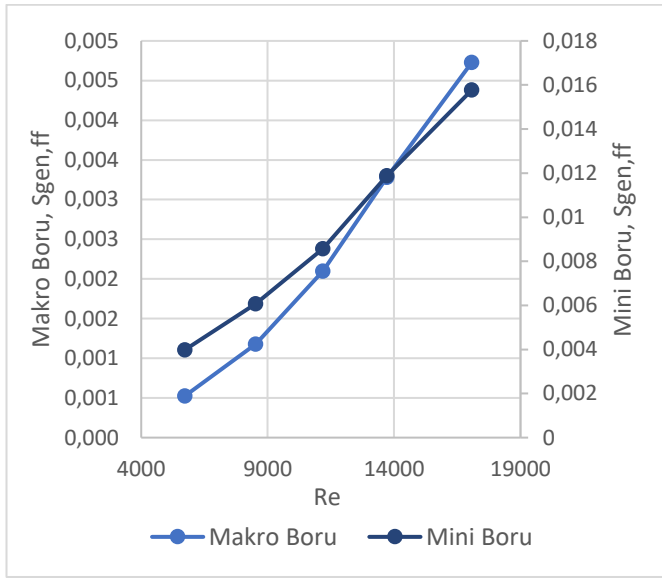
mini boru (2.74 mm) için deneysel olarak elde edilen $S'_{\text{gen,ht}}$ değerlerinin Re sayısına bağlı değişimi gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, her iki boru tipi için de benzer bir eğilimi ortaya koymaktadır: Re sayısı arttıkça ısı transferine bağlı entropi üretimi azalmaktadır. Yüksek Re değerlerinde akışkan hızı arttığı için duvarla temas süresi kısaldı; bu da sıcaklık farklarını dengeleyerek entropi üretimini azaltır. Makro boru için entropi üretimi, düşük Re aralığında 0,15 civarındayken, $Re = 17000$ civarına gelindiğinde 0,067 seviyelerine kadar düşmektedir. Mini boruda ise bu değerler çok daha düşük mertebelerde ölçülmektedir; örneğin, $Re = 6000$ civarında $S'_{\text{gen,ht}}$ yaklaşık 3.57×10^{-5} W/K iken, $Re = 17000$ civarında bu değer 1.5×10^{-5} W/K seviyesine kadar gerilemektedir. Mini boruların yüksek yüzey/hacim oranı, ısı transfer etkinliğinin artmasında rol oynamaktadır.

Bu sonuçlar, literatürde yer alan birçok çalışmayla da doğrudan uyumludur [13]. Örneğin, Singh ve arkadaşları (2010), mini borularda ısı transferinden kaynaklanan entropi üretiminin makro sistemlere kıyasla çok daha düşük olduğunu, bunun da mikro ölçekteki duvar etkilerinden kaynaklandığını belirtmiştir [18]. Aynı şekilde Manay vd., (2018), mikrokanaal yapılarında Re arttıkça ısı transfer veriminin yükseldiğini ve buna bağlı olarak entropi üretiminin azaldığını deneysel olarak göstermiştir [9]. Bir diğer husus da yüksek Re sayılarında makro ve mini boru entropi üretimi değerlerinin birbirine yakınsamaya başlamasıdır. Bu durum, türbülans öncesi geçiş rejiminde mini boruların avantajını korusa da akış Re sayısı belirli bir eşik değerinin üzerine çıktığında makro boruların da benzer bir performans göstermeye başladığını ortaya koymaktadır. Ancak mini boruda entropi üretiminin başlangıç değerlerinin oldukça düşük olması, düşük enerji tüketimi ve daha az

düzensizlikle çalışan sistemlerin mini çaplı kanallarda daha başarılı olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, bu grafik ve deneysel bulgular, ısı transferine dayalı entropi üretiminin, kanal çapı küçüldükçe ve akış Re değeri arttıkça ciddi oranda azaltılabileceğini ortaya koymaktadır. Bu da özellikle yüksek verimlilik gerektiren mikrokanaal soğutma, mikroreaktör ve biyomedikal uygulamalar için mini boruların tercih edilmesini destekleyen önemli bir argümandır. Sistem tasarımı yapılırken, $Re > 10000$ bölgesinin hem ısı transfer etkinliğini optimize ettiği hem de entropi üretimini minimize ettiği göz önünde bulundurulmalıdır.

Sürtünme kaynaklı entropi üretimi



Şekil 4. Sürtünme Kaynaklı Borularda Entropi Üretimi

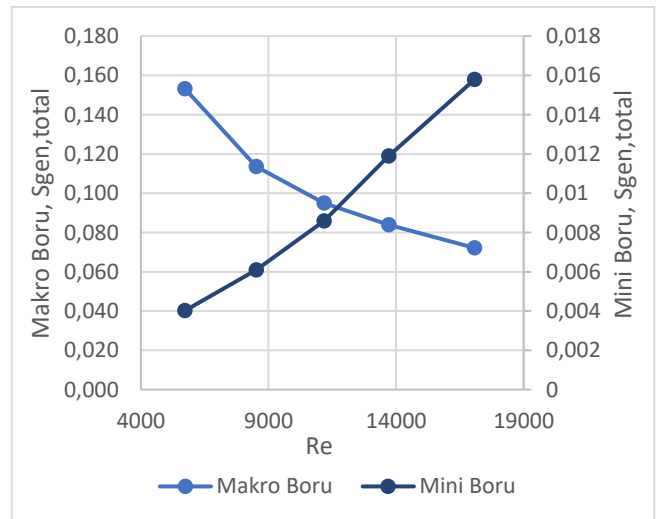
Isı değişim sistemlerinin ikinci yasa verimliliğini değerlendirebilmek için yalnızca ısı transferinden kaynaklanan entropi üretimi yeterli değildir; aynı zamanda akışkanın kanal boyunca hareketi sırasında karşılaştığı viskoz dirençten kaynaklanan sürtünme etkileri de dikkate alınmalıdır. Sürtünme kaynaklı entropi üretimi, özellikle mini ve mikro boyutlu borularda toplam entropi üretimi içerisinde belirleyici hale gelmektedir. Bu çalışmada, mini (2.74 mm) ve makro (13.7 mm) borular için sürtünme etkisiyle oluşan entropi üretimi değerleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (Şekil 4). Şekil 4 incelendiğinde, her iki boru için de Re sayısının artmasıyla birlikte sürtünmeye bağlı entropi üretiminin arttığı görülmektedir. Bu eğilim, akışkanın hızının artmasıyla beraber duvarlarla olan temasının ve buna bağlı olarak oluşan viskoz enerji kayıplarının artmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle mini borularda gözlemlenen değerlerin makro boruya kıyasla çok daha yüksek seviyede olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, mini borularda daha yüksek yüzey/hacim oranı ve dar çap nedeniyle akışkanın kanal duvarları ile daha fazla etkileşimde bulunmasına bağlanabilir.

Makro boruda ölçülen $S'_{gen,ff}$ değerleri 0.00052 W/K ile 0.0047 W/K aralığında gerçekleşirken, mini boruda bu

değerler daha yüksek seviyelere ulaşmıştır. Küçük çaplı borularda akış direnci, enerji kaybı veya başka bir fiziksel büyüklüğün ölçülebilir şekilde arttığını ve bu farkın düzenli bir şekilde sürdüğünü gösterir. Ayrıca, sürtünme katsayısı (f) değerlerinin iki boruda benzer aralıklarda olmasına rağmen mini boruda entropi üretiminin daha yüksek çıkması, geometrik daralmanın etkisini net şekilde göstermektedir. Bu sonuçlar, mikrokanaal akışlarında sürtünme kaynaklı entropi üretiminin ihmal edilemez olduğunu savunan çalışmaları desteklemektedir. Herwig (2012), özellikle mikro ve mini kanallarda viskoz etkilerin entropi üretimi üzerindeki katkısını ayrıntılı olarak incelemiş ve bu kayıpların sistem verimliliğini belirleyen temel unsurlardan biri olduğunu ortaya koymuştur [12]. Benzer şekilde, Bejan (1996), ikinci yasa analizlerinde entropi üretiminin sadece termal değil, aynı zamanda akış direncinden kaynaklanan bileşenleri de kapsamalı gerektiğini belirtmiş ve sistem optimizasyonunun bu ikili yapıya göre yapılmasını önermiştir [19].

Buna ek olarak, makro borularda Re sayısının artışıyla birlikte f katsayısının belirgin biçimde arttığı ve bu artışın $S'_{gen,ff}$ 'ye yansıdığı gözlemlenmiştir. Bu durum, Şahin (2002)'in boru içi akışlarda türbülans rejimine geçişle birlikte sürtünme kaynaklı entropi üretiminin artacağı yönündeki bulgusuyla uyumludur. Ancak mini borularda f değerinin daha sabit seyretmesine rağmen entropi üretiminin hızlı artışı, dar borularda geometrik etkilerin baskın hale geldiğini göstermektedir [20]. Sonuç olarak, mini borularda ısı transferi açısından elde edilen yüksek verimlilik, sürtünmeye bağlı entropi üretimi nedeniyle ikinci yasa verimliliğinde düşüşe neden olabilmektedir. Bu nedenle sistem tasarımında yalnızca termal verimlilik değil, aynı zamanda viskoz kayıplar da dikkate alınmalı; toplam entropi üretimini minimize edecek optimum Re aralığı belirlenmelidir. Elde edilen verilere göre mini borularda Re sayısının 10.000–12.000 aralığında tutulması, sürtünme ve ısı transferi kaynaklı entropi üretimlerinin birlikte dengelendiği bir çalışma rejimi sağlayabilir. Bu yaklaşım, Bejan'ın Entropy Generation Minimization (EGM) ilkesine dayalı bir sistem tasarımı stratejisiyle örtüşmektedir.

Toplam entropi üretimi



Şekil 5. Borularda Oluşan Re Sayısına Göre Entropi Üretimi

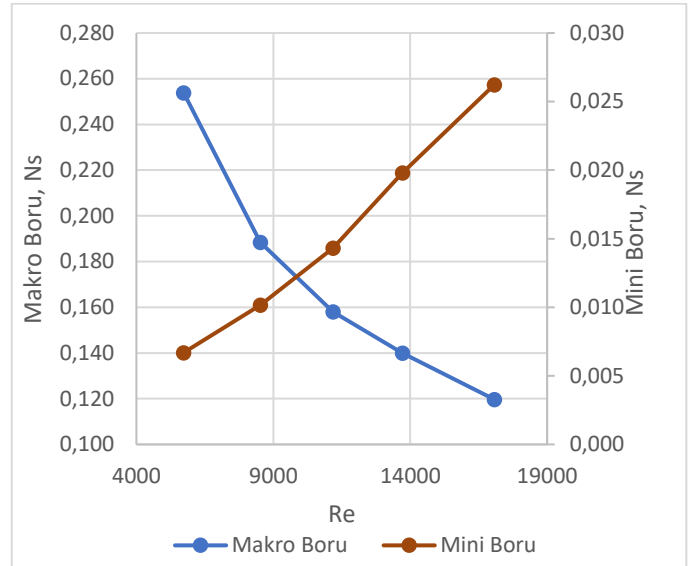
Isı sistemlerinin ikinci yasa düzleminde değerlendirilmesi, yalnızca ısı transferinden ya da akış direncinden kaynaklanan entropi üretiminin tekil olarak incelenmesiyle yeterince doğru bir yaklaşım oluşturmaz. Gerçekten, bir termal sistemde entropi üretimi iki ana bileşenden oluşur: ısı transferine bağlı termal entropi üretimi ve akışkanın viskoz sürtünmesi sonucu oluşan sürtünme entropisi. Bu iki etki birlikte değerlendirildiğinde, sistemin toplam entropi üretimi elde edilir ve bu değer doğrudan sistemin ikinci yasa verimliliği ile ilişkilidir. Şekil 5'te gösterilen grafik, makro (13,7 mm) ve mini (2,74 mm) borular için toplam entropi üretiminin Re sayısına bağlı değişimini ortaya koymaktadır. Grafikte açıkça görüldüğü üzere, makro boruda Re sayısı arttıkça toplam entropi üretimi sürekli olarak azalmaktadır. Bu durum, daha yüksek Re değerlerinde hem ısı transferinin daha etkin hale gelmesi hem de akışın daha düzgün hale gelmesiyle açıklanabilir. Ayrıca, sürtünmeye bağlı kayıpların makro boruda görece düşük kalması, bu düşüşü desteklemektedir.

Mini boru için eğilim ters yönlüdür: Re sayısının artmasıyla birlikte toplam entropi üretimi belirgin şekilde yükselmektedir. Bu artış, mini boruda yüksek hızlarla birlikte artan viskoz etkiler nedeniyle sürtünmeden kaynaklanan entropi üretiminin baskın hale gelmesiyle ilişkilidir. Daha önceki analizlerde gösterildiği üzere, mini borularda ısı transferi kaynaklı entropi üretimi oldukça düşüktür; ancak

sürtünme kayıplarının ciddi boyutlara ulaşması, $S'_{gen,total}$ değerini yukarı taşımaktadır. Bu sonuç, sistemlerin sadece ısı transferi açısından değil, aynı zamanda basınç kayıpları ve akış direnci açısından da optimize edilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Özellikle mini kanallar gibi dar geometrilerde, düşük Re rejiminde çalışmak entropi üretiminin minimize edilmesini sağlayabilir. Dolayısıyla mini borular için optimum Re aralığının 6000–10000 aralığında tutulması önerilebilir. Bu aralıkta hem ısı transferi etkinliği sağlanmakta hem de viskoz kayıplar nispeten sınırlı kalmaktadır. Söz konusu bulgular, literatürde geniş biçimde desteklenmektedir. Örneğin, Bejan (1996), sistemlerin ikinci yasa düzeyinde verimli hale getirilebilmesi için entropi üretimi minimizasyonunun temel kriter olarak alınması gerektiğini belirtmiştir [19]. Aynı şekilde Herwig (2012), mikro kanallarda sürtünme etkisinin baskın entropi üretimi kaynağı olduğunu ve bu etki göz önüne alınmadan yapılan analizlerin eksik kalacağını vurgulamaktadır [12]. Ayrıca, Manay vd., (2018) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda da mikrokanal sistemlerinde Re arttıkça toplam entropi üretiminin arttığı gösterilmiştir [9].

Dolayısıyla elde edilen bulgular, sistemin sadece tekil performans göstergeleri (Nu, Re, ΔT gibi) ile değil, çok bileşenli ve ikinci yasa odaklı bir analiz yaklaşımı ile değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Özellikle entropi üretimini hem termal hem de viskoz bileşenleriyle ele alan bu tür analizler, ekserji tabanlı tasarım yaklaşımlarının temelini oluşturmaktadır.

Entropi Üretim Sayısı



Şekil 6. Borularda Re Sayısına Göre Entropi Üretim Sayısı

Termodinamik sistemlerin ikinci yasa verimliliğini değerlendirmek için kullanılan önemli performans kriterlerinden biri de entropi üretimi sayısıdır (Ns). Bu boyutsuz büyüklük, sistemde oluşan toplam entropi üretiminin, karakteristik ısı transferiyle normalize edilmiş halidir. Böylece farklı ölçeklerdeki sistemlerin karşılaştırılmasına olanak tanır. Ns değeri arttıkça, sistemin ikinci yasa açısından daha az verimli olduğu; yani geri dönüşümsüzlüklerin arttığı anlaşılar. Dolayısıyla Ns, tasarım kararlarının entropi üretimini azaltacak şekilde yönlendirilmesine olanak sağlayan temel göstergelerden biridir.

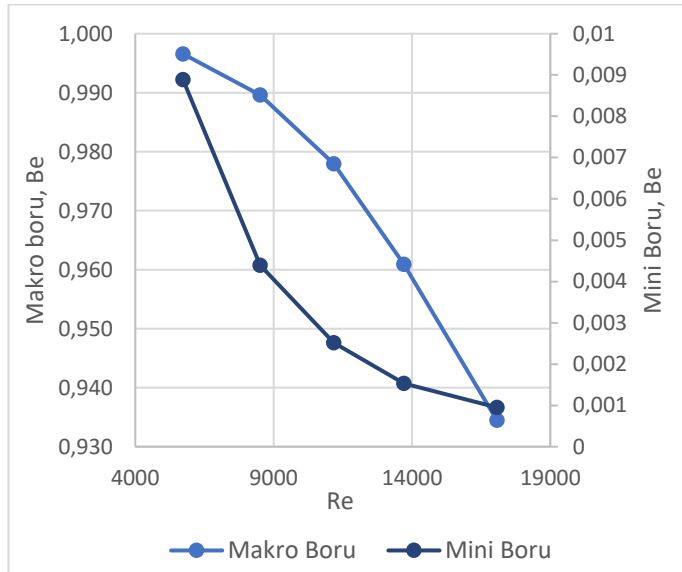
Şekil 6'te, makro (13,7 mm) ve mini (2,74 mm) borular için hesaplanan Ns değerlerinin Re sayısına bağlı değişimi verilmiştir. Elde edilen veriler, boru çapı ve Re sayısının Ns üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. Grafik incelendiğinde, makro boruda Re arttıkça Ns değerinin belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durum, yüksek Re sayılarında artan ısı transferi katsayısı ile birlikte sistemdeki entropi üretiminin nispi olarak azaldığını ve ikinci yasa verimliliğinin arttığını göstermektedir. Başka bir deyişle, akış hızı arttıkça makro boruda sistem daha düzenli hale gelmektedir. Ancak mini boruda durum tersine dönmektedir. Mini boru için Ns değeri, Re sayısının artışıyla birlikte önemli ölçüde artmaktadır. Bu eğilim, mini boruda özellikle yüksek debilerde sürtünme kaynaklı entropi üretiminin ciddi boyutlara ulaşması ve toplam entropi üretiminin buna bağlı olarak yükselmesiyle açıklanabilir. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi, mini boruda ısı transferi kaynaklı entropi üretimi düşük olsa da viskoz etkiler çok baskındır. Bu durum, Ns'nin büyük ölçüde artmasına neden olmaktadır.

Dolayısıyla elde edilen sonuçlar, sistem tasarımında sadece ısı transfer verimliliğine değil, aynı zamanda viskoz etkilerin neden olduğu geri dönüşümsüzlüklere de odaklanılması gerektiğini göstermektedir. Ns değerinin düşürülmesi, sistemin sadece enerji değil, aynı zamanda ekserji (kullanılabilir enerji) bazlı verimliliğinin artırılması için temel bir strateji olarak görülmelidir. Nitekim Bejan (1996), entropi üretiminin normalleştirilmiş bir ölçüt olarak

kullanılmasının sistemler arası karşılaştırmalarda önemli avantajlar sunduğunu belirtmiştir [19]. Ayrıca Herwig (2012) ve Şahin (2002) gibi araştırmacılar da Ns analizlerinin özellikle mikro boyutlu sistemlerde ikinci yasa bakış açısıyla değerlendirme yapmak için uygun bir kriter olduğunu ifade etmişlerdir [12,20].

Makro boruda Ns değerlerinin 0.25'ten 0.13 seviyelerine kadar düştüğü, mini boruda ise yaklaşık 0.0067 seviyesinden başlayıp 0.27'yi yaklaştığı görülmektedir. Bu fark, boru çapının sistem ölçeğindeki geri dönüşümsüzlükleri nasıl etkilediğini net bir şekilde göstermektedir. Bu nedenle, mini borularda çalışma koşullarının dikkatle belirlenmesi ve özellikle $Re > 11000$ seviyelerinde sistemin ikinci yasa verimliliğinin bozulabileceği dikkate alınmalıdır. Dolayısıyla, mini boruların düşük Re aralıklarında (örneğin 6000–9000) çalıştırılması hem ısı transferi performansı hem de geri dönüşümsüzlükleri minimize etme açısından uygun bir strateji sunabilir. Sonuç olarak, Ns analizleri boru çapı küçüldükçe viskoz etkilerin sistem performansını ciddi şekilde etkilediğini ve bu nedenle çap, debi ve sıcaklık farkı gibi parametrelerin çoklu optimizasyonunun zorunlu hale geldiğini ortaya koymaktadır. Bu da tasarımların yalnızca birinci yasa değil, mutlaka ikinci yasa temelli performans göstergeleri ile yönlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Bejan sayısı



Şekil 7. Borularda Re Sayısına Göre Be Sayısı

İkinci yasa analizlerinde kullanılan kritik boyutsuz parametrelerden biri olan Bejan Sayısı (Be), bir sistemdeki toplam entropi üretiminin ne oranda ısı transferi kaynaklı olduğunu ifade eder. Dolayısıyla Bejan Sayısı; $Be \approx 1$ ise entropi üretiminin baskın kaynağı ısı transferidir; $Be \approx 0$ ise sürtünme (viskoz) etkiler ön plana çıkmaktadır. Dolayısıyla, Bejan sayısı, ısı sistemlerinin hangi geri dönüşümsüzlük mekanizmasına karşı daha hassas olduğunu anlamak açısından oldukça değerli bir ikinci yasa göstergesidir.

Şekil 7'te, makro (13.7 mm) ve mini (2.74 mm) borular için hesaplanan Bejan sayılarının Re sayısına göre değişimi sunulmuştur. Grafik detaylı incelendiğinde, her iki boru tipi için Bejan sayısının Re arttıkça azaldığı net bir şekilde

gözlenmektedir. Bu düşüş, sistemde sürtünme kaynaklı entropi üretiminin artmasıyla doğrudan ilişkilidir. Yani düşük Re rejimlerinde entropi üretimi büyük ölçüde ısı transferine bağlıyken, $Re > 10000$ civarlarında viskoz kayıplar baskın hale gelmektedir. Makro boruda Bejan sayısı başlangıçta 0.996 gibi oldukça yüksek bir seviyede olup, bu değer $Re = 17000$ civarında 0.935'e kadar gerilemektedir. Bu eğilim, makro boruda düşük Re sayılarında entropi üretiminin neredeyse tamamen ısı geçişi kaynaklı olduğunu ve viskoz kayıpların ihmal edilebilecek düzeyde kaldığını göstermektedir. Ancak Re arttıkça akış hızının etkisiyle viskoz sürtünmelerin önemi artmakta, bu da Bejan sayısında düşüşe yol açmaktadır.

Mini boruda ise Bejan sayısı, makro boruya kıyasla çok daha düşük seviyelerde seyretmektedir. Bu oldukça küçük değerler, mini borularda entropi üretiminin çok büyük oranda sürtünmeye bağlı olarak gerçekleştiğini açıkça göstermektedir. Özellikle $Re > 8000$ sonrası Be değerinin dramatik şekilde düşmesi, viskoz etkilerin sistem üzerindeki etkisinin ne denli baskın olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuç, mini borularda sistem performansının sürtünme kaynaklı entropi üretimine duyarlılığını doğrular niteliktedir.

Bu bulgular, literatürde mikrokanal sistemleri üzerine yapılan ikinci yasa analizleriyle yüksek düzeyde örtüşmektedir. Örneğin, Herwig (2012), mikro kanallarda Bejan sayısının oldukça düşük seyrettiğini ve sürtünme etkilerinin ısı transferine göre çok daha baskın olduğunu ifade etmiştir [12]. Benzer şekilde, Bejan (1996) da sistemlerin optimizasyonu sırasında Bejan sayısının Re 'ye bağlı dinamik analizinin yapılmasının gerekliliğini vurgulamıştır [19]. Mini boruların tasarımında Re 'nin belirli bir eşiği aşmaması gerektiği ve sistemin Bejan sayısının mümkün olduğunca yüksek tutulmaya çalışılması gerektiği önerilmektedir.

Sonuç olarak, elde edilen Bejan sayısı eğilimleri hem makro hem de mini borularda entropi üretiminin dinamik kaynağının akış koşullarına göre değiştiğini açıkça göstermektedir. Özellikle mini borular için, tasarımda Bejan sayısının Re ile olan ilişkisi mutlaka dikkate alınmalı; $Re > 10000$ bölgesi geçilmemelidir. Aksi takdirde sistemde viskoz kayıpların baskın hale gelmesiyle ikinci yasa verimliliği önemli ölçüde düşecektir. Bu nedenle Bejan sayısı, yalnızca tanınal değil aynı zamanda tasarımsal bir parametre olarak kullanılmalıdır.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, klasik ısı transfer analizlerinin ötesine geçerek sistemlerin termodinamik kalite açısından da değerlendirilmesi gerektiğini açıkça göstermektedir. Mini borular, yüksek yüzey-hacim oranı nedeniyle düşük Re aralığında ısı transferi açısından avantaj sağlamaktadır. Ancak çap küçüldükçe sürtünmeye bağlı viskoz etkiler belirgin hale gelmekte ve bu durum, toplam entropi üretimini önemli ölçüde artırmaktadır.

Literatürdeki benzer çalışmalara bakıldığında, elde edilen verilerle yüksek düzeyde uyum olduğu görülmektedir. Bejan (1996) tarafından önerilen Entropy Generation Minimization (EGM) yaklaşımı doğrultusunda, mini boruların yalnızca termal değil aynı zamanda sürtünme kaynaklı entropi üretimi açısından da optimize edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır [19]. Herwig (2012), mikrokanallarda viskoz etkilerin göz ardı edilmemesi gerektiğini ifade etmiş; bizim çalışmamızda

da bu etki, Bejan Sayısı'nın dramatik düşüşüyle net şekilde doğrulanmıştır [12].

Buna karşın, makro boruların yüksek Re değerlerinde hem ısı transferi hem de düşük entropi üretimi açısından daha dengeli bir performans sunduğu görülmektedir. Bu da özellikle sabit basınçlı sistemlerde veya düşük pompalama gücü gerektiren uygulamalarda makro ölçekteki boruların daha uygun olabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan ikinci yasa göstergeleri olan $S'_{gen,ht}$, $S'_{gen,ff}$, Ns ve Be ; sistemlerin hangi rejimde, hangi nedenle verimsizleştiğini açıklamak açısından oldukça değerli bir analitik araç sunmaktadır. Böylelikle mühendislik tasarımlarının yalnızca birinci yasa (enerji verimliliği) ile değil, ikinci yasa (ekserji verimliliği) bakış açısıyla da optimize edilmesi gerektiği net biçimde ortaya konmuştur.

Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı çaplara sahip iki boruda (13.7 mm makro boru ve 2.74 mm mini boru) suyun zorlanmış konveksiyon altındaki ısı transferi ve entropi üretimi davranışı, termodinamiğin ikinci yasasına dayalı olarak kapsamlı biçimde incelenmiştir. Deneysel bulgular hem boru çapının hem de Re sayısının sistemin ikinci yasa verimliliği üzerinde belirleyici etkilere sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışma, yalnızca ısı transferi değil, aynı zamanda sürtünme ve entropi üretimi gibi ikinci yasa verimliliği göstergeleriyle çok kriterli bir değerlendirme yapılmasını önermektedir. Sistem tasarımı yapılırken, yalnızca enerji değil, ekserji ve toplam entropi üretimi bazlı analizlerle optimum performans elde edilmelidir

Çalışmadan elde edilen temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Isı transferine bağlı entropi üretimi, her iki boruda da Re sayısı arttıkça azalmaktadır. Bu durum, artan Re ile birlikte ısı transfer etkinliğinin artmasından ve sıcaklık farklarının daha dengeli dağılmasından kaynaklanmaktadır. Mini borularda, yüksek yüzey/hacim oranı sayesinde bu değerler makro borulara kıyasla daha düşüktür.
2. Sürtünme kaynaklı entropi üretimi, özellikle mini borularda belirgin bir artış göstermektedir. Makro boruda sürtünme etkisi sınırlı kalırken, mini borularda küçük çap nedeniyle viskoz etkiler baskın hale gelmekte ve sistemin toplam entropi üretimini olumsuz yönde etkilemektedir.
3. Toplam entropi üretimi, makro boruda Re arttıkça azalırken; mini boruda artmaktadır. Bu sonuç, düşük Re değerlerinde mini boruların daha verimli çalıştığını ancak yüksek Re rejimlerinde sürtünme etkisinin bu avantajı ortadan kaldırdığını göstermektedir.
4. Bejan Sayısı (Be) analizine göre, makro boruda entropi üretimi ağırlıklı olarak ısı transferinden kaynaklanırken, mini boruda entropi üretimi büyük oranda sürtünmeye bağlıdır. Bejan sayısının Re ile birlikte düşmesi, viskoz etkilerin sistemdeki rolünün arttığını göstermektedir.
5. Entropi Üretim Sayısı (Ns) değerleri, mini boruda artış eğilimindeyken makro boruda düşüş göstermektedir. Bu durum, mini borunun yüksek Re koşullarında ikinci yasa açısından daha az verimli olduğunu göstermektedir.

6. Optimal çalışma aralığı açısından, mini borular için Re sayısının 6000–10000 aralığında tutulması önerilmektedir. Bu aralık, hem ısı transfer etkinliğinin yüksek olduğu hem de viskoz kayıpların tolere edilebilir seviyede kaldığı bölgedir.

Sonuç olarak, bu çalışma göstermektedir ki; boru çapı küçüldükçe sistemin ısı transfer kapasitesi artsa da ikinci yasa açısından oluşan viskoz kayıplar nedeniyle toplam sistem verimliliği düşebilmektedir. Bu nedenle, yalnızca birinci yasa kriterlerine dayalı tasarımlar yeterli değildir. Sistem tasarımı yapılırken mutlaka entropi üretimi, Bejan sayısı ve Ns gibi ikinci yasa göstergeleri göz önüne alınmalı; böylece hem enerji hem de ekserji temelli optimize edilmiş yapılar elde edilmelidir.

Bu çalışmada elde edilen entropi üretimi bulguları, yalnızca deneysel gözlemler değil, aynı zamanda sistem tasarımı açısından da önemli termodinamik ipuçları sunmaktadır. Entropi üretimi, sistemdeki düzensizlik ve enerji kullanımındaki verimsizlik ile doğrudan ilişkili olduğundan, mühendislik uygulamalarında çok kriterli bir tasarım yaklaşımı gereklidir. Bu kapsamda, gelecekteki çalışmalarda entropi üretimi ile ekserji kaybı arasındaki ilişki daha detaylı ele alınmalı, böylece sistemlerin ekserji verimliliği nicel olarak değerlendirilmelidir. Örneğin, belirli bir debi ve sıcaklık farkı altında elde edilen entropi üretimi değeri kullanılarak sistemin ekserji kaybı yaklaşık olarak hesaplanabilir ve bu değer üzerinden sistemin ikinci yasa verimliliği yorumlanabilir. Böyle bir yaklaşım, sadece enerji değil, ekserji temelli optimizasyon yapılarak daha sürdürülebilir ve yüksek verimli sistemlerin tasarlanmasına olanak sağlayacaktır. Bu nedenle, bu çalışma entropi üretimini merkeze alan bir değerlendirme sunmakla birlikte, gelecekteki çalışmalarda ekserji analiziyle desteklenmiş çok kriterli mühendislik değerlendirmeleri yapılması önerilmektedir.

Bu çalışma, mini/makro ölçekli borularda gerçekleştirilen termal sistem tasarımlarında ikinci yasa odaklı mühendislik yaklaşımının önemini vurgulamakta ve literatüre deneysel katkı sunmaktadır.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır

Yazar Katkıları

YILDIRIM ve Karagöz makale hazırlamada Çalışma konsepti ve tasarım, Veri toplama, Verilerin analizi ve yorumlanması, Taslağın oluşturulması, Revizyon aşamalarda kapsamlı katkı sağlayıp makaleye son şeklini verirler.

Kaynakça

- [1] Y. A. Çengel and M. A. Boles, Thermodynamics: An Engineering Approach, 8th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2015.
- [2] M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner, and M. B. Bailey, Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 7th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010.

- [3] A. Bejan, "Thermodynamic optimization of geometry in engineering flow systems," *Exergy, an Int. J.*, vol. 1, no. 4, pp. 269–277, 2001.
- [4] López-Núñez, O. A., Lara, F., Gonzalez-Angeles, A., Cárdenas-Robles, A., Ramírez-Minguela, J. D. J., & Alfaro-Ayala, J. A. "Assessment of thermohydraulic performance and entropy generation in an evacuated tube solar collector employing pure water and nanofluids as working fluids," *Heliyon*, vol. 10, no. 8, 2024.
- [5] M. Niazi and H. Xu, "Fully developed flow of a nanofluid through a circular micropipe in the presence of electroosmotic effects," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2020, pp. 1–15, 2020, doi: 10.1155/2020/1723256.
- [6] O. Fadodun, A. Kaood, and M. Hassan, "Investigation of the entropy production rate of ferrosoferric oxide/water nanofluid in outward corrugated pipes using a two-phase mixture model," *Int. J. Therm. Sci.*, 107598, 2022. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107598.
- [7] Y. Yang, X. Yuan, and Z. Li, "Experimental and numerical study on heat transfer performance of single-phase water in a horizontal mini-annular channel," *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 108, p. 109483, 2024.
- [8] J. Li and C. Kleinstreuer, "Entropy generation analysis for nanofluid flow in microchannels," *ASME J. Heat Transfer*, vol. 132, no. 12, p. 122401, 2010.
- [9] E. Manay, E. F. Akyürek, and B. Şahin, "Entropy generation of nanofluid flow in a microchannel heat sink," *Results Phys.*, vol. 9, pp. 615–624, 2018.
- [10] Hassan, M., Sadri, R., Ahmadi, G., Dahari, M. B., Kazi, S. N., Safaei, M. R., & Sadeghinezhad, E. "Numerical study of entropy generation in a flowing nanofluid used in micro- and minichannels," *Entropy*, vol. 15, no. 1, pp. 144–155, 2013, doi: 10.3390/e15010144.
- [11] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 7th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011.
- [12] H. Herwig, "The role of entropy generation in momentum and heat transfer," *J. Heat Transfer*, vol. 134, no. 3, p. 031003, 2012.
- [13] I. Firat, S. Karagoz, O. Yildirim, and M. Yilmaz, "Performance and entropy production analysis of angle blade turbulators used to increase heat transfer," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 148, pp. 7811–7828, 2023.
- [14] H. Abdi, "Yatay borulardaki türbülantörlerin ısı transferine etkisinin deneysel ve teorik olarak incelenmesi," M.S. thesis, Dept. Mech. Eng., Atatürk Univ., Erzurum, Turkey, 2014.
- [15] KARAGÖZ, Ş., Erzincanlı, S., YILDIRIM, O., FIRAT, İ., KAYA, M., ÇOMAKLI, Ö., ÖMEROĞLU, G "Experimental investigation of the effect of wave turbulators on heat transfer in pipes," *Thermal Sci.*, vol. 26, no. 2 Part C, pp. 1771–1783, 2022.
- [16] Ş. Karagöz and O. Yildirim, "Analysis of heat transfer in single-phase flow in circular mini-channels," *Int. J. Innov. Res. Rev.*, vol. 8, no. 2, pp. 50–60, 2024.
- [17] L. H. K. Goh, Y. M. Hung, G. M. Chen, and C. P. Tso, "Entropy generation analysis of turbulent convection in a heat exchanger with self-rotating turbulator inserts," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 160, p. 106652, 2021, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106652.
- [18] P. K. Singh, K. B. Anoop, T. Sundararajan, and S. K. Das, "Entropy generation due to flow and heat transfer in nanofluids," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 53, no. 21–22, pp. 4757–4767, 2010.
- [19] A. Bejan, "Entropy generation minimization: The new thermodynamics of finite-size devices and finite-time processes," *J. Appl. Phys.*, vol. 79, no. 3, pp. 1191–1218, 1996.
- [20] A. Z. Sahin, "Entropy generation and pumping power in a turbulent fluid flow through a smooth pipe subjected to constant heat flux," *Exergy, an Int. J.*, vol. 2, no. 4, pp. 314–321, 2002.