

GYROID ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNİN AKIŞ VE ISI TRANSFER KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Investion Of Flow And Heat Transfer Characteristics Of Gyroid Heat Exchangers

Alper Mete Genç
Yusuf Yıldırım
Ziya Haktan Karadeniz

ÖZET

Bu çalışmada, Shoen'in Gyroid geometrisinin ısı değiştiricisi olarak ısı performansını deneysel olarak araştırılmıştır. Gyroid, karmaşık geometrisi nedeniyle yalnızca eklemeli üretim yöntemleriyle üretilebilen üç yönlü periyodik minimal yüzeylerden (ÜYPMY) biridir. Düz kanallardan oluşmaması, yapısal bütünlük sağlaması ve girdaplar oluşturmaması sayesinde bu geometri seçilmiştir. Bu sayede, geleneksel seramik ısı değiştiricilerine göre ısı transferini ve akış performansını artıracakları öngörülmektedir. Deneylerin gerçekleştirilebilmesi için 90, 120 ve 150 m³/h hava debileri seçilmiştir. Bu modelin gelecekte ısı geri kazanımlı havalandırma cihazlarında ısı değiştiricisi olarak kullanılması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Gyroid, ÜYPMY, ısı transferi, ısı değiştiricisi, eklemeli üretim.

ABSTRACT

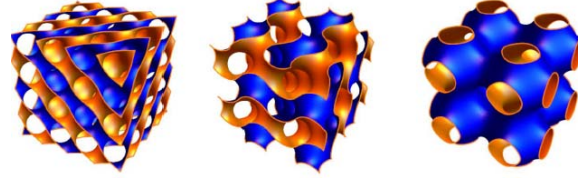
The present study investigates the thermal performance of Shoen's gyroid geometry as a heat exchanger experimentally. The gyroid is one of the triply periodic minimal surfaces (TPMS) that can only be produced by additive manufacturing methods due to its complex geometry. This geometry is chosen because it does not consist of straight channels, provides structural integrity, and creates vortices. In this way, it is predicted that it will increase the heat transfer and flow performance compared to traditional ceramic heat exchangers. Air flow rates are chosen as 90, 120 and 150 m³/h for the experiments. It is aimed to use this model as a heat exchanger in heat recovery ventilation devices in the future.

Key Words: Gyroid, TPMS, heat transfer, heat exchanger, additive manufacturing.

1. GİRİŞ

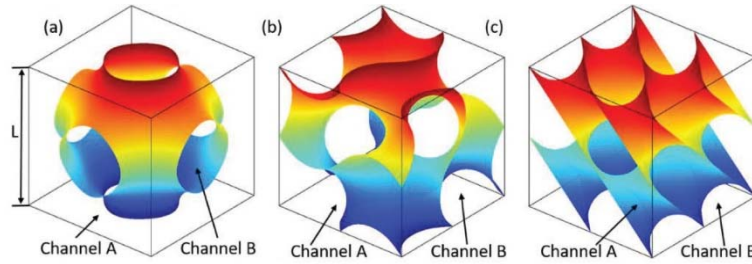
Üstün ısı ve kütle transferi performansları sayesinde gözenekli ortamlar, uzay mühendisliğinde [1], elektronik soğutmada [2], güneş toplayıcılarında [3], metan dönüştürücülerde [4], katalitik dönüştürücü [5] ve tıbbi implantoloji [6] gibi birçok teknik alanda kullanılmaktadır. Belirtilen sistemlere ek olarak diğer uygulama alanı ise ısı değiştiricileridir [7]. Gözenekli ortamlar periyodik (düzenli) ve stokastik (düzensiz) olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir. Periyodik yapılar içerisinde son zamanlarda en çok kullanılan yapılar Üç Yönlü Periyodik Minimal Yüzeyler'dir (ÜYPMY). ÜYPMY ile ilgili çalışmalar ise ÜYPMY'lerden ilki olan ve Schwarz primitive olarak adlandırılan geometrinin 1865 yılında Schwarz tarafından tasarlanması ile başlamıştır [8]. Daha sonra 1883 yılında Schwarz'ın öğrencisi Neovius tarafından Schwarz diamond (D), Schwarz hexagonal (H), Schwarz Neovius (N) ve Schwarz CLP

olmak üzere 4 farklı ÜYPMY geometrisi geliştirmiştir [9]. 1970 yılına geldiğimizde ise Schoen, yeni keşfedilen on bir ÜYPMY ile birlikte literatürdeki çalışmalarda sıkça kullanılan gyroid (G) yüzeyini tasarlamıştır [10]. Günümüzde 100'den fazla ÜYPMY geometrisi mevcuttur ve birçoğu halen daha çalışmalarda kullanılmaktadır [11]. Şekil 1'de en yaygın ÜYPMY geometrilerinden olan Gyroid, Diamond ve Primitive gösterilmiştir [12].



Şekil 1. Sırasıyla Schwarz D, Shoens Gyroid ve Schwarz P'nin yüzey modelleri [12].

ÜYPMY'ler yüksek yüzey alanı/hacim oranı sağlayan birbiriyle kesilmeyen iki ayrı üç boyutlu alana sahiptirler. Bu sayede, farklı sıcaklıklardaki iki akışın birbiri ile karışmadan ÜYPMY içerisinden geçmesi sağlanmakta ve verimli bir şekilde ısı transferi yapılabilmektedir. Şekil 2'de A ve B kanalları olarak iki ayrı kanaldan oluşan farklı tiplerdeki birim uzunluğa sahip ÜYPMY'ler gösterilmiştir. Ortalama eğrilik, ÜYPMY üzerindeki herhangi bir noktada sıfırdır ve her bir kanal bütün yönlerde birbirine bağlı olması sayesinde akış herhangi bir doğrultuda serbestçe hareket edebilmektedir. Akış esnasında ÜYPMY'ler içerisinde oluşan girdaplar sayesinde yüzeyde biriken pislik ve partiküllerin yüzeyden atıldığı ve ısı transfer veriminin iyileştiği belirtilmektedir [13]. ÜYPMY'ler doğal yapısal bütünlük sergilemektedir. Eğrilerden meydana gelen yapısı gereğince ÜYPMY'nin her iki tarafına da uygulanan basınç eşittir. Bu sayede yüksek sıcaklık ve basınç gibi zorlu çalışma koşullarına dayanabilirler. Yukarıda belirtilen özelliklerinden dolayı ÜYPMY'ler ısı değiştiricisi olarak kullanım potansiyeline sahiptir [13].



Şekil 2. Bir birim uzunluktaki ÜYPMY: (a) Schwarz yüzeyi, (b) Gyroid yüzeyi ve (c) Diamond yüzeyi. [13]

ÜYPMY'lerin ısı değiştiricisi olarak incelenmesi amacıyla çeşitli deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Chandrasekaran [14], deneysel olarak yaptığı çalışmada, ısı değiştiricisi olarak tasarlanmış 3-B baskılı Schwarz D geometrisini incelemiştir. Benzer performansa sahip ısı değiştiricileri arasında Schwarz D geometrisinin basınç düşümü, gövde borulu ısı değiştiricilerine göre %32 daha az olduğu bulunmuştur. Peng vd. tarafından Schwarz D, P ve Gyroid yüzeyleri, HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizi yapılarak sayısal olarak incelenmiştir [13]. ÜYPMY ısı değiştirici tasarım parametrelerini optimize etmek için sayısal bir model geliştirilmiş ve ısı transfer oranları incelenmiştir. ısı transfer oranının geleneksel plakalı ısı değiştiricisine göre 7,5 kat arttığı sonucuna varılmıştır. Attarzadeh vd. [15], farklı duvar kalınlıklarına sahip Schwarz-D ÜYPMY ısı değiştiricisinin ısı performansını incelemek amacıyla HAD analizleri geliştirmiştir. Düşük duvar kalınlığına sahip ısı değiştiricisinin ısı performansının daha yüksek duvar kalınlığına sahip ısı değiştiricisine oranla %250 daha iyi performans sergilediği belirtilmiştir. Iyer vd. [16] tarafından yapılan çalışmada farklı ÜYPMY ile periyodik düğüm yüzeyleri (PDY) ısı değiştiricilerinin ısı ve akış performansları incelenmiştir. Schwarz-D ısı değiştiricisinin yaklaşık 16 kat daha iyi ısı transfer performansına sahip olduğu görülmüştür.

Sunulan bu çalışmada, eklemeli üretim yöntemiyle üretilmiş Shoens'in Gyroid geometrisinin çapraz akışlı ısı değiştiricisi olarak ısı ve akış performansı deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda farklı debilerde (90, 120 ve 150 m³/h) ve farklı gözeneklilik oranlarındaki (0,77 - 0,82 -

0,87) geometriler için ısı verimleri ve basınç kayıpları elde edilmiş ve analitik modellerle karşılaştırılmıştır.

2. YÖNTEM

Mevcut çalışmada ticari bir matematik yazılımı aracılığıyla Denklem 1'e göre farklı gözenekliliğe sahip (0,77 – 0,82 – 0,87) üç farklı tip Gyroid ÜYPMY ısı değiştiricisi oluşturulmuştur. Ardından, tüm geometriler .STL formatında oluşturularak bir 3-B yazıcıya aktarılmıştır.

$$\cos(x) \sin(y) + \cos(y) \sin(z) + \cos(z) \sin(x) = 0 \quad (1)$$

Isıl verim ve basınç düşümlerini elde etmek için her bir ısı değiştiricisi sırasıyla deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 4'te gösterilmiştir ve aşağıdaki varsayımlar dikkate alınmıştır:

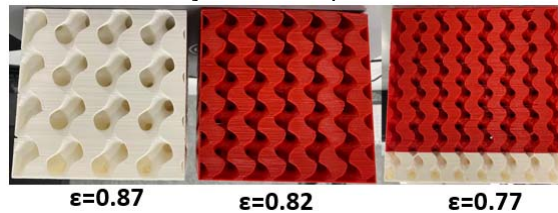
- Havanın sisteme giriş sıcaklıkları, sıcak ve soğuk taraflar için sırasıyla 20 ve 40°C'dir.
- Akışkanın debisi için 90, 120 ve 150 m³/h olmak üzere üç farklı debi seçilmiştir.

Deneyler, TS EN 308 2022 - Isı Değiştiriciler - Havadan Havaya ve Atık Gaza Isı Geri Kazanım Cihazlarının Performansının Belirlenmesine Yönelik Test Yöntemleri Standardı doğrultusunda gerçekleştirilmiştir [17].

Yöntem alt bölümlerinde, eklemeli üretim, basınç düşümü hesabı, deney düzeneği ve ısı transfer veriminden bahsedilmiştir.

2.1. Eklemeli Üretim Yöntemi

Dördüncü sanayi devrimi olan Endüstri 4.0, akıllı otomasyon teknolojisindeki son harekettir. Bu yeni çağda, yeni bilgi teknolojilerinin entegrasyonu bağlamında eklemeli üretim gibi modern üretim becerilerinin kullanılması, ekonomik rekabet edebilirlikte hayati bir rol oynamaktadır [18]. Bu nedenle, eklemeli üretimin, gelişmiş niteliklere sahip karmaşık nesnelere yaratma kabiliyeti nedeniyle, özelleştirilmiş ürünler üretmek için anahtar bir teknoloji haline gelebileceği düşünülmektedir (yeni malzemeler, geometriler vb.) [18]. Artan ürün kalitesi sayesinde eklemeli üretim, şu anda havacılık, biyomedikal, imalat ve havalandırma sistemleri gibi çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır [19, 20]. Eklemeli üretim, ısı transferi için bileşenlerin tasarlanma ve üretilme şeklini büyük ölçüde değiştirme potansiyeline sahiptir [21]. Eklemeli üretim, diğer geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor olan farklı karmaşık tasarımlarla test yapma esnekliği sağlar. Avantajlarına ek olarak, hızlı prototipleme, Ar-Ge'nin hızlandırılması ve yedek parçaların zamanında teslimi sağlayabilmektedir [22]. Genel olarak eklemeli üretim, 3 boyutlu bir nesneyi katman katman oluşturma işlemidir. Geleneksel yöntemlere kıyasla daha az malzeme israfı ile kaynakları verimli kullanmamıza yardımcı olur [23]. Eriyik Biriktirme Modellemesi (Fused Deposition Method - FDM), Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering - SLS) ve Stereolitografi (Stereolithography - SLA), ısı değiştiricileri üretiminde en çok kullanılan 3-B baskı teknikleridir. Bu çalışmada, diğer 3-B baskı seçenekleri içerisinde daha ucuz ve en çok kullanılan yöntem olması nedeniyle FDM kullanılacaktır. FDM, eriyik biriktirme yönteminin termal plastiklerin filamanlarını belirli bir modele göre biriktirmek için kullanıldığı bir teknolojidir. FDM yöntemi, bir platformun üzerinde X ve Y yönlerinde hareket edebilen bir yazıcı kafasından oluşur. Şekil 3'te gösterilen üç farklı geometri, FDM 3-B yazıcı tarafından üretilmiştir. Her bir geometri deneysel sisteme yerleştirilmek üzere 114 mm'lik bir kenar ölçüsüne sahiptir.



Şekil 3. Farklı gözeneklilik değerlerine sahip Gyroid ısı değiştiricileri.

2.2. Basınç Düşümü

Literatürde, gözenekli ortamın basınç düşümünü hesaplamak için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden biri Fu vd. tarafından yapılan çalışmada gösterilmiştir [24]. Parçacık veya gözenek çapını (d_p) hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılmıştır:

$$d_p = \frac{6(1-\varepsilon)}{a_p} \quad (2)$$

Burada ε , gözeneklilik değerini temsil etmektedir. a_p spesifik alandır (m^2/m^3). Yeniden düzenlenmiş Re sayısı aşağıdaki gibidir:

$$Re = \frac{\rho_G V_G d_p}{(1-\varepsilon)\mu_G} = \frac{3 \rho_G V_G d_h}{2 \varepsilon \mu_G} \quad (3)$$

Denklem 3'te G , sıvı özelliklerini temsil etmektedir. Ayrıca d_h , hidrolik çap anlamına gelmektedir. Basınç düşümü Denklem 4 ile hesaplanmaktadır:

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \psi \frac{(1-\varepsilon) F_v^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (4)$$

ψ ifadesi, Ergun denkleminden (Denklem 5) gelen bir direnç katsayısıdır [25]. F_v^2 , sıvı tarafından uygulanan basınç miktarını temsil etmektedir (Denklem 6):

$$\psi = \frac{150}{Re} + 1.75 \quad (5)$$

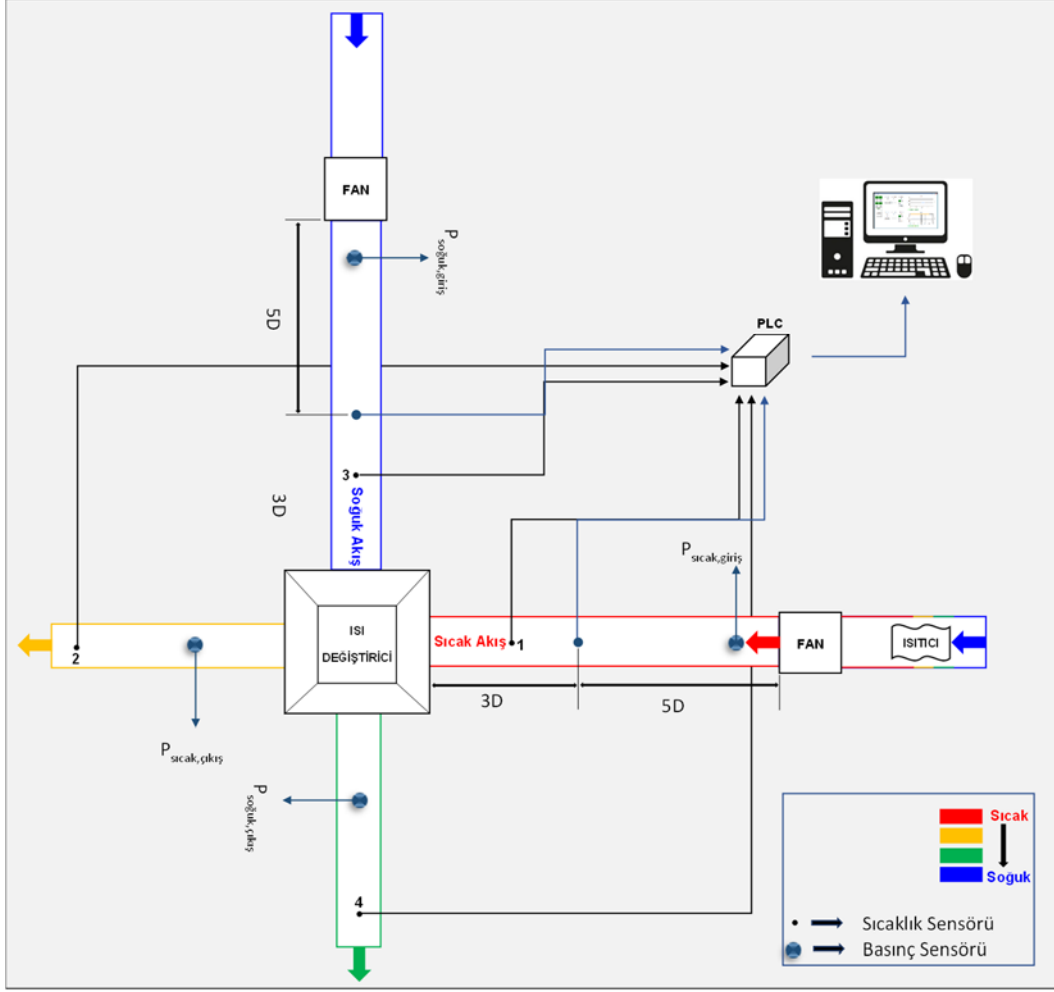
$$F_v = V_G \sqrt{\rho_G} \quad (6)$$

$$f = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho V^2 \frac{L}{d_h}} \quad (7)$$

Sürtünme faktörü (f) Denklem 7'de gösterilmiştir. Burada L , ısı değiştiricisinin uzunluğudur.

2.3. Deney Düzeneği

Deney düzeneği, çapraz akışlı ısı değiştiricilerinin gerçek performansını elde etmek üzere tasarlanmıştır. Deney sisteminin daha iyi anlaşılabilmesi adına deney düzeneğinin şematik diyagramı Şekil 3'te gösterilmiştir. Öncelikle ısı değiştirici kasasında oluşabilecek iç ve dış kaçakların önlenmesi için kapalı gözenekli izolasyon malzemesi uygulanmıştır. Deney düzeneği sıcak ve soğuk akış kanalı olmak üzere iki ayrı kanaldan oluşmaktadır. Sıcak akışın sağlanabilmesi için kanala bir elektrikli ısıtıcı monte edilmiştir. Deney düzeneğinde, sıcak ve soğuk akış için ısı değiştiricisi giriş ve çıkışlarına dört adet sıcaklık ve dört adet basınç sensörü olmak üzere toplam sekiz adet sensör akışa dik olacak şekilde kanala daldırılmıştır. Belirtilen sensörler bir PLC'ye (Programmable Logic Controller – Programlanabilir Mantıksal Kontrolcü) bağlanmıştır. Bu sayede, anlık olarak sıcaklık ve basınç verileri okunabilmektedir. Aynı zamanda PLC'nin bir bilgisayara bağlanması ile tüm veriler kaydedilebilmektedir. TS EN 308 standardına uygunluk sağlanabilmesi adına sıcak ve soğuk akış kanallarında ısı değiştiricisi giriş noktalarındaki sıcaklık farkının 20 °C olmasına dikkat edilmiştir [11]. Isı değiştiricisi girişindeki soğuk hava sıcaklık değerine göre, sıcak hava sıcaklık değeri PLC'ye bağlı elektrikli ısıtıcının oransal olarak ayarlanmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 4. Deney düzeneği şeması

2.4. Isıl Verim

Deney sonuçlarından elde edilen verilerin analizi için ısı verim TS EN 308 standardı [25] kullanılarak hesaplanmıştır. Isıl verim (η_t) hesabı için sıcak ve soğuk taraftaki ısı değiştiricisi giriş ve çıkış sıcaklıkları kullanılmıştır. Isıl verim Denklem 8 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\eta_t = \frac{T_{Soğuk_Çıkış} - T_{Soğuk_Giriş}}{T_{Sıcak_Giriş} - T_{Soğuk_Giriş}}$$

Burada;

- $T_{Sıcak_Giriş}$: Sıcak hava giriş sıcaklığı
- $T_{Sıcak_Çıkış}$: Sıcak hava çıkış sıcaklığı
- $T_{Soğuk_Giriş}$: Soğuk hava giriş sıcaklığı
- $T_{Soğuk_Çıkış}$: Soğuk hava çıkış sıcaklığı

3. Bulgular ve Tartışmalar

Deneylere başlamadan önce sistemdeki kaçak oranlarını kontrol edebilmek adına iç ve dış kaçak testleri gerçekleştirilmiştir. Dış kaçak testleri 50, 75 ve 100 Pa basınç altında gerçekleştirilmiştir (Tablo

1). Belirtilen basınçlarda kaçak oranı değerleri %3'ün altında elde edilmiştir (TS EN 308). Bu da sistemden dışarıya önemli ölçüde kaçak olmadığını göstermektedir.

Tablo 1. Dış kaçak oranları.

P_{stat} [Pa]	Kaçak Hava Debisi [m ³ /h]	Kaçak Oranı [%]
0	0	0,00
50	0,35	0,70
75	0,55	1,10
100	0,63	1,26

Tüm ısı değiştiricileri için 25, 50 Pa basınç altında iç kaçak testleri yapılmış ve elde edilen değerler sırasıyla Tablo 2 ve 3'te gösterilmiştir. 25 ve 50 Pa basınç altında bir ısı değiştiricisi kullanılmadığında iç kaçak değerleri %3'ün altında elde edilmiştir. Bu durum, 25 ve 50 Pa basınç altında sistemde kaçak olmadığını göstermektedir. Sisteme ısı değiştiricilerinin eklenmesi ile iç kaçak oranları artmaktadır. 25 Pa basınçta 0,87 ve 0,82 gözenekliliklere sahip geometriler için kaçak oranları %3'ün altında elde edilmiştir (Tablo 2). Ancak, gözeneklilik azaldığında (0,77) kaçak değeri %3'ü geçmiş ve %10,2 değerine ulaşmıştır. 50 Pa basınçta ise yalnızca 0,87 gözenekliliğe sahip geometri için kaçak oranı %3'ün altında elde edilmiştir (Tablo 3). 0,82 ve 0,77 gözeneklilik değerlerindeki geometriler için kaçak oranları sırasıyla %11,5 ve %16,2 olarak elde edilmiştir. Artan basınçla beraber kaçak oranlarının artması beklenen bir durumdur. Ancak, kaçak değerinin %3 değerinin üzerinde çıkması, ısı değiştiricileri içerisinde kaçak olduğunu göstermektedir. Bu da ısı değiştiricilerinin üretim yönteminden kaynaklanmaktadır. Karmaşık yapıdaki ısı değiştiricilerinin FDM ile üretilmesi sonucunda tam olarak boşluksuz bir yapı elde edilememiştir.

Tablo 2. 25 Pa basınç altında iç kaçak oranları.

Geometri	Kaçak Hava Debisi [m ³ /h]	Kaçak Oranı [%]
Gyroid($\epsilon=0.87$)	0,91	1,82
Gyroid($\epsilon=0.82$)	1,50	3,00
Gyroid($\epsilon=0.77$)	5,10	10,20
Isı değiştiricisi yok	0,60	1,20

Tablo 3. 50 Pa basınç altında iç kaçak oranları.

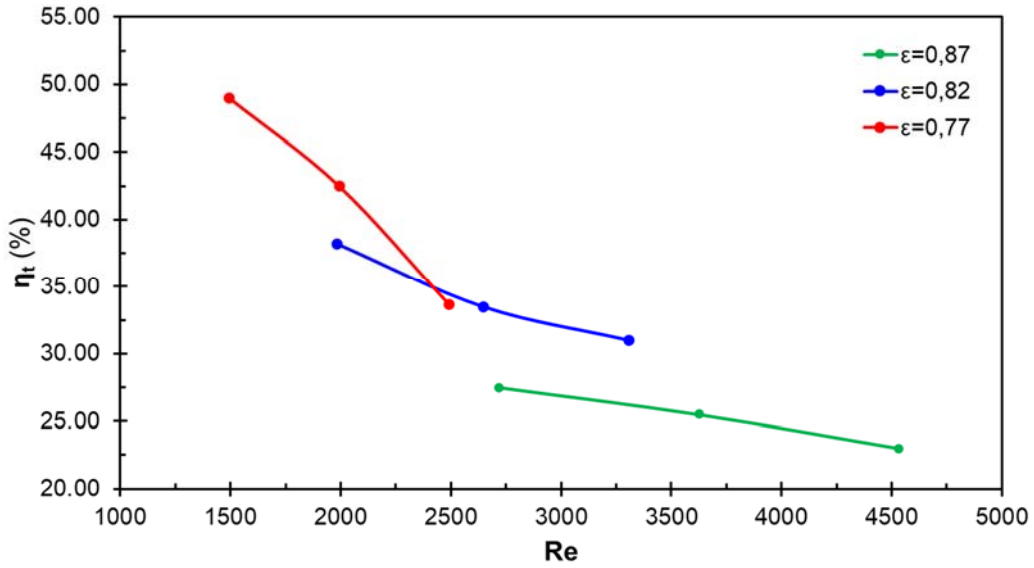
Geometri	Kaçak Hava Debisi [m ³ /h]	Kaçak Oranı [%]
Gyroid($\epsilon=0.87$)	1,43	2,86
Gyroid($\epsilon=0.82$)	5,75	11,50
Gyroid($\epsilon=0.77$)	8,10	16,20
Isı değiştiricisi yok	1,45	2,90

Şekil 5'te ısı verim değerleri gösterilmiştir. Isıl verim sonuçlarına bakılırsa gözeneklilik arttıkça ısı verim azalmaktadır. Burada, artan gözeneklilikte sistem içerisinde ısı transfer yüzey alanı ve türbülans etkisiyle oluşan girdaplar azalmaktadır. Bu da daha düşük ısı verim elde edilmesine yol açmaktadır. Tablo 2 ve Tablo 3 ele alındığında gözenekliliğin azalmasıyla ısı değiştiricisinin karmaşık yapısından dolayı kaçak oranı da artmaktadır. Kaçak oranı ne kadar yüksek olursa, ısı değiştiricisi içerisinde sıcak

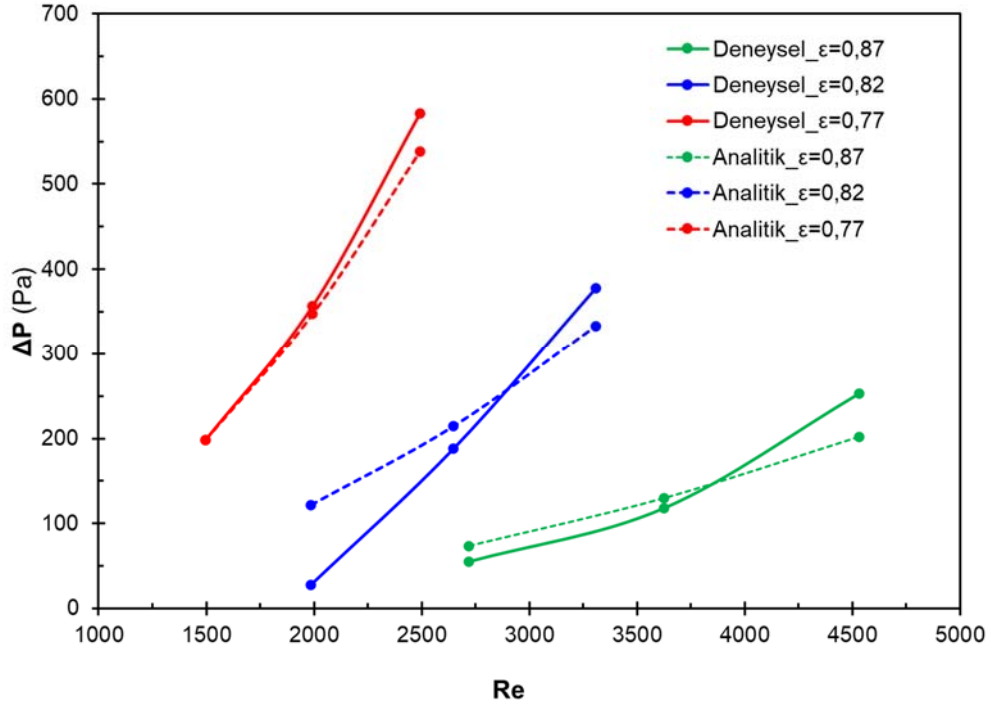
ve soğuk akışların karışmasıyla ısı verim artmaktadır. En yüksek ısı verim değeri %49 olarak gözenekliliğin 0,77 olduğu geometri için elde edilmiştir. En düşük ısı verim ise %23 olarak 0,87 gözenekliliğe sahip geometri için hesaplanmıştır.

Basınç düşümü ve sürtünme katsayıları Bölüm 2.2'de gösterilen denklemler yardımıyla elde edilmiş ve sonuçlar sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir. Deney düzeneğine yerleştirilen basınç sensörleri ile de ölçülerek analitik ve deneysel çalışmaların karşılaştırılması sağlanmıştır. Basınç düşümleri her bir geometri için sistem içerisindeki akış debisine bağlı olarak artmaktadır. Ek olarak, gözenekliliğin azalması ile basınç düşümü artmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre 0,77 gözenekliliğe sahip geometri için en yüksek basınç düşümü değeri elde edilmiştir. Deney sonuçları ve analitik hesaplamalar sonucu elde edilen basınç düşümü değerlerinin oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu noktada, basınç düşümleri arasında oluşan fark, analitik hesaplama için kullanılan korelasyonların doğrudan sunulan bu çalışmadaki ısı değiştiriciler için elde edilmiş olmamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, basınç ölçümü için kullanılan sensörlerin ölçüm hassasiyeti de hesaba katılmalıdır.

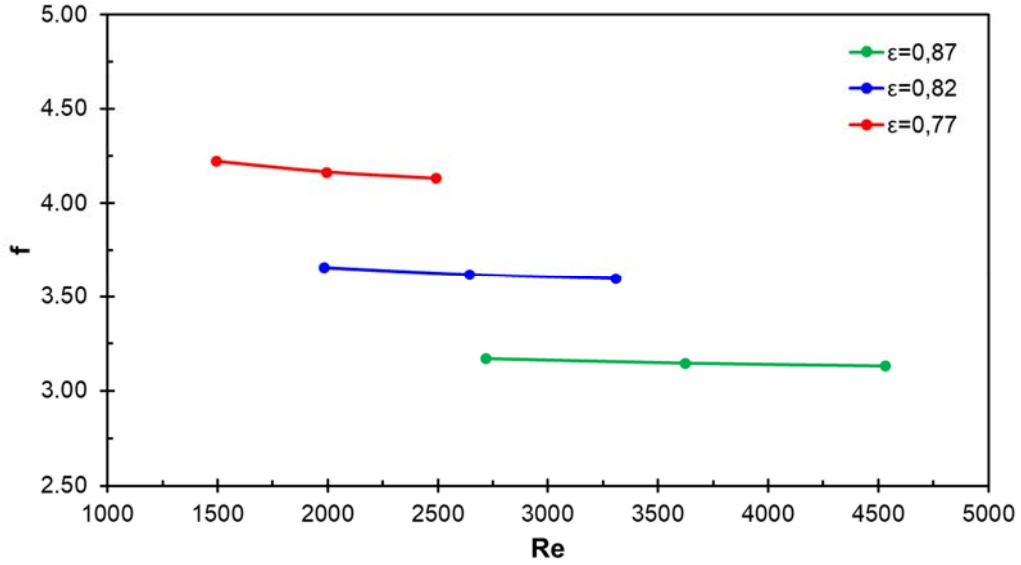
Sürtünme faktörü, tüm geometriler için artan hava debisi ile azalmaktadır. Ayrıca gözeneklilik azaldıkça sürtünme faktörü ve yapısal bütünlük (kompaktlık) de artmaktadır. Bu durum daha rijit bir yapının oluştuğunu göstermektedir. Öte yandan, yapısal bütünlüğü artırmak, daha yüksek bir sürtünme faktörüne neden olur. Bu nedenle, ısı değiştiricisi seçimi yapılırken yapısal bütünlük ve ısı verimin yüksek olmasına dikkat etmekle beraber sürtünme faktörünün de artacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Sonuç olarak, eklemeli üretim sonrasında ısı değiştiricilerinde yapısal bütünlüğün tam olarak sağlanamadığı ve ısı değiştiricilerinde boşluklar olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5. Isı verim değerleri



Şekil 6. Deney ve analiz sonuçlarından elde edilmiş farklı Re sayılarına karşılık gelen basınç düşümü değerleri



Şekil 7. Sürtünme faktörü

SONUÇ

Bu çalışmada, FDM eklemeli üretim yöntemi ile üretilmiş farklı gözenekliliklere sahip (0,87 – 0,82 – 0,77) üç farklı Gyroid ısı değiştiricilerinin performansı deneysel olarak incelenmiştir. Farklı akış debilerinde ve gözeneklilikteki geometriler için ısı verim, basınç düşümleri ve sürtünme faktörleri elde edilmiştir.

Başlıca sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- En yüksek verim 0,77 gözeneklilik değerindeki geometri için yaklaşık %50 olarak elde edilmiştir.
- Gözeneklilik değerinden bağımsız olarak artan Re sayısı ile sürtünme faktörü azalmaktadır. Ayrıca, sürtünme faktörü gözeneklilik ile ters orantılıdır.
- Belirlenen tüm basınç değerleri için %3'ün altında dış kaçak oranları elde edilmiştir. Bu da sistemde herhangi bir dış kaçak olmadığı anlamına gelmektedir.
- Tüm geometriler için olmasa da belirli basınç altında iç kaçak oranları %3'ün üzerinde elde edilmiştir. Eklemeli üretim sonrasında ısı değiştiricilerinde yapısal bütünlük tam olarak sağlanamadığı için ısı değiştiricileri içerisinde boşluklar oluşmaktadır. Isı değiştiricilerinin yeniden üretilmesi ve SLS, SLA gibi farklı bir eklemeli üretim yöntemi kullanılarak test edilmesi gerekmektedir.

Eklemeli üretim sonrasında ısı değiştiricilerindeki boşluklardan dolayı farklı bir eklemeli üretim yöntemi ile aynı geometriler yeniden üretilecektir. Bu sayede ısı değiştiricilerinin gerçek performansları elde edilmiş olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Y.Q. Liu , P.X. Jiang , S.S. Jin , J.G. Sun , Transpiration cooling of a nose cone by various foreign gases, *Int. J. Heat Mass Transf.* 53 (2010) 5364–5372 .
- [2] A. Ghahremannezhad , K. Vafai , Thermal and hydraulic performance enhance- ment of microchannel heat sinks utilizing porous substrates, *Int. J. Heat Mass Transf.* 122 (2018) 1313–1326 .
- [3] P. Wang , K. Vafai , Modeling and analysis of an efficient porous media for a solar porous absorber with a variable pore structure, *ASME J. Solar Energy* 139 (2017) 051005 .
- [4] P. Qian , J.Y. Wang , Z.H. Wu , J. Yang , Q.W. Wang , Performance comparison of methane steam reforming in a randomly packed bed and a grille-sphere com- posite packed bed, *Energy Convers. Manage.* 193 (2019) 39–51 .
- [5] U. Scheithauer , E. Schwarzer , G. Ganzer , A. Kornig , W. Becker , et al. ,Micro-re- actors made by lithography-based ceramic manufacturing (LCM), *Ceram. Trans. Ser.* 258 (2016) 31–41 .
- [6] H.-U. Nissen, Crystal orientation and plate structure in echinoid skeletal units, *Science*, vol. 166, no. 3909, pp. 1150–1152, 1969. DOI: 10.1126/science.166.3909.1150.
- [7] Cheng, Z., Xu, R., & Jiang, P. X. (2021). Morphology, flow and heat transfer in triply periodic minimal surface based porous structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 170, 120902.
- [8] H.A. Schwarz, Ueber ein Modell eines Minimalflächenstückes, welches langs seiner Begrenzung vier gegebene Ebenen rechtwinklig trifft. In: *Gesammelte Mathematische Abhandlungen*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 149–150, 1890.
- [9] E.R. Neovius, Bestimmung Zweier Spezieller Periodischer Minimalflächen, *Akad. Abhandlungen*, Helsinki, Finland, 1883.
- [10] A. H. Schoen, Infinite periyodik minimal surfaces without selfintersections, *NASA Technical Note No. D-5541*, NASA, 1970.
- [11] E.A. Lord and A.L. Mackay, Periyodik minimal surfaces of cubic symmetry, *Curr. Sci.*, vol. 85, no. 3, pp. 346–362, 2003.
- [12] Genç, A. M., Vatanserver, C., Koçak, M., & Karadeniz, Z. H. (2022, May). Investigation of additively manufactured triply periodic minimal surfaces as an air-to-air heat exchanger. In *CLIMA 2022 conference*.
- [13] Peng, H., Gao, F., & Hu, W. (2019). Design, modeling and characterization of triply periyodik minimal surface heat exchangers with additive manufacturing. In *30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium–An Additive Manufacturing Conference*.
- [14] Chandrasekaran G. 3D Printed HeatExchangers: An Experimental Study. 2018.
- [15] Attarzadeh, R., Rovira, M., & Duwig, C. (2021). Design analysis of the” Schwartz D” based heat exchanger: A numerical study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 177, 121415.

- [16] Iyer, J., Moore, T., Nguyen, D., Roy, P., & Stolaroff, J. (2022). Heat transfer and pressure drop characteristics of heat exchangers based on triply periodic minimal and periodic nodal surfaces. *Applied Thermal Engineering*, 209, 118192.
- [17] TS EN 308: Isı Değiştiricileri - Havadan havaya veatık gazlardan ısı kazanımı cihazlarının performansının tayini için deney metotları, 2022.
- [18] Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 545-554.
- [19] Ayar, O., Yalçinkaya, M. A., Karadeniz, Z. H., Gezgin, E. 2017. "Isı Geri Kazanımlı Havalandırma Cihazları İçin 3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilebilecek Isı Değiştirici Tasarımı ve İmalatı" 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 19-22 Nisan, İzmir.
- [20] Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., ... & Martina, F., 2016. "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints", *CIRP Annals: manufacturing technology*, 65(2), 737-760.
- [21] Catchpole-Smith, S., Sélo, R. R. J., Davis, A. W., Ashcroft, I. A., Tuck, C. J., & Clare, A. (2019). Thermal conductivity of TPMS lattice structures manufactured via laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 30, 100846.
- [22] Tirelli, V. (2020, May). Additive Manufacturing in Heat Exchangers and Valves. In *Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference.
- [23] Danayat, S. S. (2019). Investigating 3-D Printed Polymer Heat Exchanger (Doctoral dissertation, Arizona State University).
- [24] Fu, Y., Bao, J., Wang, C., Singh, R. K., Xu, Z., & Panagakos, G. (2019). CFD Study of Countercurrent Flow in Triply Periyodik Minimal Surfaces with CO₂BOL Solvent (No. PNNL-29590). Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States).
- [25] Ergun, S., & Orning, A. A. (1949). Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds. *Industrial & Engineering Chemistry*, 41(6), 1179-1184.

ÖZGEÇMİŞ

Alper Mete GENÇ

1991 yılı Kütahya doğumludur. 2015 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Bölümünü bitirmiştir. İzmir Dokuz Eylül Üniversitesinden 2018 yılında Yüksek Mühendis unvanını almıştır. 2018 yılından beri İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Makina Mühendisliği Bölümü Anabilim Dalı'nda Doktora Eğitimine devam etmektedir. Güneş Enerjisi, Nanoakışkan, Isıtma-Havalandırma ve Soğutma Uygulamaları, Eklmeli Üretim konularında çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.

Yusuf YILDIRIM

1999 yılı Adana doğumludur. 2018 yılında İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesinde Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliğine başlamıştır. Hala aynı okulda ve aynı bölümde 4.sınıf olarak eğitim görmektedir. 2020 ve 2021 yıllarında sırasıyla ÖZGÜL ÇELİK ve SANEM PLASTİK Şirketlerinde 3 ay süren stajlarını tamamlamıştır. Ekim 2022'den bu yana ENEKO Havalandırma Şirketi'nde yarı-zamanlı olarak çalışmaktadır.

Ziya HAKTAN KARADENİZ

1980 yılında İzmir'de doğan Ziya Haktan KARADENİZ; 2002 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden, 2005 ve 2011 yıllarında ise sırasıyla aynı Üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Yüksek Lisans ve Doktora Programlarından mezun olmuştur. 2002-2013 yılları arasında Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma görevlisi olarak çalışmıştır. 2022 yılından beri İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'nde Doç. Dr. olarak görev yapmaktadır. Rüzgâr enerjisi, HVAC Bileşenlerinin 3B eklmeli Üretimi, Nanoakışkanlar konuları üzerinde çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.