



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

ISI GERİ KAZANIMLI HAVALANDIRMA CİHAZLARI İÇİN 3 BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLEBİLECEK ISI DEĞİŞTİRİCİ TASARIMI VE İMALATI

**OKAN AYAR
MEHMET ALP YALÇINKAYA
ZİYA HAKTAN KARADENİZ
ERKİN GEZGİN
İZMİR KÂTİP ÇELEBİ ÜNİVERSİTESİ**

**MACİT TOKSOY
ENEKO**



ISI GERİ KAZANIMLI HAVALANDIRMA CİHAZLARI İÇİN 3 BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLEBİLECEK ISI DEĞİŞTİRİCİ TASARIMI VE İMALATI

Design and Production of a Heat Exchanger for a Heat Recovery Ventilation Device That Can be Manufactured by 3D Printers

Okan AYAR
Mehmet Alp YALÇINKAYA
Ziya Haktan KARADENİZ
Erkin GEZGİN
Macit TOKSOY

ÖZET

Dünya nüfusunun artmasıyla birlikte enerji tüketim miktarı da buna paralel olarak günden güne artış göstermektedir. Bu nedenle enerji tüketiminin azaltılması oldukça önemli bir konudur. Günümüzde enerji tüketiminin nedenlerinden bir tanesi havalandırma ile çevreye olan ısı kaybıdır. İç hava kalitesini arttırırken kaybedilen bu ısının enerjisini kullanmak için havadan havaya ısı değıştirciler kullanılarak ısı geri kazanımı sağlanır. Havalandırma sistemleri için gerekliliği günden güne daha iyi anlaşılan ısı geri kazanım sistemlerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Atık ısının geri kazanımında, değışik tipte ısı değıştirciler kullanılmaktadır. Isı değıştirciler, ısı geri kazanım cihazlarının temel elemanıdır ve cihazların verimini büyük ölçüde belirlerler. Bu projede, ısı geri kazanımlı havalandırma cihazlarında hâlihazırda kullanılan ısı değıştircilerin yerine geçebilecek, 3 boyutlu (3B) yazıcı ile üretilebilen, polimer esaslı bir ısı değıştircinin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Isı değıştircinin geometrik parametreleri değıştirilerek, kullanılabilir farklı geometrik tasarımlar önerilmiştir. Proje kapsamında yapılan araştırmaların sonucunda üretilen ısı değıştirciler, ısı geri kazanımlı havalandırma cihazları standartlarına uygun olarak test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mekanik havalandırma, Isı geri kazanımı, 3B eklemeli üretim, Isı değıştirci

ABSTRACT

The amount of energy consumption is increasing day by day with the increase of the world population. For this reason, reducing energy consumption is a very important issue. Today, one of the reasons for energy consumption is the loss of heat to the surroundings by ventilation. In order to utilize the energy of this heat which is lost when increasing indoor air quality, heat recovery is achieved by using air to air heat exchangers. The necessity of heat recovery systems for ventilation are being understood day by day and the use of this kind of systems are becoming widespread. Heat exchangers which are the key element of heat recovery devices specify the efficiency of the system. Different types of heat exchangers are used in recovering of the waste heat. In this project, the availability of polymer based heat exchanger which could be produced by 3D printer and replaced with currently used heat exchangers has been investigated. The geometric parameters of the heat exchanger have been changed and different geometric designs have been suggested. Suggested design have been tested according to the standards on heat recovery devices.

Key Words: Mechanical ventilation, Heat recovery, 3D Additive manufacturing, Heat exchanger

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun artmasıyla birlikte enerji tüketim miktarı da buna paralel olarak günden güne artış göstermektedir. Bu nedenle enerji tüketiminin azaltılması oldukça önemli bir konudur. Günümüzde enerji tüketiminin nedenlerinden bir tanesi havalandırma ile çevreye olan ısı kaybıdır. İç hava kalitesini artırırken kaybedilen bu ısının enerjisini kullanmak için havadan havaya ısı değiştiriciler kullanılarak ısı geri kazanımı sağlanır. Havalandırma sistemleri için gerekliliği günden güne daha iyi anlaşılan ısı geri kazanım sistemlerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Atık ısının geri kazanımında, değişik tipte ısı değiştiriciler kullanılmaktadır. Isı değiştiriciler, ısı geri kazanım cihazlarının temel elemanıdır ve cihazların verimini büyük ölçüde belirlerler.

Isı geri kazanım cihazlarının tasarruf yapmasındaki en önemli etken olan ve verimlerini de büyük ölçüde belirleyen elemanlar ısı değiştiricileridir. Bu çalışma kapsamında, daha düşük maliyetlerle insan hayatını yakından ilgilendiren bir sorunun daha kolay şekilde çözülebilirliği araştırılmıştır. 3B eklemeli üretim ile ısı değiştirici imalatının bir diğer önemi, iklimlendirme sektörünün dünyada hızla gelişmesi ile Ar-Ge çalışmalarının farklı bir boyut kazanmaya başlamasıdır. Dünya pazarındaki büyük rekabet ve uluslararası kuruluşlar tarafından belirlenen standartlar, enerji verimliliğinin en üst seviyeye çekilmesini zorunlu kılmıştır. Bu nedenle, iklimlendirme firmaları düşük maliyet ve yüksek performans ilkesine en uygun üretim şeklini oluşturmak üzere çalışmalarını yoğunlaştırmıştır. Yukarıda da bahsedildiği gibi, bu 3B yazıcılar kullanılarak sağlanabilir.

Son dönemde yaygınlaşmaya başlayan 3B eklemeli üretim ile ısı değiştirici üretimi alanındaki öncü çalışmalar Amerika'da Maryland Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda 3B yazıcı ile imal edilen prototip ısı değiştirici (Şekil 1) geleneksel yollar ile üretilen kanatlı borulu ısı değiştiricisine göre hem %20 enerji tasarrufu sağlamakta hem de %20 daha hafif olarak üretilebilmektedir [1]. Böylece önemli oranda maliyet tasarrufu sağlanmaktadır. Bunun nedenleri şöyle açıklanabilir;

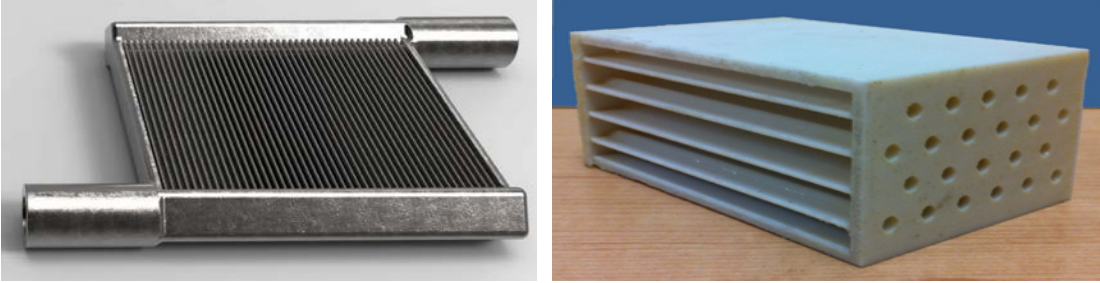
- 1) Isı değiştiricinin tek parça olarak üretilebilmesi, dolayısıyla malzeme sarfiyatının azaltılması, iş gücünün azaltılması ve ürün boyutlarının en aza indirilmesi maliyeti azaltmaktadır.
- 2) Ürün üzerindeki duvar kalınlıklarının minimize edilmesi de verimliliğin artmasını sağlamaktadır.

3B eklemeli üretim ile ısı değiştiricisi üretiminin diğer bir amacı normal üretim yollarına kıyasla imalatın daha kısa zamanda yapılabilmesidir. Bu da sektördeki seri imalatın hızlandırılması anlamını taşımaktadır.

Maryland Üniversitesi tarafından yapılan bu çalışmada ortaya çıkan %20 değerindeki verim artışı gelecek yıllar için umut vermektedir. 2030 yılındaki küresel enerji ihtiyacının, 2004'teki seviyeye göre %65 oranında artacağı öngörülmektedir [2]. Bu ihtiyacı karşılamak için daha fazla güç üretmektense, daha düşük enerjili geri dönüştürülebilir malzemeler kullanılabilir. Bu aşamada polimerler ısı değiştirici tasarımında yeni fırsatlar sunmaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanılan malzemenin polimer yapıda (ABS tipi plastik) seçilmesindeki en önemli nedenler; esneklik, düşük maliyet, düşük ağırlık, korozyon direnci ve üretimin kolaylığı olarak açıklanabilir [3]. Daha önce yapılan çalışmalar ışığında proje için öngörülen en önemli sorun polimer malzemelerin düşük ısı iletim katsayılarına sahip olmasıdır. Sıradan bir polimerin ortalama iletim katsayısı 0,25 W/m.K iken paslanmaz çelikte bu değer 16 W/m.K, alüminyumda ise 250 W/m.K olarak ölçülmektedir. Bu nedenle iletkenliği arttırmak için grafit, siyah karbon, karbon fiber, seramik veya metal parçacıklar(alüminyum ve bor nitür) ilave malzeme olarak kullanılabilir [4].

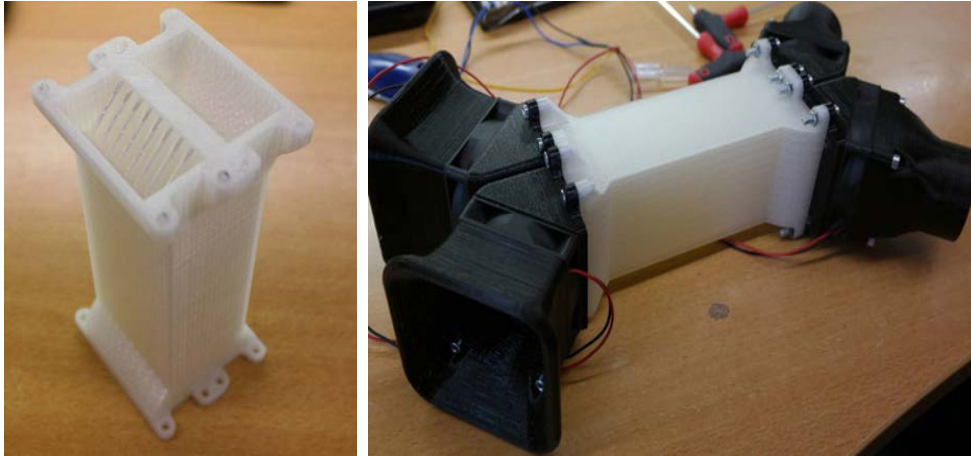
Geçtiğimiz aylarda Aneesh vd. [5] yayınladıkları makalede elektronik baskı devre mantığıyla ısı değiştirici üretimini başarmışlardır. Bu çalışma farklı olarak ısı değiştiricinin 3B yazıcı teknolojisi ile imal edilmesine olanak sağlayacaktır. Aneesh vd. akışkan olarak helyum, ısı değiştirici malzemesi olarak da alaşım çelik kullanılmıştır. Giriş ve çıkış sıcaklıkları sırasıyla 900 °C ve 540 °C olarak belirlenmiştir. Bizim uygulamaya yapacağımız sıcaklıklar bu yüksek sıcaklıklara kıyasla oldukça düşüktür ve bu da üretim malzemesi olarak daha az maliyetli olan polimer yapıları ABS kullanımının uygunluğunu göstermektedir.

Tüm bu çalışmalar düşünüldüğünde 3B yazıcı ile polimer malzemeden ısı değiştirici imalatının ne denli önemli olabileceği ortaya çıkmıştır. Bu konu üzerine ulaşılabilen tek araştırmada ABD'deki Maryland Üniversitesi'ndeki aynı grup tarafından 3B yazıcı teknolojisi ile polimer ısı değiştirici üretilmiştir (Şekil 1). Ağ borulu ısı değiştirici olarak üretilen model havadan suya ısı aktarımı için test edilmiş ve polimer malzeme kullanımının dezavantajlarının önerilen geometride giderildiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak üretilen ısı değiştiricinin özgül ısı geçiş katsayısı $1,4 \text{ kW/m}^2\text{K}$ olarak belirlenmiştir [6].



Şekil 1. Maryland Üniversitesi'nde 3B yazıcı teknolojisi ile metal ve polimer malzemeden üretilen ısı değiştiriciler [1 ve 6].

Yakın tarihli bir diğer çalışmada da [7] öncelikle kabuk boru tipi ısı değiştiricinin bazı parçaları 3B yazıcı ile üretilmiş ve üretilen bu parçalar montajı yapılarak verimlilik testleri yapılmıştır. Bu çalışmanın ardından plakalı tipte ısı değiştirici imalatı için 3B yazıcı kullanılmıştır. Duvar kalınlığı 0,3 mm, katman kalınlıkları 0,16 mm olan plakalı tip ısı değiştirici (Şekil 2) PLA malzemesi kullanılarak yaklaşık 10 saat gibi bir sürede tamamı blok halinde başarıyla üretilmiştir. Üretilen ısı değiştiricinin boyutları 15 x 8 x 7 cm olup iç yüzey alanı 1000 cm^2 'dir. Ayrıca yapılan verimlilik testlerinde %50 ile %65 arası değerler olarak oldukça iyi sonuçlar vermiştir [7]. Ancak bu çalışma kontrollü koşullar sağlanarak akademik bir araştırma şeklinde değil, bir ev çalışması şeklinde yapıldığından verilerin güvenilirliği tartışmalıdır.



Şekil 2. 3B yazıcı ile üretilmiş havadan havaya plakalı tip polimer ısı değiştirici ve ısı geri kazanımlı havalandırma cihazı [7].

Günümüzde hızla gelişen 3B yazıcı teknolojisine baktığımızda, istenilen tasarımda yaşam alanları üretilebildiği de görülmüştür. Bunun bir örneği (Şekil 3'te) sunulmuştur. Bu örnekte tasarlanan konut için uygun ısı geri kazanım cihazının geleneksel yöntemlerle imalatı hem çok maliyetli hem de tasarımsal olarak çok mümkün değildir. Ancak 3B yazıcılar kullanılarak bütünleşik olarak, evin tasarımına ve boyutuna göre yüksek verimle çalışan ısı geri kazanımlı havalandırma cihazları için kanal ve ısı değiştiricisi üretimini başarıyla yapılması mümkündür. Tüm bu bilgiler ışığında 3B yazıcı ile imal edilen ısı değiştiricilerinin, tüm dünyada kabul gören yeni bir dal olması öngörülmektedir.



Şekil 3. 3B yazıcı teknolojisi ile imal edilmek üzere tasarlanmış bir ev [8].

Bu incelemeler sonucunda ısı geri kazanım cihazlarının tasarımına, montaj ve uygulanabilirlik olarak bakıldığında oldukça önemli olduğu ortaya konmaktadır.

Bu çalışmada, öncelikle ısı geri kazanımlı havalandırma cihazlarında kullanılabilecek kompakt bir ısı değiştiricinin 3B yazıcı ile üretilebilecek şekilde tasarımı yapılmış, 3B modeli oluşturulmuş ve prototipi üretilmiştir. Böylece, 3B yazıcı ile ısı geri kazanımlı havalandırma cihazlarında kullanılabilecek ısı değiştirici üretimi alanındaki literatüre katkı sağlanmıştır. Yapılan çalışmada, tüm dünyada değişen iklimlendirme standartlarını karşılayacak verimliliğe sahip ve daha az maliyetle üretilebilecek ısı değiştiriciler ile ilgili bir ön çalışma niteliğindedir. Ayrıca ürünün üretilebilirliği ve kullanılabilirliği test edilmiştir.

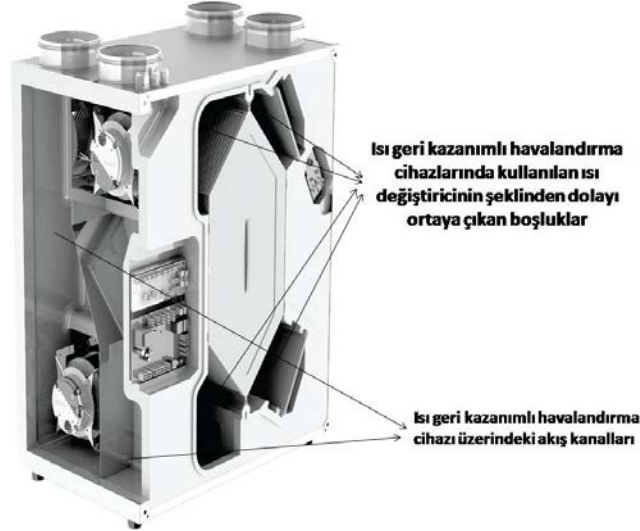
2. YÖNTEM

Yukarıda belirtildiği gibi yapılan çalışma; 3B yazıcı ile üretilebilecek şekilde tasarımının yapılması, laboratuvar testlerine uygun 3B modelinin oluşturulması ve prototipin üretilmesi ve testlerin yapılması aşamalarını içermektedir. Bu şamalar aşağıda sunulmuştur.

2.1. 3B yazıcı ile üretilebilecek havadan havaya ısı değiştirici tasarımının yapılması

İmal edilmesi planlanan prototipin, çapraz akışlı plakalı tip ısı geri kazanım cihazı içerisinde kullanılabilmesi gerekmektedir. Mevcut durumda iklimlendirme sektöründe kullanılan ısı geri kazanımlı havalandırma cihazlarının en büyük dezavantajı sadece belirli geometrik şekillerde üretiliyor olmasıdır. Bu zorunluluk cihazların tasarımsal olarak belli kalıplarda kalmasına neden olmaktadır. Isı geri kazanım cihazlarında bulunan ısı değiştiricilerin yeniden tasarlanarak geometrik şekilden dolayı oluşan boşlukların (Şekil 4) kullanılması sektördeki en büyük sınırlayıcı olan standart geometriler ile üretilme sorununu çözecektir. Bu nedenle 3B eklemeli üretim özellikle tasarlanacak yeni ısı değiştiriciler için çok geniş bir tasarım potansiyeli sunmaktadır. İstedığımız boyut ve şekilde üretim yapma imkânının önemli faydaları vardır:

- 1) Özgün tasarımlarla havalandırma sisteminin kurulacağı konut veya endüstriyel tesislerin yapısına ve geometrisine uygun şekillerde ısı değiştirici imalatı yapılabilecektir.
- 2) 3B eklemeli üretim ile ısı geri kazanım cihazı verimini arttırmak için ısı aktarım yüzeyleri için yeni şekilsel yapılar önerilebilir. Böylece toplam ısı aktarımı artırılabilir. Böylece boyutsal olarak çok daha küçük cihazlardan kullanılarak yüksek verim elde edilebilir.
- 3) Havalandırma cihazlarının ısı değiştirici yerleştirmek için kullanılmayan bölgelerini de kullanılabilir hale getirilerek verim artırılabilir.



Şekil 4. Isı geri kazanımlı havalandırma cihazı içerisinde ısı değiştiricinin görünümü [9].

4) Isı değiştirici tek parça olarak üretilebilecektir, böylece malzeme sarfiyatı azalacaktır. Ayrıca, ürünün tek parça olarak üretilmesiyle iş gücü maliyeti önemli ölçüde azaltılabilecektir.

5) Binalar ile bütünleşik tasarlanan ve 3B eklemeli üretim ile üretilen binalarda üretim aşamasında bina içerisine gömülecek tasarımlar ile fabrikada imalat sürecinin de devreden çıkması ve yüksek performanslı binaların tasarlanması mümkün olabilecektir.

Bu başlangıç çalışmasında, temel olarak 3B eklemeli üretimin ısı değiştirici üretiminde kullanımı incelenenmiş ve basit geometriler ile çalışılmıştır. Ancak, bu alanda yapılan ilk çalışma olması nedeniyle öncü niteliktedir. Takip eden süreçte, ısı değiştiricisinin ölçülerinin (duvar kalınlığı, katman kalınlığı, uzunluğu ve yüzey alanı gibi), kullanılan malzemenin, tasarımının ve akış şekli değiştirilmesinin ürün başarımına etkisinin incelenmesi planlanmaktadır.

2.1.1. 3B Eklemeli üretim yönteminin geleneksel yöntemden farklılıkları

Üretimde iki farklı özellikte 3B yazıcılar kullanılmaktadır. Bazı durumlarda yatay eğimli yüzeylerin baskısında model üretilirken sarkmalar oluşabilir. Bu tip sarkmaları engellemek için destek kullanmak gereklidir. Açık yapan kısmın altı destek malzeme ile doldurulur. Üretim tamamlandıktan sonra kimyasal banyosunda destek malzeme üründen ayrılır. İkinci bir yol olarak destek parçaları olmaksızın üretim yapılmaktadır. Bu nedenle üretim yaparken yazıcı özellikleri dikkate alınarak model tasarlanmaktadır.

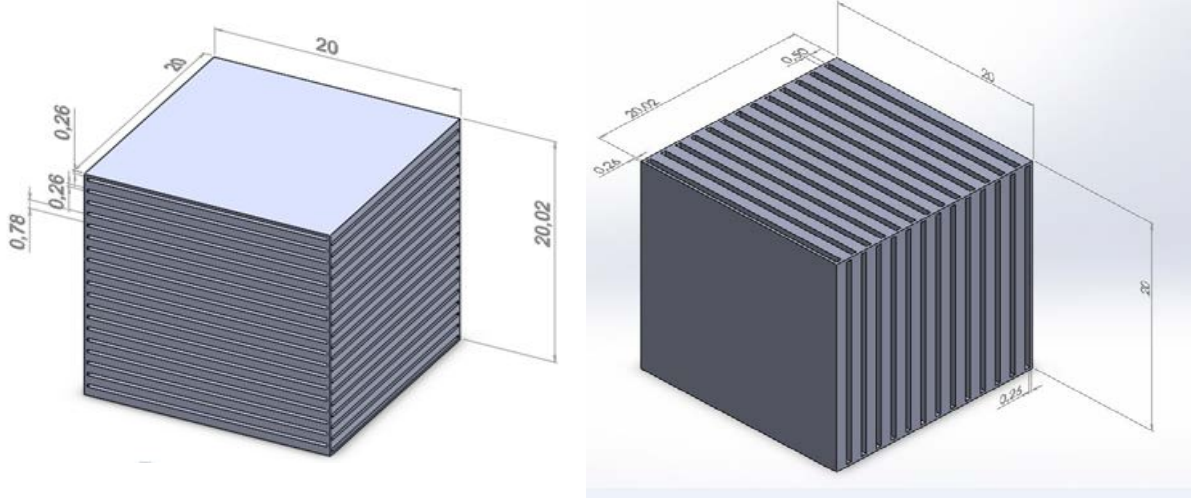
Geleneksel talaşlı imalat yöntemleriyle bir parça üretmek için, arzu edilen geometriden daha büyük ölçülerdeki bir parçayı alıp, adım adım fazlalıklarını tıraşlayarak parçaya son şeklini vermek gerekmektedir. Bu şekilde gerçekleştirilen imalat yöntemleri genel olarak "çıkarmalı üretim" yöntemleri olarak adlandırılmaktadır. 3B yazıcıların yaygınlaşması ile çıkarmalı yöntemlerden farklı bir üretim anlayışının yavaş yavaş sanayide kendine yer bulmaya başladığı görülmektedir. "Eklemeli üretim" yöntemlerinde, üretilmek istenen parça, malzemenin birbirine eklenmesiyle elde edilmektedir. Basit bir ifadeyle gereksiz parçaları çıkarmak yerine, malzemenin katmanlar halinde üst üste yığılmasıyla sağlanmaktadır. Bu şekilde gerçekleştirilen üretimlere, 3B eklemeli üretim adı verilmektedir [10].

Mevcut ısı değiştiriciler, genellikle ince plaka şeklindeki ham maddenin uygun kalıpta soğuk preslenmesi ile üretilmektedir. Bu yöntemin her bir plaka için ayrı ayrı uygulandığı düşünülürse ortaya çıkan, işgücü ve maliyet kaybı ciddi boyutlara ulaşmaktadır. 3B eklemeli üretim ile bu kayıpların azaltılması mümkündür.

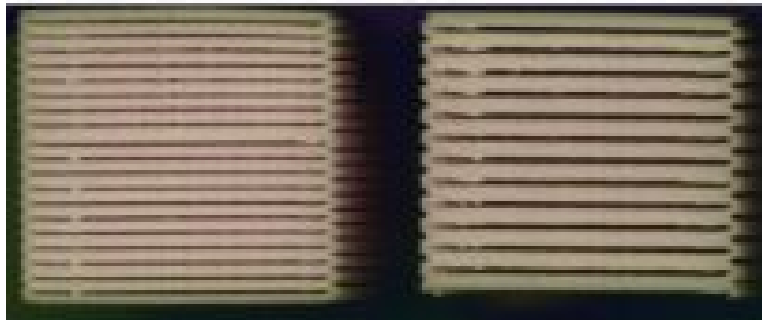
2.1.2 3B eklemeli üretim ile havadan havaya ısı değiştirici üretim denemeleri

Başlangıç olarak 3B yazıcının ısı değiştirici üretimi için minimum çalışma boyutlarının belirlenmesi adına ön çalışmalar yapılmıştır. 3B yazıcıların genel kullanım alanı mekanik işlevsel parçaların üretimi ve endüstriyel tasarımların görselleştirilmesidir. Isı değiştiricilerin tekrarlı, ince kanallı, ince duvarlı yapısı 3B yazıcıların üretim sınırlamaları için yeni bir uygulama alanıdır. Ayrıca, olabildiğince ince duvarlar (ısı iletim direncini azaltmak için) ve olabildiğince ince kanallar (ısı değiştiricinin yüzey alanı yoğunluğunu artırmak için) gerektiğinde 3B yazıcıların boyutsal alt sınırlarının zorlanması gerekmektedir. Konu ile ilgili yapılan görüşmeler 3B yazıcı piyasasında bu tip bir problemle henüz ilgilenilmediğini göstermektedir. Farklı bir uygulama olması nedeniyle yazıcıların boyutsal alt sınırlarının ısı değiştiriciler için deneyimlenmesi gerekmiştir. Böylece 3B yazıcı ile en az malzeme kullanılarak, en hızlı şekilde üretim yapılması hedeflenmiştir.

Test üretimleri için 2 cm kenar uzunluğuna sahip küp şeklinde ısı değiştiriciler bilgisayar ortamında modellenmiştir. İki bileşenli yazıcı ile üretilmesi planlanan ilk iki model 260 μm katman kalınlığı ile 260 μm duvar kalınlığına sahip olan iki ayrı kanal genişliği değeri için (260 μm 500 μm) modellenmiştir. Boşluk olması gereken yerler baskı sırasında destek malzemesi ile doldurulduğundan modelin içinde geniş boşluklar bırakmak mümkün olmuştur. Destek malzemesini çıkarılması için baskı işleminden sonra parçalar kimyasal olarak temizlenmiştir. Küçük kanal genişliğine sahip parçanın temizliğinde zorluklar yaşanmasına rağmen üretim başarı ile gerçekleşmiştir (Şekil 6).



Şekil 5. 260 μm kanal aralığı, 260 μm katman kalınlığına sahip ve 500 μm kanal aralığı, 260 μm katman kalınlığına sahip ısı değiştirici tasarımları.



Şekil 6. 260 μm (soldaki) ve 500 μm (sağdaki) kanal aralıklarına sahip iki ısı değiştirici.

Üretim sonucunda ortaya çıkan maliyet fazlalığı, destek malzeme kullanımının azaltılması hatta ortadan kaldırılması, ayrıca kimyasal temizlik sürecinden kurtulmak için yeni tasarımlar oluşturulmuştur. Üretim yapılan iki yazıcıda en düşük 90 ve 260 μm katman kalınlıklarında baskı

yapılabilmektedir. Bu nedenle, yazıcı özellikleri göz önüne alınarak farklı katman kalınlıklarıyla ve destek malzemesi kullanılmadan üretilebilecek bir yapı modellenmiştir ve üretim denemeleri yapılmıştır (Şekil 7).



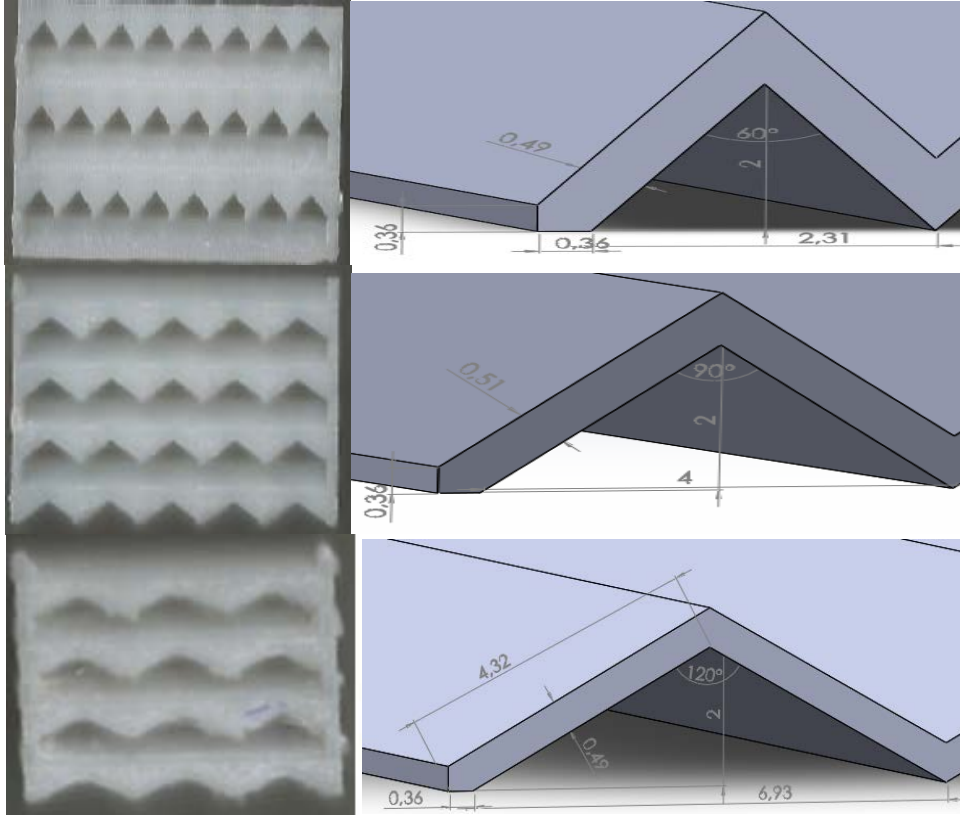
Şekil 7. 800 µm kanal aralıklı tasarım ve 90 µm ile 260 µm katman kalınlıklı baskı denemeleri

Bu noktada, baskıda kullanılan katman kalınlığı ile uyumlu olmayan model ölçüleri nedeniyle oluşan baskı hataları gözlenmiştir. 3B eklemeli üretim kesikli (süreksiz) bir üretim şekli olduğundan model ile üretim yönteminin geometrik uyumu çok önemlidir. Şekil 8 de yapılması istenilen kanal kesiti beyaz renk ile gösterilmiştir. 260 µm katman kalınlığı ile üretilmek istenen 800 µm yüksekliğindeki eşkenar dörtgen kanalın üretimi ancak siyah renk ile gösterilen şekilde oluşmuştur. Bu şekilde oluşan hataların yanında bir de birikimli hata oluşumu nedeniyle tabandan yükseldikçe kanal boşluklarında kaymalar oluşabilmektedir. Bu tasarımların sonucunda elde edilen ürünlerin istenilen başarıma ulaşamadığı, geometrik olarak üretim yöntemi ile uyumlu yapılar planlanması gerektiği görülmüştür.



Şekil 8. Oluşan hatalar sonucu meydana gelen yeni kanal şekli

Bu sonuçlar doğrultusunda desteksiz malzeme kullanmadan daha az maliyetle üretilebilecek ve daha fazla ısı transfer alanına sahip farklı tip ısı değiştirici tasarımı ve imalatına yönelik modeller oluşturulmuştur. Bu konuda yapılan ilk denemeler trapez geometrili 8cm³ dış hacminde kübik ısı değiştiriciler olmuştur (Şekil 9). Bu noktada belirlenmesi gereken temel ölçütler ısı değiştiricinin kanal aralığı (2 mm), duvar kalınlığı (0.5 mm) ve tepe açısı (60, 90 ve 120 °) olarak belirlenmiştir (Şekil 9). Bu ölçütler sonucunda yapılan üç tasarım için baskı denemeleri yapılmıştır (Şekil 9).



Şekil 9. Farklı tepe açısına sahip trapez kanallı ısı değiştiriciler.

Üç modelinde destek malzemesi kullanmadan üretilebildiği görülmüştür. Ürün boyutlarını küçültürken, ısı verimin artırılması açısından her bir geometri için kompaktlık (1 m^3 lük ısı değiştiricideki ısı aktarımı yüzey alanının dış hacme oranı) ve gözeneklilik (ısı değiştiricideki boşlukların toplam hacmine oranı) hesapları yapılmış olup elde edilen sonuçlar aşağıda paylaşılmıştır.

60° tepe açılı model:

$$\sigma = \frac{4322,81}{19,20 \times 17,91 \times 19,20} = \%65.5 \quad 1 \times 1 \times \frac{1}{2,98 \times 10^{-3}} \times 2 = 671,14 \text{ m}^2 / \text{m}^3 \text{ non-compact}$$

90° tepe açılı model:

$$\sigma = \frac{6704,22}{20,72 \times 21,76 \times 20,72} = \%71.7 \quad 1 \times 1 \times \frac{1}{2,57 \times 10^{-3}} \times 2 = 778,21 \text{ m}^2 / \text{m}^3 \text{ compact}$$

120° tepe açılı model:

$$\sigma = \frac{7223,72}{20,56 \times 21,50 \times 21,50} = \%76 \quad 1 \times 1 \times \frac{1}{2,72 \times 10^{-3}} \times 2 = 722,02 \text{ m}^2 / \text{m}^3 \text{ compact}$$

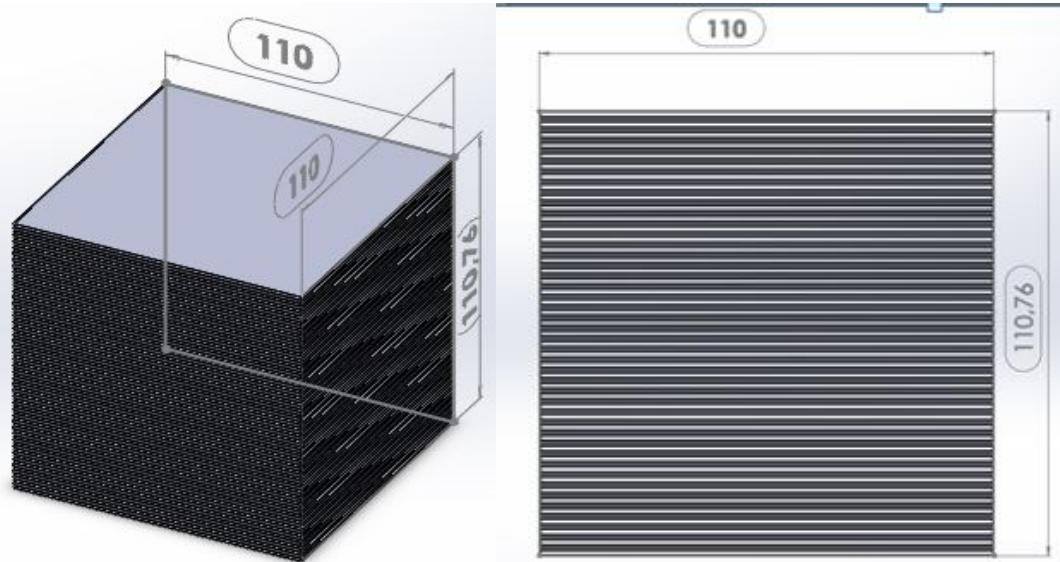
Hesaplamaların sonucunda gözeneklilik oranı en yüksek aynı zamanda ısı aktarımı yüzey alanı da ortalama olan 120° tepe açısına sahip ısı değiştirici tasarımının daha büyük boyutlarda üretilmesi kararlaştırılmıştır. 3B yazıcı üretim hassasiyetinin bu tasarıma nasıl cevap verebileceğinin gözlemlenmesi için iki katmandan oluşan deneme parçası üretilmiş (Şekil 10) ve bu boyutlarda üretimin yapılabildiği görülmüştür.



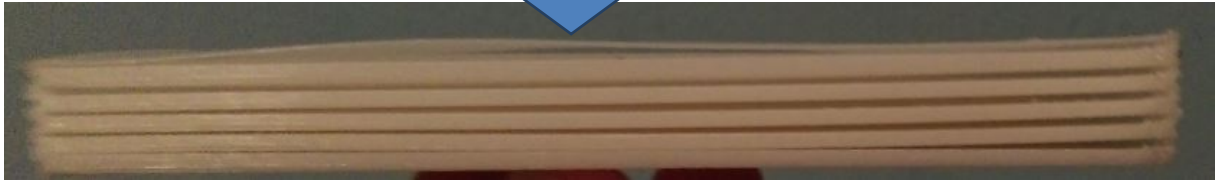
Şekil 10. 120° tepe açılı 11cm kenar uzunluğunda ısı değıştirici

2.2 Laboratuvar testlerine uygun prototip tasarlanması ve üretilmesi

Yapılan testlerde hatasız sonuçlar elde edebilmek amacıyla, testlerin yapıldığı laboratuvar da ölçülebilecek minimum debi ($30\text{m}^3/\text{h}$) dikkate alınarak daha büyük ölçülerde ısı değıştiriciler tasarlanmıştır. Laboratuvar şartlarında standartlara uygun şekilde test edilebilir en küçük boyutlu ısı değıştiricinin 11cm kenar uzunluğuna sahip kübik yapıda olması gerektiği belirlenmiştir. Katman kalınlığı $260\ \mu\text{m}$ olarak belirlenmiş ve buna bağlı olarak duvar kalınlığı da $260\ \mu\text{m}$ seçilmiştir. Isı değıştirici için kanal aralıkları, hali hazırda kullanılan ısı değıştiricilere daha yakın bir değer olan ve iki bileşenli üretimde karşılaşılan kimyasal temizlik problemlerini azaltmak için $1040\ \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir. Model 3b eklemeli üretime uygun olarak ölçülendirilmiştir (Şekil 11).

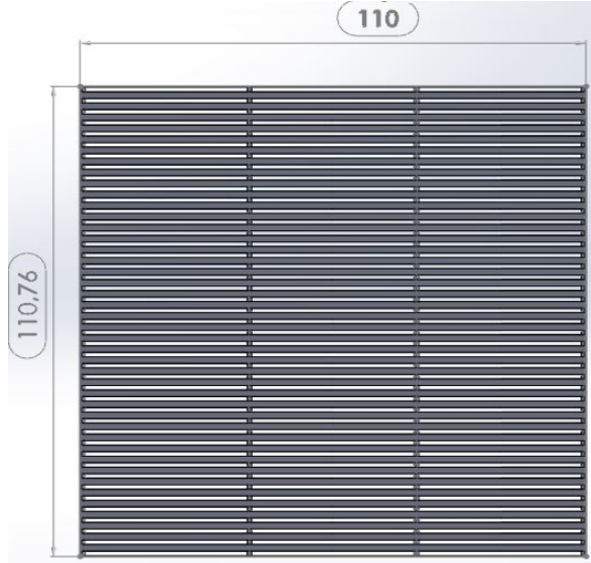


Şekil 11. 11x11x11 kübik tasarım ve ölçülendirilmesi

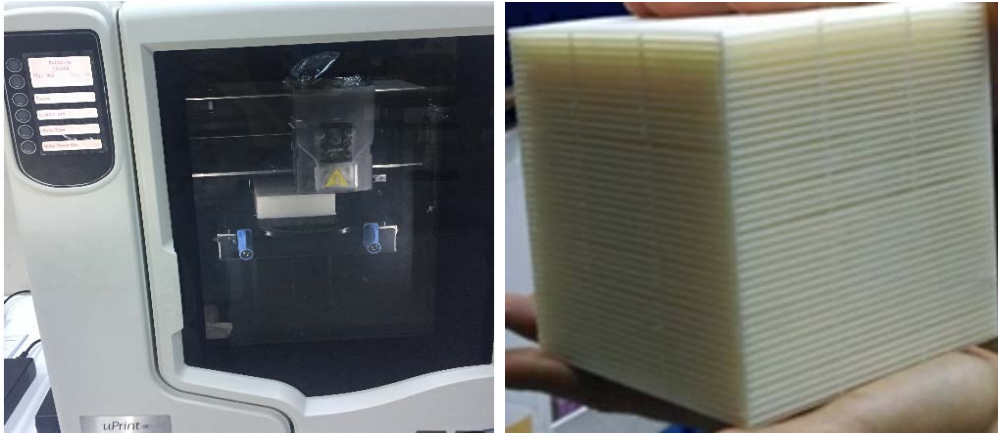


Şekil 12. Isı değıştiricinin deneme parçasının karşıdan görüntüsü

İlk aşamada olası problemleri görmek için modelin küçük bir kısmı üretilmiştir (Şekil 12). Destek malzemeyi temizlemek için yüksek sıcaklıklarda kimyasal temizleme işlemine sokulan modelin $260\ \mu\text{m}$ kalınlığındaki duvarlarında deformasyonlar gözlemlenmiştir. Bu deformasyonları gidermek, tasarımın mukavemetini artırmak için, modele $1040\ \mu\text{m}$ çapında silindirik 16 adet destek kolunu eşit aralıklarla eklenmiştir (Şekil 13). Böylece laboratuvar da standartlara uygun şekilde test edilebilir en küçük hacimli ısı değıştirici tasarımı ve imalatı yapılmıştır ($1332\ \text{cm}^3$ hacimli) (Şekil 14). Bu işlem yaklaşık 29 saat sürmüştür.

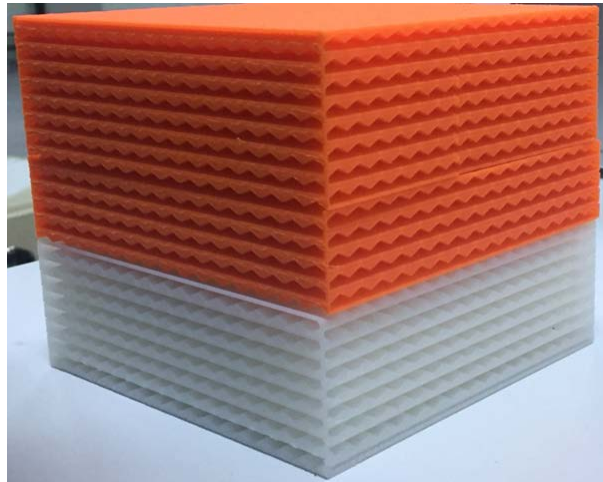


Şekil 13. Destek kolonlu ısı değiştiricinin karşıdan görüntüsü



Şekil 14. 3B yazıcı ile imalat ve test edilebilir boyuttaki ısı değiştirici

Destek malzemesi kullanmadan üretebilmek için yapılan ön çalışma sonucunda elde edilen bilgiler işığında, 11 cm kenarlı kübik, trapez kanallı ısı değiştirici üretimi de yapılarak teste hazır hale getirilmiştir (Şekil 15).



Şekil 15. 11 cm kenarlı kübik, trapez kanallı ısı değiştirici

2.3. Laboratuvar Testlerinin Yapılması

Üretilen prototipler ürün için öngörülen testlere tabi tutulmuştur. Yapılan testlerde TS EN 308 1997 -Isı Değiştiriciler - Havadan Havaya ve Atık Gazlardan Isı Kazanımı Cihazlarının Performansının Tayini için Deney Metotları Standardı göz önüne alınmıştır [11].

Bu standart aşağıda yer alan konular için deney yöntemlerini belirlemektedir;

- Dış kaçak,
- Isı değiştiricileri için hava kanalları arasında verilen bir basınç farkında taze havaya egzoz havasının iç kaçağı,
- Sıcaklık ve nem oranları,
- Egzoz havası ve taze hava taraflarındaki basınç düşüşü [11].

Üretilen ısı değiştiriciler, ölçülerine uygun olarak tasarlanmış temsili bir cihaza bağlanarak test edilmiştir (Şekil 16).



Şekil 16. Üretilen ısı değiştirici ve test modülü

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Başlangıç için ısı değiştiricilerin kaçak testlerinin yapılması uygun görülmüştür. Kaçak testlerinde cihaz basınçlandırılıp, basınç altında cihazdan çevreye ve egzoz havası tarafından taze hava tarafına doğru olan hava kaçaqları ölçülmüştür. Kaçak testleri dış kaçak testi ve iç kaçak testi olmak üzere iki başlık altında incelenir.

Bu aşamada testler sadece iki bileşenli sistem ile üretilen model için (Şekil 14) yapılabilmektedir. Yapılan iç ve dış kaçak testlerinin sonucunda ısı değiştirici duvar kalınlığı olarak belirlenen tek katman kalınlığının (260 μm) geçirgen bir yapı oluşturduğu, bu nedenle ısı değiştiricideki iç ve dış kaçak miktarlarının yüksek olduğu görülmüştür (Tablo 2 ve Tablo 3). Dış kaçak testinde en yüksek basınç değerinde %67'ye kadar çıkan kaçak miktarları belirlenmiştir. İç kaçak testlerinde ise, en küçük basınç farkı için bile kabul edilebilir iç kaçak debisinin (4.5 m^3/h) üstünde olduğu (6.07 m^3/h), en yüksek basınç farkı değerinde ise iç kaçağın kabul edilebilir değerin 10 katına kadar çıktığı görülmüştür.

Testi yapılan ısı değiştirici için debi basınç ilişkisi Şekil 17'de verilmiştir. İki hattaki debi basınç ilişkisi de iç kaçağın çok yüksek olduğunu göstermektedir. Bu şartlar altında verim testlerinin yapılması çok sağlıklı olmayacağından verim testlerinin yeni ısı değiştiriciler üretildikten sonra yapılması planlanmaktadır.

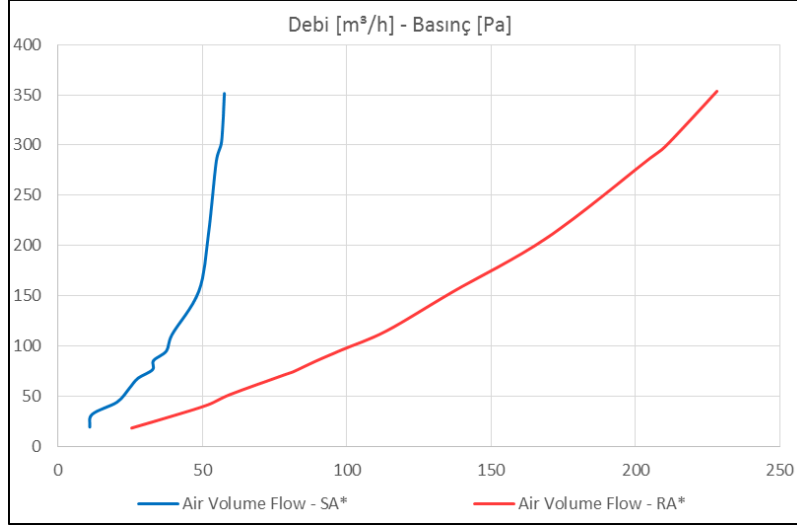
**Tablo 2.** İç Ve Dış Kaçak Testi Verileri

DIŞ KAÇAK (EXTERNAL LEAKAGE)			İÇ KAÇAK (INTERNAL LEAKAGE)		
P _{stat} [Pa]	Kaçak Debisi (Leak. Air Flow) [m ³ /h]	Kaçak Oranı (Leak. Ratio) [%]	P _{stat} [Pa]	Kaçak Debisi (Leak. Air Flow) [m ³ /h]	Kaçak Oranı (Leak. Ratio) [%]
-250	0.9	0.60	-170	62.7	41.80
-200			-150	42.4	28.27
-150			-100	34.4	22.93
-100			-50	19.1	12.73
-50			-20	9.1	6.07
0	0		0	0	0.00
50			20	12	8.00
100			50	21.5	14.33
150			100	32.4	21.60
200			125	37	24.67
250	1	0.67	170	43.3	28.87
			250	51.8	34.53

Ortam Sıcaklığı (Ambient Temp.)	Ortam Bağıl Nemi (Ambient Rel. Humidity)	Nominal Hava Debisi (Nominal Air Flow)	Nominal Dış Sta. Basınç (Nominal Ext. Sta. Pres.)	Kabul Edilebilir Kaçak D. (Allowable Leak. Flow)
25.9 °C	21.2 %	150 m ³ /h	20 Pa	4.5 m ³ /h

Tablo 3. Test Verileri

Ölçüm Noktası	TAZE HAVA (SA)			EGZOZ HAVASI (RA)		
	Dış Statik Basınç Farkı	Hava hızı	Hava debisi - SA	Dış Statik Basınç Farkı	Hava hızı	Hava debisi - RA
	[Pa]	[m/s]	[m ³ /h]	[Pa]	[m/s]	[m ³ /h]
A1	19,1	0,3	11,1	18,2	0,7	25,5
A2	31,9	0,3	11,9	30,4	1	39,9
A3	44,1	0,5	20,5	41,3	1,4	51,9
A4	57,7	0,7	24,7	51,6	1,6	59,7
A5	67,6	0,7	27,7	71	2,1	78,2
A6	76,3	0,9	32,8	74,4	2,1	81,6
A7	85,5	0,9	33,1	84,7	2,3	89,2
A8	95,1	1	37,6	96,1	2,6	98,4
A9	111,1	1	39,5	115	3	113,8
A10	154,6	1,3	48,8	153,5	3,6	136,5
A11	210,9	1,4	52,1	207,7	4,5	169,3
A12	284,2	1,4	54,9	284,6	5,4	204
A13	303,4	1,5	56,7	298,9	5,5	210,4
A14	351,4	1,5	57,7	353,6	6	228,1



Şekil 17. Basınç-Debi Eğrileri

4. SONUÇ

Proje çıktısı olarak aldığımız veriler, ısı geri kazanımlı havalandırma cihazlarında kullanılmak üzere farklı şekilsel yapılarda tasarlanacak ısı değiştiricilerinin imalatı alanında getireceği yeniliklerle literatüre katkı sunmayı amaçlamaktadır. Elde edilen sonuçlar ile 3B eklemeli üretimin tesisat sektöründe kullanımı ile ilgili yenilikçi bir yaklaşım ortaya konmuştur. Test edilen ilk ürün bu aşamada çok iyi sonuçlar vermemiş olsa da, üretim yöntemi ile ilgili yapılan tespitler ve kazanılan deneyim sonraki aşamalarda üretilecek yeni modeller için ümit vaat etmektedir. Günümüz teknolojisinde, bu çalışmada test edilebilen modelde kullanılan 260 µm katman kalınlığından çok daha küçük katman kalınlıklarında baskı yapabilmeyen cihazlar bulunmaktadır. Bu kalınlıkta bir duvar tek katman ile basmak yerine birkaç katman ile basıldığında duvarın gözenekliliği azalacaktır. Böylece iç ve dış kaçakların önlenmesi mümkündür.

3B eklemeli üretim yönteminin kullanımı önündeki engellerden biri de hızdır. Bu çalışmada kullanılan teknoloji ile standartlara uygun olarak test edilebilir bir ısı değiştirici yaklaşık 30 saate üretilebilmektedir. Bu süre seri üretim için oldukça uzundur. 3B eklemeli üretimin üretim yöntemi olarak da hızla gelişmekte olması nedeniyle zaman sorununun yakın gelecekte çözülebileceği düşünülmektedir. Yeni malzemeler, yüksek hızlı cihazlar, yeni yöntemler ile teknoloji hızla geliştikçe bu yöntem seri üretim için kullanılabilir hale gelecek, hatta standart üretim yöntemi olacaktır.

Mevcut sistemdeki bir diğer kısıt ise boyuttur. Günümüz teknolojisinde polimer malzeme basan cihazlarda boyutlar en çok 70 cm mertebesindedir. Bu nedenle tek bir cihazın veya büyük boyutlu ısı değiştiricilerin tek seferde basılabileceği sistemler bulunmamaktadır. Ancak cihaz içerisindeki boşlukların azaltılması ve daha verimli 3 boyutlu ısı değiştirici tasarımlarının yapılması ile aynı kapasitedeki cihazların çok daha küçük hacimlere sığdırılması mümkün olacaktır. Cihazlarda yaşanacak gelişmelerde düşünüldüğünde kısa zamanda tüm cihazın 3B eklemeli üretim ile üretilmesi mümkün görülmektedir.

Bir diğer önemli nokta ise sadece ısı değiştiricinin veya cihazın değil, artık tüm binanın 3B eklemeli üretim yöntemi ile üretilmesinin mümkün olmasıdır. Bu sayede binaya uygun olarak, binaya bütünleşik tasarlanmış mekanik havalandırma sisteminin bina üretilirken üretilmesi bu sayede zaman, para, hammadde tasarrufu sağlanırken çok daha verimli sistemleri üretilmesi mümkün olacaktır. Özellikle 3B eklemeli üretim yöntemine uygun geometrik tasarımlar yapılarak çok çeşitli şekillerde ısı değiştiriciler üretilmesi ve mevcut cihazlar içindeki atıl boşlukların, cihazların duvarlarının hatta binanın kendisinin ısı değiştirici olarak kullanılması mümkün olacaktır. Bu tespitler ısı değiştirici tasarımında yeni ve çığır açacak bir sürecin başlangıcı olarak görülebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 2209-B – Sanayi Odaklı Lisans Bitirme Tezi Destekleme Programı kapsamında 1139B411601504 ve 1139B411601552 numaralı projeler ile desteklenmiştir. Destekleri için TUBİTAK'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] http://www.ceee.umd.edu/news/news_story.php?id=9709
- [2] Patrick Luckow, Avram Bar-Cohen, Peter Rodgers, JuanCevallos, "Energy Efficient Polymers for Gas-Liquid HeatExchangers", 2010
- [3] Juan Gabriel Cevallos, Arthur E. Bergles, Avram Bar-Cohen, Peter Rodgers, and Satyandra K. Gupta, Polymer Heat Exchangers—"History, Opportunities and Challenges", 2012
- [4] R. R. Trojanowski , T. Butcher , M.Worek , G.Wei , "Polymer heat exchange design for condensing boiler applications", 2016
- [5] Aneesh A.M. , AtulSharma , AtulSrivastava , K.N. Vyas , ParitoshChaudhuri, "Thermal-hydraulic characteristics and performance of 3D straight channel based printed circuit heat exchanger", 2015
- [6] <http://www.eng.umd.edu/html/media/release.php?id=156>
- [7] [HTTP://YTEC3D.COM/3DP-HEAT-EXCHANGER/](http://YTEC3D.COM/3DP-HEAT-EXCHANGER/)
- [8] <https://1onel.com/curve-appeal-3d-printed-freeform-house/>
- [9] http://eneko.com.tr/Upload/Product/eneko_23520161544432.pdf
- [10] <https://muhendishane.org/uc-boyutlu-yazicilar-ve-sanayideki-kullanim-alanlari/>
- [11] TS EN 308: Isı eşanjörleri-Havadan havaya ve atık gazlardan ısı kazanımı cihazlarının performansının tayini için deney metotları, 1997.
- [12] EU Energy Security and Solidarity Action Plan: 2nd Strategic Energy Review, http://europa.eu/rapid/press-release_memo-08-703_en.htm

ÖZGEÇMİŞ

Okan AYAR

1994 yılı İzmir doğumludur. İzmir Katip Çelebi Üniversitesi lisans son sınıf Makine Mühendisliği bölümünde öğrenim görmektedir.

Mehmet Alp YALÇINKAYA

1994 yılı Muğla doğumludur. İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi lisans son sınıf Makine Mühendisliği bölümünde öğrenim görmektedir.

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. 2013 yılından beri İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde Yrd. Doç. Dr. olarak görev yapmaktadır.

Macit TOKSOY

Macit TOKSOY 1949 doğumludur. İTÜ 1972 mezunudur. 1972 – 2013 seneleri arasında Ege Üniversitesi, North Carolina State Üniversitesi, Dokuz Eylül Üniversitesi ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsünde ısı transferi, enerji depolama, enerji verimliliği, jeotermal bölge ısıtması ve jeotermal elektrik santralleri alanlarında akademik hayatını sürdürmüştür. 2013 Yılından bu yana Eneko Havalandırma ve Isı Ekonomisi Sistem Teknolojileri şirketine ısı geri kazanımlı havalandırma teknolojisi alanında çalışmaktadır. Akademik alanlarının yanında uluslararası spor etkinliklerinin planlanması ve lojistik yönetimi ilgi alanıdır. İzmir Yaz ve Erzurum Kış Oyunlarında, Mersin Akdeniz Oyunlarında üst düzey yöneticilik yapmıştır.