



**MODİFİYE GRAFİT KÖPÜK İLE HAVA
ARASINDAKİ ORTALAMA HACİMSEL ISI
TAŞINIM KATSAYISININ TAYİNİ**

Gürşah GÜRÜF

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji Bilim Dalı
Doç. Dr. İsmail SOLMUŞ**

2019

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MODİFİYE GRAFİT KÖPÜK İLE HAVA ARASINDAKİ
ORTALAMA HACİMSEL ISI TAŞINIM KATSAYISININ TAYİNİ**

Gürşah GÜRÜF

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Enerji Bilim Dalı**

**ERZURUM
2019**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**MODİFİYE GRAFİT KÖPÜK İLE HAVA ARASINDAKİ ORTALAMA
HACİMSEL ISI TAŞINIM KATSAYISININ TAYİNİ**

Doç. Dr. İsmail SOLMUŞ'un danışmanlığında Gürşah GÜRÜF tarafından hazırlanan bu çalışma 30/05/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı – Enerji Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (3./3.)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doc. Dr. İsmail SOLMUŞ

İmza :

Üye : Prof. Dr. Kadir BİLEN

İmza :

Üye : Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun **20.06/2019.** tarih ve **25./..09.**..... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma TÜBİTAK 3501 projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 315M136

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MODİFİYE GRAFİT KÖPÜK İLE HAVA ARASINDAKİ ORTALAMA HACİMSEL ISI TAŞINIM KATSAYISININ TAYİNİ

Gürşah GÜRÜF

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İsmail SOLMUŞ

Bu çalışmanın temel amacı, eşsiz termal ve fiziksel özelliklerinden dolayı elektronik bileşenlerin ısı kontrolünde gelecek vaadeden modifiye gözenekli grafit malzeme ile hava arasındaki ortalama hacimsel ısı taşınım katsayısını (h_v) veya Nusselt (Nu_{fs}) sayısını, zamana bağlı tek akım yöntemi (transient single-blow technique) vasıtasıyla Reynolds sayısının ($Re = 1000-10000$) fonksiyonu olarak boyutları ($L/H = 0.69-5.07$) arasında değişen dokuz farklı örnek için ampirik bağıntılar ile ifade etmektir. Zamana bağlı tek akım yöntemi deneysel çalışma neticesinde malzeme çıkışında zamanın fonksiyonu olarak okunan akışkan sıcaklığının, deneysel giriş sınır koşullarını kullanmak suretiyle iki enerji denkleminde dayalı bir boyutlu zamana bağlı sayısal modelden ortalama hacimsel ısı taşınım katsayısının tahmin edilen bir değeri için elde edilmesi olarak tanımlanır. Sayısal modelin bir boyutlu olarak ifade edilmesi nedeniyle deneysel çalışma esnasında katı sıcaklığının sadece akış yönünde değişip değişmediği farklı noktalardan sıcaklık ölçmek suretiyle kontrol edilmiş ve bir boyutlu modelin geçerliliği ayrıca ortaya konulmuştur. Deneysel çalışmanın sonrasında sayısal modele dayalı olarak MatLab ortamında geliştirilen simülasyon programı ile her bir örnek için ortalama hacimsel Nusselt sayısı (Nu_{fs}) Re sayısının fonksiyonu olarak $Nu_{fs} = aRe^b$ formunda ampirik bir eşitlik ile ifade edilmiş olup a ve b sabitleri doğrusal regresyon yöntemi ile tayin edilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlardan Nu_{fs} sayısının, Re sayısı ve örnek uzunluğunun artması ile birlikte arttığı, malzeme yüksekliğinin artması ile birlikte belirli bir değere kadar arttığı sonrasında ise kayda değer bir değişim göstermediği gözlemlenmiştir.

2019, 70 sayfa

Anahtar Kelimeler: Grafit, Gözenekli ortam, Hacimsel ısı taşınım katsayısı, Zamana bağlı tek akım yöntemi

ABSTRACT

Master Thesis

DETERMINATION OF AVERAGE VOLUMETRIC HEAT TRANSFER COEFFICIENT BETWEEN MODIFIED GRAPHITE FOAM AND THE AIR

Gürşah GÜRÜF

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Department of Energy

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İsmail SOLMUŞ

Graphite foam is considered to be frequently used in the future for thermal management of electronic components due to its unique thermal and physical properties. The main purpose of this project is to express an empirical correlation for the volumetric heat transfer coefficient (h_v) or volumetric Nusselt number (Nu_{fs}) between the modified graphite foam material and air as function of Reynolds number ($Re = 1000-10000$) for nine different samples ranging in size ($L/H = 5.07-0.69$) by using transient single blow technique. Transient single blow technique is defined as; measured time dependent fluid temperature at the exit of the sample from the experimental study is tried to obtain for a predicted value of volumetric heat transfer coefficient by using developed transient-one dimensional mathematical model based on the two energy equations, and the experimental boundary conditions. Validity of one dimensional model has been also shown by measuring the solid phase temperature at different points during the experiments. After the experimental study, Nu_{fs} for each sample as a function of Re number is expressed by an empirical equation in the form of $Nu_{fs} = aRe^b$ with the help of the simulation program based on the proposed numerical model and developed in MatLab environment. a and b constants of empirical equation are determined by linear regression method. In addition to it is observed from the results that the Nu_{fs} number increases with the increasing values of samples length and Re number, and also an increase in sample height increases the Nu_{fs} number but this is only valid up to a certain value of sample height and after that value its effect becomes insignificant.

2019, 70 pages

Keywords: Graphite, Porous material, Volumetric heat transfer coefficient, Transient single blow technique

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca ve bu tez çalışmamda beni her konuda yönlendiren desteğini esirgemeyen ve kendimi geliştirmemde önemli rol oynayan değerli hocam Sayın Doç. Dr. İsmail SOLMUŞ'a en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım. Ayrıca çalışmalarım ve hayatım boyunca yardımlarını esirgemeyen isimlerini buraya yazsam veya yazmasam da kendilerini çok iyi bilen değerli dostlarıma son olarak hayatım boyunca her an yanımda olan ve bana çalışma azmi kazandıran değerli çekirdek ailem annem ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde 315M136 nolu proje kapsamında mali açıdan destek veren Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Gürşah GÜRÜF

Haziran, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	6
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	11
3.1. Zamana Bağlı Tek Akım Yönteminin Aşamaları.....	13
3.1.1. Deneysel çalışma	13
3.1.2. Teorik çalışma	13
3.2. Deneysel Çalışma	14
3.2.1. Fan	16
3.2.2. Fan ile ısıtıcı arasındaki bağlantı aparatı	17
3.2.3. Elektrikli ısıtıcı ve ısıtıcının içine yerleştirildiği kanal aparatı	17
3.2.4. Kanal kesit alanı düşürücü	18
3.2.5. Teflon kanal (test bölümü girişi)	19
3.2.6. Test bölümü	20
3.2.7. Teflon kanal (test bölümü çıkışı).....	26
3.2.8 Ölçüm cihazları	27
3.2.9. Deney prosedürü.....	35
3.3. Sayısal Çalışma	36
3.3.1. Sayısal yöntem	40
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	44
4.1. Ortalama Hacimsel Isı Taşınım Katsayısının Tayini	44
4.2. Korelasyon Denklemleri.....	50
4.3. Deneysel Hata Hesaplaması	58
5. SONUÇ	59

KAYNAKLAR	60
EKLER.....	63
EK 1.	63
ÖZGEÇMİŞ	71



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Semboller

μ	Dinamik viskozite (kg/m.s)
A_p	Delik yüzey alanı (m ²)
c_p	Sabit basınçta özgül ısı (J/kg°C)
d_p	Gözenek çapı (mm)
H	Gözenekli grafit malzeme yüksekliği (m)
h_v	Ortalama hacimsel ısı taşınım katsayısı (W/m ³ K)
k	Isı iletim katsayısı (W/mK)
L	Gözenekli grafit malzeme uzunluğu (m)
N	Yüzey delik sayısı
Nu_{fs}	Nusselt sayısı
Pr	Prandtl sayısı
Re	Reynolds sayısı
T	Sıcaklık (°C)
t	Zaman (s)
$T_{f,\zeta}$	Gözenekli malzeme çıkışında havanın ortalama sıcaklığı (°C)
$T_{s,d}$	Gözenekli malzeme alt duvar sıcaklığı (°C)
T_{son}	Gözenekli malzeme girişinde ortalama hava sıcaklığı (sürekli rejimde) (°C)
U	Akışkan hızı (m/s)
W	Gözenekli grafit malzeme genişliği (m)
X	Boyutsuz kartezyen koordinat
x	Kartezyen koordinat (m)
α	Isıl yayılım katsayısı (cm ² /s)
ε	Gözeneklilik (%)
θ	Boyutsuz sıcaklık
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
τ	Boyutsuz zaman

Alt indisler

ç	Çıkış
d	Alt duvar
f	Akışkan
fe	Akışkan efektif
h	Ortam
i	Giriş
s	Katı
se	Katı efektif

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. a) Grafit karbon köpük 2 vpm (milimetre başına makro gözenek miktarı), b) Grafen karbon köpük 3 vpm.....	2
Şekil 1.2. a) Kapalı hücreli karbon köpük, b) açık hücreli karbon köpük	2
Şekil 1.3. Karbon köpük malzemenin yapısı	4
Şekil 3.1. POCO firması tarafından üretilen gözenekli grafit malzeme	12
Şekil 3.2. Zamana bağlı tek akım yöntemine ait akış diyagramı	12
Şekil 3.3. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	15
Şekil 3.4. Deney düzeneğine ait bir fotoğraf	16
Şekil 3.5. Fana ait bir fotoğraf	16
Şekil 3.6. Fan ile ısıtıcı bağlantı aparatına ait bir fotoğraf.....	17
Şekil 3.6. Isıtıcı ve ısıtıcının içine yerleştirildiği kanala ait bir fotoğraf	18
Şekil 3.7. Test bölümü girişinde ve çıkışında ortalama hava sıcaklığını ölçmek için kullanılan ısı çiftlerinin yerleri	19
Şekil 3.8. Dağıtıcı-karıştırıcıya ait görsel	20
Şekil 3.9. Test bölümünün şematik gösterimi ve görseli.....	21
Şekil 3.10. Isıl çiftlerin grafit örnek üzerindeki yerleri	22
Şekil 3.11. Yukarıdan aşağıya ortalama gözenek çapları 600 µm, 650 µm, 500 µm	24
Şekil 3.12. a) Kanatçıklı ve b) Kanallı grafit köpük ısı kuyusu tasarımları.....	24
Şekil 3.13. a) Modifiye grafit örneğin görseli b) ile silindirik kanalların yerleri	25
Şekil 3.14. CNC tezgahında numunenin işlenmesi.....	26
Şekil 3.15. Isıl çift.....	27
Şekil 3.16. Veri toplama cihazı.....	28
Şekil 3.17. 20 kanal kapasiteli Keysight 34901A şarj kart.....	29
Şekil 3.18. a) Isıl çiftlerin veri kayıt cihazındaki yerleri b) Elde edilen verilerin düzenlenmiş hali.....	30
Şekil 3.19. Güç kaynağı (power supply).....	31
Şekil 3.20. Anemometre (Hız ölçüm cihazı)	33
Şekil 3.21. Anemometrenin kanala yerleşimi	33
Şekil 3.22. Teorik çalışmanın yürütüleceği geometrinin şematik gösterimi	36

Şekil 3.23. Grafit köpük malzeme içerisindeki boyutsuz hız profili, $x/H=0.02$ ve $Re=104$	37
Şekil 3.24. Problem bölgesinin sonlu farklara bölünmesi	40
Şekil 4.1. Bir boyutlu sayısal modelin doğrulanması	45
Şekil 4.2. Boyutsuz ortalama hava giriş sıcaklığının boyutsuz zamanın fonksiyonu olarak gösterimi.....	46
Şekil 4.3. 4.2 veya 4.3 numaralı denklemin katsayılarının tayini.....	46
Şekil 4.4. $Re = 5277$ ve $Nu_{fs} = 1$ için teorik ve deneysel akışkan çıkış sıcaklıklarının ve akış yönünde katı sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi	48
Şekil 4.5. $Re = 5277$ ve $Nu_{fs} = 30$ için teorik ve deneysel akışkan çıkış sıcaklıklarının ve akış yönünde katı sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi	48
Şekil 4.6. Hatanın Nufs ile değişimi	49
Şekil 4.7. Her bir örnek için doğrusal regresyon yöntemi ile ampirik denklem sabitlerinin tayini.....	52
Şekil 4.8. Aynı yükseklik değerinde üç farklı modifiye grafit örnek uzunluğu ($L=27$ mm, 52 mm, 76 mm) için Nu_{fs} sayısının Re ile değişimi	53
Şekil 4.9. Üç farklı örnek yüksekliği için üç farklı örnek uzunluğunda $\ln Nu_{fs} Re^b$ değerinin $\ln(L/H)$ ile değişimi.....	55
Şekil 4.10. $Re = 10100$ ve $Nu_{fs} = 317$ için teorik ve deneysel akışkan çıkış sıcaklıklarının ve akış yönünde katı sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi	56
Şekil 4.11. Her bir örnek için ortalama hacimsel Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi	57

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Metal köpük malzemelerin üretim teknikleri	3
Çizelge 3.1. Gözenekli grafit malzemenin termal ve fiziksel özellikleri.....	11
Çizelge 3.2. Radyan fanın özellikleri.....	17
Çizelge 3.3. Numunelerin boyutları.....	22
Çizelge 3.4. Isıl çift tiplerine göre bağlantı şekilleri.....	28
Çizelge 3.5. Güç kaynağı özellikleri.....	31
Çizelge 3.6. 2 numaralı numune için her bir Reynolds değerine karşılık ısıtıcı gücü	32
Çizelge 3.7. Reynolds sayısı ve numune uzunluklarına göre hız değerleri	34
Çizelge 4.1. $Re = 5277$ ve $Nu_{fs} = 30$ için ağ sayısı ve zaman adımından bağımsızlık çalışması	49
Çizelge 4.2. Her bir örnek için ampirik denklem sabitleri ve korelasyon katsayısı	52

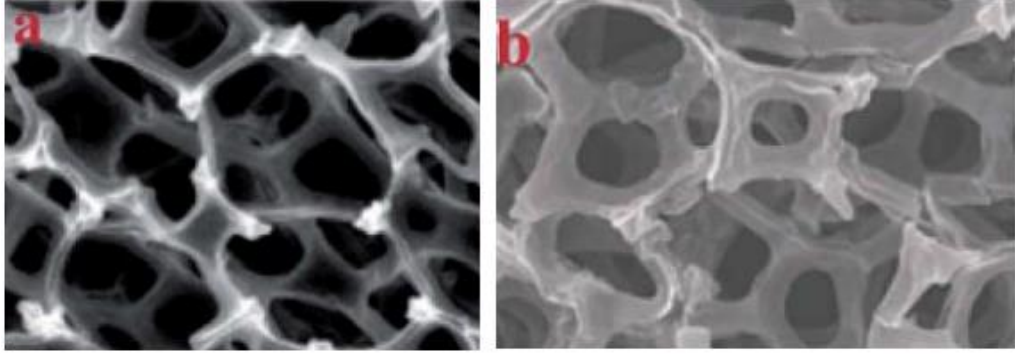
1. GİRİŞ

Elektronik parçaların termal kontrolü teknolojinin gelişmesi ile büyük önem arz etmeye başlamıştır. Bilindiği üzere söz konusu elektronik parçalar üzerinde üretilen ısı uzaklaştırılmadığı takdirde aşırı ısınma sonucunda elektronik parçalarda kalıcı hasarlar oluşmaktadır. Doğal ve zorlanmış taşınım ile gerçekleştirilen geleneksel soğutma yöntemleri bahse konu ısıyı parçalar üzerinden uzaklaştırıp kullanılan akışkana aktarmak için çokça kullanılmaktadır. Fakat bu yöntemler elektronik sistemlerin boyutlarının küçülmesi ve daha da güçlenmesi ile birlikte yeterli miktarda ısıyı uzaklaştırmak için yetersiz kalmaktadır. Son yıllarda parçalar üzerinde oluşan ısıyı uzaklaştırmak ve bu işlemi daha etkin bir şekilde gerçekleştirmek amacı ile gözenekli köpük malzemelerden üretilen ısı kuyuları kullanılmaya başlanmıştır. Gözenekli ısı kuyuları geleneksel tiplere göre daha yüksek temas yüzey alanı/hacim oranına ve toplam ısı transferi katsayısına sahiptirler (Gallego and Klett 2003; Jeng *et al.* 2006).

Gözenekli köpük malzemeler, genel anlamı ile malzeme türlerine göre metal köpük ve karbon köpük olmak üzere 2 gruba ayrılmaktadırlar. Metal köpük malzemeler doğal yollarla elde edilemezler. Ancak bazı işlemler sonucunda üretilebilirler. Metal köpük malzemelerin üretim yöntemleri Çizelge 1.1’de verilmiştir. Metal köpük malzemeler, alüminyum, bakır, titanyum, nikel, çelik ve çinko gibi metal malzemelerden oluşmaktadırlar (Sığırtmaç 2010). Bu alt başlıklar içerisinde alüminyum malzemedan üretilen gözenekli köpük malzemeler ısı kuyusu olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun başlıca sebepleri, kütlelerinin diğer malzemelere göre düşük olması, büyük oranda enerji uzaklaştırma kapasitesine sahip olması, diğer malzemelere göre darbe enerjisine dayanıklı olmasıdır (Dahil 2017).

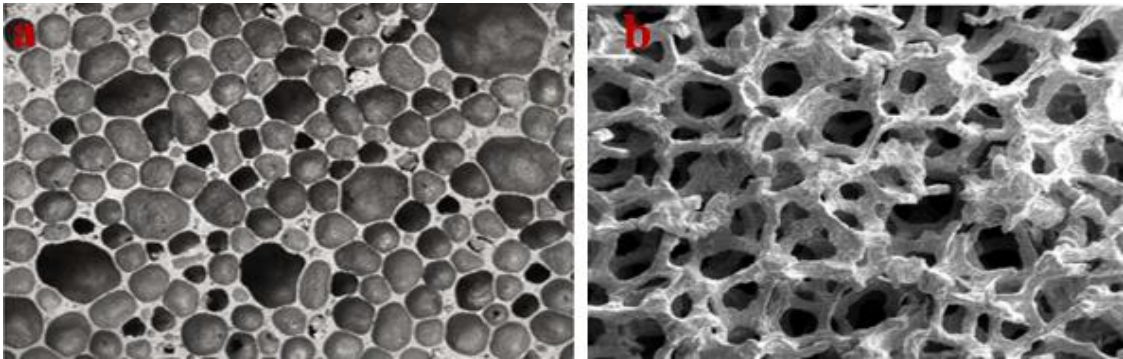
Gözenekli köpük malzemelerin bir diğer türü olan karbon köpükler makro gözenek boyutlarına göre 8 gruba ayrılmaktadır (Asfaw 2014). Bunlardan en önemli ve en çok kullanılanları grafit karbon köpük ve grafen karbon köpüklerdir (Şekil 1.1). Gözenekli karbon köpük malzemeler düşük yoğunluk, yüksek dayanım ve eşsiz termal özelliklerinden dolayı çoğu uygulama alanında kullanılan malzemeler arasına girmiştir.

Bu alanlar ana başlıklarına göre askeri, ticari, uzay, otomotiv, medikal, gemi sanayisi ve enerji şeklinde ele alınmaktadır (Sertakar 2008).



Şekil 1.1. a) Grafit karbon köpük 2 vpm (milimetre başına makro gözenek miktarı), b) Grafen karbon köpük 3 vpm (Asfaw 2014)

Karbon köpük malzemeler gözenek yapısına göre 2 grupta toplanabilirler. Bunlar; açık hücreli karbon köpükler ve kapalı hücreli karbon köpüklerdir. Açık hücreli karbon köpüklerin gözenekleri birbiri ile bağlantılıdır ve bu gözenekler içerisinden akış söz konusu olabilmektedir. Kapalı hücreli karbon köpüklerde ise gözeneklerin hiçbiri birbirine bağlı değildir ve bu gözenekler içerisinden akış söz konusu değildir. Kapalı hücreli karbon köpükler yüksek dayanım ve iyi ısı yalıtımı gerektiren yerlerde kullanılabilirken açık hücreli karbon köpükler ise ısı iletiminin önemli olduğu (ısı değiştiriciler vb.) yerlerde kullanılabilir. Açık ve kapalı hücreli karbon köpüklerin görseli Şekil 1.2’de verilmiştir.

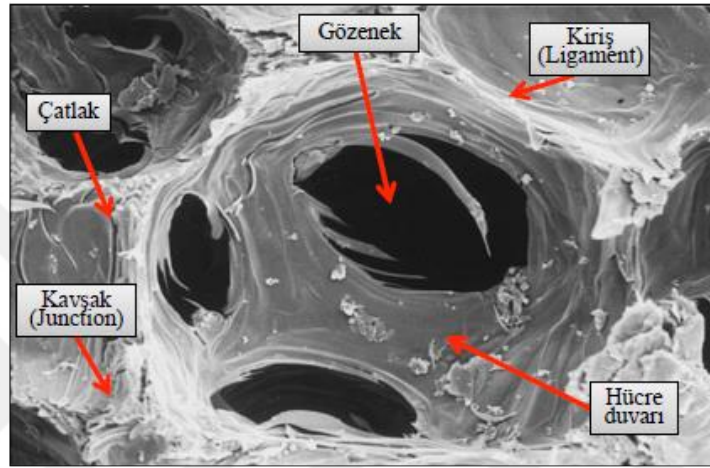


Şekil 1.2. a) Kapalı hücreli karbon köpük, b) açık hücreli karbon köpük (Mohammadimehr 2018)

Çizelge 1.1. Metal köpük malzemelerin üretim teknikleri (Kalkan 2012)

Üretim Tekniği	Katı Hal Bileşimi	Gözeneklilik	Hücre Boyutu ve Tipi	Ticari Adı veya Tipi
<u>Ergitme Bazlı Yöntemler</u>				
Gaz enjeksiyon	Al alaşımları + Seramik parçacıklar	% 80-98	3 - 25 mm, kapalı hücreli	ALCAN (ayrıca CYMAT ve HYDRO)
Gecikmeli serbest gaz üretimi	Al alaşımları + Seramik parçacıkları	% 60-96	0,8 - 3 mm, kapalı hücreli	FORM GRIP
Oksidasyondan önce in situ	CP Al + (oksidasyon parçacıkları)	% 89-93	4,8 mm, kapalı hücreli	ALPORAS
Ötektik gaz reaksiyonu	Ni, Cu, Mg, Al ve diğer malzemeler	% 5-75	5 µm - 10 mm, açık ve kapalı hücreli	GASAR
	6101 ve A356	% 88-92	0,5 - 4,3 mm, açık hücreli	DUACEL
İnfiltrasyon ve replikasyon	Al	% 60-70	10 µm - 1 mm, açık hücreli	Çoğaltılmış köpük yapısı Sintaktik gözenekli yapılar
	Al, Mg ve Ti alaşımları	<%55	0,06 - 3,7 mm, seramik içi boş küreler	
<u>Toz bazlı yöntemler</u>				
Köpükleştirici öncü ile birleştirilmiş toz katkısının ısıtılması	Al alaşımları + artık oksit parçacıklar	% 63-89	1 - 8 mm, kapalı hücreli	ALULIGHT FOAMINAL (IFAM) ALUFOAM
	Hapsolmuş öncü gazın ısıtılması	Ti-6Al-4V	% 20-40	10 - 100 µm, kapalı hücreli
<u>Sinterleme</u>	Çelik, Ti ve Ni bazlı içi boş küreler	% 65-87	0,5 - 6 mm, kapalı hücreli	İçi boş küre yapılar
	Farklı metal tozlar	% 30-50	Ara bağlantılı ağlar	Sinterlenmiş tozlar
	Farklı metal fiberler	<%95	Ara bağlantılı ağlar	Sinterlenmiş fiberler

Karbon köpük malzemenin içyapısı genel anlamı ile gözenek, kiriş, kavşak ve hücre duvarından oluşmaktadır. İki hücre duvarının birleştiği çizgi kiriş, en az üç hücre duvarının birleştiği nokta kavşak, malzeme içerisindeki boşluklara gözenek ve bu gözenekleri birbirinden ayıran duvarlara hücre duvarı denilmektedir. Bu ifadeler dahilinde karbon köpük malzemenin yapısı Şekil 1.3’de gösterilmiştir (Kılıç 2015).



Şekil 1.3. Karbon köpük malzemenin yapısı (Kılıç 2015)

Karbon köpük malzemeler kullanım alanlarına göre farklı yöntemler kullanılarak üretilmektedirler. Bu üretim yöntemlerinde ön plana çıkan parametreler sıcaklık ve basınç olduğu görülmüştür. Karbon köpük malzemenin üretiminde uygulanan farklı sıcaklık ve basınçlarda malzemenin yoğunluğu, dayanımı, ısıl iletkenliği gibi özellikleri değişebilmektedir. Karbon köpük malzemenin üretimi 4 aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; köpükleşme, stabilizasyon, karbonizasyon ve grafitizasyondur (Ekşilioğlu 2004). Köpükleşme işlemi sonucunda gözenek, kiriş ve kavşaklar meydana gelir. Stabilizasyon işlemi ile meydana gelen yapının homojen olması amaçlanmaktadır. Karbonizasyon işlemi ise karbon köpük malzemenin içerisindeki safsızlığın en aza indirgenmesi için yapılmaktadır. Grafitizasyon işlemi ile karbon köpük malzemenin grafitize olması sağlanır. Bu sayede karbon köpük malzemenin elektrik ve ısı iletkenlikleri daha yüksek olması amaçlanmaktadır (Kılıç 2015).

Gözenekli grafit malzeme, metal köpüklere nispeten daha yüksek ısıl iletkenlik, temas yüzey alanı ve daha düşük yoğunluğa sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı ısı kuyusu olarak

kullanılması durumunda, bileşenler üzerinden aynı miktarda ısıyı uzaklaştırmak için metal ısı kuyularına nazaran daha küçük hacimlere gereksinim duymaktadır. Dolayısıyla, elektronik sektöründeki yönelimler dikkate alındığında (cihaz boyutlarının küçülmesi ve hafiflik gibi) gözenekli grafit ısı kuyuları gözenekli metal ısı kuyularına nispeten daha ilgi çekici görünmektedirler. Gözenekli ısı kuyusu tasarımında, kuyu içerisinde gözenekli katı malzeme (karbon, alüminyum, bakır vb.) ile aracı akışkanın (hava, su vb.) sıcaklık dağılımlarını deneysel olarak hassas bir şekilde elde etmek bir takım zorluklardan dolayı mümkün değildir. Bu nedenden dolayı bu alanda yapılacak teorik çalışmalar büyük önem arz etmektedir. Teorik çalışmalarda ısı kuyusu içerisindeki sıcaklık dağılımı, katı ve akışkan fazları için ayrı ayrı geliştirilen iki farklı enerji denklemi veya her iki fazı da kapsayan tek bir enerji denklemi ile elde edilmektedir. Teorik modelde enerji denkleminin, her iki fazı da kapsayan tek bir denklem ile ifade edilmesi durumunda fazlar arasında lokal olarak ısıl dengenin söz konusu olduğu varsayılır. Diğer bir ifade ile bu yaklaşımda fazlar arasında kayda değer bir sıcaklık farkı yoktur ve tek bir enerji denklemi kuyu içerisindeki sıcaklık dağılımını elde etmek için yeterlidir. Ancak, özellikle yüksek akışkan hızları ve/veya fazların ısıl iletkenlik katsayıları arasındaki farkın büyük olması durumunda tek enerji denklemine dayalı teorik çözümden elde edilen sonuçlar gerçek durumu yansıtmayabilir. Özellikle hava ile soğutulan grafit tabanlı ısı kuyularının tek enerji denklemi ile modellenmesi fazların ısıl iletkenlik katsayıları arasındaki farkın büyük olması nedeniyle gerçekçi olmayan sonuçların elde edilmesine yol açmaktadır. Tek enerji denklemine dayalı teorik model fazlar arasındaki ısı geçişini dikkate almadığı için bu modelin kullanımına bağlı olarak ortaya çıkabilecek hatalar her bir faz için ayrı ayrı enerji denklemlerinin geliştirilmesi ile ortadan kaldırılabilir. Ancak her bir faz için ayrı enerji denkleminin geliştirilmesi durumunda fazlar arasında gerçekleşen ısı transferinin bu denklemlerde ifade edilmesi gerekmektedir. Diğer bir ifade ile fazlar arasındaki hacimsel ısı taşınım katsayısının bilinmesi gerekmektedir. Literatürde gözenekli grafit malzeme ile hava arasındaki ortalama hacimsel ısı taşınım katsayısının tayininde kullanılacak herhangi bir bağıntı bulunmamaktadır. Dolayısıyla gözenekli grafit malzeme ile hava arasındaki ortalama hacimsel ısı taşınım katsayısının tayini büyük önem arz etmekte ve bu çalışma ile birlikte literatürdeki mevcut boşluğun doldurulması hedeflenmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER

Metal malzemeden (özellikle alüminyum) üretilen gözenekli ısı kuyularının ısı transferi ve akış davranışları farklı konfigürasyonlar, aracı akışkanlar ve uygulamalar için deneysel ve teorik olarak kapsamlı bir şekilde çalışılmıştır (örneğin bkz: Jeng and Tzeng 2005; Leong and Jin 2006; Dukhan and Chen 2007; Ejlali *et al.* 2009; Mahjoob and Vafai 2008; Kurtbaş ve Çelik 2009). Bu çalışmaların yanında Şerbetçi (2018) yüksek lisans tezi kapsamında alüminyum köpükleri ısı değiştiricisi olarak kullanmış ve boş ısı değiştiricileriyle karşılaştırmıştır. Sonuç olarak alüminyum köpük ile kaplanmış ısı değiştiricisinin performansının daha iyi olduğu görülmüştür. Son zamanlarda Jafarizade *et al.* (2019) tarafından yapılan başka bir çalışma kapsamında alüminyum köpük malzemenin ısı transferi ve akış performansına yapısal parametrelerin (gözeneklilik, gözenek yapısı ve eğrilik) etkisini kararsız durum altında sayısal olarak incelemişlerdir. Bu çalışma neticesinde gözeneklilik ve gözenek çapı arttıkça akış performansının arttığı fakat bunun yanında ısı transferi performansının azaldığı gözlemlenmiştir.

Grafit tabanlı gözenekli ısı kuyuları metal örneklerine göre daha yüksek termal iletkenlik ve temas yüzey alanı ve daha düşük yoğunluğa sahip olmaları nedeni ile elektronik bileşenlerin taşınım ile soğutulmasında daha ilgi çekici durmaktadırlar. Fakat gözenekli grafit ısı kuyularının termal performansı ve akış davranışlarının farklı parametreler altında incelenmesi konusunda literatürde sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Grafit tabanlı gözenekli ısı kuyuları ile ilgili literatürde mevcut olan çalışmaları özetlersek; Gallego ve Klett (2003) su ile soğutulan gözenekli blok tip grafit ve alüminyum ısı kuyuları üzerinde karşılaştırmalı deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmanın sonucunda araştırmacılar, grafit tabanlı gözenekli ısı kuyusunun alüminyum örneğine nazaran daha fazla miktarda ısıyı uzaklaştırdığını ve grafit köpüğün daha kısa sürede sürekli rejime ulaştığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca grafit köpüğün göreceli olarak daha fazla basınç düşümüne sahip olmasına rağmen ısı transfer katsayısının daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Söz konusu basınç düşümü ısı kuyusu geometrisinin değiştirilmesi ile önemli ölçüde azaltılmıştır. Leong *et al.* (2010) bir kanal içerisine farklı konfigürasyonlarda yerleştirilmiş grafit köpüklerin (blok, zig-zag ve akış saptırıcı) zorlanmış taşınımında ısı

transferi ve basınç düşümü üzerinde göstermiş oldukları etkileri sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Aynı zamanda bu çalışmada grafit köpüğün fiziksel özelliklerini örneğin gözeneklilik, gözenek çapı, yoğunluk, geçirgenlik ve Forchheimer katsayısını deneysel olarak belirlemişlerdir. Sonuç olarak blok tip ısı kuyusunun yüksek basınç düşümü ile birlikte en iyi ısı transfer performansına sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Lin *et al.* (2013) bir ısı değiştiricisinin ısıl performansını ve basınç kayıplarını ayrı ayrı dört farklı konfigürasyona (akış saptırıcı, pim kanatlı, oluklu ve dalgalı oluklu) sahip gözenekli grafit kanatçık kullanarak sayısal olarak analiz etmişlerdir. Dalgalı oluklu gözenekli grafit kanatçıklara sahip ısı değiştiricisinin daha yüksek ısıl performansa ve daha düşük basınç düşümüne sahip olduğunu göstermişlerdir. Aynı zamanda söz konusu ısı değiştiricisi gözenekli alüminyum kanatçıklara sahip ısı değiştiricisi ile performans katsayısı (kaldırılan ısı/fan gücü), güç yoğunluğu (kaldırılan ısı/ısı değiştirici kütlesi) ve yoğunluk faktörü (kaldırılan ısı/ısı değiştirici hacmi) bakımından karşılaştırılmıştır. Dalgalı oluklu grafit kanatçıklı ısı değiştirici güç yoğunluğu ve yoğunluk faktörü bakımından alüminyum kanatçıklı ısı değiştiriciye nazaran daha iyi performansa sahip iken giriş havasını akışa zorlamak için gerekli fan gücünün yüksek olması nedeniyle performans katsayısı daha düşük bulunmuştur. Straatman *et al.* (2006) bir levha üzerine oturtulmuş gözenekli grafit tabakanın paralel hava akımı ile taşınım da ısı transferi üzerine olan etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. İncelenen koşullar altında, ısı transferinin grafit köpüğün efektif ısıl iletkenlik katsayısından ve grafit köpük tabaka kalınlığından (>3 mm) bağımsız olduğunu bulmuşlardır. Aynı zamanda ısı transferinin artan Reynolds sayısı ile birlikte azaldığı ifade edilmiştir. Yu *et al.* (2006) gözeneklilik ve gözenek çapının grafit kanatlı borulu ısı değiştiricisinin ısıl ve hidrodinamik performansına etkisini geliştirdikleri matematiksel model vasıtasıyla araştırmışlardır. Ayrıca araştırma konusu olan ısı değiştirici geleneksel alüminyum kanatlı örneği ile performans açısından karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma neticesinde gözenekli grafit kanatlı ısı değiştiricisinin performans açısından daha üstün olduğu ifade edilmiştir. Lim and Roh (2005) gözenekli grafit termosifon buharlaştırıcısının termal performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Buharlaştırıcısının grafit köpük ile yapılandırılması neticesinde ısıl performansı üzerinde önemli bir iyileşme elde edilmiştir. Yukarıdaki literatür çalışmasından anlaşılacağı üzere grafit tabanlı gözenekli ısı kuyuları yüksek ısıl iletkenlik ve temas yüzey alanına sahip olmaları nedeni ile metal (özellikle alüminyum)

örneklerine nazaran ısı performans açısından daha iyi sonuç vermektedirler. Ancak son derece düşük geçirgenlik özelliklerinden dolayı bir kanal içerisinde yığın olarak kullanılmaları durumunda akış yönünde büyük basınç düşümüne sebebiyet vermektedirler. Söz konusu basınç düşümünün üstesinden gelmek için soğutucu akışkanı akışa zorlayan fan gücünün artırılması gerekmektedir. Bu durum yığın kullanılmaları durumunda ortaya çıkan en önemli sorundur. Ancak bu sorun kanal içerisinde yığın yerine farklı konfigürasyonlarda kullanılmaları ile büyük ölçüde ortadan kaldırılabilmektedir.

Aşağıda çeşitli köpük malzeme-aracı akışkan çiftleri için fazlar arasındaki hacimsel ısı taşınım katsayısının tayinine yönelik literatürde yapılmış çalışmalar özetlenmiştir. Bu çalışmalarda fazlar arasındaki hacimsel ısı taşınım katsayısı boyutsuz parametrelerin fonksiyonu olarak çeşitli bağıntılar ile ifade edilmiştir. Fu *et al.* (1998) farklı gözeneklilik değerlerine sahip seramik malzeme ile hava arasındaki hacimsel ısı taşınım katsayısını (h_v) zamana bağlı tek akım yöntemi vasıtasıyla $Nu_v = CRe^m$ formunda ifade etmişlerdir. Bu çalışmada ayrıca ampirik korelasyon denkleminin malzemenin, birim santimetredeki gözenek sayısının ve örnek kalınlığının fonksiyonu olduğu rapor edilmiştir. Hwang vd. (2002) bir dikdörtgen kanal içerisine yerleştirilmiş gözenekli alüminyum malzeme ile hava arasındaki hacimsel ısı taşınım katsayısını zamana bağlı tek akım yöntemi vasıtasıyla Reynolds sayısının (1900-7800) ve malzeme gözenekliliğinin ($\epsilon=0.7, 0.8$ ve 0.95) bir fonksiyonu olarak elde etmişlerdir. Jiang *et al.* (2006) mini gözenekli ortamda katı bronz tanecikler ile akışkan arasındaki ısı transferini deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Tanecik-akışkan arasındaki ısı transfer katsayısı (h_v) zamana bağlı tek akım yöntemi ile elde edilmiştir. Toplam kütle yaklaşımı ve zamana bağlı bir boyutlu model vasıtasıyla h_v deneysel verilerden faydalanılarak hesaplanmıştır. Her iki modelden elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu dolayısıyla toplam kütle yaklaşımının basit olması sebebiyle tercih edilebileceği ifade edilmiştir. Wu *et al.* (2011) gözenekli seramik malzeme ile hava arasındaki ısı taşınım katsayısını teorik olarak araştırmışlardır. Sürekli rejimde üç boyutlu korunum denklemleri (kütle, momentum ve enerji) belirli sınır koşullar altında sayısal olarak çözülmüştür. Hava ve seramik köpük arasındaki yerel hacimsel ısı taşınım katsayısını veren korelasyon denklemi sayısal çözümlenmeden elde

edilen sonuçlardan faydalanılarak elde edilmiştir. Söz konusu korelasyon denkleminin geniş bir gözeneklilik, hız, hücre boyutu ve sıcaklık aralığında geçerli olduğu vurgulanmıştır. Son olarak geliştirilen korelasyon denklemi literatürde mevcut olan deneysel çalışmalarla karşılaştırılmış ve denklemin güvenli bir şekilde kullanılabileceği ortaya konmuştur. Ando *et al.* (2013) zamana bağlı tek akım yöntemini (transient single-blow technique) kullanarak farklı gözeneklilik değerlerine sahip seramik malzeme ile hava arasındaki hacimsel ısı taşınım katsayısını Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak ifade etmişlerdir. Hafeez *et al.* (2016) nikel köpük ısı değiştirici ile hava arasında sürtünme faktörü ve hacimsel ısı transferi katsayısı hava hızının 0.1 ile 5 m/s arasındaki değerleri için temsil edebilecek boyutsuz korelasyon denklemi geliştirmişlerdir. Abadi ve Kim (2017) farklı boyutlarda üretilmiş içi bakır köpük doldurulmuş küçük tüpler ile aracı akışkan R245fa soğutucu akışkan arasındaki ısı transferi katsayısını ampirik bir bağıntı ile ifade etmişlerdir. Shi *et al.* (2018) farklı PPI (İnç başına gözeneklilik) değerlerine sahip dairesel metal köpük ile doldurulmuş yatay tüplerin yoğunmalı ısı transferi altında ısı transferi ve basınç düşümü performanslarını deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunda deneysel verileri kullanarak bahse konu tüpler ile su arasında bir korelasyon denklemi elde etmişlerdir. Kim ve Kim (2019) Nikel ve bakırdan yapılmış yüksek gözeneklilikli açık hücreli metal köpük malzemeler ile aracı akışkan R245fa soğutucu akışkan arasında ısı transfer katsayısını tam olarak ifade edileceğini düşündükleri bir korelasyon denklemi elde etmişlerdir. Li *et al.* (2019) metal köpük ile doldurulmuş bir kanal içerisinden aracı akışkan olarak R141b soğutucu akışkan kullanarak kaynama ısı transferi altında metal köpük malzemenin ısı transferi performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunda ısı transferi katsayısını birim metrekaresindeki kütleli debiye ($50-200 \text{ kg/m}^2\text{s}$) ve ısı akısına ($4.52-13.57 \text{ kW/m}^2$) bağlı olarak bir korelasyon denklemi ile ifade etmişlerdir.

Yukarıdaki literatür taraması gözenekli katı malzemeler ile hava arasındaki hacimsel ısı taşınım katsayısının tayinine yönelik çalışmaların sınırlı sayıda olduğunu ve literatürde gözenekli grafit malzeme ile hava arasındaki hacimsel ısı taşınım katsayısının tayininde kullanılabilecek herhangi bir bağıntının olmadığını ortaya koymaktadır. Literatürde gözenekli grafit malzeme ile hava arasındaki hacimsel ısı taşınım katsayısının tayininde

kullanılabilecek bir bağıntının olmaması bu alanda yapılan teorik çalışmaların çoğunlukla tek enerji denklemine dayalı olmasına veya yapılan çalışmalarda farklı çiftler için önerilen bağıntıların kullanılmasına yol açmaktadır. Sonuç olarak bu çalışmalar neticesinde elde edilen çıktıların (deneysel veriler ile doğrulanmadıkları sürece) geçerlilikleri ciddi bir şekilde sorgulanmaktadır. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında literatürdeki bahse konu boşluğu doldurmak adına modifiye (akışa paralel 2 mm çapında şaşırtılmış dizilime sahip delikler) gözenekli grafit malzeme ile aracı akışkan hava arasındaki hacimsel ısı taşınım katsayısı, boyutsuz Reynolds sayısı ($Re=1000-10000$) ve malzeme uzunluğu/yüksekliği ($L/H = 0.69-5.07$) oranının fonksiyonu olarak zamana bağlı tek akım yöntemi (transient single-blow technique) vasıtasıyla elde edilmesi hedeflenmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

İki enerji denklemine dayalı teorik modelde fazlar arasında taşınım ile gerçekleşen ısı transferini hesaba katmak için fazlar arasındaki ortalama hacimsel ısı taşınım katsayısının (h_v , W/m^3K) bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, zamana bağlı tek akım yöntemi (transient single blow technique) vasıtasıyla POCO firması tarafından üretilen gözenekli grafit malzeme (POCOFoam) ile hava arasındaki hacimsel ısı taşınım katsayısının tayininde kullanılacak aşağıdaki formda ampirik bir korelasyon denklemi elde edilmesi hedeflenmiştir.

$$Nu_{fs} = aRe^b(L/H)^c \quad (3.1)$$

Nu_{fs} ve Re sırasıyla malzemenin akış yönündeki uzunluğuna bağlı olarak ifade edilmiş Nusselt ve Reynolds sayılarıdır. L/H ise malzeme uzunluğunun yüksekliğine oranını ifade etmektedir.

Çalışmada kullanılmış olan gözenekli grafit malzemenin termal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de görseli ise Şekil 3.1’de verilmiştir. Farklı gözeneklilik değerine sahip grafit malzemenin ticari olarak ulaşılabilir olmaması bu çalışmanın tek bir gözenek çapı değeri ile yapılmasına sebebiyet vermiştir.

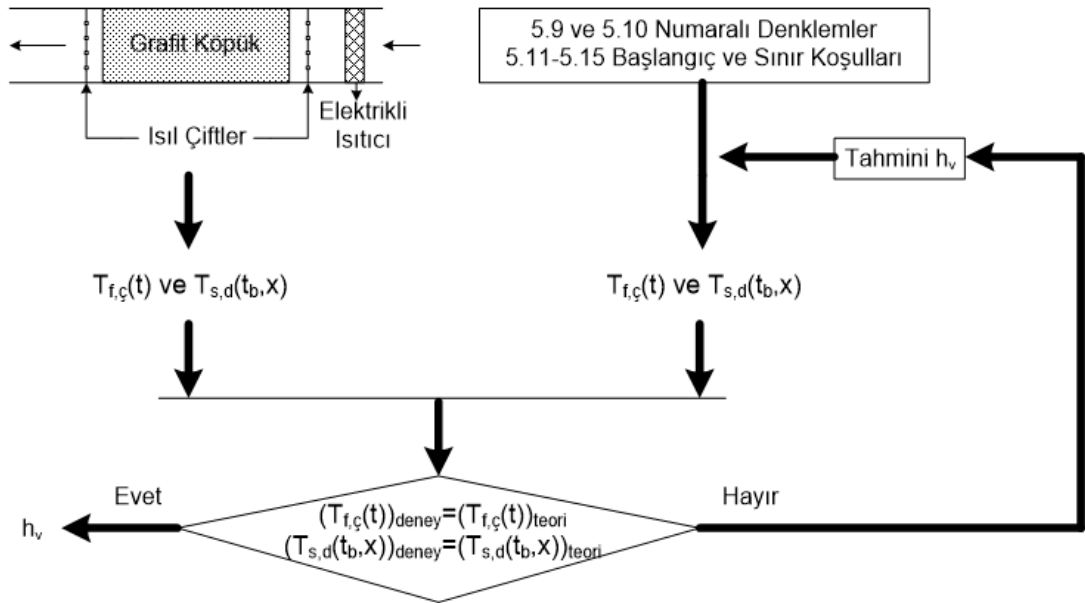
Çizelge 3.1. Gözenekli grafit malzemenin termal ve fiziksel özellikleri (POCO 2015)

	k_{se} (W/mK)	C_p (J/gK)	ρ (g/cm ³)	α (cm ² /s)	d_p (mm)	ε (%)
POCO	135	0.7	0.55	3.59	0.4	75



Şekil 3.1. POCO firması tarafından üretilen gözenekli grafit malzeme

Zamana bağlı tek akım yöntemi hem deneysel hem de teorik çalışma içermektedir. Deneysel çalışmanın ardından elde edilen veriler çerçevesinde teorik çalışma yürütülmektedir. Yöntemin aşamaları aşağıda hem başlıklar halinde hem de Şekil 3.2’de verilen akış diyagramı ile gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Zamana bağlı tek akım yöntemine ait akış diyagramı (Hwang *et al.* 2002)

3.1. Zamana Bağlı Tek Akım Yönteminin Aşamaları

Zamana bağlı tek akım yöntemi yukarıda da bahsedildiği gibi hem deneysel hem de teorik çalışma içermektedir. Bu çalışma kapsamında aşağıdaki başlıklarda nasıl bir yol izleneceği hakkında kısa bilgiler verilmiştir.

3.1.1. Deneysel çalışma

Deneysel çalışmanın yürütüleceği düzeneğin şematik gösterimi ve düzeneğe ait bir fotoğraf sırasıyla Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de verilmiştir. Deney düzeneğinin test bölümü olarak adlandırılan bölgesinde teflon kanal içerisine yerleştirilmiş modifiye gözenekli blok grafit malzeme bulunmaktadır. Deneysel çalışmanın başlangıcında gözenekli malzeme ve hava ortam sıcaklığında bulunmaktadır. Sonrasında kanal girişinde bulunan radyal fan vasıtasıyla dış ortam koşullarında ve U_i ortalama hızında temin edilen hava, elektrikli ısıtıcı ile ısıtıldıktan sonra dağıtıcı-karıştırıcı ile temasa getirilip $T_i(t)$ ortalama sıcaklığında test bölümü içerisine yerleştirilen gözenekli grafit malzeme içerisinden geçirilerek dış ortama atılır. Bu ısıtma işlemi gözenekli malzeme girişinde ortalama hava sıcaklığının zamanla değişmediği bir T_{son} sıcaklığına dek sürer. Gözenekli malzemenin sıcak hava ile ısıtılması esnasında havanın test bölümü giriş ve çıkışındaki ortalama sıcaklıkları zamana bağlı olarak kaydedilir. Aynı zamanda gözenekli grafit malzemenin sıcaklığı akış yönünde belirli mesafelerde zamana bağlı olarak okunup kayıt altına alınır. Her iki faz içinde sıcaklıkların nasıl okunacağı ile ilgili detaylı bilgiler sonraki bölümlerde verilmiştir.

3.1.2. Teorik çalışma

Ortalama hacimsel ısı taşınım katsayısının (h_v) tahmin edilen bir değeri için;

- Test bölümünde kullanılan gözenekli grafit malzemenin geometrik özellikleri,
- Havanın ve grafit malzemenin termo-fiziksel özellikleri

- Deneysel çalışma neticesinde test bölümü girişinde zaman bağılı olarak elde edilen havanın ortalama sıcaklık değeri ile hızı

kullanılmak suretiyle iki enerji denkleminde dayalı matematiksel model deneyden elde edilen sınır koşullarının yardımı ile çözülerek grafit köpük malzeme (θ_s) ile havanın (θ_f) boyutsuz sıcaklık değerleri zamana bağılı olarak hesaplama bölgesi içerisinde elde edilir.

Teorik çalışma neticesinde ortalama hacimsel ısı taşınım katsayısının tahmin edilen bir değeri için test bölümü çıkışında havanın zamana bağılı olarak elde edilen sıcaklık değeri ile yine zamana bağılı olarak katı malzemenin giriş, orta nokta ve çıkıştaki sıcaklık değerleri deney verileriyle karşılaştırmak suretiyle hata hesaplaması yapılır. Aşağıdaki denklem ile ifade edilen hata, deneysel ve teorik modelden elde edilen sonuçlar arasındaki farkların karelerinin toplamı olmaktadır. Zamana bağılı olarak dört farklı noktada hesaplanan hata değerleri toplanmak suretiyle ortalama hacimsel ısı taşınım katsayısının tahmin edilen bir değeri için tek bir hata değeri elde edilir. Sonuç olarak, yukarıdaki prosedür çerçevesinde farklı h_v veya Nu_{fs} değerleri için program çalıştırılmak suretiyle hata hesaplaması yaptırılır ve h_v ile hata arasındaki ilişki eğri uydurma yöntemi ile bir fonksiyon şeklinde ifade edilir. Bu fonksiyonun hataya göre türevinin (eğim) 0,005'den küçük olduğu hata değerine karşılık gelen h_v değeri bahse konu örnek ve Reynolds değeri için tayin edilmiş ortalama hacimsel ısı taşınım katsayısı değeri olur.

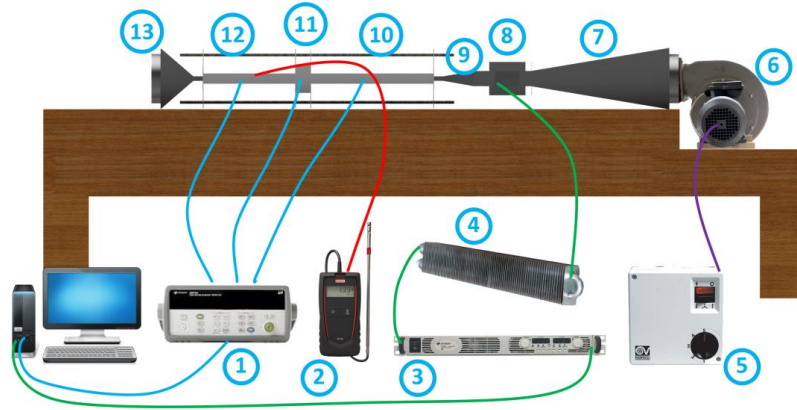
$$Hata = \sum_{i=1}^n \left[(T_{deney,h\check{c}} - T_{model,h\check{c}})^2 + (T_{deney,s2} - T_{model,s2})^2 + (T_{deney,s5} - T_{model,s5})^2 + (T_{deney,s8} - T_{model,s8})^2 \right] \quad (3.2)$$

3.2. Deneysel Çalışma

İki faz arasındaki ortalama hacimsel ısı taşınım katsayısının tayininde kullanılacak deney düzeneğinin şematik gösterimi ve düzeneğe ait bir fotoğraf sırasıyla Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de verilmiştir. Deney düzeneğini oluşturan başlıca elemanlar;

1. Data Logger (Veri Toplayıcı)
2. Anemometre (Hız Ölçüm Cihazı)
3. Power Supply (Güç Kaynağı)
4. Yaprak Rezistans (Hava Isıtıcı)
5. Fan Hız Kontrol Cihazı
6. Radyal Fan
7. Fan Kanal Arası Bağlantı
8. Yaprak Rezistansın Bulunduğu Kanal
9. Kanal Kesit Alanı Düşürücü
10. Teflon Kanal (Test Bölümü Girişi)
11. Test Bölümü
12. Teflon Kanal (Test Bölümü Çıkışı)
13. Kanal Kesit Alanı Yükseltici

olup her bir elemanın deney düzeneğindeki kullanım amacı, boyutları ve hangi malzemeden ne şekilde imal edildiği aşağıda detaylı bir şekilde verilmiştir.



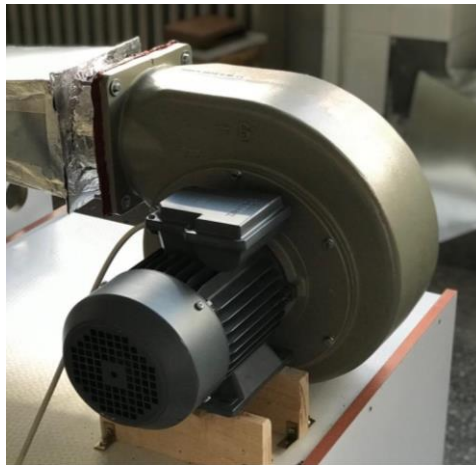
Şekil 3.3. Deney düzeneğinin şematik gösterimi



Şekil 3.4. Deney düzeneğine ait bir fotoğraf

3.2.1. Fan

Kanal içerisindeki hava akışı, debisi $4650 \text{ m}^3/\text{saat}$ ve gücü 2200 W olan Bahçivan BDS 6-M marka bir fan vasıtasıyla sağlanmıştır. Fanın devir sayısı dolayısıyla akışkanın hızı fan hız kontrol cihazı ile kontrol edilmiştir. Fan zemine sabitlenmiş olup fanın çalışmasıyla beraber oluşacak titreşimi asgari seviyede tutmak için lastik pabuçlar kullanılmıştır. Fana ait bir görsel ve fanın özellikleri sırası ile Şekil 3.5’de ve Çizelge 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.5. Fana ait bir fotoğraf

Çizelge 3.2. Radyan fanın özellikleri (Bvnair 2019)

Voltaj (V)	230
Frekans (Hz)	50
Güç (W)	2200
Devir (d/d)	2800
Debi (m ³ /h)	4650
Ses Seviyesi (dB(A))	55
Ağırlık (kg)	31

3.2.2. Fan ile ısıtıcı arasındaki bağlantı aparatı

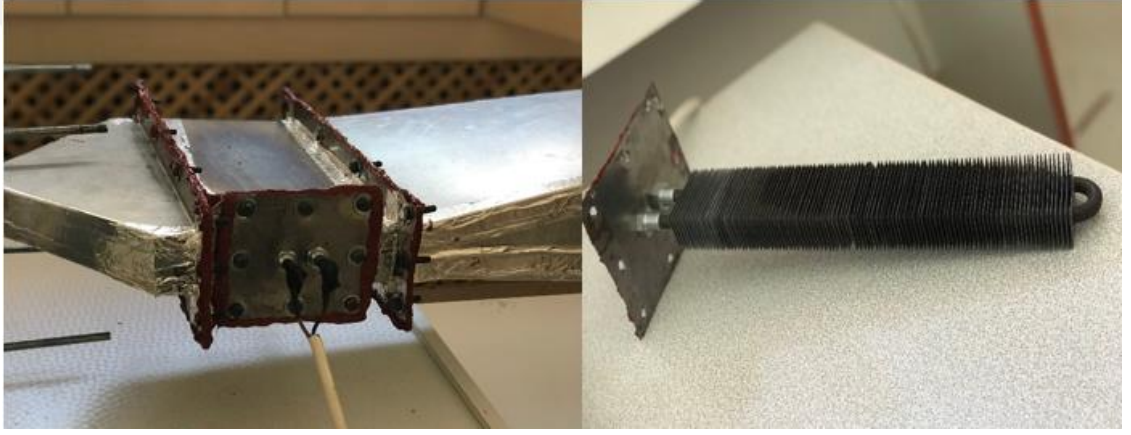
Fan ile ısıtıcı bağlantı aparatı, fan ile ısıtıcı arasındaki bağlantıyı sağlamak amacıyla 1 mm kalınlığında sac malzemeden punta kaynağı vasıtasıyla imal edilen parçadır. Bahse konu bu parçanın bir ucu dairesel ve fan çıkışının çapında diğer ucu ise dikdörtgen geometriye sahiptir. Fan ile ısıtıcı bağlantı aparatı ait bir görsel Şekil 3.6'da verilmiştir.

**Şekil 3.6.** Fan ile ısıtıcı bağlantı aparatına ait bir fotoğraf

3.2.3. Elektrikli ısıtıcı ve ısıtıcının içine yerleştirildiği kanal aparatı

Deney başlangıcında gözenekli grafit malzeme ile gözenekler içerisinde mevcut hava ortam sıcaklığında bulunmaktadır. Daha sonra fan tarafından temin edilen dış ortam

havası güç kaynağı vasıtasıyla sabit bir güç değerinde çalıştırılan elektrikli ısıtıcı üzerinden geçirilerek ısıtılır. Böylece zamana bağlı tek akım yönteminin gereği olarak grafit malzeme girişinde hava sıcaklığı zamanla değişir ve kısa bir süre sonra ısıtıcının ayarlanan gücüne ve hava debisine bağlı olarak sabit bir değere ulaşır. Böylece havanın ısıtılması ile kanal girişindeki koşul değiştirilerek zamana bağlı bir problem yaratılmış olur. Isıtıcı 1 kW gücünde olup 1 mm kalınlığında sac malzemeden imal edilmiş 300x160x50 mm boyutlarında bir kanal içerisine yerleştirilmiştir. Isıtıcı ve ısıtıcının içine yerleştirildiği kanalın fotoğrafı Şekil 3.6'da verilmiştir.



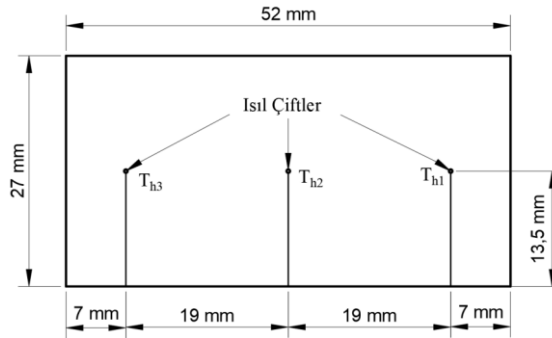
Şekil 3.6. Isıtıcı ve ısıtıcının içine yerleştirildiği kanala ait bir fotoğraf

3.2.4. Kanal kesit alanı düşürücü

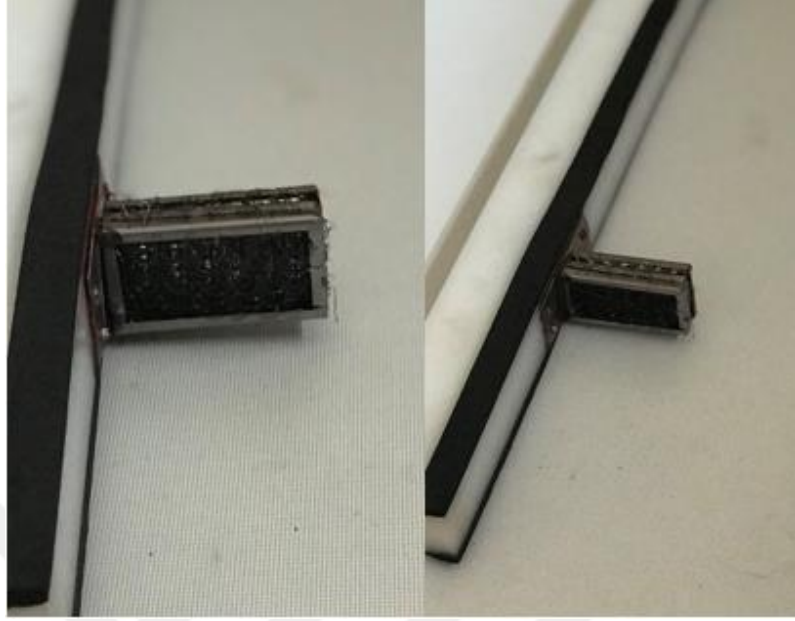
Isıtıcı çıkışında havayı kesit alanı $W \times H$ (numune genişliği x yüksekliği) olan teflon kanala yönlendirmek için kullanılmıştır. Kanal içerisine yerleştirilen grafit numunelerin üç farklı yüksekliğe sahip olmaları nedeniyle ısıtıcı tarafındaki kesit alanı değişmeyen ancak teflon kanal tarafındaki kesit alanı yükseklik ile değişen üç farklı düşürücü imal edilmiştir. Düşürücü punta kaynağı vasıtasıyla 1 mm kalınlığa sahip sac malzemeden imal edilmiştir.

3.2.5. Teflon kanal (test bölümü girişi)

Test bölümü girişinde havanın düzgün dağılılı hız ve sıcaklık profiline sahip olması için kullanılmıştır. Teflon kanal parçalı olarak (yan yüzeyler, alt ve üst yüzey) üretilmiş olup sonrasında cıvata somun bağlantısı ile birleştirilmiştir. Üç farklı numune yüksekliği ile çalışıldığından dolayı kanal alt ve üst yüzeyleri aynı kalmak koşulu ile üç farklı yüksekliğe sahip kanal yan duvarı imal edilmiştir. Kanal uzunluğu 40 cm olup yan duvarlar 4 cm, alt ve üst yüzeyler ise 1 cm kalınlığında teflon malzemeden üretilmiştir. Kanal çıkışında (test bölümü girişi) kanal üst yüzeyine açılan deliklerden geçirilen ısı çiftleri vasıtasıyla kanal genişliği boyunca üç farklı noktada hava sıcaklığı okumak suretiyle ortalama sıcaklık elde edilmiştir. Şekil 3.7'de ısı çiftlerinin yerleri 27 mm yüksekliğinde kanal için verilmiş olup farklı yüksekliklere sahip malzeme numuneleri için ısı çiftlerinin yerleştirilmesi benzer şekilde yapılmıştır. Isıl çiftlerin geçirildiği delikler hava sızıntısına karşı ısıya dayanıklı silikon ile doldurulmuştur. Kanal çıkışında havanın ortalama sıcaklığını okumadan önce kanal yan duvarına monte edilen ve Şekil 3.8'de görseli verilen dağıtıcı-karıştırıcı vasıtasıyla kanal içerisinde üniform hız ve sıcaklık dağılımı elde edilmeye çalışılmıştır.



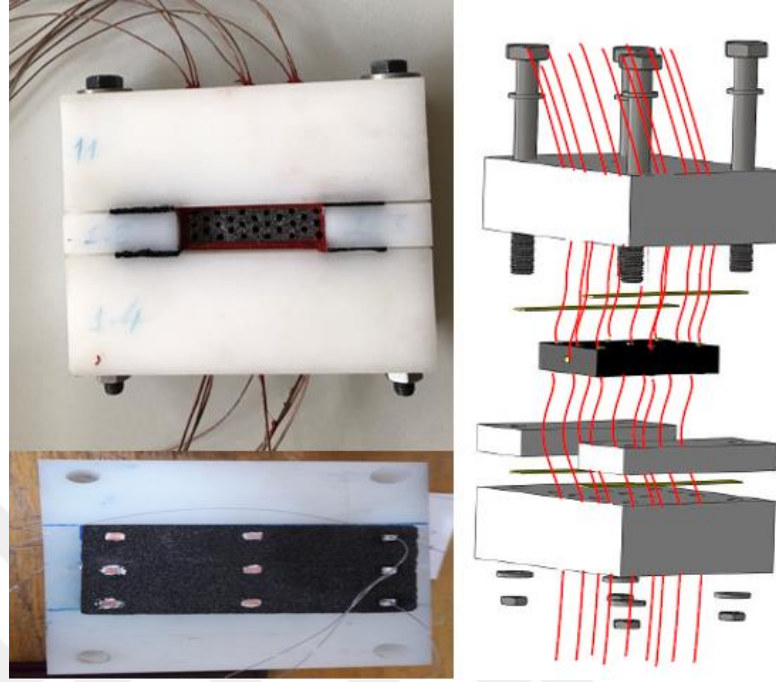
Şekil 3.7. Test bölümü girişinde ve çıkışında ortalama hava sıcaklığını ölçmek için kullanılan ısı çiftlerinin yerleri



Şekil 3.8. Dağıtıcı-karıştırıcıya ait görsel

3.2.6. Test bölümü

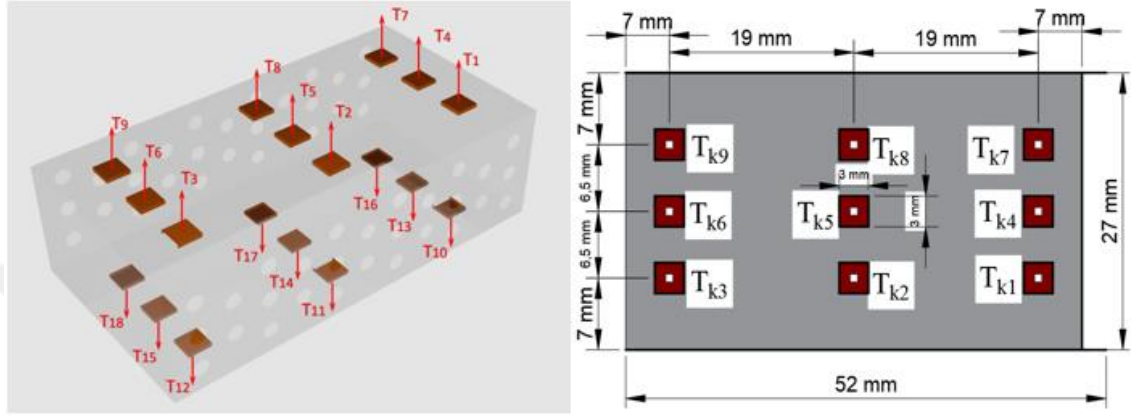
Çalışmada kullanılacak her bir gözenekli grafit malzeme için 9 farklı test bölümü imal edilmiştir. Test bölümü kalınlığı 4 cm olan teflon malzemeden parçalı olarak üretilmiş olup sonrasında cıvata somun bağlantısı ile birleştirilmiştir. Test bölümü imalatında düşük ısı iletkenlik değerine sahip olması (izolasyon amacıyla) ve kolay işlenebilmesi nedeniyle teflon malzeme tercih edilmiştir. Şekil 3.9’da 52x15x27 mm boyutlarında olan numune için üretilmiş test bölümünün şematik görünüşü ve fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 3.9. Test bölümünün şematik gösterimi ve görseli

Test bölümünün alt ve üst duvarlarına ısı çiftlerinin dışarı alınması için grafit malzeme yüzeyinde bulunan bakır levhalardan dolayı önce 8 mm çapında ve 3 mm derinliğinde sonrasında ise boylu boyunca 2 mm çapında delikler açılmış böylece gözenekli grafit malzemenin yüzeylere tam olarak oturması sağlanmıştır. Isıl çiftler ile delikler arasındaki boşluklar dışarıdan ısıya dayanıklı kırmızı silikon ile doldurulmuştur. Aynı zamanda cıvata somun bağlantısı yapılan yüzeylerin arasına sızdırmazlığı sağlamak amacıyla ısıya dayanıklı bant yapıştırılmıştır. Akış yönünde grafit malzemenin zamana bağlı sıcaklık değişimini ölçmek için boyutları $3 \times 3 \text{ mm}^2$ olan ve her birinin merkezinde ısı çifti bulunan 3 adet bakır levha grafit malzemenin alt yüzeyine ısı iletim katsayısı yüksek termal macun ile yapıştırılmış olup ilgili görsel Şekil 3.10'da verilmiştir. Yüksek ısı iletkenliğe sahip termal macun ile yapıştırılmadığı amaç bakır levha ile grafit malzeme arasındaki ısı temas direncini düşürmektir. Sayısal çözümleme de test bölümünün iyi bir şekilde yalıtılmış olduğu varsayımı ile katı ve gaz fazına ait sıcaklıkların sadece akış yönünde değiştiği zamana bağlı bir boyutlu model kullanılmıştır. Bu nedenle, modelin geçerliliğini deneysel olarak kanıtlamak maksadıyla alt yüzeyde yan duvarlar ile arasında 7 mm mesafe olan akış doğrultusunda bir hat boyunca üzerinde ısı çifti bulunan toplam 6 adet bakır levha (3 adette merkezde olup toplam 9 adet) yapıştırılmış olup benzer bir uygulama üzerinde ısı

çift bulunan 9 adet bakır levha ile üst yüzey içinde yapılmıştır. Ayrıca sayısal çözümleme de kullanılmak üzere katı faza ait giriş ve çıkış sınır koşulları girişte ve çıkışta malzeme merkezine yerleştirilen birer adet ısı çift vasıtasıyla okunmuştur.



Şekil 3.10. Isıl çiftlerin grafit örnek üzerindeki yerleri

Test bölümüne yerleştirilecek gözenekli grafit malzeme numunelerinin boyutları aşağıda Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Numunelerin boyutları

	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)	Uzunluk (mm)	L/H	Delik Çapı (mm)	Delik Sayısı	ε (%)
1.Örnek	52	15	27	1.8	2	28	0,113
2.Örnek	52	15	52	3.47	2	28	0,113
3.Örnek	52	15	76	5.07	2	28	0,113
4.Örnek	52	27	27	1	2	50	0,113
5.Örnek	52	27	52	1.93	2	50	0,113
6.Örnek	52	27	76	2.81	2	50	0,113
7.Örnek	52	39	27	0.69	2	72	0,113
8.Örnek	52	39	52	1.33	2	72	0,113
9.Örnek	52	39	76	1.95	2	72	0,113

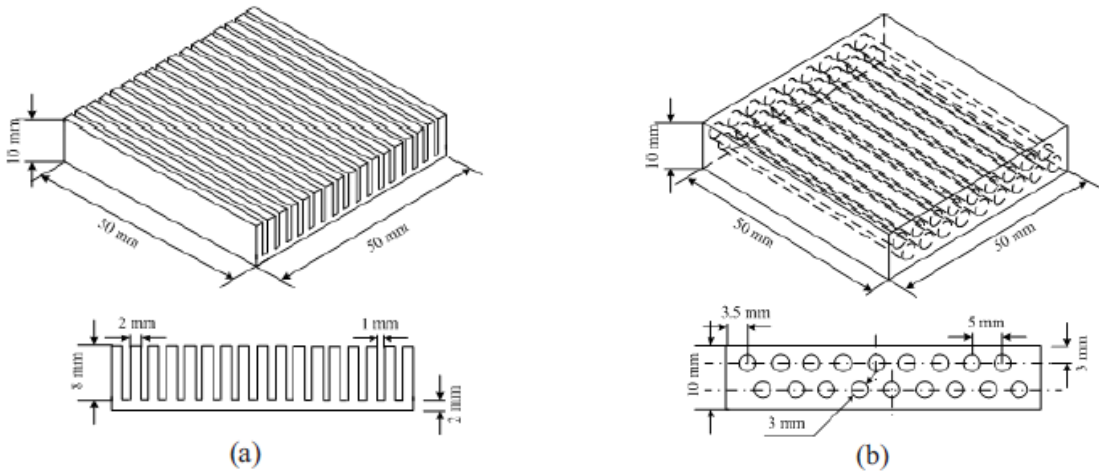
Kanalda istenilen hava akımı grafit köpük malzemenin blok olarak kullanımı ile elde edilememiştir. Bunun üzerine literatürde gözenekli grafit malzeme ile ilgili yapılan çalışmalar incelemiştir. Leong *et al.* (2010) tarafından yapılan bir çalışmada, gözenek çaplarının mikro boyutta olması ve dış ortam havasında bulunan partiküllerin gözenekleri tıkanması nedeniyle malzeme üzerinde ciddi basınç düşümünün olduğu ifade edilmiş olup söz konusu basınç düşümünü yenmek amacıyla deney düzeneğinde fan yerine kompresör sisteminin kullanıldığı görülmüştür. Garrity *et al.* (2010) tarafından yapılan bir çalışmada, üç adet farklı gözenek büyüklüğünde modifiye karbon köpük tabanlı ısı değiştiricisinin termal performansının deneysel olarak çalışıldığı görülmüştür. Bu çalışmada, yazarlar tarafından gözenek çapının çok küçük olması ve yüksek basınç düşümünden dolayı grafit köpük malzemeler akış yönünde 3,2 mm çapında silindirik kanallar açılmak suretiyle modifiye edilmiş ve bunun grafit köpüğün mühendislik uygulamalarında kullanımı için bir gereklilik olduğu vurgulanmıştır. Diğer taraftan bu çalışmada konveksiyonla ısı transferinin büyük oranda silindirik kanallarda akan hava tarafından gerçekleştirildiği varsayılmıştır. Malzeme gözenekliliği silindirik kanallara göre tanımlanmış olup silindirik kanalların açıldığı grafit malzeme radyasyon, doğal taşınım ve termal dispersiyon etkilerinin göz ardı edildiği homojen gözenekli ortam olarak modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Kanal çapının gözenek çapına oranının çok büyük olması nedeniyle grafit köpükler arasında basınç düşümü bakımından kayda değer bir değişimin söz konusu olmadığı,
- Akış kanallarının sayısı ve büyüklüğünün optimum bir performansa yol açmayacağı,
- Basınç düşümünün grafit ve alüminyum örnekler için Darcy-Forcheimer denklemi ile ifade edilerek geçirgenlik K ve atalet katsayısı C_F in elde edildiği,
- Boyutsuz hız profilinin akış kesiti boyunca uniform ve sınırlarda no-slip sınır koşulundan dolayı sıfır olduğu ve gözenekli ortamın akışı homojenize ettiği,
- Sürekli rejimde alt duvarı sabit ısı akısına maruz kalan, üst duvarı ise yalıtılmış bir kanal içerisine yerleştirilen grafit örneklere ait Nu sayısı Re ve D/d_p oranının fonksiyonu olarak ortaya konmuştur. Söz konusu grafit köpüklere ait görsel Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Yukarıdan aşağıya ortalama gözenek çapları 600 μm , 650 μm , 500 μm (Garrity *et al.* 2010)

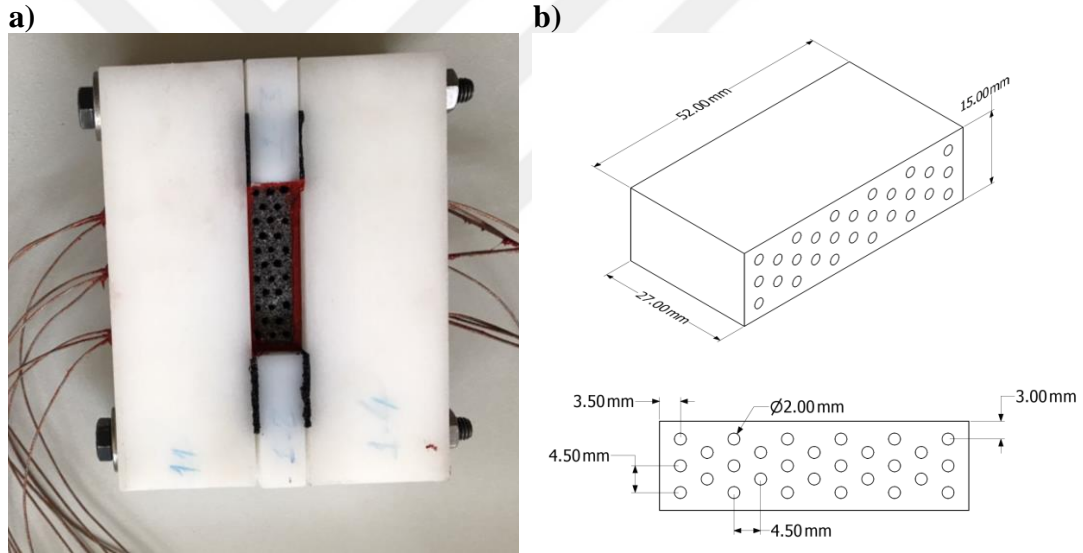
Benzer şekilde Leong ve Jin (2008) yüksek ısı iletim katsayısına sahip grafit köpüğün termal kontrol uygulamalarında kullanımı başlıklı çalışmalarında, POCO grafit köpük için basınç düşümünün 5429 Pa/cm olduğu ve kullanım sırasında söz konusu basınç düşümünün dikkate alınması gerektiği ifade edilmiştir. Bu nedenle çalışmada malzeme üzerinde oluşan basınç düşümünü azaltmak amacıyla kanatçıklı ve kanallı ısı kuyusu tasarımları kullanılmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. a) Kanatçıklı ve b) Kanallı grafit köpük ısı kuyusu tasarımları (Leong and Jin 2008)

Diğer taraftan grafit malzeme üzerinde akış yönünde silindirik kanallar açıldığı durumda malzeme gözenekliliğinin açılan silindirik kanallara göre tanımlanmasıyla malzemenin

homojen gözenekli ortam olarak modellenebileceği literatürde bir çok araştırmacı tarafından ortaya konulmuştur (Kim *et al.* 2000; Chen 2007; Garrity *et al.* 2010). Dolayısıyla her iki faz için tanımlanan enerji denklemleri grafit malzeme üzerinde akış yönünde açılan silindirik kanallarla birlikte değişime uğramadan geçerliliğini koruyacaktır. Ancak malzemenin ısı ve termal özellikleri silindirik kanallara göre tanımlanan gözeneklilik değeri ile hesaba katılmıştır. Ayrıca grafit malzeme içerisindeki gözenekler üzerinden akışın olmadığı varsayılmıştır. Aşağıda Şekil 3.13’de üzerinde 2 mm çapında silindirik kanalların açıldığı 15x52x27 mm boyutlarında grafit numunenin görseli ile akış yönüne dik malzeme yüzeyinde açılan silindirik kanalların yerleri verilmiştir.

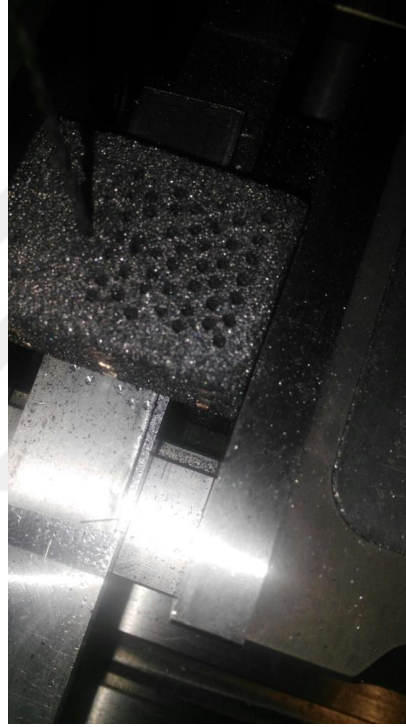


Şekil 3.13. a) Modifiye grafit örneğin görseli b) ile silindirik kanalların yerleri

Malzeme üzerindeki kanallar CNC makinasında açılmış olup delici uç boyunun çapın küçülmesi ile birlikte kısılması veya uzun olması durumunda salınım yapması ve malzemeye temas ile birlikte eğilmesi gibi nedenlerden dolayı minimum delik çapı 2 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 3.14). Ayrıca malzemenin yeterince mukavim olmaması nedeniyle kanallar açılır iken malzemeye zarar vermemek adına kanal merkezleri arasındaki mesafe z ve y yönünde 4,5 mm olarak tutulmuştur. Bütün örnekler için akış yönüne dik malzeme yüzeyinde Şekil 3.13’de verilen düzende 2 mm çapında kanallar açılmış olup söz konusu düzende bütün numuneler için gözeneklilik değeri aşağıda

verilen denklem vasıtasıyla 0,113 olarak hesaplanmıştır. Bu denklemde W ve H sırasıyla örnek genişliği ve yüksekliğini, A_p delik yüzey alanını, N ise yüzeydeki deliklerin sayısını ifade etmektedir.

$$\varepsilon = \frac{A_p * N}{W * H} \quad (3.3)$$



Şekil 3.14. CNC tezgahında numunenin işlenmesi

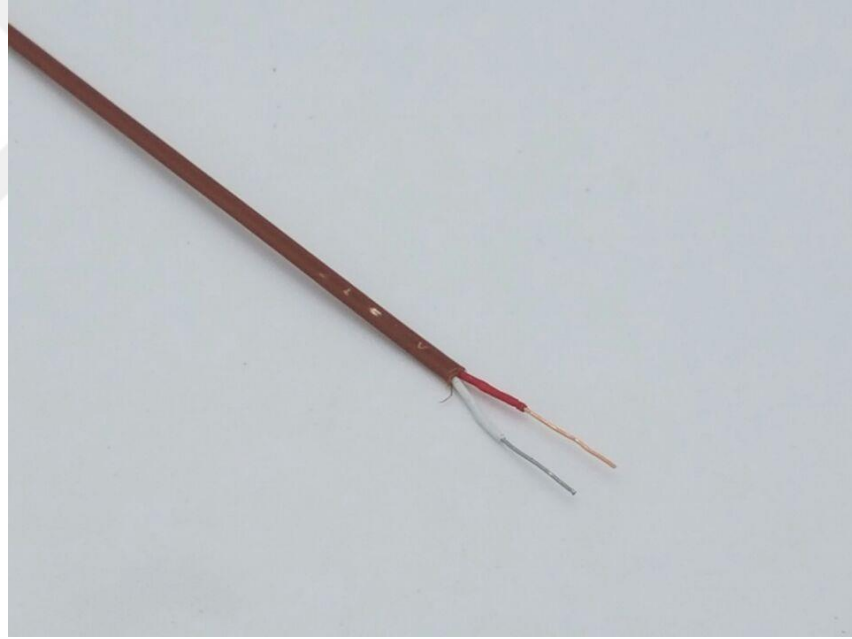
3.2.7. Teflon kanal (test bölümü çıkışı)

Test bölümü çıkışında hava hızını ve ortalama sıcaklığını ölçme amacıyla kullanılmıştır. Kanal uzunluğu 30 cm olup yan duvar ile alt ve üst yüzeylerde kullanılan teflon malzeme kalınlıkları test bölümü girişinde kullanılan kanal ile aynıdır. Benzer şekilde test bölümü girişinde kullanılan kanal gibi yan duvarları üç farklı boyutta ve aynı şekilde imal edilmişlerdir. Kanalda akmakta olan havanın hızını okumak için kanal girişinden (test bölümü çıkışı) yaklaşık 1 cm ileride yan duvara sıcak tel anemometresinin probunun girebilmesi için 10 mm çapında delik açılmıştır. Ayrıca kanal üst duvarına

açılan deliklerden geçirilen ısıtıcı çiftler vasıtasıyla test bölümü çıkışında kanal genişliği boyunca üç farklı noktada hava sıcaklığı okumak suretiyle ortalama sıcaklık elde edilmiştir.









3.2.8 Ölçüm cihazları

Isıtıcı çiftler: Grafit malzeme üst ve alt yüzey sıcaklıkları ile test bölümü giriş ve çıkışında hava sıcaklıklarını ölçmek için kablo çapı 1 mm olan kullanılmıştır. Kullanılan ısıtıcı çiftlerin görseli Şekil 3.15’de verilmiştir. Isıtıcı çiftlerin bağlantı şekilleri Çizelge 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.15. Isıtıcı çift

Çizelge 3.4. Isıl çift tiplerine göre bağlantı şekilleri (Termopar 2019)

TİP	İLETKEN CİNSİ		RENK KODLARI		KABLO ORTAM ÇALIŞMA SICAKLIĞI
	(+)	(-)	ULUSLARAR ASI IEC-584-3	ALMAN DIN 43714	
K	Nikel Krom veya Kromel	Nikel veya Alümel			-25°C TO +200°C
	Demir	Constantan veya Bakır Nikel W			0°C TO +150°C
	Bakır	Constantan veya Bakır Nikel V			0°C TO +100°C
T	Bakır	Constantan veya Bakır Nikel T			-25°C TO +100°C
J	Demir	Constantan veya Bakır Nikel J			-25°C TO +200°C

Veri toplama cihazı: Deney düzeneğinin kusursuz bir şekilde çalışmasıyla beraber grafit malzeme üst ve alt yüzey sıcaklıkları ile test bölümü giriş ve çıkışında hava sıcaklıklarını ölçmek ve elde edilen verileri kendi yazılımı vasıtasıyla kayıt altına almak amacıyla Keysight 34972A veri toplama cihazı 20 kanal kapasiteli 2 adet Keysight 34901A şalter kart ile beraber kullanılmıştır. Isıl çiftlerin *mV* çıkış değerleri veri toplama cihazının yazılımı yardımıyla °C olarak okunup kayıt altına alınmıştır. Veri toplama cihazı Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16. Veri toplama cihazı

Şekil 3.16’de görülen veri toplama cihazının arkasında bulunan 20 kanal kapasiteli Keysight 34901A şarter kartına (Şekil 3.17) ısı çiftleri bağlanmıştır. Bu sayede gerekli yerlerden sıcaklıklar ölçülerek zamana bağlı olarak kayıt altına alınmıştır. Hangi kanal hangi noktanın sıcaklığını temsil ettiğini anlayabilmek için aşağıda Şekil 3.18a’deki gibi bir yol izlenmiştir. Daha sonra veri kayıt cihazından alınan veriler düzenlenerek Şekil 3.18b’deki gibi formata getirilmiştir. En son düzenlenen veriler sayısal çalışmada kullanılmıştır.



Şekil 3.17. 20 kanal kapasiteli Keysight 34901A şarter kart

a)

PÇ1 (112)		
Ü9 (111)	Ü8 (110)	Ü7 (108)
Ü6 (107)	Ü5 (106)	Ü4 (105)
Ü3 (104)	Ü2 (103)	Ü1 (102)
PG1 (101)		

A9 (201)	A8 (120)	A7 (119)
A6 (118)	A5 (117)	A4 (116)
A3 (115)	A2 (114)	A1 (113)

G3 (202)	G2 (203)	G1 (201)
----------	----------	----------

Ç3 (204)	Ç2 (206)	Ç1 (205)
----------	----------	----------



AKIŞ

b)

Scan	Time	Kanal Giriş			Kanal Giriş Ortalama	Köpük Üst Giriş			Köpük Üst Orta			Köpük Üst Çıkış		
		G1	G2	G3		Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü6	Ü7	Ü8	Ü9
		201 (C)	203 (C)	202 (C)		101 (C)	102 (C)	103 (C)	104 (C)	105 (C)	106 (C)	107 (C)	108 (C)	110 (C)
1	19 Eyl 2017 14:06:07:431													
2	19 Eyl 2017 14:06:37:415													
3	19 Eyl 2017 14:07:07:415													
4	19 Eyl 2017 14:07:37:415													
5	19 Eyl 2017 14:08:07:415													
6	19 Eyl 2017 14:08:37:415													
7	19 Eyl 2017 14:09:07:415													
8	19 Eyl 2017 14:09:37:415													
9	19 Eyl 2017 14:10:07:415													
10	19 Eyl 2017 14:10:37:415													
11	19 Eyl 2017 14:11:07:415													
12	19 Eyl 2017 14:11:37:415													

Şekil 3.18. a) Isıl çiftlerin veri kayıt cihazındaki yerleri b) Elde edilen verilerin düzenlenmiş hali

Şekil 3.18a'da gösterildiği gibi ısıl çiftler veri kayıt cihazında kanallara yerleştirilmektedir. Burada A indisi numunenin altını, Ü indisi numunenin üstünü, G indisi havanın girişini, Ç indisi havanın çıkışını, PG indisi numunenin hava giriş yüzeyini ve PÇ indisi numunenin hava çıkış yüzeyini temsil etmektedir. Parantez içerisindeki numaralar Keysight 34901A şarjer kartının kanal isimlerini ifade etmektedir. Örneğin Ü5 numaralı (numunenin üst yüzeyinde ortada) ısıl çift kartın 106 numaralı kanalına

bağlanmıştır. 106 numaralı kanal veri kayıt cihazının 1. kartının 6. kanalını ifade etmektedir.

Güç kaynağı (power supply): Test bölümü girişindeki havanın sıcaklığını farklı *Re* sayılarında sabit bir değere ayarlayabilmek diğer bir ifade ile ısıtıcının gücünü kontrol edebilmek için 1500 W Keysight N5770A güç kaynağı kullanılmıştır (Şekil 3.19). Güç kaynağına ait özellikler Çizelge 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.19. Güç kaynağı (power supply)

Çizelge 3.5. Güç kaynağı özellikleri (Keysight 2019)

DC çıkış değeri (maximum)	Voltaj (V)	150
	Amper (A)	10
	Güç (W)	1500
Çıkış cevap süresi	Yükleme (sn)	0.15
	Kapatma (sn)	2

Güç kaynağı vasıtasıyla yaprak rezistansın gücü her bir Reynolds sayısı ve malzeme uzunluğuna göre ayarlanmıştır. Bunun temel amacı her deneyin aynı sıcaklık aralığında

gerçekleşmesidir. Çizelge 3.6'da deneyde kullanılan bir numune için her Reynolds değerine karşılık yaprak rezistansın gücü verilmiştir.

Çizelge 3.6. 2 numaralı numune için her bir Reynolds değerine karşılık ısıtıcı gücü

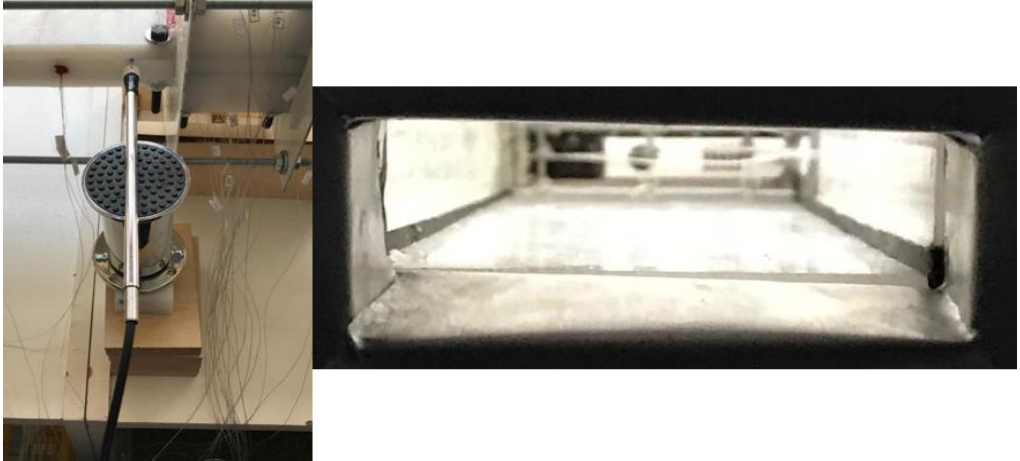
Reynolds Sayısı	Voltaj (V)	Amper (A)	Güç (W)
1000	157,2	5,24	162,44
2000	142,5	4,76	147,26
3000	141,0	4,72	145,72
4000	110,0	3,68	113,68
5000	101,6	3,40	105,00
6000	85,3	2,87	88,17
7000	78,1	2,64	80,74
8000	70,8	2,39	73,19
9000	65,6	2,21	67,81
10000	60,3	2,04	62,34

Hız ölçüm cihazı: Kanalda akmakta olan havanın hızını dolayısıyla Reynolds sayısını belirleyebilmek için Kimo VT 50 markalı anemometre kullanılmıştır (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. Anemometre (Hız ölçüm cihazı)

Şekil 3.20’da gösterilen anemometrenin probu test bölümünün çıkışından 1 cm uzaklığa kanal duvarına 10 mm çapında (Prob girecek şekilde) delik açılarak yerleştirilmiştir. Yerleştirilirken kızgın telin kanalın tam ortasına denk gelmesi amaçlanmıştır (Şekil 3.21).



Şekil 3.21. Anemometrenin kanala yerleşimi

Anemometre Şekil 3.21’de kanala yerleştirildiği gibi deney süresi boyunca kanalda durmakta ve belli aralıklarla ölçümler alınmaktadır. Deney başlangıcında anemometreden okunan hız değerine göre fan hızı manuel olarak ayarlanmıştır. Her bir Reynolds değerine ve numune uzunluklarına göre olması gereken hız değerleri Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Reynolds sayısı ve numune uzunluklarına göre hız değerleri

1-4-7. Numunelerin Hız Değerleri			
Reynolds Sayısı	Uzunluk (mm)	Kinematik Viskozite (m²/s)	Hız (m/s)
1000	27	16,97x10 ⁻⁶	0,63
2000	27	16,97x10 ⁻⁶	1,26
3000	27	16,97x10 ⁻⁶	1,89
4000	27	16,97x10 ⁻⁶	2,51
5000	27	16,97x10 ⁻⁶	3,14
6000	27	16,97x10 ⁻⁶	3,77
7000	27	16,97x10 ⁻⁶	4,40
8000	27	16,97x10 ⁻⁶	5,03
9000	27	16,97x10 ⁻⁶	5,66
10000	27	16,97x10 ⁻⁶	6,29
2-5-8. Numunelerin Hız Değerleri			
Reynolds Sayısı	Uzunluk (mm)	Kinematik Viskozite (m²/s)	Hız (m/s)
1000	52	16,97x10 ⁻⁶	0,33
2000	52	16,97x10 ⁻⁶	0,65
3000	52	16,97x10 ⁻⁶	0,98
4000	52	16,97x10 ⁻⁶	1,31
5000	52	16,97x10 ⁻⁶	1,63
6000	52	16,97x10 ⁻⁶	1,96
7000	52	16,97x10 ⁻⁶	2,28
8000	52	16,97x10 ⁻⁶	2,61
9000	52	16,97x10 ⁻⁶	2,94
10000	52	16,97x10 ⁻⁶	3,26
3-6-9. Numunelerin Hız Değerleri			
Reynolds Sayısı	Uzunluk (mm)	Kinematik Viskozite (m²/s)	Hız (m/s)
1000	76	16,97x10 ⁻⁶	0,22
2000	76	16,97x10 ⁻⁶	0,45
3000	76	16,97x10 ⁻⁶	0,67
4000	76	16,97x10 ⁻⁶	0,89
5000	76	16,97x10 ⁻⁶	1,12
6000	76	16,97x10 ⁻⁶	1,34
7000	76	16,97x10 ⁻⁶	1,56
8000	76	16,97x10 ⁻⁶	1,79
9000	76	16,97x10 ⁻⁶	2,01
10000	76	16,97x10 ⁻⁶	2,23

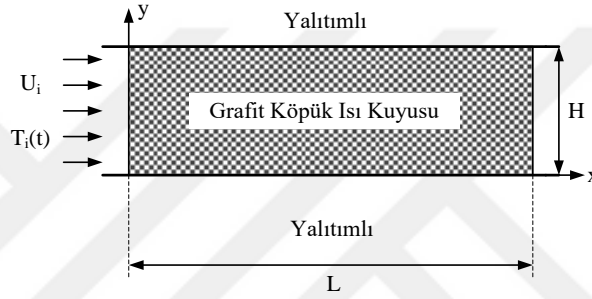
3.2.9. Deney prosedürü

Deneysel çalışma esnasında izlenen yol aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

1. Şekil 3.9'da görseli verilen içerisinde grafit örneğinin bulunduğu test bölümünün hava kanalına montajı yapılır.
2. Yerleri Şekil 3.10'da verilen termal elemanlar Şekil 3.18a'da gösterildiği gibi işaretlenerek veri kayıt cihazına bağlanır.
3. Fan çalıştırılarak sabun köpüğü vasıtasıyla kanal bağlantı noktalarında hava kaçağı olup olmadığı kontrol edilir. Hava kaçağı olmadığına kanaat getirildikten sonra hız kontrol anahtarı ve ihtiyaç duyulması durumunda kanal çıkışını kısarak yaklaşık olarak istenilen Reynolds değerine (Çizelge 3.7) karşılık gelen kanal içi hava akışı temin edilir.
4. Elektrikli ısıtıcının gücü, hava akış hızı dikkate alınarak test bölümü girişinde hava sıcaklığının belirli bir değeri (yaklaşık 65-70°C) aşmayacak şekilde ayarlanır (Çizelge 3.6).
5. Malzemenin homojen olarak ortam sıcaklığında bulunduğu durumda veri kayıt cihazı, güç kaynağı ve fan çalıştırılarak deney başlatılır.
6. Deney süresince malzeme girişi ve çıkışına yerleştirilen ısılı çiftler (Şekil 3.7) ile havanın ortalama sıcaklığı, grafit malzeme üzerinde farklı noktalara yerleştirilen ısılı çiftler (Şekil 3.10) ile de katı malzemenin sıcaklığı okunur ve deney boyunca her 30 saniye de bir kayıt altına alınır.
7. Test bölümü çıkışında ortalama hava hızı deney süresince her 10 dakika da bir okunarak deneye ait tek bir ortalama hız ve bu hız değerine karşılık ortalama Reynolds değeri, özellikler ortalama sıcaklıkta alınarak hesaplanır.
8. Malzeme girişindeki hava sıcaklığı yaklaşık olarak sürekli rejim koşullarına ulaştığı durumda deney sonlandırılır.
9. Elde edilen verilerin tekrar edilebilirliklerini kontrol etmek amacıyla aynı deney yukarıdaki prosedür çerçevesinde yeniden yapılır. Her iki deneyden elde edilen sonuçlar arasında kayda değer bir sapmanın söz konusu olup olmadığı kontrol edilir. Eğer bir sapma söz konusu ise bunun nedenleri araştırılarak çözüm geliştirilir değil ise bir sonraki deney ile devam edilir.

3.3. Sayısal Çalışma

Teorik çalışmanın yürütüleceği geometrinin şematik gösterimi Şekil 3.22’de verilmiştir. Açık hücreli gözenekli grafit malzeme yalıtım amacıyla teflon malzemeden üretilmiş dikdörtgen bir kanal içerisine yerleştirilmiştir. Çalışılacak köpük malzeme çevresinin ısı geçişine karşı iyi bir şekilde yalıtıldığı varsayımıyla zamana bağlı bir boyutlu ısı transferi yaklaşımı kullanılmıştır.



Şekil 3.22. Teorik çalışmanın yürütüleceği geometrinin şematik gösterimi

Önerilmekte olan matematiksel model literatürde yaygın bir şekilde kullanılmakta olan ve aşağıda sırasıyla verilen varsayımlar ve basitleştirmeler çerçevesinde oluşturulmuştur.

1. Gözenekli malzemenin yapısı homojen ve izotropiktir.
2. Girişteki akışkan sıcaklığı ve hızı düzgün dağılımlıdır.
3. Kanal boyunca grafit köpük malzemenin ve havanın sıcaklıkları yalnızca akış yönünde ve zamanla değişmektedir. Dolayısıyla problem bir boyutlu ve zamana bağlıdır.
4. Akış laminar ve sıkıştırılamazdır.
5. Gözenekli malzemenin ve havanın termal ve fiziksel özellikleri değişken değildir.
6. Fazlar arasında (katı ve akışkan) ısı denge söz konusu değildir.
7. Işınım ve doğal taşınım ile ısı transferi göz ardı edilmiştir.

Her bir faz (grafit ve hava) için enerji korunum denklemleri aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

Katı faz (grafit):

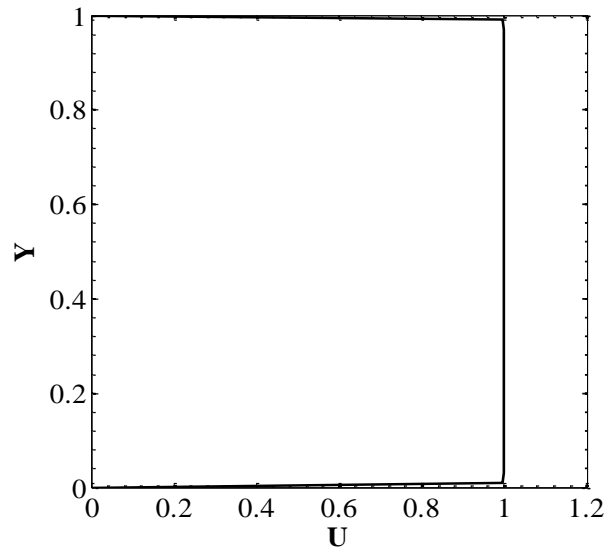
$$(1 - \varepsilon)(\rho c_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = h_v(T_f - T_s) + k_{se} \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} \quad (3.4)$$

Akışkan faz (hava):

$$\varepsilon(\rho c_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho c_p)_f u_D \frac{\partial T_f}{\partial x} = h_v(T_s - T_f) + (k_{fe} + k_d) \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} \quad (3.5)$$

Solmuş (2015), geniş bir Reynolds sayı aralığı ($Re=813-10582$) için bir kanal içerisinde yerleştirilmiş blok grafit köpük malzeme boyunca akışın slug akış olarak modellenebileceğini göstermiştir. Şekil 3.23'de kanal yüksekliği boyunca, üst ve alt kanal yüzeylerine yakın bölge (no-slip sınır koşulundan dolayı basamak hız gradyanı mevcut) dışında boyutsuz hızın yaklaşık olarak sabit kaldığı gösterilmiştir ($u_D/U_i \approx 1$). Elde edilen bu sonuç Xu *et al.* (2014), Feng *et al.* (2014), Lua *et al.* (2006) ve Yang and Hwang (2009) çalışmalarından elde edilen sonuçlar ile uyumludur. Dolayısıyla 3.5 numaralı denklemdeki Darcy hızı yaklaşık olarak kanaldaki akışkanın ortalama hızına eşit alınabilir (Dukhan and Chen 2007; Hwang *et al.* 2002; Ando *et al.* 2013)

$$u_D \cong U_i \quad (3.6)$$



Şekil 3.23. Grafit köpük malzeme içerisindeki boyutsuz hız profili, $x/H=0.02$ ve $Re=104$ (Solmuş 2015)

3.4 ve 3.5 numaralı denklemlerin çözümü için gerekli başlangıç ve sınır koşulları aşağıda verilmiştir. Bu koşullar deneysel çalışma neticesinde elde edilmiştir.

$$T_s(0, x) = T_f(0, x) = T_h \quad (3.7)$$

$$k_{se} \frac{\partial T_s}{\partial x}(t, 0) = h_v L (T_i(t) - T_s(t, 0)) \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial x}(t, L) = 0 \quad (3.9)$$

$$T_f(t, 0) = T_i(t) \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial x}(t, L) = 0 \quad (3.11)$$

3.4 ve 3.5 numaralı enerji denklemleri ile başlangıç ve sınır koşulları aşağıdaki boyutsuz parametreler kullanılarak boyutsuzlaştırılmışlardır.

$$\theta = \frac{T - T_h}{T_{son} - T_h} \quad X = \frac{x}{L} \quad \tau = \frac{t}{L/U_i} \quad C_1 = \frac{(\rho c_p)_f}{(1 - \varepsilon)(\rho c_p)_s} \quad C_2 = \frac{(\rho c_p)_f k_{se}}{(1 - \varepsilon)(\rho c_p)_s k_f}$$

$$C_3 = \frac{k_{fe} + k_d}{\varepsilon k_f} \quad C_4 = \frac{k_{fe}}{k_{se}} \quad Pr = \frac{\mu (c_p)_f}{k_f} \quad Re = \frac{\rho_f U_i L}{\mu} \quad Nu_{fs} = \frac{h_v L^2}{k_f}$$

Katı faz (grafit) için boyutsuz enerji denklemi:

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} = \frac{C_1 Nu_{fs}}{Re Pr} (\theta_f - \theta_s) + \frac{C_2}{Re Pr} \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial X^2} \quad (3.12)$$

Akışkan faz (hava) için boyutsuz enerji denklemi:

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial \tau} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \theta_f}{\partial X} = \frac{Nu_{fs}}{\varepsilon RePr} (\theta_s - \theta_f) + \frac{C_3}{RePr} \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial X^2} \quad (3.13)$$

Boyutsuz başlangıç ve sınır koşulları:

$$\theta_s(0, X) = \theta_f(0, X) = 0 \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial X}(\tau, 0) = C_4 Nu_{fs} (\theta_i(\tau) - \theta_s(\tau, 0)) \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial X}(\tau, 1) = 0 \quad (3.16)$$

$$\theta_f(\tau, 0) = \theta_i(\tau) \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial X}(\tau, 1) = 0 \quad (3.18)$$

3.5 numaralı denklemdeki ısıl dağılıma katsayısı fazların ısıl iletkenlik katsayıları arasındaki farkın kayda değer olması nedeniyle göz ardı edilmiştir (Calmidi and Mahajan 2000).

Karbon köpük malzeme ile havanın efektif ısıl iletkenlik katsayıları aşağıda verilen denklemler vasıtasıyla hesaplanmıştır.

$$k_{se} = k_s(1 - \varepsilon) \quad (3.19)$$

$$k_{fe} = k_f \varepsilon \quad (3.20)$$

3.3.1. Sayısal yöntem

Şekil 3.24 ile verilen hesaplama alanında katı ve gaz fazına ait zamana bağlı sıcaklıkların akış yönündeki değişimleri 3.12 ve 3.13 numaralı enerji denklemlerinin eş zamanlı olarak 3.14 numaralı başlangıç ve 3.15 – 3.18 numaralı sınır koşulları ile birlikte sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözülmesiyle elde edilmiştir. Düzgün dağılı ağ yapısı kullanılmış olup söz konusu denklemlerdeki ikinci mertebeden türevler, konvektif terim ve zaman bağlı türev yaklaşık olarak sırasıyla üç noktalı merkezi fark formülü, upwind ve Crank-Nicolson yöntemleri ile ifade edilerek diferansiyel denklemler doğrusal cebirsel denklemlere dönüştürülmüştür. Elde edilen doğrusal cebirsel denklem takımları eş zamanlı olarak Thomas algoritması vasıtasıyla çözülmüştür. 3.12 ve 3.13 numaralı denklemlerin sonlu farklar ile ifade edilmiş halleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.24. Problem bölgesinin sonlu farklara bölünmesi

3.12 numaralı denklemin sonlu farklar ile gösterimi:

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} = K_1(\theta_f - \theta_s) + K_2 \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial X^2} \quad (3.21)$$

Burada, $K_1 = \frac{C_1 Nu_{fs}}{RePr}$ $K_2 = \frac{C_2}{RePr}$

$$\begin{aligned} \frac{\theta_{s,i}^{t+1} - \theta_{s,i}^t}{\Delta \tau} = & \frac{K_1}{2} [\theta_{f,i}^{t+1} + \theta_{f,i}^t - \theta_{s,i}^{t+1} - \theta_{s,i}^t] \\ & + \frac{K_2}{2} \left[\frac{\theta_{s,i+1}^{t+1} - 2\theta_{s,i}^{t+1} + \theta_{s,i-1}^{t+1}}{\Delta x^2} + \frac{\theta_{s,i+1}^t - 2\theta_{s,i}^t + \theta_{s,i-1}^t}{\Delta x^2} \right] \end{aligned} \quad (3.22)$$

Yukarıdaki denklem düzenlendikten sonra aşağıda verilen doğrusal denklem takımı elde edilir.

$$\begin{aligned} A_1\theta_{s,i}^{t+1} - A_2\theta_{s,i+1}^{t+1} - A_2\theta_{s,i-1}^{t+1} - A_3\theta_{f,i}^{t+1} \\ = A_4\theta_{s,i}^t + A_2\theta_{s,i+1}^t + A_2\theta_{s,i-1}^t + A_3\theta_{f,i}^t \end{aligned} \quad (3.23)$$

Burada,

$$A_1 = 1 + \frac{K_1\Delta\tau}{2} + \frac{K_2\Delta\tau}{\Delta x^2} \quad A_2 = \frac{K_2\Delta\tau}{2\Delta x^2} \quad A_3 = \frac{K_1\Delta\tau}{2} \quad A_4 = 1 - \frac{K_1\Delta\tau}{2} - \frac{K_2\Delta\tau}{\Delta x^2}$$

Katı faz için sınır koşullarının sonlu farklar ile gösterimi

$$X_0 = 0 \quad \frac{\theta_{s,i+1}^{t+1} - \theta_{s,i-1}^{t+1}}{2\Delta x} = C_4 Nu_{fs} (\theta_i - \theta_{s,i}^{t+1}) \quad (3.24)$$

$$X_L = 1 \quad \frac{\theta_{s,i+1}^{t+1} - \theta_{s,i-1}^{t+1}}{2\Delta x} = 0 \quad (3.25)$$

5.10 numaralı denklemin sonlu farklar ile gösterimi:

$$\frac{\partial\theta_f}{\partial\tau} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial\theta_f}{\partial X} = K_3(\theta_s - \theta_f) + K_4 \frac{\partial^2\theta_f}{\partial X^2} \quad (3.26)$$

$$\text{Burada,} \quad K_3 = \frac{Nu_{fs}}{\varepsilon RePr} \quad K_4 = \frac{C_3}{RePr}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\theta_{f,i}^{t+1} - \theta_{f,i}^t}{\Delta\tau} + \frac{1}{2\varepsilon} \left[\frac{\theta_{f,i}^{t+1} - \theta_{f,i-1}^{t+1}}{\Delta x} + \frac{\theta_{f,i}^t - \theta_{f,i-1}^t}{\Delta x} \right] \\
&= \frac{K_3}{2} [\theta_{s,i}^{t+1} + \theta_{s,i}^t - \theta_{f,i}^{t+1} - \theta_{f,i}^t] \\
&+ \frac{K_4}{2} \left[\frac{\theta_{f,i+1}^{t+1} - 2\theta_{f,i}^{t+1} + \theta_{f,i-1}^{t+1}}{\Delta x^2} + \frac{\theta_{f,i+1}^t - 2\theta_{f,i}^t + \theta_{f,i-1}^t}{\Delta x^2} \right]
\end{aligned} \tag{3.27}$$

Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra yukarıdaki denklem aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\begin{aligned}
& B_1 \theta_{f,i}^{t+1} - B_2 \theta_{f,i+1}^{t+1} - B_3 \theta_{f,i-1}^{t+1} - B_4 \theta_{s,i}^{t+1} \\
&= B_5 \theta_{f,i}^t + B_2 \theta_{f,i+1}^t + B_3 \theta_{f,i-1}^t + B_4 \theta_{s,i}^t
\end{aligned} \tag{3.28}$$

Burada, $B_1 = 1 + \frac{\Delta\tau}{2\varepsilon\Delta x} + \frac{K_3\Delta\tau}{2} + \frac{K_4\Delta\tau}{\Delta x^2}$, $B_2 = \frac{K_4\Delta\tau}{2\Delta x^2}$, $B_3 = \frac{\Delta\tau}{2\varepsilon\Delta x} + \frac{K_4\Delta\tau}{2\Delta x^2}$

$$B_4 = \frac{K_3\Delta\tau}{2}, B_5 = 1 - \frac{\Delta\tau}{2\varepsilon\Delta x} - \frac{K_3\Delta\tau}{2} - \frac{K_4\Delta\tau}{\Delta x^2}$$

Gaz fazı için sınır koşullarının sonlu farklar ile gösterimi

$$X_0 = 0 \quad \theta_{f,i}^{t+1} = \theta_i \tag{3.29}$$

$$X_L = 1 \quad \frac{\theta_{f,i+1}^{t+1} - \theta_{f,i-1}^{t+1}}{2\Delta x} = 0 \tag{3.30}$$

Şekil 3.24’de gösterilen problem bölgesi eğer n eşit parçaya bölünür ise n+1 adet düğüm noktası elde edilir. 3.23 numaralı lineer cebirsel denklem bağımlı değişkenin değerinin bilinmediği bütün noktalara uygulanır. 3.23 numaralı denklem sınırlara uygulandığında ortaya çıkan sanal noktalar 3.24 ve 3.25 numaralı denklemlerin yardımıyla ortadan kaldırılır. 3.28 numaralı lineer cebirsel denklem ise bağımlı değişkenin değerinin bulunduğu sol taraftaki sınır noktası dışında bütün noktalara uygulanır. 3.28 numaralı denklemin sağ

tarafındaki sınır noktasına uygulanması durumunda ortaya çıkan sanal nokta 3.30 numaralı denklemin yardımıyla ortadan kaldırılır. Bu durumda $2(n+1)$ bilinmeyenli (her noktada katı ve gaz sıcaklığı) $2(n+1)$ adet lineer cebirsel denklem takımı elde edilir. Bu cebirsel denklem takımı kapalı formda aşağıdaki şekilde ifade edilebilir. Burada A katsayılar matrisi olup 3.23 ve 3.28 numaralı denklemlerin sağ tarafında bulunan bilinmeyenlerin katsayılarından oluşur. B bilinmeyenler vektörünü, C ise 3.23 ve 3.28 numaralı denklemlerin sağ tarafını temsil etmektedir.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dots & & \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \dots & & \end{bmatrix}}_A * \underbrace{\begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix}}_B^{t+1} = \underbrace{\begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix}}_C^t$$

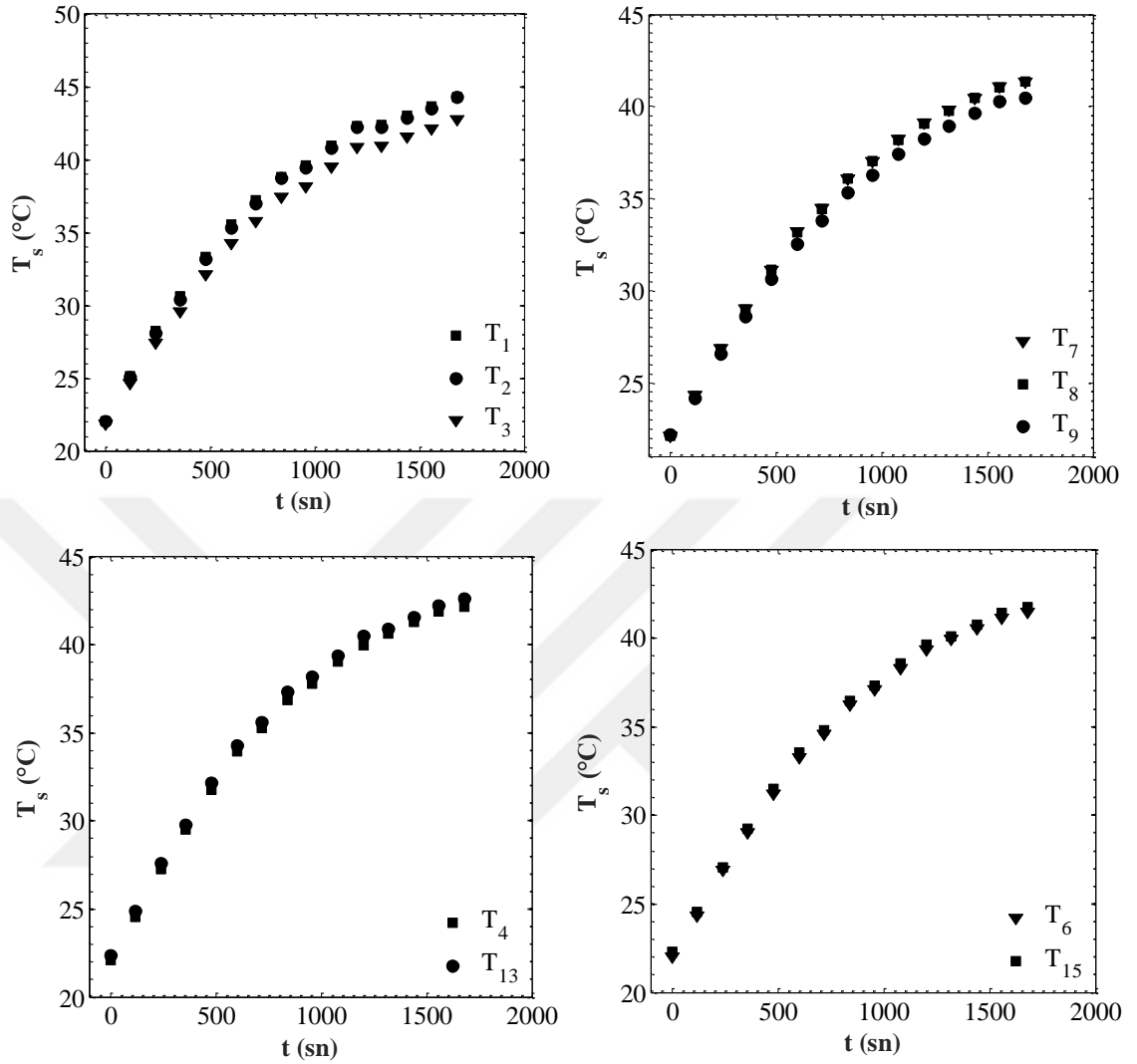
Böylece hesaplama bölgesinde t anındaki değerleri bilinen bağımlı değişkenlerin t+1 anındaki değerleri, yukarıdaki lineer cebirsel denklem takımının Thomas algoritması (Tridigonal matrix solver algorithm) kullanılarak çözülmesiyle elde edilir. Çalışmada kullanılmış olan matematiksel modele dayalı olarak yukarıda anlatılan sayısal yöntem çerçevesinde MatLab ortamında geliştirilen simülasyon programı Ek 1’de verilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Ortalama Hacimsel Isı Taşınım Katsayısının Tayini

Deneysel çalışma tamamlandıktan sonra ortalama hacimsel ısı taşınım katsayısı, belirli bir örnek ve Reynolds sayı değerinde bir önceki bölüm de ifade edilen matematiksel model ve sayısal çözüm tekniğine dayalı olarak geliştirilen simülasyon programının aşağıdaki prosedür çerçevesinde çalıştırılmasıyla tayin edilmiştir. Söz konusu prosedür 1. numune ve Re değerinin yaklaşık 5277 olduğu durum için verilmiş olup diğer örnekler ve Re değerlerinde de benzer prosedür takip edilmiştir.

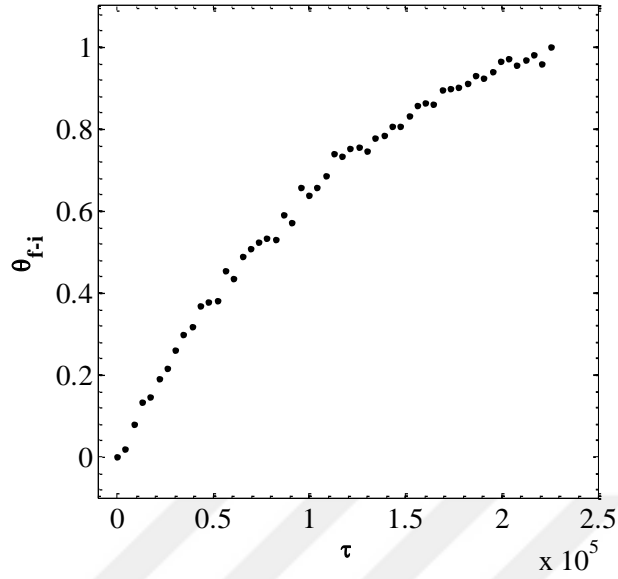
1. Excel formatında kayıt altına alınan deneysel veriler MatLab ortamında geliştirilen simülasyon programına aktarılır.
2. Zamana bağlı bir boyutlu sayısal model yaklaşımı kullanılacak olması sebebiyle (katı ve gaz fazına ait sıcaklıkların sadece akış yönünde değiştiği varsayılmıştır) öncelikle bu modelin geçerliliğinin ortaya konması gerekmektedir. Bu amaçla malzeme üzerinde farklı noktalarda zamana bağlı olarak okunan sıcaklıklar kullanılmak suretiyle bir boyutlu matematiksel modelin fiziksel problemi temsil edip etmediği çalışılmıştır. Şekil 3.10'da yerleri verilen T_1 , T_2 , T_3 , T_7 , T_8 , ve T_9 numaralı termal elemanlar kullanılarak öncelikle zamana bağlı olarak y yönünde (Şekil 4.1) ve sonrasında ise T_4 , T_6 , T_{13} ve T_{15} numaralı termal elemanlar kullanılarak z yönünde (Şekil 4.1) kayda değer bir sıcaklık gradyanının olup olmadığı kontrol edilmiştir. Şekil 4.1'den her iki yönde de maksimum sıcaklık farkının yaklaşık 2°C 'den az olduğu görülmektedir. Sonuç olarak y ve z yönünde okunan maksimum sıcaklık farkları bu yönlerdeki sıcaklık gradyanlarının ihmal edilebileceğini göstermiş olup önerilen bir boyutlu sayısal modelin fiziksel problemi kabul edilebilir hata sınırları içerisinde temsil ettiği ortaya konmuştur.



Şekil 4.1. Bir boyutlu sayısal modelin doğrulanması

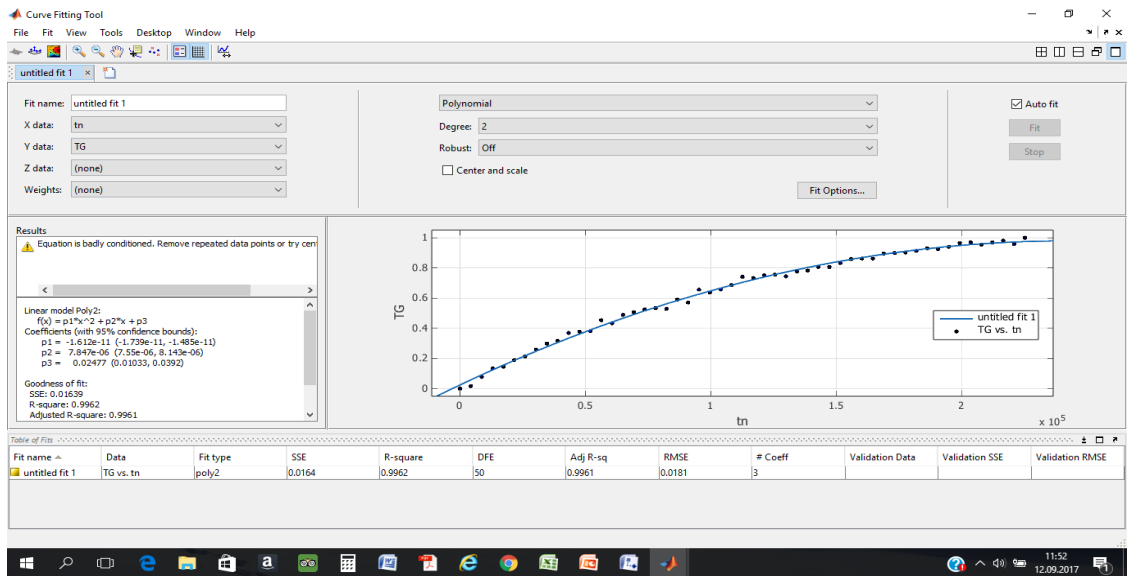
3. Modifiye grafit köpük malzeme girişinde zamana bağlı olarak farklı noktalarda okunan hava sıcaklıklarının ortalaması alınmak suretiyle ortalama hava giriş sıcaklığı aşağıdaki denklem vasıtasıyla boyutsuzlaştırılır. Boyutsuz giriş sıcaklığı boyutsuz zamanın fonksiyonu olarak aşağıda Şekil 4.2’de verildiği gibi MatLab ortamında çizdirilir.

$$\theta = \frac{T - T_h}{T_{son} - T_h} \quad \tau = \frac{t}{L/U_i} \quad (4.1)$$



Şekil 4.2. Boyutsuz ortalama hava giriş sıcaklığının boyutsuz zamanın fonksiyonu olarak gösterimi

4. Akışkanın zamana bağlı giriş sıcaklığı, sınır koşulu olduğu için eğri uydurma yöntemi (MatLab Curve Fitting Tool, Şekil 4.3) vasıtasıyla zamanın fonksiyonu olarak ikinci dereceden polinom (Eş. 4.2) veya iki terimli eksponansiyel fonksiyon (Eş. 4.3) ile ifade edilir. Hangisinin kullanılacağına eğri uydurulduktan sonra elde edilen korelasyon katsayısının değerine bakılarak karar verilir.



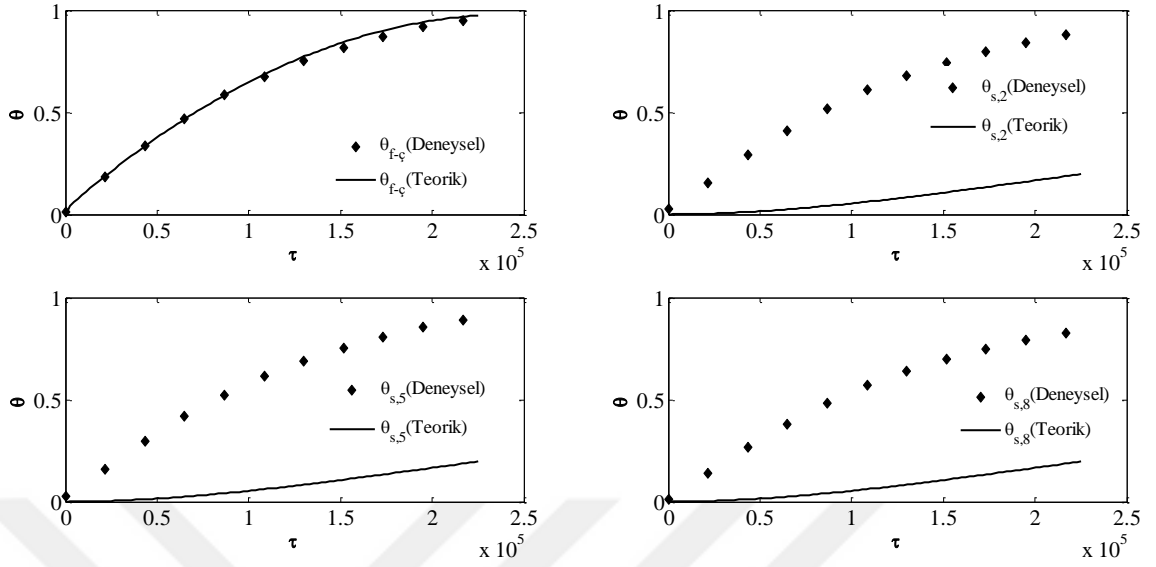
Şekil 4.3. 4.2 veya 4.3 numaralı denklemin katsayılarının tayini

$$\theta_{f_i} = a\tau^2 + b\tau + c \quad (4.2)$$

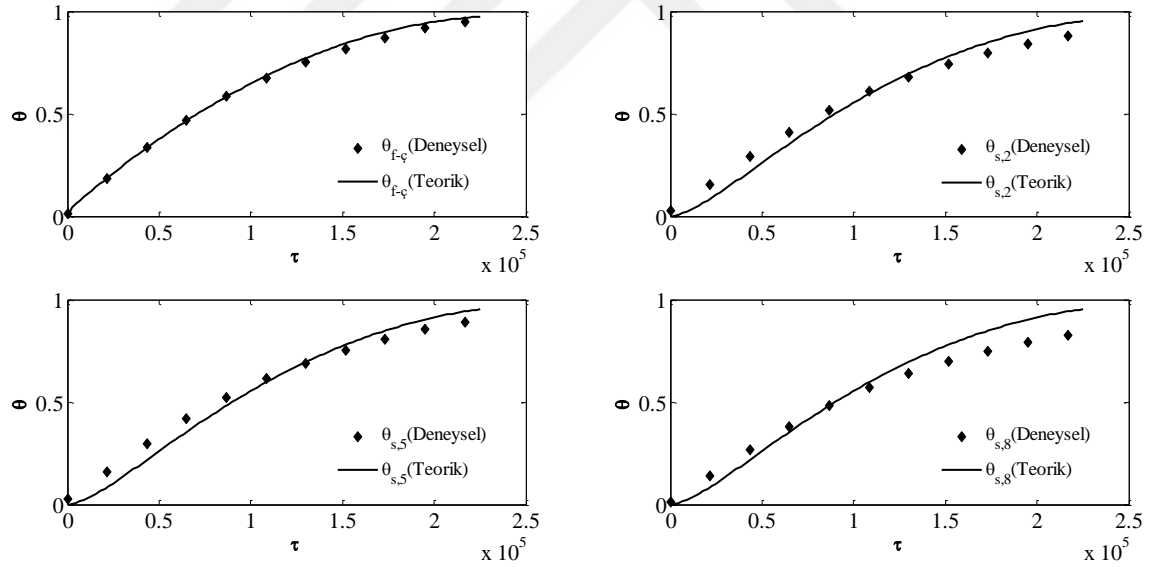
$$\theta_{f_i} = ae^{b\tau} + ce^{d\tau} \quad (4.3)$$

5. Deneysel çalışma neticesinde yukarıda boyutsuz zamanın fonksiyonu olarak ifade edilen hava giriş sıcaklığı, tahmini Nu_{fs} değeri, ortalama akış hızı (Reynolds sayısı), ortalama akışkan özellikleri, malzeme özellikleri, X yönündeki aralık sayısı ve zaman adımı geliştirilen bilgisayar simülasyon programına girilir.

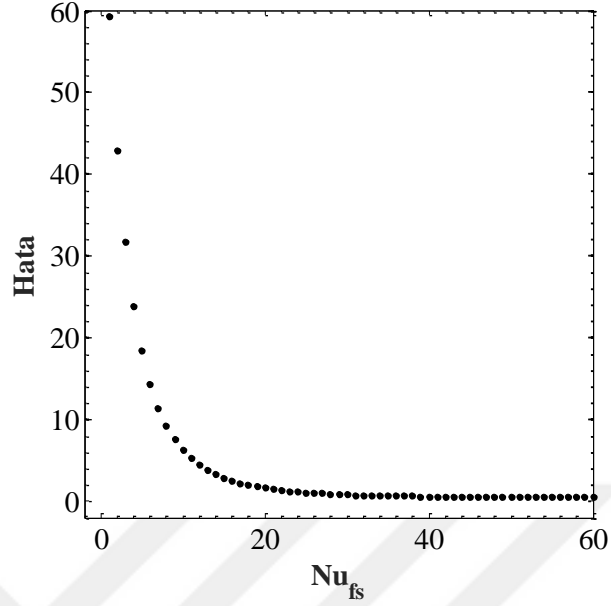
6. Teorik çalışma neticesinde ortalama hacimsel ısı taşınım katsayısının tahmin edilen bir değeri için test bölümü çıkışında havanın zamana bağlı olarak elde edilen sıcaklık değeri ile yine zamana bağlı olarak katı malzemenin giriş (T_2), orta nokta (T_5) ve çıkıştaki (T_8) sıcaklık değerleri deney verileriyle karşılaştırılmak suretiyle hata hesaplaması yapılır. Aşağıda sırasıyla Şekil 4.4 ve 4.5 ile $Nu_{fs} = 1$ ve $Nu_{fs} = 30$ tahmini değerleri için bahse konu karşılaştırmanın görseli verilmiştir. 3.2 numaralı eşitlik ile verilen hata, deneysel ve teorik modelden elde edilen sonuçlar arasındaki farkların karelerinin toplamı olmaktadır. Dört farklı noktada hesaplanan hata değerleri toplanmak suretiyle ortalama hacimsel ısı taşınım katsayısının tahmin edilen bir değeri için tek bir hata değeri elde edilir. Sonuç olarak, yukarıdaki prosedür çerçevesinde farklı h_v veya Nu_{fs} değerleri için program çalıştırılmak suretiyle hata hesaplaması yaptırılır ve h_v ile hata arasındaki ilişki eğri uydurma yöntemi ile bir fonksiyon şeklinde ifade edilir ($Hata = f(Nu_{fs})$, Şekil 4.6). Bu fonksiyonun Nu_{fs} 'ye göre türevinin ($d(Hata)/d(Nu_{fs}) = eğim$) 0.005' den küçük olduğu değere karşılık gelen Nu_{fs} değeri bahse konu örnek ve Reynolds değeri için tayin edilmiş ortalama hacimsel ısı taşınım katsayısı değeri olmaktadır.



Şekil 4.4. $Re = 5277$ ve $Nu_{fs} = 1$ için teorik ve deneysel akışkan çıkış sıcaklıklarının ve akış yönünde katı sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi



Şekil 4.5. $Re = 5277$ ve $Nu_{fs} = 30$ için teorik ve deneysel akışkan çıkış sıcaklıklarının ve akış yönünde katı sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi



Şekil 4.6. Hatanın Nufs ile değişimi

7. Belirli bir örnek ve Re değeri için Nu_{fs} tayin edildikten sonra elde edilen sonucun X yönündeki aralık sayısı ve zaman adımından bağımsız olup olmadığı kontrol edilir. $Nu_{fs} = 30$ değeri $\Delta X = 0.01$ ve $\Delta \tau = 2253.3$ için elde edilmiştir. Aşağıda Çizelge 4.1’de $Re = 5277$ olduğu durumda 1 numaralı örnek için $Nu_{fs} = 30$ değerinin ağ sayısı ve zaman adımından bağımsız olduğu gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. $Re = 5277$ ve $Nu_{fs} = 30$ için ağ sayısı ve zaman adımından bağımsızlık çalışması

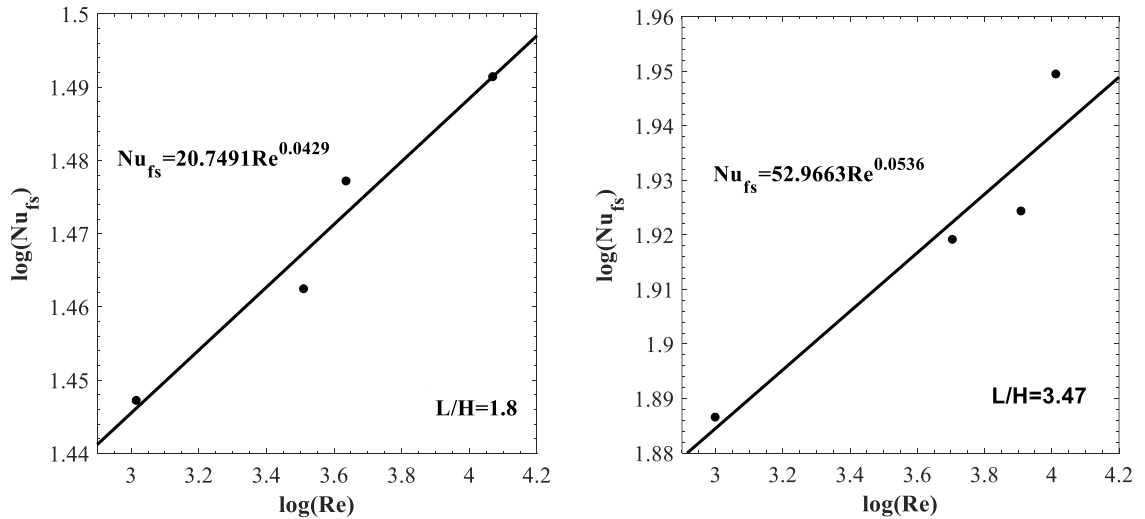
	$\Delta \tau = 4506.7$			$\Delta \tau = 2253.3$			$\Delta \tau = 1126.7$		
	$\Delta X=0.02$	$\Delta X=0.01$	$\Delta X=0.005$	$\Delta X=0.02$	$\Delta X=0.01$	$\Delta X=0.005$	$\Delta X=0.02$	$\Delta X=0.01$	$\Delta X=0.005$
$\theta_{r,C}$	0.9743	0.9743	0.9743	0.9743	0.9743	0.9743	0.9743	0.9743	0.9743
$\theta_{s,2}$	0.9531	0.9531	0.9531	0.9531	0.9531	0.9531	0.9531	0.9531	0.9531
$\theta_{s,5}$	0.9531	0.9531	0.9531	0.9531	0.9531	0.9531	0.9531	0.9531	0.9531
$\theta_{s,8}$	0.9531	0.9531	0.9531	0.9531	0.9531	0.9531	0.9531	0.9531	0.9531

Yukarıdaki tabloda $\Delta X = 0.01$ ve $\Delta \tau = 2253.3$ için $Nu_{fs} = 30$ tahmini değeri ile çalıştırılan simülasyon programının ağ sayısı ve zaman adımından bağımsız olduğu gösterilmiştir.

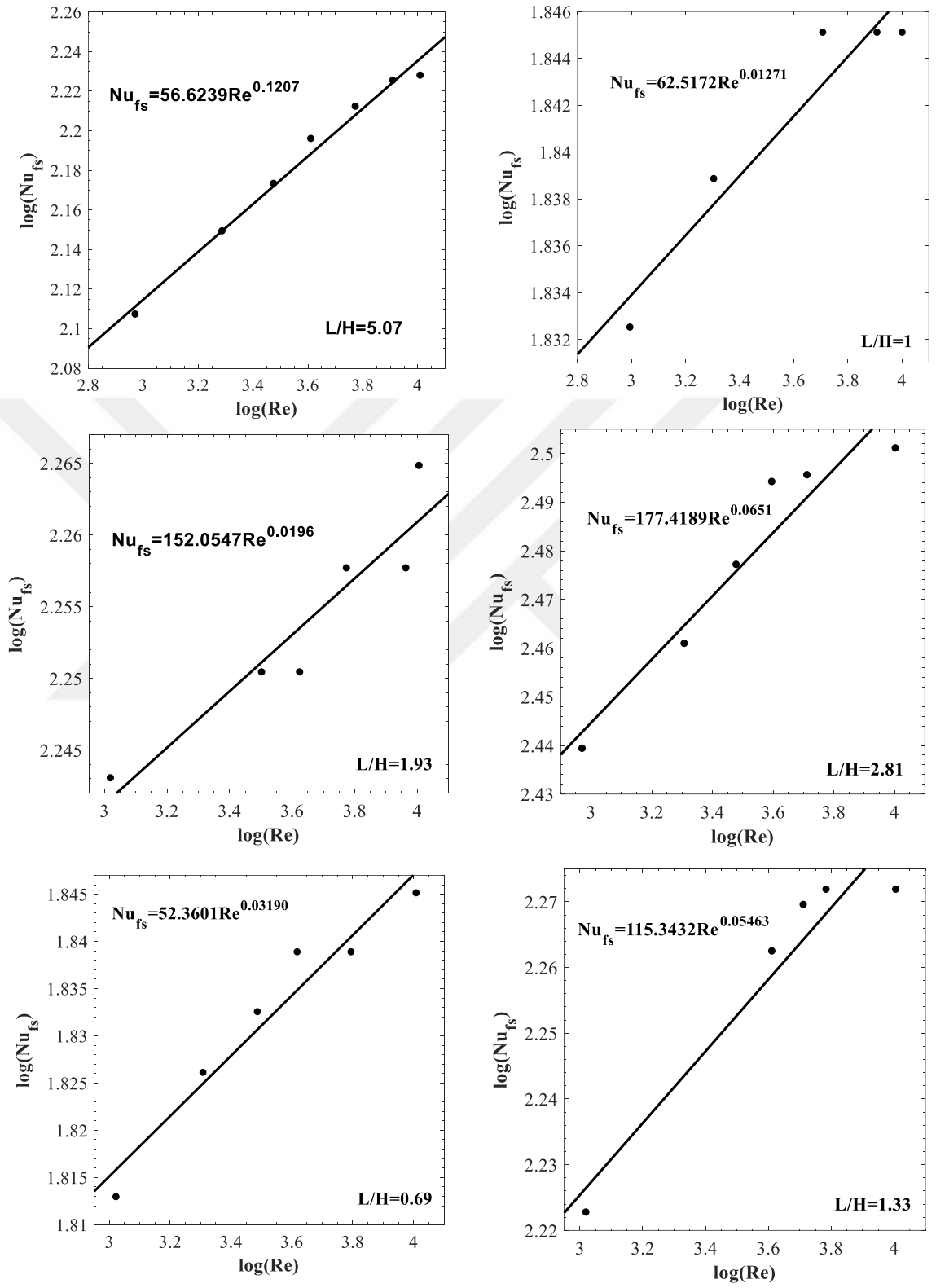
Sonuçlar beş anlamlı rakama kadar aynı olup virgülden sonra altıncı basamaktan itibaren değişmektedir.

4.2. Korelasyon Denklemleri

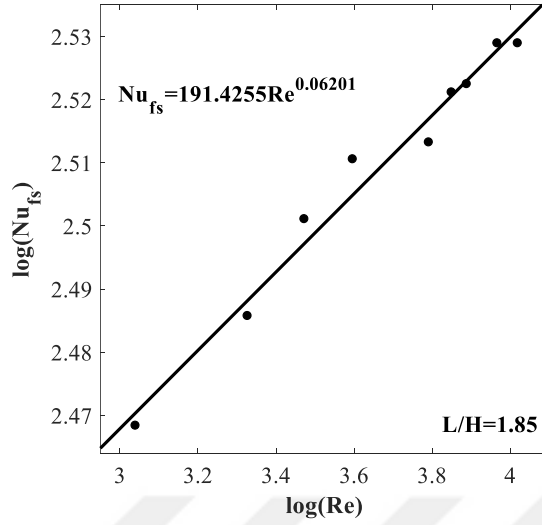
Aşağıda Şekil 4.7’de her bir örnek için fazlar arasındaki Nu_{fs} , Re sayısının fonksiyonu olarak $Nu_{fs} = aRe^b$ formunda ampirik bir eşitlik ile ifade edilmiştir. Korelasyon denkleminin sabitleri her bir örnek için korelasyon katsayısı ile birlikte Çizelge 4.2’de verilmiştir. Korelasyon katsayıları (R^2), ampirik denklemlerin ilgili veri grubunu iyi bir şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Korelasyon denkleminin sabitleri tayin edilirken öncelikle bahse konu doğrusal olmayan eşitlik, her iki tarafının 10 tabanında logaritması alınmak suretiyle doğrusallaştırılmıştır ($\log(Nu_{fs}) = \log(a) + b * \log(Re)$). Sonrasında doğrusal regresyon yöntemi ile a ve b sabitleri tayin edilmiştir. Önerilen eşitlikler yaklaşık olarak $Re=1000-10000$ aralığında geçerlidir. Aynı yükseklik değerinde göreceli olarak kısa örneklerde Re çalışma aralığında Nu_{fs} hemen hemen sabit kaldığından sınırlı sayıda deneysel veri kullanılmıştır.



Şekil 4.7. (devam)



Şekil 4.7. (devam)



Şekil 4.7. Her bir örnek için doğrusal regresyon yöntemi ile ampirik denklem sabitlerinin tayini

Çizelge 4.2. Her bir örnek için ampirik denklem sabitleri ve korelasyon katsayısı

	$Nu_{fs} = aRe^b$			R^2
	L/H	a	b	
1.Örnek	1.8	20.7491	0.0429	0.96
2.Örnek	3.47	52.9663	0.0536	0.90
3.Örnek	5.07	56.6239	0.1207	0.99
4.Örnek	1	62.5172	0.01271	0.92
5.Örnek	1.93	152.0547	0.0196	0.88
6.Örnek	2.81	177.4189	0.0651	0.92
7.Örnek	0.69	52.3601	0.03190	0.95
8.Örnek	1.33	115.3432	0.05463	0.92
9.Örnek	1.95	191.4255	0.06201	0.98

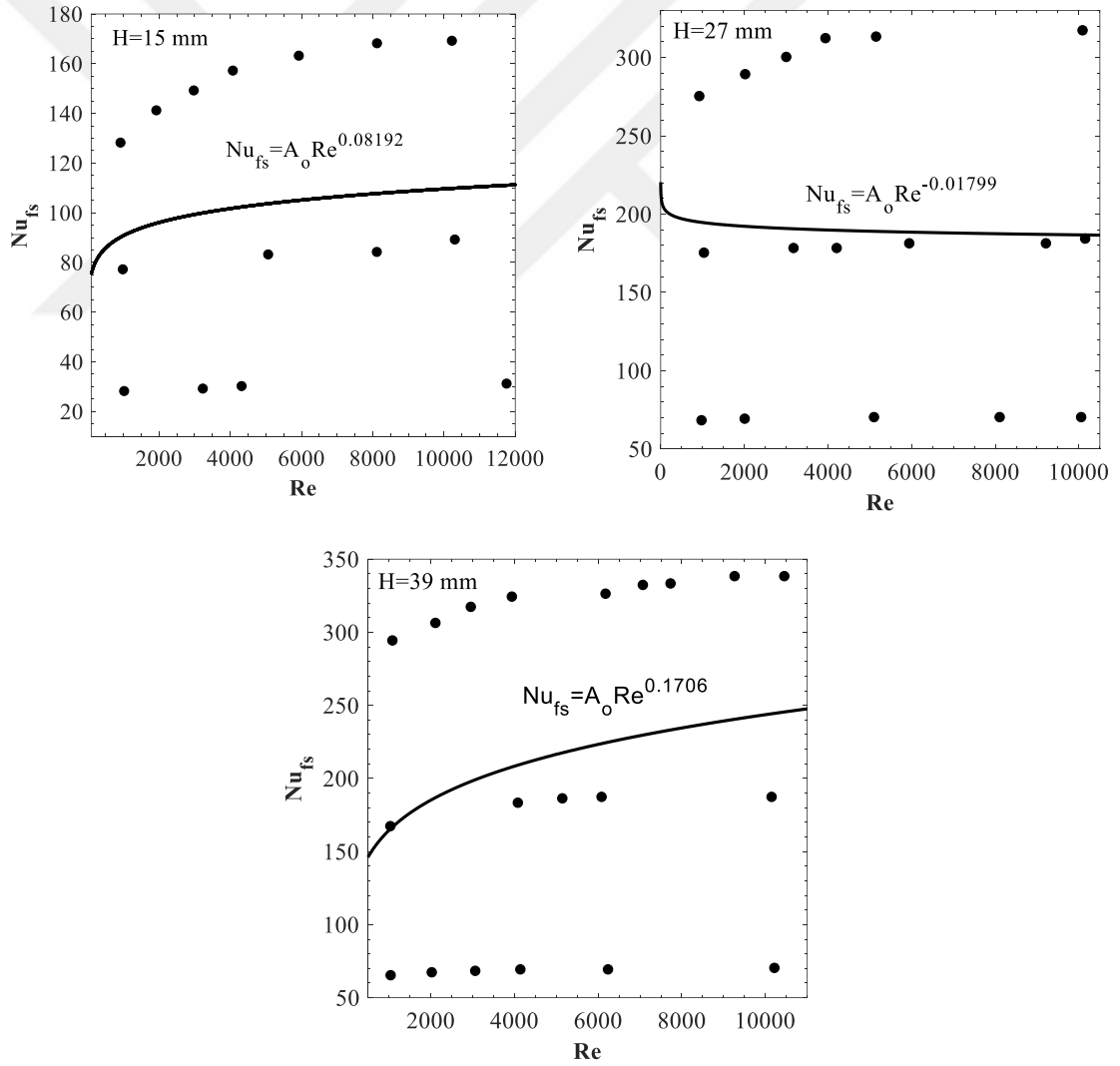
Aynı yükseklik değerinde üç farklı örnek uzunluğu ($L= 27$ mm, 52 mm, 76 mm) için zamana bağlı tek akım yöntemi ile elde edilen Nu_{fs} sayısının Re ile değişimi Şekil 4.8’de verilmiş olup bahse konu veri grupları $Nu_{fs} = aRe^b L/H^c$ formunda üç farklı ampirik denklem ile ayrıca ifade edilmiştir. Ampirik denklemlerin türetilmesi sırasında izlenen yol aşağıda ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Öncelikle tek bir yükseklik değeri için çizdirilen veri grubu MatLab Curve Fitting Toolbox vasıtasıyla $Nu_{fs} = A_0Re^b$ formunda

ampirik bir denklem ile ifade edilmiş olup ilgili denklemler aşağıda verilmiştir. Böylelikle her bir veri grubu için ampirik denklem sabitlerinden biri olan b tayin edilmiş olur.

$$Nu_{fs} = A_0 Re^{0.08192} \quad (L/H = 1.8, 3.47, 5.07) \quad (4.4)$$

$$Nu_{fs} = A_0 Re^{-0.01799} \quad L/H = 1, 1.93, 2.81) \quad (4.5)$$

$$Nu_{fs} = A_0 Re^{0.1706} \quad (L/H = 0.69, 1.33, 1.95) \quad (4.6)$$



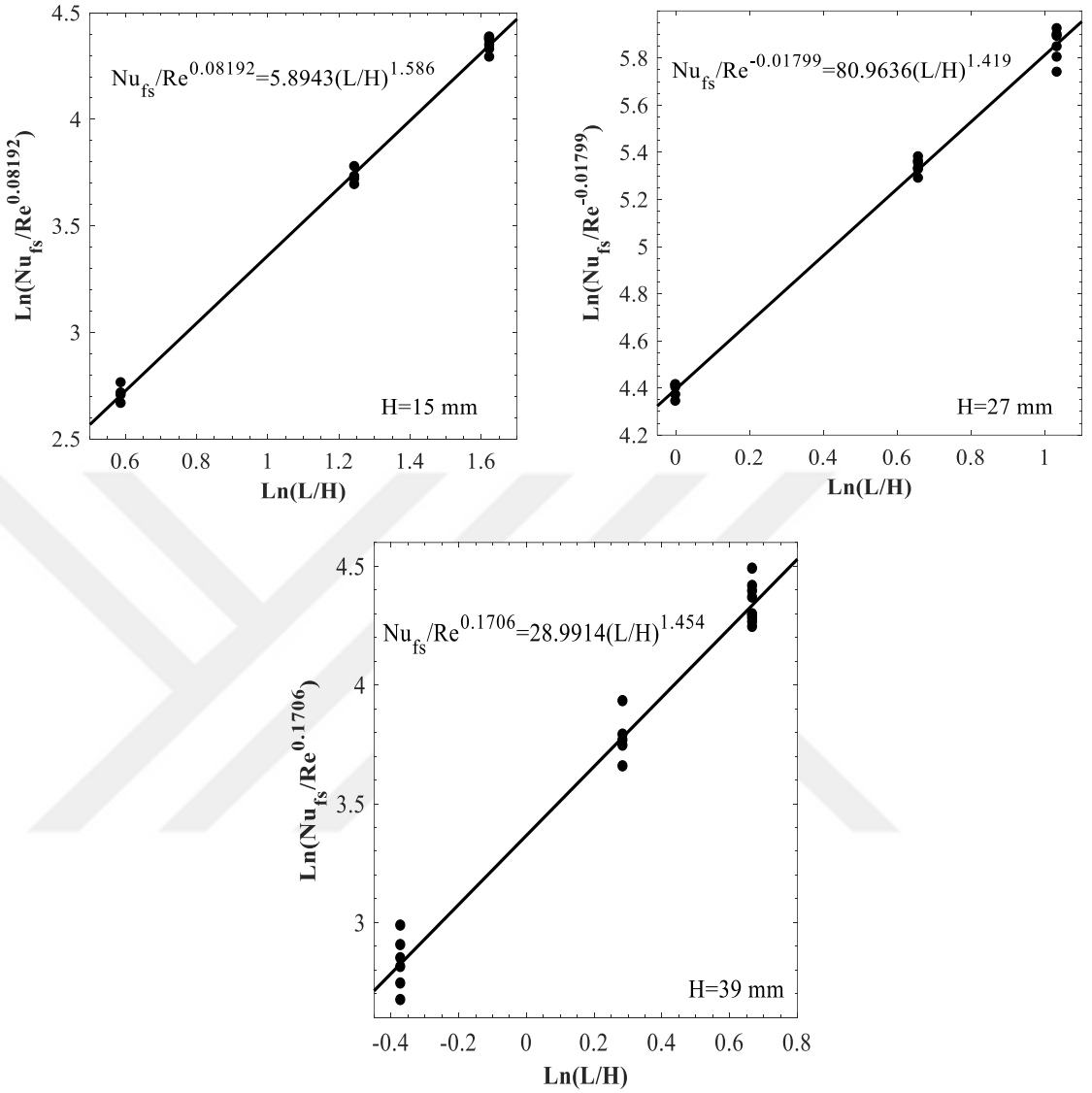
Şekil 4.8. Aynı yükseklik değerinde üç farklı modifiye grafit örnek uzunluğu ($L = 27$ mm, 52 mm, 76 mm) için Nu_{fs} sayısının Re ile değişimi

Yukarıda verilen denklemlerin her iki tarafı Re^b ifadesine bölünerek $A_0 = Nu_{sf}/Re^b = a(L/H)^c$ eşitliği elde edilir. Sonrasında bu eşitlikteki var olan a ve c sabitlerinin değerini tayin etmek için doğrusal olmayan eşitlik, her iki tarafının doğal logaritması alınmak suretiyle doğrusallaştırılır $Ln(Nu_{sf}/Re^b) = Ln(a) + c * Ln(L/H)$ ve Şekil 4.9'da verildiği gibi $Ln(Nu_{sf}/Re^b)$ değerinin $Ln(L/H)$ ile değişimi çizdirilir. Son olarak MatLab Curve Fitting Toolbox vasıtasıyla bahse konu veri grubuna birinci dereceden polinom uydurmak suretiyle a ve c sabitlerinin değerleri belirlenir. Sonuç olarak aynı yükseklik değerinde üç farklı L/H oranı için yaklaşık $Re=1000-10000$ aralığında geçerli olan 0,113 gözeneklilik değerine sahip modifiye grafit malzeme ile hava arasındaki ortalama hacimsel ısı taşınım katsayısının tayininde kullanılabilecek aşağıda verilen korelasyon denklemleri türetilmiştir.

$$Nu_{fs} = 5.8943Re^{0.08192} L/H^{1.586} \quad (L/H = 1.8, 3.47, 5.07) \text{ ve } (R^2 = 0.99) \quad (4.7)$$

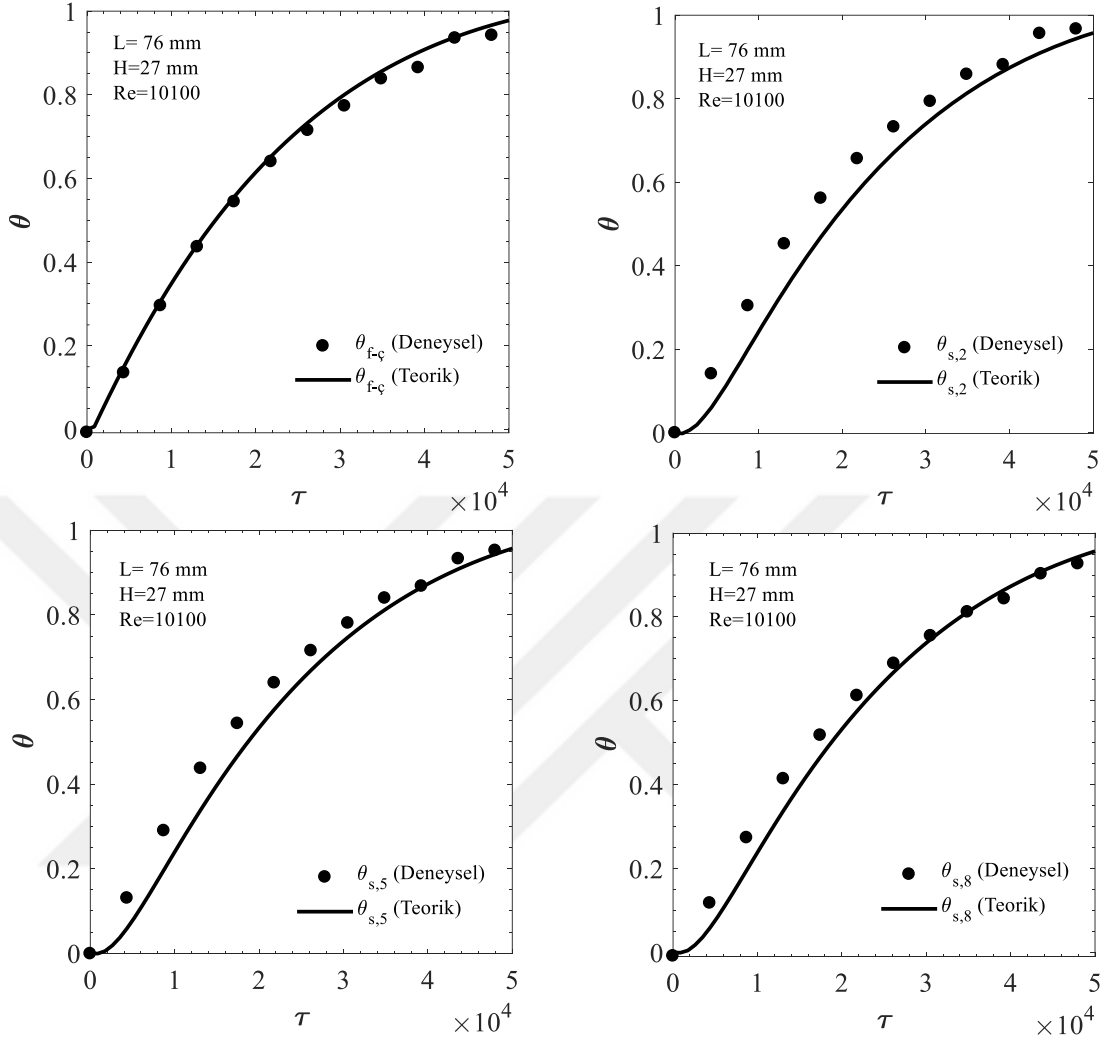
$$Nu_{fs} = 80.9636Re^{-0.01799} L/H^{1.419} \quad (L/H = 1, 1.93, 2.81) \text{ ve } (R^2 = 0.99) \quad (4.8)$$

$$Nu_{fs} = 28.9914Re^{0.1706} L/H^{1.454} \quad (L/H = 0.69, 1.33, 1.95) \text{ ve } (R^2 = 0.98) \quad (4.9)$$



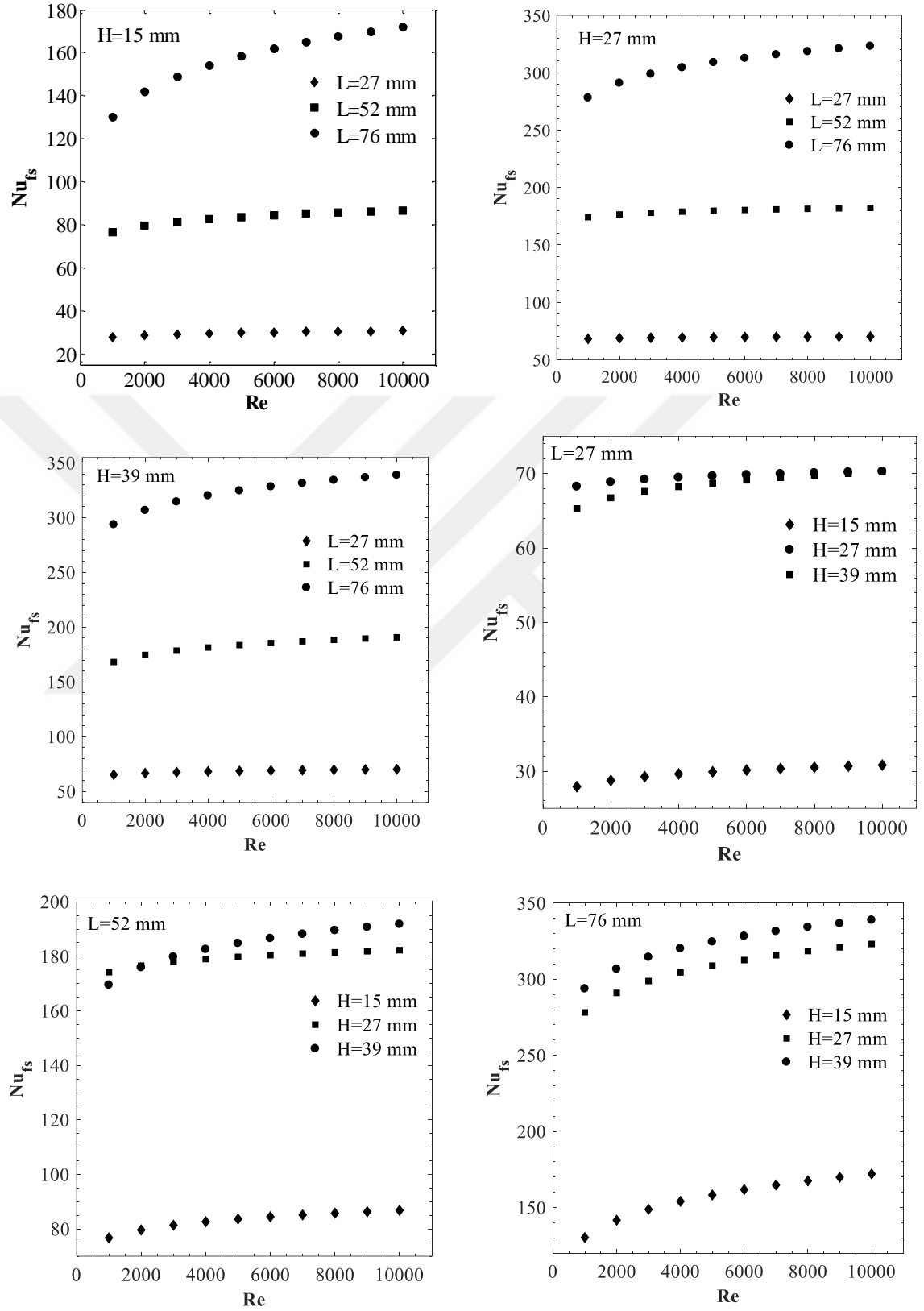
Şekil 4.9. Üç farklı örnek yüksekliği için üç farklı örnek uzunluğunda $\ln(Nu_{fs}/Re^b)$ değerinin $\ln(L/H)$ ile değişimi

Şekil 4.10'da görüldüğü üzere Nu_{fs} nin tahmin edilen bir değeri ($Nu_{fs}=317$) için sayısal çalışma neticesinde zamana bağlı olarak elde edilen çıkış hava sıcaklığı ile grafit köpük malzemenin giriş (T_2), orta nokta (T_5) ve çıkıştaki (T_8) sıcaklık değerleri deneysel olarak ölçülen değerler ile iyi bir uyum içerisindedir. Dolayısıyla tayin edilen ortalama hacimsel ısı taşınım katsayısı tam olarak katı ile gaz fazı arasındaki taşınım ile ısı geçişini korele etmektedir.



Şekil 4.10. $Re = 10100$ ve $Nu_{fs} = 317$ için teorik ve deneysel akışkan çıkış sıcaklıklarının ve akış yönünde katı sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi

Yukarıda türetilen korelasyon denklemleri kullanılmak suretiyle Nu_{fs} 'nin Re ile değişimi sabit H değerlerinde farklı L değerleri ve sabit L değerinde farklı H değerleri için Şekil 4.11'de verilmiştir. Şekil 4.11'den açık bir şekilde gözükmektedir ki Nu_{fs} değeri sabit bir H değerinde artan L ile artmaktadır. Ancak, sabit bir L değerinde artan H değeri ile belirli bir noktaya kadar artmakta sonrasında ise kayda değer bir değişim göstermemektedir. Diğer taraftan genel olarak artan Re değeri ile birlikte Nu_{fs} değeri artmaktadır. Ayrıca Nu_{fs} sabit H değerinde Re artıkça L değerinin artması ile bir gradyen oluşturduğu fakat L azaldıkça kayda değer bir değişim gerçekleştirmediği görülmektedir. Yani küçük L değerlerinde Re değerinin artması Nu_{fs} etkilemezken büyük L değerlerin aynı durum söz konusu değildir. Bu durum Şekil 4.11'de açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.11. Her bir örnek için ortalama hacimsel Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

4.3. Deneysel Hata Hesaplaması

Bu çalışmada ölçülen her bir büyüklüğün sahip olduğu belirsizliğe bağlı olarak ortaya çıkan deneysel hatalar aşağıda verilen denklem vasıtasıyla tahmin edilmiştir. Bu denklem aynı zamanda Gauss hata yayılım yasası (Gauss error propagation law) olarak da bilinmektedir. Bu denklemde R , ölçülen $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ nin fonksiyonu olan bir değerdir. Diğer bir ifade ile $R=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ şeklinde yazmak mümkündür. w_n ise n inci ölçülen büyüklüğe ait belirsizlik değerini ifade etmektedir. Bu durumda w_R R 'nin tahmin edilen belirsizlik değeridir.

$$w_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n\right)^2} \quad (4.10)$$

Doğrudan ölçülen sıcaklık ve hız için deneysel belirsizlikler söz konusu büyüklükleri ölçmek için kullanılan cihazların üreticileri tarafından sağlanan değerlere dayanmaktadır. Örneğin bu değerler sıcaklık ve hız için sırasıyla $\pm 1^\circ\text{C}$ ve $\pm 0,05$ m/s (hız 0,15-3 m/s arasında değişiyor ise) veya $\pm 0,2$ m/s (hız 3,1-30 m/s arasında değişiyor ise) olarak verilmiştir. Ölçülen bu değerleri kullanarak hesaplanan Re ve dolayısıyla Nu_{fs} için deneysel belirsizliklerin çalışma aralığında Eş. 4.10 çerçevesinde sırasıyla %1,3 ve %3,6'dan daha az olduğu değerlendirilmiştir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, öncelikle modifiye gözenekli grafit malzeme ile hava arasındaki ortalama hacimsel ısı taşınım katsayısı (h_v) veya Nusselt (Nu_{fs}) sayısı, zamana bağlı tek akım yöntemi (transient single-blow technique) vasıtasıyla Reynolds sayısının fonksiyonu olarak boyutları ($L/H = 0.69-5.07$) arasında değişen dokuz farklı örnek için $Nu_{fs} = aRe^b$ formunda ampirik bir bağıntı ile ifade edilmiştir. Sonrasında, aynı yükseklik değerinde üç farklı örnek uzunluğu ($L = 27$ mm, 52 mm, 76 mm) için Nu_{fs} , nin Re ve L/H ile değişimi $Nu_{fs} = aRe^b L/H^c$ formunda üç farklı ampirik denklem ile ayrıca ifade edilmiştir. Önerilen korelasyon denklemleri yaklaşık olarak 1000-10000 Reynolds sayı aralığında geçerlidir. Gözenekli grafit malzeme üzerinde oluşan yüksek basınç düşümünden dolayı örneklere akış yönünde şaşırtılmış bir şekilde 2 mm çapında kanallar açılmıştır. Böylelikle modifiye grafit köpük olarak adlandırılan ve gözeneklilik değeri 0,113 olan malzeme mühendislik uygulamalarına uygun hale getirilmiştir.

Modifiye grafit tabanlı ısı kuyuları içerisinde fazların (grafit ve hava) sıcaklık dağılımlarını deneysel olarak hassas bir şekilde elde etmek mümkün değildir. Deneysel çalışmanın zorluğundan, elde edilen sonuçların tatmin edici olmamasından ve deneysel çalışmanın getirmiş olduğu mali yükten dolayı araştırmacılar bu alanda daha çok teorik çalışmalara yönelmişlerdir. Teorik çalışmada fazlar arasında (grafit köpük-hava) ısı denge varsayımının diğer bir ifade ile lokal olarak her iki fazında aynı sıcaklıkta olduğu kabulüne başvurulmadığı durumda her iki fazı da kapsayan tek bir enerji denklemi yerine her bir faz için ayrı enerji denkleminin kullanılması gerekmektedir. Diğer taraftan iki enerji denklemine dayalı teorik modelde fazlar arasındaki hacimsel ısı taşınım katsayısının bilinmesi gerekmektedir. Ancak literatürde modifiye gözenekli grafit malzeme ile hava arasındaki hacimsel ısı taşınım katsayısının tayininde kullanılabilecek herhangi bir bağıntı bulunmadığından bu çalışma ile literatürdeki mevcut boşluk doldurulmuştur. Sonuç olarak, önerilen korelasyon denklemleri vasıtasıyla modifiye gözenekli grafit malzeme kullanan yeni nesil elektronik cihazların tasarımının hızlı ve güvenilir bir şekilde yapılması mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- Abadi, G., B., Kim, K., C., 2017 Experimental heat transfer and pressure drop in a metal-foam-filled tube heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 82, 42-49.
- Ando, K., Hirai, H., Sano, Y. 2013. An accurate experimental determination of interstitial heat transfer coefficients of ceramic foams using the single blow method. *The Open Transport Phenomena Journal*, 5, 7-12.
- Asfaw, H. D., Roberts, M. R., Tai, C. W., Younesi, R., Valvo, M., Nyholm, L., Edstrom, K., 2014. Nanosized LiFePO₄-Decorated Emulsion-Templated Carbon Foam For 3D Micro Batteries: A Study Of Structure And Electrochemical Performance. *Nanoscale*, 15, 8804-8813.
- Bahçivan "Elektrik Motorları ve Havalandırma Fanları" <https://www.bvnair.com/uploads/BDS.pdf> Son Erişim Tarihi: 04 Mayıs 2019.
- Calmidi, V.V., Mahajan, R.L. 2000. Forced convection in high porosity metal foams. *ASME Journal of Heat Transfer*, 122 (3), 557-565.
- Chen, C. 2007. Forced convection heat transfer in microchannel heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(11-12), 2182-2189.
- Dahil, L., 2017. Alüminyum Köpük Malzemenin Dinamik Davranışlarının İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*
- Dukhan, N., Chen, K.C. 2007. Heat transfer measurements in metal foam subjected to constant heat flux. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 624-631.
- Ejlali A., Ejlali, A., Hooman, K., Gurgenci, H. 2009. Application of high porosity metal foams as air-cooled heat exchangers to high heat load removal systems. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36, 674-679.
- Ekşilioğlu, A., 2004. Sıcaklık, Çözücü ve Ek Karbon Malzemelerin Mezofaz Zift Bazlı Karbon Köpüğünün Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Feng, S.S., Kuang, J.J., Wen, T., Lu, T.J., Ichimiya, K. 2014. An experimental and numerical study of finned metal foam heat sinks under impinging air jet cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 77, 1063-1074.
- Fu, X., Viskanta, R., Gore, J.P. 1998. Measurement and correlation of volumetric heat transfer coefficients of cellular ceramics. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 17, 285-293.
- Gallego, N.C., Klett, J.W. 2003. Carbon foams for thermal management. *Carbon*, 41, 1461-1466.
- Garrity, P., Klausner, J., Mei, R. 2010. Performance of Aluminum and Carbon Foams for Air Side Heat Transfer Augmentation. *Journal of Heat Transfer*, 132(12), 121901.
- Hafeez, P., Chandra, S., Mostaghimi, J., 2016. Heat Transfer During High Temperature Gas Flow Through Metal Foam Heat Exchangers. *Journal of Heat Transfer*, 12, 1623-1634.

- Hwang, J.J., Hwang, G.J., Yeh, R.H., Chao, C.H. 2002. Measurement of interstitial convective heat transfer and frictional drag for flow across metal foams. *Journal of Heat Transfer*, 124, 120-129.
- Jafarizade, A., Panjepour, M., Meratian, M., Emami, M., D., 2019. Numerical Simulation of Gas/Solid Heat Transfer in Metallic Foams: A General Correlation for Different Porosities and Pore Sizes. *Transport in Porous Media*, 127, 481-506.
- Jeng, T.M., Tzeng, S.C., Hung, Y.H. 2006. An analytical study of local thermal equilibrium in porous heat sinks using fin theory. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 1907-1914.
- Jeng, T.M., Tzeng, S.C. 2005. Numerical study of confined slot jet impinging on porous metallic foam heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 4685-4694.
- Kalkan, Y., 2012. Vakum Döküm Yöntemi İle Açık Gözenekli Alüminyum. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Keysight “System DC Power Supplies”
<https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-1330EN.pdf?id=509788>
 Son Erişim Tarihi: 04 Mayıs 2019.
- Kılıç, M., 2015. Biyokütle Esaslı Karbon Köpük Üretimi ve Karakterizasyonu. Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Kim, D., Y., Kim, K., C., 2019. an Experimental Study on The Thermal and Hydraulic Characteristics of Open-Cell Nickel and Copper Foams For Compact Heat Exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 130, 162-174.
- Kim, S., Kim, D., Lee, D. 2000. On the local thermal equilibrium in microchannel heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(10), 1735-1748.
- Kurtbas, I., Celik, N. 2009. Experimental investigation of forced and mixed convection heat transfer in a foam-filled horizontal rectangular channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 1313-1325.
- Leong, K., Jin, L. 2008. Study of Highly Conductive Graphite Foams in Thermal Management Applications. *Advanced Engineering Materials*, 10(4), 338-345.
- Leong, K., Li, H., Jin, L., Chai, J. 2010. Numerical and experimental study of forced convection in graphite foams of different configurations. *Applied Thermal Engineering*, 30(5), 520-532.
- Leong, K.C., Jin, L.W. 2006. Effect of oscillatory frequency on heat transfer in metal foam heat sinks of various pore densities. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 671-681.
- Li, H., Zhang, C., Yang, D., Sun, B., Hong, W., 2019. Experimental Investigation on Flow Boiling Heat Transfer Characteristics of R141b Refrigerant in Parallel Small Channels Filled With Metal Foam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 133, 21-35.
- Lim, K., Roh, H. 2005. Thermal characteristics of graphite foam thermosyphon for electronics cooling. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 19 (10), 1932-1938.
- Lin, W., Sundén, B., Yuan, J. 2013. A performance analysis of porous graphite foam heat exchangers in vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 50, 1201-1210.

- Lua, W., Zhao, C.Y., Tassou, S.A. 2006. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers. Part I: Metal-foam filled pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 2751-2761.
- Mahjoob, S., Vafai, K. 2008. A synthesis of fluid and thermal transport models for metal foam heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 3701-3711.
- Mohammadimehr, A., 2018. Görüntü İşleme Yöntemi İle Grafit Köpüğün Termo Fiziksel Özelliklerinin Tayini. Yüksek Lisans, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Poco Graphite Inc. “POCOFoam@ Material Properties”. <http://www.poco.com/portals/0/literature/semiconductor/78962v2pocofoamflyer.pdf>, Son erişim tarihi:04 Temmuz 2015.
- Şerbetçi, İ., O., 2018. Metalik Köpüklerin Taşıtlarda Isı Değiştiricisi Olarak Kullanımının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Sertakar, A., G., 2008. Demineralize Asfaltitten Karbon Köpük Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Shi, J., Zheng, G., Chen, Z., 2019. Experimental Investigation on Flow Condensation in Horizontal Tubes Filled With Annular Metal Foam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 116, 920-930.
- Sığırtmaç, T., 2010. Metal Köpük Malzemelerin Üretim Sonrası Kesme Ve Birleştirme İşlemlerinin Deneysel Verilerden Yararlanarak Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Solmuş, İ. 2015. Numerical investigation of heat transfer and fluid flow behaviors of a block type graphite foam heat sink inserted in a rectangular channel. *Applied Thermal Engineering*, 78, 605-615.
- Straatman, A.G., Gallego, N.C., Thompson, B.E., Hangan, H. 2006. Thermal characterization of porous carbon foam-convection in parallel flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 1991-1998.
- Termopar “ TC ve RT Kablolari” <http://termopar.com.tr/kablo.asp> Son Erişim Tarihi: 04 Mayıs 2019.
- Wu, Z., Caliot, C., Flamant, G., Wang, Z. 2011. Numerical simulation of convective heat transfer between air flow and ceramic foams to optimise volumetric solar air receiver performances. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 1527-1537.
- Xu, H., Gong, L., Huang, S., Xu, M. 2014. Non-equilibrium heat transfer in metal-foam solar collector with no-slip boundary condition. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 76, 357-365.
- Yang, Y.T., Hwang, M.L. 2009. Numerical simulation of turbulent fluid flow and heat transfer characteristics in heat exchangers fitted with porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 2956-2965.
- Yu, Q., Straatman, A.G., Thompson, B. E. 2006. Carbon-foam finned tubes in air-water heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 26, 131-143.

ÖZGEÇMİŞ

Gürşah GÜRÜF 1993 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve ortaokul öğrenimini İstanbul'da ve Lise öğrenimini Tokat'ta tamamladı. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı. 2016 yılında aynı üniversitede yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitimine devam ederken 2019 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaya başladı.

