

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI GÖZENEKLİ ORTAMLARDA AKIŞ VE ISI GEÇİŞİNİN DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erdem YILDIZ
DANIŞMAN: Dr. Öğr.Üyesi Mustafa Yasin GÖKASLAN

VAN-2023

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI GÖZENEKLİ ORTAMLARDA AKIŞ VE ISI GEÇİŞİNİN DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erdem YILDIZ

VAN-2023

KABUL VE ONAY SAYFASI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Yasin GÖKASLAN danışmanlığında, Erdem YILDIZ tarafından sunulan “**Farklı Gözenekli Ortamlarda Akış ve Isı Geçişinin Deneysel Olarak İncelenmesi**” isimli bu çalışma Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili hükümleri gereğince 23/02/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile başarılı bulunmuş ve Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Doç. Dr. Faruk YEŞİLDAL

İmza:

Üye: Dr. Öğr. Ü. Mustafa Yasin GÖKASLAN

İmza:

Üye: Dr. Öğr. Ü. Altuğ KARABEY

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/..../..... tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

İmza

.....
Enstitü Müdürü

ETİK BEYANI

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

(İmza)

Erdem YILDIZ

ÖZET

FARKLI GÖZENEKLİ ORTAMLARDA AKIŞ VE ISI GEÇİŞİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

YILDIZ, Erdem

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Yasin GÖKASLAN

Şubat 2023, 172 sayfa

Dünyanın ve ülkemizin gelişerek büyüyen sanayisine hem bilimsel hem de teknolojik alanlarda ciddi katkısının olacağı bu yapılan çalışmada literatürde deneysel olarak yeterince çalışma olmadığından daha sonra yapılacak birçok çalışmaya da kaynaklık ederek büyük katkı sağlayacaktır.

Eklemeli imalat sayesinde küçük hacimli, hafif ve üretim maliyetlerinin düşük olduğu gözenekli ortamlar üretilebilir. 3D yazıcılar kullanılarak eklemeli imalat ile oluşturulan PLA ve ABS içerikli polimer parçalar kanal içerisine yerleştirilmiştir. Elde edilen gözenekli ortamların gözeneklilikleri sırasıyla %67 ve %78 olarak hesaplanmıştır.

Hava akışı ile yapılan deneylerde, kanal hidrolik çapına göre Reynolds sayıları 2882.9 – 30990 ve geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayıları 9.62 – 121.4 aralığındadır. Bu aralıkta yapılan deneyler gözenekli ortamın Türbülans akış rejimine karşılık gelmektedir. Basınç düşüşü ile hız arasındaki ilişki ikinci dereceden polinom olarak elde edilmiştir. Gyroid tasarımındaki gözenekli ortamın geçirgenliği ve şekil sürüklenme katsayısı PLA için sırasıyla $2.79 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ ve ABS için $5.52 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ ve 0.09 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca gyroid şekilli gözenekli ortamlar için geçirgenliğe bağlı olarak sürtünme katsayıları sunulmuştur.

PLA ve ABS malzemelerinden üretilmiş gözenekli ortamların alt yüzeyinden sabit ısı akısı uygulayarak ısı geçişi deneysel incelenmiştir. Kanalın içerisinin boş olması, PLA ve ABS malzemeli gözenekli ortam olması durumlarında Nusselt sayısı ile Reynolds sayısı arasındaki ilişki verilmiştir. Ayrıca deneyde kullanılan gözenekli ortamlar için de geçirgenliğe göre hesaplanmış Nusselt ve Reynolds sayıları arasındaki ilişki de araştırılmıştır. Bu çalışma sayesinde üç boyutlu yazıcılar ile üretilmiş gyroid şekilli gözenekli ortamların basınç düşüşü ve ısı geçişi hakkında bilgi verilmektedir.

Anahtar kelimeler: Basınç Düşüşü, Gözenekli Ortam, , Isı Geçişi, Sürtünme Faktörü, Türbülanslı Akış

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FLOW AND HEAT TRANSFER IN DIFFERENT POROUS MEDIA

YILDIZ, Erdem

MSc. Thesis Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Mustafa Yasin GÖKASLAN

February 2023, 172 pages

Studies are carried out on heat transfer and pressure drop in both scientific and technological fields to the developing and growing industry of the world and our country. This thesis study, which examines the heat transfer and pressure drop of polymer-based porous media produced from 3D printers, which is one of the new production methods, will make a great contribution to the literature.

Thanks to additive manufacturing, porous media with small volume, light weight and low production costs can be produced. Polymer parts containing PLA and ABS, which were created by additive manufacturing using 3D printers, were placed in the channel. The porosity of the obtained porous media was calculated as 67% and %78 respectively.

In the experiments with air flow, Reynolds numbers are between 2882.9 - 30990 according to duct hydraulic diameter and Reynolds numbers calculated according to permeability are in the range of 9.62 – 121.4. Experiments in this range correspond to the turbulent flow regime of the porous medium. The relationship between pressure drops and velocity is obtained as a quadratic polynomial. The permeability and shape drift coefficient of the porous media in the gyroid design were calculated as for PLA porous media $2.97 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ and 0.07, and for ABS porous media $5.52 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ and 0.09 respectively. In addition, the friction factor based on permeability is presented for the gyroid-shaped porous media.

Heat transfer is also investigated experimentally by applying constant heat flux from the bottom surface of porous media made of PLA and ABS porous media. The relation between the Nusselt number and the Reynolds number is given in cases where the channel is empty and there is a porous medium with PLA and ABS material. In addition, the relation between Nusselt and Reynolds numbers based on permeability is also investigated. Thanks to this study, information is given about the heat transfer and pressure drop of gyroid-shaped porous media produced with 3D printers.

Keywords: Friction Factor, Heat Transfer, Porous Media, Pressure Drop, Turbulence Flow



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının belirlenmesi ve sonuçlandırılması aŐamalarında, tezimi inceleyerek gürőŐ ve öneriyle tezimi dzenlememe yardımcı olan değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Ü. Mustafa Yasin GÖKASLAN'a teŐekkürlerimi sunarım.

Başta Makine Mühendisliği bölüm başkanımız değerli hocam Sayın Doç. Dr. İrfan UÇKAN olmak üzere bütün bölüm hocalarıma ve asistanlarına teşekkür ederim.

Yüksek lisans tezimin hazırlanması aŐamasında ve tüm öğretim süreci boyunca manevi desteklerini sürekli yanımda hissettiğim kıymetli aileme ve eŐime teŐekkürlerimi sunarım.

2023

Erdem YILDIZ



İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|--|-------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | iii |
| TEŞEKKÜR | v |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| ÇİZELGELER LİSTESİ | ix |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | xi |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | xiii |
| EKLER DİZİNİ | xvii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ | 9 |
| 3. MATERYAL VE METOD | 25 |
| 3.1. Gözenekliliğin Belirlenmesi | 25 |
| 3.2. Gözenekli Ortamın İmalatı | 26 |
| 3.3. Basınç Ölçümleri | 32 |
| 3.4. Sıcaklık Ölçümleri | 33 |
| 3.5. Belirsizlik Analizi | 34 |
| 3.6. Basınç Düşüşü Deneyleri | 35 |
| 3.7. Isı Geçişi Deneyleri | 44 |
| 3.7.1. Kanalın Boş Olması Durumunda Isı Geçişi Deneyleri | 46 |
| 3.7.2. Kanalın Gözenekli Ortam Olması Durumunda Isı Geçişi Deneyleri | 51 |
| 3.7.2.1. ABS Malzemesinden Üretilen Gözenekli Ortamda Isı Geçişi Deneyleri | 51 |
| 3.7.2.2. PLA Malzemesinden Üretilen Gözenekli Ortamda Isı Geçişi Deneyleri | 57 |
| 4. SONUÇLAR | 63 |
| 4.1. Basınç Düşüşü Deney Çalışmaları | 65 |
| 4.2. Isı Geçişi Deney Sonuçları | 69 |
| 4.2.1. Boş Kanalda Isı Geçişi Deney Sonuçları | 69 |
| 4.2.2. Gözenekli Kanalda Isı Geçişi Deney Sonuçları | 71 |
| 4.3. Öneriler | 75 |
| KAYNAKLAR | 77 |
| EKLER | 81 |
| ÖZGEÇMİŞ | 143 |



ÇİZELGELER LİSTESİ

| | |
|---|----|
| Çizelge 3.1. Gözenekli ortamların gözeneklilik değerleri..... | 26 |
| Çizelge 3.2. Film ısıtıcının termokulp yerleşim planı | 31 |
| Çizelge 3.3. Deney verilerindeki belirsizlikler | 35 |
| Çizelge 3.4. Gözenekli ortamlarda basınç deneyleri | 37 |
| Çizelge 3.5. Deney verilerinden elde edilen geçirgenlik, Forchhimer katsayıları | 43 |
| Çizelge 3.6. Gözenekli ortamda ısı geçişi deneysel bilgileri..... | 46 |
| Çizelge 4.1. Aynı şartlardaki deney verileri | 74 |



ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Şekil 1.1. Deney düzeneği şematik görseli (Gururatana ve ark., 2020) | 3 |
| Şekil 1.2. Isı eşanjörünün cad görseli (Wang ve ark., 2019)..... | 4 |
| Şekil 1.3. Enine kesit görseli (Ahmadi ve Bigham, 2022) | 5 |
| Şekil 1.4. Açık hücreli yapının görüntüsü (Fratlocchi ve ark., 2020) | 6 |
| Şekil 1.5. Ofsetli elmas kafeste boşluk tipleri (Do ve ark., 2020)..... | 7 |
| Şekil 2.1. Deney düzeneğinin şematik görseli (N.Dukhan, 2006) | 9 |
| Şekil 2.2. TPMS yapıları a) Primitif b)IWP (Qureshi ve ark., 2022)..... | 10 |
| Şekil 2.3. Kompozit Fan Prototip tasarımı a) Fanın 3B Modelinin Üstten Görünümü b) Deformasyon Modelinin Üstten Görünümü c) Deformasyon Modelinin İzometrik Görünümü (Zouboulis ve ark., 2022) | 11 |
| Şekil 2.4. Fan Deneysel Değerlendirilme Kurulumu a) Şematik b) Fiziksel Düzenek (Zouboulis ve ark., 2022)..... | 12 |
| Şekil 2.5. Deneysel test düzeneği (Vafadar ve ark., 2021)..... | 13 |
| Şekil 2.6. 10 PPM Alüminyum Köpük ve Temsili Resmi (Mancin ve ark., 2010)..... | 14 |
| Şekil 2.7. Deney Düzeneğinin Şematik Görseli (Dukhan ve ark., 2012)..... | 15 |
| Şekil 2.8. CFD Modelleri a) Diamond Solid b) Gyroid Solid c) Gyroid Sheet (Alketean ve ark., 2020) | 16 |
| Şekil 2.9. Gyroid Sıcaklık Kontürü a) Sıcak-Soğuk Arayüz b) Enine Kesit (Khan ve ark., 2022) | 17 |
| Şekil 2.10. Hidrolik Performansı Analizi İçin Kurulan Düzenek (Khalil ve ark., 2022) 18 | |
| Şekil 2.11. Suyu Isıtmak için Kullanılan Eşanjör (Dutkowski ve ark.2022)..... | 19 |
| Şekil 3.1. a) PLA ve b) ABS malzemelerinden üretilmiş Gyroid yapıda gözenekli ortam | 27 |
| Şekil 3.2. a) Film ısıtıcı, b) Film ısıtıcıya termokupların yerleştirilmesi c) Isıtıcının bakır levha ile kaplanması | 28 |
| Şekil 3.3. Deney tesisatı | 29 |
| Şekil 3.4. Deney tesisatı görseli..... | 32 |
| Şekil 3.5. Termokupl Teli..... | 33 |
| Şekil 3.6. PLA gözenekli ortamda basınç düşüşü ile hız arasındaki ilişki | 38 |
| Şekil 3.7. Sürtünme faktörleri ile Re_K arasındaki ilişkisi | 41 |
| Şekil 3.8. ABS gözenekli ortamda basınç düşüşü ile hız arasındaki ilişki..... | 42 |

| | |
|---|----|
| Şekil 3.9. Sürtünme faktörleri ile Re_K arasındaki ilişki..... | 43 |
| Şekil 3.10. Farklı malzemelerden üretilen gözenekli ortamların birim uzunluk başına düşen basınç düşüşü ile hız arasındaki ilişki | 44 |
| Şekil 3.11. Boş kanala ait sıcaklıkların konumla değişimi..... | 47 |
| Şekil 3.12. Boş kanal için yerel Nusselt sayılarının konumla değişimi | 49 |
| Şekil 3.13. Nusselt sayısı Reynolds sayısı arasındaki ilişki | 50 |
| Şekil 3.14. ABS gözenekli ortamda yüzey ve akışkan sıcaklıklarının konumla değişimi | 52 |
| Şekil 3.15. ABS gözenekli ortamda ısıl olarak tam gelişmiş bölge tespiti..... | 53 |
| Şekil 3.16. Yerel Nusselt sayısının konuma göre değişimi | 54 |
| Şekil 3.17. Kanal hidrolik çapına göre hesaplanmış Nusselt sayısının Reynolds sayısı arasındaki ilişki..... | 55 |
| Şekil 3.18. Geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısı ve Nusselt sayısının ilişkisi | 56 |
| Şekil 3. 19. PLA gözenekli ortamda yüzey ve akışkan sıcaklıklarının konumla değişimi | 58 |
| Şekil 3. 20. PLA gözenekli ortamda ısıl olarak tam gelişmiş bölge tespiti..... | 59 |
| Şekil 3. 21. Yerel Nusselt sayısının konuma göre değişimi | 60 |
| Şekil 3. 22. Kanal hidrolik çapına göre hesaplanmış Nusselt sayısının Reynolds sayısı arasındaki ilişki..... | 61 |
| Şekil 3. 23. Geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısı ve Nusselt sayısı ilişkisi.. | 62 |
| Şekil 4.1. Basınç düşüşünün literatürle kıyaslanması | 67 |
| Şekil 4.2. Sürtünme faktörünün literatürle kıyaslanması | 68 |
| Şekil 4.3. Boş kanalda yapılan ısı geçişi sonuçlarının literatürle kıyaslanması | 70 |
| Şekil 4.4. Nusselt sayılarının Literatürle kıyaslanması | 72 |
| Şekil 4.5. Kanal hidrolik çapına göre nusselt sayısının literatürle kıyaslanması | 73 |
| Şekil 4. 6. Gözenekli ortamların Nusselt sayılarının boş kanalla kıyaslanması | 74 |
| Şekil 4. 7. Farklı drurumlarda yüzey sıcaklıklarının kıyaslanması | 75 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| Simgeler | Açıklama |
|-----------------------|---|
| A | Alan (m^2) |
| A_c | Kanal kesit alanı (m^2) |
| a | Hava kanalı genişliği (mm) |
| b | Hava kanalı yüksekliği (mm) |
| c_p | Özgül ısı (J/kgK) |
| d_h | Kanal hidrolik çap (m) |
| F | Forchheimer (Şekil sürüklenme) katsayısı |
| f | Sürtünme faktörü |
| h | Isı taşınım katsayısı (W/m^2K) |
| i | Akım (A) |
| k | Isı iletim katsayısı (W/mK) |
| K | Geçirgenlik (m^{-1}) |
| L | Uzunluk (m) |
| m | Kütleli debi (kg/s) |
| Nu | Kanal hidrolik çapına göre hesaplanmış Nusselt sayısı |
| Nu_p | Gözenekli ortam için hesaplanmış Nusselt sayısı |
| Nu_K | Geçirgenliğe göre hesaplanmış Nusselt sayısı |
| P | Basınç (Pa) |
| Pr | Prandtl sayısı |

Simgeler**Açıklama**

| | |
|---------------------------------|--|
| q'' | Isı akısı (W/m^2) |
| Re | Kanal hidrolik çapına göre hesaplanmış Reynolds sayısı |
| Re_k | Geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısı |
| T_s | Yüzey sıcaklığı ($^{\circ}C$) |
| T_f | Akışkan sıcaklığı ($^{\circ}C$) |
| u_m | Ortalama hava hızı (m/s) |
| V | Hacim (m^3) |
| V_t | Temsili Birim Hacim |
| x | Konum (mm) |
| ρ | Yoğunluk (kg/m^3) |
| ε | Gözeneklilik |
| Δ | Fark |
| ΔP | Basınç Düşüşü (Pa) |
| μ | Dinamik viskozite (Pa.s) |
| v | Kinematik viskozite ($m^2.s^{-1}$) |

Simgeler**Açıklama**

| | |
|------------|----------|
| eff | Efektif |
| f | Akışkan |
| i | Giriş |
| k | Katı |
| m | Ortalama |

Simgeler

Açıklama

p

Gözenekli ortam





EKLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|---|-----|
| EK - 1. PLA Gözenekli ortamda Basınç Düşüşü Deney Sonuçları..... | 81 |
| EK - 2. ABS Gözenekli ortamda Basınç Düşüşü Deney Sonuçları..... | 84 |
| EK - 3. Boş Kanal Isı Geçiş Deneyleleri..... | 87 |
| EK - 3.1. Boş kanal sıcaklık konum değişimi | 87 |
| EK - 3.2. Boş kanal sıcaklık konum değişimi | 88 |
| EK - 3.3. Boş kanal sıcaklık konum değişimi | 89 |
| EK - 3.4. Boş kanal sıcaklık konum değişimi | 90 |
| EK - 3.5. Boş kanal sıcaklık konum değişimi | 91 |
| EK - 3.6. Boş kanal sıcaklık konum değişimi | 92 |
| EK - 3.7. Boş kanal sıcaklık konum değişimi | 93 |
| EK - 3.8. Boş kanal sıcaklık konum değişimi | 94 |
| EK - 3.9. Boş kanal sıcaklık konum değişimi | 95 |
| EK - 4. ABS Malzemeli Gözenekli Ortamda Isı Geçiş Deney Sonuçları | 96 |
| EK - 4.1. Sıcaklık konum ilişkisi..... | 96 |
| EK - 4.2.Sıcaklık konum ilişkisi..... | 97 |
| EK - 4.3.Sıcaklık konum ilişkisi..... | 98 |
| EK - 4.4. Sıcaklık konum ilişkisi..... | 99 |
| EK - 4.5. Sıcaklık konum ilişkisi..... | 100 |
| EK - 4.6. Sıcaklık konum ilişkisi..... | 101 |
| EK - 4.7. Sıcaklık konum ilişkisi..... | 102 |
| EK - 4.8. Sıcaklık konum ilişkisi..... | 103 |
| EK - 4.9. Sıcaklık konum ilişkisi..... | 104 |
| EK - 4.10. Sıcaklık konum ilişkisi..... | 105 |
| EK - 4.11.Sıcaklık konum ilişkisi..... | 106 |
| EK - 4.12. Sıcaklık konum ilişkisi..... | 107 |
| EK - 4.13. Sıcaklık konum ilişkisi..... | 108 |
| EK - 4.14. Sıcaklık konum ilişkisi..... | 109 |
| EK - 4.15. Sıcaklık konum ilişkisi..... | 110 |

| | |
|--|-----|
| EK - 4.16. Sıcaklık konum ilişkisi..... | 111 |
| EK - 4.17. Sıcaklık konum ilişkisi..... | 112 |
| EK - 4.18. Sıcaklık konum ilişkisi..... | 113 |
| EK - 4.19. Sıcaklık konum ilişkisi..... | 114 |
| EK - 4.20. Sıcaklık konum ilişkisi..... | 115 |
| EK - 4.21. Sıcaklık konum ilişkisi..... | 116 |
| EK - 4.22. Sıcaklık konum ilişkisi..... | 117 |
| EK - 5. ABS Malzemeli Gözenekli Ortamda Isı Geçişi Deney Sonuçları | 118 |
| EK - 5.2. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 118 |
| EK - 5.3. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 119 |
| EK - 5.4. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 120 |
| EK - 5.5. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 121 |
| EK - 5.6. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 122 |
| EK - 5.7. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 123 |
| EK - 5.8. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 124 |
| EK - 5.9. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 125 |
| EK - 5.10. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 126 |
| EK - 5.11. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 127 |
| EK - 5.12. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 128 |
| EK - 5.13. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 129 |
| EK - 5.14. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 130 |
| EK - 5.15. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 131 |
| EK - 5.16. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 132 |
| EK - 5.17. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 133 |
| EK - 5.18. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 134 |
| EK - 5.19. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 135 |
| EK - 5.20. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 136 |
| EK - 5.21. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 137 |
| EK - 5.22. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 138 |
| EK - 5.23. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 139 |
| EK - 5.24. Sıcaklık Konum ilişkisi..... | 140 |

EK - 5.25. Sıcaklık Konum ilişkisi..... 141



1. GİRİŞ

Gelişerek artan ihtiyaçlar ve yükselişte olan nüfus doğrultusunda teknoloji ve sanayideki gelişmeye olan talebi de beraberinde artırmaktadır. Hayatımızı kolaylaştıran ve enerji gibi temel ihtiyaçlarımıza cevap vererek günlük yaşamda kullanılan bir çok makine ısıtma ve soğutma başta olmak üzere, arıtma, ayrıştırma vb. alanlarda çeşitli tasarımsal mimarilere ihtiyacı beraberinde getirmektedir. Üzerinde çok çeşitli çalışmalar yapılan enerji alanında olduğu kadar kimyasal, elektriksel, mekaniksel veya ısıtma-soğutma gibi farklı alanlarda bulunabilmektedir.

Türkiye, geçtiğimiz 20 yılda iktisadi işbirliği ve kalkınma teşkilatı ülkeler arasında enerji talebinin en hızlı arttığı ülke olup tasarrufa ve teknolojik döngüye de en fazla dikkat etmesi gereken bir durumdadır.

Bu dönemde, elektrik ve doğalgaz talep artışında Çin'den sonra dünyada ikinci sırada Türkiye gelmektedir. Enerji talebini karşılamakta yaklaşık %74 oranında dışa bağımlı olan Türkiye enerjide bölgesel ticaret merkezi olmak yerli ve yenilenebilir enerji modelleri ile teknolojik yeniliklerinde merkezi olmayı hedeflemektedir.

Halihazırdaki enerjiyi ısıtma soğutma, ulaşım ve birçok makede kullandığımızdan hayatımızın hemen hemen her alanında ihtiyaç olduğu için aynı oranda da mühendislik faaliyetlerine de ihtiyaçlar doğrultusunda talep artmaktadır. Farklı endüstrilerde CO₂ azaltımına yönelik talep artmaktadır. Uluslararası enerji ajansı iklim değişikliklerine önemli katkıda bulunan küresel CO₂ emisyon değerlerinde artışların olacağını ifade edilmektedir. Yüksek hesaplama gücünün sürekli artan talepleri daha gelişmiş ve verimli soğutma sistemlerine yönelik karmaşık yapıdaki tasarımların katmanlı imalat teknikleri ile kolaylaştırılmaktadır.

Ülkemiz açısından ithal edilen veya üretilen enerjiyi geri kazanma uygulamalarının geliştirilmesi ve enerji tasarrufu ciddi önem arz etmekte olup maliyetlerin indirilmesi açısından mühendislere, akademisyenlere ve işbirliği içerisindeki imalatçılara yeni sistemlerin buluşu için gerek deneysel gerekse sayısal çalışmalar yapmaya zorlanmaktadır.

Ülkemiz ve dünyanın gelişerek büyüyen sanayisine hem bilimsel hem teknolojik alanlarda katkısının olacağı bu çalışmada literatürde deneysel olarak yeterince çalışma olmadığından daha sonra yapılacak bir çok çalışmaya da kaynaklık ederek büyük katkı sağlayacaktır.

Sanayi ve literatürde metal bazlı tasarımlar ele alınmış olup polimer içerikli çalışama ve uygulamalar yeni ve gelişen üç boyutlu yazıcı teknolojileri ile yaygınlaşmaktadır.

Endüstride yüksek ısı geçiş katsayılarına ulaşabilmek için imalat yöntemlerini çeşitlendirmekle beraber sisteme göre ihtiyaç duyulan geometrilerinde tasarımları karmaşık bir geometriye sahip olmaya başlamıştır. Sistemlerde ısı geçişini bazı yöntemlerle artırmak mümkün bunlar; sisteme ilave parçaların uygulanması, yüzeylerin hareket ettirilmesi, bazı mekanik kollar ile akışkanın cinsine göre karıştırılması veya titreşim oluşumunu sağlayarak aktif sonuçlara ulaşılabilmektedir (Akadırcı, 2015).

Isı geçişinin oluşmasının istendiği bölgelerde veya parçaların yüzeyinin eğer geleneksel imalat yöntemi tercih edilecekse CNC vb. makinalarda işlenmesi, parça veya bölge yüzeylerinin kaplanması, üzerine ilave parça montajları ile akışa laminer veya türbülanslı olarak yön verip ısı geçişinde optimizasyon çalışmaları yapılabilmektedir.

Isı geçişinin iyileştirilmesi gerektiğinde, yüksek ısı geçişi katsayılarına ulaşmak gerekir. Sıcak veya soğuk akışkanlar arasındaki sıcaklık farkını değiştirmek, geometrinin boyutlarını düşürerek maliyeti azaltarak ulaşılabilecek en verimli sistemi elde etmek mümkündür. Yapılan bir çok çalışmanın temelinde sistem içindeki akışın türbülanslı formda ilerlemesiyle ısı geçişini artırma amaçlarıdır.

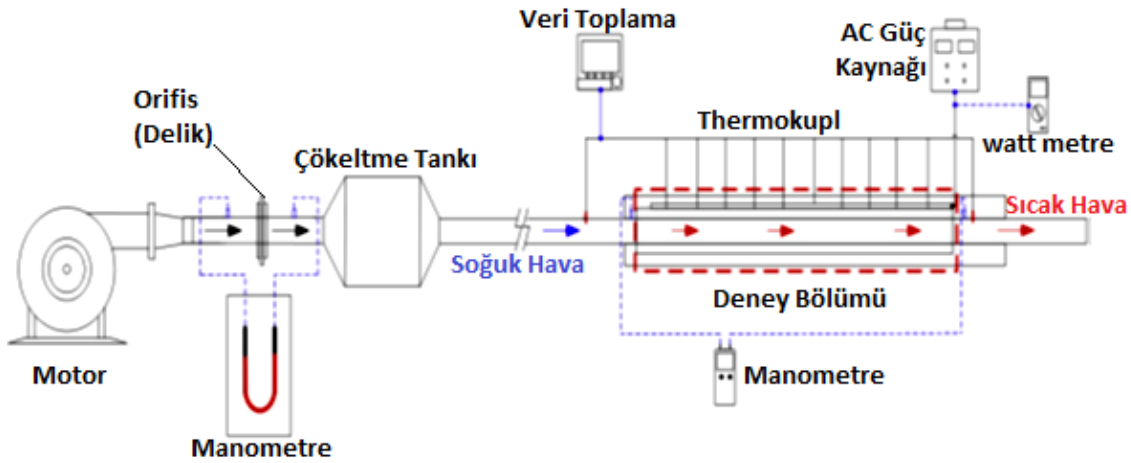
Polimer bazlı malzemeler günümüzde birçok ısı uygulamalarında kullanılmaktadır. Uygulama alanlarına göre polimer malzeme kullanımının avantajları ve dezavantajları vardır. Yüksek sıcaklıklarda bu malzemelerin kullanılması uygun değildir. Düşük ısı iletkenliğine sahip olması ısı geçiş uygulamalarında bir dezavantaj olsa da karmaşık yapıda geometrilerin üretilmesi konusunda avantajlıdır. Böylece yüzeyde istenilen değişiklikler yapılabilir, yüzey artırılabilir ve türbülans etkisi sağlanabilir. Polimer malzeme olarak çok malzeme bulunurken 3D yazıcılarda üretimi en yaygın PLA (Polilaktik Asit) ve ABS (Akrilonitril Bütadien Strien) malzemelerdir.

PLA (Polilaktik Asit), ofis otomasyon ekipmanları, elektrik cihazları, otomotiv sanayisinde bazı araç gövde ve parçalarında hatta evre dostu olması ve biyo uyumluluk

gibi özelliklere sahip olduğundan plastiklerde, paketlemede, ziraat ürünlerinde, medikal alanda doku organ bağları gibi bir çok kullanım alanı bulunmaktadır (Üner vd., 2012).

ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren), hafif ve sert yapıda polimer madde grubunda olup asit ve bazlara karşı dayanıklı olup elektriksel yalıtımı iyi bir maddedir. Borular, otomotiv ve beyaz eşya parçaları, tıbbi emme pompaları gibi bir çok alanda kullanımı hayatımızı kolaylaştırmaktadır.

Isı eşanjöründeki ısı geçiş oranını artırmak için bükümlü, helisel, tel-rulo, kanat vb. uygulamalar mühendislik çalışmalarında yaygın olarak kullanılmakta olup yapılan çalışmalarda eşanjörlerdeki sürtünme ve basınç düşüşünü azaltmaya odaklanılmıştır. Yapılan araştırmalara bağlı olarak ısı eşanjörlerinde ısı performansını artırmak için dalgalı kanatçık uygulamaları çeşitli konfigürasyonlarda genellikle imalat tekniklerinden kaynaklanan alüminyum veya çelik malzemelerden deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmış ve ağır test modellerinden kaynaklı sorunlar ortaya çıkmıştır. Çalışma neticesinde 3D baskı teknolojilerinin tercih edilme sebebi üretilebilirlik, yüksek doğruluk, hızlılık, işlevsellik, hafiflik ve uygun maliyet sağlayacağı görülmüştür (Gururatana vd., 2020).



Şekil 1.1. Deney düzeneği şematik görseli (Gururatana ve ark., 2020)

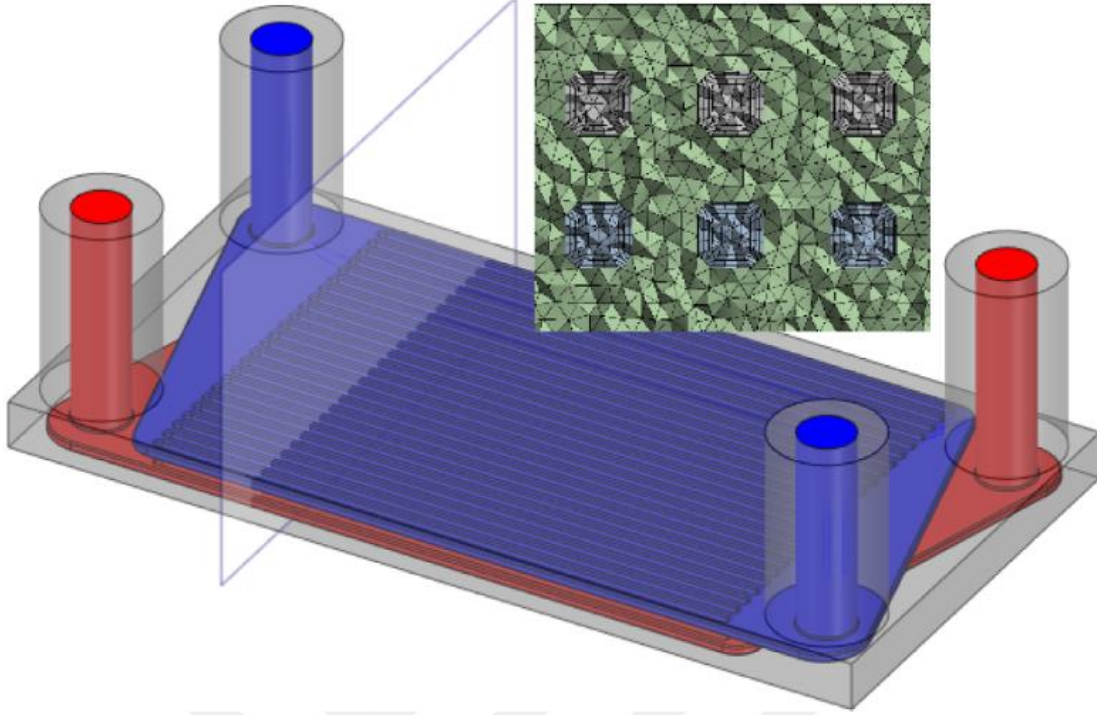
3B fraktal ağacı benzeri bir ısı eşanjörünün hidrolik ve termal özellikleri büyük ölçekte deneysel olarak çalışılmış olup SLA tip 3D yazıcıların verimli, doğru ve güvenilir olduğu kanıtlandığından pürüzsüz yüzeylere sahip şeffaf kanallar basabildiğinden SLA tercih edilmiştir. Deneylerde deiyonize su kullanılarak kanallarda oluşan ısının enerji

dağılımı ve ısı transfer performansı hem deneysel hem sayısal incelenmiş olup 3D baskı teknolojilerinin entegrasyonu değerlendirilmiştir. Deney koşullarında fraktal tabanlı ısı eşanjörü geleneksel ısı eşanjöründen daha yüksek bir COP'ye sahip olduğu belirlenmiştir (Wang vd., 2019).



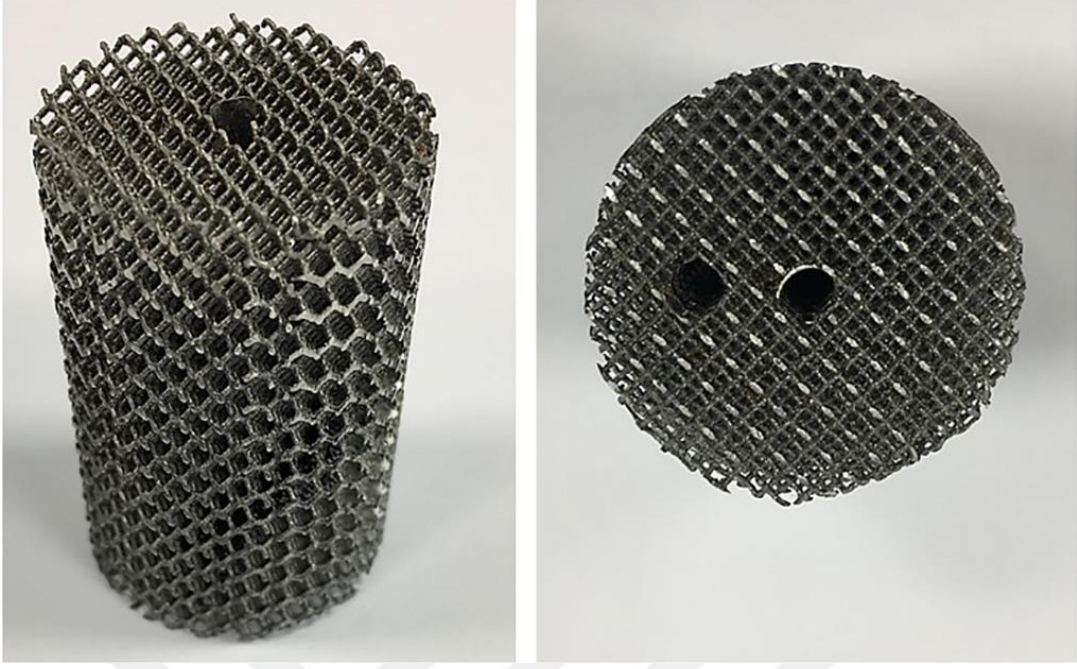
Şekil 1.2. Isı eşanjörünün cad görseli (Wang vd., 2019)

Elektrikli araçlar, tuz arıtma tesisleri, kimyasal üniteler, iklimlendirme sistemleri, enerji santralleri gibi endüstriyel alanlarda ısı eşanjörleri kullanılmakta olup polimer ısı eşanjörleri bazı kritik uygulamalarda metal ısı eşanjörlerine umut verici bir alternatif olarak görülmektedir. 3D baskı ile üretimi yapılan polimer ısı eşanjörleri elektrikli makinelerde termal sargıların soğutulmasını iyileştirmek için pil ünitelerinde kullanılmış olup elektrikli araçlarda da çokça tercih edilmektedir. Polimerler düşük erime ve işleme sıcaklığına sahip olduğundan daha uygun maliyetli çözümler oluşturmaktadır fakat metal eşanjörlerle kıyaslandığında daha düşük termal iletkenliğe sahiptirler. Katkı maddelerinin ekstrüzyon işlemi sırasında ısıl iletkenlikten etkilendiği görülüp düzenlenmiştir (Ahmadi ve Bigham, 2022).



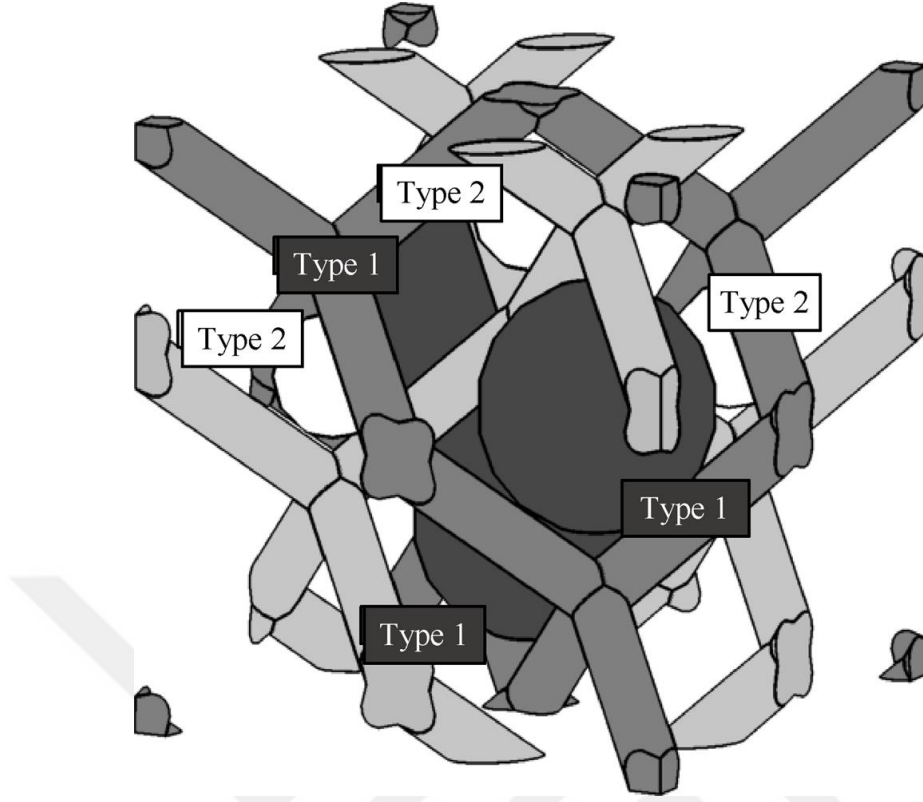
Şekil 1.3. Enine kesit görseli (Ahmadi ve Bigham, 2022)

Yüksek iletkenliğe sahip yoğunlaştırılmış kompakt mikrokanallar, kapalı çapraz akış yapıları, mikro lifli katalizörler ve köpük tasarımları arasından özellikle açık hücreli köpükler ele alınmıştır. Yüksek gözenekliliğe, düşük yoğunluğa, yüksek mekanik özellikleriyle geniş yüzey alanına sahiptirler. Isı transfer özellikleri karmaşık olduğundan buna çözüm olarak giderek yaygınlaşan 3D eklemeli üretim modelleri ile yüksek oranlarda tasarım esnekliği sağlayan daha teknolojik ve tekrarlanabilir üretim tercih edilmiştir. 3D lazer eritme ile üretileim sırasında yaşanan sorunlar nedeniyle dış kaplama 1mm kalınlığa çıkarılıp gözenekli yapıda basınç en aza indirgenerek üretim yapılarak iyileştirmeler sonucunda üretkenliğinde arttığı görülmüştür (Fratolocchi vd. 2020).



Şekil 1.4. Açık hücreli yapının görüntüsü (Fratolocchi vd., 2020)

Özel yapılarda uygulama ihtiyacına göre farklı olarak tasarlanabilir ve üretilebilir. Oluşturulan matris tasarımdaki yüksek gözeneklilik, basınç düşüşüne neden olur ve sıvının radyal karışımı ile ekzo ve endotermik reaksiyonlar sonucu ısı transferi sağlar. Eklemeli imalat tekniklerinin ilginç bir özelliği iç içe geçmiş üretim yapma yeteneği olup yapılan çalışmada tek ve çift iç içe geçmiş yapılar çeşitli hücre geometrisine sahip bir elmas kafese dayanarak tasarlanmıştır. Yapı geometrisi payanda çapı, hücre boyutu ve ofset gibi ayarlanabilir değişkenler ile tasarlandıktan sonra küboit formdan silindirik form çıkarılarak istenilen gözeneklilik elde edilmiştir. Çalışmada ABS malzeme kullanılarak etanol ile şekillendirilmiş ve bilgisayar modelinden elde edilen denklemler doğrulanmıştır (Do vd., 2020).



Şekil 1.5. Ofsetli elmas kafeste boşluk tipleri (Do vd., 2020)

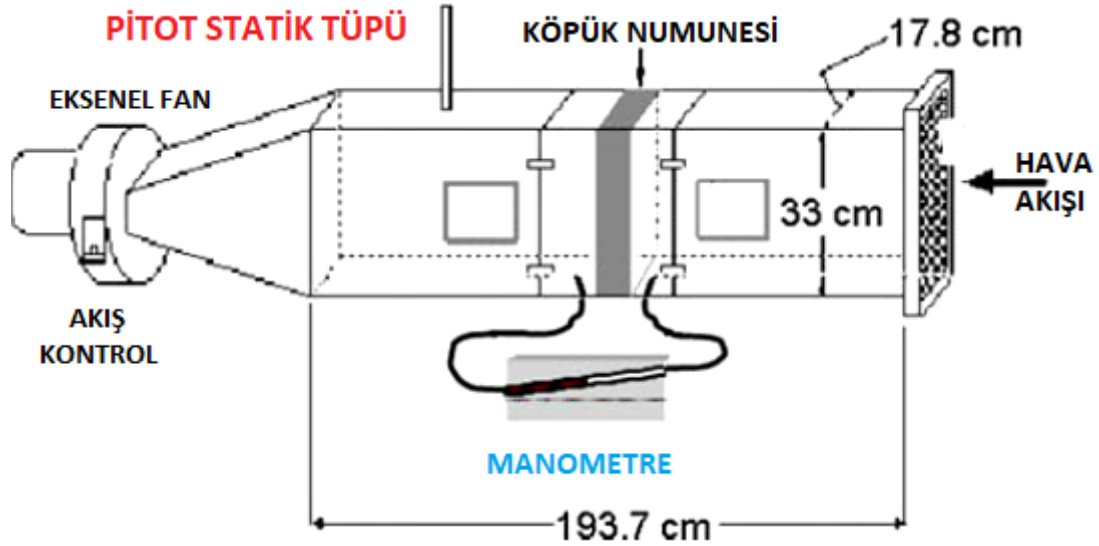
2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ

Literatür taramasında metal seramik ve polimer gibi malzemelerden üretilmiş farklı gözenekli ortamlarda basınç düşüşünü ve ısı geçişini inceleyen çalışmalar incelenmiştir.

Bu çalışmalarda farklı malzeme kombinasyonları ele alınmıştır. Ayrıca farklı geometrilere sahip malzemeler ile bunları üretecek teknolojiler de mevcut olup çalışmaların sonuçlarını kıyaslayabilecek deney ünitelerine de yer verilmiştir.

Mevcut tez çalışmasının farkını ortaya koyabilmek için literatür çalışmaları ve kullanılan yöntemlerin yer aldığı literatür taraması bilgi vermesi amacıyla aşağıda verilmiştir.

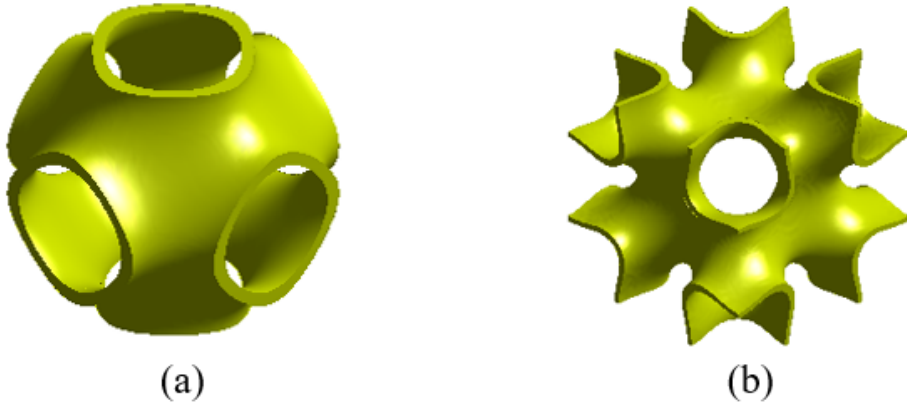
Dukhan (2006), Alüminyum köpük tasarımının gözeneklilik yapısı ve yoğunluğu ele alınmıştır. Basınç düşüşü ile hız arasındaki ilişkiyi, ikinci dereceden polinomla ilişkili olduğunu ifade etmiş olup basınç düşüşünü geçirgenliğe ve Forchhimer katsayısı cinsinden denkleme kullanmıştır. Üretilen düşük gözenekli köpük tasarımlarının yüksek basınç düşüşü oluşturduğu gözlenmiştir. Çalışması deneysel olup deney tesisatı Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Deney düzeneğinin şematik görseli (Dukhan, 2006)

Farklı geçirgenlik için önceki çalışmalarla karşılaştırılıp hem geçirgenlik hem de atalet katsayısı ilişkilendirilmiş ve elde ettiği sonuçları literatüre yakın bulunmuştur.

Qureshi vd. (2022), Üçlü periyodik minimal yüzey yapılarına dayalı mimari örgüler sayısallaştırma ile yüksek güçte ısı emiciler olarak elektronik soğutma uygulamalarına yönelik incelenmiştir. Daha sonra yüksek ısı akışı ve soğutma için çalışılmamıştır. IWP ve Primitif gibi iki TPMS yapı seçilmiş olup Alüminyum tozu ve bakır kullanılmıştır. İncelenen yapıların performansı çok yakın çıktığından mimari etkinin olmadığı görülmüştür. Galyum bazlı soğutucu, beklendiği gibi Parafinik PCM'den daha iyi performans göstermiştir.



Şekil 2.2. TPMS yapıları a) Primitif b)IWP (Qureshi vd., 2022)

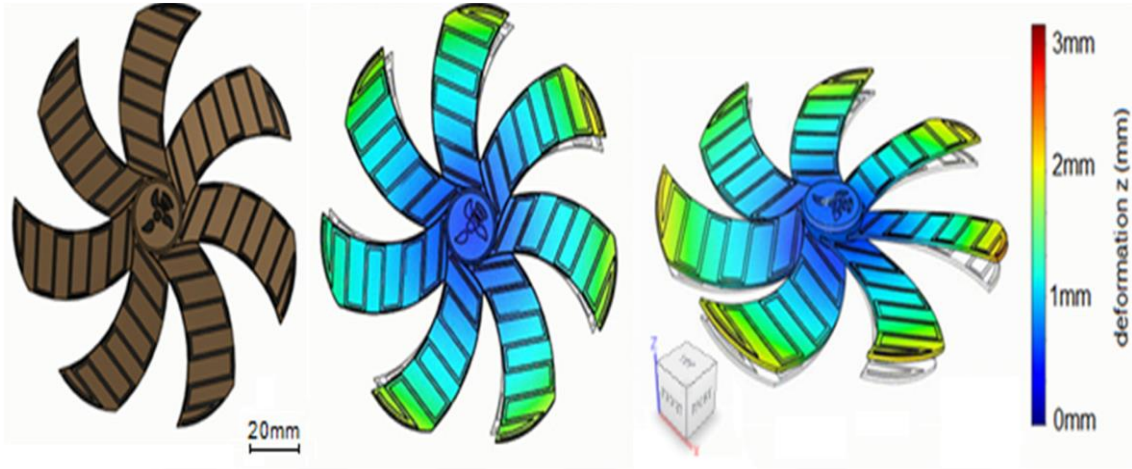
İlkel soğutucu IWP'den daha iyi performans göstermesine rağmen ısı emicinin aşırı ısınmasını engelleyememiştir. Soğutucu malzemede Alüminyum tozundan Bakır'a geçiş olumlu termo-fiziksel durum sayesinde daha iyi sıcaklık azaltıldığını bakır'ın özelliği ile sonuçlanmıştır. Ancak bakır pahalı olduğundan çalışmalarda alüminyum'un dikkate alınması gerekir. Bu nedenle iyi bir maliyet fayda analizi ısı emici malzeme seçiminden önce önerilir.

Dutkowski ve Kruzel (2021), suyun ısı iletkenliği ile ilgili ayrıntılı çalışmaların sonuçlarını sunmaktadır. Mikrokapsüllenmiş bulamacı ve su propilen glikol çözeltilerine dayalı bulamaç kullanılmıştır. Yaklaşık %43 mikrokapsüllü parafin içeren 28 °C'lik bir dönüştürme sıcaklığı ile bulamaçlar elde etmek üzere sıvılar karıştırılmıştır.

Bulamacın sıcaklığındaki artış ısı iletkenliğinde artışa neden olmuştur. Deneysel verilere ek olarak test edilen bulamaç için elde edilen iletkenlik katsayısının deneysel verilerini de içerir. Damıtılmış su ile test ölçümleri yapılmış olup elde edilen veriler

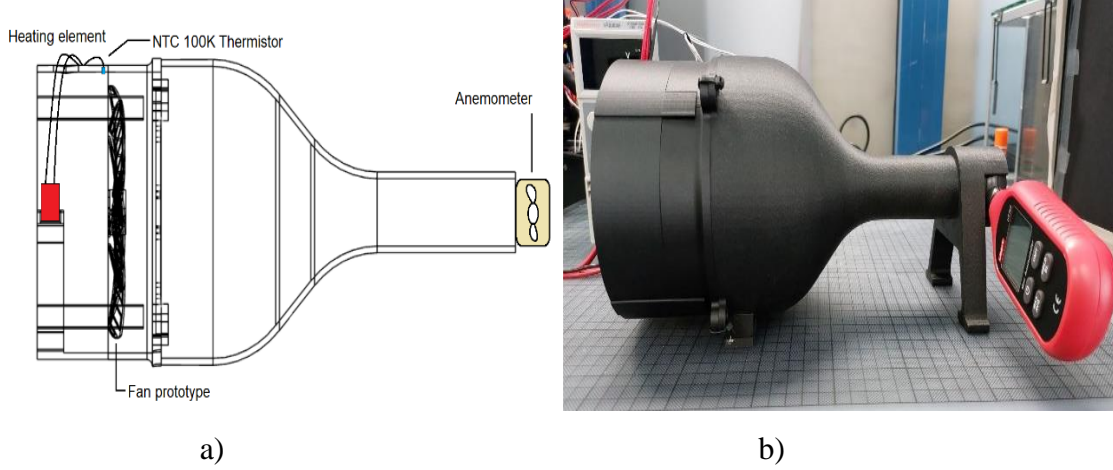
literatür ile karşılaştırılmıştır. Uygulanan yöntem ve test prosedürünün doğru sonuca uygun olduğu kanaatine varılmıştır.

Zouboulis vd. (2022), Polimer alt tabakalar üzerine yazıcı ile basımı yapılan sürekli liflere sahip iki malzemeli kompozit yapılar farklı genleşme katsayılarının neden olduğu termal uyaran altında dönüşüm sergiler. Bu çalışmada böylesi geometri yapıların programlanabilir ve tersine çevrilebilir lif desenleri ve malzemeleri açısından araştırılmıştır.



Şekil 2.3. Kompozit fan prototip tasarımı A) Fanın 3B modelinin üstten görünümü B) Deformasyon modelinin üstten Görünümü C) Deformasyon modelinin izometrik görünümü (Zouboulis vd., 2022)

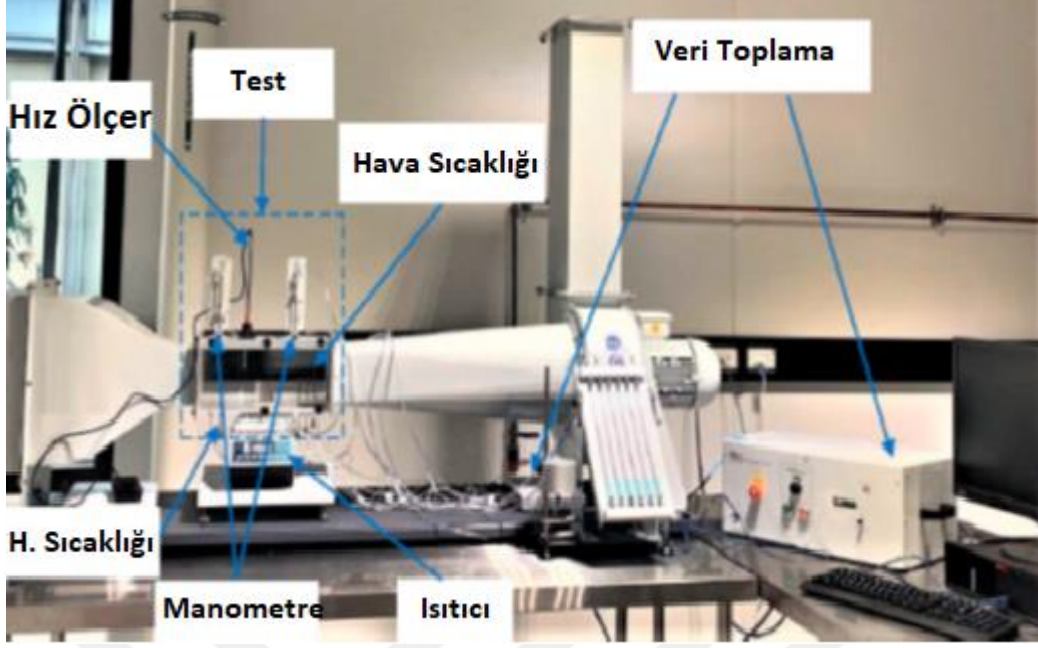
Araştırma sonucuna göre, bir aksenal soğutma fanı prototipi kompozit ile imal edilmiştir. Yapılan deneylerin ve simülasyonların sonucunu doğrulamak amacıyla karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 2.4. Fan Deneysel değerlendirilme kurulumu a) Şematik b) Fiziksel düzenek (Zouboulis vd., 2022)

Soğutma amaçlı akıllı bileşenlerin üretimi için iki katmanlı kendi kendine biçim değiştiren konfigürasyonların kullanımında potansiyel görülmüştür.

Vafadar vd. (2021), basit, güvenilir ve uygun maliyetli bir soğutma sistemi olan hava ısı eşanjörleri endüstriyel sektörde kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada eklemeli imalat sistemleriyle yüksek verimli, hafif hava ısı eşanjörlerinin yapımında önemli potansiyel de görülerek araştırma yapılmıştır. 316 L Paslanmaz Çelikten üretilen tek kanatçıktan oluşan parçaların hem metal baskı hem de frezeleme ile üretilerek değerlendirilmiştir.

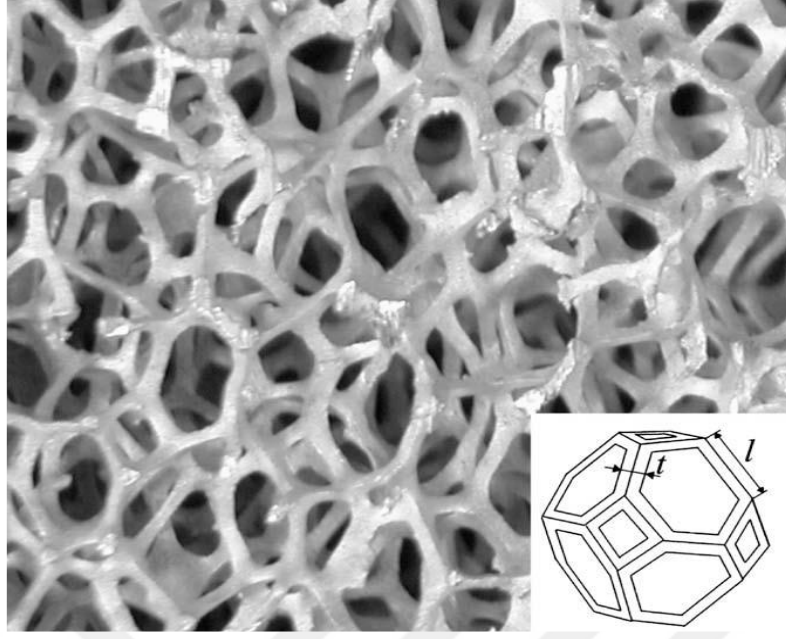


Şekil 2.5. Deneysel test düzeneği (Vafadar vd., 2021)

Üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğü incelenerek tasarımı yapılan deneysel test cihazında da ısı transfer katsayısı, nusselt sayısı, termik akışkan dinamik performansı ve sürtünme faktörü incelenmiştir. Sonuç olarak üretim yöntemi hava ısı eşanjörleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğu yüzey pürüzlülüğü ve iç malzeme miktarının performansı etkilediği görülmüştür.

Mancin vd. (2010), Bu çalışmada altı farklı alüminyumdan hava akışı sırasındaki basınç düşüşünü deneysel olarak incelenmiştir. İnç başına farklı gözenek sayısına (PPI) ve farklı gözenekliliğe sahip açık hücreli köpük numuneleri ile çalışmalar yapılmıştır.

Her numune için üç ısı akışı uygulanmış olup toplanan basınç düşüşü verileri literatürde bulunan modellere referansla analiz edilmiş olup mevcut verilere dayalı basınç düşüşü modeli geliştirilmiştir.

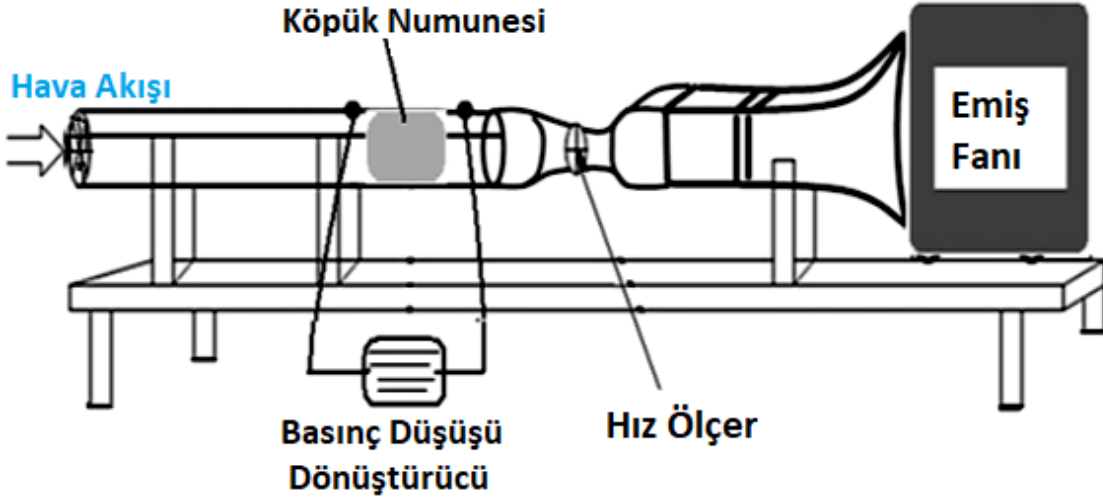


Şekil 2.6. 10 PPM alüminyum köpük ve temsili Resmi (Mancin vd., 2010)

Liu vd. (2004), Yapılan araştırmada havanın köpük matrislerinden ölçülen basınç düşüşüne dayalı olarak bir sürtünme özelliği korelasyonu geliştirilmiştir. Farklı gözenekliliklere ve gözenek yoğunluklarına göre yedi tip alüminyum köpük değerlendirilmiş ve köpüğün eşdeğer küresel çapı 32.05 ile 1289.32 arasında değişmektedir. Ampirik korelasyon, deneysel verilerle uyum sağlayarak sürtünme faktörü ile Reynolds sayısı arasındaki oranı ile granüler matrislerin eğilimini takip eden üç rejim halinde sınıflandırılmıştır.

Deneysel veriler analiz edilerek farklı akışta basınç düşüşünün grafiği oluşturulmuş ve sonuç olarak ampirik bir sürtünme faktörü denklemi köpük matrislerinin karakteristiği temel alınarak geliştirilmiştir.

Dukhan vd. (2012), Sıvının metal köpüğün gözeneklerinden aktığı çalışmada Darcy Yasası ve Forchhimer denklemlerini uygulayarak ortamın basınç düşüşünü, geçirgenliği ve Forchhimer katsayılarını elde edilmiştir. Sınırlayıcı duvarlar ve boyutun hız üzerinde güçlü etkisi olacağından ortaya çıkan basınç düşüşünü incelemiştir. Minimum çap, geliştirilmiş iki tip açık hücreli alüminyum için elde edilmiştir. Reynolds sayısı 15.000 ile 115.000 arasında iç içe geçmiş duvar ve boyut etkisi izole edilmiş ve incelenmiştir.

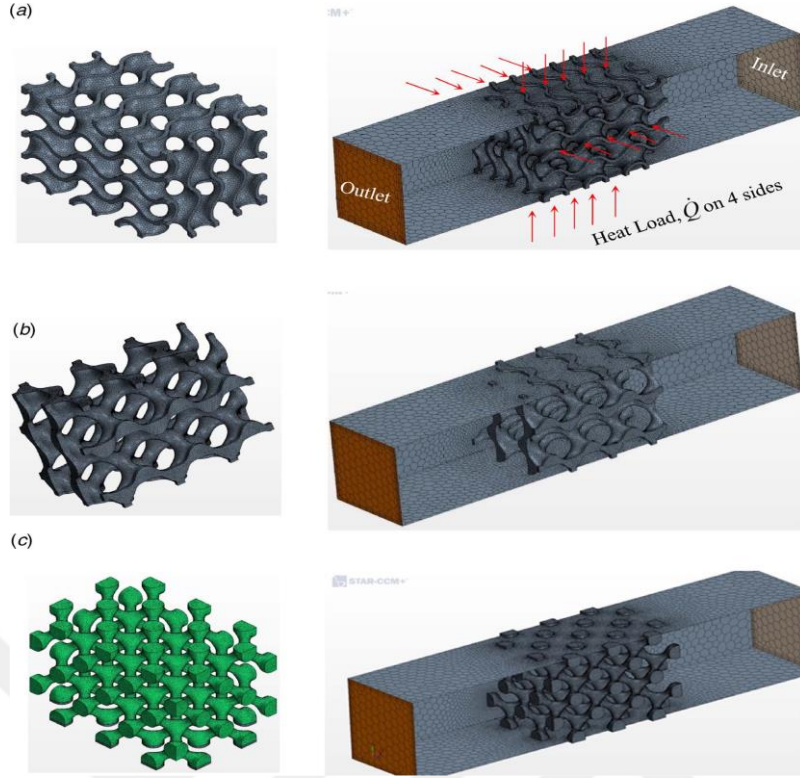


Şekil 2.7. Deney düzeneğinin şematik görseli (Dukhan vd., 2012)

Beavers ve Sparrow (1969), Metalik liflerden oluşan bir kafes biçimine sahip 5 farklı gözenekli ortamın akış özelliklerini keşfetmek için ortam araştırılmıştır. Çalışma koşulları Darcy akışından daha geniş bir hız aralığında uzanır ancak verilerden çıkarılan geçirgenlikler Darcy rejimi için geçerlidir. Akış-basınç özellikleri, karakteristik boyut olarak geçirgenliğin karekökünün kullanıldığı tek boyutsuz bir ifade ile temsil edilmiştir. İncelemeler sonucunda diğer gözenekli ortam sınıfları için burada belirtilen türden sistematik araştırmalara ihtiyaç duyulduğu görülmektedir.

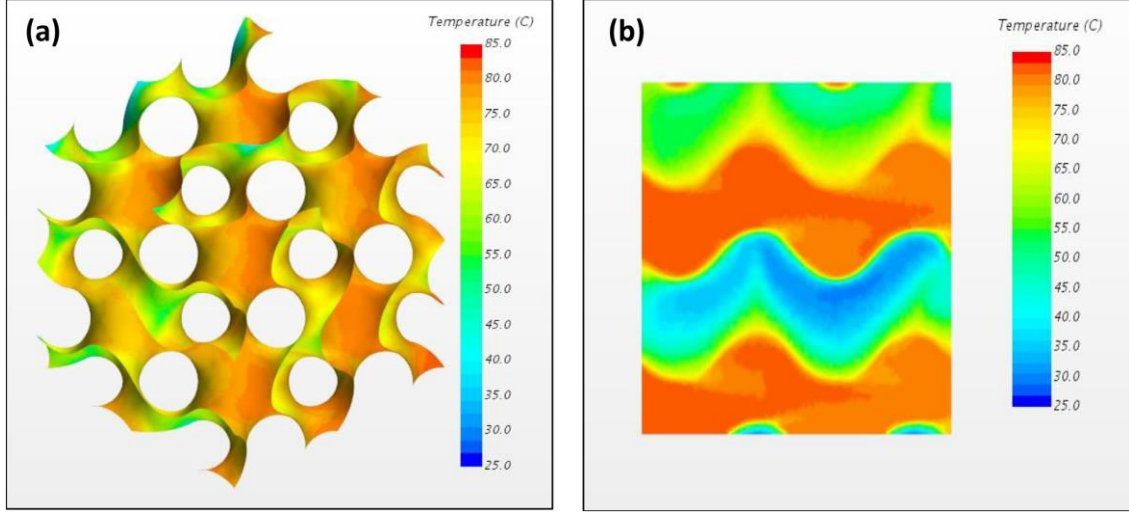
Alketean vd. (2020), Hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak matematiksel olarak gerçekleştirilen bir ısı emici geometrisi ile performansları araştırılmıştır. Isı emiciler üçlü periyodik minimal yüzeylere dayalı topolojilerle formülasyonlarla tasarlanmıştır.

Genel ısı transfer katsayısı, yüzey sıcaklığı, Reynolds sayısı, basınç düşüşü, soğutucu performansı ve akış davranışları analiz edilerek incelenmiştir. Diamond modelinin karşılaştırma sonucu ısı transfer katsayısında % 32'lik artışa neden olduğu görülmüş olup önerilen tasarımların üretilebilirliği değerlendirilmiştir.



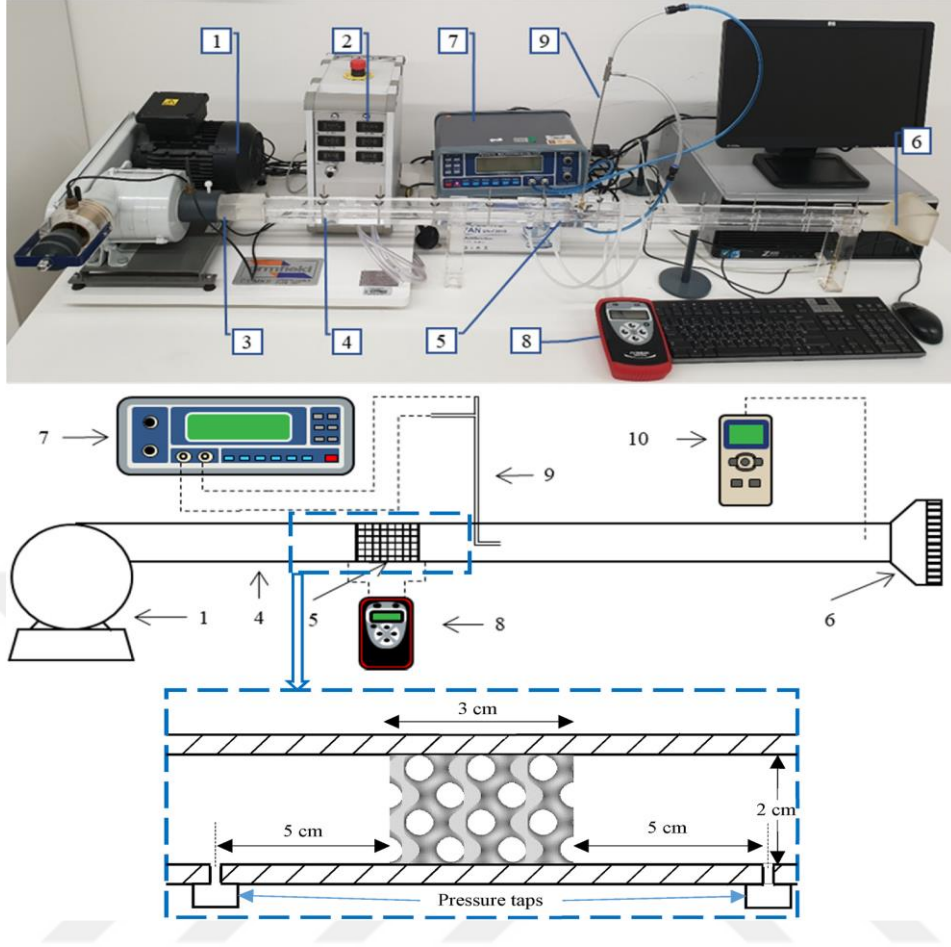
Şekil 2.8. CFD modelleri a) Diamond solid b) Gyroid solid c) Gyroid sheet (Alketean vd., 2020)

Khan vd. (2022), Geleneksel yöntemler ile üretilen ısı eşanjörleri termal performansı artırmak için karmaşık geometrilere sahip ısı eşanjörlerinin gelişimini engelleyen sınırlandırmalara sahiptirler. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak eklemeli imalat yöntemi ile 3B kompakt modeller oluşturularak konveksiyon ısı transfer katsayısı, basınç düşüşü ve giriş-çıkış akışkan sıcaklıkları incelenmiştir. 0.2 ile 1.0 arasındaki NTU değerine sahip gyroid modelinde tasarımın önemli ölçüde etkilediği gösterilerek çapraz akışlı ısı eşanjörlerinin analitik sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Gyroid yapısı için incelenen NTU aralığı ve ısı kapasitesi oranları üzerinde %35'e varan artış olduğu gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Gyroid sıcaklık kontürü a) Sıcak-soğuk arayüz b) Enine kesit (Khan vd., 2022)

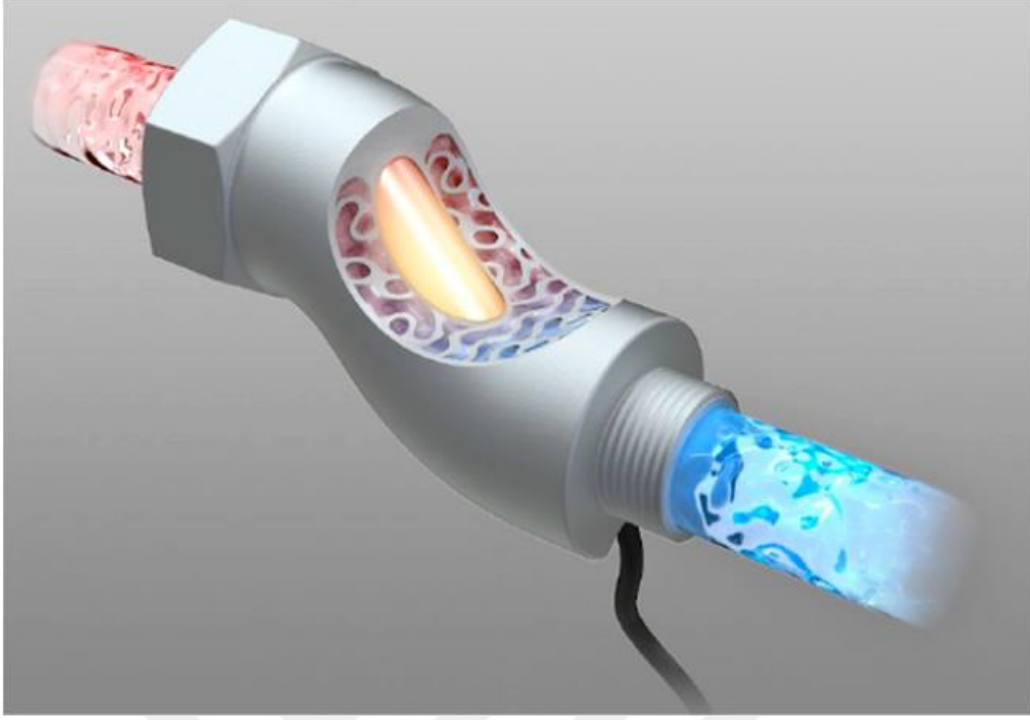
Khalil vd. (2022), Yapılan çalışmada sayısal ve deneysel olarak zorlanmış taşınım ile ısı geçişi araştırılmıştır. Matematiksel olarak tasarlanmış periyodik olarak düzenlenmiş üç model ele alınarak ısı emicilerin soğutucu ve akışkan performansı incelenmiş ve literatürdeki diğer soğutucularla karşılaştırılmıştır. Termal performansla ilgili olarak G-sheet en yüksek yüzey alanı ile ısı transfer katsayısı ve en düşük termal direnç sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 2.10. Hidrolik performansı analizi için kurulan düzenek (Khalil vd., 2022)

Dutkowski vd., (2022), Metal içerikli üretim ile eklemeli imalat yöntemleri karşılaştırılarak mevcut simülasyonların ve deneysel sonuçları sunmuştur. Isı transferi alanındaki yayın sayısı ve alan çok sınır olduğundan bu yeni teknolojiler kullanılarak boyutların %60 oranda azaltılabileceği sonucuna varılmıştır.

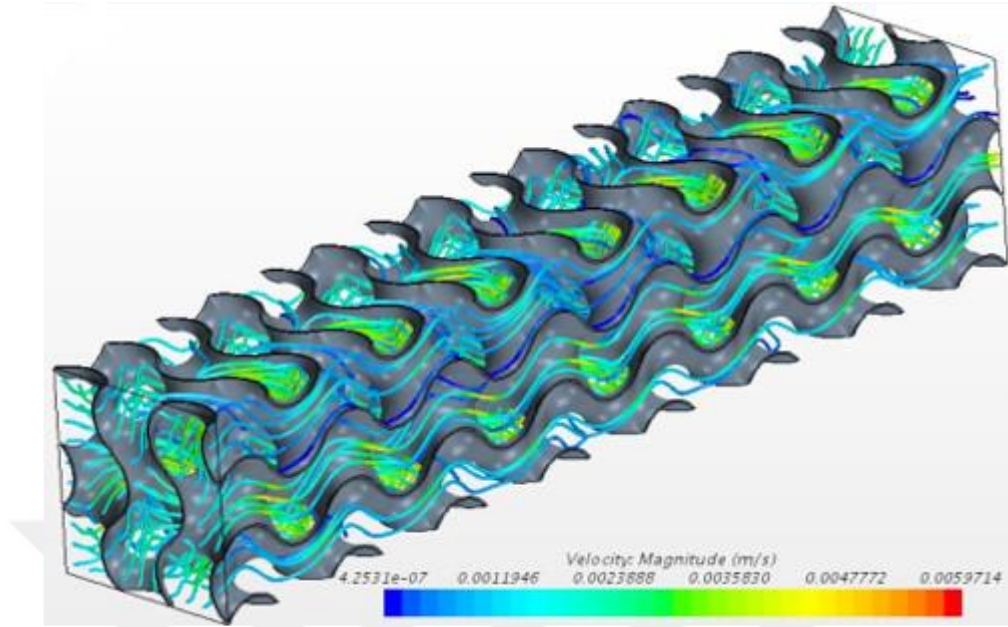
Boyut ve gözenekliliği optimize etmek için yapılan araştırmalar neticesinde iyileştirmeler ısı transferinden elde edilen kazançlar sistemdeki enerji harcamasını telafi eder. CFD simülasyon sonuçlarını doğrulamak için deneysel araştırmada yapılmıştır.



Şekil 2.11. Suyu ısıtmak için kullanılan eşanjör (Dutkowski vd. 2022)

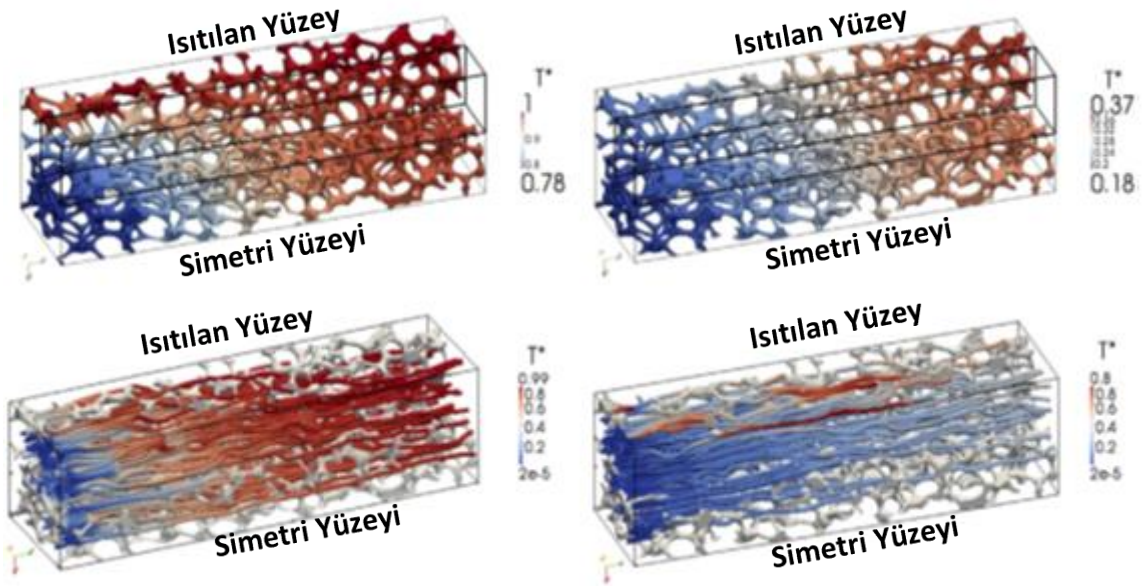
Younis ve Viskanta (1992), Seramik köpük kullanılarak ısıtılmış havanın ısı transfer karakterize eden deneysel çalışmalar yapmıştır. Isı transfer katsayısını belirlemek için ayrıca aparat tasarlanmış olup farklı gözenek çaplı numuneler ile çalışılmıştır. İki farklı seramik türü köpükler incelenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Isı transfer katsayısı korelasyonları seramik köpüğün farklı gözenek çapı ve Reynolds sayı aralıkları için geliştirilmiştir. Termokupl uçlarından iletim nedeniyle maksimum sıcaklık ölçüm hatası yaklaşık %4.4'tür. Alümina ve kordiyerit seramik köpükler kullanılarak ısı transfer sonuçları karşılaştırıldı.

Pulvirenti vd., (2020), Metal köpükler ısı transferini arttırmak için geniş çapta incelenmiştir. Gözenekli malzemeler, farklı özellikleri ile kanatlı yüzeylere bir alternatif olarak iyi bir alternatif olarak kabul edilmektedir. Dezavantajları arasında farklı numuneler üretmenin zorluğu vardır. Aynı iç yapı, sonuç olarak performansları önemli ölçüde değişken olabileceği görülmüş olup yapılan çalışmada ısı transfer özelliklerine odaklanılmıştır. Sayısal bir simülasyon yapılarak metal köpükte akış ve ısı transferinin makroskobik modelleme sonuçları değerlendirilmiştir. Metal köpük içinden suyun zorlanmış taşınımı uygulanarak CFD hesaplamaları yaptırılmıştır. Hacimsel fazlar arası ısı literatürle iyi bir uyum gösteren transfer katsayısı da elde edilmiştir.



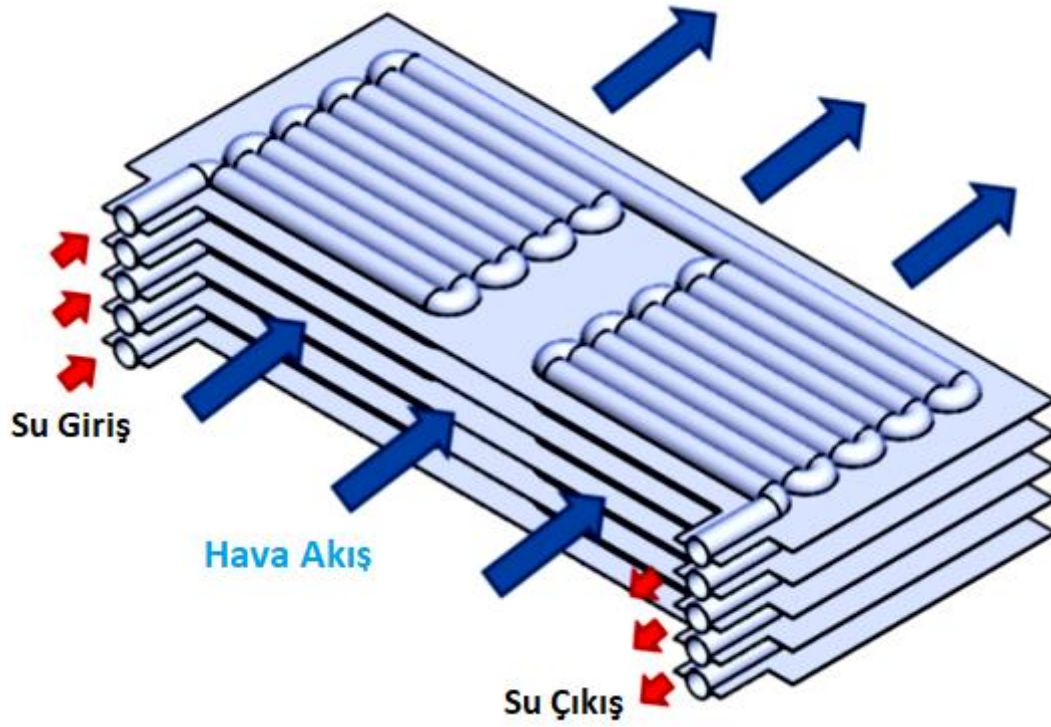
Şekil 2.12. Vaka için elde edilen akım çizgileri (Pulvirenti vd., 2020)

Bianchi vd., (2014), Metal açık hücreli köpüklerle dolu bir reaktörün duvara yakın bölgesindeki ısı taşıma işlemlerinin sayısal bir incelemesi yapılarak katalitik olarak aktif köpüklerle dolu, dışarıdan soğutulan boru şeklindeki reaktörlerin gelişimi ışığında sunulmaktadır. Bu çalışmada kullanılan 3D modelleri oluşturmak için iki farklı alüminyum açık hücreli köpük, X-ışını mikro bilgisayarlı tomografi ile taranarak Eşlenik katı-sıvı ısı transferi sorunu, farklı akış hızları ve sıvı özellikleri için (Peclet sayısı aralığı 1 ila 105) sonlu hacim analizi (FVA) ile çözülmüştür. Katı faz arasındaki bağlantının etkisinin derinlemesine araştırılması için sistematik bir sayısal çalışma yapılmıştır. Süreksizlik durumları için duvar ısı transfer katsayısı için yeni korelasyonlar türetilmiş ve statik bir formda önerilmiştir. Peclet sayısına ve duvarla tahmini toleransa bağlılığı ayrıntılı olarak ortaya çıkarmış ve analizleri yapılmıştır.



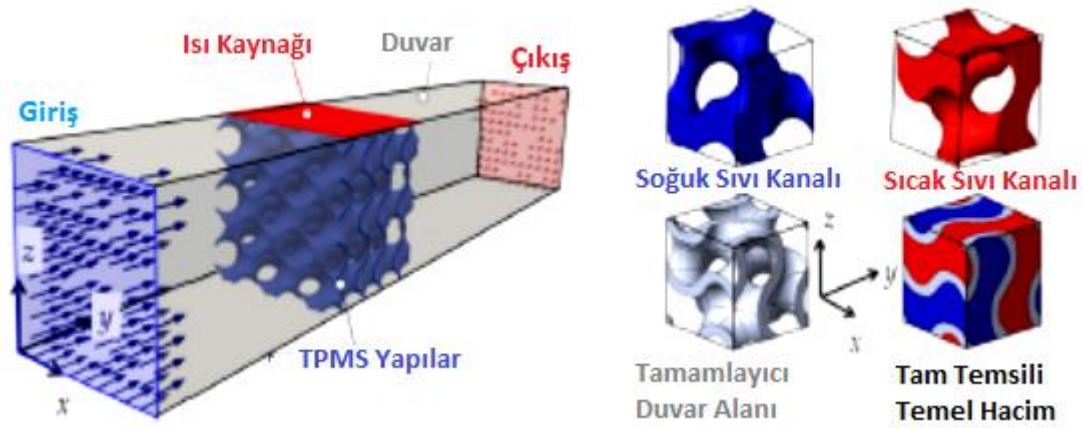
Şekil 2.13. Sıcaklık dağılımı ısı transfer simülasyonları (Bianchi vd., 2014)

Arie vd., (2016), Bu çalışmada, ince polimer levhalardan yapılmış uygun maliyetli bir hava-su polimer ısı eşanjörü kullanılmıştır. Lazerli eklemeli imalat yöntemi ile üretilip deneysel olarak test edilmiştir. 15.5 cm genişliğinde 29 cm uzunluğunda akış kanalları 150 mikron kalınlıkta yüksek yoğunluklu polietilen levhalardan yapılmıştır. Piyasadaki düz plaka kanatçık yüzeyli soğutuculara göre polimer ısı değiştiricilerin performansının genel olarak daha iyi olduğunu savunmaktadır.



Şekil 2.14. Çalışmada kullanılan yüzey ısı eşanjörü izometrik görüntüsü (Yeranee ve Rao 2022)

Yeranee ve Rao (2022), TPMS yapıları geleneksel tabanlı yapılara göre daha iyi mekanik performans ile termal iletkenlik göstermektedir. Literatürde genellikle farklı topolojiler araştırılmıştır. Tasarım değişkenlikleri, Termal performansları, soğutma avantajları gibi hususlar değerlendirilmiş olup akış ve ısı transferi iyileştirilmesi, gözeneklilik, duvar kalınlığı ve hücre boyutu da ayrıca ele alınmıştır. Geleneksel soğutma yapıları ile kıyaslanmış ve daha iyi termal performans göstermiştir. Aynı gözenekliliğe sahip daha karmaşık yapıları olan diamond ve gyroid modeller reynolds sayıları arttıkça yüksek ısı transferi sağlar ancak yüksek basınca neden olur bu nedeni de geniş yüzey alanlarına sahip olup akış özelliklerini de önemli ölçüde değiştirir. Aynı duvar kalınlığına sahip topolojiler farklı gözeneklere sahiptir ve yüzey alanları, akış ve ısı transferi varyasyonu ile sonuçlanır. Daha büyük duvar kalınlığı, daha yüksek konvektif ısı transferi ve basınç kaybı sağlar ancak TPMS topolojileri ve birim hücre boyutları nedeniyle, duvar kalınlığı değişimi akış alanını ve ısı transferini farklı şekilde etkileyebilir.



Şekil 2.15. TPMS yapıların gösterimi ve soğutma yapısı (Straatman vd., 2006)

Literatür taramasından da anlaşılacağı üzere farklı çalışmalarda farklı amaçlar için kullanılan köpük malzemelerin; kullanılan ham madde, gözeneklilik oranı ve akışkan cinsi vs. parametrelerin ısı transfer verimini değiştirmektedir.

Straatman vd., (2006), Gözenekli bir tabaka üzerinden paralel hava akışı geçirilerek elde edilen taşınım ile ısı transferini ölçmek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Karbon köpüğü ısı transferindeki artışın Reynolds sayısı ile ters orantılı olduğunu göstermiştir. En iyi ısı transferi iyileştirmesini elde etmek için gerekli havanın nüfuz etme derinliğine göre seçilir, paralel akış uygulamaları için yaklaşık bu değer 3mm'dir. Isı transferi bağlı hava akışının köpük içinden geçişinin daha güçlü bir fonksiyonu olduğu gözlemlendi. Karşılaştırmalar sonucunda ortalama olarak daha yüksek gözenekli numuneler, yüksek yüzey pürüzlülüğü nedeniyle düşük gözenekliliğe göre daha iyi performans gösterir.

Son yıllarda literatür çalışmalarında polimer malzeme kullanımı olsa da genel itibarıyla üretimde de metal içerikli (Alüminyum, Bakır, Çelik vb.) malzemeler tercih edilmiştir. Bunun sebebi ısı iletim katsayılarının yüksek olmasıdır. Metal bazlı eşanjörlere göre polimer içerikli eşanjörler yüksek erime sıcaklığı ve basınca karşı dayanıklılıkları ele alındığında yüksek değerlere dayanım oranları oldukça düşük olacaktır. Fakat teknolojik imkanların genişlemesi ile daha gelişmiş karmaşık kompleksdeki yapıların uygulanabilirliği artmakta olup yapılan çalışmada 3D yazıcı teknolojisi ile üretilen gyroid geometrisi ile deneysel çalışmalarla tutarlı hale getirilmiştir.

Bu çalışmada polimer bazlı gözenekli ortamlarda basınç düşüşü ve ısı geçişi deneysel olarak incelenmiştir. Bu malzemelerden yapılmış ortamların ısı iletim katsayısını düşük olduğundan metal malzemeli gözenekli ortamlara göre ısı geçişi daha düşük olması beklenmektedir. Fakat kanal içerisinde gözenekli ortam olması akışı karıştırıcı etki sayesinde ısı geçişinde bir miktar artış olması beklenmektedir. Karmaşık geometrili gözenekli ortamın imalatı sayesinde avantajı olan polimer malzemeli gözenekli ortamda ısı geçişi ve basınç düşüşü araştırılacaktır. Bu sayede polimer malzemeli gözenekli ortamların ısıl davranışı da ortaya çıkarılacaktır.



3. MATERYAL VE METOD

3.1. Gözenekliliğin Belirlenmesi

Mslattice, periyodik hücreli malzemeler veya geometrik malzemeler olarak bilinen çeşitli kafes türlerinin geometrilerini oluşturmak için kullanılan bir yazılım olup çok çeşitli topolojiler için tek tip kafesler, işlevsel olarak derecelendirilmiş kafesler ve hücre boyutu dereceli kafesler oluşturulmasına olanak tanır. Ortogonal, silindirik ve küresel tasarımlar oluşturulabilir.

Eklemeli imalat yöntemleri kullanarak kafesleri imal için gereken STL dosyalarını oluşturabilir ve farklı yükleme yöntemleri ile kafeslerin performansını tahmin etmek için sonlu elemanlar simülasyonları veya hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarını yapmak için gereken dosyaları oluşturmaktadır.

Çalışmaları için kullanılan Mslattice programı arayüzünde belirlenen parametreler ile gyroid, diamond gibi temel geometriler de şekil olarak seçebilme kolaylığı sunmaktadır. Seçimi yapılan mimari sonrası istediğimiz ölçüleri ve gözeneklilik oranını program girdilerine işledikten sonra program işlem süresine ve parametrelere göre ortaya bir geometri çıktısı vermekte olup daha sonra stl formatında 3D yazıcılara göre istenilen polimer, metal ve seramik malzemeleri tercihlerinde imalat aşamalarının da hızlandırmayı sağlıyor.

MS-Lattice programında çizilen geometri 3D yazıcı sayesinde PLA ve ABS iki farklı malzemede üretilmiştir. Gözeneklilik ve malzeme ölçüleri programdan bilgileri girilse de gözeneklilik tekrar hesaplanmıştır. Gözenekli ortam üretmek için kullanılan malzemelerin teknik dökümanı incelendiğinde PLA ve ABS malzemeleri için yoğunluk sırasıyla 1.2 ve 1.06 g/cm³ olarak verilmiştir (PLA ve ABS).

Oda sıcaklığında ölçülen gözenekliliği belirlemek için Denklem 3.1 kullanılmıştır.

$$\varepsilon = \frac{V_b}{V_t} = 1 - \frac{V_k}{V_t} \quad (3.1)$$

Gözenekli malzemenin hacmini belirlemek için ilk önce numuneler Precisa marka LS220A model hassas terazide tartılmıştır. Her bir numunenin yoğunluğu ve ağırlıkları kullanılarak, gözenekli malzemelerin katı hacimleri elde edilmiştir. Gözenekli malzemelerden elde edilen gözeneklilik değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Gözenekli ortamların gözeneklilik değerleri

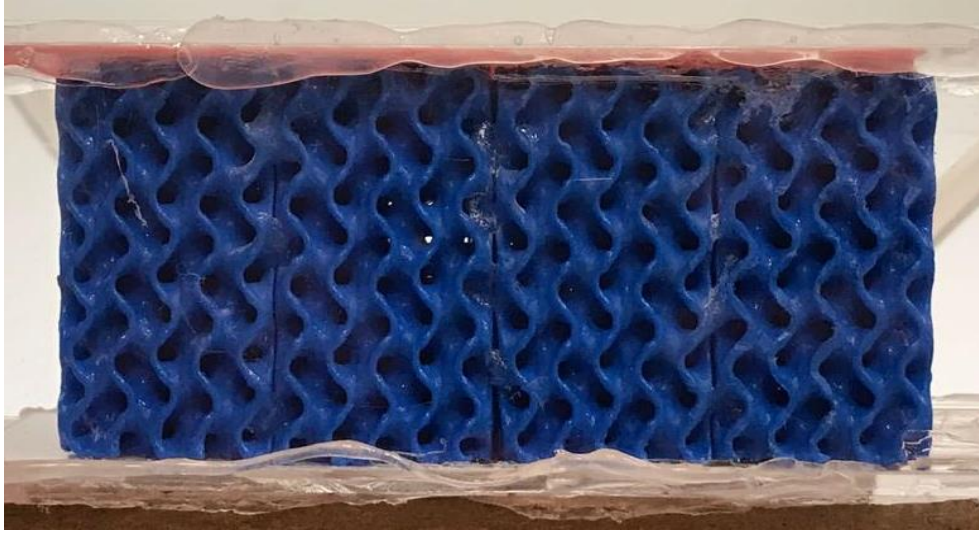
| Malzeme Cinsi | Ağırlık (gr) | Katı Hacmi (cm ³) | Gözeneklilik (%) |
|---------------|--------------|-------------------------------|------------------|
| PLA | 100.72 | 81.68 | 67.33 |
| ABS | 58.52 | 55.20 | 77.92 |

Üretilen gözenekli ortamların gözeneklilik değerleri PLA ve ABS malzemeleri için sırasıyla 0.67 ve 0.78 olarak hesaplanmıştır. Gözeneklilik değerinden de anlaşıldığı gibi üretilen gözenekli ortamın katı hacmi çok düşük olup, boşluk hacimleri yüksek değerlerdedir.

3.2. Gözenekli Ortamın İmalatı

Gözenekli ortam, MS-Lattice programı yardımıyla, gözenek çapı, gözeneklilik ve numune boyutları gibi veriler girilerek katı modeli oluşturulmuştur. MS-Lattice programı genel olarak eklemeli imalat yönteminden üretilecek olan parçaların çizimleri tasarlanmaktadır. Programın kütüphanesinde farklı tip katı model geometrileri mevcuttur. Bu katı modeller arasında Gyroid, Gyroid sheet, Diamond, Primitive, Neovius gibi farklı tipte açık gözenekli ortam yapıları mevcuttur. Bu çalışmada, Gyroid geometrisinde gözenekli ortam tasarlanmıştır.

Bu programdan tasarlanan katı model daha sonra üç boyutlu yazıcı yardımıyla iki farklı malzemeden üretilmiştir. Bu malzemeler ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) ve PLA (Polylactic acid) olup 3D boyutlu yazıcılarda çokça kullanılan filamentlerdir. 3D boyutlu yazıcılardan elde edilen gözenekli ortamların fotoğrafları Şekil 3.1’de verilmiştir.



a)



b)

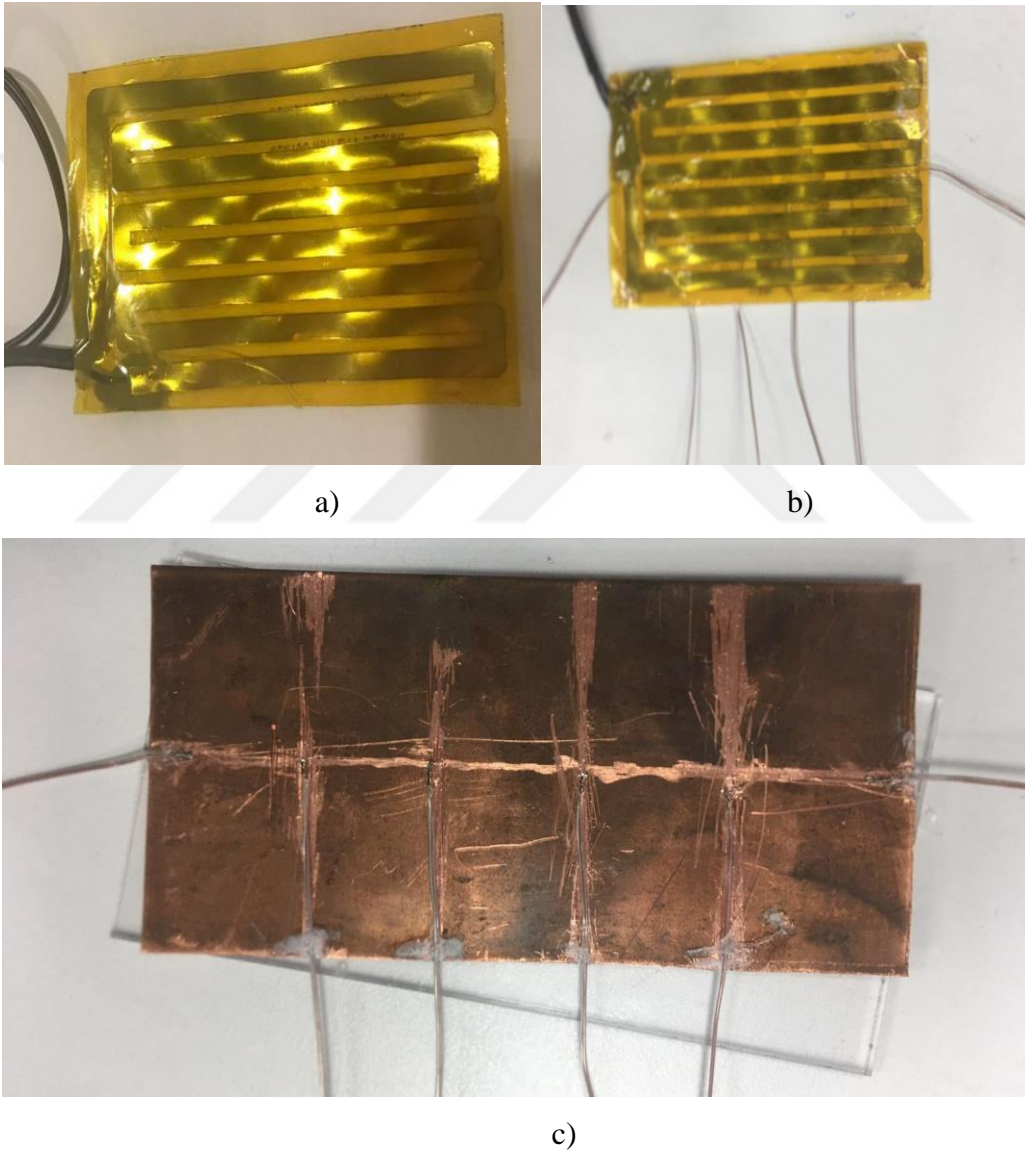
Şekil 3.1. a) PLA ve b) ABS malzemelerinden üretilmiş gyroid yapıda gözenekli ortam

Üretilen her iki gözenekli ortamın geometrik ölçüleri aynı olup, yüksekliği ve genişliği 50 mm, uzunluğu ise 100 mm'dir.

Gözenekli ortamda basınç düşüşü ve ısı geçişinin inceleneceği bu tez çalışmasında gözenekli ortamdan akışkan geçebilmesi için pleksiglas malzemesinden bir hava kanalı tasarlanmış ve üretilmiştir. Hava kanalı gözenekli ortamın ölçülerine bağlı olarak kare kesitlidir. Ölçüleri 50x50 mm olup, 1000 mm uzunluğundadır. Kanalda, hava sızdırmazlığını sağlamak amacıyla hava kanalının kenarlarının birleşim yerleri epoksi yapıştırıcılarla yapıştırılmış ve silikon ile sızdırmazlığı sağlanmıştır.

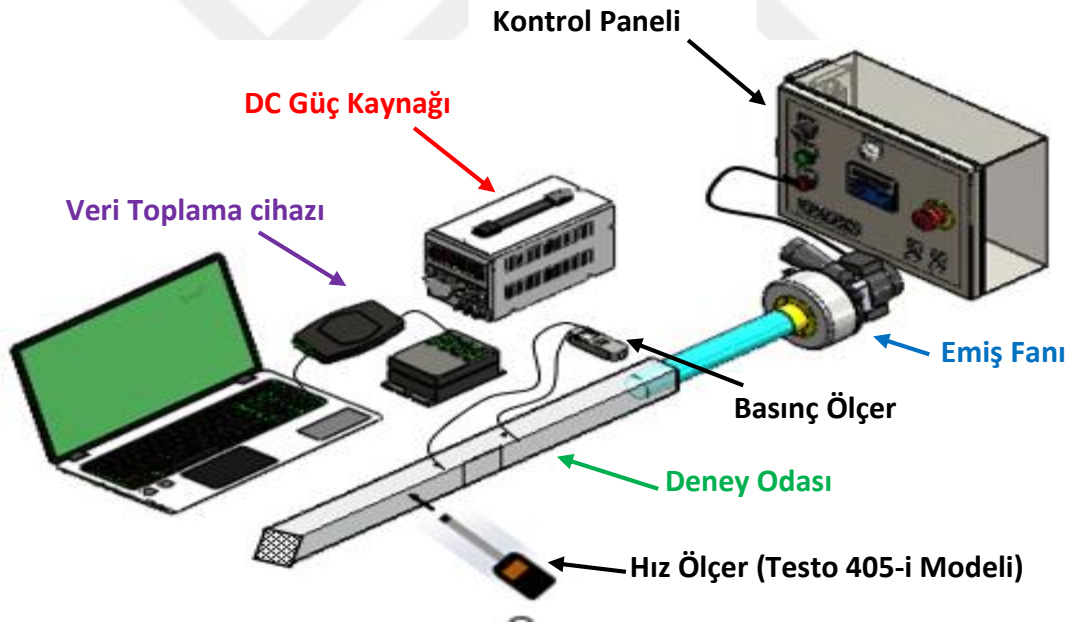
Kanal üzerinde basınç prizleri ve termokupl için delikler tasarlanmıştır. Ayrıca hava kanalının en alt bölgesinde numune boyutunda (50x100 mm) ölçülerinde boşluk bırakılmıştır. Bu sayede numune kanal içerisine yerleştirilmesi ve ısıtıcının yerleştirilmesi hedeflenmiştir.

Isı geçiş deneyleri sabit ısı askında yapılması hedeflenmiştir. Sabit ısı akısını elde etmek için bir film ısıtıcı üretilmiştir. Bu ısıtıcının boyutları 100x50 mm olup 120 W gücündedir. Film ısıtıcı Şekil 3.2a'da gösterilmiştir.



Şekil 3.2. a) Film ısıtıcı, b) Film ısıtıcıya termokuplların yerleştirilmesi c) Isıtıcının bakır levha ile kaplanması

Isıtıcının yüzeyine bakır plaka yerleştirilmiştir. Bu sayede homojen bir ısı akışı elde edilmesi hedeflenmiştir. Bakır yüzeylere yüzey sıcaklığı ölçmek için termokupllar yerleştirilmiştir. Termokupllar için bakır plakada kanal açılmıştır. Böylece ısıtıcının bakır plakaya tam teması sağlanmıştır. Bu işleme ait görsel Şekil 3.2b’de verilmiştir. Isıtıcının alt ve üst kısmından elektriksel yalıtım sağlamak amacıyla teflon bant kullanılmıştır. Böyle bakır ile bağlantısında herhangi bir kısa devre yapması engellenmiştir. Film ısıtıcı ile bakır yüzey arasındaki temas direncine en aza indirmek için ısıl macun sürülmüştür. Isıtıcılar ile yüzey arasındaki ısıl macunun ısı iletim katsayısı 4 W/mK’dir. Isıl macun sayesinde ısıtıcı bakır yüzeye daha iyi yapışması ve arada hava boşlukların oluşmaması sağlanmıştır. Isıtıcının diğer yüzeyine ısı iletim katsayısı çok düşük bir kompozit malzeme yerleştirerek ısıtıcıdan elde edilen ısıl gücün tamamının bakır yüzeyden geçmesi hedeflenmiştir. Sabit ısı akışını elde etmek için üretilen ısıtıcı ünitesinin son hali Şekil 3.2c’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Deney tesisatı

Deney odasının detayları Şekil 3.3’te gösterilmiştir. Deney tesisatı; hızölçer, basınçölçer, emiş fanı, frekans kontrol ünitesi, DC güç kaynağından oluşmaktadır. Akışkan olarak hava kullanılmıştır. Deney tesisatı, akış düzleştiricisi, test odası ve akış kontrol ünitesi olmak üzere 3 ana bölmeden oluşmaktadır.

Akış düzleştirici bölümünde, hava kanalının girişinde dairesel akış düzleştirici olup, hava kanalına girdikten sonra akış düzleştiriciden geçmektedir. Akış düzleştirici

sayesinde havanın hızı kanalın kesiti boyunca uniform olması amaçlanmıştır. Akış düzleştiriciden geçen havanın ortalama hızı Testo 405'i (Hot-wire) aracılığıyla ölçülmüştür. Havanın ortalama hızı o hava debisinde yapılan deney boyunca kaydedilmiş ve ortalama değeri alınmıştır. Akış hızı ölçüldükten sonra hava test odası (gözenekli ortama) girmeden önce akışın hidrodinamik olarak gelişmesi için belirli bir mesafe bırakılmıştır.

Test odası, Şekil 3.3'de gösterilen siyah kısım olup Gyroid gözenekli ortam kanala yerleştirilmiştir. Gözenekli ortam yerleştirildikten sonra kanalın alt kısmına ısıtıcı ünitesi yerleştirilmiştir. Isıtıcı DC güç kaynağına bağlanmıştır. Farklı ısı akıları uygulanarak sabit ısı akısı elde etmesi hedeflenmiştir. Isıtıcı ünitesinin alt kısmı ısı olarak cam yünü yalıtım malzemesi ile yalıtılmıştır. Böylece uygulanan ısı akısının çevreye kaybı engellenerek kanala doğru geçmesi hedeflenmiştir. Daha sonra bu test bölgesi kısmı rüzgâr kanalı tamamen ısı olarak yalıtılmıştır. Yalıtım malzemesi olarak cam yünü kullanılmıştır. Böylece kanaldan da çevreye olan ısı kaybı engellenerek uygulanan ısı akısının tamamının akışkana geçmesi sağlanmıştır.

Akış kontrol ünitesinde emiş fanı ve frekans kontrolü bulunmaktadır. Emiş fanının çalışma frekansını değiştirerek kanal içinden geçen hava debisi değiştirilmektedir.

Test odası, deney tesisatının ortasında, akış düzeltirme bölümü hava kanalının giriş kısmında, Akış kontrol ünitesi ise deney tesisatının en sonunda olup tesisatın çıkış kısmında bulunmaktadır. Gyroid test odası pleksiglas hava kanalına (50x50 mm) yerleştirilmiştir. Emiş fanı aracılığıyla farklı debilerde emilen hava ilk olarak akış düzeltirme bölümünden geçmekte, daha sonra test bölgesine gelmektedir. Test bölgesinden geçen hava akış kontrol ünitesine gelmekte ve daha sonra hava düzeneği terk ederek ortama atılmaktadır. Ayrıca bu bölümde havanın sıcaklığı da ölçülmüş, ortamın bağıl nemi ve atmosfer basıncı kullanarak havanın termofiziksel özellikleri belirlenmiştir.

Akış düzleştirici ünitesinden çıkan havanın hemen ortalama hızı Testo 405i hızölçer cihazı ile ölçülmüştür. Deney sırası boyunca hız verileri alınıp toplam veriye bölünerek hızın ortalama değeri elde edilmiştir.

Hızı ölçüldükten sonra hava pleksiglass kanalda ilerlemekte ve test odasına girmeden önce kanalda bulunan basınç prizinden giriş basıncı ve test odasının hpemen çıkışında bulunan çıkış basınç prizinden ölçülen çıkış basıncını kullanarak test odasının

fark basıncı belirlenmiştir. Fark basıncı ölçmek için PCE-MPM 10 marka fark basınç ölçer kullanılmıştır. Bu cihazın ölçüm aralığı 0-5000 Pa aralığındadır.

Isı deneylerinde ise ısıtıcıya elektriksel güç uygulanarak sabit ısı akısı elde edilmiştir. Böylece elde edilen ısı, deney düzeneğinin alt kısmından hava kanalına girmekte ve akışkanın çıkış sıcaklığını arttırmaktadır. Isıtıcı ve hava kanallarında bulunan termokupllar Ordell marka veri toplama cihazına bağlıdır. Termokupllardan alınan sinyaller veri toplama cihazı sayesinde bilgisayara aktarılmıştır.

Hava kontrol ünitesinde bulunan emiş fanı ile kanaldan emilen hava ortama atılır. Emiş fanı, Bekatech Sanayi Tipi emiş fanı olup tek kademeli 1400 W gücündedir. Emiş fanı, frekans kontrol ünitesine bağlanmıştır. Bu sayede, emiş fanı motorunun farklı frekanslarda çalışması sağlanarak kanal içinden geçen debinin değişmesini sağlamaktadır. Emiş fanı deneyler esnasında tam güçte çalıştırılmamıştır. Bunun sebebi gözenekli ortamda oluşan basınç düşüşünü ölçmek için kullanılan ölçüm cihazının ölçüm aralığının dışına çıkılmaktadır. Ayrıca tam güç de çalıştırılması, hava kanalının geometrik ölçüleri düşük olduğundan hava kanalına zarar verebilir.

Çizelge 3.2. Film ısıtıcının termokulp yerleşim planı

| 1. Yüzey (mm) | 2. Yüzey (mm) | 3. Yüzey (mm) | 4. Yüzey (mm) | 5. Yüzey (mm) | 6. Yüzey (mm) | Hava giriş yükseklik (mm) | Hava çıkış yükseklik (mm) |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 10 | 10 |
| | | | | | | 20 | 20 |
| | | | | | | 30 | 30 |

Yüzey sıcaklığını ölçmek için toplam 6 tane termokupl yerleştirilmiştir. Yüzey sıcaklığının konumları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Yüzey termokoplları ısıtıcı plakanın tam ortasına yerleştirilmiştir. Akışkan sıcaklığını ölçmek için ise test odasının girişine 3 test odasının çıkışına ise 3 adet termokupl olmak üzere 6 adet termokupl yerleştirilmiştir. Bu üç farklı yüksekliklerde ölçülen hava sıcaklıklarının ortalaması alınarak akışkanın test

odasına girişindeki ve çıkışındaki sıcaklıkları belirlenmiştir. Deney odasının nihai hali Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Deney tesisatı görseli

Şekilde soldan sağa doğru hız ölçer, fark basınç ölçer test odası, Test odasının hemen önünde veri toplama cihazı ve bilgisayar bulunmaktadır. Test bölgesinden sonra DC güç kaynağı, emiş fanı ve frekans kontrol ünitesi bulunmaktadır.

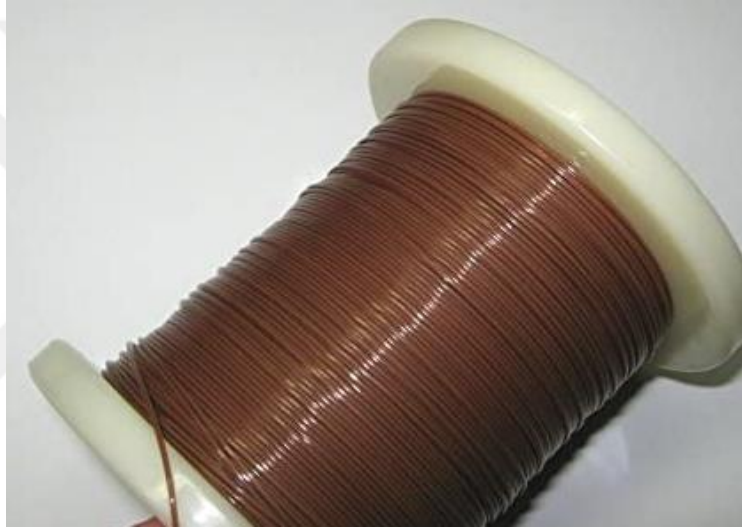
3.3. Basınç Ölçümleri

Deneylerde gözenekli ortam bulunan test odasının giriş ve çıkışında bulunan basınç prizlerine silikon hortum aracılığıyla PCE-MPM 10 marka fark basınçölçer bağlanmıştır. Fark basınçölçer 3V piller sayesinde kendi gücünü sağlamakta ve ekranı sayesinde test bölgesinde oluşan basınç düşüşünü göstermektedir. Basınç düşüşü deneyleri ayarlanan motor frekansında (farklı debilerde) sistemin termodinamik dengeye

ulaştığında yani hız ve basınç değerlerinin değişmediği durumlarda en az 100 adet basınç farkı verisi alınmıştır. Alınan bu verilerin ortalaması alınarak, hava hızındaki basınç farkı değerleri elde edilmiştir.

3.4. Sıcaklık Ölçümleri

Deney tesisatında kullanılan termokupllar Omega marka TT-K-30-SLE model termokupl telidir. Bu termokupl iki kat yalıtımlı olup K tipidir. Deney tesisatında kullanılan termokupl telinin görseli Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Termokupl teli

Isı deneyleri ısıtıcıya elektriksel güç verildikten sonra yüzey sıcaklıkları belirli bir süre artmakta ve daha sonra ısı olarak dengeye gelmektedir. Sistem ısı olarak dengeye geldikten sonra başka bir deyişle termokupllardan okunan sıcaklık değerleri değişmediği ya da çok az dalgalanma yaptığı durumda sıcaklık verileri, veri toplama cihazı yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır. Her bir noktanın sıcaklığını belirlemek için en az 100 adet sıcaklık verisi alınmış ve bu verilerin ortalaması alınarak o noktadaki sıcaklıklar elde edilmiştir. Çok veri alınmasının sebeplerinden birkaç tanesi sıralamak gerekirse; bunlar sistemin ısı olarak dengeye ulaştığını saptamak, verilerde standart sapmalarını kontrol etmek ve hata payını minimuma indirmektir.

Isı geçiş deneylerinde yüzey sıcaklıkları PLA malzemesinden yapılan gözenekli ortamda 60 °C'ye geçmemesi hedeflenmiştir. ABS malzemesinden yapılan gözenekli

ortamda ise 95 °C'yi geçmemesi hedeflenmiştir. Verilen bu sıcaklıklar bu malzemeler için camsı geçiş sıcaklığı olup, malzemelerin bu sıcaklık değerlerinden yüksek değerlerde yapısının bozulması elde edilen gyroid yapının bozulmasıdır. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda emiş fanına giren akışkanın sıcaklığının da artacak olması emiş fanın zarar verebileceği düşünülmüştür.

3.5. Belirsizlik Analizi

Deneysel yapılan çalışmalarda ölçüm cihazlarından gelen belirsiz ve bu ölçülen değerlerin kullanıldığı formüllerden kaynaklı belirsizlikler söz konusudur. Bu belirsizlikleri elde edilen sonuçlara eklenmesi sunulacak korelasyonun güvenilirliği bakımında oldukça önemlidir. Verilen korelasyonların ya da ölçülen verilerin belirsizliklerin değerlerinin küçük olması deney sonuçlarının sonucunu doğrudan etki etmektedir.

Deney verilerindeki belirsizlik, sıcaklık, hız ve basınç düşüşü gibi birincil ölçümlerdeki ana hata kaynakları tanımlanarak değerlendirilir.

Deney tesisatında fark basıncını ölçebilmek için PCE-MPM 10 marka fark basınç ölçer kullanılmıştır. Cihazın teknik verilerini içeren dosya da belirsizliği ölçüm aralığının en yüksek değerinin $\pm \%0.3$ 'ü olduğu ifade edilmiştir. Cihazın ölçüm aralığının en yüksek değeri 5000 Pa olduğundan bu değer $\%0.3$ değeri 15 Pa'dır. Basınç düşüşü deneylerinde 15 Pa sabit bir belirsizlik söz konusudur.

Hava kanalına gönderilen hava Testo 405i hızölçer sayesinde havanın hızı ölçülmüştür. Bu cihazın ölçüm aralığı 0-30 m/s olarak verilmektedir. Testo 405i cihazının belirsizliği ise firmanın sunduğu teknik dokümandan; hızın 0-2 m/s için $\pm (0.1 \text{ m/s} + 5 \% \text{ÖD})$ (ÖD: Ölçülen Değer) hava hızının 2 ile 15 m/s arasında olması durumunda $\pm (0.3 \text{ m/s} + 5 \% \text{ÖD})$

Isı geçişi deneylerinde sıcaklığı ölçmek için Omega marka K tipi (Kromel + Alumel) termoeleman telleri kullanılmıştır. Bu termoelemanlar iki kat yalıtımlı ve özel hata sınırlıdır. Termoeleman tellerinin belirsizliği $\pm 1.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Isı geçiş deneylerinde sıcaklıklar, sistem sürekli rejime ulaşıncaya ölçülmüştür.

Bu ölçülen değerlerin boyutsuz sayıları belirlenmesi için kullanılması durumunda denklem 3.2 kullanılmaktadır (Kline, S. J., 1985).

$$W_R = \bar{r} \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} W_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} W_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} W_{x_n}\right)^2} \quad (3.2)$$

Bu metoda göre, hesaplanan parametre R ve W değişkeni, alt simge ile bir belirsizliği göstermektedir. Bu parametreyi etki eden n tane bağımsız değişkenler ise x_1, x_2, \dots, x_n olsun.

Hesaplanan parametrelerin belirsizlikleri, indirgenmiş basınç düşüşü ($\Delta P/Lu_m$) ve boyutsuz sayılar (Re_p, Re_K, Nu ve Nu_K) olarak ifade etmek mümkündür.

Yapılan deneylerin belirsizliği Çizelge 3.3.'de verilmiştir. Hava kanalındaki hesaplanan hızın belirsizliği %5,9 ile %14,5 arasında değişmektedir. Ortalama hız kullanılarak hesaplanan Re, Re_K , boyutsuz sayılarındaki belirsizliğin, büyük oranda hızdaki belirsizlikten kaynaklanmaktadır.

Çizelge 3.3. Deney verilerindeki belirsizlikler

| | Parametreler | Belirsizlikler |
|------------------------------------|------------------|----------------|
| Ölçüm Hataları | u_m [m/s] | 5.9% -14.5% |
| | T [°C] | 1.8 – 6.9 % |
| | ΔP | 0.03-15.6 % |
| Hesaplanan Parametrelerin Hataları | $\Delta P/Lsu_m$ | 5.96-21.8% |
| | Re_p | 5.9-14.5% |
| | Re_K | 5.95-14.6%. |
| | Nu | 9-14%. |
| | Nu_p | 9-14%. |

3.6. Basınç Düşüşü Deneyleri

Basınç düşüşü deneyleri kanal içerisinde gözenekli ortam olması ve kanalın boş olması durumunda yapılmıştır. Fakat boş kanal için yapılan basınç düşüşü deneyleri çok çok küçük olduğundan (3-10 Pa) basınçölçerinin belirsizlik aralığına düşmüştür. Bu yüzden boş kanal için yapılan deneyler tez çalışmasında yer verilmemiştir.

Basınç düşüşü deneylerin de test odasındaki basınç düşüşü verileri ile hava hızı verileri eş zamanlı olarak ölçülmüştür. Her bir hava hızı için yaklaşık 100 adet deney verisi alınmıştır. Daha sonra bu deney verilerin aritmetik ortalaması alınmış ve ortalama basınç düşüşü ve ortalama hız verileri elde edilmiştir.

Hava kanalından ölçülen havanın ortalama hızından, kanal içerisindeki kütleli debi hesaplanmıştır. Kütleli debiyi veren ifade denklem 3.3'de verilmiştir.

$$\dot{m} = \rho_f u_m A_c \quad (3.3)$$

Denklem de verilen ρ_f havanın yoğunluğunu (kg/m^3), u_m havanın ortalama hızı (m/s), A_c ise hava kanalının kesit alanıdır (m^2). Kanal hidrolik çapına göre hesaplanmış Reynolds sayısını veren ifade denklem 3.4'te verilmiştir.

$$Re = \frac{\rho u_m d_h}{\mu} \quad (3.4)$$

Denklemden verilen Re , Reynolds sayısı, d_h hidrolik çap, μ havanın viskozitesidir.

Gözenekli ortamda yapılan basınç düşüşü deneylerinde 2 farklı malzemeden yapılmış gyroid yapıda gözenekli ortam kullanılmıştır. Boş kanalda basınç düşüşü deneylerinde olduğu gibi basınç düşüşü verileri ile hız eş zamanlı olarak alınmış ve en az 100 adet deney verisinin ortalama değeri alınarak o hava hızında karşılık gelen basınç düşüşü değerleri belirlenmiştir. Farklı basınç ölçerlerin ölçüm aralığı, 0-5000 Pa olmasından dolayı bu basınç düşüşüne kadar hava hızı değerine çıkılmıştır. Bunun üzerinde basınç farkı için emiş fanının gücü yetmekte olup fakat basınçölçerlerin ölçüm aralığından çıktığından 5000 Pa değerinin üzerine çıkılamamıştır.

Hava kanalında her bir debi değiştirilmesinden sonra sistemin rejime gelmesi yani geçen hava debisinin sabitlenmesi beklenmekte ve daha sonra hız ve basınç düşüşü değerleri alınmıştır. Hesaplamalarda kullanılan havanın termofiziksel özellikleri ise o gün deney yapılan laboratuvar ortam sıcaklığı, bağıl nem ve atmosfer basıncı dikkate alınarak belirlenmiştir.

Gözenekli ortamlarda Reynolds sayısı parçacık ya da gözenek çapına veya geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayıları kullanılmaktadır. Bu Reynolds sayılarını veren ifadeler sırasıyla Denklem 3.5'te verilmiştir.

$$Re_K = \frac{\rho u_m \sqrt{K}}{\mu} \quad (3.5)$$

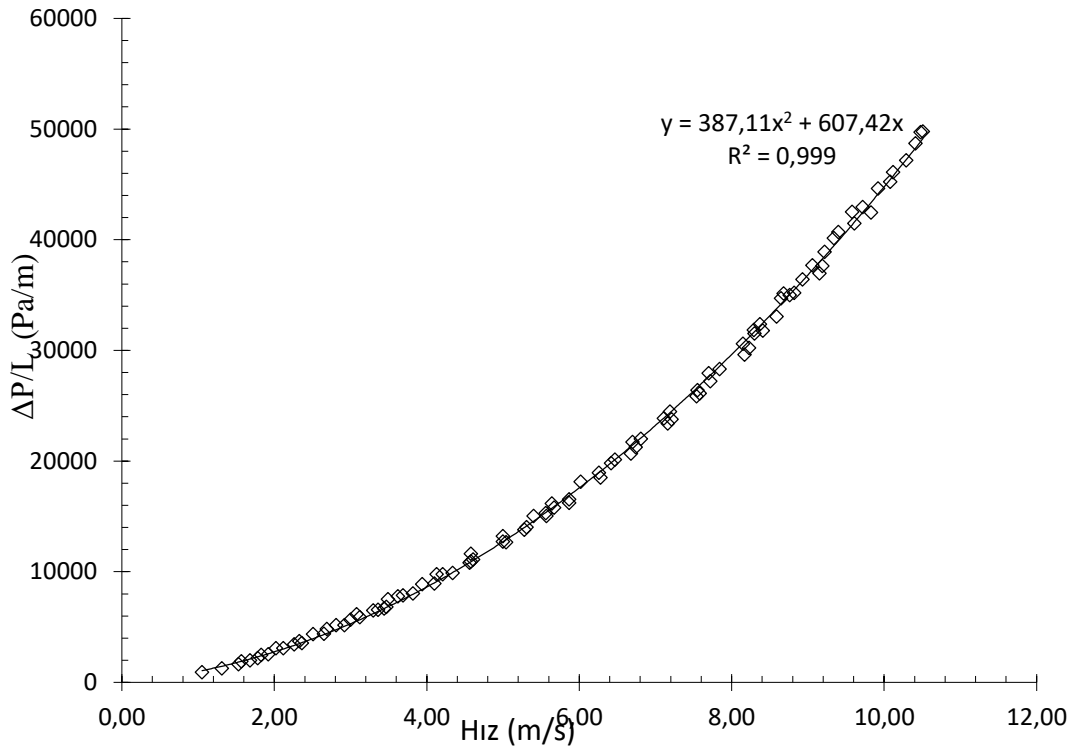
Bu denklemlerde verilen ρ havanın yoğunluğu, μ viskozitesini ve K ise geçirgenliği ifade etmektedir. Gözenekli ortamlarda basınç düşüşünü, gözenekli ortam uzunluğuna bölüldüğünde birim uzunluk başına düşen basınç düşüşünü elde edilmektedir.

Çizelge 3.4'de iki farklı malzemeden yapılmış gyroid yapıda gözenekli ortamların basınç farkı deneylerine ait deney verilerinin aralığı sunulmuştur.

Çizelge 3.4. Gözenekli ortamlarda basınç deneyleri

| Malzeme Cinsi | u_m [m/s] | Re_K | $\Delta P/L$ [Pa/m] | Deney Sayısı |
|------------------|-------------|-------------|---------------------|-----------------|
| PLA | 1.05-10.51 | 9.62-96.32 | 920-49780 | 98 |
| ABS | 1.18-11.24 | 12.74-121.4 | 960-49830 | 116 |

PLA malzemeden üretilen gözenekli ortamda birim uzunluk başına düşen basınç düşüşü ile hız arasındaki ilişki Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. PLA gözenekli ortamda basınç düşüşü ile hız arasındaki ilişki

PLA malzemesinden üretilen gyroid yapıda gözenekli ortamın gözenekliliği 0.67'dir. Şekil 4.6'da görüldüğü üzere gözenekli ortam içerisindeki hız arttıkça basınç düşüşü artmaktadır. Birim uzunluk başına düşen basınç düşüşü ile hız arasında 2. dereceden polinomla (quadratic) bir ilişki söz konusudur. Bu ilişki deney verileri uydurulan eğriden görülmektedir. Deney verilerine uydurulan bu 2. Dereceden polinom eğrinin R^2 değeri 1'e çok yakındır. Bu durum; ikinci dereceden uydurulan eğrinin, deneysel verileriyle iyi bir uyum içinde olduğunu göstermektedir.

Düşük hızlarda (Darcy rejimi) sadece viskoz etkiler söz konusu olup basınç düşüşü hızla lineer değişir, hız arttıkça atalet kuvvetleri etkili olmakta ve basınç düşüşü ile hız arasındaki ilişki paraboliktir.

Paket yataklarda basınç düşüşü çalışmalarından öncülerinden olan (Ergün, S., 1952) çeşitli büyüklükteki küreler, kum ve pulverize koklardan oluşan paket yataklardan parçacık çapına göre hesaplanmış Reynolds sayısı 100'e kadar deneysel bir çalışma yapılmıştır. Deneylerinde akışkan olarak gaz akışlarını incelemiştir. Sunduğu korelasyon denklem 3.6'da verilmiştir.

$$\frac{\Delta P}{L} = A_E \frac{(1 - \varepsilon)^2 \mu u_m}{\varepsilon^3 d^2} + B_E \frac{(1 - \varepsilon) \rho u_m^2}{\varepsilon^3 d} \quad (3.6)$$

Burada, A_E ve B_E katsayıları, Ergün sabitleri olup sırasıyla 150 ve 1.75'dir. (Ergün, S., 1952), Sunduğu bu korelasyon vekatsayılar düz paket yataklar için geçerlidir. Gözenekli ortam eğer bir köpükten elde edilmiş ise (Lage, J. L., 1998), geçirgenlik ve Forchheimer katsayısı cinsinden birim uzunluk başına düşen basınç düşüşünü veren ifadeyi denklem 3.7'yi kullanmak daha uygundur.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu u_m}{K} + \frac{\rho F u_m^2}{\sqrt{K}} \quad (3.7)$$

Bu denklemde K ile gösterilen terim geçirgenliği ve F ile gösterilen terim ise Forchheimer katsayısını ifade etmektedir. Denklem 7'nin sağ tarafındaki ilk terim viskoz geçirgenliği, ikinci terim ise atalet kuvvetlerini ifade etmektedir. Düşük hızlarda viskoz kuvvetler etkiliyken hız arttıkça atalet kuvvetlerinin etkisi de artmaktadır. (Lage, J. L., 1998)'nin sunduğu bu korelasyonda geçirgenliği ve Forchheimer katsayısını deney verilerinden hesaplamak mümkündür.

Ayrıca, geçirgenlik ve Forchheimer katsayısının gözeneklilik, bilye çapı ve (Ergün, S., 1952) ve Ergün sabitlerine karşılık gelen sayılardan hesaplamak mümkündür. Bu terimleri kullanarak geçirgenliği ve Forchheimer katsayısını veren ifadeler sırasıyla Denklem 3.8 ve Denklem 3.9'da verilmiştir.

$$K = \frac{\varepsilon^3 d^2}{A_E (1 - \varepsilon)^2} \quad (3.8)$$

$$F = \frac{B_E}{\sqrt{A_E}} \frac{1}{\varepsilon \sqrt{\varepsilon}} \quad (3.9)$$

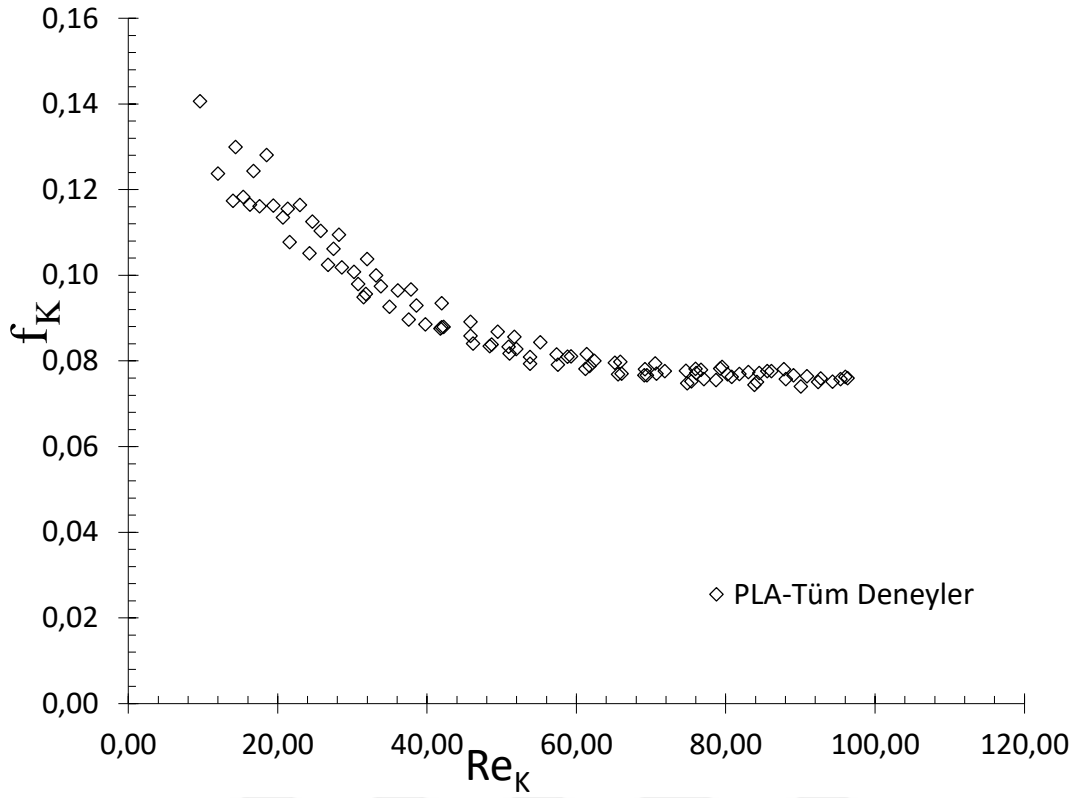
Denklem 7'den elde edilen geçirgenlik ve Forchheimer katsayısı Çizelge 3.4'de verilmiştir. Denklem 3.10'da gösterildiği gibi sürtünme faktörü tanımlamak mümkündür.

$$f = \frac{\Delta P}{4 \left(\frac{L}{d_h} \right) \left(\frac{\rho u_m^2}{2} \right)} \quad (3.10)$$

Hava kanalı dikdörtgen kesitli olduğu için hidrolik çapı Denklem 3.11'de gösterildiği gibi hesaplamak mümkündür.

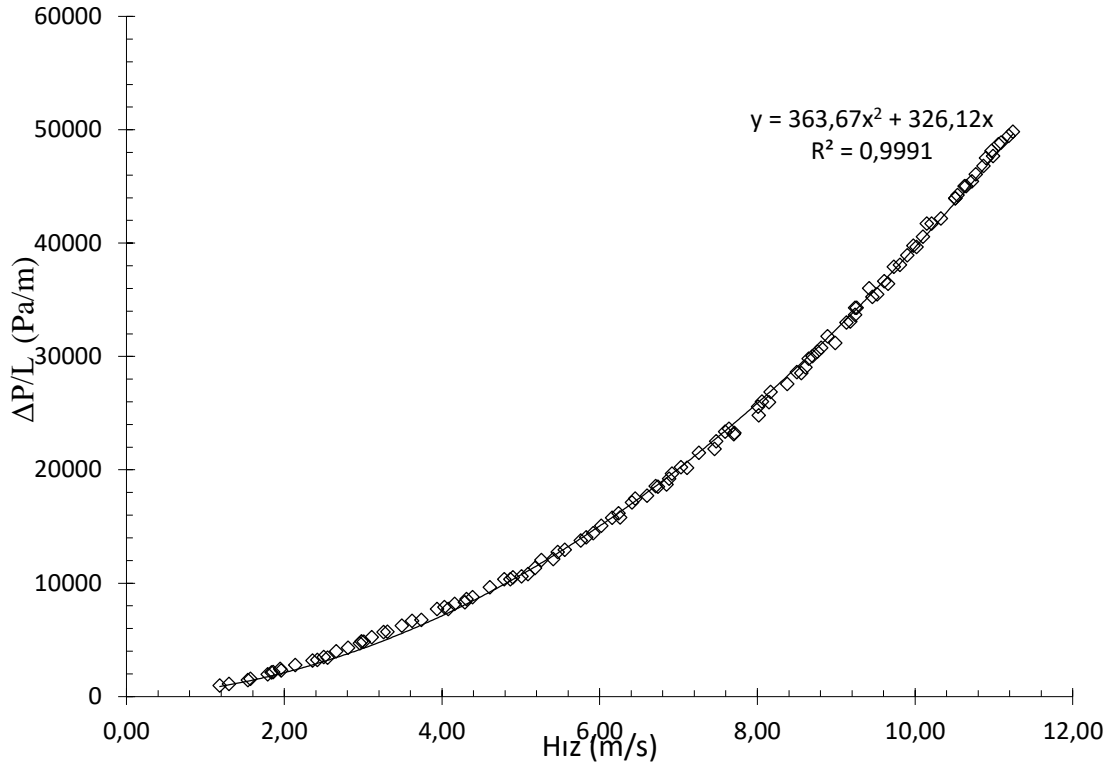
$$dh = \frac{4WH}{2(W + H)} \quad (3.11)$$

Kare kesitli deney odasının hidrolik çapı 50 mm'dir. Sürtünme faktörü, gözenekli kanal içindeki basınç düşüş davranışını daha iyi anlaşılmasını sağlayabilir ve genel kullanım için daha uygundur. Bu yüzden tüm deneysel veriler için geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısı ile sürtünme faktörünün değişimi Şekil 3.7.'de gösterilmektedir. Deney verileri beklenildiği gibi azalmakta ve asimptotik olarak sabite yaklaşmaktadır. Sunulan bu korelasyon gözenekli ortamlar için pratik kullanıma uygundur.



Şekil 3.7. Sürtünme faktörleri ile Re_K arasındaki ilişkisi

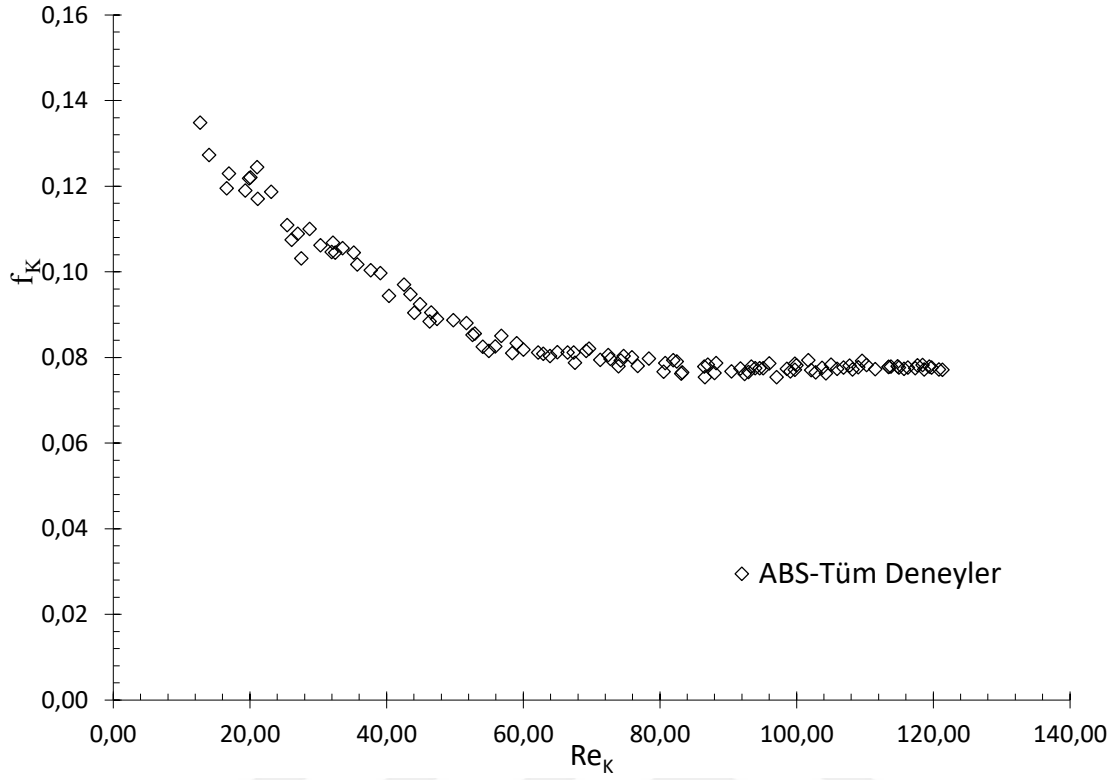
ABS malzemesinden üretilmiş gyroid yapıda gözenekli ortam için yapılan basınç deneylerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir. ABS malzemedan üretilen gözenekli ortamda birim uzunluk başına düşen basınç düşüşü ile hız arasındaki ilişki Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. ABS gözenekli ortamda basınç düşüşü ile hız arasındaki ilişki

ABS malzemesinden üretilen gyroid yapıda gözenekli ortamın gözenekliliği 0.78'dir. Şekil 3.8'de görüldüğü üzere gözenekli ortam içerisindeki hız arttıkça basınç düşüşü artmaktadır. Birim uzunluk başına düşen basınç düşüşü ile hız arasında 2. dereceden polinomla (kuadratik) bir ilişki söz konusudur. Bu ilişki deney verileri uydurulan eğriden görülmektedir. Deney verilerine uydurulan bu 2. dereceden polinom eğrinin R^2 değeri 1'e çok yakındır. Bu durum; ikinci dereceden uydurulan eğrinin, deneysel verileriyle iyi bir uyum içinde olduğunu göstermektedir.

ABS malzemeli gözenekli ortamın tüm deneysel veriler için geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısı ile sürtünme faktörünün değişimi Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Deney verileri beklenildiği gibi azalmakta ve asimptotik olarak sabite yaklaşmaktadır.



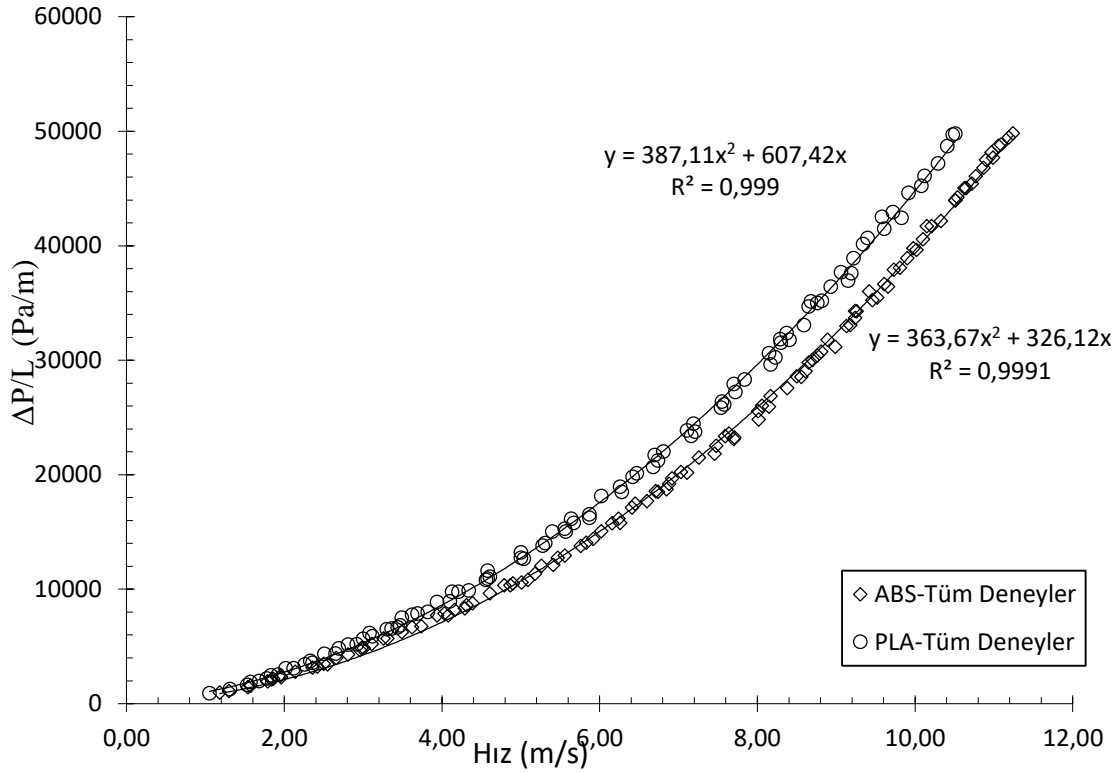
Şekil 3.9. Sürtünme faktörleri ile Re_k arasındaki ilişki

PLA ve ABS malzemelerinden üretilmiş gözenekli ortamların basınç deneyleri sonucunda elde edilen geçirgenlik ve Forchheimer katsayıları Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Deney verilerinden elde edilen geçirgenlik, forchhimer katsayıları

| Malzeme Cinsi | Geçirgenlik $\times 10^8$ [m ²] | Forchheimer Katsayısı |
|---------------|---|-----------------------|
| PLA | 2.97 | 0.07 |
| ABS | 5.52 | 0.09 |

PLA ve ABS malzemelerinden üretilen gözenekli ortamların gözeneklilikleri eşit olmadığından kıyaslamak çok mümkün değildir. Farklı gözeneklilik değerleri için deneylerden elde edilen için basınç düşüşü ile hız arasındaki ilişki Şekil 3.10’da verilmiştir. Her iki gözenekli ortamın gözeneklilik değerleri farklı olduğu için geçirgenlik ve Forchheimer katsayıları birbirinden farklıdır.



Şekil 3.10. Farklı malzemelerden üretilen gözenekli ortamların birim uzunluk başına düşen basınç düşüşü ile hız arasındaki ilişki

Şekil 3.10'da da görüldüğü üzere gözeneklilik değeri küçük olan PLA malzemeli gyroid gözenekli ortamında elde edilen basınç düşüşü değerleri daha yüksektir. Bu gözenekli ortamda gözenek çapı daha küçük olduğu için basınç düşüşü daha yüksektir. Gözenekliliğin düşük olması aynı hacimde iki gözenekli ortamda PLA malzemesinin katı hacminin daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Şekil 3.10'da görüldüğü üzere aynı hava hızlarında PLA malzemeli gözenekli ortamda basınç düşüşü daha yüksektir. Hava kanalı içerisinde ortalama hava hızını 8 m/s olduğu durumda PLA malzemeli gözenekli ortamda birim uzunluk başına düşen basınç düşüşü yaklaşık 30600 Pa iken ABS malzemeli gözenekli ortamda bu değer yaklaşık 25550 Pa'dır.

3.7. Isı Geçişi Deneyle

Isı geçiş deneyle, alt yüzeye sabit ısı akısı uygulanarak hava hızı ile yüzey ve akışkan sıcaklıklarının eş zamanlı ölçülmesiyle yapılmıştır. Deneylelerden ölçülen veriler,

deney sistemin sürekli rejime ulaşmasından sonra kaydedilmiştir. Deneyle, hava kanalın içerisinde boş olması, PLA gözenekli ortam ve ABS gözenekli ortam olma durumunda 3 farklı test odasında yapılmıştır.

Bu 3 farklı test odasında yapılan ısı geçişi en az 20 farklı hava hızında ve en az 3 farklı sabit ısı akısında yapılmıştır. Isı akısını sağlamak için elektrikli rezistans kullanılmış ve bu ısıtıcı DC güç kaynağı ile beslenmiştir. DC güç kaynağında bulunan ekran sayesinde ısıtıcının elektrikselle gücü belirlenmiş ve bu gücün tamamının ısıya dönüştüğü kabul edilmiştir. Elektrikselle güç deney başladıktan sonra ve sistem sürekli rejime ulaştığı ana kadar kontrol edilmiş ve deney boyunca yüzeye aynı ısı akısı uygulandığı kontrol edilmiştir.

Isı geçişi deneylerinde deney başlatıldığında başka bir deyişle ısıtıcıya güç uygulandığında yüzey sıcaklıkları ve akışkan sıcaklıkları artmakta ve sistem sürekli rejime ulaştığı başka bir deyişle zaman bu sıcaklık değerleri sabit değerlere ulaşmaktadır. Deney odasının sürekli rejime gelmesi her bir hava debisi için yaklaşık 2 saat sürmüştür. Sistem sürekli rejime ulaştığı sıcaklıkların değişmediği ana kadar kontrol edilmiş ve daha sonra sıcaklık, hız ve basınç düşüşü verileri veri toplama cihazı sayesinde bilgisayara aktarılmıştır. Sistem sürekli rejimde iken her bir termokupl için en az 100 adet sıcaklık verisi alınmış ve bu verilerin ortalaması alınarak o noktadaki sıcaklık değerleri belirlenmiştir.

Isı geçişi deneylerinin sürekli rejime gelmesi ve farklı ısı akılarında da deney yapılmasından dolayı deneyler aynı günde yapılamamıştır. Bu yüzden hesaplamalarda kullanılan havanın bağıl nemi atmosfer basıncı ve ortam sıcaklığı dikkate alınarak o günkü şartlardaki havanın termodinamik özellikleri kullanılmıştır.

Ortalama akışkan sıcaklığı belirlerken havanın giriş ve çıkışındaki 3 farklı yükseklikten sıcaklıklar ölçülmüş ve bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak gözenekli ortamın girişindeki ve çıkışındaki akışkan sıcaklıkları belirlenmiştir. Deney yapılan ortamdaki sıcaklık deneyler esnasında yaklaşık 15-19 °C arasında değişmektedir. Bağıl nemi ise yaklaşık %60 civarındadır.

Isı geçiş deneylerine ait deney bilgileri Çizelge 3.6'de verilmiştir. Test odasına bağıl olarak gözenekli ortamlar için havanın hızı 1.32 – 10,18 m/s arasında değişmekte iken boş kanal için hız 3.12 – 7,25 m/s arasında değişmektedir. Yüzeyle uygulanan sabit ısı akısı ise gözenekli ortam için 1863 ile 4708 W/m² , arasında olmak üzere 4 farklı ısı

akısında boş kanal için ise 1177, 1134 ve 2116 W/m² olmak üzere 3 farklı ısı akısında deneyler yapılmıştır.

Hava kanalın içerisinde boş veya gözenekli olması durumunda kullanılan boyutsuz ve boyutlu sayılar değişmekte olup deney verilerin analizi değişmektedir.

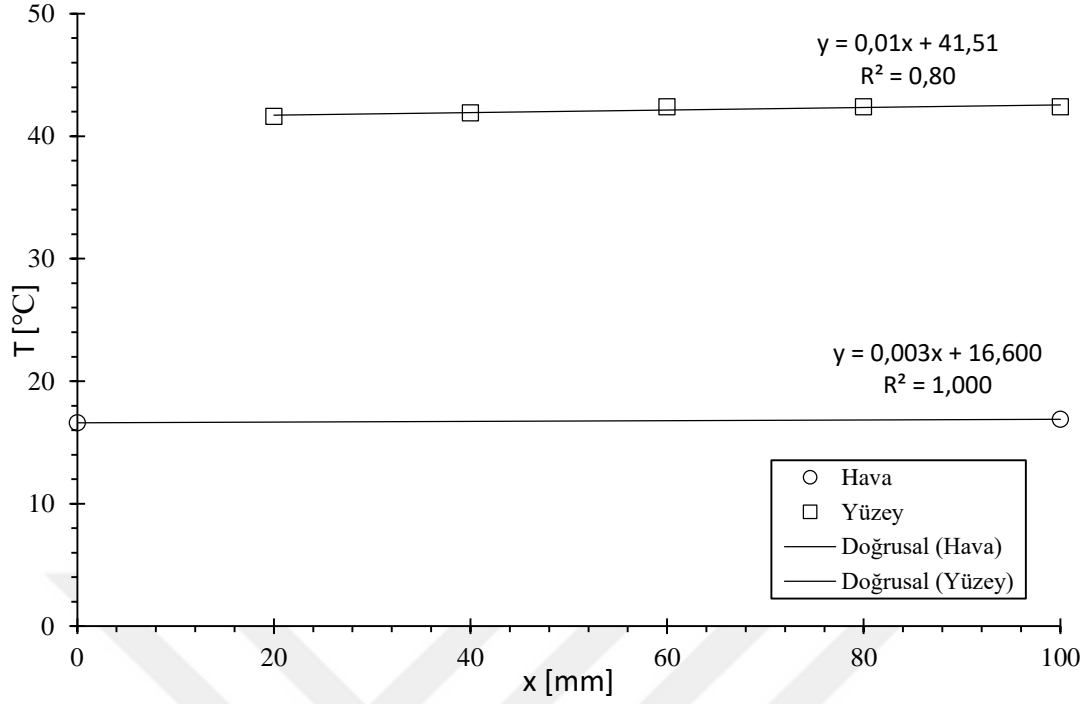
Çizelge 3.6. Gözenekli ortamda ısı geçişi deneysel bilgileri

| Malzeme Cinsi | PLA | ABS | Boş Kanal |
|---------------------------------|---|------------------------|------------------|
| Deneysel sayı | 24 | 22 | 12 |
| Isı akıları (W/m ²) | 1849, 1904, 3743, 3114, 2385, 2417, 3385, | 1863, 3801, 4708, 1945 | 1177, 1134, 2116 |
| u _m (m/s) | 2.21 – 9.56 | 1.32 – 10.18 | 3.12 – 7.25 |
| Re | - | - | 9302 - 21907 |
| Re _K | 22.66 – 98.33 | 15.31 - 118.4 | - |
| h (W/m ² K) | 75.2 – 170.1 | 65.5 – 223.7 | 36.3 – 49.04 |

3.7.1. Kanalın Boş Olması Durumunda Isı Geçişi Deneyleri

Test odasına gözenekli ortam yerleştirilmeden önce ısı deneyleri boş kanal için yapılmıştır. Boş kanal için 3 farklı ısı akısında deneyler yapılmış olup 9 farklı hava hızında ısı deneyleri yapılmıştır.

Kanalın boş olma durumunda yüzey sıcaklığı ve akışkan sıcaklığının konuma bağlı sıcaklığı Şekil 3.11’de verilmiştir. Verilen şeklin daha iyi anlaşılması için bir hava hızı 6.68 m/s olduğu, yüzeye uygulanan ısı akısının da 1177 W/m² olduğu durumda sıcaklıkların konuma bağlı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Boş kanala ait sıcaklıkların konumla değişimi

Şekil 3.11’de gösterilen sıcaklık verileri kanal içerisinde geçen havanın kütledebisi 0.01895 kg/s’dir. Yüzey sıcaklıkları ilk nokta da 40 °C’den son nokta 42.4 °C’dedir. Görüldüğü üzere yüzey sıcaklığı ısıtıcı yüzeyinde konuma bağlı olarak çok fazla değişmemektedir. Akışkan sıcaklığı ise 16.6 °C girmekte 17 °C’de çıkmaktadır. Şekil 3.11 sıcaklıklar çizdirilirken giriş yüzey sıcaklığı çizdirilmemiştir. Bunun sebebi giriş noktasında sistem ısıl olarak tam gelişmemiş bölgededir. Diğer boş kanal için deney verileri, Çizelge Ek C’de verilmiştir.

Gözenekli kanalda havanın yığın sıcaklığının deneysel olarak elde edilmesi oldukça zordur. Gözenekli ortam içerisinde havanın sıcaklığını ölçmek neredeyse imkansızdır. Bu yüzden ısıl olarak tam gelişmiş bölgede, havanın herhangi bir kesitindeki ortalama sıcaklığını Denklem 3.12’de gösterildiği gibi,

$$T_f = \frac{1}{u_m A} \int_A u T dA \quad (3.12)$$

hesaplamak mümkündür. Isıl olarak tam gelişmiş bölgede sıcaklık lineer olup Denklem 3.13’te gösterildiği gibidir.

$$\frac{dT_f}{dx} = \frac{dT_s}{dx} = \text{sabit} \quad (3.13)$$

Şekil 3.11’de ısı deney verilerine uydurulan lineer eğrilerden bakıldığında akışın tam gelişmiş olduğu görülmektedir. Burada, yüzey sıcaklığına ve hava sıcaklığına uydurulan eğrinin eğimleri hemen hemen aynıdır. Eğimlerinin katsayılarının aynı olması demek konuma bağlı hesaplanan yerel ısı taşınım katsayılarının her nokta için aynı olacağı anlamına gelmekte olup akışın ısıl olarak da tam geliştiğini göstermektedir.

Isıl ve Hidrodinamik olarak Tam Gelişmiş Akış için ortalama ısı taşınım katsayısının belirlenmesi

Hava kanalın test bölgesinde kanalın sadece alt kısmına sabit ısı akısı uygulanmış ve geri kalan üç yüzey ısıl olarak tam yalıtılmıştır. Bu yüzden kanala uygulanan ısı akısının tamamının akışkana geçtiği kabulü yaparak kanal içerisindeki havanın sıcaklığı da konuma bağlı olarak değişecektir. Buradan hesaplanan hava sıcaklığının konumla değişimi denklem 3.14’te verilmiştir.

$$T_f(x) = T_{f,i} + \frac{pq''}{\dot{m}c_p}x \quad (3.14)$$

Burada, $T_{f,i}$ havanın kanala girişindeki sıcaklık, p ise kanal çevre uzunluğudur. Kanal uzunluğu konumun bir fonksiyonu olduğundan yığın sıcaklığı beklenildiği gibi lineerdir.

Kanal yüzey sıcaklıklarının Newton’un soğuma yasasına göre, duvara uygulanan ısı akısı ile doğru orantılıdır. Yüzey sıcaklığının konuma bağlı olarak değişimi Denklem 3.15’te verilmiştir.

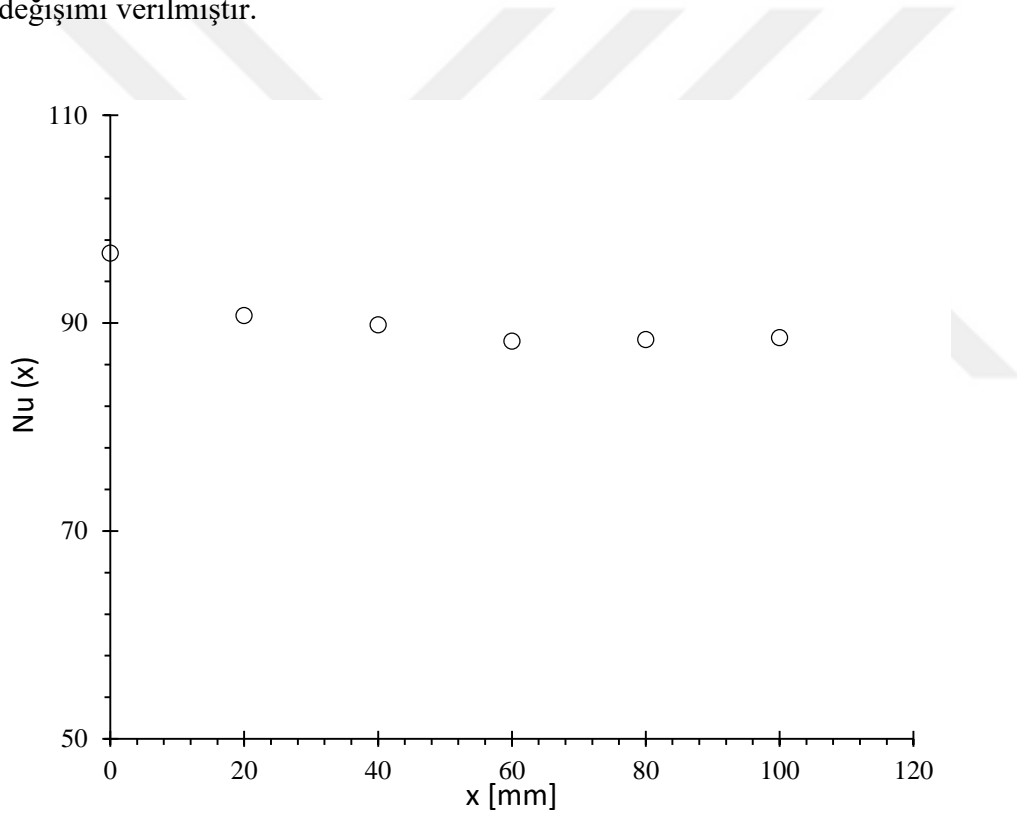
$$T_s(x) = T_{f,i} + \frac{pq''}{\dot{m}c_p}x + \frac{q''}{h} \quad (3.15)$$

Burada, h yüzeydeki ısı taşınım katsayısı, q'' ısı akısını ifade etmektedir. Kanal içerisinde akışın ısı olarak gelişip gelişmediğinin anlamının diğeri bir yöntemi de yerel Nusselt sayılarının değişimini incelemektir.

Yerel Nusselt sayısını Denklem 3.16 gösterildiği gibi

$$Nu(x) = \frac{h(x)d_h}{k_f} = \frac{q''d_h}{k_f(T_s(x) - T_f(x))} \quad (3.16)$$

hesaplamak mümkündür. Denklemde verilen k_f , havanın ısı iletim katsayısıdır. Şekil 3.12'de boş kanal için yapılan ısı deneylerine ait yerel Nusselt sayısının konuma bağlı değişimi verilmiştir.



Şekil 3.12. Boş kanal için yerel nusselt sayılarının konumla değişimi

Şekil 3.12'de verilen Nusselt sayısı hava hızı 6,68 m/s olduğu, yüzeye uygulanan ısı akısının da 1177 W/m² olduğu için verilmiştir. Şekil 3.12'de de görüldüğü üzere kanalın girişinde Yerel Nusselt sayısı daha yüksek olup yüzeyin diğer konumlarında yerel Nusselt sayılarının aynı olduğu görülmektedir. Başka bir deyişle konumun 20 mm olduğu

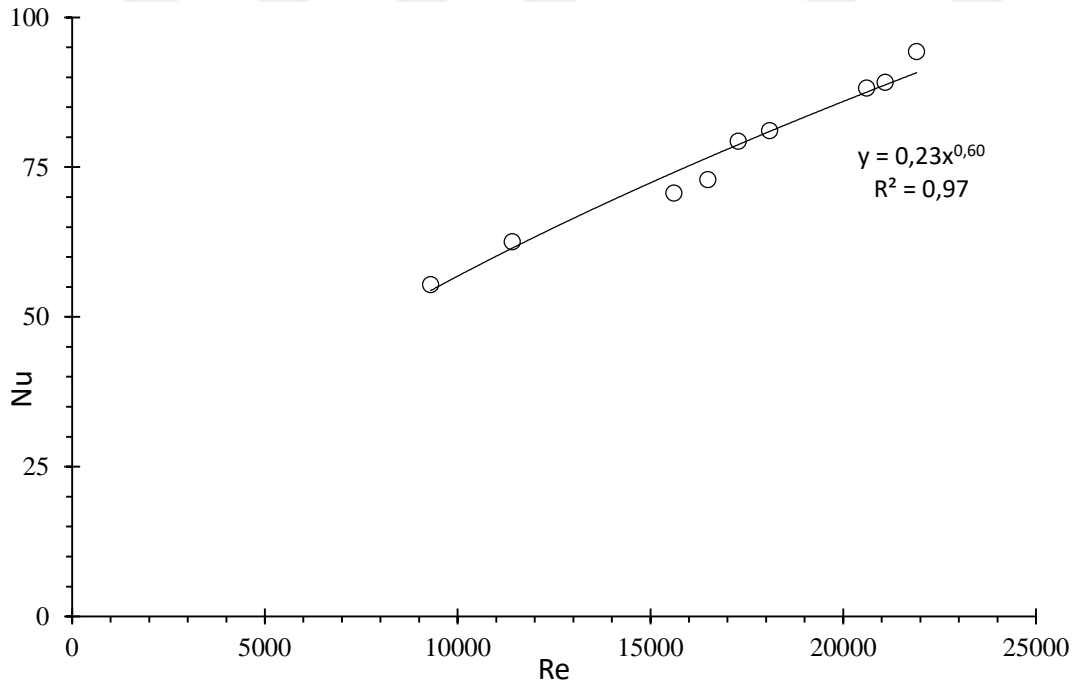
duruma kadar değer asimptotik olarak azalmakta ve bu değerden sonra belirli bir değere yakınsamaktadır.

Bu durumda kanalın giriş noktasında yerel Nusselt sayısının yüksek olması akışın ışıl olarak gelişmekte olan bölgede kaldığı ve ikinci termokupldan sonra kanalın girişinden 20 mm sonra akış ışıl olarak geliştiği görülmektedir. Akışın ışıl olarak tam geliştiği bölgelerde taşınım katsayıları belirlenmiş ve bu ışı taşınım katsayılarının aritmetik ortalaması alınarak o hava debisine karşılık gelen ışı taşınım katsayısı belirlenmiştir.

Akışın ışıl ve hidrodinamik olarak tam geliştiği durumda, elde edilen ışı taşınım katsayılarından ortalama Nusselt sayısı Denklem 3.17’de gösterildiği gibi

$$Nu = \frac{h d_h}{k_f} = \frac{q'' d_h}{k_f (T_s - T_f)} \quad (3.17)$$

Tanımlamak mümkündür. Burada, T_s ve T_f terimleri sırasıyla yüzey ve akışkan sıcaklığını ifade etmektedir. Şekil 3.13’te kanalın boş olma durumunda ortalama Nusselt sayısı ile Reynolds sayısının değişimi verilmiştir.



Şekil 3.13. Nusselt sayısı reynolds sayısı arasındaki ilişki

Deney verilerinden hesaplanan ısıl olarak tam gelişmiş bölgede boş kanala ait Nusselt sayıları, Denklem 3.18’de verilmiştir.

$$Nu = 0.23Re^{0.60} \quad (3.18)$$

Ortalama Nusselt sayıları, Reynolds sayısını bir fonksiyonu olup Reynolds sayısının üssü şeklinde değişmektedir. Nusselt sayısı veren korelasyonlarda Prandtl sayısına bağlı Nusselt korelasyonları sunulmaktadır. Prandtl sayısının sunulabilmesi için farklı akışkanlarda da deney yapılması daha uygundur. Deney şartlarında hava için hesaplanan Prandtl sayısı hemen hemen hep aynıdır.

Denklem 19’de verilen korelasyon akışkan olarak hava için uygun olup Reynolds sayısının 9302 – 21907 aralığında olduğu durumlarda geçerlidir. Boş kanal ısı deney verilerine üstel bir eğri uydurulmuş ve görüldüğü üzere R^2 değeri bire çok yakın değerdedir. Bu R^2 değerinin bire yakın olması uydurulan eğri ile deneden elde edilen verilerin uyumunu göstermektedir. Birden uzaklaşıp sifıra yaklaşması Uydurulan eğri başka bir deyişle korelasyon deneysel verilerle uyumu o kadar kötü olduğu anlamına gelmektedir.

3.7.2. Kanalın Gözenekli Ortam Olması Durumunda Isı Geçişi Deneyleri

3.7.2.1. ABS Malzemesinden Üretilen Gözenekli Ortamda Isı Geçişi Deneyleri

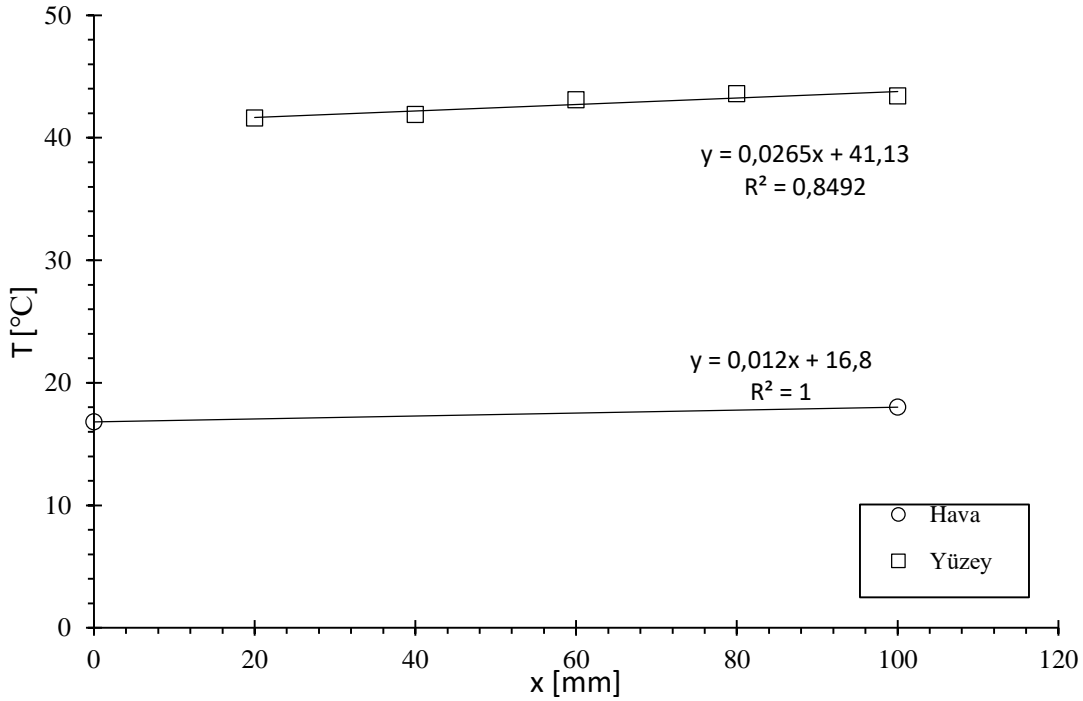
3 boyutlu yazıcıdan üretilmiş ABS malzemeli gyroid şekil gözenekli ortamda ısı geçişi deneyleri sabit ısı akısında yapılmıştır. Gözenekli ortam hava kanalına yerleştirildikten sonra, kanalın giriş ve çıkışında üç farklı yüksekliklerde termokupl yerleştirilmiştir.

Boş kanalda yapılan ısı geçişi deney metotları gözenekli ortamda yapılacak ısı geçişi deneylerine adım adım aynı olacak şekilde uygulanmıştır.

Gözenekli ortamlı test odasına sabit ısı akısı uygulanmış yüzey ve akışkan sıcaklıkları artmaya başlamış ve belirli bir süre geçtikten sonra sıcaklıkları dengeye gelmiştir. Böyle deney tesisatı ısıl olarak dengeye ulaşmış ve ısıl olarak dengeye

ulaştıktan sonra sıcaklık, basınç, hız ve elektriksel güç değerleri veri toplama cihazı aracılığıyla bilgisayara aktarılarak kaydedilmiştir.

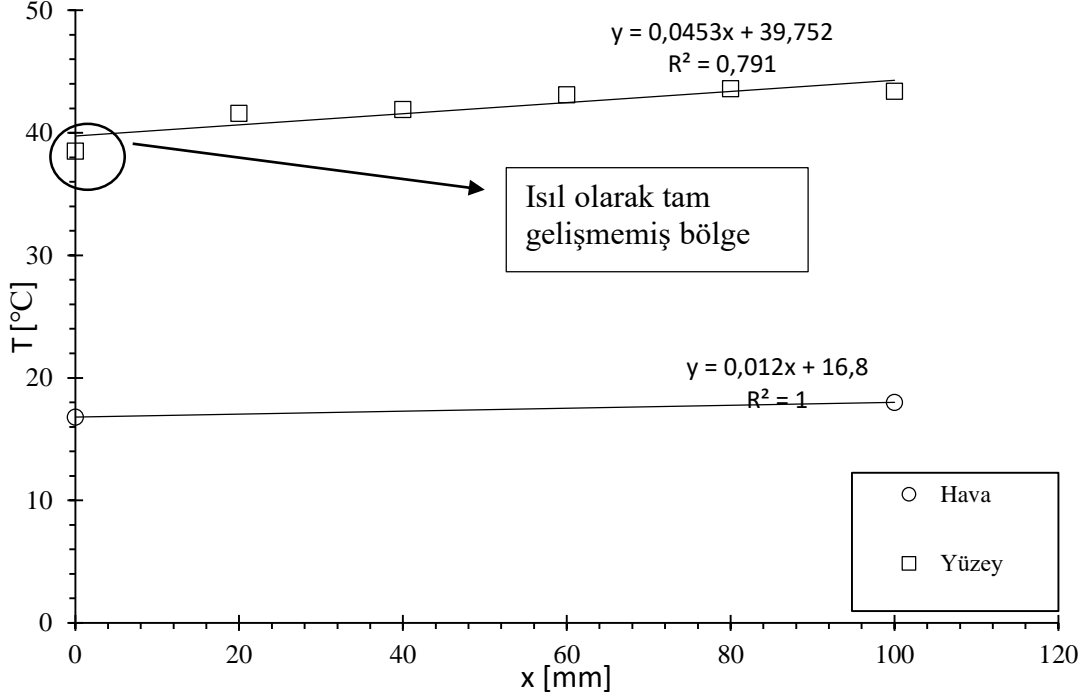
Sıcaklıkların artışı ve deneye ulaştığını daha iyi görselleştirebilmek için boş hava kanalında olduğu gibi burada da tek bir hava hızında deney verileri sunulmuştur. Şekil 3.14'te ABS malzemeli gözenekli ortamda sıcaklıkların konuma bağlı değişimi verilmiştir. Şekildeki sıcaklık bilgileri, gözenekli ortama uygulanan ısı akısı 3802 W/m^2 kanaldan geçen havanın hızı $5,96 \text{ m/s}$ ve havanın kütleli debisi $0,01606 \text{ kg/s}$ 'dir. Ortam sıcaklığı yaklaşık $16 \text{ }^\circ\text{C}$ iken deney başlatılmış yüzey sıcaklığı bu sıcaklıktan $38,5 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar ulaşmıştır. Kanalın giriş konumunda sıcaklık $38,8 \text{ }^\circ\text{C}$ iken çıkışında $43,8 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ulaşmıştır. Hava ise gözenekli ortama girmeden önce $16,8 \text{ }^\circ\text{C}$ gözenekli ortamdan çıktıktan sonra $18,1 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.14. ABS gözenekli ortamda yüzey ve akışkan sıcaklıklarının konumla değişimi

Şekil 3.14 gösterilen sıcaklık verilerine uydurulan eğrilerin eğimi hemen hemen aynı değerdedir. Bu eğimlerinin birbirine yakın olması o konumlarda akış ısı olarak tam geliştiğini göstermektedir. Boş kanalda ısı geçişi deneylerinde olduğu gibi burada da gözenekli ortamın ilk giriş noktasında akış ısı olarak tam gelişmediği başka bir deyişle

ısl olarak gelişmekte olan akış bölgesinde olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3.15'te ABS gözenekli ortamda ısl olarak tam gelişmekte bölge olduğu gösterilmiştir.



Şekil 3.15. ABS gözenekli ortamda ısl olarak tam gelişmiş bölge tespiti

Test odasının girişinde (x=0 mm) olduğu durumda giriş bölgesinin ısl olarak gelişmekte olan akış bölgesindedir. Şekil 3.15'te her yüzey ve akışkan sıcaklıkları verilerine eğriler uydurulmuştur. Uydurulan bu lineer eğrilerin eğimleri birbirine çok yakın olmadığı giriş noktasındaki sıcaklık düşük kaldığı görülmüştür.

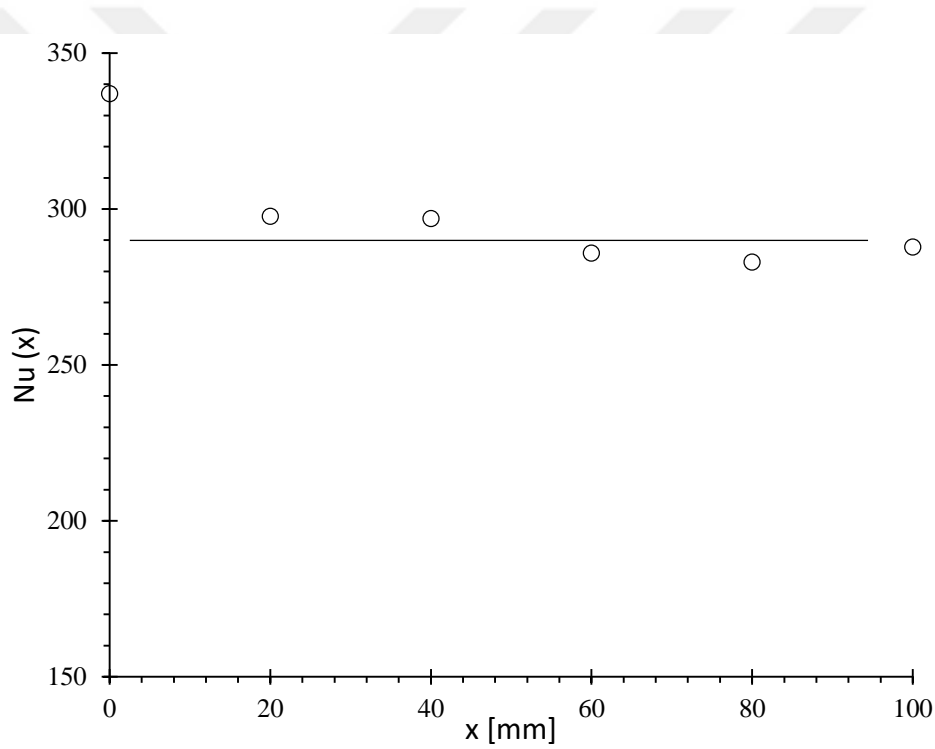
Denklem 14 ve Denklem 15'te gösterildiği gibi akışan ve yüzey sıcaklıkları konuma göre lineer olarak artmaktadır. Deney verilerinin her bir noktasındaki sıcaklık verilerine de uydurulan bu eğrilerin eğimlerinin eşit olması beklenmektedir. Şekil 3.14'de gösterildiği üzere giriş konumundaki yüzey sıcaklığı dahil edilmediği durumda hem yüzey hem de akışkan sıcaklığının eğimlerinin hemen hemen eşit olduğu görülmüş olup bu bölgelerde akış ısl olarak tam gelişmiş bölgededir.

Deney odaları ve farklı malzeme oluşturulan gözenekli ortamlarda ısı geçişi deney verileri, Şekilleri Ek A'da verilmiştir. Burada; Sıcaklıkların konumla değişimi, yerel ısı taşınım katsayısı ve yerel Nusselt sayısının konuma göre değişimleri verilmiştir.

Gözenekli ortam için akışın ısı ve hidrodinamik olarak tam geliştiği bölgede, deney verilerinden elde edilen ısı taşınım katsayısından yerel Nusselt sayısı aşağıda görüldüğü gibi,

$$Nu_p(x) = \frac{h(x) d_h}{k_f} \quad (3.19)$$

Hesaplamak mümkündür. Burada, $h(x)$ yerel ısı taşınım katsayısı, d_h kanal hidrolik çapıdır. Aynı hava hızı ve ısı akışı için yapılan deneylerde yerel Nusselt sayısının konuma göre değişimi Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.16. Yerel nusselt sayısının konuma göre değişimi

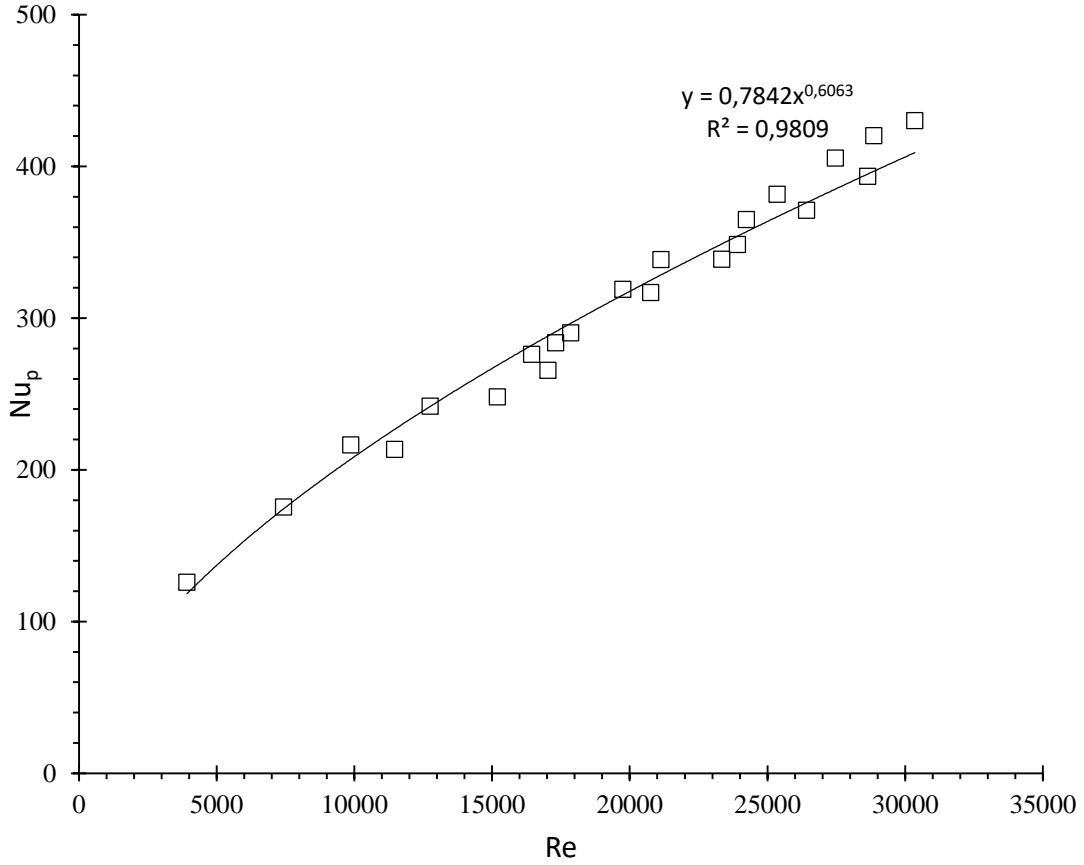
Yüzey sıcaklıklarından da beklenildiği gibi giriş bölgesinde ortalama Nusselt sayısı yüksek değerlerde olup akışın ısı olarak gelişmiş bölgede kanal sonuna doğru asimptotik azalarak belli bir değere sabitlenmektedir.

Ortalama Nusselt sayısını hem kanal hidrolik çapa göre hem de geçirgenliğe göre hesaplamak mümkündür. Ortalama Nusselt sayısının hidrolik çapa ve geçirgenliği göre formülasyonu sırasıyla Denklem 3.20 ve Denklem 3.21’de sırasıyla verilmiştir.

$$Nu_p = \frac{h d_h}{k_f} = \frac{q'' d_h}{k_f (T_s - T_f)} \quad (3.20)$$

$$Nu_K = \frac{h \sqrt{K}}{k_f} = \frac{q'' \sqrt{K}}{k_f (T_s - T_f)} \quad (3.21)$$

Deney verilerinden elde edilen ortalama Nusselt sayılarının ilk önce Şekil 3.17’de Reynolds sayısı ile değişimi verilmiştir.



Şekil 3.17. Kanal hidrolik çapına göre hesaplanmış nusselt sayısının reynolds sayısı arasındaki ilişki

Şekilde deney verilerine uydurulan eğri, boş kanal yapılan çalışmalarda olduğu gibi üssel bir ilişki olduğu görülmüştür. Hesaplanarak elde edilen ortalama Nusselt sayılarına uydurulan eğrinin R^2 değeri sıfırdan uzak ve bire oldukça yakın olduğu

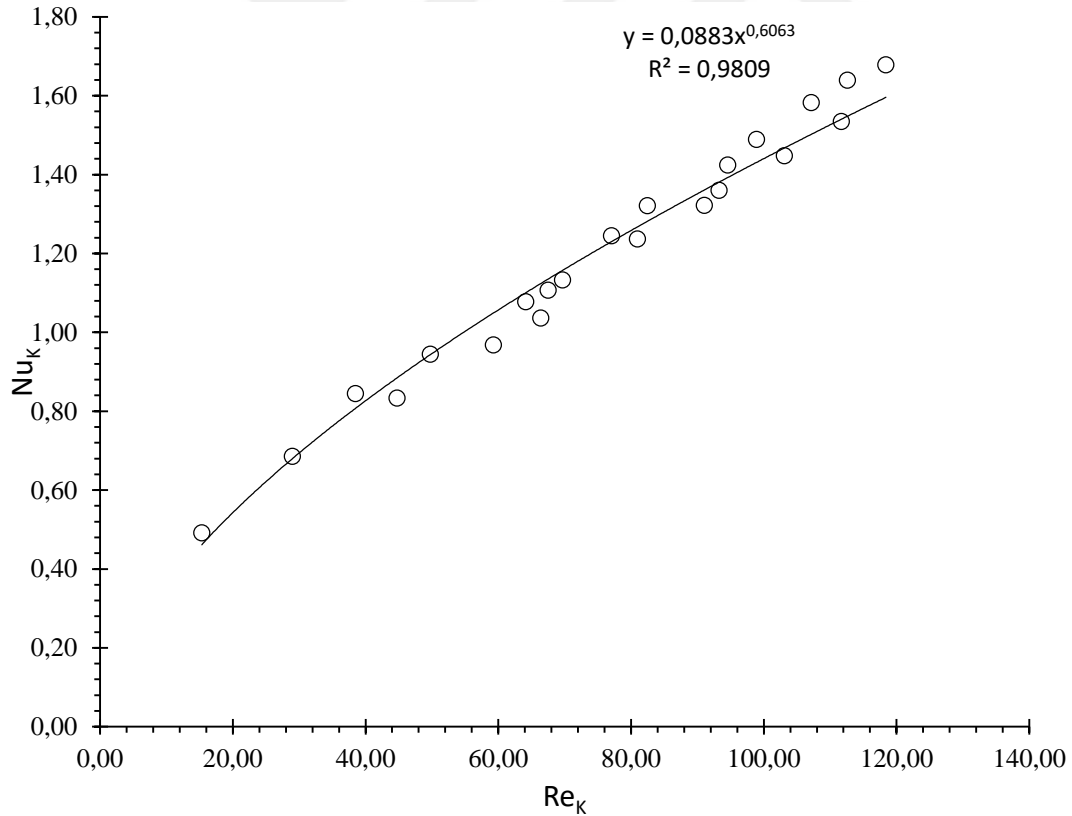
görülmüştür. Bu durumda uydurulan eğri ile hesaplanan Nusselt sayısının uyumlu olduğunu göstermektedir.

Kanal hidrolik çapına göre hesaplanmış Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi üssel bir fonksiyon olup bu ilişki Denklem 3.22’de verilmiştir.

$$Nu_p = 0.78Re^{0.61} \quad (3.22)$$

Bu Nusselt korelasyonu ABS malzemesi için verilmiş olup, 22 adet deney verisi mevcuttur. Fakat bu verilen korelasyon gözenekli ortam için çok uygun olmadığı tespit edilmiş ve bu yüzden geçirgenliğe göre hesaplanmış Nusselt sayısı ile geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısı arasındaki ilişki incelenmiştir.

Şekil 3.18’de geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısı ile geçirgenliğe göre hesaplanmış Nusselt sayısının ilişkisi verilmiştir.



Şekil 3.18. Geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısı ve nusselt sayısının ilişkisi

Şekilde kullanılan boyutsuz sayılar gözenekli ortamlar için en çok kullanılan boyutsuz sayılar olup, bu boyutsuz sayılarla korelasyonları sunulması hem literatüre katkısı incelenmesi hem de literatürle kıyaslanabilmesi için oldukça önemlidir.

Şekilde deney verilerine uydurulan eğri, kanal hidrolik çapına göre hesaplanmış Nusselt ve Reynolds sayılarındaki ilişki de olduğu gibi üssel bir ilişki olduğu görülmüştür. Hesaplanarak elde edilen ortalama Nusselt sayılarına uydurulan eğrinin R^2 değeri sıfırdan uzak ve bire oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bu durumda uydurulan eğri ile hesaplanan Nusselt sayısının uyumlu olduğunu göstermektedir.

Geçirgenliğe göre hesaplanmış Nusselt sayısı ile Reynolds sayısının ilişkisi üssel bir fonksiyon olup bu ilişki Denklem 3.23'te verilmiştir.

$$Nu_K = 0.09Re_{\sqrt{K}}^{0.61} \quad (3.23)$$

Bu Nusselt korelasyonu ABS malzemesi için verilmiş olup, 22 adet deney verisi mevcuttur. Denklem 22 ve Denklem 23 de sunulan her iki korelasyon hava için uygun olup geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısının 20 ile 120 arasında geçerlidir.

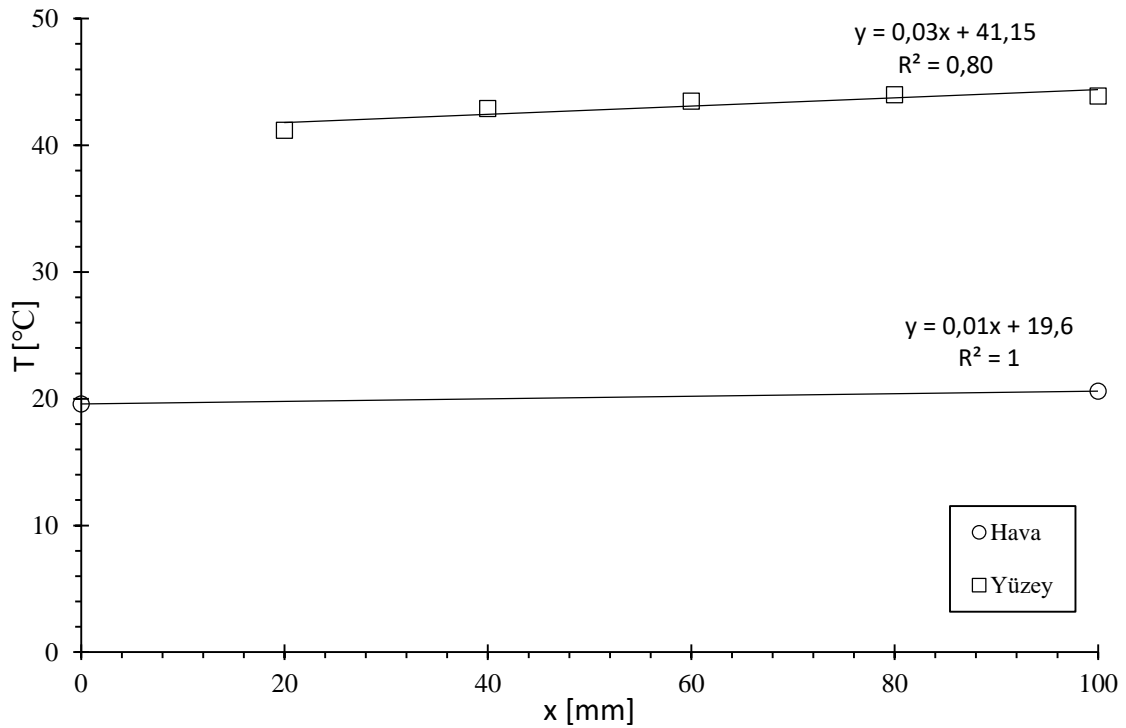
3.7.2.2. PLA Malzemesinden Üretilen Gözenekli Ortamda Isı Geçiş DeneYleri

3 Boyutlu yazıcıdan üretilen PLA malzemeli gyroid şekil gözenekli ortamda ısı geçiş deneYleri sabit ısı akısında yapılmıştır. Yine ABS gözenekli ortam deneYlerinde olduğu gibi PLA gözenekli ortam deneYlerinde de, gözenekli ortam hava kanalına yerleştirildikten sonra, kanalın giriş ve çıkışında üç farklı yüksekliklerde termokupl yerleştirilmiştir.

ABS gözenekli ortamda yapılan ısı geçiş deneY çalışmaları, aynı olacak şekilde PLA gözenekli ortamda da yapılmıştır. Alt yüzeye sabit ısı akısı uygulanmış, yüzey ve akışkan sıcaklıkları da artmaya başlamıştır. Daha sonra sistem sürekli rejime ulaşmış ve termokupllardan ölçülen sıcaklık değerleri belirli bir değerde sabitlenerek salınım yapmaya başlamıştır. Bu zamandan sonra sıcaklık, basınç, hız ve elektriksel güç değerleri veri toplama cihazı aracılığıyla bilgisayara aktarılarak kaydedilmiştir.

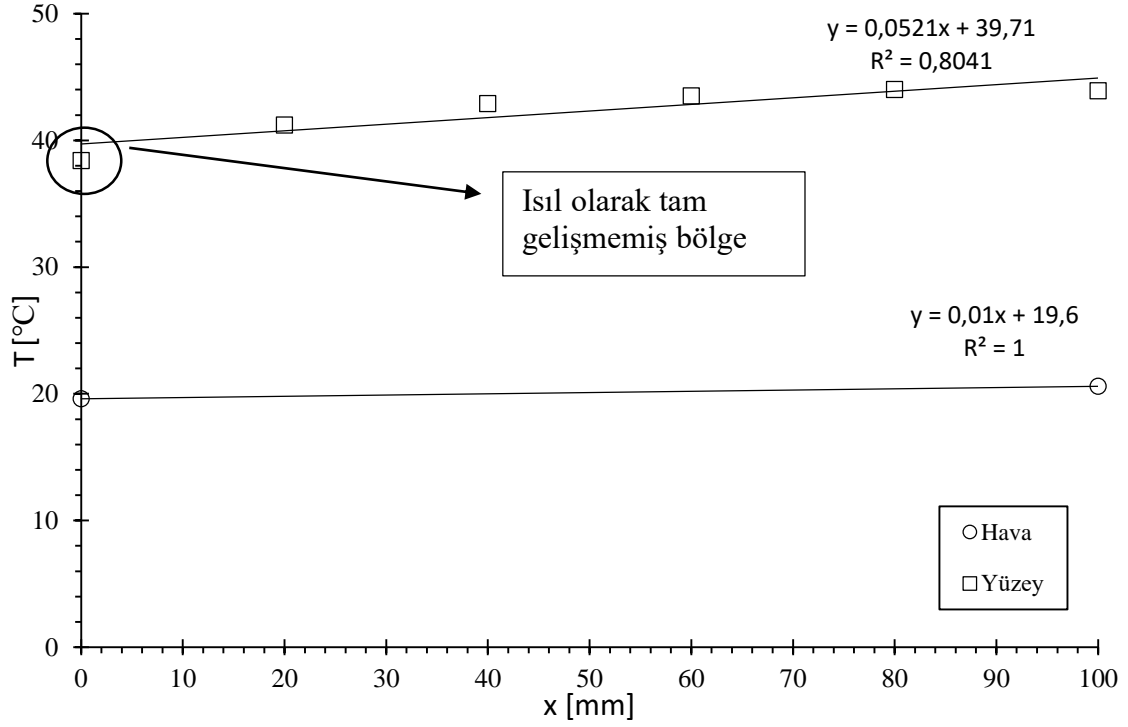
ABS gözenekli ortam deneY sonuçları analizinde olduğu gibi PLA gözenekli ortam deneYlerinde de ısı sonuçları analiz edilmiştir. Sonuçları dahi iyi ortaya çıkarmak için tek

bir hava hızında deney verileri sunulmuştur. Şekil3.19'da PLA gözenekli ortamda sıcaklıkların konuma bağlı değişimi verilmiştir. Şekildeki sıcaklık bilgileri, gözenekli ortama uygulanan ısı akısı 3097 W/m^2 kanaldan geçen havanın hızı 6.34 m/s ve havanın kütleli debisi 0.01723 kg/s 'dir. Ortam sıcaklığı yaklaşık $18.9 \text{ }^\circ\text{C}$ iken deney başlatılmış yüzey sıcaklığı bu sıcaklıktan $44.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar ulaşmıştır. Kanalin giriş konumunda yüzey sıcaklık değerleri $38.4 \text{ }^\circ\text{C}$ iken çıkışında $44.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ulaşmıştır. Hava ise gözenekli ortama girmeden önce $19.4 \text{ }^\circ\text{C}$ gözenekli ortamdan çıktıktan sonra $20.6 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.19. PLA gözenekli ortamda yüzey ve akışkan sıcaklıklarının konumla değişimi

Şekil 3.19 gösterilen yüzey ve akışkan sıcaklık verilerine uydurulan eğrilerin eğimleri hemen aynı değerdedir. Bu eğimlerinin birbirine yakın olması o konumlarda akış ısı olarak tam geliştiğinin göstergesidir. Boş kanalda ve ABS gözenekli ortamda ısı geçişi deneylerinde olduğu gibi PLA gözenekli ortamın ilk giriş noktasında akış ısı olarak tam gelişmemiş noktadadır.

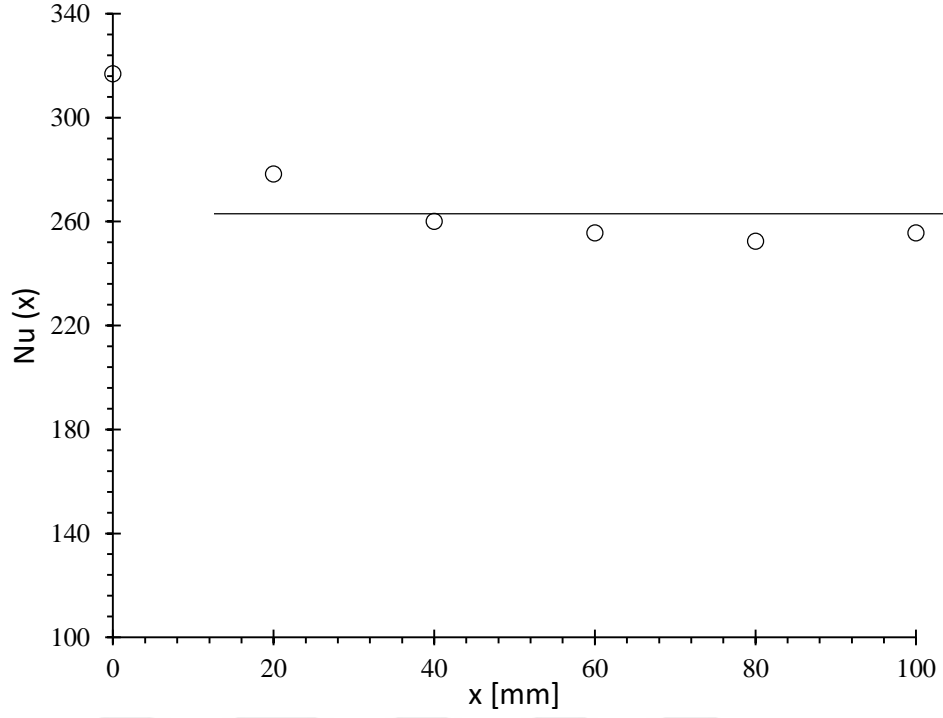


Şekil 3.20. PLA gözenekli ortamda ısıl olarak tam gelişmiş bölge tespiti

Test odasının girişinde ($x=0$ mm) giriş bölgesinin ısıl olarak gelişmekte olan akış bölgesindedir. Yüzey sıcaklığına uydurulan eğrinin altında kalmıştır. Denklem 3.24 ve Denklem 3.25'te gösterildiği gibi akışkan ve yüzey sıcaklıkları konuma göre lineer olarak artmaktadır. Deney verilerin her bir noktasındaki sıcaklık verilerine de uydurulan bu eğrilerin eğimlerinin eşit olması beklenmektedir. Şekil 3.19'da gösterildiği üzere giriş konumundaki yüzey sıcaklığı dahil edilmediği durumda hem yüzey hem de akışkan sıcaklığının eğimlerinin hemen hemen eşit olduğu görülmüştür. Eğimlerinin aynı olması akışın ısıl olarak tam geliştiğinin göstergesidir.

PLA gözenekli ortamlarda ısı geçişi deney verileri, şekilleri EK B'de verilmiştir. Burada; Sıcaklıkların konumla değişimi, yerel ısı taşınım katsayısı ve yerel Nusselt sayısının konuma göre değişimleri verilmiştir.

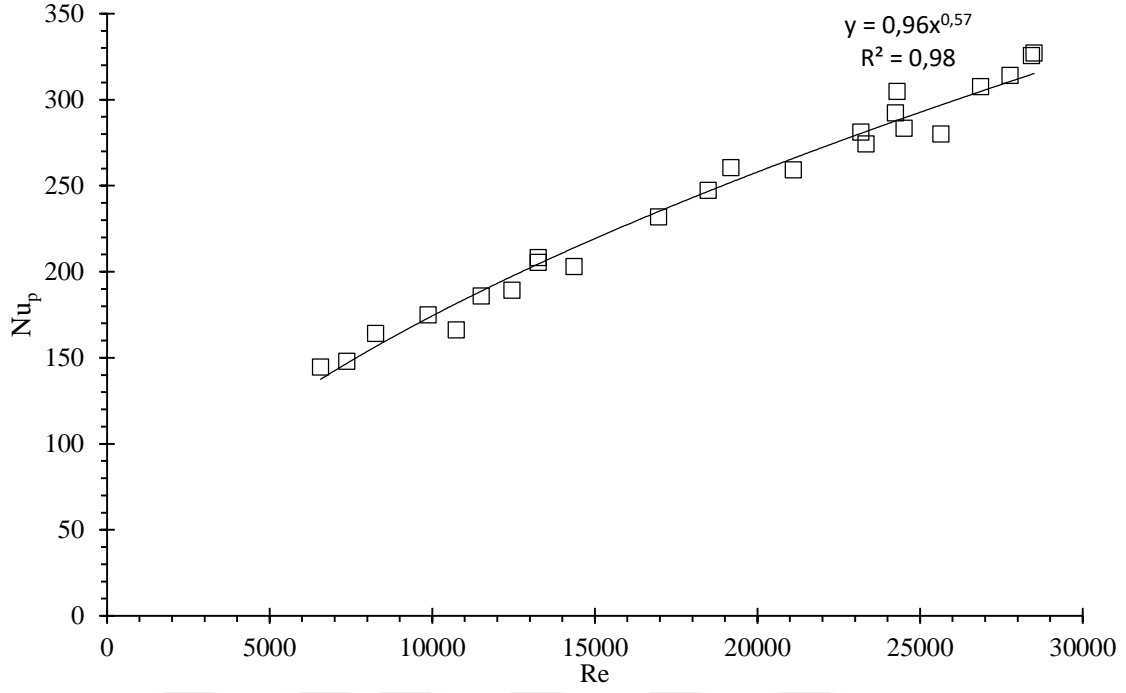
Gözenekli ortam için akışın ısıl ve hidrodinamik olarak tam geliştiği bölgede, deney verilerinden elde edilen ısı taşınım katsayısından yerel Nusselt sayısı Denklem 19'da verilen eşitsizlikle hesaplanabilir. Aynı Hava hızı ve ısı akısı için yapılan deneylerde yerel Nusselt sayısının konuma göre değişimi Şekil 3.21 'de verilmiştir.



Şekil 3.21. Yerel nusselt sayısının konuma göre değişimi

Giriş bölgesinde ($x=0$ ile $x=20$ mm arası) ortalama Nusselt sayısı yüksek değerde olup akışın ısıl olarak gelişmiş bölgede kanal sonuna doğru asimptotik azalarak belli bir değere sabitlenmektedir.

Ortalama Nusselt sayısını hem kanal hidrolik çapa hem de geçirgenliğe göre sırasıyla Denklem 20 ve Denklem 21’de hesaplamak mümkündür. Deney verilerinden elde edilen hidrolik çapa göre hesaplanmış ortalama Nusselt sayılarının Şekil 3.22 ‘de Reynolds sayısı ile değişimi verilmiştir.



Şekil 3.22. Kanal hidrolik çapına göre hesaplanmış nusselt sayısının reynolds sayısı arasındaki ilişki

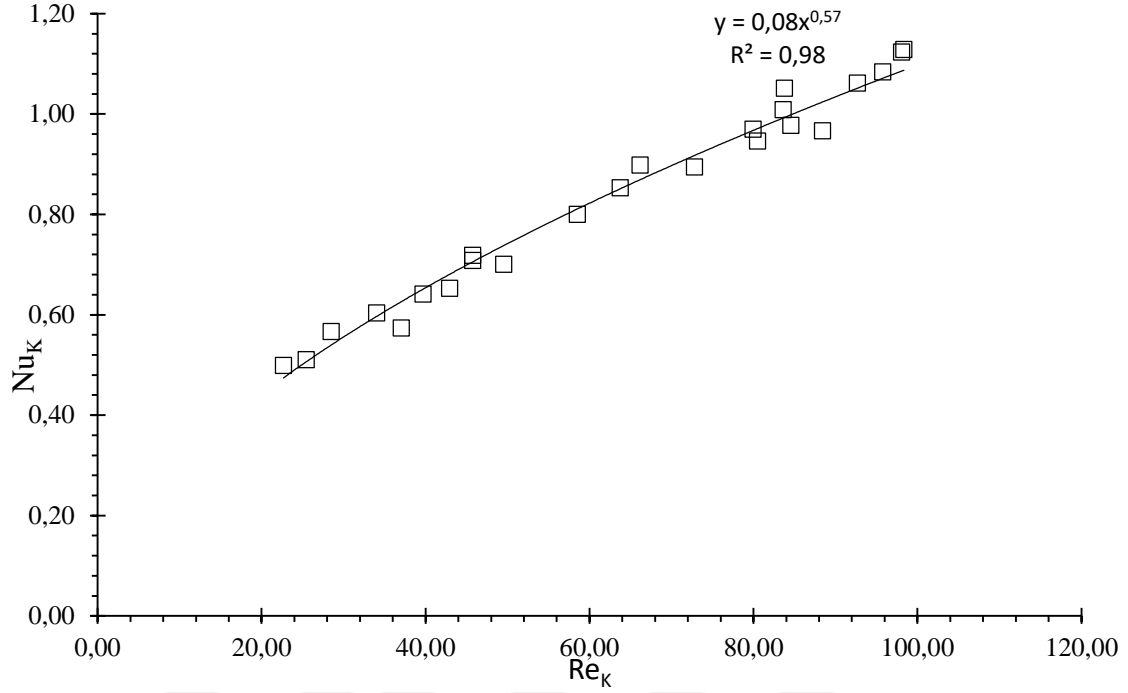
Şekilde deney verilerine uydurulan eğri, boş kanal ve ABS gözenekli ortamda yapılan çalışmalarda olduğu gibi Nusselt sayısı ile Reynolds sayısı arasında üssel bir ilişki olduğu görülmüştür. Hesaplanarak elde edilen ortalama Nusselt sayılarına uydurulan eğrinin R^2 değeri bire oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bu durumda uydurulan eğri ile hesaplanan Nusselt sayısının uyumlu olduğunu göstermektedir.

Kanal hidrolik çapına göre hesaplanmış Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi üssel bir fonksiyon olup bu ilişki Denklem 3.24’de verilmiştir.

$$Nu_p = 0.96Re^{0.57} \quad (3.24)$$

Bu Nusselt korelasyonu PLA malzemesi için verilmiş olup, 24 adet deney verisi mevcuttur. Ayrıca, geçirgenliğe göre hesaplanmış Nusselt sayısı ile geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısı arasındaki ilişki incelenmiştir.

Şekil 3.23’te geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısı ile geçirgenliğe göre hesaplanmış Nusselt sayısının ilişkisi verilmiştir.



Şekil 3.23. Geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısı ve Nusselt sayısı ilişkisi

Şekillerde kullanılan boyutsuz sayılar gözenekli ortamlar için en çok kullanılan boyutsuz sayılar olup, bu boyutsuz sayılarla korelasyonları sunulması hem literatüre katkısı incelenmesi hem de literatürle kıyaslanabilmesi için oldukça önemlidir.

Şekillerde deney verilerine uydurulan eğri, kanal hidrolik çapına göre veya geçirgenliğe göre hesaplanmış Nusselt ve Reynolds sayılarındaki ilişki de olduğu gibi üssel bir ilişki olduğu görülmüştür. Hesaplanarak elde edilen ortalama Nusselt sayılarına uydurulan eğrinin R2 değeri sıfırdan uzak ve bire oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bu durumda uydurulan eğri ile hesaplanan Nusselt sayısının uyumlu olduğunu göstermektedir.

Geçirgenliğe göre hesaplanmış, Nusselt sayısı ile Reynolds sayısının ilişkisi üssel bir fonksiyon olup bu ilişki Denklem 3.25'te verilmiştir.

$$Nu_K = 0.08Re_{\sqrt{K}}^{0.57} \quad (3.25)$$

Bu Nusselt korelasyonu ABS malzemesi için verilmiş olup, 24 adet deney verisi mevcuttur. Denklem 24 ve Denklem 25 de sunulan her iki korelasyon hava için uygun olup geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısının 20 ile 120 arasında geçerlidir

4. SONUÇLAR

Günümüzde ısıtma soğutma, güç çevrimlerinde ve elektronik aletlerin soğutulmasında ısı geçişi büyük önem arz etmektedir. Mühendislik açısından Bir uygulamada ısısın ya yüksek oranda geçmesi ya da düşük oranda geçmesi istenmektedir. Örneğin bina uygulamalarında kış mevsimi için iç ortamda elde edilen ısı enerjisinin dışarıya kaybını ya da yaz mevsimi için ise binaya dışarıdan ısı kazanımı istenmemektedir. Bu yüzden ısı yalıtımlar yaparak ısı geçişini en aza indirmek hedeflenmektedir. Hata günümüz teknolojilerinden bina betonarmelerini ya da tuğlalarını kapalı gözenekli ortamlardan (y-tong) malzemelerden yaparak ısı geçişinde kötüleştirme amaçlanmaktadır.

Elektronik aletlerin soğutulması ya da güç çevrimlerinde ısıyı ortama atmak ısı geçişini iyileştirmek gerekir. Bunun için ya yüzey alanını arttırmak ya da ısı taşınım katsayısını arttırmak gerekmez. Günümüz mühendislik ve akademik çalışmalarında bu ısı taşınım katsayısını arttırmayı yönelik çalışmalar yapılmış ve halen de yapılmaktadır. Isı geçişini arttırmak için yüzey alanını arttırmış başka bir deyişle yüzey alanına kanatçık denilen malzemeler yerleştirmiştir. Isı geçişini arttırmak için kanala kavis vermek, kanal içerisine türbülator yerleştirmek, kanal içerisine çeltikler oluşturarak akışı bozmak, kanala gözenekli ortam yerleştirmek gibi uygulamalar yaparak ısı geçişinin etkileri incelenmektedir. Ayrıca çevrimde kullanılan akışkan tipini değiştirme ya da çift fazlı akış oluşturarak da ısı geçişine etkileri inceleyen çalışmalar mevcuttur.

Bu tez çalışmasının da konusu olan gözenekli ortamlar ısı geçişini arttırmaktadır. Fakat ortam içerisine gözenekli yapı yerleştirildiğinde kanalda ki basınç düşüşü başka bir deyişle fan gücü de artmaktadır. Gözenekli ortamlarda ısı geçişini daha çok arttırmak için genelde ısı iletim katsayısı yüksek metal bazlı alüminyum bakır gibi malzemeler kullanılmaktadır. Basınç düşüşü olarak incelendiğinde ise gözenekli ortamın malzemesi çok etkilememekte olup, gözenekli ortamın gözenekliliği ya da geçirgenliği etkilemektedir.

Bu tez çalışmasında gözenekli ortam olarak polimer bazlı düşük ısı iletkenliği sahip ABS ve PLA malzemelerden yapılmış gözenekli ortamlarda ısı geçişi ve basınç düşüşü deneysel olarak incelenmiştir. Gözenekli ortamın polimer bazlı olma durumunda basınç düşüşünü veya ısı geçişinin nasıl etkilendiği üzerine akademik çok fazla çalışma

görülmemiştir. Bu yüzden, literatürdeki bu akademik açığı kapatmak için bu tez çalışması yapılmıştır. Günümüzde eklemeli imalatın yaygınlaşması ve 3D boyutlu yazıcıların geliştirilmesi ve bu yazıcılara olan erişimin artması sayesinde imalatı zor, karışık yapıda geometriler bu teknoloji sayesinde çok kolay üretilmektedir.

Yapılan literatür araştırmalarında ısı değiştiriciler ya da ısı geçişi yüzeyleri eklemeli imalat metal ya da metal olmayan malzemelerle eklemeli imalat yöntemiyle üretilmektedir. Yapılan literatür taramasından sonra polimer bazlı pek çok ısı değiştiricileri yapıldığı saptanmıştır. Polimer bazlı gözenekli ortamlar aynı seramik bazlı gözenekli ortamlarda olduğu gibi yüksek ısı iletim katsayılı malzemelere sahip değildir. Bu sayede gözenekli ortamdaki katı yüzeylerden ısı geçişi metal bazlı gözenekli ortamlara göre çok çok düşük olacaktır. Fakat bu tez çalışmasında beklenen ısı geçişinin artması o da kanal içerisindeki akışı bozarak türbülans etki sayesinde ısı geçişinde artışlar görülmüştür.

Polimer bazlı gözenekli ortamların en büyük avantajları erişimleri kolay, düşük maliyet, istenilen veya tasarlanan geometriyi üretim kolaylığı gibi ciddi avantajlara sahiptir. Polimer bazlı malzemeler üzerine çokça mekanik davranışları üzerine akademik çalışmalar mevcuttur. Fakat polimer bazlı gözenekli ortamların ısıl davranışları üzerine çok bir çalışma yapılmamıştır. Ayrıca bu polimer bazlı malzemeler insan vücudunda da kullanılmaya başlamıştır. Doku kayıp bölgelerine yerleştirme ya da uzuv olarak kullanma gibi tıbbi kullanımları da söz konusudur. Bu çalışma ile birlikte insan vücudunda bu malzemelerin kullanımı sonrası nasıl bir ısıl performans vereceği yönünde bilgi verecek bir çalışma olacaktır.

Isı iletim katsayısı ve camsı geçiş sıcaklığı yani malzemenin şekil değiştirmeye/yumuşamaya başladığı sıcaklıkların düşük olması ısıl analiz olarak ciddi bir dezavantaj olsa da üretim kolaylığı, düşük maliyet, düşük sıcaklıklarda kullanım alanları ve ısı değiştirici ya da ısıl parçanın bir bütün olarak üretim avantajı gibi parametreler polimer bazlı malzemelerin kullanım sebebi olabilir. Isıl alanda kullanımının uygun olup olmadığını bunu polimer bazlı gözenekli ortamlarda uygulama oluşturarak bu çalışmada basınç düşüşü ve ısı geçişi üzerine öncü bir çalışmalardan olacaktır.

Gözenekli ortam kanallara yerleştirilmeden önce boş kanalda, basınç düşüşü ile hız arasındaki ilişki hesaplanmıştır. Boş kanal için ölçülen basınç düşüşünün gözenekli kanla göre ihmal edilebilir olduğu hatta ölçüm cihazının belirsizliği içinde kaldığı

görülmüştür. Daha sonra kanal içerisine gözenekli yapı yerleştirilerek gözenekli ortamlar oluşturulmuş ve basınç düşüşleri deneysel incelenmiştir.

Her bir gözenekli ortam için gözenek çapı, geçirgenlik, Forchheimer katsayıları hesaplanmıştır. Gözenekliliğin etkisini belirlemek için geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısı tanımlanmış ve basınç düşüşünün etkisi belirlenmiştir. PLA ve ABS bazlı gözenekli ortamlardaki basınç düşüşü literatürde bulunan gözenekli ortamlarda basınç düşüşü çalışmaları ile kıyaslanmıştır.

Gözenekli ortamlarda, basınç düşüşü tamamen bitirildikten sonra ısı geçişi deneyleri yapılmıştır. Kanala gözenekli ortam yerleştirilmeden önce boş kanal için sabit ısı akısında, ısı geçişi deneysel olarak incelenmiştir. Daha sonra kanal içerisine gözenekli ortam yerleştirilmiş ve sabit ısı akısında deneysel olarak ısı geçişi deneyleri yapılmıştır. Boş kanalda yüzey sıcaklıklar konuma bağlı olarak çok fazla değişmemekte olup hemen hemen birbirine yakın değerlerde kaldığı ayrıca akışkan sıcaklığın giriş ve çıkışında çok fazla bir fark gözlemlenmemiştir. Bu durum gözenekli kanal için irdelendiğinde ise yüzey sıcaklıkları biraz daha düşük sıcaklıklarda kaldığı ve kanaldan çıkan havanın sıcaklığının boş kanala göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla bu durumda gözenekli ortam için ısı taşınım katsayıların boş kanala göre daha yüksek çıkacağı beklenmektedir. Yaklaşık aynı ısı akılarında ve havı hızlarda, boş kanalda yüzey sıcaklıkları ortalama 66 °C iken bu gözenekli ortam için ortalama yüzey sıcaklığı 31 °C'dir.

Kanal yüzey ve akışkan sıcaklıkları kullanılarak her bir nokta için yerel ısı taşınım katsayısı, yerel Nusselt sayısı ve ortalama ısı taşınım katsayısı ile ortalama Nusselt sayısı değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu ortalama Nusselt sayıları literatürle kıyaslanmış ve polimer bazlı gözenekli ortamın kullanılabilirliği hakkında yorum yapılmıştır.

4.1. Basınç Düşüşü Deney Çalışmaları

Gözenekli ortamlarda basınç düşüşü 2 farklı malzemeden ve gözeneklilik değerlerinin birbirine yakın geometri seçilmeye çalışılarak deneysel olarak incelenmiştir. Her bir gözenekli ortamın uzunlukları birbiri ile aynıdır. Her bir gözenekli ortam için basınç düşüşü ölçülmüş ve bu basınç düşüşleri birim uzunluklarına bölünerek birim uzunluk başına düşen basınç düşüşleri belirlenmiştir. Her bir gözenekli ortam için geçirgenlik ve Forchheimer katsayıları hesaplanmıştır.

PLA ve ABS malzemelerinden üretilmiş gözenekli ortam korelasyonları sırasıyla Denklem 4.26 ve Denklem 4.27 de verilmiştir.

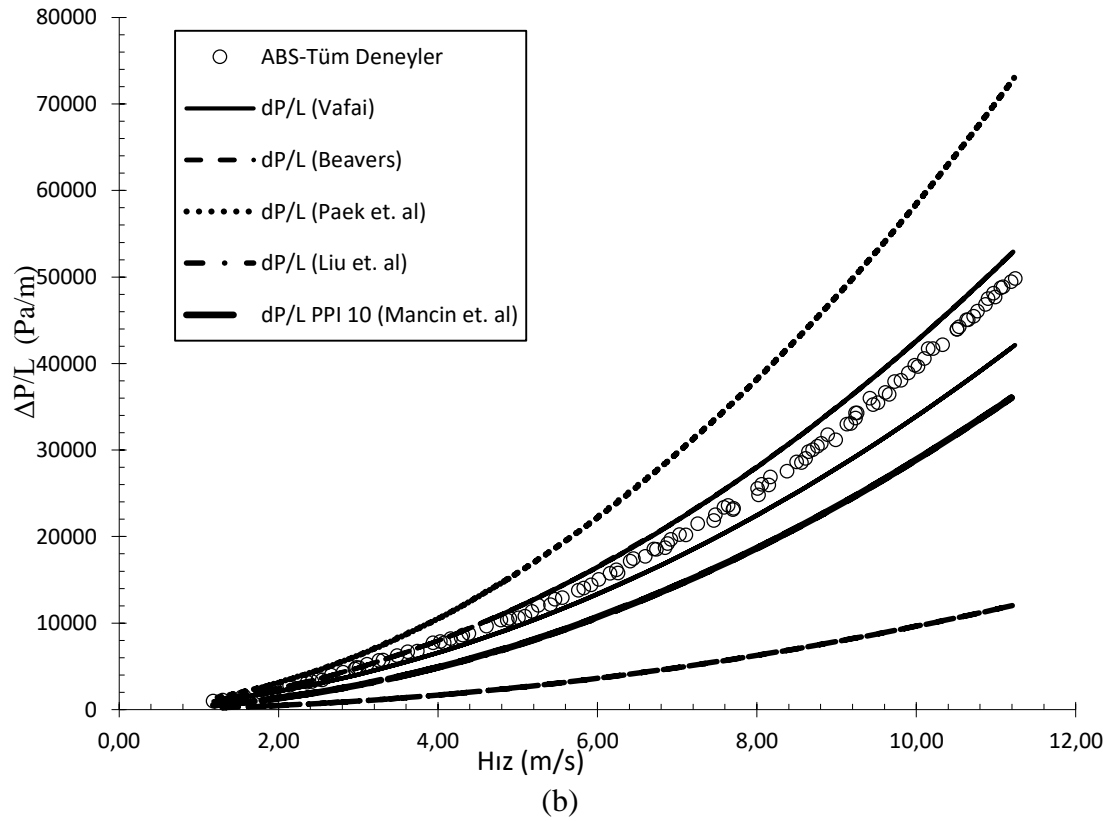
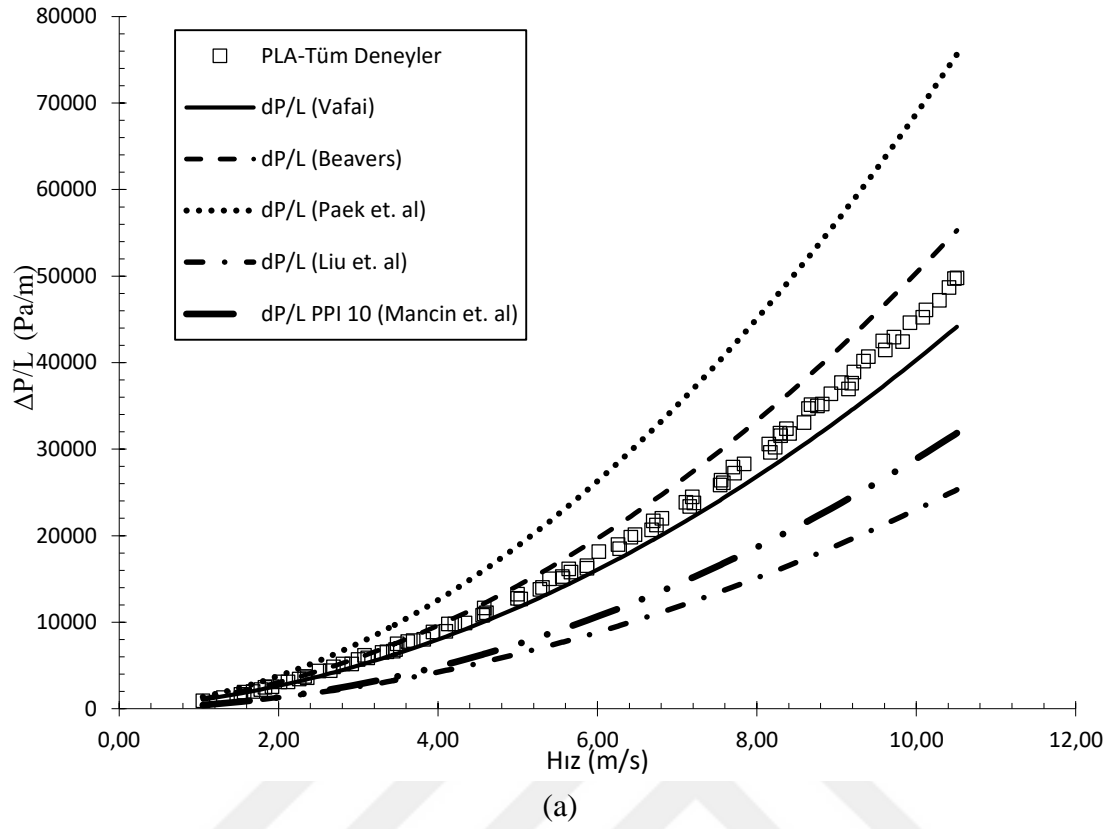
$$\frac{\Delta P}{L} = 607.2 u_m + 387.1 u_m^2 \quad (4.26)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = 326.1 u_m + 363.7 u_m^2 \quad (4.27)$$

Deney verilerinden elde edilen bu değerler literatürde aynı çalışma şartlarına sahip diğer çalışmalarla kıyaslanmıştır. Elde edilen kıyaslama çalışması Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

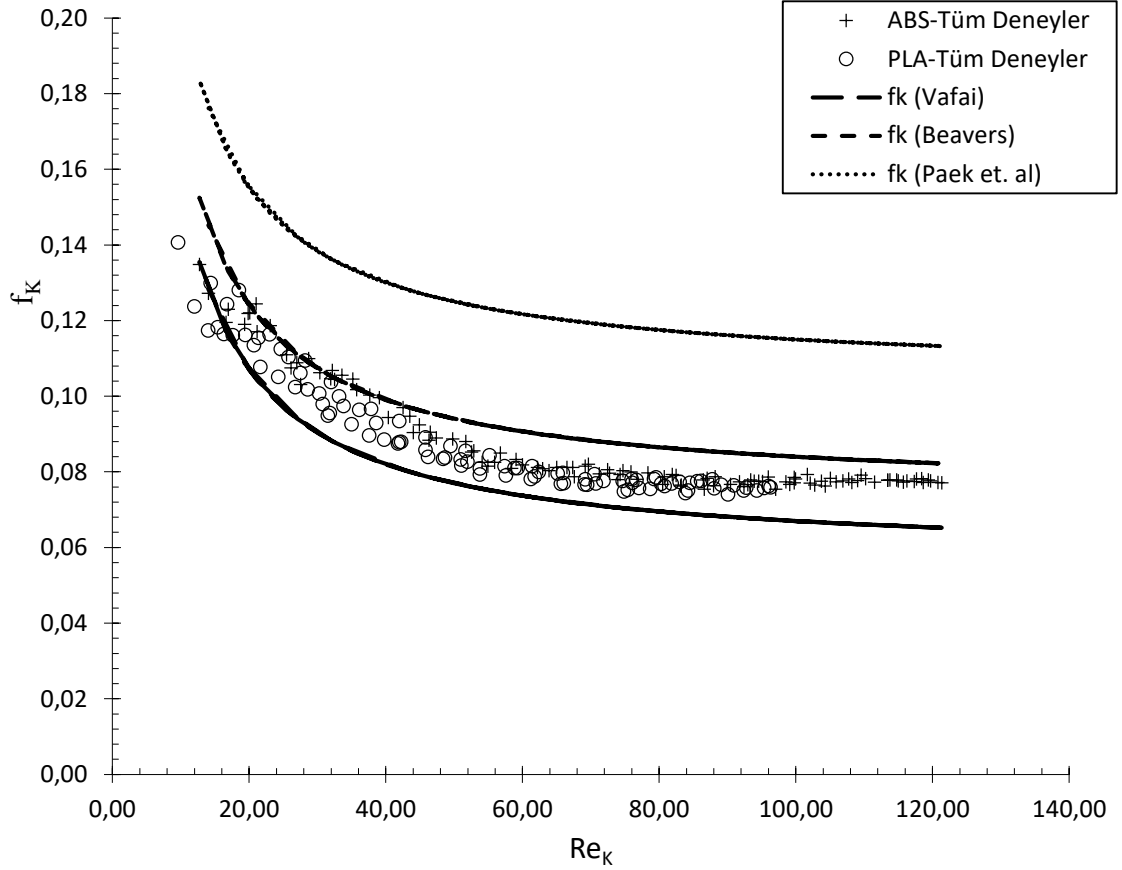
Şekil 4.1’de de görüldüğü üzere Basınç düşüşü değerleri literatürle hemen hemen aynı değerlere sahiptir. Gözenekli ortamdaki malzemenin cinsi basınç düşüşüne etkisi görülmemiştir.

Gözenekli ortamda gözeneklilik azalınca aynı ortalama hız değerleri için, kanal içindeki birim uzunluk başına düşen basınç düşüşü artmaktadır. Gözenekliliğin düşmesi ortamdaki katı hacmin artması başka bir deyişle kanal içinde özgül yüzey alanı artmasıdır. Özgül yüzey alanı arttıkça basınç düşüşü de artmaktadır.



Şekil 4.1. Basınç düşüşünün literatürle kıyaslanması a) PLA gözenekli ortam b) ABS gözenekli ortam

Ayrıca pratik kullanımı açısından, gözenekli ortamlar için sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile ilişkisi de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlarla literatür kıyaslanmış ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Sürtünme faktörünün literatürle kıyaslanması

Burada, geçirgenliğe göre bir sürtünme faktörü tanımlanmış ve bu değer in geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısı arasındaki ilişki verilmiştir.

$$f_K = \frac{(\Delta P/L)\sqrt{K}}{\rho u_m^2} \quad (4.28)$$

4.2. Isı Geçişi Deney Sonuçları

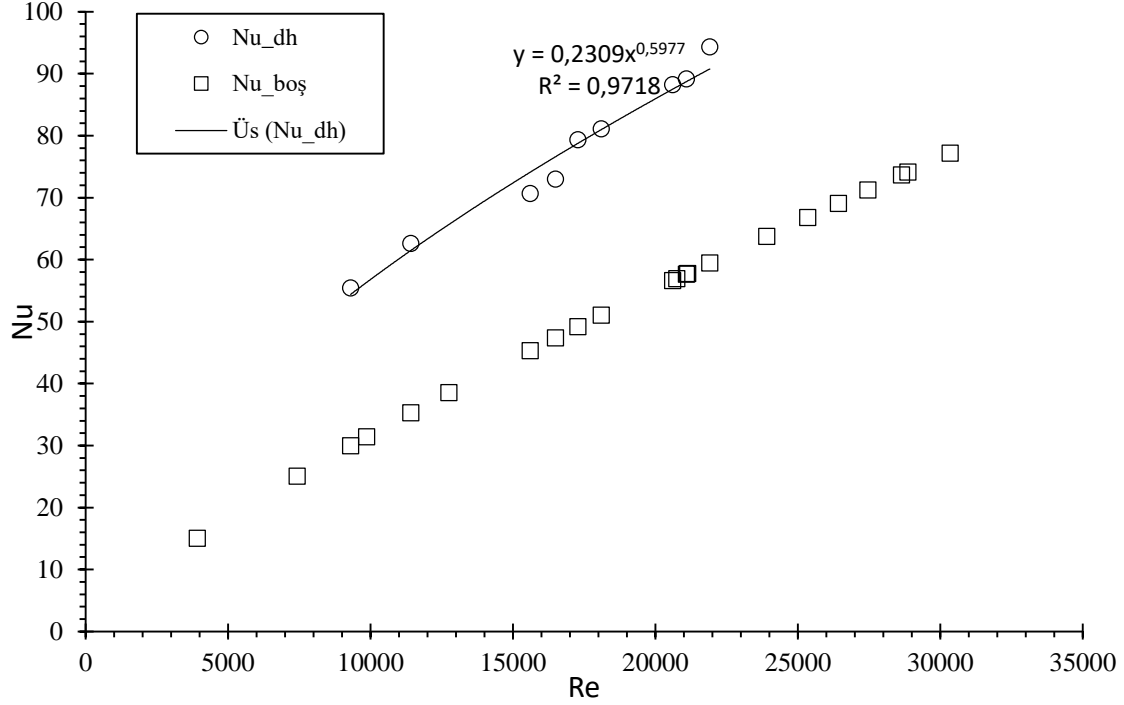
Hava kanalın içerisinde hem gözenekli ortam hem de boş olma durumunda, kanalın alt yüzeyine sabit ısı akısı geri kalan üç yüzeyin ise ısı olarak yalıtılmış durumda ısı geçişi deneyleri yapılmıştır. Yüzey ve akışkan sıcaklıkları ölçülmüştür. Bütün ısı deneyleri, sistemin termodinamik (ısı) olarak dengeye geldiği durumda yapılmıştır. Her bir gözenekli ortam için yüzey sıcaklıkları ilk noktadan başlamak üzere 20 mm aralıklarla yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Akışkan sıcaklıkları ise kanalın girişinde ve çıkışında üç farklı yükseklikte ölçülmüş ve bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Akış doğrultusunda yerel ısı taşınım katsayıları ve yerel Nusselt sayıları değişimleri incelenmiştir. Yüzey sıcaklıklarına uydurulan eğrilerden ve yerel Nusselt sayılarından akışın ısı olarak tam geliştiği bölge bulunmuştur.

Hava kanalındaki akışkanın yığın sıcaklığının konumla değişimini belirlemek için kontrol hacmi seçilmiştir. Seçilen bu kontrol hacminde enerji dengesi yazılmıştır. Enerji dengesinde hem akışkanın hem de yüzey sıcaklığını veren ifadeler bulunmuş bunların konumla değişimi lineer olduğu görülmüştür.

4.2.1. Boş Kanalda Isı Geçişi Deney Sonuçları

Hava kanalına gözenekli ortamlar önce, kanal boşken ısı geçişi deneyleri yapılmıştır. Alt yüzeye sabit ısı akısı uygulanmış ve diğer yüzeyler ısı olarak yalıtılmıştır. Sistem sürekli rejime ulaştınca deney verileri toplanmıştır. Yaklaşık ortam sıcaklığında hava kanalına giren hava, alt yüzeye uygulanan sabit ısı akısıyla kanal boyunca ısınarak daha yüksek sıcaklıklarda kanaldan çıkmaktadır. Her bir noktadaki sıcaklık verileri eğriler uydurarak eğimleri incelenmiş ve ısı gelişmiş bölge belirlenmiş ve bu durum aynı zamanda yerel Nusselt sayılarından da kontrol edilerek ısı olarak gelişmiş bölge belirlenmiştir. Yerel taşınım katsayıların, akışın ısı olarak tam geliştiği bölge de olan ısı taşınım katsayıların aritmetik ortalaması alınarak ortalama ısı taşınım katsayısı ve dolayısıyla ortalama Nusselt sayısı belirlenmiştir. Şekil 4.3 boş kanalda yapılan ısı geçişi sonuçlarının literatürle kıyaslanması yapılmıştır. Bu deney verileri sonucu elde edilen Nusselt korelasyonu ise Denklem 4.29’te verilmiştir.

$$Nu_{dh} = 0.23Re^{0.60} \quad (4.29)$$



Şekil 4.3. Boş kanalda yapılan ısı geçişi sonuçlarının literatürle kıyaslanması

Yapılan boş kanalda ısı geçişi sonuçları Reynolds sayılarına bakıldığında akışın türbülanslı olduğu belirlenmiştir. Türbülanslı kanal içi akış için

$$Nu_{dh} = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (4.30)$$

Nusselt sayısı Denklem 4.30'deki korelasyon seçilmiştir. Şekil 4.3'teki korelasyondan elde edilen sonuçlarla deneyden edilen Nusselt sayıları arasında yaklaşık 1,5 kat fark vardır. Bunun sebeplerinden bazıları karşılaştırılan korelasyon dairesel kesitli tez çalışmasındaki kanal kare kesitli, Denklem 4.30'deki korelasyon tüm yüzeylere sabit ısı akısı uygulanırken tez çalışmasındaki kanalın sadece alt yüzeyine ve diğer yüzeylerin ısı olarak yalıtıldığı kabulü yapılmıştır. Buna rağmen yine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

4.2.2. Gözenekli Kanalda Isı Geçişi Deney Sonuçları

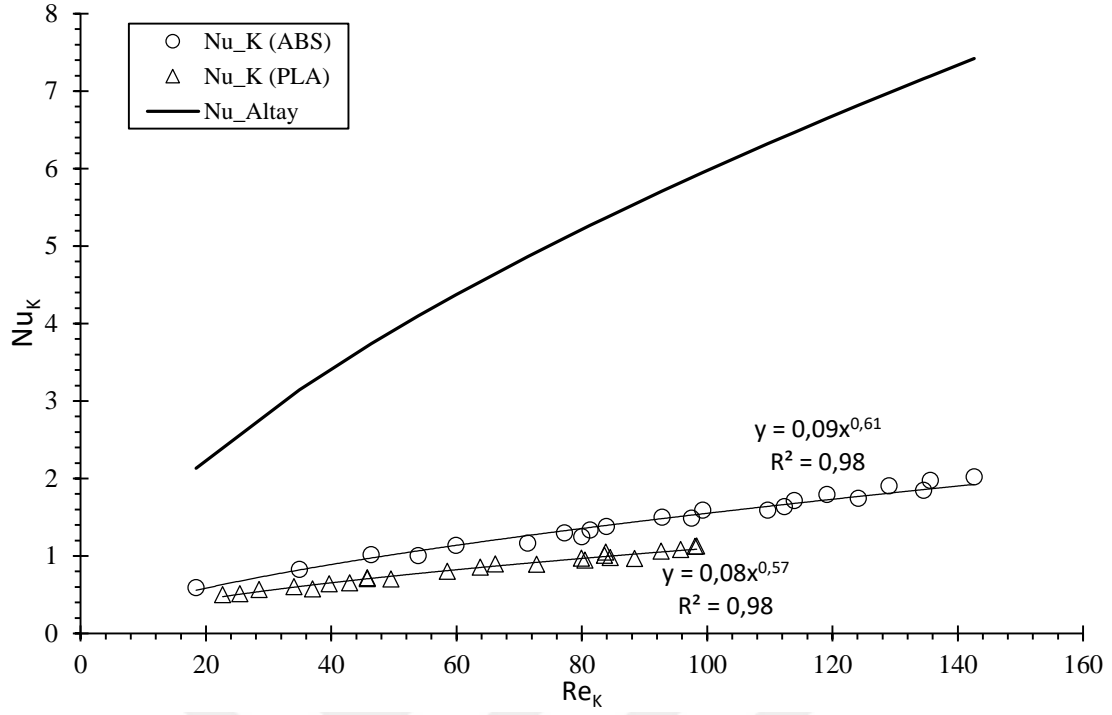
İki farklı gözenekli malzemeden gözenekli ortamlar elde edilmiş ve bu ortamların ısı geçişi deneysel olarak incelenmiştir. Yine kanalın altına sabit ısı akısı uygulanmış, yüzey ve akışkan sıcaklıkları artmış ve sistemin sürekli rejime gelmesi beklenmiştir. Sistem ısı olarak dengeye geldikten sonra sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Burada sıcaklıklar boş kanalla kıyaslandığında, gözenekli ortamlarda daha düşük yüzey sıcaklığı ve daha yüksek akışkan çıkış sıcaklığı elde edilmiştir. Bunun sebebinin de gözenekli ortam içindeki akışın çalkantılanması, ikincil akışlar (vorteksler) oluşması sayesinde içeride türbülans etki meydana geldiği tahmin edilmektedir.

Bütün deney verilerinden elde edilen sonuçlara göre geçirgenliğe göre hesaplanmış Nusselt sayısı ile geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısı arasındaki ilişki Denklem 4.31’te verilmiştir.

$$\text{ABS Gözenekli Ortam} \quad Nu_K = 0.09Re_K^{0.61} \quad (4.31)$$

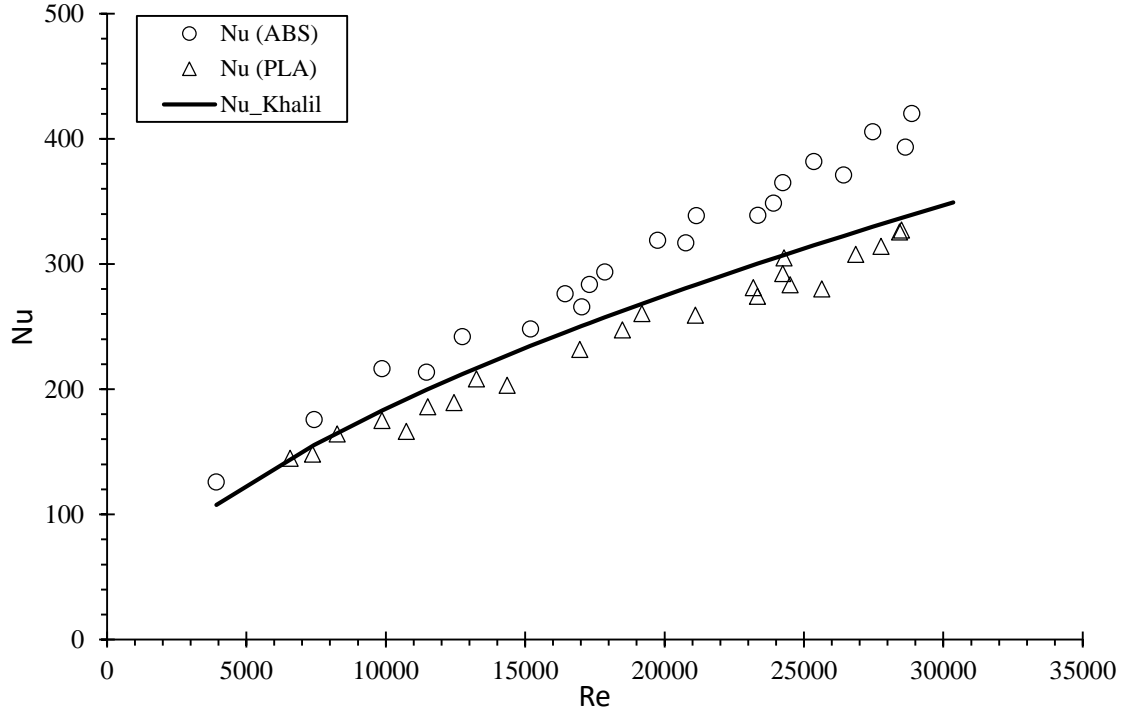
$$\text{PLA Gözenekli Ortam} \quad Nu_K = 0.08Re_K^{0.57} \quad (4.32)$$

Şekil 4.4 ise PLA ve ABS malzemeli gözenekli ortamlarda Nusselt sayılarının literatürle kıyaslanması verilmiştir. Kıyaslamalarda kullanılan gözenekli ortamlar metal bazlı gözenekli ortamlar olduğu için Aynı Reynolds sayılarında daha küçük Nusselt sayısı elde edilmiştir. Aynı şekilde PLA gözenekli ortamda hesaplanan Nusselt sayıları ABS ile kıyaslandığında daha düşük değerlerdedir. Bunun sebeplerinden bir tanesinde ABS malzemesinin ısı iletim katsayısı değeri PLA’ya göre daha yüksektir. Ayrıca PLA gözenekli ortamın gözeneklilik değeri ABS gözenekli ortama göre daha düşüktür.



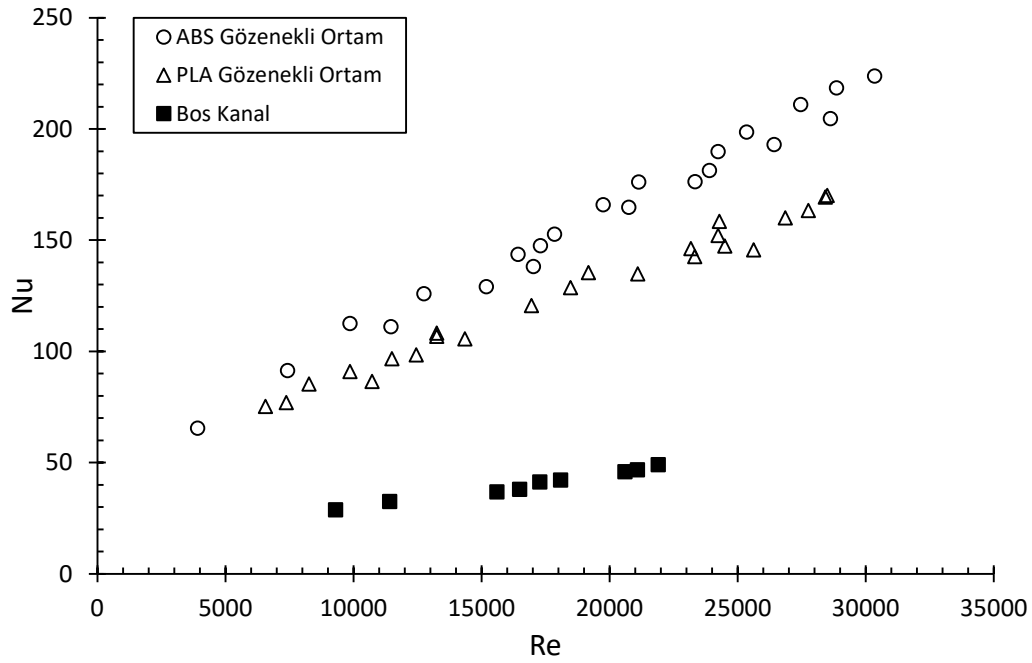
Şekil 4.4. Nusselt sayılarının literatürle kıyaslanması

Kıyaslama yapılan çalışmada alüminyum metal köpük olup ısı iletim katsayısı yüksektir. Bu yüzden hesaplanan Nusselt sayılarında yaklaşık 4 kat daha düşük değerler hesaplanmıştır. Çünkü Alüminyumun ısı iletim katsayısı yaklaşık 300 W/mK iken polimerlerin ısı iletim katsayısı yaklaşık 0.5 W/mK civarındadır. Kıyaslamaları daha detaylı bakılmak istendiğinde Şekil 4.5 kıyaslama genişletilmiştir.



Şekil 4.5. Kanal hidrolik çapına göre nusselt sayısının literatürle kıyaslanması

Şekilde görüldüğü üzere Khalil'in yaptığı çalışma ile tez çalışmasına yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu Khalil'in yaptığı çalışma ile tez çalışmasına yakın sonuçlar elde edilmiştir. Fakat kullanılan malzemeler farklıdır.



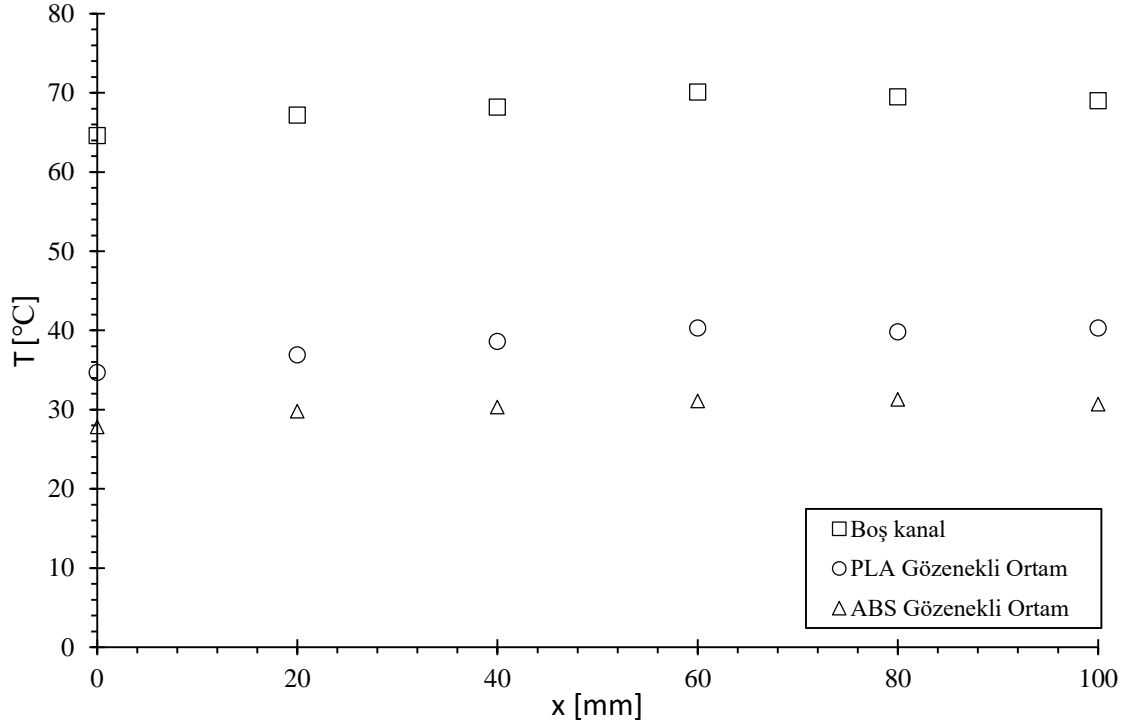
Şekil 4.6. Gözenekli ortamların nusselt sayılarının boş kanalla kıyaslanması

Şekil yukarı'de görüldüğü üzere içerisine gözenekli ortam yerleştirilmesi durumunda yüzeyde taşınım ile ısı geçişi artmaktadır. Reynolds sayısına ve gözenekli ortamın malzemesine bağlı olarak Nusselt sayıları yaklaşık 2.5 ile 4 kat iyileşmeler söz konusudur.

Şekil aşağıdaki yüzeylere uygulanan ısı akışlarının ve hava hızlarının hemen hemen aynı olması durumunda yüzey sıcaklıklarının konumla değişimini göstermektedir. Çizelge aşağıdaki bu deneylere ait veriler verilmiştir.

Çizelge 4.1. Aynı şartlardaki deney verileri

| Malzeme Cinsi | Isı Akısı (W/m^2) | Hava Hızı (m/s) |
|---------------|-----------------------|-----------------|
| PLA | 2310 | 5.75 |
| ABS | 1808 | 5.66 |
| Boş kanal | 2116 | 5.98 |



Şekil 4.7. Farklı durumlarda yüzey sıcaklıklarının kıyaslanması

Şekilde 4.7’de görüldüğü üzere yüzeye uygulanan ısı akısının hemen hemen aynı olması durumunda boş kanala ait yüzey sıcaklığı verileri daha yüksektir. Daha sonra PLA gözenekli ortam ve sonra ABS gözenekli ortam bu durumu takip etmektedir. Boş kanalda yüzey sıcaklığının yüksek olması hesaplanan Nusselt sayılarından da görülmüştür. Kanal içerisine konulan bu gözenekli ortam her ne kadar kanalda basınç düşüşünü artırsa da yüzey sıcaklığı olarak ciddi oranda etkilemektedir. Kanal içerisine gözenekli ortam yerleştirilmesi durumunda yüzey sıcaklıklarını yarı yarıya kadar düşürmektedir. Bu da yüzey soğutma işlemleri için istenilen sonuçlar arasındadır. Gözenekli ortamın malzemesi yüzey sıcaklığını etkilemektedir. Metal bazlı ya da seramik bazlı gözenekli ortamlarda bu durumlar dikkate alınarak incelenmelidir.

4.3. Öneriler

- Gözenekli ortamda soğuk deneyler (basınç düşüşü) deneylerinde, fark basınçölçerinin en yüksek (5000 Pa) kadar ölçümler yapılabilmektedir. Daha yüksek

bir fark basınçölçer kullanılarak, daha yüksek Reynolds sayılarında basınç düşüşü deneyleri yapılabilir.

- Hız ölçer ve emiş fanı daha düşük hava debileri için ayarlandığında düşük hızlarda hem basınç düşüşü hemde ısı geçişi deneyleri yapılabilir. Böylece sadece türbülanslı bölge değil Darcy ve Forchheimer bölgelerinde de ısı ve hidrodinamik davranışları incelenebilir.
- Test odası imal edilirken akışın ısı olarak gelişme bölgesi dikkate alınarak ön ısıtma yüzey ısıtıcısı eklenebilir. Böylece kanalın ilk noktasından son noktasına kadar akış ısı olarak tam gelişmiş bölgede olur.
- Gözenekli ortamların yüzeylerine sabit ısı akısı uygulanmıştır. Ayrıca yüzeylere sabit yüzey sıcaklığı sınır şartı uygulanarak ısı geçişi korelasyonu sunulabilir. Hem sabit ısı akısı hem de sabit yüzey sıcaklığı sonuçları karşılaştırılabilir.
- Daha fazla ABS ve PLA malzemesinden gözenekli ortam yapılıp gözenekliliğin de ısı geçişine etkisi daha detaylı sunulabilir.
- Akışı darbeli ya da titreşimli yaparak polimer bazlı gözenekli ortamlarda etkisi ısı ve hidrodinamik etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Al-Ketan, O. M., Khalil, Rowshan, R., Khan, K. A., Al-Rub, R. K. A., (2020). Forced convection CFD analysis of architected and 3D printable heat sinks based on triply periodic minimal surfaces. *Journal of thermal Science and Engineering Applications*. doi: 10.1115/1.4047385
- Alteneiji, M., Ali, M. I. A., Khan, K. A., Al-Rub, R. K. A., (2022). Heat transfer effectiveness characteristics maps for additively manufactured TPMS compact heat exchangers. *Energy storage and saving*, 2772-6835.
- Akçadırcı, E., (2015). *Bir boru içerisinde cidardan ayrı olarak yerleştirilmiş çeşitli tipteki şerit elemanların ısı transferi iyileştirmesine etkisinin deneysel olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Kayseri Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye.
- Ahmadi, B., Bigham, S., (2022). Performance evaluation of hi-k lung-inspired 3D printed polymer heat exchangers. *Applied thermal engineering*. 204: 117993.
- Arbak, A., Dukhan, N., (2020). Performance and heat transfer measurements in asymmetrically-heated metal foam cooled by water. *Thermal Science and Engineering Progress*. 20 : 100688.
- Arie, M. A., Tiwari, R., Shooshtari, A. H., Dessiatoun, S. V., Ohadi, M. M., Pearce, J. M., (2017). Experimental characterization of heat transfer in an additively manufactured polymer heat exchanger. *Applied thermal engineering*. 113: 575-584. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.11.030
- Beavers, G. S., Sparrow, E. M., (1969). Non-Darcy flow through fibrous porous media. *Journal of Applied Mechanics*. (Transactions of the ASME) pp.711-714. Erişim Tarihi: 10.01.2023. Erişim Adresi: <http://appliedmechanics.asmedigitalcollection.asme.org/>.
- Bianchi E., Groppi G., Schwieger W., Tronconi E., Freund H., (2015). Numerical simulation of heat transfer in the near-wall region of tubular reactors packed with metal open-cell foams. *Chemical Engineering Journal*, 264: 268-279. Erişim Tarihi: 20.01.2023. Erişim Adresi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.11.055>.
- Do, G., Geibelbrecht, M., Schwieger, W., Freund, H., (2020). Additive manufacturing of interpenetrating periodic open cellular structures (interPOCS) with in operando adjustable flow characteristics. *Chemical engineering & processing : process intensification*. 148:107786.
- Dukhan, N., Ali, M., (2012). Strong wall and transverse size effects on pressure drop of flow through open-cell metal foam. *International Journal of Thermal Sciences*. 57: 85-91.
- Dutkowski, K., Kruzel, M., Rokosz, K., (2022). Review of the state-of-the-art uses of minimal surfaces in heat transfer. *Energies* 2022, 15, 7994. Erişim Tarihi: 10.01.2023. Erişim Adresi: <https://doi.org/10.3390/en15217994>.
- Dutkowski, K., Kruzel, M., (2021). Experimental investigation of the apparent thermal conductivity of microencapsulated phase-change-material slurry at the phase-transition temperature. 2021,14,4124. Erişim Tarihi : 10.01.2023. Erişim Adresi: <https://doi.org/10.3390/ma14154124> .
- Dukhan, N., (2006). Correlations for the pressure drop for flow through metal foam. *Exp Fluids* 2006, 41:665-672. Doi:10.1007/s00348-006-0194-x.
- Ergün, S., & Orning, A. A., (1949). Fluid flow through randomly packed columns and Fluidized Beds, *Industrial and Engineering Chemistry*, 41 , 1179–1184.

- Ergün, S., (1952). Fluid flow through packed columns, *Chemical Engineering and Processing*, 48 , 89–94.
- Fratolocchi, L., Groppi, G., Visconti, C.G., Lietti, L., Tronconi, E., (2020). Adoption of 3D printed highly conductive periodic open cellular structures as an effective solution to enhance the heat transfer performances of compact Fischer-Tropsch fixed-bed reactors. *Chemical engineering journal*. 386: 123988.
- Gururatana, S., Skullong, S., (2020). Heat transfer augmentation in a pipe with 3D printed wavy insert. *Case studies in thermal engineering*. 21: 100698.
- Khalil, M., Ali, M.I.H., Khan, K.A., Al-Rub, R.A., (2022). Forced convection heat transfer in heat sinks with topologies based on triply periodic minimal surfaces. *Case Studies in Thermal Engineering*. 38, 102313.
- Kline, S. J., (1985). The purposes of uncertainty analysis, *Journal of Fluids Engineering*, 107 (2), 153–160.
- Lage, J. L., (1998). The fundamental theory of flow through permeable media from Darcy to turbulence, *Transport Phenomena Porous Media*. Elsevier; ss 1–30. Erişim Tarihi: 23.02.2023. Erişim Adresi: <https://doi.org/10.1016/B978-008042843-7/50001-5>
- Liu, J.F., Wu, W.T., Chiu, W.C., Hsieh, W.H., (2005). Measurement and correlation of friction characteristic of flow through foam matrices. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 30 : 329-336.
- Mancin, S., Zilio, C., Cavallini, A., Rosetto, L., (2010). Pressure drop during air flow in aluminum foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 53, 3121-3130.
- Paek, W., Kang, B. H. Kim, S. Y. and Hyun J. M. 2000. Effective Thermal Conductivity and Permeability of Aluminum Foam Materials. *International Journal of Thermophysics*, Vol. 21, No. 2.
- Pulvirenti B., Celli M., Barletta A., (2020). Flow and convection in metal foams: A survey and new CFD results. *Fluids* 2020, 5(3), 155. Erişim Tarihi : 20.01.2023. Erişim Adresi: <https://doi.org/10.3390/fluids5030155> .
- 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.
- Üner, İ., Koçak, E.D., (2012). Polilaktik asit'in kullanım alanları ve nano lif üretimindeki uygulamaları. *İstanbul ticaret üniversitesi fen Bilimleri Dergisi*. 22: 79-88
- Vafadar, A., Guzzomi, F. and Hayward, K., (2021). Experimental investigation and comparison of thermal performance of additively and conventionally manufactured heat exchangers. *Metals* 2021, 11, 574. Erişim Tarihi: 10.01.2023. Erişim Adresi: <https://doi.org/10.3390/en15145142> .
- Qureshi, Z.A., Alketan, O., Elnajjar, E., Al-Rub, R.A., (2022). Architected lattices embedded with phase change materials for thermal management of high-power electronics: A numerical study. *Applied Thermal Engineering*, ATE 119420
- Younis L. B., Viskanta R., (1993). Experimental determination of the volumetric heat transfer coefficient between stream of air and ceramic foam. *Heat Mass Transfer* Vol:36 no:6 ; 1425 – 1434.
- Yerane, K., Rao, Y., (2022). A review of recent investigations on flow and heat transfer enhancement in cooling channels embedded with triply periodic minimal surfaces (TPMS). *Energies* 2022, 15, 8994. Erişim Tarihi: 20.01.2023. Erişim Adresi: <https://doi.org/10.3390/en15238994>.

Zouboulis, P., Koumoulos, E. K., Karatza, A., (2022). Employment of 3D-printed bilayer structures with embedded continuous fibers for thermal management applications: An axial cooling 4D-printed fan application case study. *Polymers* 2022, 14(19),3952. Erişim Tarihi : 10.01.2023. Erişim Adresi: <https://doi.org/10.3390/polym14193952> .





EKLER

EK - 1. PLA Gözenekli ortamda Basınç Düşüşü Deney Sonuçları

| Ortalama hız (m/s) | ΔP (Pa) | $\Delta P/L$ (Pa/m) | $\Delta P/Lu$ (Pa.s/m ²) | Re | Re _k |
|--------------------|-----------------|---------------------|--------------------------------------|----------|-----------------|
| 1.05 | 92.00 | 920.00 | 876.190476 | 2882.99 | 9.62 |
| 1.31 | 126.00 | 1260.00 | 961.832061 | 3596.87 | 12.01 |
| 1.53 | 163.00 | 1630.00 | 1065.35948 | 4200.92 | 14.02 |
| 1.57 | 190.00 | 1900.00 | 1210.19108 | 4310.75 | 14.39 |
| 1.68 | 198.00 | 1980.00 | 1178.57 | 4612.78 | 15.40 |
| 1.78 | 219.00 | 2190.00 | 1230.33708 | 4887.35 | 16.31 |
| 1.83 | 247.00 | 2470.00 | 1349.72678 | 5024.63 | 16.77 |
| 1.92 | 254.00 | 2540.00 | 1322.91667 | 5271.75 | 17.60 |
| 2.02 | 310.00 | 3100.00 | 1534.65347 | 5546.32 | 18.51 |
| 2.12 | 310.00 | 3100.00 | 1462.26 | 5820.89 | 19.43 |
| 2.26 | 344 | 3440.00 | 1522.12 | 6205.29 | 20.71 |
| 2.33 | 372.00 | 3720.00 | 1596.57 | 6397.48 | 21.35 |
| 2.36 | 356.00 | 3560.00 | 1508.47458 | 6479.86 | 21.63 |
| 2.51 | 435.00 | 4350.00 | 1733.06773 | 6891.71 | 23.00 |
| 2.65 | 438 | 4380.00 | 1652.83 | 7276.11 | 24.29 |
| 2,69 | 483.00 | 4830.00 | 1795.53903 | 7385.94 | 24.65 |
| 2.81 | 517.00 | 5170.00 | 1839.85765 | 7715.42 | 25.75 |
| 2.92 | 518.00 | 5180.00 | 1773.97 | 8017.45 | 26.76 |
| 3 | 567 | 5670.00 | 1890.00 | 8237.10 | 27.49 |
| 3.08 | 616.00 | 6160.00 | 2000 | 8456.76 | 28.23 |
| 3.12 | 588.00 | 5880.00 | 1884.62 | 8566.59 | 28.59 |
| 3.30 | 651.00 | 6510.00 | 1972.72727 | 9060.82 | 30.24 |
| 3.36 | 656 | 6560.00 | 1952.38 | 9225.56 | 30.79 |
| 3.47 | 683 | 6830.00 | 1968.30 | 9527.58 | 31.80 |
| 3.44 | 666.00 | 6660.00 | 1936.05 | 9445.21 | 31.53 |
| 3.49 | 750.00 | 7500.00 | 2148.99713 | 9582.50 | 31.98 |
| 3.62 | 777.00 | 7770.00 | 2146.40884 | 9939.44 | 33.17 |
| 3.69 | 787 | 7870.00 | 2132.79 | 10131.64 | 33.82 |
| 3.82 | 802.00 | 8020.00 | 2099.48 | 10488.58 | 35.01 |
| 3.94 | 888.00 | 8880.00 | 2253.80711 | 10818.06 | 36.11 |
| 4.10 | 894.00 | 8940.00 | 2180.49 | 11257.38 | 37.57 |
| 4.13 | 978.00 | 9780.00 | 2368.03874 | 11339.75 | 37.85 |
| 4.21 | 977 | 9770.00 | 2320.67 | 11559.40 | 38.58 |
| 4.34 | 989.00 | 9890.00 | 2278.80 | 11916.34 | 39.77 |
| 4.56 | 1080.00 | 10800.00 | 2368.42 | 12520.40 | 41.79 |
| 4.58 | 1093 | 10930.00 | 2386.46 | 12575.31 | 41.97 |
| 4.58 | 1163.00 | 11630.00 | 2539.30131 | 12575.31 | 41.97 |

| Ortalama hız (m/s) | ΔP (Pa) | $\Delta P/L$ (Pa/m) | $\Delta P/Lu$ (Pa.s/m ²) | Re | Re _k |
|--------------------|-----------------|---------------------|--------------------------------------|----------|-----------------|
| 4.61 | 1109.00 | 11090.00 | 2405.63991 | 12657.68 | 42.25 |
| 5 | 1273 | 12730.00 | 2546.00 | 13728.51 | 45.82 |
| 5.00 | 1322.00 | 13220.00 | 2644 | 13728.51 | 45.82 |
| 5.04 | 1266.00 | 12660.00 | 2511.90 | 13838.34 | 46.19 |
| 5.28 | 1380.00 | 13800.00 | 2613.64 | 14497.30 | 48.39 |
| 5.31 | 1402.00 | 14020.00 | 2640.30 | 14579.68 | 48.66 |
| 5.40 | 1502.00 | 15020.00 | 2781.48148 | 14826.79 | 49.49 |
| 5.56 | 1528.00 | 15280.00 | 2748.20144 | 15266.10 | 50.95 |
| 5.57 | 1504 | 15040.00 | 2700.18 | 15293.56 | 51.05 |
| 5.64 | 1615.00 | 16150.00 | 2863.47518 | 15485.76 | 51.69 |
| 5.67 | 1578.00 | 15780.00 | 2783.07 | 15568.13 | 51.96 |
| 5.87 | 1654 | 16540.00 | 2817.72 | 16117.27 | 53.79 |
| 5.87 | 1622.00 | 16220.00 | 2763.20 | 16117.27 | 53.79 |
| 6.02 | 1814.00 | 18140.00 | 3013.28904 | 16529.12 | 55.17 |
| 6.26 | 1895 | 18950.00 | 3027.16 | 17188.09 | 57.37 |
| 6.28 | 1850.00 | 18500.00 | 2945.86 | 17243.01 | 57.55 |
| 6.42 | 1980.00 | 19800.00 | 3084.11215 | 17627.40 | 58.83 |
| 6.47 | 2012.00 | 20120.00 | 3109.73725 | 17764.69 | 59.29 |
| 6.68 | 2068.00 | 20680.00 | 3095.81 | 18341.29 | 61.22 |
| 6.70 | 2172.00 | 21720.00 | 3241.79104 | 18396.20 | 61.40 |
| 6.74 | 2124 | 21240.00 | 3151.34 | 18506.03 | 61.77 |
| 6.81 | 2201.00 | 22010.00 | 3232.01 | 18698.23 | 62.41 |
| 7.11 | 2386 | 23860.00 | 3355.84 | 19521.94 | 65.16 |
| 7.16 | 2338.00 | 23380.00 | 3265.36313 | 19659.22 | 65.62 |
| 7.19 | 2446.00 | 24460.00 | 3401.94715 | 19741.59 | 65.89 |
| 7.21 | 2376.00 | 23760.00 | 3295.42 | 19796.51 | 66.07 |
| 7.54 | 2586.00 | 25860.00 | 3429.71 | 20702.59 | 69.10 |
| 7.55 | 2639 | 26390.00 | 3495.36 | 20730.05 | 69.19 |
| 7.58 | 2612.00 | 26120.00 | 3445.91029 | 20812.42 | 69.47 |
| 7.7 | 2792 | 27920.00 | 3625.97 | 21141.90 | 70.56 |
| 7.72 | 2722.00 | 27220.00 | 3525.90674 | 21196.82 | 70.75 |
| 7.84 | 2830.00 | 28300.00 | 3609.69388 | 21526.30 | 71.85 |
| 8.15 | 3060 | 30600.00 | 3754.60 | 22377.47 | 74.69 |
| 8.17 | 2962.00 | 29620.00 | 3625.46 | 22432.38 | 74.87 |
| 8.23 | 3023.00 | 30230.00 | 3673.14702 | 22597.12 | 75.42 |
| 8.29 | 3185.00 | 31850.00 | 3841.97829 | 22761.87 | 75.97 |
| 8.30 | 3153.00 | 31530.00 | 3798.79518 | 22789.32 | 76.06 |
| 8.37 | 3237 | 32370.00 | 3867.38 | 22981.52 | 76.70 |
| 8.41 | 3179.00 | 31790.00 | 3780.02 | 23091.35 | 77.07 |
| 8.59 | 3306.00 | 33060.00 | 3848.66123 | 23585.58 | 78.72 |
| 8.65 | 3470 | 34700.00 | 4011.56 | 23750.32 | 79.27 |
| 8.68 | 3513.00 | 35130.00 | 4047.23502 | 23832.69 | 79.55 |
| 8.76 | 3500.00 | 35000.00 | 3995.43379 | 24052.35 | 80.28 |

| Ortalama hız (m/s) | ΔP (Pa) | $\Delta P/L$ (Pa/m) | $\Delta P/Lu$ (Pa.s/m ²) | Re | Re _K |
|--------------------|-----------------|---------------------|--------------------------------------|----------|-----------------|
| 8.82 | 3520.00 | 35200.00 | 3990.93 | 24217.09 | 80.83 |
| 8.93 | 3641 | 36410.00 | 4077.27 | 24519.12 | 81.84 |
| 9.06 | 3767 | 37670.00 | 4157.84 | 24876.06 | 83.03 |
| 9.15 | 3696.00 | 36960.00 | 4039.34 | 25123.17 | 83.85 |
| 9.19 | 3761.00 | 37610.00 | 4092.49184 | 25233.00 | 84.22 |
| 9.22 | 3890.00 | 38900.00 | 4219.08894 | 25315.37 | 84.49 |
| 9.34 | 4015.00 | 40150.00 | 4298.7152 | 25644.85 | 85.59 |
| 9.40 | 4068.00 | 40680.00 | 4327.65957 | 25809.60 | 86.14 |
| 9.58 | 4251.00 | 42510.00 | 4437.36952 | 26303.82 | 87.79 |
| 9.61 | 4148 | 41480.00 | 4316.34 | 26386.19 | 88.07 |
| 9.72 | 4294 | 42940.00 | 4417.70 | 26688.22 | 89.08 |
| 9.83 | 4244.00 | 42440.00 | 4317.39573 | 26990.25 | 90.08 |
| 9.92 | 4462 | 44620.00 | 4497.98 | 27237.36 | 90.91 |
| 10.08 | 4524.00 | 45240.00 | 4488.09524 | 27676.67 | 92.38 |
| 10.12 | 4610.00 | 46100.00 | 4555.33597 | 27786.50 | 92.74 |
| 10.29 | 4718.00 | 47180.00 | 4585.03401 | 28253.27 | 94.30 |
| 10.41 | 4869 | 48690.00 | 4677.23 | 28582.75 | 95.40 |
| 10.48 | 4971 | 49710.00 | 4743.32 | 28774.95 | 96.04 |
| 10.51 | 4978.00 | 49780.00 | 4736.44148 | 28857.32 | 96.32 |

EK - 2. ABS Gözenekli ortamda Basınç Düşüşü Deney Sonuçları

| Ortalama hız (m/s) | ΔP (Pa) | $\Delta P/L$ (Pa/m) | $\Delta P/Lu$ (Pa.s/m ²) | Re | Re _k |
|--------------------|-----------------|---------------------|--------------------------------------|----------|-----------------|
| 1.18 | 96 | 960.00 | 813.56 | 3267.94 | 12.74 |
| 1.30 | 110 | 1100.00 | 846 | 3600.28 | 14.04 |
| 1.54 | 145 | 1450.00 | 941.56 | 4264.94 | 16.63 |
| 1.57 | 155 | 1550.00 | 987.26 | 4348.03 | 16.95 |
| 1.79 | 195 | 1950.00 | 1089.39 | 4957.31 | 19.33 |
| 1.84 | 211 | 2110.00 | 1147 | 5095.78 | 19.87 |
| 1.86 | 216 | 2160.00 | 1161.29 | 5151.17 | 20.08 |
| 1.95 | 242 | 2420.00 | 1241.03 | 5400.42 | 21.05 |
| 1.96 | 230 | 2300.00 | 1173 | 5428.11 | 21.16 |
| 2.14 | 278 | 2780.00 | 1299.07 | 5926.61 | 23.11 |
| 2.36 | 316 | 3160.00 | 1339 | 6535.89 | 25.48 |
| 2.42 | 322 | 3220.00 | 1330.58 | 6702.06 | 26.13 |
| 2.5 | 348 | 3480.00 | 1392.00 | 6923.61 | 26.99 |
| 2.55 | 343 | 3430.00 | 1345.10 | 7062.08 | 27.53 |
| 2.66 | 398 | 3980.00 | 1496.24 | 7366.72 | 28.72 |
| 2.81 | 429 | 4290.00 | 1526.69 | 7782.14 | 30.34 |
| 2.96 | 469 | 4690.00 | 1584 | 8197.56 | 31.96 |
| 2.98 | 485 | 4850.00 | 1627.52 | 8252.94 | 32.18 |
| 3.01 | 484 | 4840.00 | 1607.97 | 8336.03 | 32.50 |
| 3.11 | 522 | 5220.00 | 1678.46 | 8612.97 | 33.58 |
| 3.26 | 568 | 5680.00 | 1742.33 | 9028.39 | 35.20 |
| 3.31 | 570 | 5700.00 | 1722.054 | 9166.86 | 35.74 |
| 3.49 | 625 | 6250.00 | 1790.83 | 9665.36 | 37.68 |
| 3.62 | 668 | 6680.00 | 1845.30 | 10025.39 | 39.09 |
| 3.74 | 675 | 6750.00 | 1804.813 | 10357.72 | 40.38 |
| 3.94 | 770 | 7700.00 | 1954.31 | 10911.61 | 42.54 |
| 4.03 | 787 | 7870.00 | 1952.854 | 11160.86 | 43.51 |
| 4.08 | 770 | 7700.00 | 1887.25 | 11299.33 | 44.05 |
| 4.16 | 818 | 8180.00 | 1966.35 | 11520.89 | 44.92 |
| 4.29 | 832 | 8320.00 | 1939.39 | 11880.92 | 46.32 |
| 4.31 | 860 | 8600.00 | 1995.360 | 11936.31 | 46.54 |
| 4.39 | 877 | 8770.00 | 1997.72 | 12157.86 | 47.40 |
| 4.61 | 964 | 9640.00 | 2091.11 | 12767.14 | 49.78 |
| 4.79 | 1033 | 10330.00 | 2156.58 | 13265.64 | 51.72 |
| 4.87 | 1034 | 10340.00 | 2123.203 | 13487.19 | 52.58 |
| 4.90 | 1051 | 10510.00 | 2144.90 | 13570.28 | 52.91 |
| 5.01 | 1059 | 10590.00 | 2113.77 | 13874.92 | 54.09 |
| 5.09 | 1080 | 10800.00 | 2121.81 | 14096.47 | 54.96 |
| 5.18 | 1133 | 11330.00 | 2187.26 | 14345.72 | 55.93 |

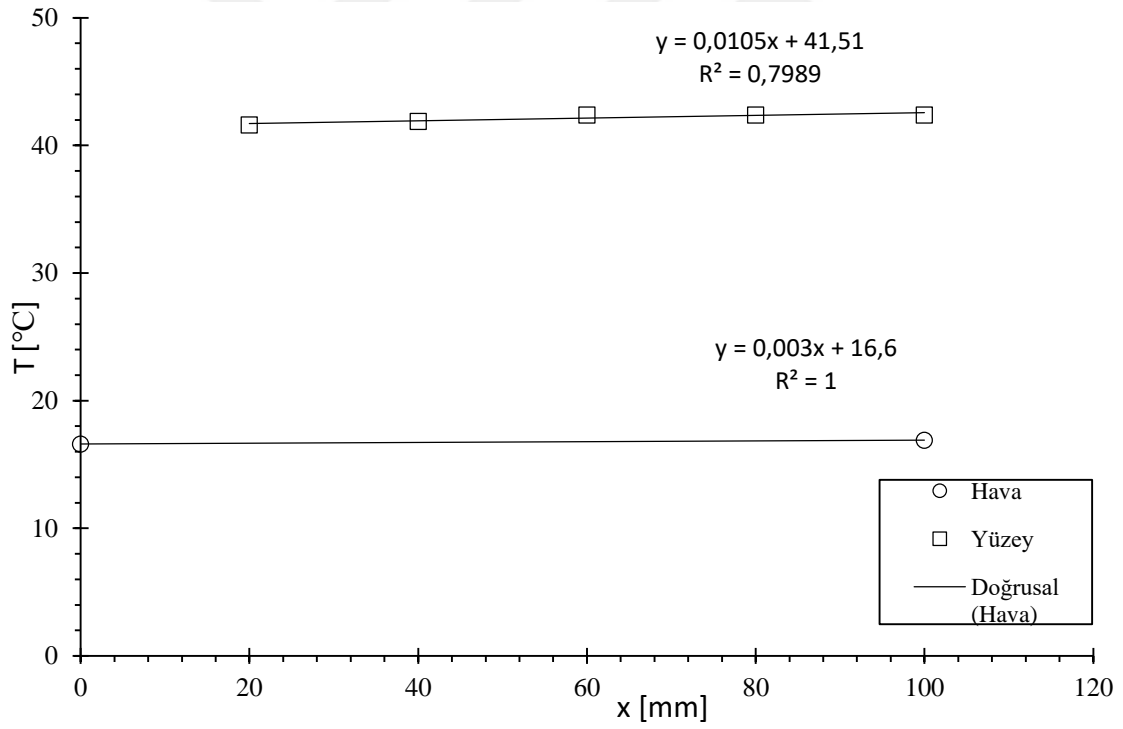
| Ortalama hız (m/s) | ΔP (Pa) | $\Delta P/L$ (Pa/m) | $\Delta P/Lu$ (Pa.s/m ²) | Re | Re _K |
|--------------------|-----------------|---------------------|--------------------------------------|----------|-----------------|
| 5.26 | 1203 | 12030.00 | 2287.07 | 14567.28 | 56.79 |
| 5.41 | 1212 | 12120.00 | 2240.30 | 14982.69 | 58.41 |
| 5.47 | 1275 | 12750.00 | 2330.896 | 15148.86 | 59.06 |
| 5.56 | 1294 | 12940.00 | 2327.34 | 15398.11 | 60.03 |
| 5.76 | 1377 | 13770.00 | 2390.63 | 15952.00 | 62.19 |
| 5.83 | 1405 | 14050.00 | 2409.95 | 16145.86 | 62.95 |
| 5.92 | 1440 | 14400.00 | 2432.432 | 16395.11 | 63.92 |
| 6.02 | 1505 | 15050.00 | 2500.00 | 16672.06 | 65.00 |
| 6.16 | 1575 | 15750.00 | 2556.82 | 17059.78 | 66.51 |
| 6.24 | 1616 | 16160.00 | 2589.74 | 17281.33 | 67.38 |
| 6.26 | 1578 | 15780.00 | 2520.767 | 17336.72 | 67.59 |
| 6.41 | 1713 | 17130.00 | 2672.387 | 17752.14 | 69.21 |
| 6.45 | 1745 | 17450.00 | 2705.43 | 17862.92 | 69.64 |
| 6.6 | 1770 | 17700.00 | 2681.82 | 18278.33 | 71.26 |
| 6.71 | 1855 | 18550.00 | 2764.53 | 18582.97 | 72.45 |
| 6.74 | 1851 | 18510.00 | 2746.291 | 18666.06 | 72.77 |
| 6.85 | 1871 | 18710.00 | 2731.39 | 18970.69 | 73.96 |
| 6.88 | 1920 | 19200.00 | 2790.70 | 19053.78 | 74.29 |
| 6.92 | 1967 | 19670.00 | 2842.49 | 19164.56 | 74.72 |
| 7.03 | 2023 | 20230.00 | 2877.667 | 19469.19 | 75.91 |
| 7.11 | 2017 | 20170.00 | 2836.85 | 19690.75 | 76.77 |
| 7.26 | 2149 | 21490.00 | 2960.06 | 20106.17 | 78.39 |
| 7.46 | 2183 | 21830.00 | 2926.27 | 20660.06 | 80.55 |
| 7.48 | 2252 | 22520.00 | 3010.695 | 20715.44 | 80.76 |
| 7.59 | 2337 | 23370.00 | 3079.05 | 21020.08 | 81.95 |
| 7.64 | 2360 | 23600.00 | 3089.01 | 21158.56 | 82.49 |
| 7.70 | 2312 | 23120.00 | 3002.60 | 21324.72 | 83.14 |
| 7.71 | 2326 | 23260.00 | 3016.86 | 21352.42 | 83.25 |
| 8.01 | 2555 | 25550.00 | 3189.76 | 22183.25 | 86.49 |
| 8.02 | 2481 | 24810.00 | 3093.52 | 22210.94 | 86.59 |
| 8.06 | 2601 | 26010.00 | 3227.05 | 22321.72 | 87.03 |
| 8.15 | 2595 | 25950.00 | 3184.05 | 22570.97 | 88.00 |
| 8.17 | 2687 | 26870.00 | 3288.86 | 22626.36 | 88.21 |
| 8.38 | 2756 | 27560.00 | 3288.78 | 23207.94 | 90.48 |
| 8.50 | 2860 | 28600.00 | 3364.71 | 23540.28 | 91.78 |
| 8.56 | 2853 | 28530.00 | 3332.94 | 23706.44 | 92.43 |
| 8.61 | 2904 | 29040.00 | 3372.82 | 23844.92 | 92.97 |
| 8.65 | 2979 | 29790.00 | 3443.93 | 23955.69 | 93.40 |
| 8.70 | 3001 | 30010.00 | 3449.43 | 24094.17 | 93.94 |
| 8.76 | 3042 | 30420.00 | 3472.60 | 24260.33 | 94.58 |
| 8.81 | 3075 | 30750.00 | 3490.35 | 24398.81 | 95.12 |
| 8.89 | 3178 | 31780.00 | 3574.80 | 24620.36 | 95.99 |
| 8.99 | 3117 | 31170.00 | 3467.19 | 24897.31 | 97.07 |

| Ortalama hız (m/s) | ΔP (Pa) | $\Delta P/L$ (Pa/m) | $\Delta P/Lu$ (Pa.s/m ²) | Re | Re _K |
|--------------------|-----------------|---------------------|--------------------------------------|----------|-----------------|
| 9.13 | 3298 | 32980.00 | 3612.27 | 25285.03 | 98.58 |
| 9.18 | 3307 | 33070.00 | 3602.40 | 25423.50 | 99.12 |
| 9.24 | 3367 | 33670.00 | 3643.94 | 25589.67 | 99.77 |
| 9.24 | 3429 | 34290.00 | 3711.04 | 25589.67 | 99.77 |
| 9.26 | 3428 | 34280.00 | 3701.94 | 25645.06 | 99.98 |
| 9.42 | 3600 | 36000.00 | 3821.66 | 26088.17 | 101.71 |
| 9.46 | 3525 | 35250.00 | 3726.22 | 26198.94 | 102.14 |
| 9.52 | 3548 | 35480.00 | 3726.89 | 26365.11 | 102.79 |
| 9.61 | 3664 | 36640.00 | 3812.70 | 26614.36 | 103.76 |
| 9.66 | 3642 | 36420.00 | 3770.19 | 26752.83 | 104.30 |
| 9.73 | 3790 | 37900.00 | 3895.17 | 26946.69 | 105.06 |
| 9.81 | 3807 | 38070.00 | 3880.73 | 27168.25 | 105.92 |
| 9.90 | 3891 | 38910.00 | 3930.30 | 27417.50 | 106.89 |
| 9.98 | 3978 | 39780.00 | 3985.97 | 27639.06 | 107.76 |
| 10.02 | 3964 | 39640.00 | 3956.09 | 27749.83 | 108.19 |
| 10.1 | 4056 | 40560.00 | 4015.84 | 27971.39 | 109.05 |
| 10.15 | 4172 | 41720.00 | 4110.34 | 28109.86 | 109.59 |
| 10.21 | 4171 | 41710.00 | 4085.21 | 28276.03 | 110.24 |
| 10.33 | 4216 | 42160.00 | 4081.32 | 28608.36 | 111.54 |
| 10.51 | 4396 | 43960.00 | 4182.68 | 29106.86 | 113.48 |
| 10.51 | 4394 | 43940.00 | 4180.78 | 29106.86 | 113.48 |
| 10.54 | 4423 | 44230.00 | 4196.39 | 29189.94 | 113.80 |
| 10.63 | 4503 | 45030.00 | 4236.12 | 29439.19 | 114.78 |
| 10.65 | 4503 | 45030.00 | 4228.17 | 29494.58 | 114.99 |
| 10.72 | 4544 | 45440.00 | 4238.81 | 29688.44 | 115.75 |
| 10.77 | 4606 | 46060.00 | 4276.69 | 29826.92 | 116.29 |
| 10.87 | 4681 | 46810.00 | 4306.35 | 30103.86 | 117.37 |
| 10.90 | 4750 | 47500.00 | 4357.80 | 30186.94 | 117.69 |
| 10.97 | 4813 | 48130.00 | 4387.42 | 30380.81 | 118.45 |
| 10.99 | 4768 | 47680.00 | 4338.49 | 30436.19 | 118.66 |
| 11.06 | 4873 | 48730.00 | 4405.97 | 30630.06 | 119.42 |
| 11.09 | 4885 | 48850.00 | 4404.87 | 30713.14 | 119.74 |
| 11.19 | 4944 | 49440.00 | 4418.23 | 30990.08 | 120.82 |
| 11.24 | 4983 | 49830.00 | 4433.27 | 31128.56 | 121.36 |

EK - 3. Boş Kanal Isı Geçiş Deneyleri

Deney 1

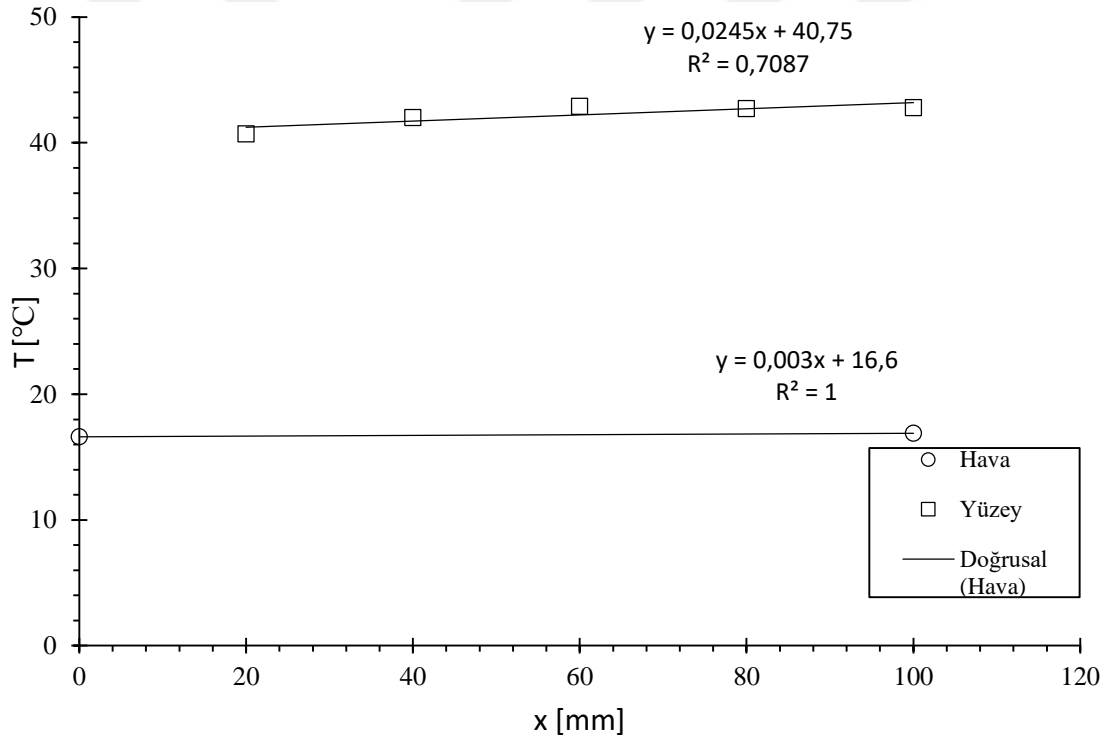
| | | | |
|-----------------------------|------------|-----------|-----------|
| u_m [m/s] | 6.98 | Re_{dh} | 21091.486 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0189507 | ReK | 82.28 |
| $T_{m_{air}}$ | 16.75 | Nu | 0.35 |
| c_p | 1013.7 | NuD | 89.157975 |
| ρ (kg/m ³) | 1.086 | NuD | 57.647615 |
| μ (kg/ms) | 0.00001797 | h | 29.97676 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | | |



EK - 3.1. Boş kanal sıcaklık konum değişimi

Deney 2

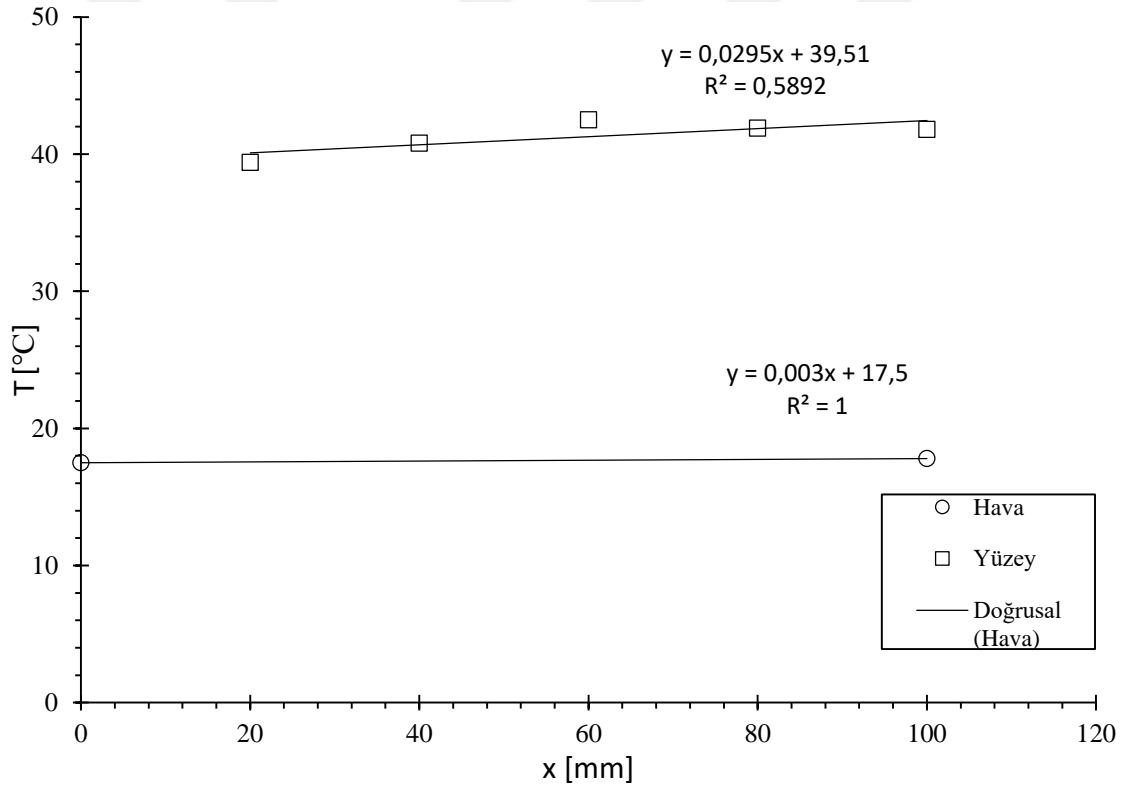
| | | | |
|-----------------------------|------------|-----------|-----------|
| u_m [m/s] | 6.82 | Re_{dh} | 20608.013 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0185163 | Re_K | 80.39 |
| T_{m_air} | 16.8 | Nu | 0.34 |
| c_p | 1013.7 | NuD | 88.220878 |
| ρ (kg/m ³) | 1.086 | NuD | 56.588021 |
| μ (kg/ms) | 0.00001797 | h | 29.425771 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | | |



EK - 3.2. Boş kanal sıcaklık konum değişimi

Deney 3

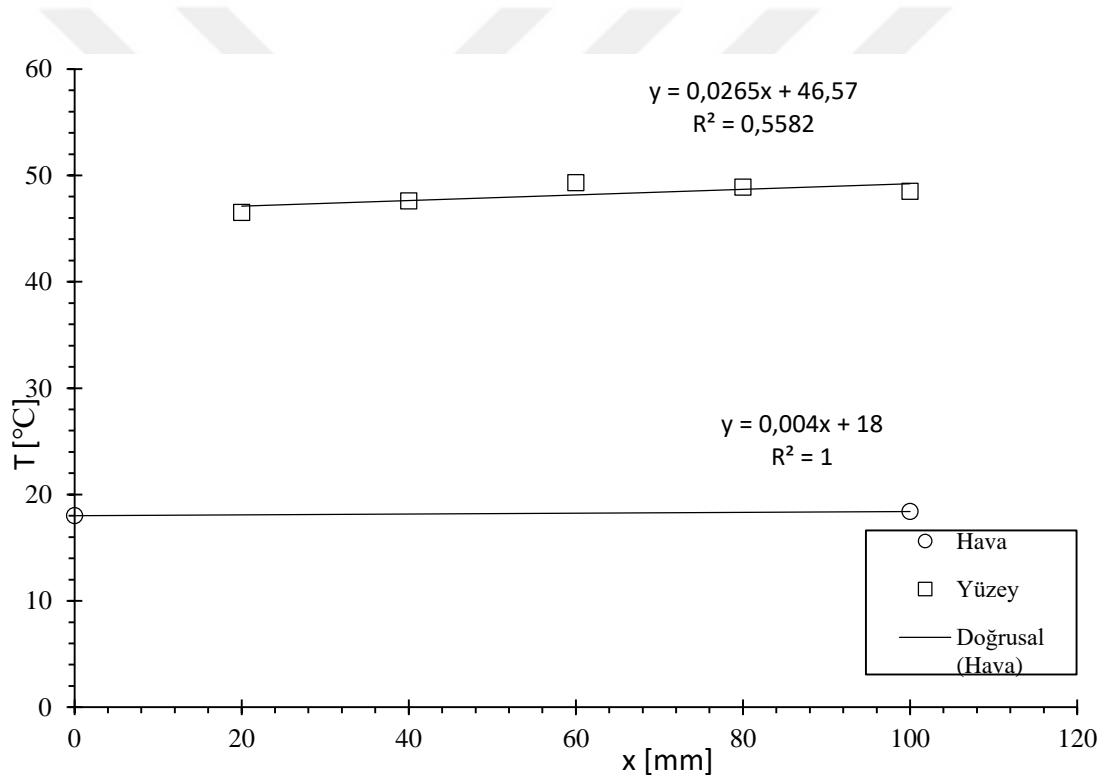
| | | | |
|-----------------------------|------------|-----------|-----------|
| u_m [m/s] | 7.25 | Re_{dh} | 21907.346 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.01968375 | Re_K | 85.46 |
| T_{m_air} | 17.65 | Nu | 0.37 |
| c_p | 1013.7 | NuD | 94.299383 |
| ρ (kg/m ³) | 1.086 | NuD | 59.424756 |
| μ (kg/ms) | 0.00001797 | h | 30.900873 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | | |



EK - 3.3. Boş kanal sıcaklık konum değişimi

Deney 4

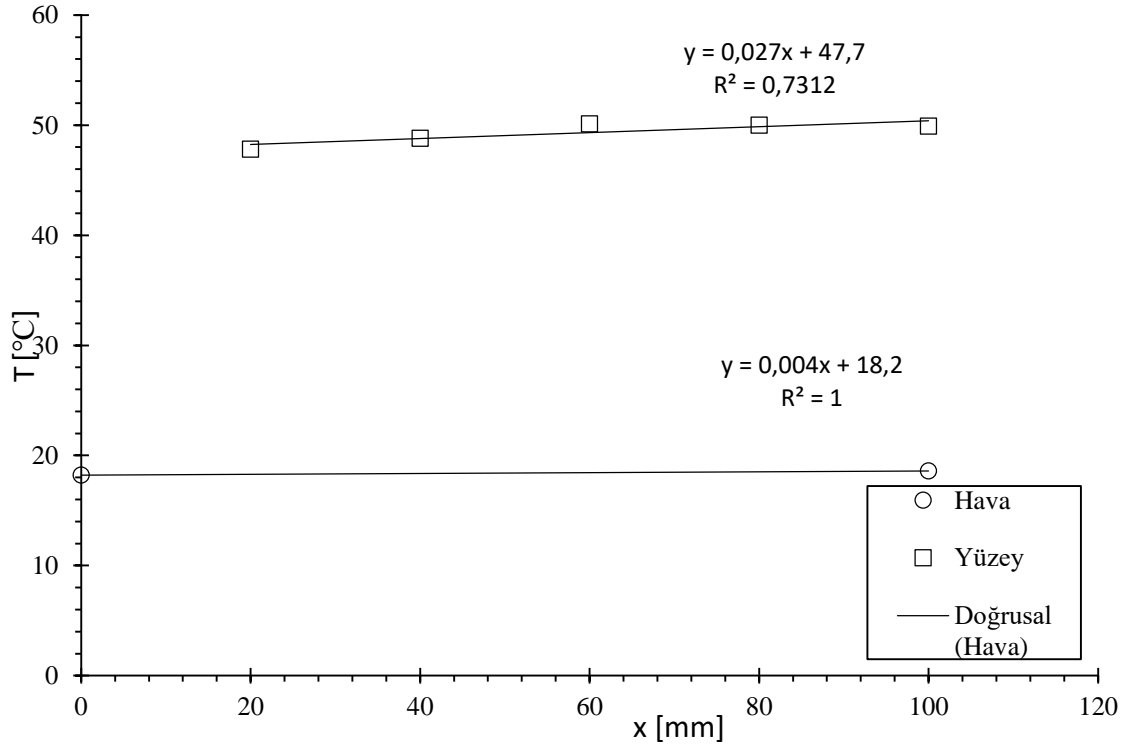
| | | | |
|-----------------------------|------------|--------|-----------|
| u_m [m/s] | 5.49 | Re_dh | 16491.338 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.01485045 | ReK | 64.33 |
| T_{m_air} | 18.05 | Nu | 0.28 |
| c_p | 1014.6 | NuD | 72.956908 |
| ρ (kg/m ³) | 1.082 | NuD | 47.347856 |
| μ (kg/ms) | 0.00001801 | h | 24.620885 |
| k (W/mK) | 0.026 | Ts_ort | 47.733333 |
| Pr | 0.707 | Tm | 18.2 |



EK - 3.4. Boş kanal sıcaklık konum değişimi

Deney 5

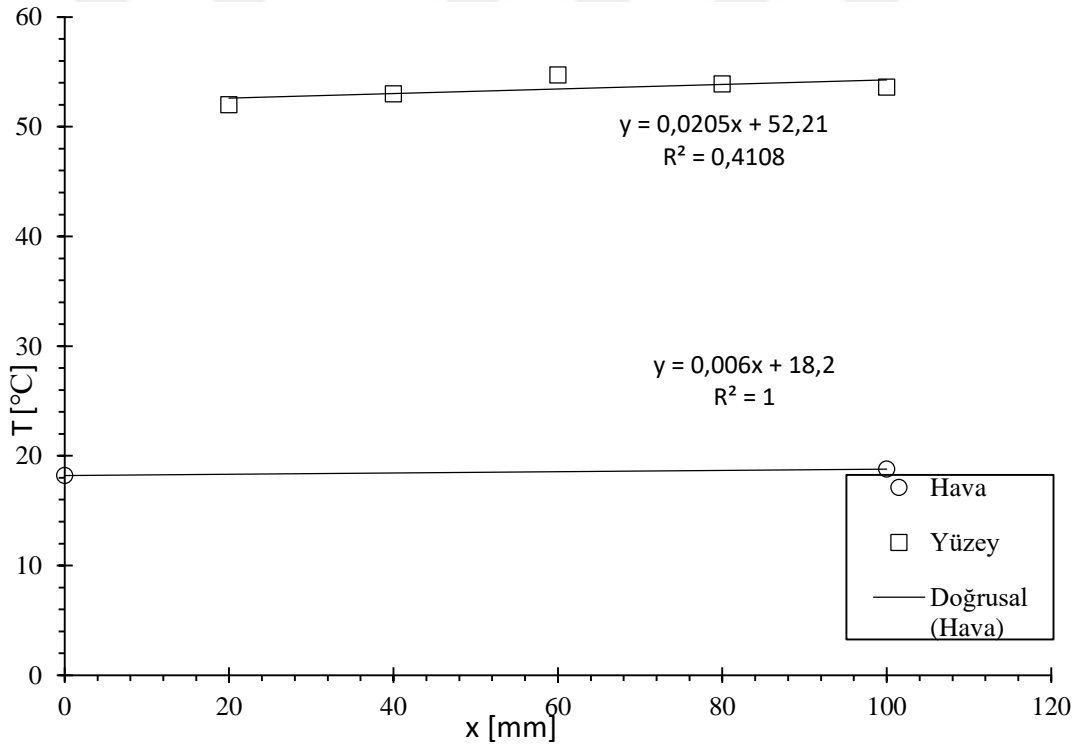
| | | | |
|-----------------------------|------------|-----------|-----------|
| u_m [m/s] | 5.21 | Re_{dh} | 15609.728 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.01404095 | Re_K | 60.89 |
| T_{m_air} | 18.4 | Nu | 0.28 |
| c_p | 1015.9 | NuD | 70.66893 |
| ρ (kg/m ³) | 1.078 | NuD | 45.311857 |
| μ (kg/ms) | 0.00001799 | h | 23.562166 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | | |



EK - 3.5. Boş kanal sıcaklık konum değişimi

Deney 6

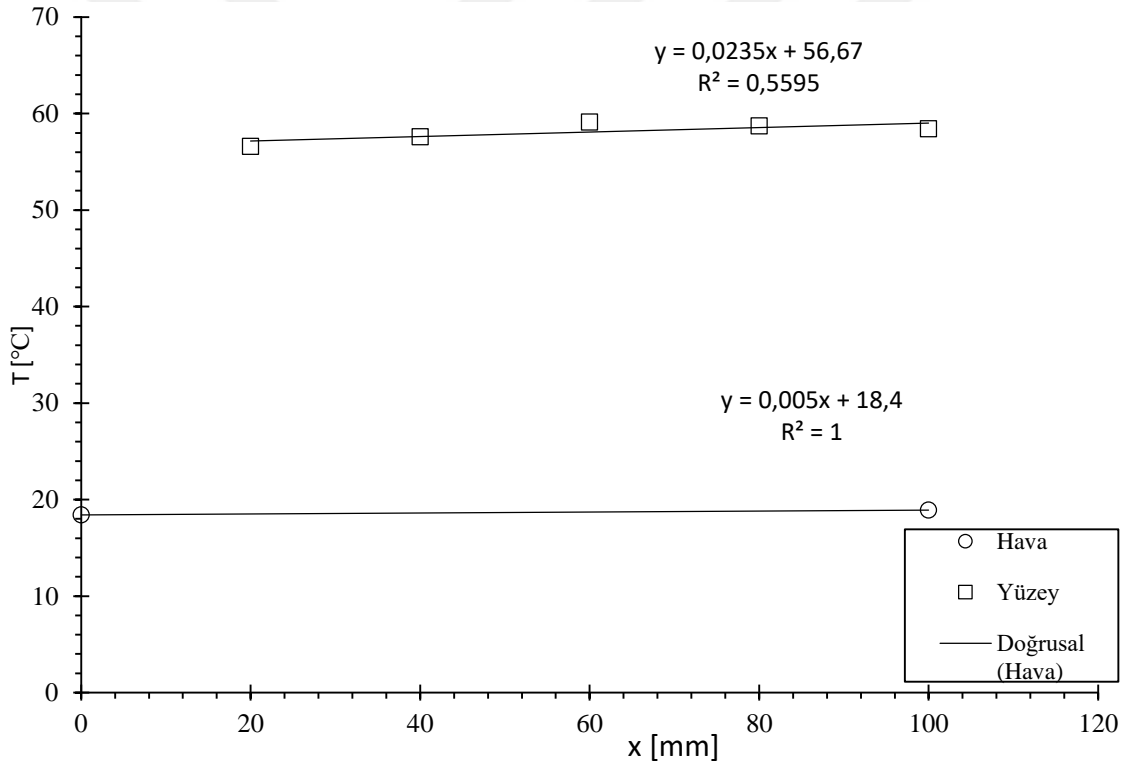
| | | | |
|-----------------------------|-----------|--------------|-----------|
| u_m [m/s] | 3.82 | Re_{dh} | 11417.556 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0102758 | ReK | 44.54 |
| T_{m_air} | 18.45 | Nu | 0.24 |
| c_p | 1015.9 | NuD | 62.584313 |
| ρ (kg/m ³) | 1.076 | NuD | 35.282074 |
| μ (kg/ms) | 0.000018 | h | 18.346679 |
| k (W/mK) | 0.026 | T_{s_ort} | 53.033333 |
| Pr | 0.707 | T_m | 18.5 |



EK - 3.6. Boş kanal sıcaklık konum değişimi

Deney 7

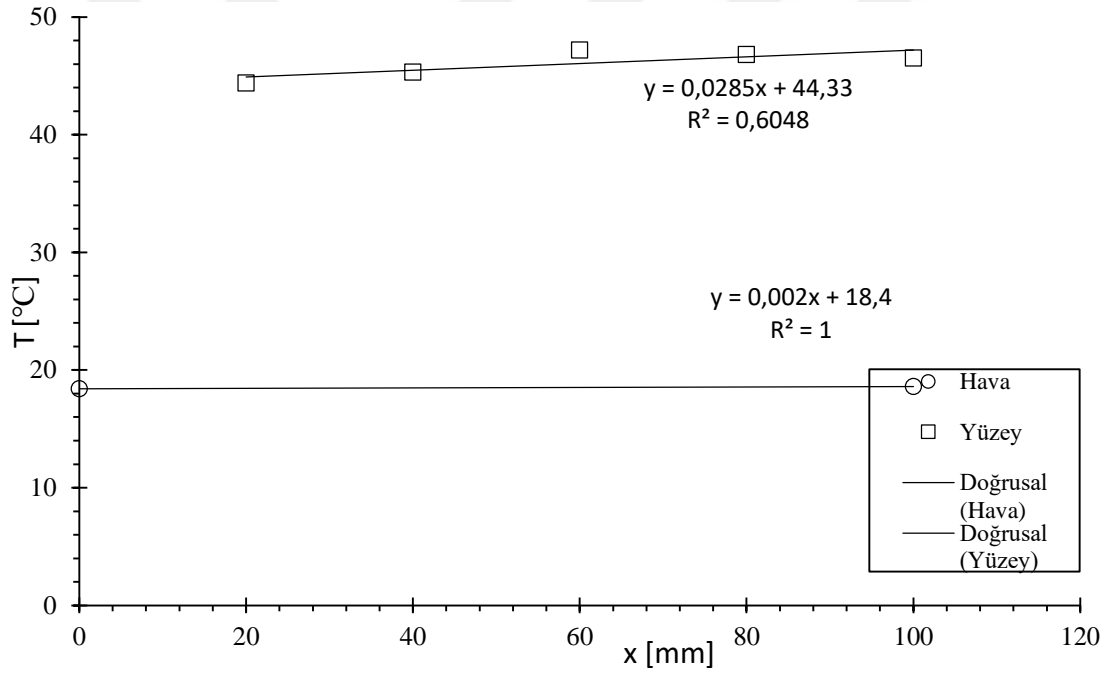
| | | | |
|-----------------------------|------------|------------|-----------|
| m [m/s] | 3.12 | Re_{dh} | 9302.99 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0084006 | Re_K | 36.29 |
| T_{m_air} | 18.65 | Nu | 0.22 |
| c_p | 1015.1 | NuD | 55.39997 |
| ρ (kg/m ³) | 1.077 | NuD | 29.949781 |
| μ (kg/ms) | 0.00001806 | h | 15.573886 |
| k (W/mK) | 0.026 | Ts_{ort} | 57.65 |
| Pr | 0.707 | T_m | 18.65 |



EK - 3.7. Boş kanal sıcaklık konum değişimi

Deney 8

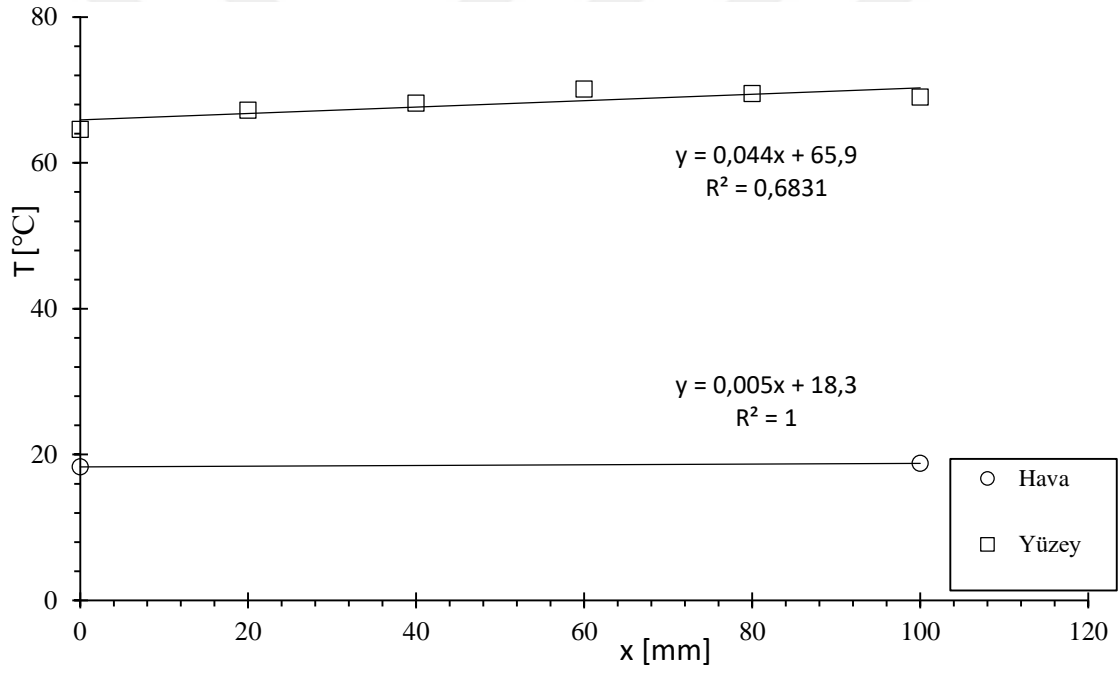
| | | | |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| u_m [m/s] | 5.78 | Re_{dh} | 17275.778 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0155482 | ReK | 67.39 |
| T_{m_air} | 18.6 | Nu | 0.31 |
| c_p | 1015.9 | NuD | 79.348148 |
| ρ (kg/m ³) | 1.076 | NuD | 49.141192 |
| μ (kg/ms) | 0.000018 | h | 25.55342 |
| k (W/mK) | 0.026 | T_m | 18.5 |
| Pr | 0.707 | Ts_ort | 45.616667 |



EK - 3.8. Boş kanal sıcaklık konum değişimi

Deney 9

| | | | |
|-----------------------------|------------|-----------|-----------|
| u_m [m/s] | 5.98 | Re_{dh} | 18096.492 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.01625065 | ReK | 70.59 |
| T_{m_air} | 18.55 | Nu | 0.32 |
| c_p | 1014.9 | NuD | 81.103184 |
| ρ (kg/m ³) | 1.087 | NuD | 51.000111 |
| μ (kg/ms) | 0.00001796 | h | 26.520058 |
| k (W/mK) | 0.026 | Ts_ort | 68.1 |
| Pr | 0.707 | Tm | 18.55 |

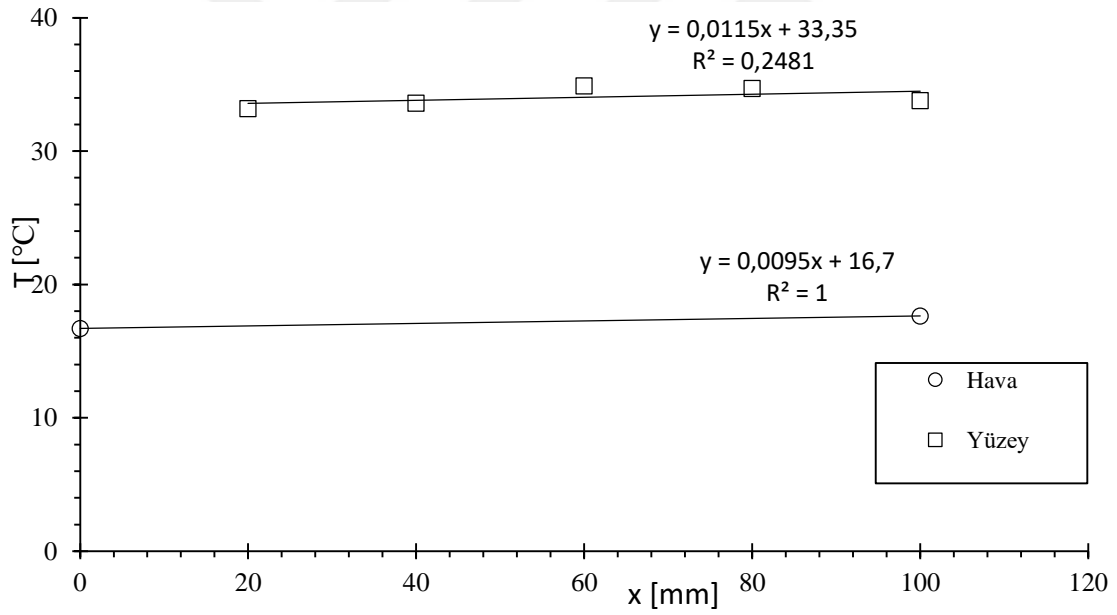


EK - 3.9. Boş kanal sıcaklık konum değişimi

EK - 4. ABS Malzemeli Gözenekli Ortamda Isı Geçişi Deney Sonuçları

Deney 1

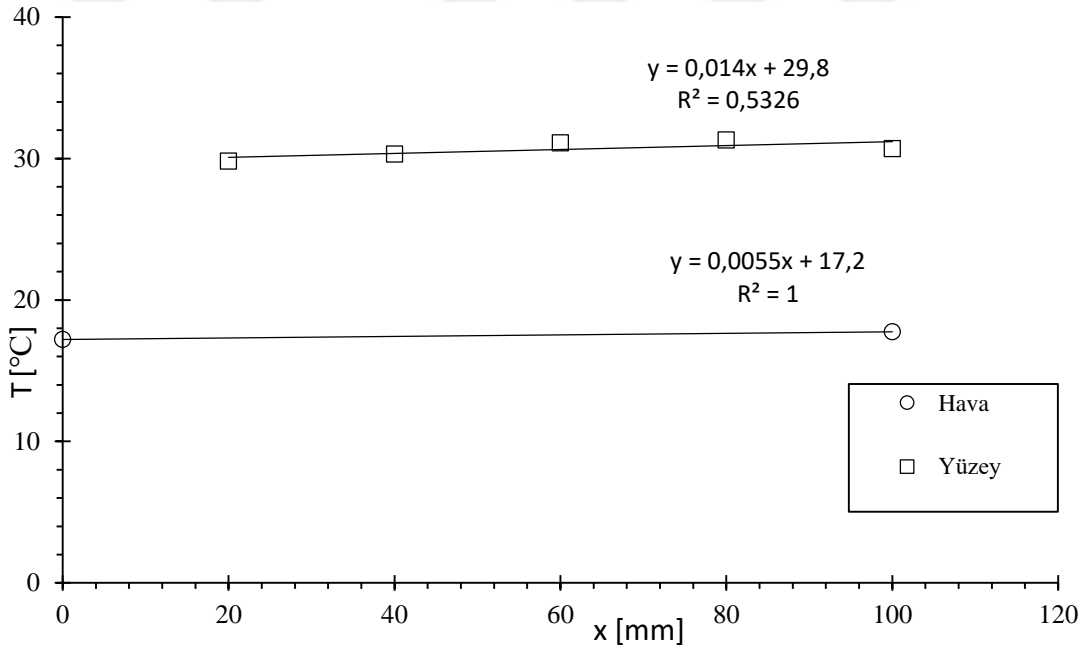
| | | | |
|-----------------------------|------------|-----------|-----------|
| u_m [m/s] | 3.81 | Re_{dh} | 11468.121 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.01031558 | Re_K | 44.74 |
| T_{m_air} | 17.3 | Nu | 0.83 |
| c_p | 1014.1 | NuD | 213.4983 |
| ρ (kg/m ³) | 1.083 | NuD | 35.407024 |
| μ (kg/ms) | 0.00001799 | h | 18.411652 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | | |



EK - 4.1. Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 2

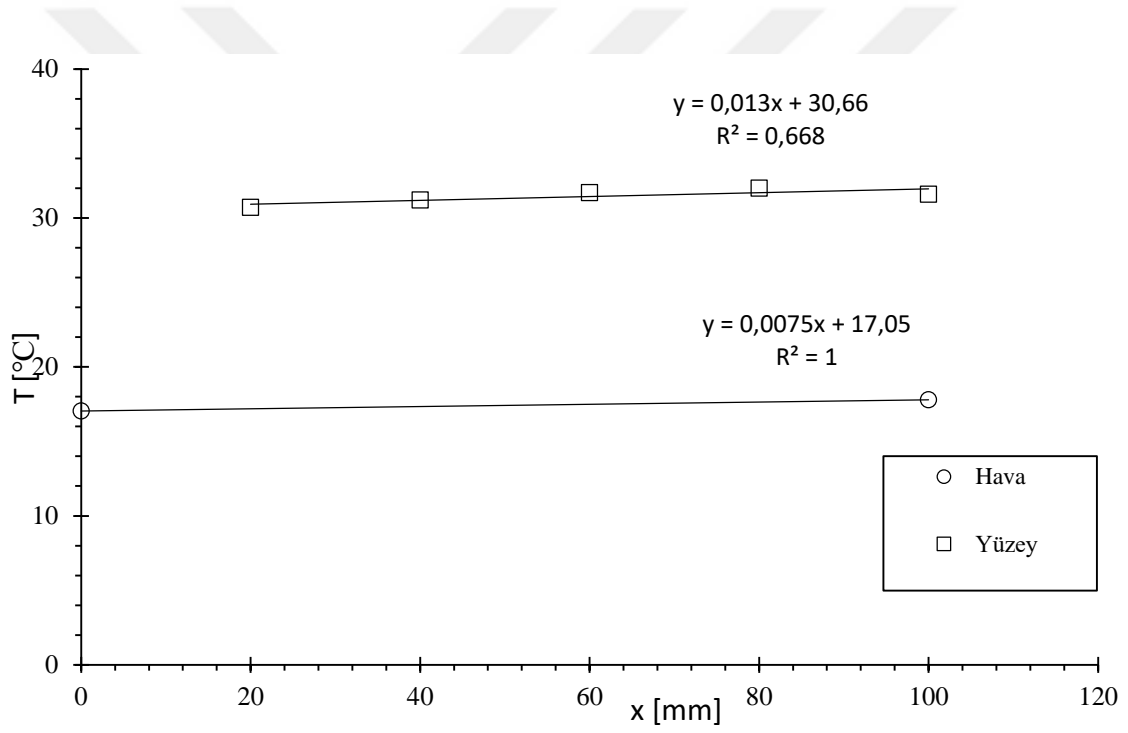
| | | | |
|-----------------------------|------------|-----------|-----------|
| u_m [m/s] | 5.66 | Re_{dh} | 17027.167 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.01532445 | ReK | 66.42 |
| T_{m_air} | 17.5 | Nu | 1.04 |
| c_p | 1014.1 | NuD | 265.63083 |
| ρ (kg/m ³) | 1.083 | NuD | 48.574631 |
| μ (kg/ms) | 0.000018 | h | 25.258808 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | | |



EK - 4.2.Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 3

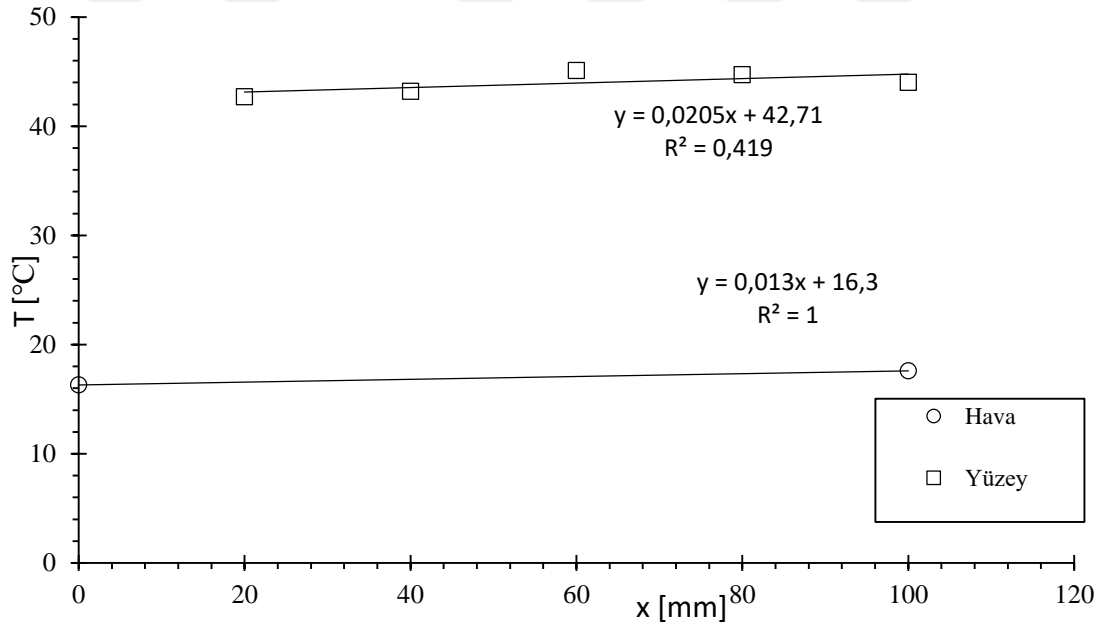
| | | | |
|-----------------------------|------------|-----------|-----------|
| u_m [m/s] | 5.05 | Re_{dh} | 15192.083 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.01367288 | Re_K | 59.26 |
| T_{m_air} | 17.35 | Nu | 0.97 |
| c_p | 1014.1 | NuD | 248.11885 |
| ρ (kg/m ³) | 1.083 | NuD | 44.339365 |
| μ (kg/ms) | 0.000018 | h | 23.05647 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | | |



EK - 4.3.Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 4

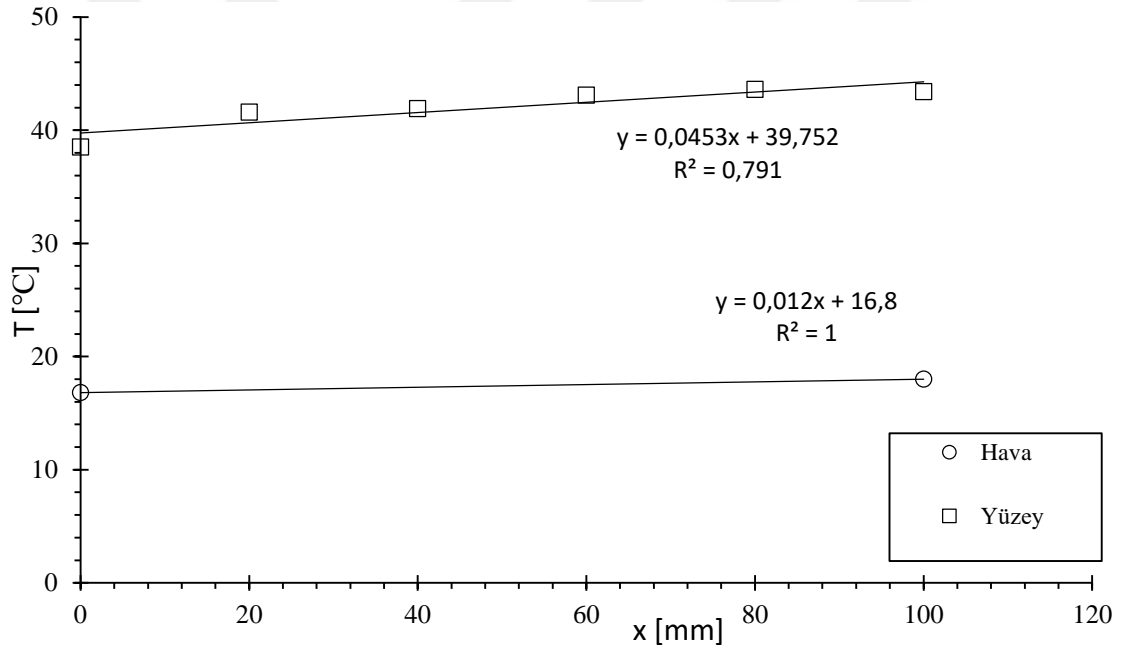
| | | | |
|-----------------------------|------------|--------|-----------|
| u_m [m/s] | 5.48 | Re_dh | 16436.95 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0147686 | ReK | 64.12 |
| T_{m_air} | 16.9 | Nu | 1.08 |
| c_p | 1015.9 | NuD | 276.18242 |
| ρ (kg/m ³) | 1.078 | NuD | 47.222894 |
| μ (kg/ms) | 0.00001797 | h | 24.555905 |
| k (W/mK) | 0.026 | Ts_ort | 42.966667 |
| Pr | 0.707 | Tm | 16.95 |



EK - 4.4. Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 5

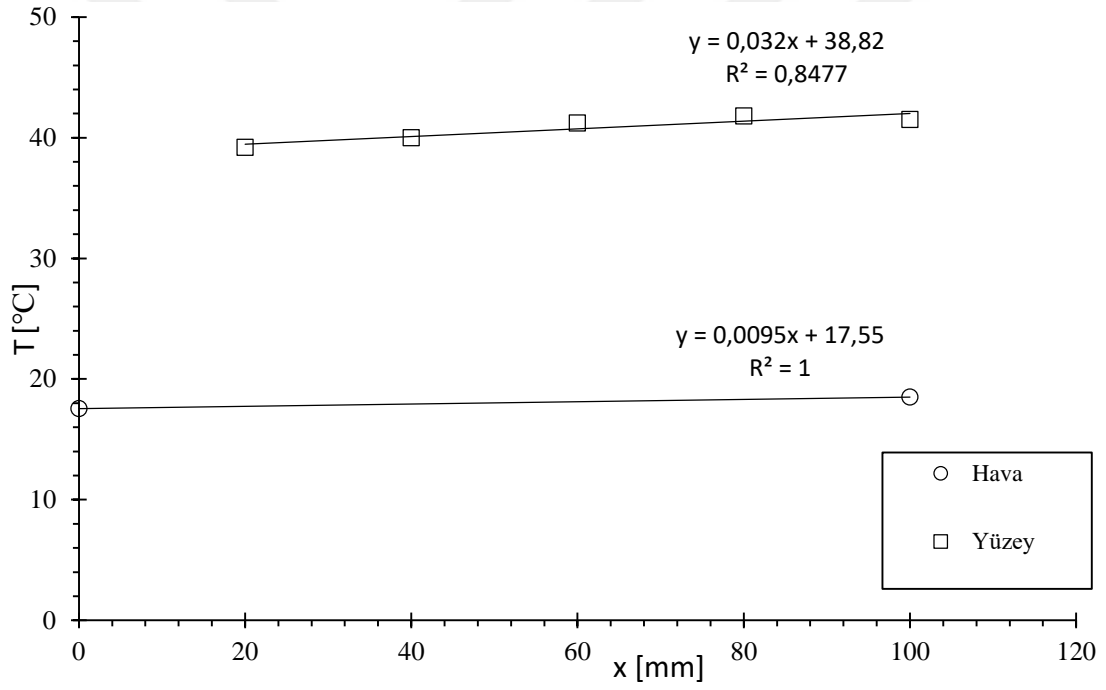
| | | | |
|-----------------------------|------------|--------|-----------|
| u_m [m/s] | 5.96 | Re_dh | 17856.809 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0160622 | ReK | 69.66 |
| T_{m_air} | 17.45 | Nu | 1.13 |
| c_p | 1015.9 | NuD | 290.23287 |
| ρ (kg/m ³) | 1.078 | NuD | 50.459006 |
| μ (kg/ms) | 0.00001799 | h | 26.238683 |
| k (W/mK) | 0.026 | Ts_ort | 42.016667 |
| Pr | 0.707 | Tm | 17.4 |



EK - 4.5. Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 6

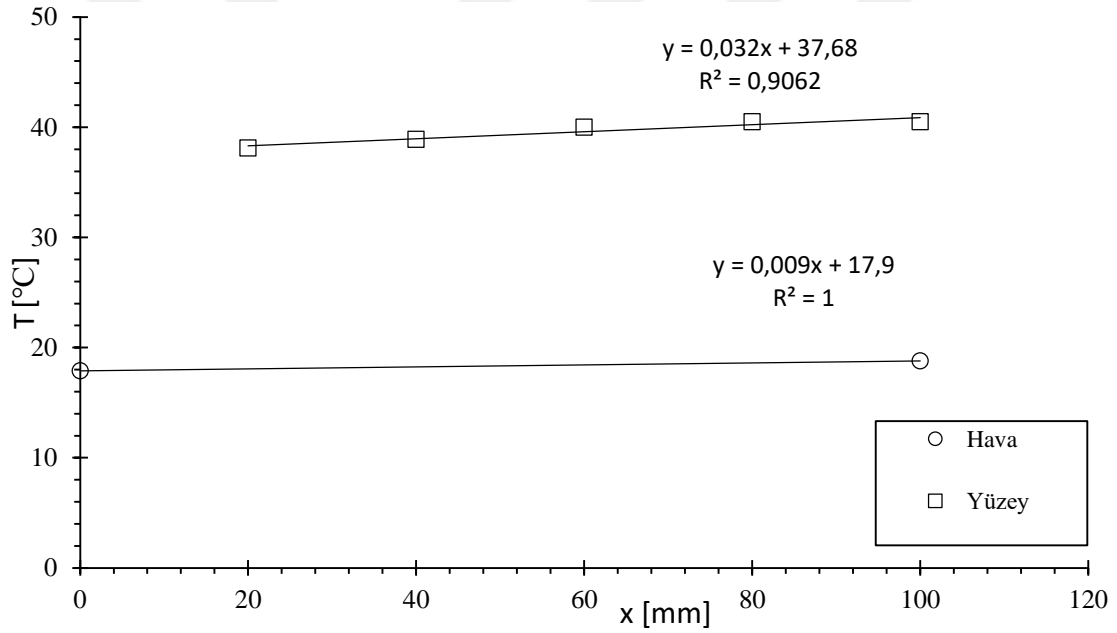
| | | | |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| u_m [m/s] | 6.61 | Re_{dh} | 19756.556 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0177809 | ReK | 77.07 |
| T_{m_air} | 17.8 | Nu | 1.24 |
| c_p | 1015.9 | NuD | 319.03013 |
| ρ (kg/m ³) | 1.076 | NuD | 54.709732 |
| μ (kg/ms) | 0.000018 | h | 28.449061 |
| k (W/mK) | 0.026 | Ts_ort | 40.016667 |
| Pr | 0.707 | Tm | 18.025 |



EK - 4.6. Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 7

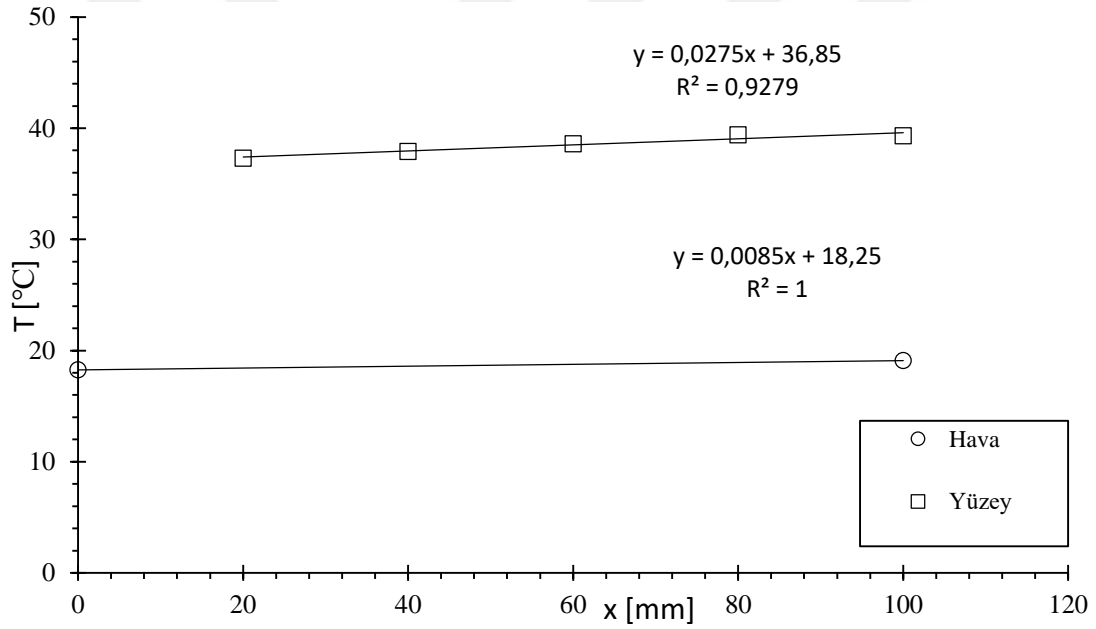
| | | | |
|-----------------------------|-----------|--------|-----------|
| u_m [m/s] | 7.81 | Re_dh | 23343.222 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0210089 | ReK | 91.06 |
| T_{m_air} | 18.25 | Nu | 1.32 |
| c_p | 1015.9 | NuD | 338.86605 |
| ρ (kg/m ³) | 1.076 | NuD | 62.520759 |
| μ (kg/ms) | 0.000018 | h | 32.510795 |
| k (W/mK) | 0.026 | Ts_ort | 39.016667 |
| Pr | 0.707 | Tm | 18.35 |



EK - 4.7. Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 8

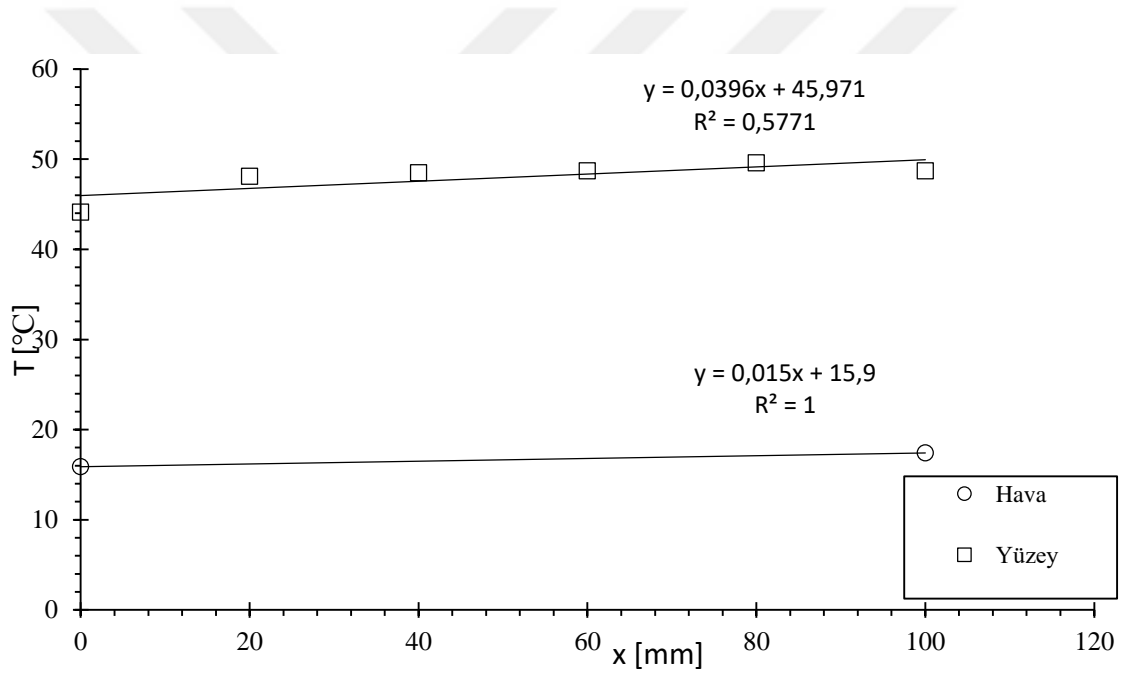
| | | | |
|-----------------------------|-----------|--------|-----------|
| u_m [m/s] | 8.11 | Re_dh | 24239.889 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0218159 | ReK | 94.56 |
| T_{m_air} | 18.6 | Nu | 1.42 |
| c_p | 1015.9 | NuD | 365.01957 |
| ρ (kg/m ³) | 1.076 | NuD | 64.434743 |
| μ (kg/ms) | 0.000018 | h | 33.506066 |
| k (W/mK) | 0.026 | Ts_ort | 37.833333 |
| Pr | 0.707 | Tm | 18.675 |



EK - 4.8. Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 9

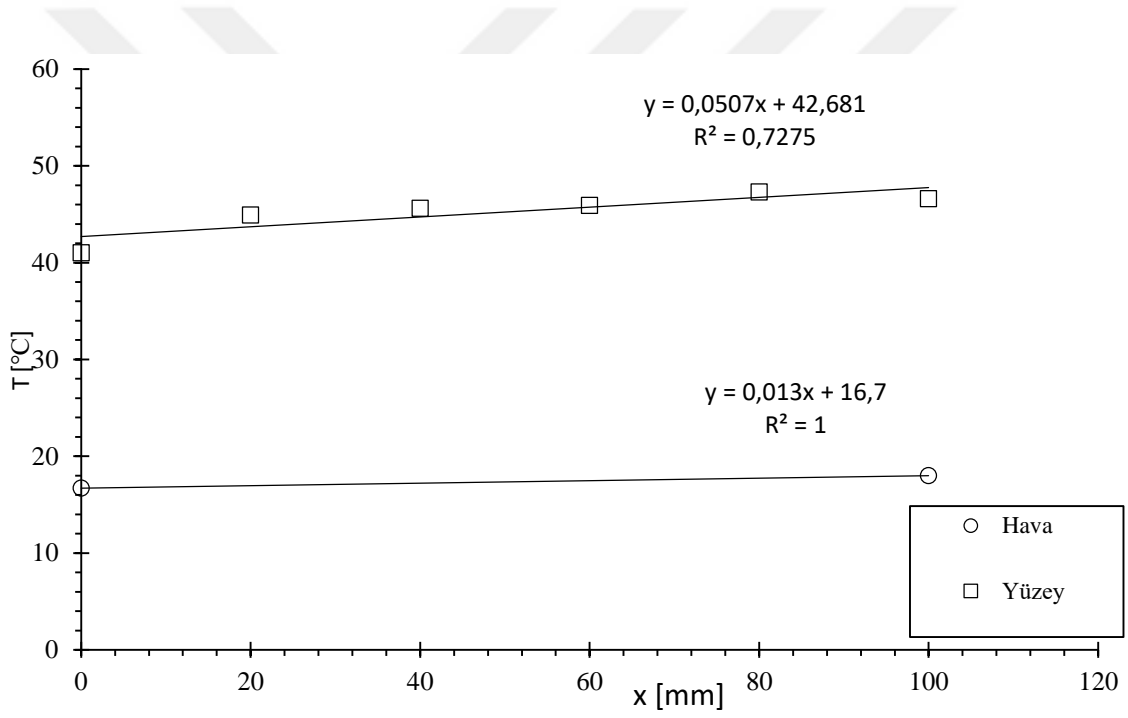
| | | | |
|-----------------------------|------------|--------------|-----------|
| u_m [m/s] | 5.72 | Re_{dh} | 17309.688 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0155441 | Re_K | 67.52 |
| T_{m_air} | 16.55 | Nu | 1.11 |
| c_p | 1013.9 | NuD | 283.68242 |
| ρ (kg/m ³) | 1.087 | NuD | 49.218344 |
| μ (kg/ms) | 0.00001796 | h | 25.593539 |
| k (W/mK) | 0.026 | T_{s_ort} | 47.95 |
| Pr | 0.707 | T_m | 16.65 |



EK - 4.9. Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 10

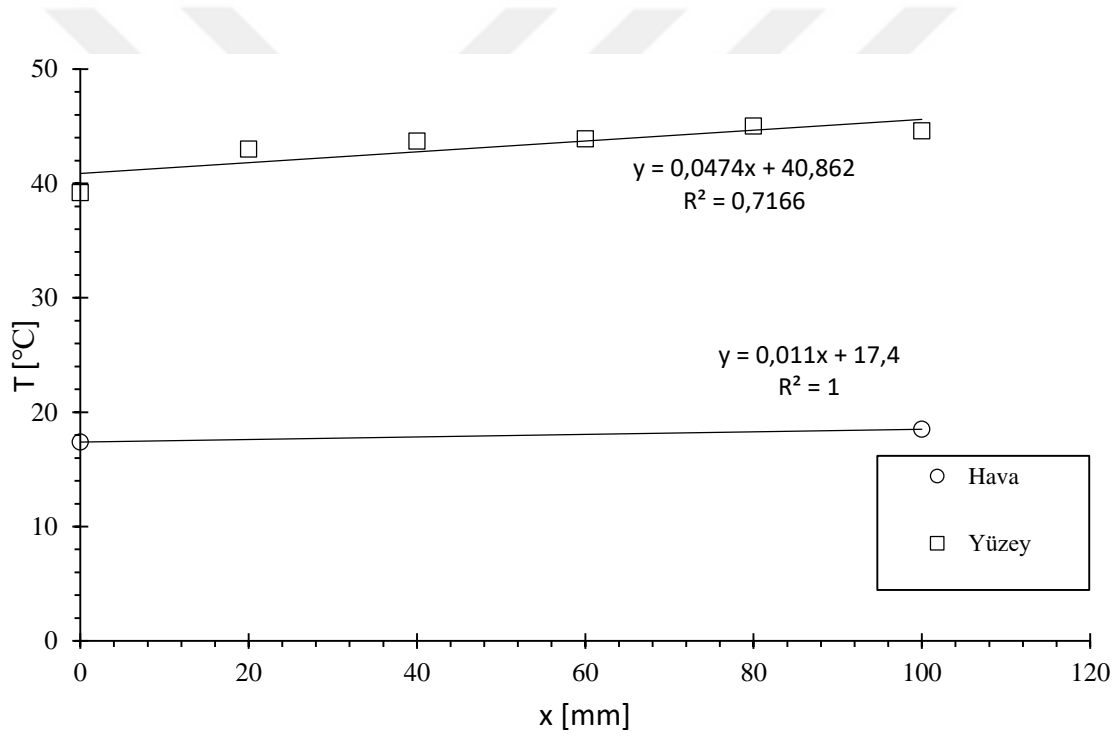
| | | | |
|-----------------------------|------------|--------|-----------|
| u_m [m/s] | 6.89 | Re_dh | 20758.088 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0186719 | ReK | 80.98 |
| T_{m_air} | 17.25 | Nu | 1.24 |
| c_p | 1014.1 | NuD | 316.89926 |
| ρ (kg/m ³) | 1.084 | NuD | 56.917456 |
| μ (kg/ms) | 0.00001799 | h | 29.597077 |
| k (W/mK) | 0.026 | Ts_ort | 45.216667 |
| Pr | 0.707 | Tm | 17.35 |



EK - 4.10. Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 11

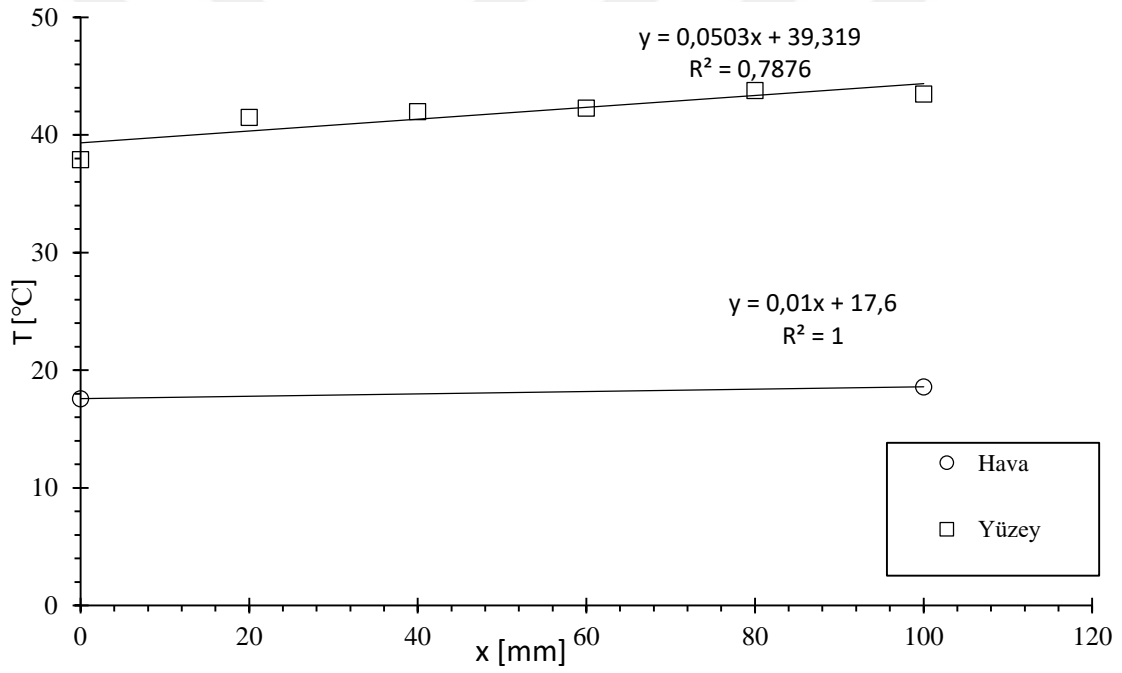
| | | | |
|-----------------------------|------------|-----------|-----------|
| u_m [m/s] | 7.96 | Re_{dh} | 23910.938 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0215318 | ReK | 93.27 |
| T_{m_air} | 17.7 | Nu | 1.36 |
| c_p | 1015.9 | NuD | 348.59097 |
| ρ (kg/m ³) | 1.082 | NuD | 63.734253 |
| μ (kg/ms) | 0.00001801 | h | 33.141811 |
| k (W/mK) | 0.026 | Ts_ort | 43.233333 |
| Pr | 0.707 | Tm | 17.95 |



EK - 4.11.Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 12

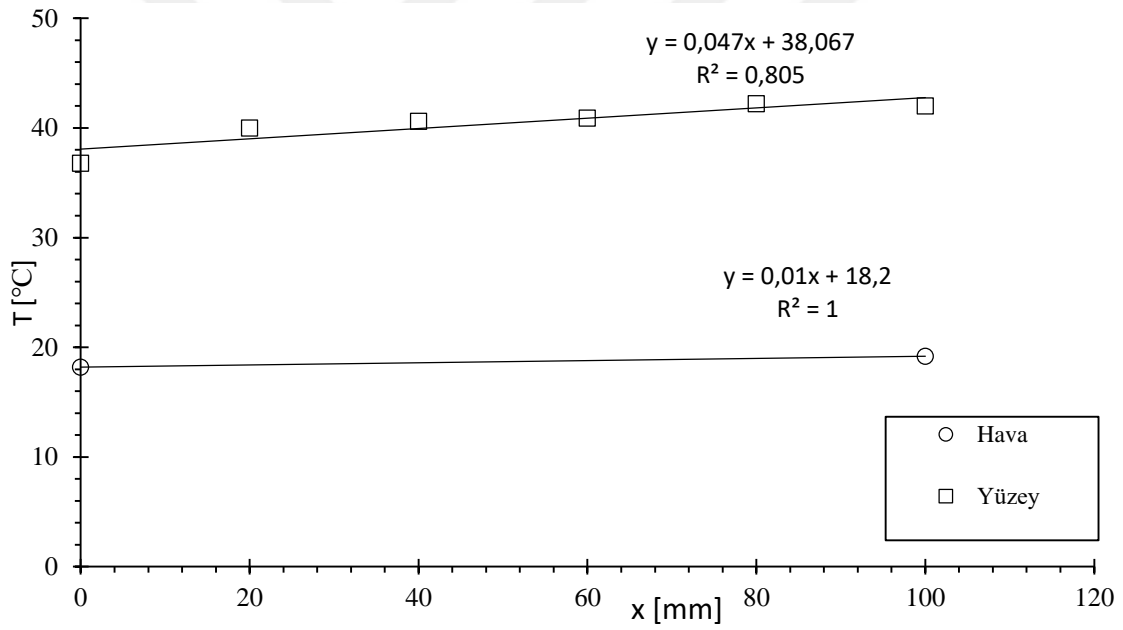
| | | | |
|-----------------------------|------------|-----------|-----------|
| u_m [m/s] | 8.81 | Re_{dh} | 26425.111 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.02380903 | ReK | 103.08 |
| T_{m_air} | 18 | Nu | 1.45 |
| c_p | 1014.4 | NuD | 370.99992 |
| ρ (kg/m ³) | 1.081 | NuD | 69.041315 |
| μ (kg/ms) | 0.00001802 | h | 35.901484 |
| k (W/mK) | 0.026 | Ts_ort | 41.833333 |
| Pr | 0.707 | Tm | 18.1 |



EK - 4.12. Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 13

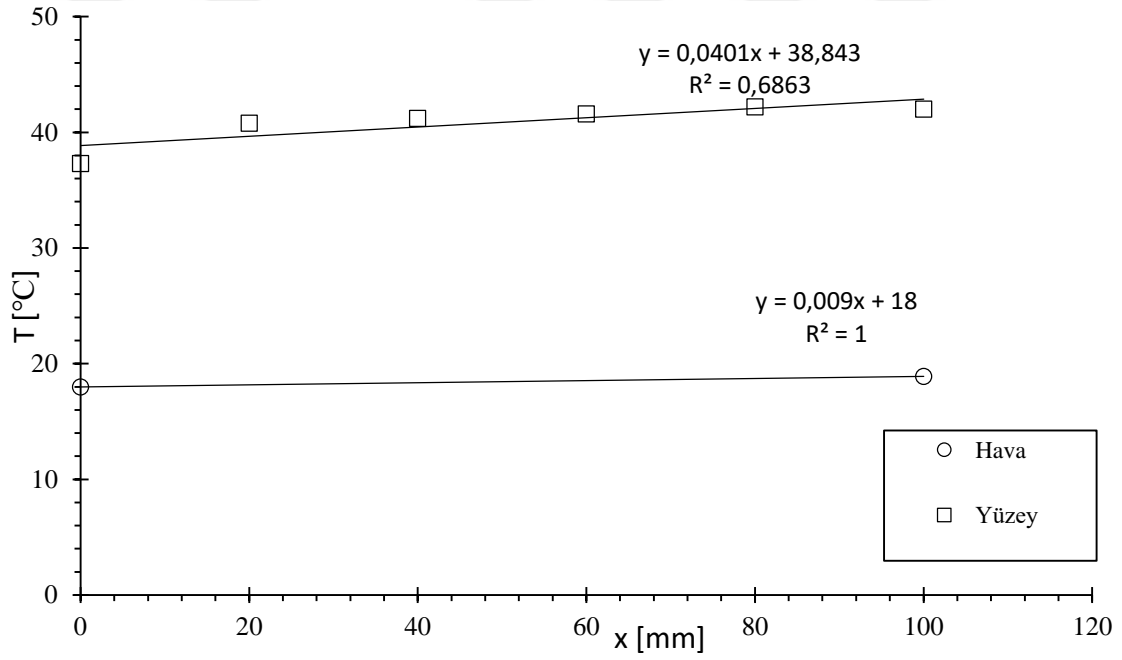
| | | | |
|-----------------------------|------------|-----------|-----------|
| u_m [m/s] | 9.17 | Re_{dh} | 27464.226 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.024759 | Re_K | 107.14 |
| T_{m_air} | 18.65 | Nu | 1.58 |
| c_p | 1015.9 | NuD | 405.54496 |
| ρ (kg/m ³) | 1.08 | NuD | 71.204837 |
| μ (kg/ms) | 0.00001803 | h | 37.026515 |
| k (W/mK) | 0.026 | Ts_ort | 40.416667 |
| Pr | 0.707 | T_m | 18.7 |



EK - 4.13. Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 14

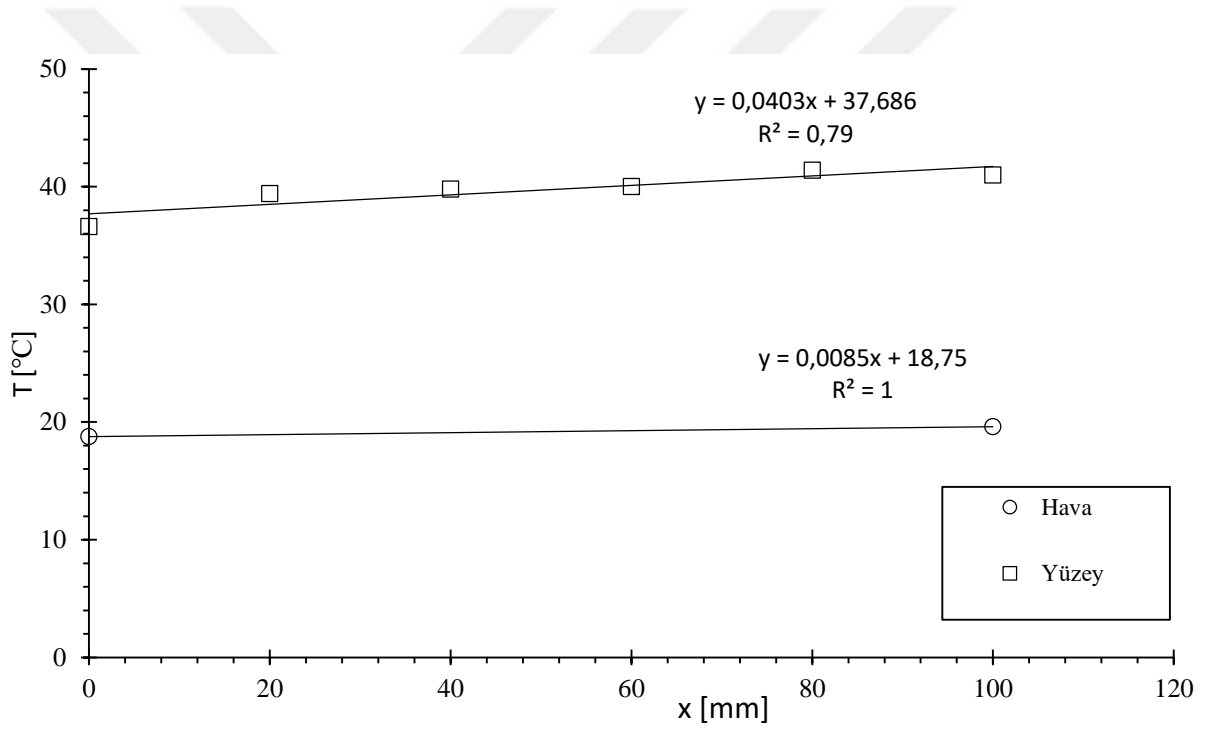
| | | | |
|-----------------------------|------------|--------|-----------|
| u_m [m/s] | 9.59 | Re_dh | 28637.175 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.02584505 | ReK | 111.71 |
| T_{m_air} | 18.25 | NuD | 1.53 |
| c_p | 1014.8 | NuD | 393.36448 |
| ρ (kg/m ³) | 1.078 | NuD | 73.627446 |
| μ (kg/ms) | 0.00001805 | h | 38.286272 |
| k (W/mK) | 0.026 | Ts_ort | 40.85 |
| Pr | 0.707 | Tm | 18.45 |



EK - 4.14. Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 15

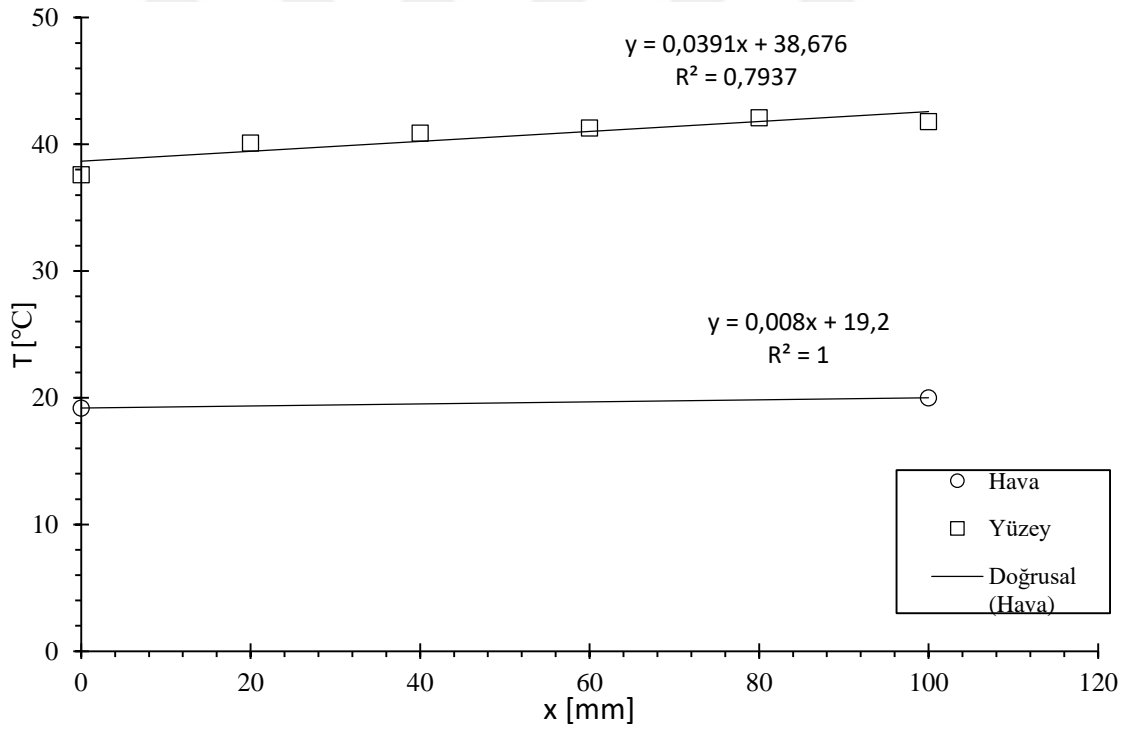
| | | | |
|-----------------------------|------------|--------|-----------|
| u_m [m/s] | 10.18 | Re_dh | 30353.987 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.02740965 | ReK | 118.41 |
| T_{m_air} | 19.15 | Nu | 1.68 |
| c_p | 1014.8 | NuD | 430.19453 |
| ρ (kg/m ³) | 1.077 | NuD | 77.137968 |
| μ (kg/ms) | 0.00001806 | h | 40.111743 |
| k (W/mK) | 0.026 | Ts_ort | 39.7 |
| Pr | 0.707 | Tm | 19.175 |



EK - 4.15. Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 16

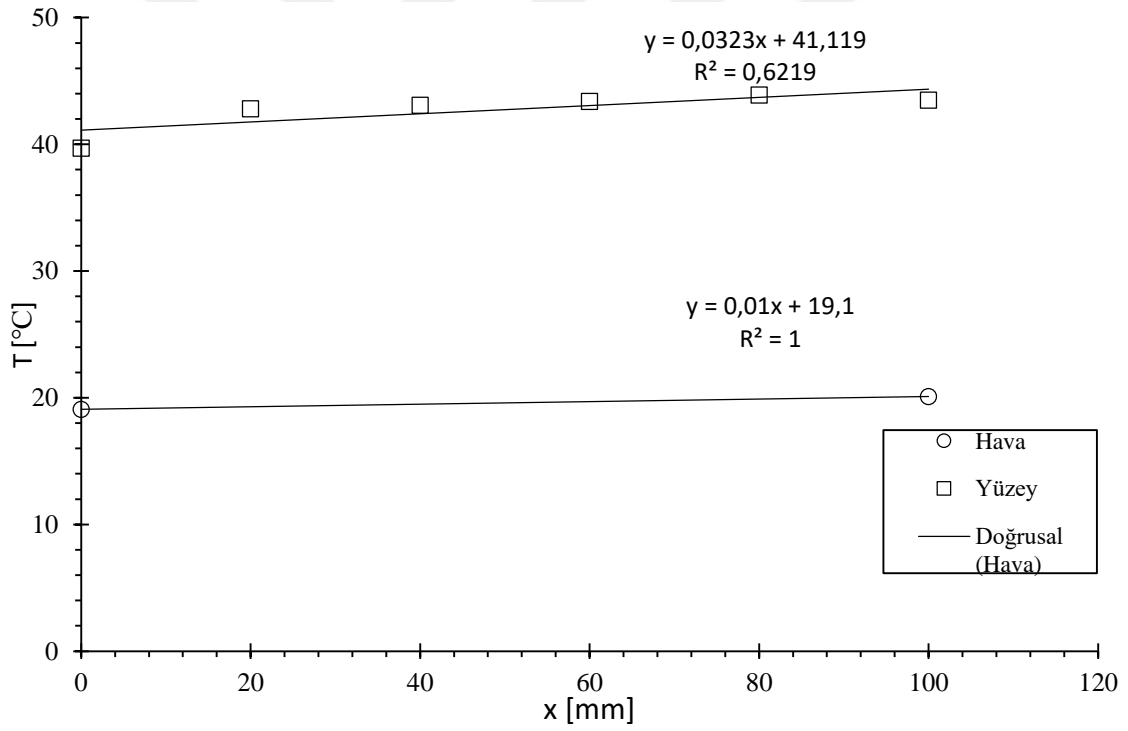
| | | | |
|-----------------------------|------------|---------------|-----------|
| u_m [m/s] | 9.71 | Re_{dh} | 28866.842 |
| P_{air} | 92800 | Re_K | 135.63 |
| $T_{m_{air}}$ | 19.5 | Nu | 1.97 |
| c_p | 1015.2 | Nu_D | 420.1661 |
| ρ (kg/m ³) | 1.075 | Nu_D | 74.099456 |
| μ (kg/ms) | 0.00001808 | h | 38.531717 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | $T_{s_{ort}}$ | 40.633333 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.02609563 | T_m | 19.6 |



EK - 4.16. Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 17

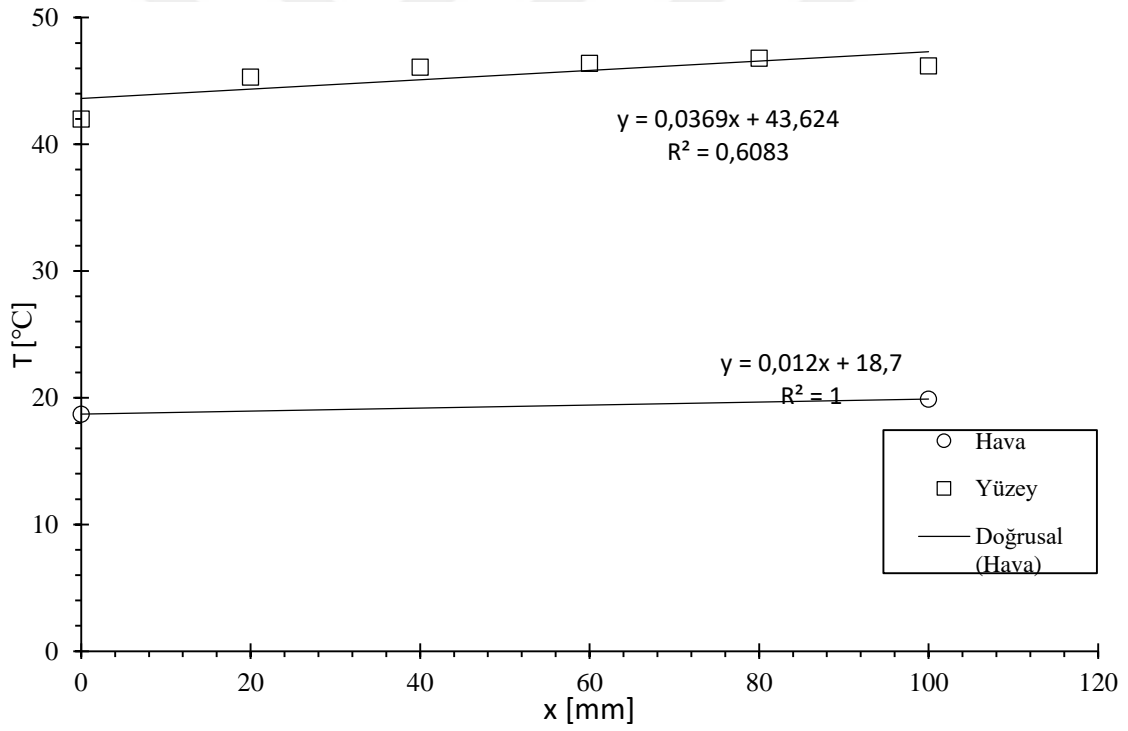
| | | | |
|-----------------------------|------------|---------------|-----------|
| u_m [m/s] | 8.54 | Re_{dh} | 25350.912 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 119.11 |
| $T_{m_{air}}$ | 19.6 | Nu | 1.79 |
| c_p | 1015.4 | NuD | 381.74259 |
| ρ (kg/m ³) | 1.074 | NuD | 66.786775 |
| μ (kg/ms) | 0.00001809 | h | 34.729123 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | $T_{s_{ort}}$ | 42.733333 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0229299 | T_m | 19.6 |



EK - 4.17. Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 18

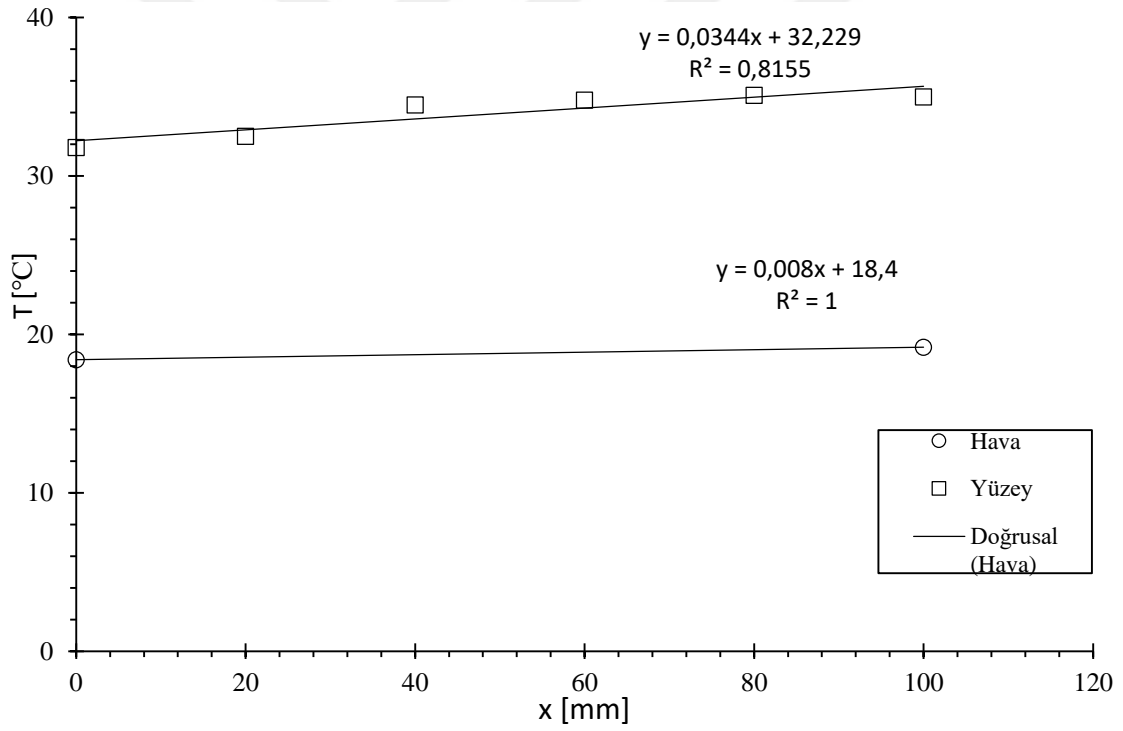
| | | | |
|-----------------------------|------------|------------|-----------|
| u_m [m/s] | 7.11 | Re_{dh} | 21137.306 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 99.31 |
| $T_{m_{air}}$ | 19.3 | Nu | 1.59 |
| c_p | 1015.2 | NuD | 338.64401 |
| ρ (kg/m ³) | 1.075 | NuD | 57.747783 |
| μ (kg/ms) | 0.00001808 | h | 30.028847 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_{ort} | 45.466667 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.01910813 | T_m | 19.3 |



EK - 4.18. Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 19

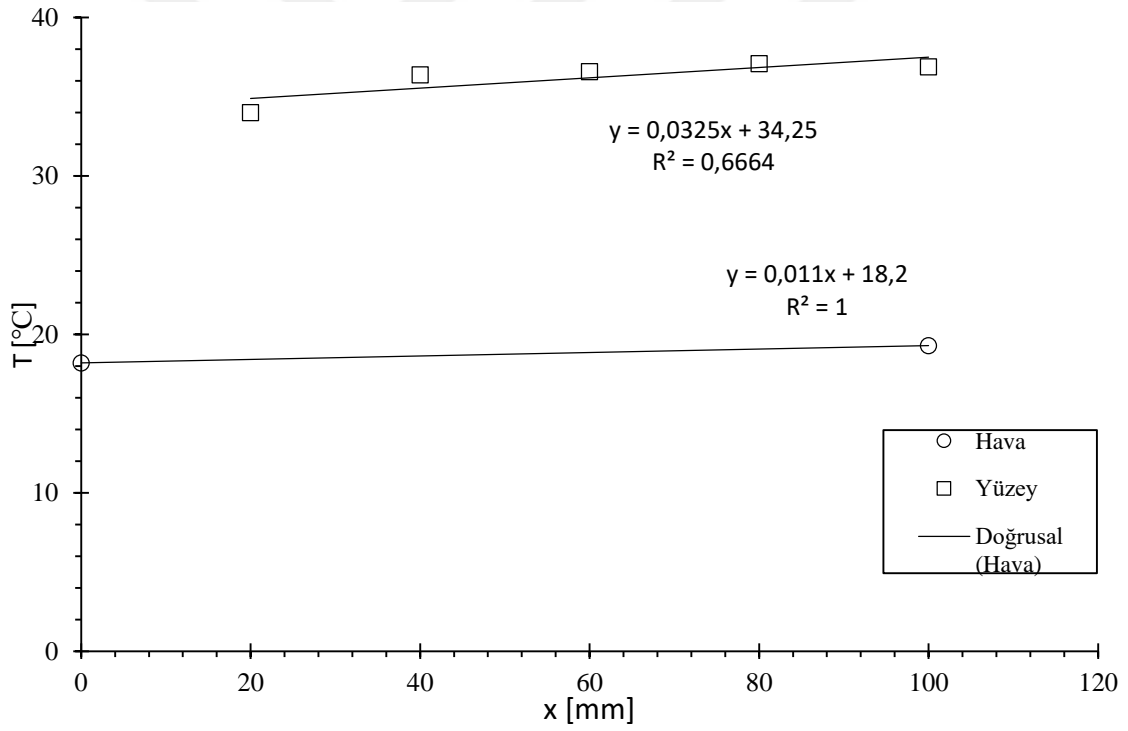
| | | | |
|-----------------------------|------------|------------|-----------|
| u_m [m/s] | 4.27 | Re_{dh} | 12750.859 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 59.91 |
| $T_{m_{air}}$ | 18.7 | Nu | 1.14 |
| c_p | 1014.8 | NuD | 242.037 |
| ρ (kg/m ³) | 1.078 | NuD | 38.54137 |
| μ (kg/ms) | 0.00001805 | h | 20.041512 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_{ort} | 33.95 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.01150765 | T_m | 18.8 |



EK - 4.19. Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 20

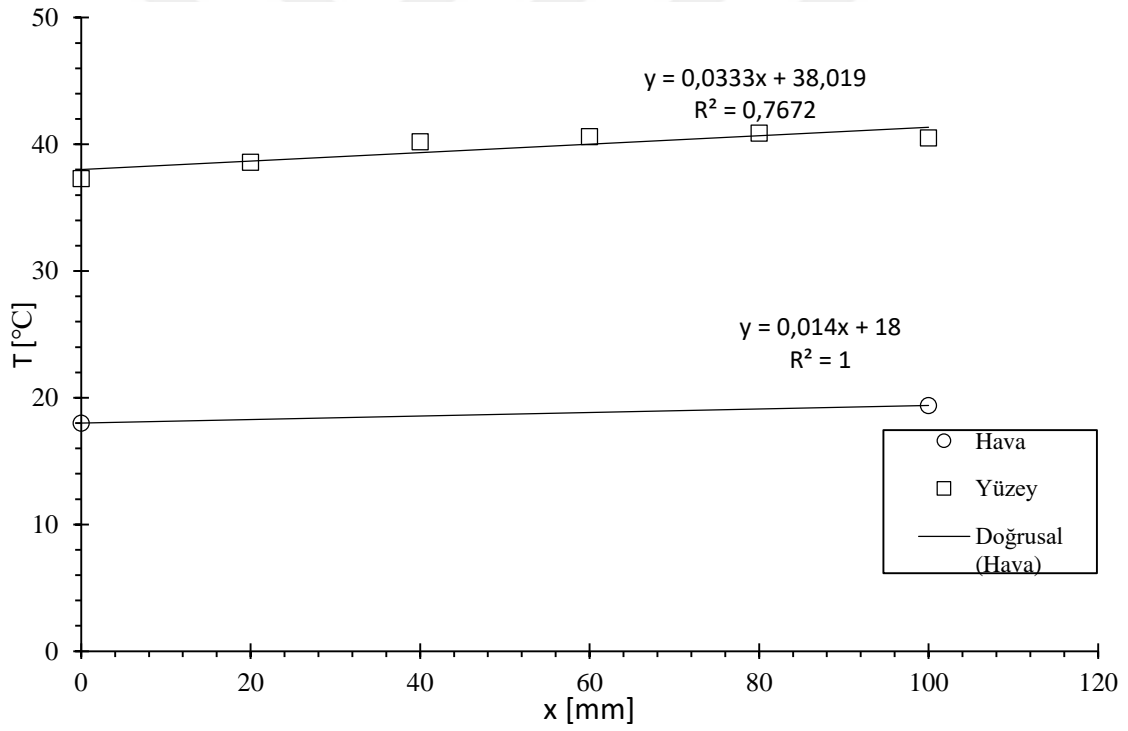
| | | | |
|-----------------------------|------------|------------|-----------|
| u_m [m/s] | 3.32 | Re_{dh} | 9870.0221 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 46.37 |
| $T_{m_{air}}$ | 18.75 | Nu | 1.02 |
| c_p | 1015.2 | NuD | 216.36815 |
| ρ (kg/m ³) | 1.075 | NuD | 31.401479 |
| μ (kg/ms) | 0.00001808 | h | 16.328769 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_{ort} | 35.7 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0089225 | T_m | 18.75 |



EK - 4.20. Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 21

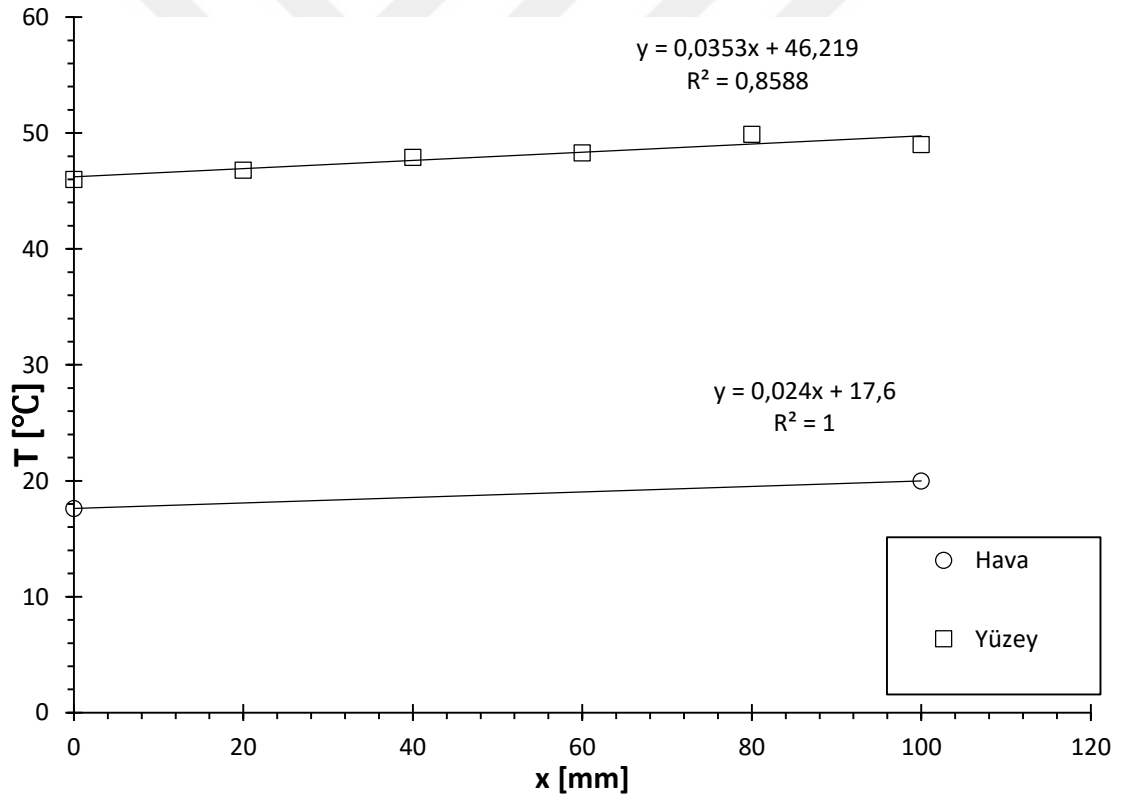
| | | | |
|-----------------------------|------------|------------|-----------|
| u_m [m/s] | 2.5 | Re_{dh} | 7432.2456 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 34.92 |
| T_{m_air} | 18.7 | Nu | 0.83 |
| c_p | 1015.2 | NuD | 175.59947 |
| ρ (kg/m ³) | 1.075 | NuD | 25.026012 |
| μ (kg/ms) | 0.00001808 | h | 13.013526 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_{ort} | 39.683333 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.00671875 | T_m | 18.7 |



EK - 4.21. Sıcaklık konum ilişkisi

Deney 22

| | | | |
|-----------------------------|------------|------------------|-----------|
| u_m [m/s] | 1.32 | Re _{dh} | 3924.2257 |
| P _{air} | 92800 | ReK | 18.44 |
| T _{m,air} | 18.8 | Nu | 0.59 |
| c _p | 1015.2 | NuD | 125.88767 |
| ρ (kg/m ³) | 1.075 | NuD | 15.014082 |
| μ (kg/ms) | 0.00001808 | h | 7.8073226 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_ort | 47.983333 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0035475 | Tm | 18.8 |

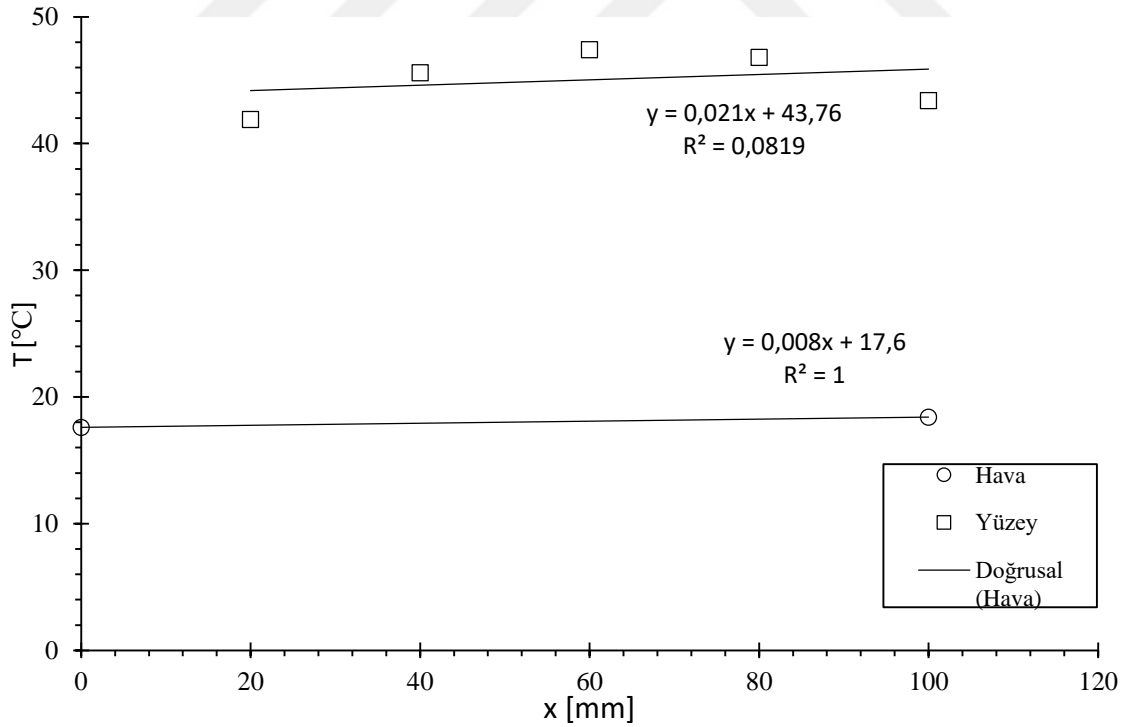


EK - 4.22. Sıcaklık konum ilişkisi

EK - 5. ABS Malzemeli Gözenekli Ortamda Isı Geçişi Deneş Sonuçları

Deneş 1

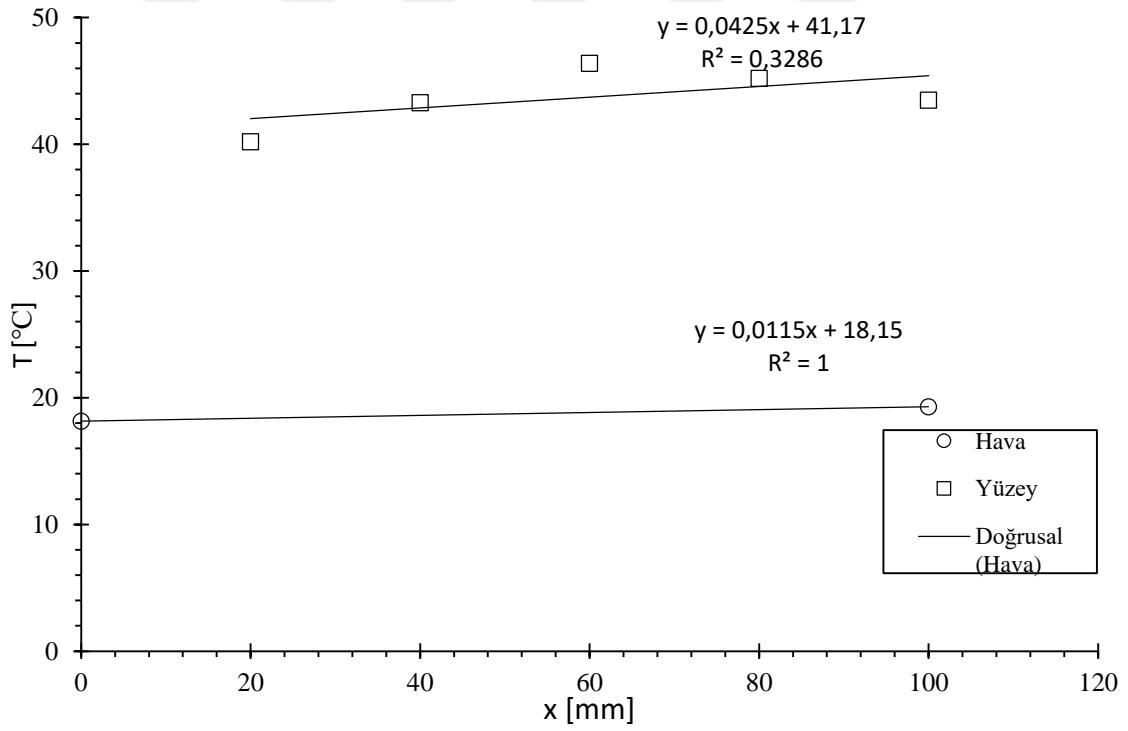
| | | | |
|-----------------------------|------------|-------|-----------|
| u_m [m/s] | 3.57 | Re_dh | 10735.87 |
| P_{air} | 90800 | ReK | 37.03 |
| $T_{m,air}$ | 17.2 | Nu | 0.57 |
| c_p | 1005.8 | NuD | 166.23721 |
| ρ (kg/m ³) | 1.079 | NuD | 33.586549 |
| μ (kg/ms) | 0.00001794 | h | 17.465005 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | | |
| \dot{m} (kg/s) | 0.00963008 | | |



EK - 5.1. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 2

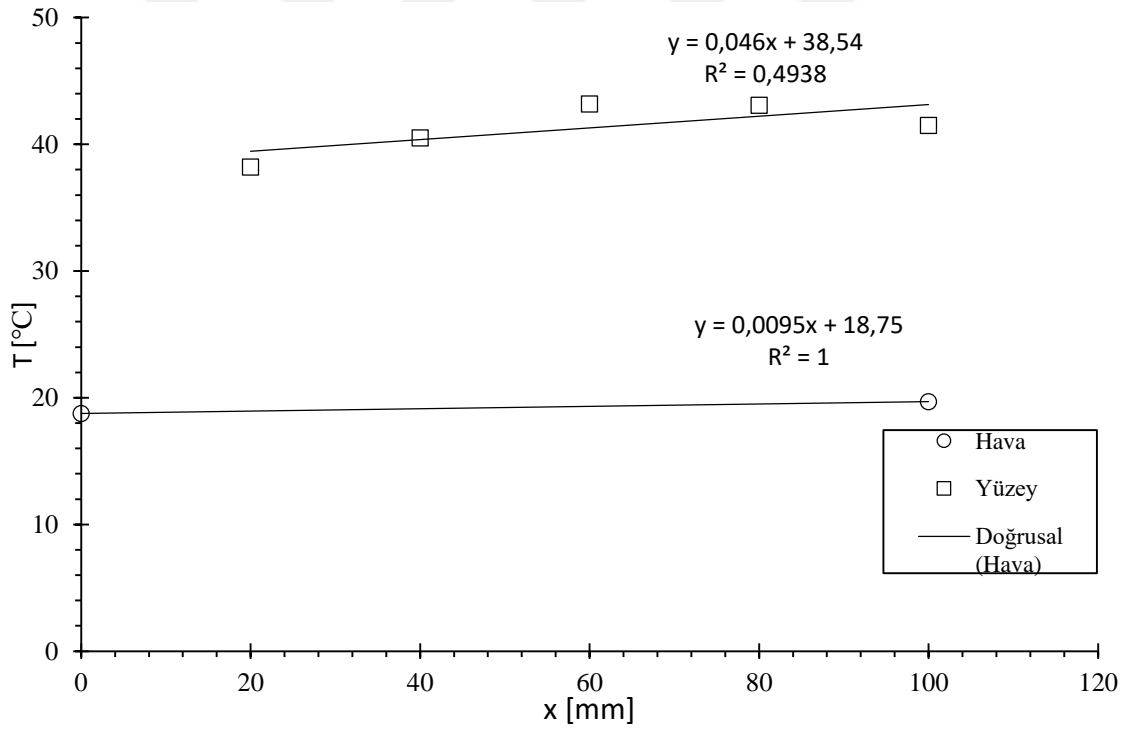
| | | | |
|-----------------------------|------------|-------|-----------|
| u_m [m/s] | 4.18 | Re_dh | 12451.805 |
| P_{air} | 90800 | ReK | 42.95 |
| T_{m_air} | 17.8 | Nu | 0.65 |
| c_p | 1005.9 | NuD | 189.23625 |
| ρ (kg/m ³) | 1.073 | NuD | 37.816509 |
| μ (kg/ms) | 0.00001801 | h | 19.664585 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | | |
| \dot{m} (kg/s) | 0.01121285 | | |



EK - 5.2. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 3

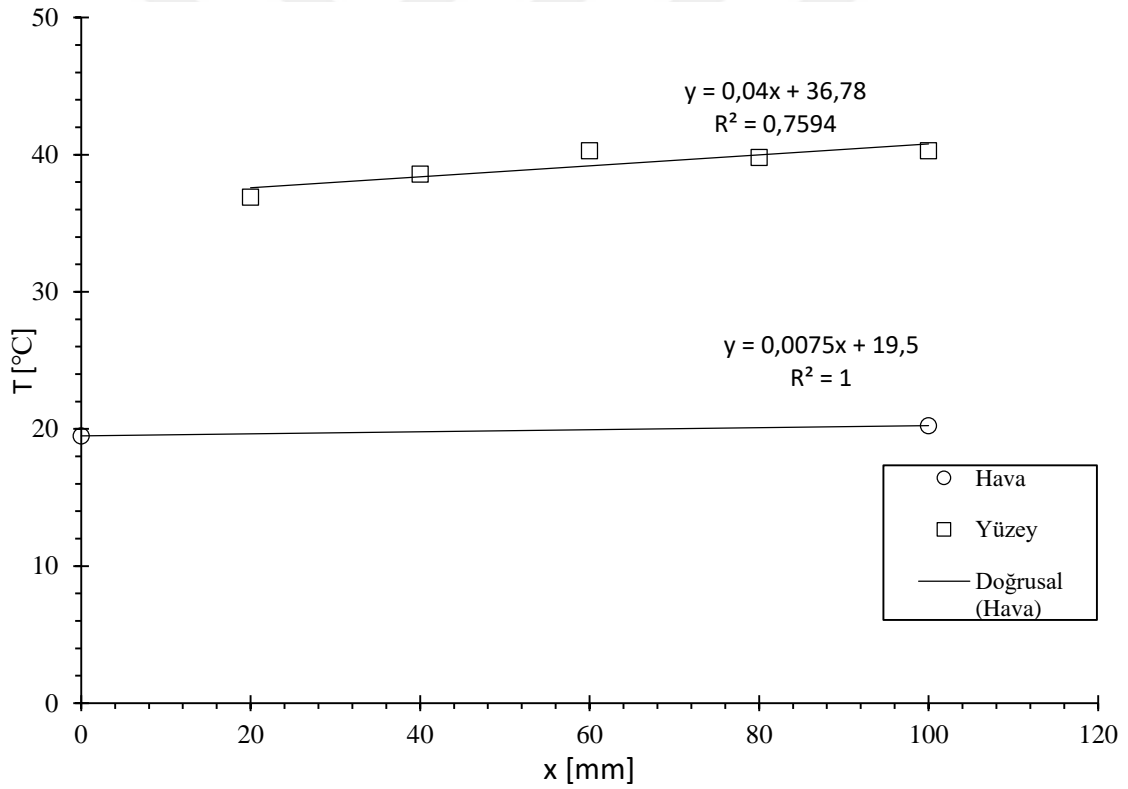
| | | | |
|-----------------------------|------------|-----------|-----------|
| u_m [m/s] | 4.84 | Re_{dh} | 14361.62 |
| P_{air} | 90800 | ReK | 49.54 |
| $T_{m_{air}}$ | 18.3 | Nu | 0.70 |
| c_p | 1015.4 | NuD | 203.03064 |
| ρ (kg/m ³) | 1.07 | NuD | 42.389504 |
| μ (kg/ms) | 0.00001803 | h | 22.042542 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | | |
| \dot{m} (kg/s) | 0.012947 | | |



EK - 5.3. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 4

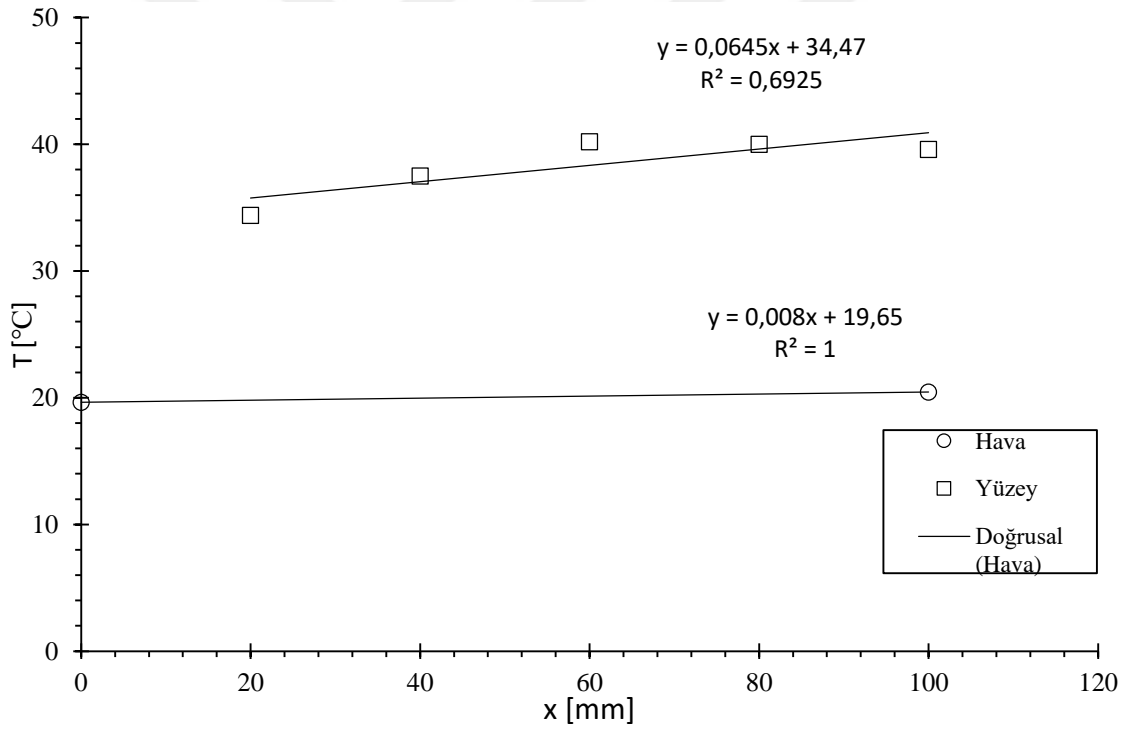
| | | | |
|-----------------------------|------------|------------|-----------|
| u_m [m/s] | 5.75 | Re_{dh} | 16960.432 |
| P_{air} | 90800 | ReK | 58.51 |
| $T_{m_{air}}$ | 19 | Nu | 0.80 |
| c_p | 1015.9 | NuD | 231.83452 |
| ρ (kg/m ³) | 1.066 | NuD | 48.422267 |
| μ (kg/ms) | 0.00001807 | h | 25.179579 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_{ort} | 38.433333 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.01532375 | T_m | 19.875 |



EK - 5.4. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 5

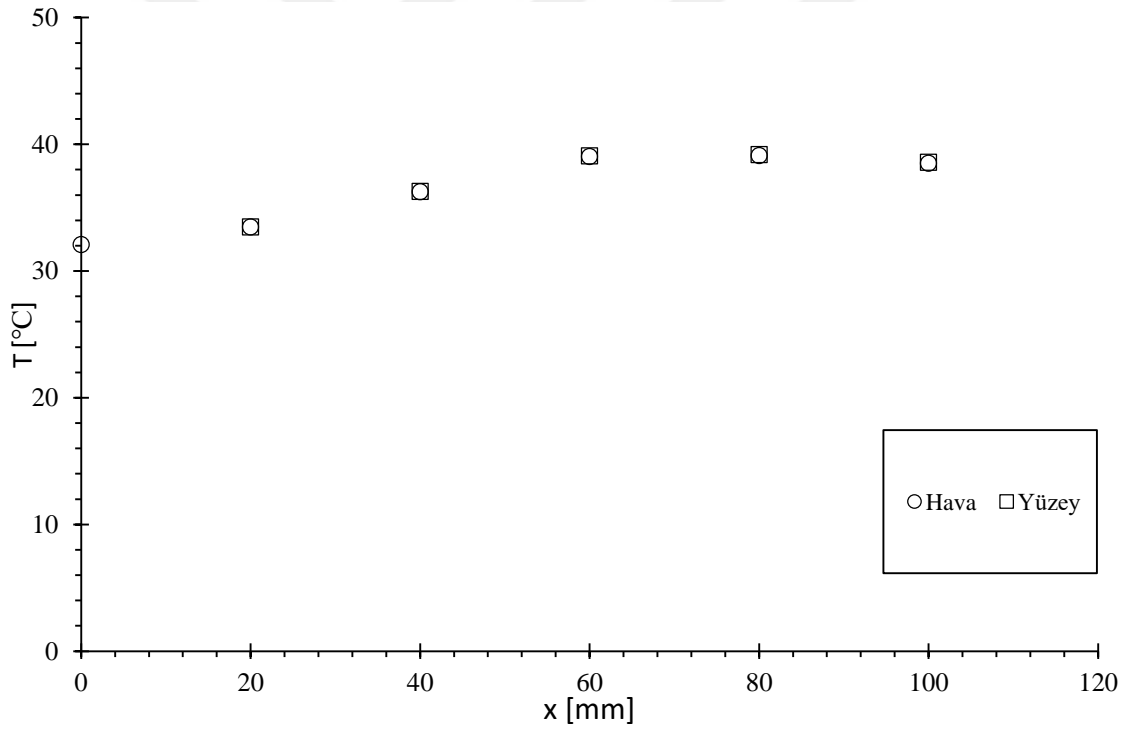
| | | | |
|-----------------------------|------------|---------------|-----------|
| u_m [m/s] | 6.17 | Re_{dh} | 18485.992 |
| P_{air} | 92800 | Re_K | 63.77 |
| $T_{m_{air}}$ | 19.85 | Nu | 0.85 |
| c_p | 1015.9 | Nu_D | 247.31727 |
| ρ (kg/m ³) | 1.078 | Nu_D | 51.876398 |
| μ (kg/ms) | 0.00001799 | h | 26.975727 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | $T_{s_{ort}}$ | 37.433333 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.01662815 | T_m | 20.05 |



EK - 5.5. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 6

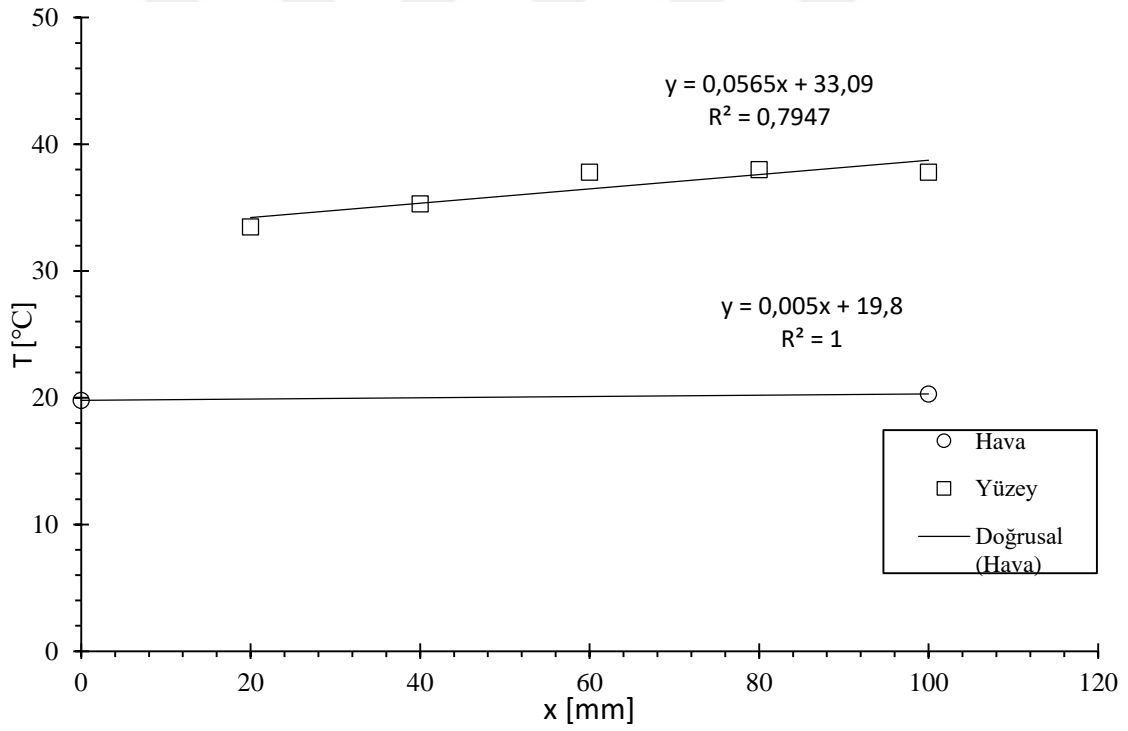
| | | | |
|-----------------------------|-----------|------------|-----------|
| u_m [m/s] | 7.12 | Re_{dh} | 21102.889 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 72.80 |
| $T_{m_{air}}$ | 19.1 | Nu | 0.89 |
| c_p | 1015.9 | NuD | 259.20153 |
| ρ (kg/m ³) | 1.067 | NuD | 57.672547 |
| μ (kg/ms) | 0.000018 | h | 29.989724 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_{ort} | 36.466667 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0189926 | T_m | 19.65 |



EK - 5.6. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 7

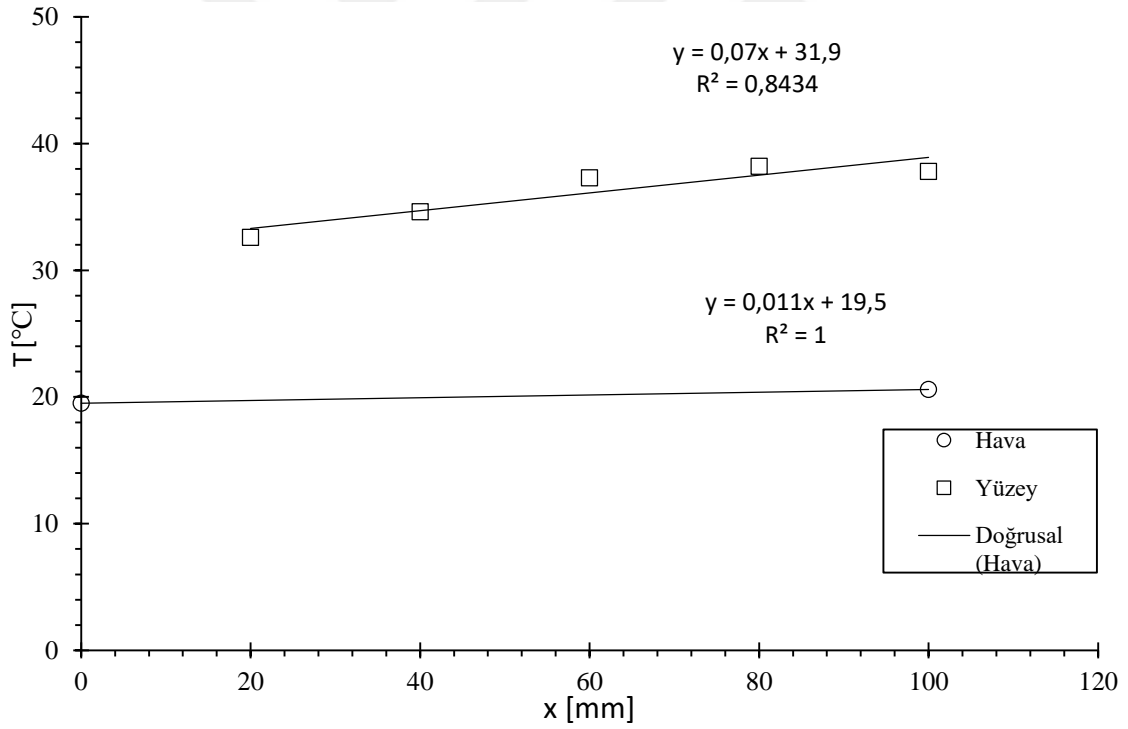
| | | | |
|-----------------------------|----------|------------|-----------|
| u_m [m/s] | 8.2 | Re_{dh} | 24508.889 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 84.55 |
| $T_{m_{air}}$ | 19.1 | Nu | 0.98 |
| c_p | 1015.9 | NuD | 283.39458 |
| ρ (kg/m ³) | 1.076 | NuD | 65.006158 |
| μ (kg/ms) | 0.000018 | h | 33.803202 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_{ort} | 35.75 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.022058 | T_m | 20.05 |



EK - 5.7. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 8

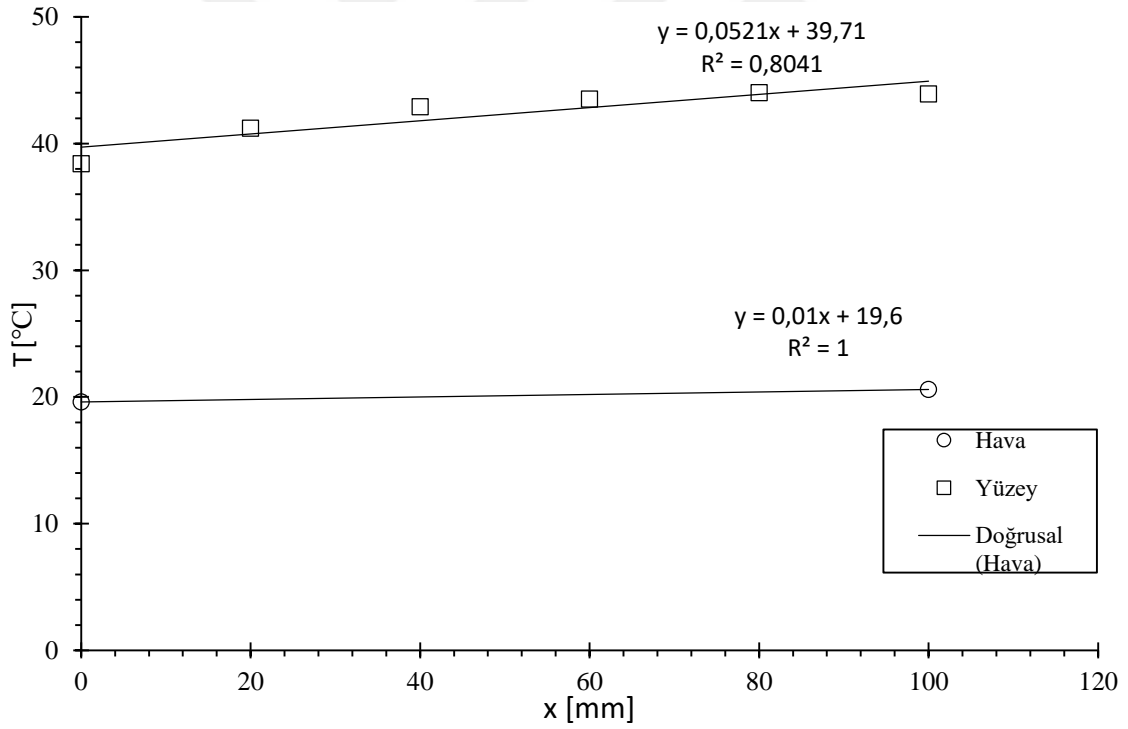
| | | | |
|-----------------------------|-----------|---------------|-----------|
| u_m [m/s] | 8.11 | Re_{dh} | 24239.889 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 83.62 |
| $T_{m_{air}}$ | 19.9 | Nu | 1.01 |
| c_p | 1015.9 | NuD | 292.33884 |
| ρ (kg/m ³) | 1.076 | NuD | 64.434743 |
| μ (kg/ms) | 0.000018 | h | 33.506066 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | $T_{s_{ort}}$ | 35.233333 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0218159 | T_m | 20.05 |



EK - 5.8. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 9

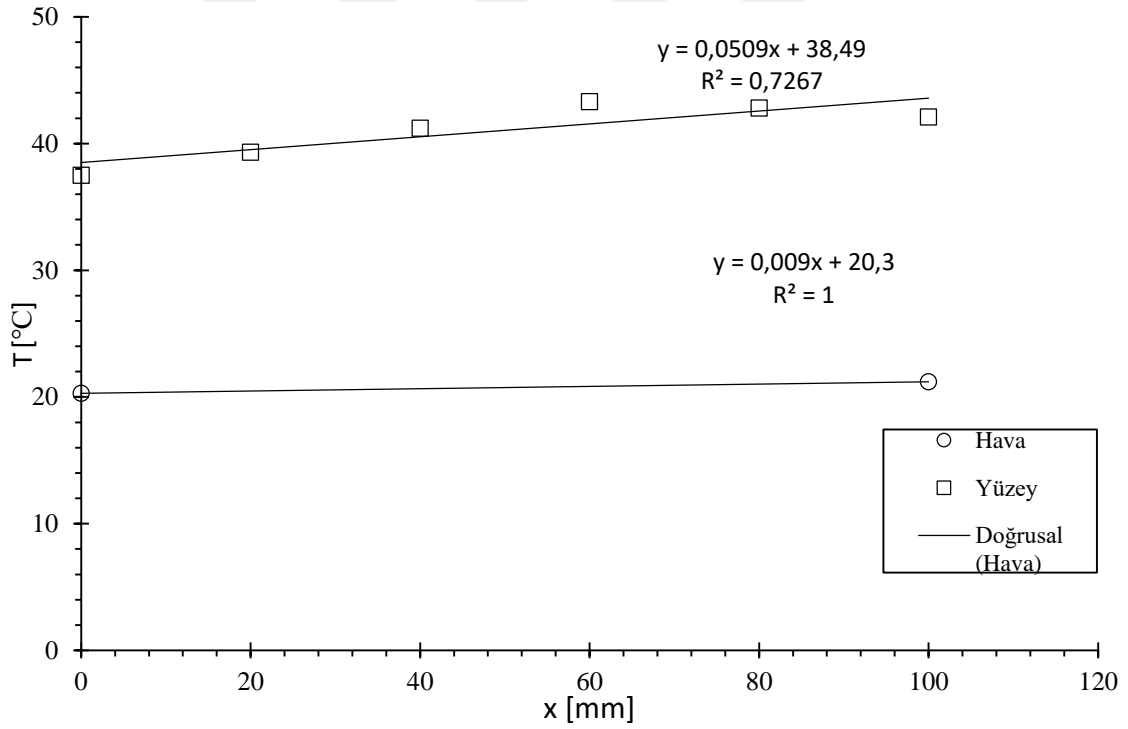
| | | | |
|-----------------------------|------------|--------|-----------|
| u_m [m/s] | 6.34 | Re_dh | 19185.913 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 66.18 |
| T_{m_air} | 19.75 | Nu | 0.90 |
| c_p | 1013.9 | NuD | 260.41125 |
| ρ (kg/m ³) | 1.087 | NuD | 53.441862 |
| μ (kg/ms) | 0.00001796 | h | 27.789768 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_ort | 42.316667 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.01722895 | Tm | 20.1 |



EK - 5.9. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 10

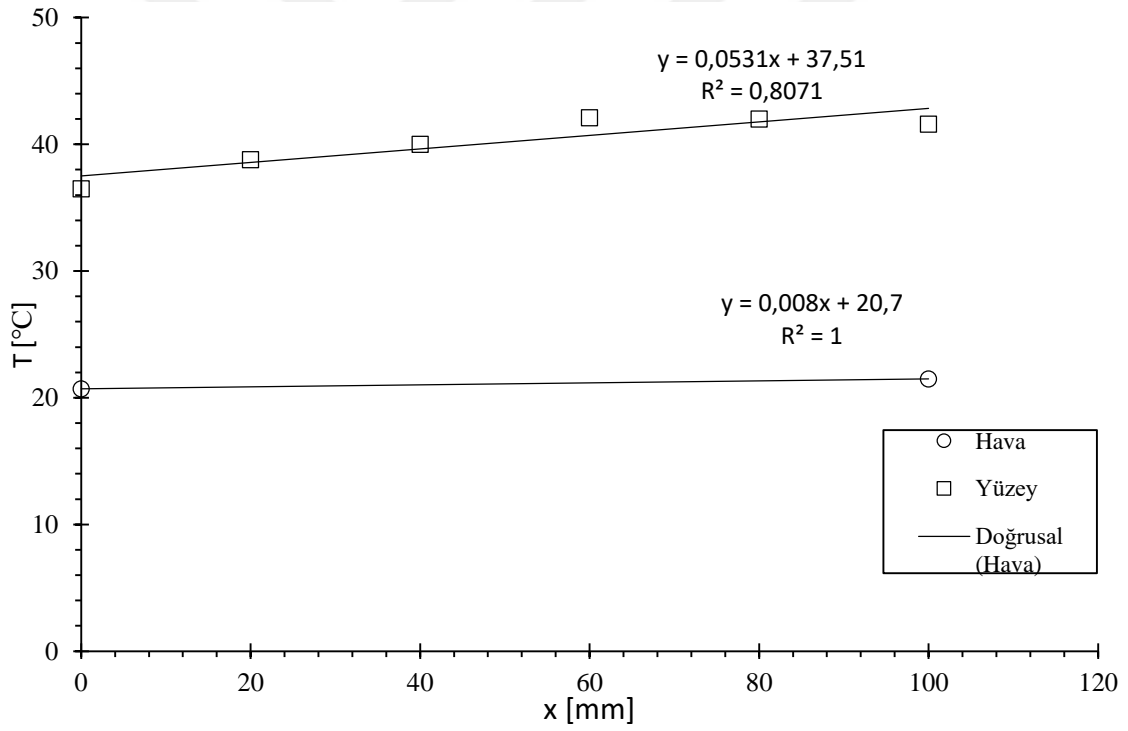
| | | | |
|-----------------------------|------------|------------|-----------|
| u_m [m/s] | 7.66 | Re_{dh} | 23180.457 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 79.96 |
| $T_{m_{air}}$ | 20.65 | Nu | 0.97 |
| c_p | 1013.9 | NuD | 281.18098 |
| ρ (kg/m ³) | 1.087 | NuD | 62.171764 |
| μ (kg/ms) | 0.00001796 | h | 32.329317 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_{ort} | 41.033333 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.02081605 | T_m | 20.75 |



EK - 5.10. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 11

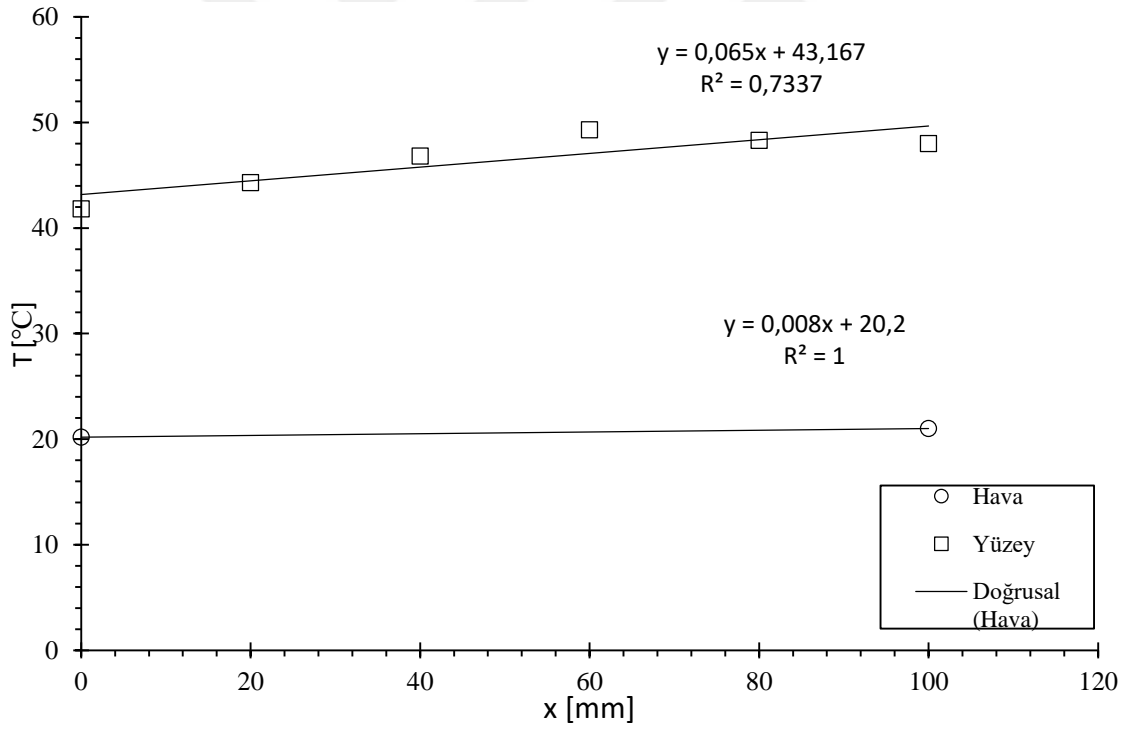
| | | | |
|-----------------------------|------------|------------|-----------|
| u_m [m/s] | 8.28 | Re_{dh} | 24292.562 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 83.80 |
| $T_{m_{air}}$ | 20.9 | Nu | 1.05 |
| c_p | 1015.9 | NuD | 304.771 |
| ρ (kg/m ³) | 1.065 | NuD | 64.546732 |
| μ (kg/ms) | 0.00001815 | h | 33.564301 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_{ort} | 40.166667 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0220455 | T_m | 21.1 |



EK - 5.11. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 12

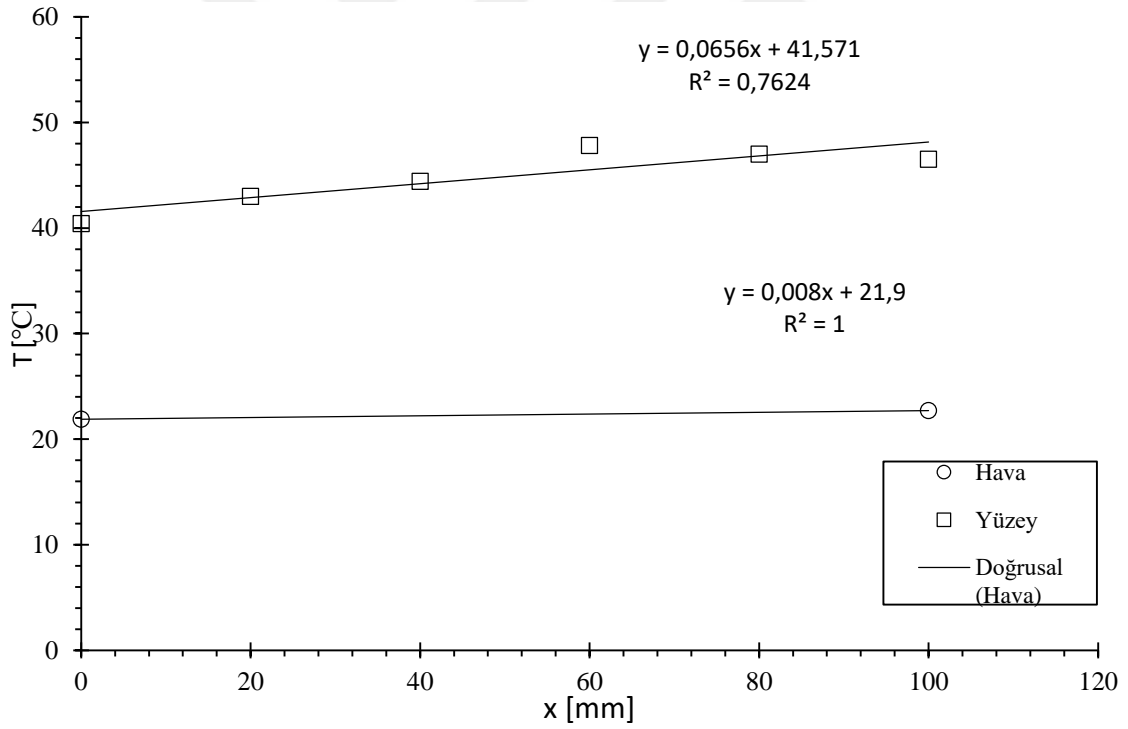
| | | | |
|-----------------------------|------------|------------|-----------|
| u_m [m/s] | 7.78 | Re_{dh} | 23335.683 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 80.50 |
| $T_{m_{air}}$ | 20.5 | Nu | 0.95 |
| c_p | 1014.4 | NuD | 274.17102 |
| ρ (kg/m ³) | 1.081 | NuD | 62.504604 |
| μ (kg/ms) | 0.00001802 | h | 32.502394 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_{ort} | 46.416667 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.02102545 | T_m | 20.6 |



EK - 5.12. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 13

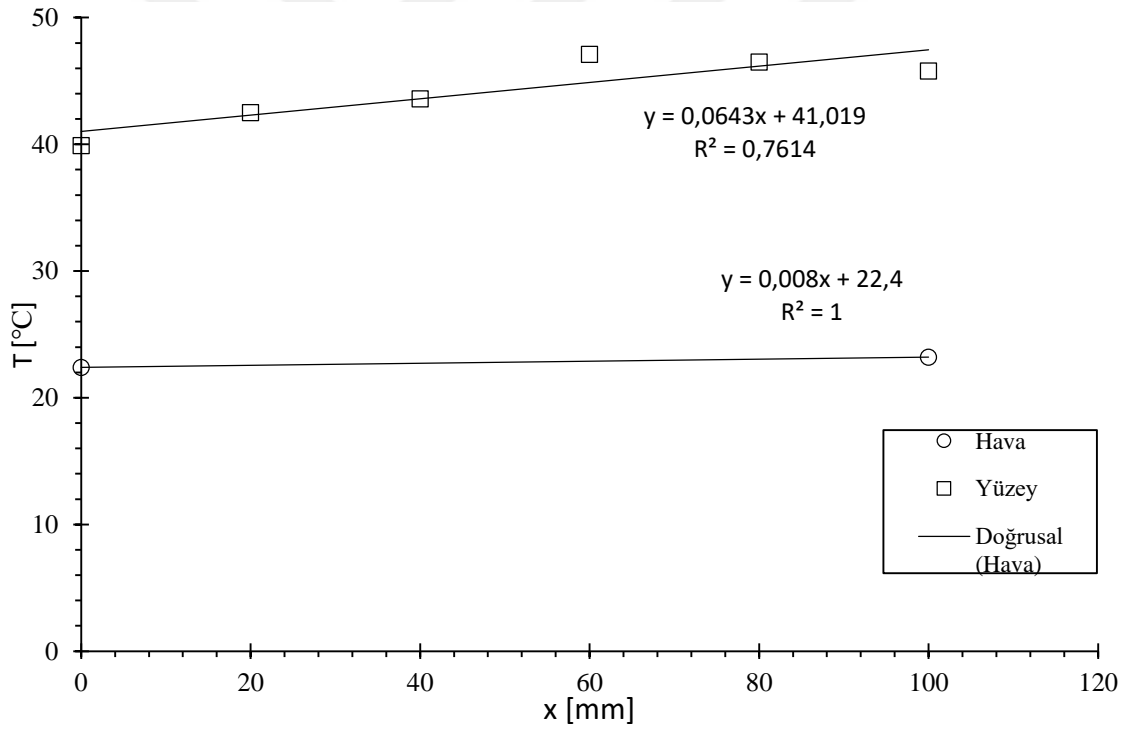
| | | | |
|-----------------------------|------------|------------|-----------|
| u_m [m/s] | 8.56 | Re_{dh} | 25637.271 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 88.44 |
| $T_{m_{air}}$ | 22.25 | Nu | 0.97 |
| c_p | 1015.9 | NuD | 280.08397 |
| ρ (kg/m ³) | 1.08 | NuD | 67.389625 |
| μ (kg/ms) | 0.00001803 | h | 35.042605 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_{ort} | 44.85 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.023112 | T_m | 22.3 |



EK - 5.13. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 14

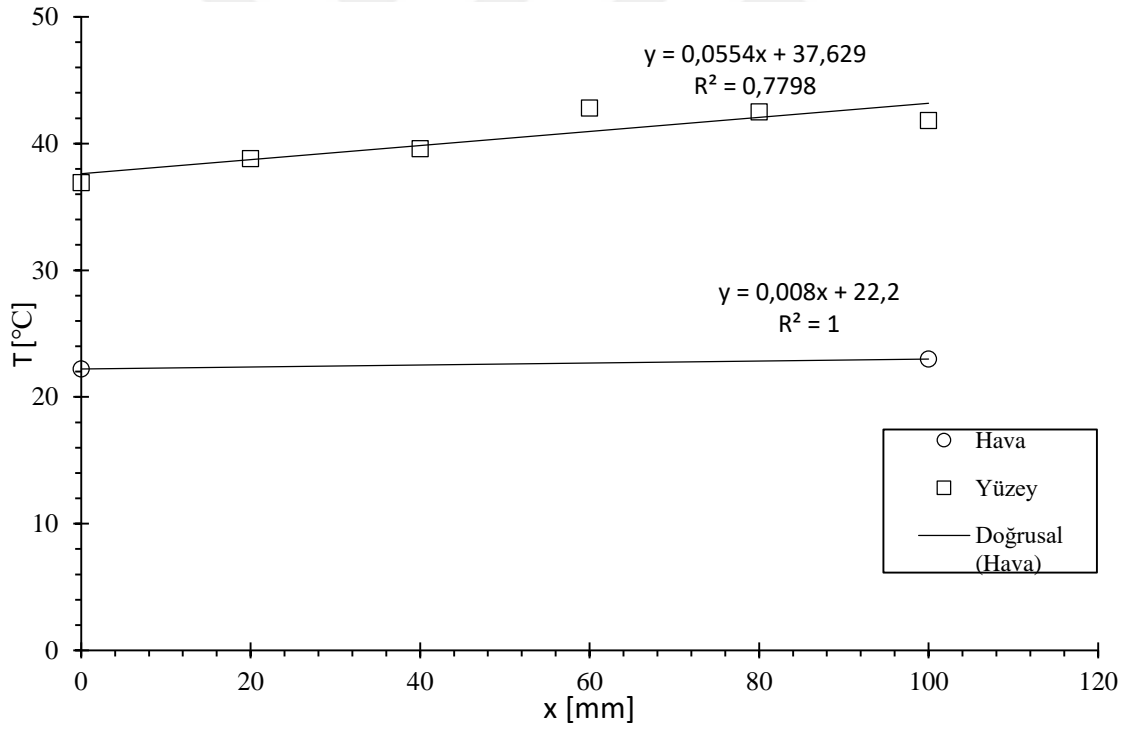
| | | | |
|-----------------------------|------------|--------|-----------|
| u_m [m/s] | 9.52 | Re_dh | 28428.144 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 98.07 |
| T_{m_air} | 22.6 | Nu | 1.12 |
| c_p | 1014.8 | NuD | 325.70025 |
| ρ (kg/m ³) | 1.078 | NuD | 73.19719 |
| μ (kg/ms) | 0.00001805 | h | 38.062539 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_ort | 44.233333 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0256564 | Tm | 22.8 |



EK - 5.14. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 15

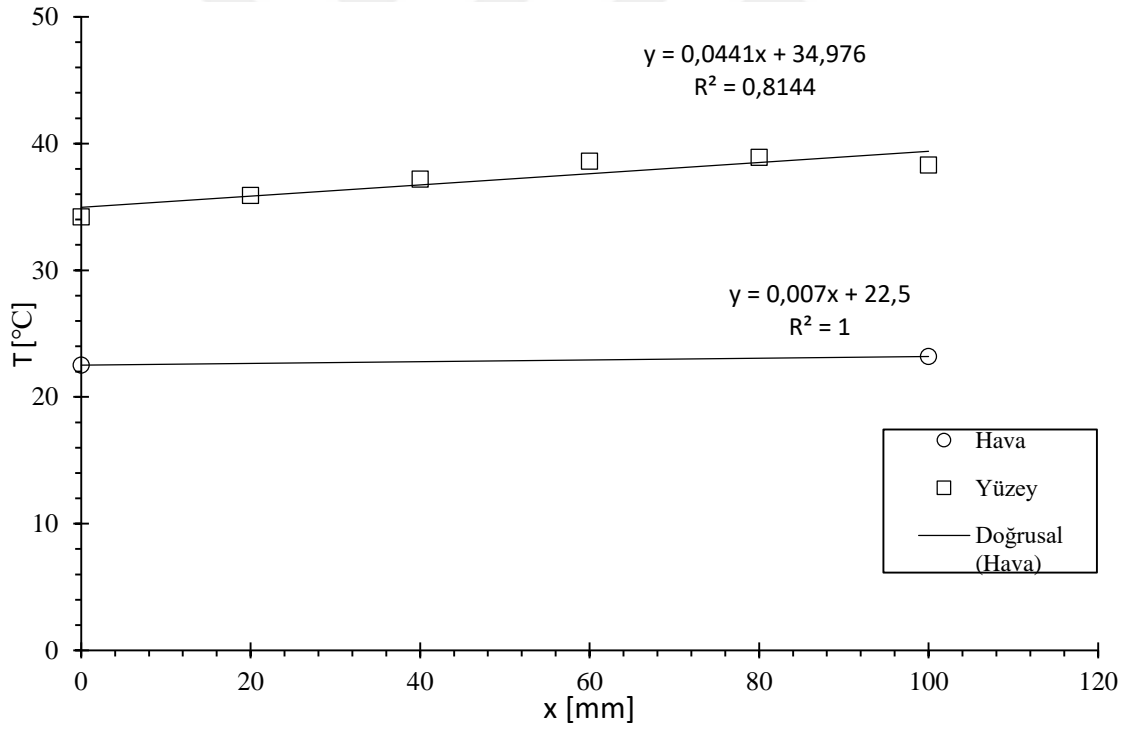
| | | | |
|-----------------------------|------------|------------|-----------|
| u_m [m/s] | 9.56 | Re_{dh} | 28505.316 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 98.33 |
| $T_{m_{air}}$ | 22.5 | Nu | 1.13 |
| c_p | 1014.8 | NuD | 327.12958 |
| ρ (kg/m ³) | 1.077 | NuD | 73.356109 |
| μ (kg/ms) | 0.00001806 | h | 38.145176 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_{ort} | 40.4 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0257403 | T_m | 22.6 |



EK - 5.15. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 16

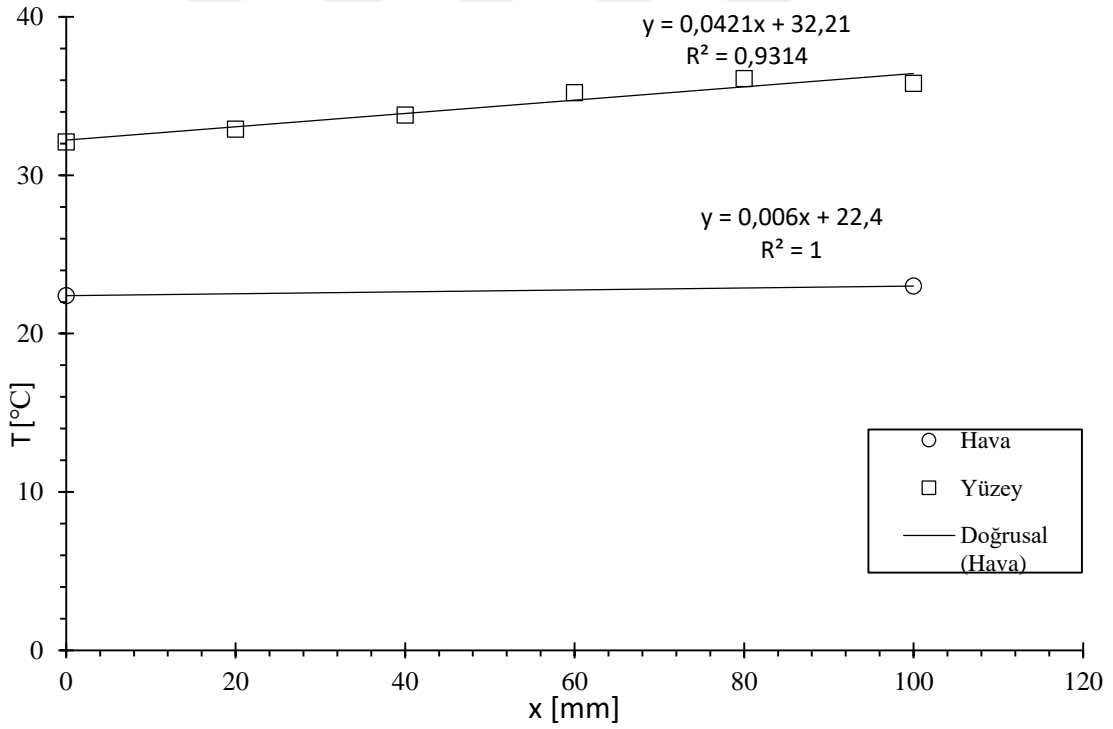
| | | | |
|-----------------------------|------------|------------|-----------|
| u_m [m/s] | 9.34 | Re_{dh} | 27766.869 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 95.79 |
| $T_{m_{air}}$ | 22.85 | Nu | 1.08 |
| c_p | 1015.2 | NuD | 314.16428 |
| ρ (kg/m ³) | 1.075 | NuD | 71.831864 |
| μ (kg/ms) | 0.00001808 | h | 37.352569 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_{ort} | 37.183333 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.02510125 | T_m | 22.85 |



EK - 5. 16. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 17

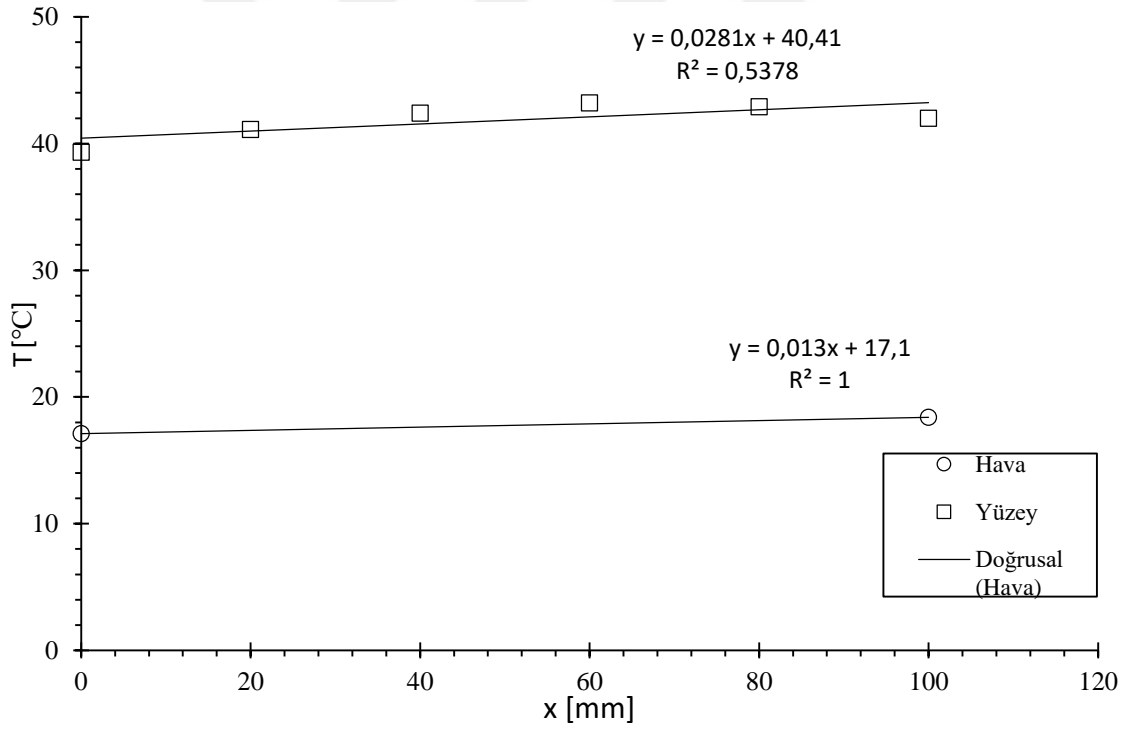
| | | | |
|-----------------------------|------------|------------|-----------|
| u_m [m/s] | 9.05 | Re_{dh} | 26864.842 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 92.67 |
| $T_{m_{air}}$ | 22.7 | Nu | 1.06 |
| c_p | 1015.4 | NuD | 307.64148 |
| ρ (kg/m ³) | 1.074 | NuD | 69.958911 |
| μ (kg/ms) | 0.00001809 | h | 36.378634 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_{ort} | 34.316667 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.02429925 | T_m | 22.7 |



EK - 5. 17. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 18

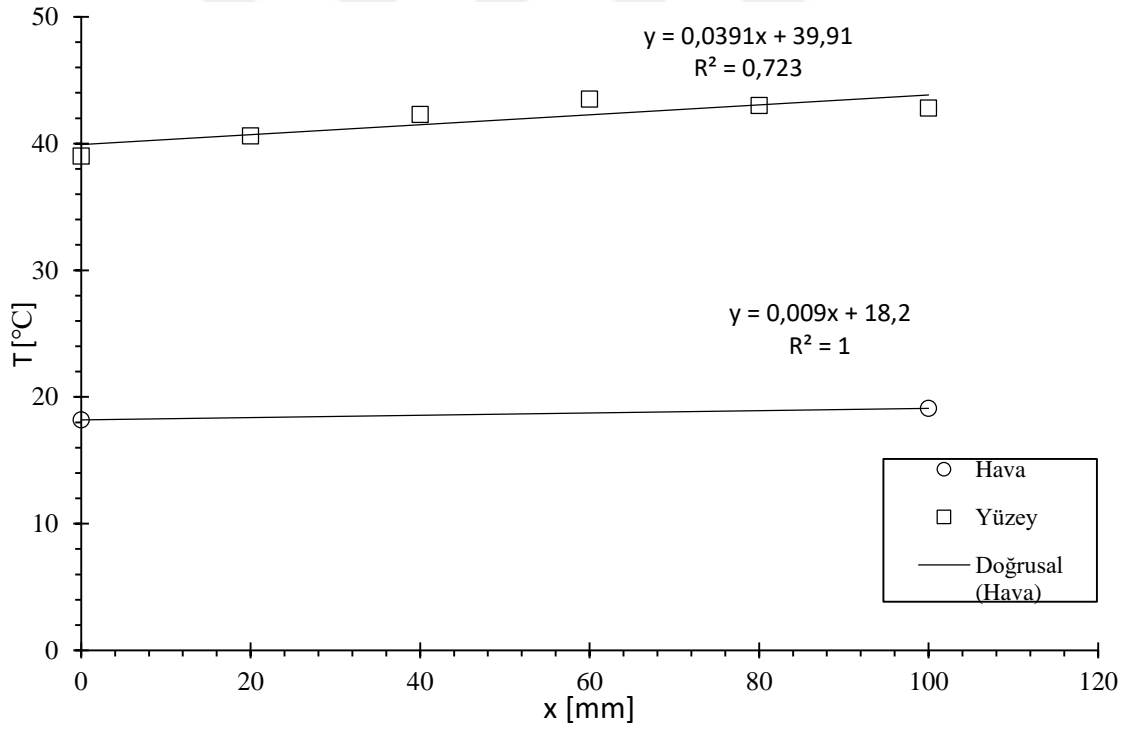
| | | | |
|-----------------------------|------------|---------------|-----------|
| u_m [m/s] | 2.21 | Re_{dh} | 6570.1051 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 22.66 |
| $T_{m_{air}}$ | 17.65 | Nu | 0.50 |
| c_p | 1015.2 | NuD | 144.68216 |
| ρ (kg/m ³) | 1.075 | NuD | 22.675322 |
| μ (kg/ms) | 0.00001808 | h | 11.791167 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | $T_{s_{ort}}$ | 41.816667 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.00593938 | T_m | 17.75 |



EK - 5.18. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 19

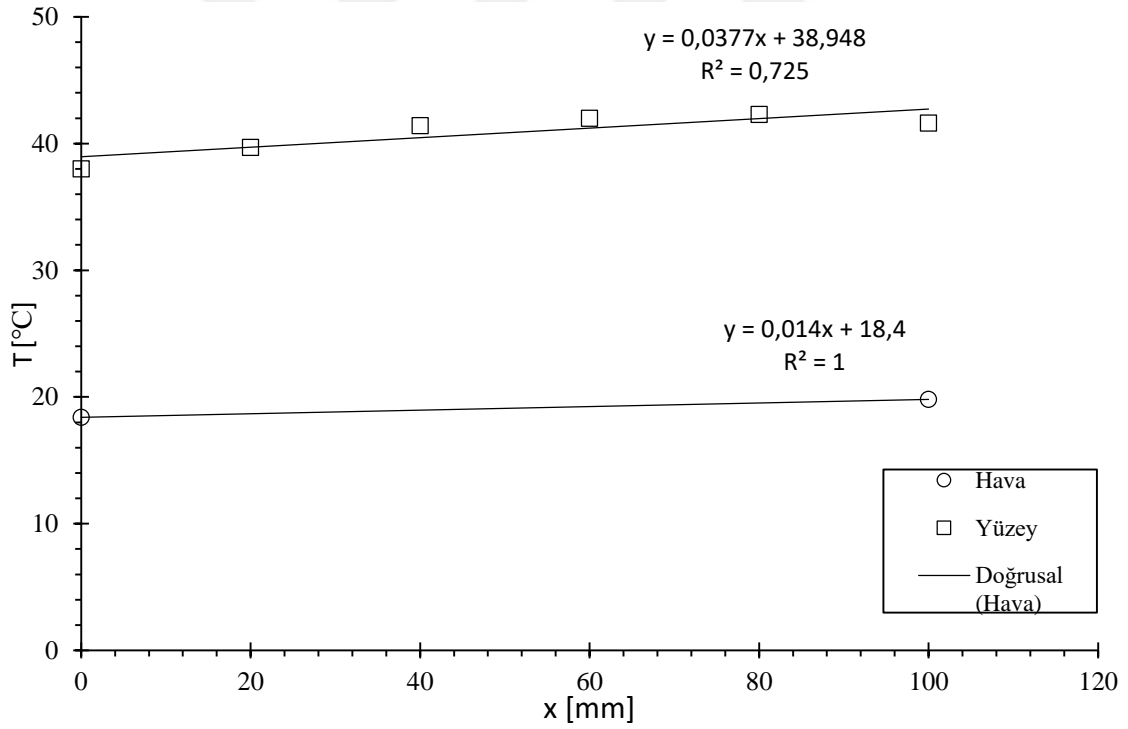
| | | | |
|-----------------------------|------------|------------|-----------|
| u_m [m/s] | 2.47 | Re_{dh} | 7375.7895 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 25.44 |
| $T_{m_{air}}$ | 18.45 | Nu | 0.51 |
| c_p | 1014.8 | NuD | 147.99628 |
| ρ (kg/m ³) | 1.078 | NuD | 24.873816 |
| μ (kg/ms) | 0.00001805 | h | 12.934384 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_{ort} | 41.866667 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.00665665 | T_m | 18.65 |



EK - 5.19. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 20

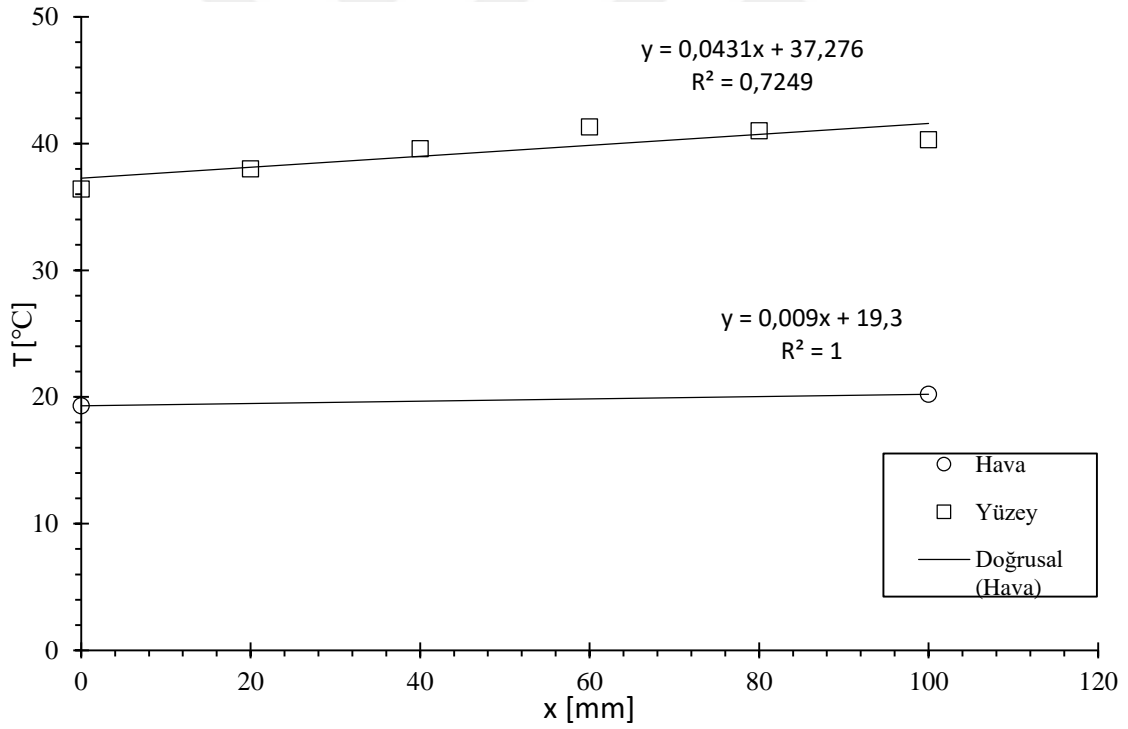
| | | | |
|-----------------------------|------------|------------|-----------|
| u_m [m/s] | 2.78 | Re_{dh} | 8264.6571 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 28.51 |
| $T_{m_{air}}$ | 19.1 | Nu | 0.57 |
| c_p | 1015.2 | NuD | 164.17083 |
| ρ (kg/m ³) | 1.075 | NuD | 27.244289 |
| μ (kg/ms) | 0.00001808 | h | 14.16703 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_{ort} | 40.833333 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.00747125 | T_m | 19.1 |



EK - 5.20. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 21

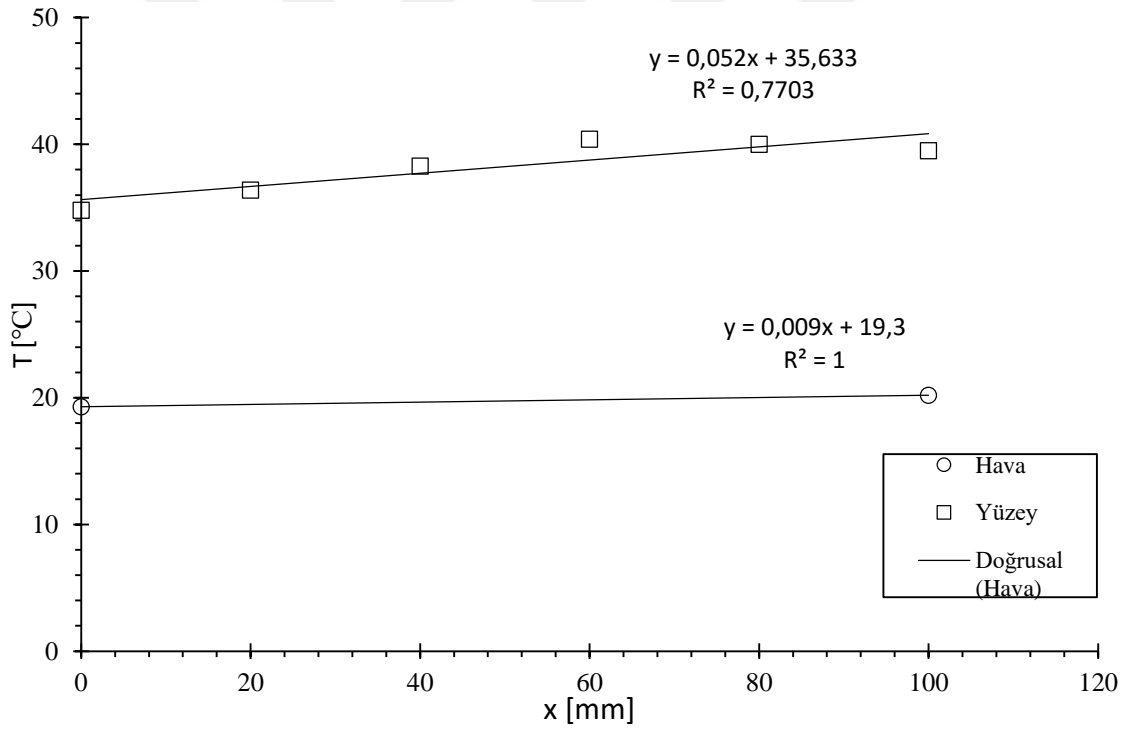
| | | | |
|-----------------------------|------------|--------|-----------|
| u_m [m/s] | 3.32 | Re_dh | 9870.0221 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 34.05 |
| T_{m_air} | 19.35 | Nu | 0.60 |
| c_p | 1015.2 | NuD | 174.87181 |
| ρ (kg/m ³) | 1.075 | NuD | 31.401479 |
| μ (kg/ms) | 0.00001808 | h | 16.328769 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_ort | 39.433333 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.0089225 | Tm | 19.75 |



EK - 5.21. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 22

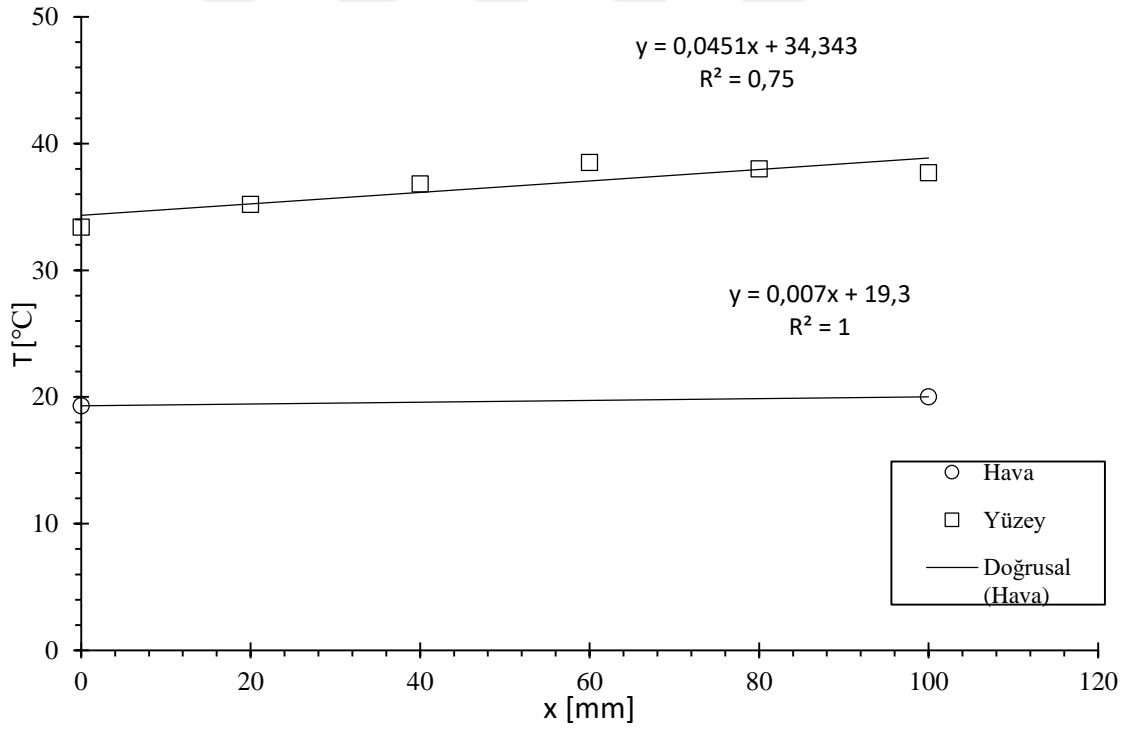
| | | | |
|-----------------------------|------------|---------------|-----------|
| u_m [m/s] | 3.87 | Re_{dh} | 11505.116 |
| P_{air} | 92800 | Re_K | 39.69 |
| $T_{m_{air}}$ | 19.4 | Nu | 0.64 |
| c_p | 1015.2 | NuD | 185.84956 |
| ρ (kg/m ³) | 1.075 | NuD | 35.49837 |
| μ (kg/ms) | 0.00001808 | h | 18.459152 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | $T_{s_{ort}}$ | 38.233333 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.01040063 | T_m | 19.75 |



EK - 5.22. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 23

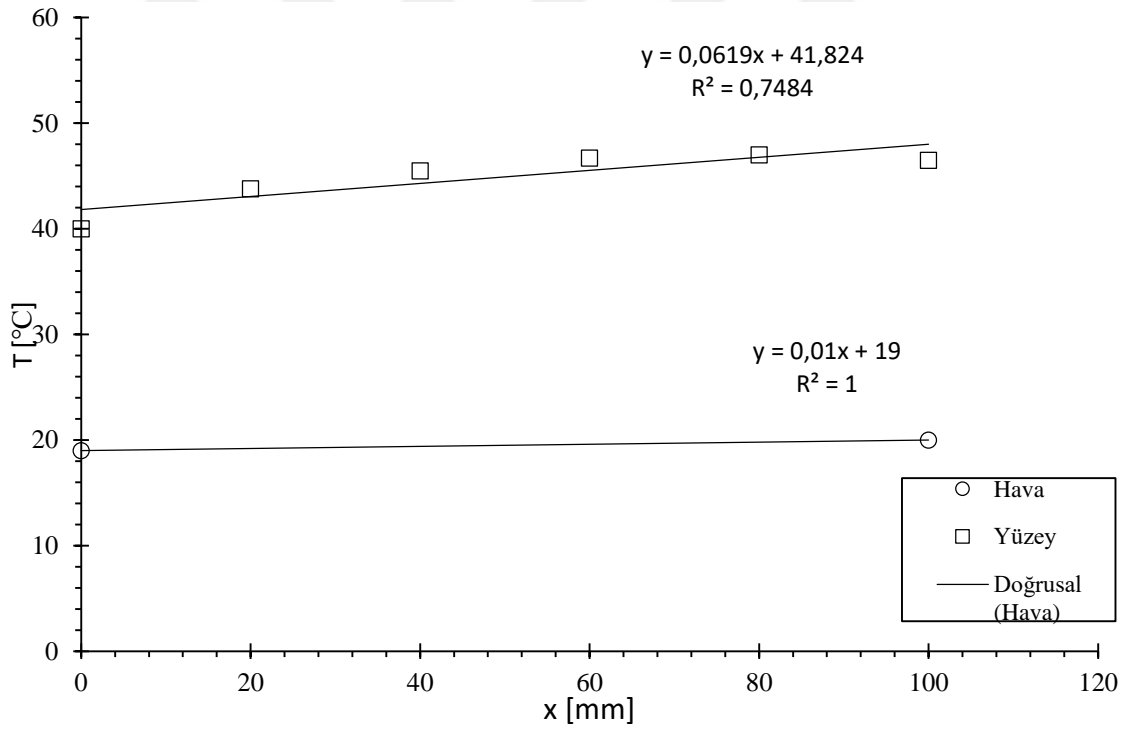
| | | | |
|-----------------------------|------------|-------------------|-----------|
| u_m [m/s] | 4.46 | Re _{dh} | 13259.126 |
| P _{air} | 92800 | ReK | 45.74 |
| T _{m,air} | 19.55 | Nu | 0.72 |
| c _p | 1015.2 | NuD | 208.18778 |
| ρ (kg/m ³) | 1.075 | NuD | 39.765598 |
| μ (kg/ms) | 0.00001808 | h | 20.678111 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts _{ort} | 36.6 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.01198625 | T _m | 19.65 |



EK - 5.23. Sıcaklık Konum ilişkisi

Deney 24

| | | | |
|-----------------------------|------------|------------|-----------|
| u_m [m/s] | 4.46 | Re_{dh} | 13259.126 |
| P_{air} | 92800 | ReK | 45.74 |
| $T_{m_{air}}$ | 19.2 | Nu | 0.71 |
| c_p | 1015.2 | NuD | 205.37509 |
| ρ (kg/m ³) | 1.075 | NuD | 39.765598 |
| μ (kg/ms) | 0.00001808 | h | 20.678111 |
| k (W/mK) | 0.026 | | |
| Pr | 0.707 | Ts_{ort} | 44.916667 |
| \dot{m} (kg/s) | 0.01198625 | T_m | 19.5 |



EK - 5.24. Sıcaklık Konum ilişkisi



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Erdem YILDIZ

Eğitim Bilgileri

Lisans : Makine Mühendisliği

Üniversite : Fırat Üniversitesi

Fakülte : Teknoloji Fakültesi

Mezuniyet Yılı : 2017

Mezuniyet
Derecesi : 3.08/4

VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
LİSANSÜSTÜ TEZ ORJİNALLİK RAPORU

Tarih. 23/02/2023

Tez başlığı Farklı Gözenekli Ortamlarda Akış Ve Isı Geçişinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışmamın. kapak sayfası, giriş, ana bölümler ve sonuç bölümlerinden oluşan toplam 172 (yüzyetmişiki) sayfalık kısmına ilişkin, 23/02/2023 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre tezimin benzerlik oranı % 2 (İKİ) 'dir.

Uygulanan filtreler aşağıda verilmiştir:

- Kabul ve onay sayfası hariç,
- Teşekkür hariç,
- İçindekiler hariç,
- Simge ve kısaltmalar hariç,
- Gereç ve yöntemler hariç,
- Kaynakça hariç,
- Alıntılar hariç,
- Tezden çıkan yayınlar hariç,
- 7 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç (Limit match size to 7 words)

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Lisansüstü Tez Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılmasına İlişkin Yönergeyi inceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim.

Tarih ve imza
23/02/2023

Adı soyadı: Erdem YILDIZ
Öğrenci no: 19910001394
Anabilim dalı: Makine Mühendisliği
Programı: Termodinamik
Statüsü: (X) Yüksek lisans () Doktora

DANIŞMAN

ENSTİTÜ ONAYI

UYGUNDUR

UYGUNDUR

Dr. Öğr. Ü. Mustafa Yasin GÖKASLAN