

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİNİ/MİKRO KANALLARDA ISI TRANSFERİNİN VE BASINÇ DÜŞÜŞÜNÜN
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) İLE MODELLENMESİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YALÇIN CESUR

OCAK 2024

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİNİ/MİKRO KANALLARDA ISI TRANSFERİNİN VE BASINÇ DÜŞÜŞÜNÜN
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) İLE MODELLENMESİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yalçın CESUR

DANIŞMAN

: Doç. Dr. Beytullah ERDOĞAN

ZONGULDAK

Ocak 2024

KABUL:

Yalçın CESUR tarafından hazırlanan “Mini/Mikro Kanallarda Isı Transferinin ve Basınç Düşüşünün Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Had) İle Modellenmesi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliğiyle kabul edilmiştir. 22/01/2024

Danışman: Doç. Dr. Beytullah ERDOĞAN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

Üye:

Prof. Dr. Adnan TOPUZ

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

Üye:

Dr. Öğr. Üyesi Hasan KÜÇÜK

Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

....../....../20....

Prof. Dr. Fikret GÖLGELEYEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Yalçın CESUR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MİNİ/MİKRO KANALLARDA ISI TRANSFERİ VE BASINÇ DÜŞÜŞÜNÜN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) İLE MODELLENMESİ

Yalçın CESUR

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Beytullah ERDOĞAN

Ocak 2024, 125 sayfa

Bu çalışmada, üç farklı çap ölçüsünde paslanmaz çelik ve Poly Ether Ether Ketone (PEEK) olmak üzere iki farklı malzemeden üretilmiş mini/mikro kanallar beş farklı hacimsel debi değerinde saf su kullanılarak daha önce gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmanın verileri referans alınarak, teorik hesaplamaları gerçekleştirilmiş daha sonra hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) programı ile bilgisayar destekli analizi gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve HAD analizleri ile ısı transferi, basınç düşüşü, Nusselt sayısı, ısı taşınım katsayısı incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneysel ölçümler ve sayısal analiz sonuçlarına göre, deneysel çalışmada en yüksek ısı transfer değeri 750µm çaplı paslanmaz çelik mini/mikro boruda 40,60 Watt, en yüksek basınç kaybı değeri ise 16,11 bar olarak 400 µm çaplı paslanmaz çelik mini/mikro boruda elde edilmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemiyle gerçekleştirilen analizlere göre en yüksek ısı transfer değerleri laminar akış rejimine göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre 32,4 Watt, türbülanslı akış rejimine göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre ise 73,88 Watt olarak 400 µm çaplı paslanmaz çelik mini/mikro boruda elde edilmiştir. HAD analizlerine göre en yüksek basınç kaybı değerleri, laminar akış rejimine göre gerçekleştirilen analizler sonucunda 3,59 bar, türbülanslı akış rejimine göre gerçekleştirilen

ÖZET (devam ediyor)

analizler sonucuna göre ise 25,65 bar olarak 400µm çaplı paslanmaz çelik mini/mikro boruda elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mini/Mikro kanal, ısı değıştirici, hesaplamalı akışkanlar dinamiğı (HAD), ısı transferi, basınç kaybı.

Bilim Kodu: 625.04.03



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

MODELING HEAT TRANSFER AND PRESSURE DROP IN MINI/MICRO CHANNELS WITH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (HAD)

Yalçın CESUR

**Zonguldak Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Beytullah ERDOĞAN

January 2024, 125 pages

In this study, mini/micro channels produced from two different materials, stainless steel and Poly Ether Ether Ketone (PEEK), in three different diameters, were used in five different volumetric flow rates of pure water, and theoretical calculations were made, using the data of the previous experimental study as reference, and then computational fluid dynamics was performed. Computer-aided analysis was carried out with the (HAD) program. Heat transfer, pressure drop, Nusselt number and heat transfer coefficient were examined with experimental and CFD analyses. According to the experimental measurements and numerical analysis results, the highest heat transfer value in the experimental study was obtained as 40,60 Watt in the 750 μm diameter stainless steel mini/micro pipe, and the highest pressure loss value was 16,11 bar in the 400 μm diameter stainless steel mini/micro pipe. According to the analysis carried out with the computational fluid dynamics (CFD) method, the highest heat transfer values were 32,4 Watt according to the analysis results performed according to the laminar flow regime, and 73,88 Watt according to the analysis results carried out according to the turbulent flow regime. was obtained in the pipe. According to CFD analyses, the highest pressure loss values were obtained in the 400 μm diameter stainless steel mini/micro pipe as

ABSTRACT (continued)

3,59 bar as a result of the analyzes performed according to the laminar flow regime and as 25,65 bar as a result of the analyzes performed according to the turbulent flow regime.

Keywords: Mini/Micro channel, heat exchanger, computational fluid dynamics (CFD), heat transfer, pressure loss.

Science Code: 625.04.03



TEŞEKKÜR

Öncelikle, beni böylesi değerli bir bilimsel alan ve bu tez konusuna yönlendiren, bilimsel fikir ve deneyimlerini paylaşan, yardıma ihtiyacım olduğu her an ivedilikle ilgilenen, süreç boyunca desteğini her daim hissettiğim kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Beytullah ERDOĞAN'a, bana güvenip her türlü zorlu şartlar altında fedakarca yanımda olan kıymetli eşim Öznur CESUR'a, bilgisayar destekli analizlerde eğitmen olarak bana Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği dünyasının büyüleyici kapılarını açan, bu süreçte her daim yanımda olan değerli dostum Güneyhan'a ve son olarak çalışmalarım boyunca desteklerini her zaman hissettiğim ismini burada sayamadığım tüm hocalarım ve dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL:	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxi
 BÖLÜM 1 GİRİŞ	 1
 1.1 DENEYSEL METOT İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR	 2
1.2. HAD METODU İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR	8
 BÖLÜM 2 TEMEL KAVRAMLAR	 15
 2.1 KÜTLENİN KORUNUMU	 15
2.2 MOMENTUMUN DENKLEMİ	16
2.3 TERMODİNAMİĞİN İKİNCİ YASASI	16
2.4 ISI GEÇİŞİ TANIMI VE ÇEŞİTLERİ	16
2.4.1 Isı Geçişi	16
2.4.2 Isı Geçişi Çeşitleri	17
2.4.2.1 İletimle Isı Geçişi	17
2.4.2.2 Taşınım ile Isı Geçişi ve Newton'un Soğuma Kanunu	18
2.4.2.3 Radyasyon (Işınım) ile Isı Geçişi	19

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

2.5 MİNİ/MİKRO KANALLARIN TANIMI VE GELİŞİMİ	20
2.5.1 Mini/Mikro Kanallar	20
2.5.2 Mini/Mikro Kanalların Tarihi	20
2.5.3 Mikro Kanalların Sınıflandırılması	20
2.5.4 Mini/Mikro Kanalların Kullanım Sebepleri	21
2.6 MİKRO-MİNİ KANALLARDA ISI GEÇİŞİ VE AKIŞ	21
2.6.1 Sıkıştırılabilir ve Sıkıştırılamaz Akışlar	22
2.6.2 Viskoz ve Viskoz Olmayan Akışlar	22
2.6.3 Laminer ve Türbülanslı Akışlar	23
2.6.4 Akışın Giriş Bölgesi Gelişimi	23
2.6.5 Harici ve Dahili Akış	26
2.7 MİNİ/MİKRO KANALLARDA ISI GEÇİŞİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER	26
2.7.1 Giriş Etkileri	26
2.7.2 Ölçek Etkileri	27
2.7.2.1 Yüzey Alanı ve Hacim Oranları	27
2.7.2.2 Viskozitenin Akışa Etkisi	27
2.7.2.3 Yüzey Pürüzlülüğü	27
2.8 BOYUTSUZ SAYILAR	27
2.8.1 Reynolds Sayısı (Re)	27
2.8.2 Nusselt Sayısı	28
2.9 ISI TRANSFERİ HESAPLAMALARINDA KULLANILAN TEMEL DENKLEMLER	28
2.9.1 Sabit Yüzey Sıcaklığında (T_s =sabit) Isı Transferi	28
2.9.2 Sabit Isı Akısı Şartlarında Isı Transferi (q_s =sabit)	29
2.10 HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) VE TARİHİ GELİŞİMİ	30
2.10.1 Nümerik Yöntemler	30
2.10.1.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi	30
2.10.1.2 Sonlu Hacimler Yöntemi	30
2.10.2 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)	31
2.10.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin Tarihi Süreci	31

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

2.10.4 Ağ Bağımsızlığı (Mesh Independency)	33
2.10.5 HAD Analizinin Tercih Edilme Sebepleri	34
BÖLÜM 3 MATERYAL VE YÖNTEM.....	35
3.1 MİNİ/MİKRO KANALDA AKIŞIN DENEYSEL ANALİZİ	35
3.1.1 Deney Düzenegi	35
3.1.2 Kullanılan Mini/Mikro Borular ve Pompa Seçimi.....	37
3.1.2.1 Paslanmaz Çelik ve Paslanmaz Çelik Borular	38
3.1.2.2 Poly Eter Eter Keton (PEEK) Borular.....	38
3.1.3 Kullanılan Akışkan ve Hacimsel Debilerin Seçimi	39
3.1.4 Deneysel Analiz Sonuçlarının Elde Edilmesi	39
3.1.5 Sürtünme Faktörü Katsayısı Hesaplamaları.....	40
3.1.6 Isı Transferi Hesaplamaları.....	43
3.2 MİNİ/MİKRO KANALDA AKIŞIN HAD ANALİZİ	45
3.2.1 HAD Doğrulama (Validasyon) Çalışması	47
3.2.1.1 Doğrulama Çalışmasının Sınır Şartları	47
3.2.1.2 Model (3D) Geometrisinin Çizilmesi.....	48
3.2.1.3 Setup Kurulumu ve Analizi	50
3.2.1.4 HAD Analiz Sonuçları ve Doğrulama Çalışması Sonuçları ile Karşılaştırılması	50
3.2.1.4.1. HAD Analiz Sonuçları	50
Analiz Sonuçlarının Doğrulama Çalışması Sonuçları ile Karşılaştırılması	52
3.3 MİNİ/MİKRO KANALDA AKIŞIN HAD ANALİZİ	57
3.3.1 Geometrinin Hazırlanması	57
3.3.2 Mesh (Ağ) Hazırlanması.....	58
3.3.3 Ağ Yapısına Karar Verilmesi.....	59
3.3.4 Mesh Bağımsızlığı (Grid Independence)	60
3.4 SINIR ŞARTLARI VE METOT TAYİNİ	62

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

BÖLÜM 4 SONUÇLAR VE TARTIŞMA	63
4.1 SÜRTÜNME FAKTÖRÜ-f.....	64
4.2 SÜRTÜNME BASINÇ KAYBI- ΔP_F	69
4.3 ISI TAŞINIM KATSAYISI-H	78
4.4 ISI TRANSFERİ - Q	82
4.5 MİNİ/MİKRO BORU ÇAP ÖLÇÜLERİ VE MALZEME TÜRLERİNE GÖRE ISI TRANSFERİ – BASINÇ KAYBI İLİŞKİSİ.....	87
4.6 GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMA YÖNTEMİNE GÖRE ISI TRANSFERİ – BASINÇ DÜŞÜŞÜ İLİŞKİSİ	93
4.7 SOĞUTMA YÜKÜ VE BASINÇ KAYBI KRİTERLERİNE GÖRE OPTİMUM MİNİ/MİKRO BORUNUN BELİRLENMESİ.....	99
SONUÇ	103
KAYNAKLAR.....	105
EKLER	111

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Mikro ısı değıştirici. Flickr (2023).....	1
Şekil 2.1 Kütlenin korunumu. (Çengel vd., 2008)	15
Şekil 2.2 Levha üzerindeki akışta hız ve sıcaklık dağılımları. (Canay, 2007).....	18
Şekil 2.3 Isı taşınım çeşitleri. (Yeşilata, 2007)	19
Şekil 2.4 Taşınım ile ısı geçişi çeşitleri. (Yeşilata, 2007)	21
Şekil 2.5 Bazı akışkanlar arasındaki viskozite farklılıkları. Bilgiustam (2023).....	22
Şekil 2.6 Laminer akışta düz levha üzerinde sınır tabakanın evrimi. (Yeşilata, 2007).....	23
Şekil 2.7 Boru iç yüzeyinde gerçekleşen akış hız sınır tabakasının gelişimi. (Düz, 2018).....	25
Şekil 2.8 Akış hidrodynamic giriş bölgesi. (Cengel vd., 2014).....	26
Şekil 2.9 Silindirik kanalda ısı geçişi. (Parlak, 2010).....	29
Şekil 2.10 HAD yöntemi ile dış akış çizgileri tasvir edilmiş bir uçak tasarımı. (Econ Engineering, 2019).....	31
Şekil 2.11 HAD programlarının endüstride kullanım alanlarına örnekler. (Topçuoğlu, 2020).....	33
Şekil 3.1 Temsili bir deney düzeneği. (Erdoğan, 2016).....	36
Şekil 3.2 Farklı çap ölçülerine sahip paslanmaz çelik mikro/mini borular ($P_{max}=400-1520$ bar, $T_{max}=289$ C°) (Heegermaterials, 2023).....	38
Şekil 3.3 Farklı çap ölçülerine sahip PEEK mikro/mini borular ($P_{max}=138-690$ bar, $T_{max}=100$ C°) (Vici Jour, 2023)	39
Şekil 3.4 SS400 paslanmaz boru için 20 ml/dk hacimsel debi ölçümü.....	40
Şekil 3.5 Space Claim programında bu çalışmaya özgü kanal geometrisinin oluşturulması...	49
Şekil 3.6 Oluşturulan mesh yapısı.....	49
Şekil 3.7 Doğrulama çalışmasının 3 boyutlu görüntüsü.	51
Şekil 3.8 Kanal boyunca basınç değışimi.....	51
Şekil 3.9 Kanal boyunca gerçekleşen sıcaklık dağılımı.....	52
Şekil 3.10 Akışkan hızının kanal boyunca değışimi	52

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No	Sayfa
Şekil 4.1 D=400 µm çaplı mini/mikro borular için sürtünme faktörünün Re sayısına göre değişimi (Deneyssel - Teorik).....	64
Şekil 4.2 Şekil 4.2 D=400 µm çaplı mini/mikro borular için sürtünme faktörünün Re sayısına göre değişimi (Deneyssel - HAD)	65
Şekil 4.3 Şekil 4.3 D=500 µm mini/mikro çaplı borular için sürtünme faktörünün Re sayısına göre değişimi (Deneyssel - Teorik)	66
Şekil 4.4 Şekil 4.4 D=500 µm çaplı mini/mikro borular için sürtünme faktörünün Re sayısına göre değişimi (Deneyssel - HAD)	67
Şekil 4.5 Şekil 4.5 D=750 µm çaplı mini/mikro borular için sürtünme faktörünün Re sayısına göre değişimi (Deneyssel - Teorik)	68
Şekil 4.6 Şekil 4.6 D=750 µm çaplı mini/mikro borular için sürtünme faktörünün Re sayısına göre değişimi (Deneyssel - HAD)	69
Şekil 4.7 D=400 µm çaplı mini/mikro borular için sürtünme basınç kaybının Re sayısına göre değişimi (Deneyssel - Teorik)	70
Şekil 4.8 D=400 µm çaplı mini/mikro borular için sürtünme basınç kaybının Re sayısına göre değişimi (Deneyssel - HAD)	71
Şekil 4.9 D=500 µm çaplı mini/mikro borular için sürtünme basınç kaybının Re sayısına göre değişimi (Deneyssel - Teorik)	72
Şekil 4.10 D=500 µm çaplı mini/mikro borular için sürtünme basınç kaybının Re sayısına göre değişimi (Deneyssel - HAD)	73
Şekil 4.11 D=750 µm çaplı mini/mikro borular için sürtünme basınç kaybının Re sayısına göre değişimi (Deneyssel - Teorik).....	74
Şekil 4.12 D=750 µm çaplı mini/mikro borular için sürtünme basınç kaybının Re sayısına göre değişimi (Deneyssel - HAD).....	75
Şekil 4.13 D=400 µm çaplı mini/mikro borular için ısı taşınım katsayısının Re sayısına göre değişimi (Deneyssel - Teorik).....	78
Şekil 4.14 D=400 µm çaplı mini/mikro borular için ısı taşınım katsayısının Re sayısına göre değişimi (Deneyssel - HAD).....	79

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No	Sayfa
Şekil 4.15 D=500 µm çaplı mini/mikro borular için ısı taşınım katsayısının Re sayısına göre değişimi (Deneysel - Teorik).....	79
Şekil 4.16 D=500 µm çaplı mini/mikro borular için ısı taşınım katsayısının Re sayısına göre değişimi (Deneysel - HAD).....	80
Şekil 4.17 D=750µm çaplı mini/mikro boruların ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi (Deneysel -Teorik)	81
Şekil 4.18 D=750 µm çaplı mini/mikro boruların ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi (Deneysel - HAD).	82
Şekil 4.19 D=400 µm çaplı mini/mikro boruların ısı transferi değerlerinin akışkan debisine göre değişimi (Deneysel - Teorik)	83
Şekil 4.20 D=400µm çaplı mini/mikro boruların ısı transferi değerlerinin akışkan debisine göre değişimi (Deneysel - HAD).	83
Şekil 4.21 D=500 µm çaplı mini/mikro boruların ısı transferinin akışkan debisine göre değişimi (Deneysel - Teorik).....	84
Şekil 4.22 D=500 µm çaplı mini/mikro boruların ısı transferinin akışkan debisine göre değişimi (Deneysel - HAD).....	85
Şekil 4.23 D=750µm çaplı mini/mikro boruların ısı transferinin akışkan debisine göre değişimi (Deneysel - Teorik).....	85
Şekil 4.24 D=750µm çaplı mini/mikro boruların ısı transferinin akışkan debisine göre değişimi (Deneysel - HAD).....	86
Şekil 4.25 SS400 çaplı mini/mikro boruya ait ısı transferi-basınç düşüşü arasındaki değişim.....	88
Şekil 4.26 SS500 çaplı mini/mikro boruya ait ısı transferi-basınç düşüşü arasındaki değişim.....	89
Şekil 4.27 SS750 çaplı mini/mikro boruya ait ısı transferi-basınç düşüşü arasındaki değişim	90
Şekil 4.28 PEEK400 çaplı mini/mikro boruya ait ısı transferi-basınç düşüşü arasındaki değişim... ..	91
Şekil 4.29 PEEK500 çaplı mini/mikro boruya ait ısı transferi-basınç düşüşü arasındaki değişim	92

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No

Sayfa

Şekil 4.30 PEEK750 çaplı mini/mikro boruya ait ısı transferi-basınç düşüşü arasındaki değişim	93
Şekil 4.31 Deneysel yöntemle gerçekleştirilen çalışmaya ait ısı transferi-basınç düşüşü arasındaki değişim.....	94
Şekil 4.32 HAD metot laminar akış analiz yöntemiyle gerçekleştirilen çalışmaya ait ısı transferi-basınç düşüşü arasındaki değişim.....	95
Şekil 4.33 HAD metot türbülanslı akış rejimiyle gerçekleştirilen analize ait ısı transferi-basınç kaybı arasındaki değişim	96
Şekil 4.34 Paslanmaz çelik mini/mikro boru pompalama gücünün ısı transferine oranının hacimsel debiye bağlı değişimi.....	99
Şekil 4.35 PEEK mini/mikro boru pompalama gücünün ısı transferine oranının hacimsel debiye bağlı değişimi.....	100

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1 Deneysel metot ile gerçekleştirilen çalışmalar.....	7
Çizelge 1.2 HAD metodu ile gerçekleştirilen çalışmalar	13
Çizelge 2.1 Mikro ve mini kanalların boyutsal sınıflandırması (Andou vd., 2007)	21
Çizelge 2.2 Boru içi zorlanmış akış için teorik denklemler	29
Çizelge 3.1 Deney setinde kullanılan malzeme ve cihazlar (numaralı şekilde).....	36
Çizelge 3.2 Deney düzeneğinde kullanılan boru anma çapları ve gerçek iç çap ölçüleri	38
Çizelge 3.3 Deneysel yöntem çalışma parametreleri	40
Çizelge 3.4 Deneysel çalışma basınç kaybı ölçümleri ve diğer hesaplamalar	43
Çizelge 3.5 Isı transferi hesaplamaları	44
Çizelge 3.6 Doğrulama çalışması sınır değerleri.	48
Çizelge 3.7 Ağ yapısı (Mesh) kalite değerleri	49
Çizelge 3.8 Doğrulama çalışması debi değerlerine göre elde edilen HAD analiz değerleri....	50
Çizelge 3.9 Doğrulama çalışması değerleri ile HAD analiz ısı akısı değerleri.....	54
Çizelge 3.10 Doğrulama çalışması değerleri ile HAD analiz basınç düşüşü değerleri.....	55
Çizelge 3.11 Doğrulama çalışması $T_{\text{çıkış}}$ değerleri ile HAD analiz $T_{\text{çıkış}}$ değerleri.....	56
Çizelge 3.12 Ağ yapısı (Mesh) kalite değerleri	60
Çizelge 3.13 Ağ bağımsızlığı analizi ısı transferi ve basınç düşüşü değerleri.....	61
Çizelge 3.14 HAD analiz sınır şartları ve parametre değerleri.	62
Çizelge 4.1 Deneysel çalışma sürtünme basınç kaybı ve pompa yükü değerleri.....	76
Çizelge 4.2 HAD metot laminer analiz sürtünme basınç kaybı ve pompa yükü değerleri.....	77
Çizelge 4.3 HAD metot türbülanslı analiz sürtünme basınç kaybı ve pompa yükü değerleri..	77
Çizelge 4.4 Deneysel çalışma yöntemine göre hesaplanan ısı transferi değerleri	97
Çizelge 4.5 Laminer akışta ısı transferinin HAD analizi ile elde edilen değerleri.....	97
Çizelge 4.6 Türbülanslı akışta ısı transferinin HAD analizi ile elde edilen değerleri.....	98
Çizelge 4.7 Isı transferi ve basınç kaybı açısından optimum mini/mikro borunun belirlenmesi.....	101



EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ

Sayfa

EK A SS400 Deneysel Ölçüm ve Hesaplama Tablosu	111
EK B SS500 Deneysel Ölçüm ve Hesaplama Tablosu.....	113
EK C SS750 Deneysel Ölçüm ve Hesaplama Tablosu.....	115
EK D PEEK400 Deneysel Ölçüm ve Hesaplama Tablosu.....	117
EK E PEEK500 Deneysel Ölçüm ve Hesaplama Tablosu.....	119
EK F PEEK750 Deneysel Ölçüm ve Hesaplama Tablosu.....	121
EK G HAD Metot Laminer Akış Analiz ve Hesaplama Tablosu.....	123
EK H HAD Metot Türbülanslı Akış Analiz ve Hesaplama Tablosu.....	124



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

$\dot{m}_{giren}$	: Sisteme giren kütleli debi (kg/s)
μ	: Dinamik viskozite (Pa · s) veya (kg/m · s)
$\dot{V}$	: Hacimsel debi (m ³ /s)
$\dot{Q}$	: Isı transferi (Watt)
$A_{c,in}$	: Mikro kanal iç kesit alanı (m ²)
W_{pompa}	: Pompa basınç gücü (Watt)
$\dot{m}_{çıkan}$	: Sistemden çıkan kütleli debi (kg/s)
ρ	: Yoğunluk (kg/m ³)
ϑ	: Kinematik viskozite (m ² /s)
μ	: Dinamik Viskozite (kg/ms)
μm	: Mikrometre
A	: Yüzey alanı (m ²)
C_p	: Akışkanın özgül ısısı (kJ/kgK)
Cr	: Krom
D_h	: Hidrolik Çap (m),
ϵ	: Boru iç yüzeyinin ortalama pürüzlülük yüksekliği (μm)
f	: Sürtünme faktörü
h	: Isı taşınım katsayısı (W/m ² K)
k	: ısıl iletim katsayısı (W/mK)
L	: Uzunluk (m)
L_h	: Hidrodinamik giriş uzunluğu
O	: Oksijen
p_{max}	: Maksimum basınç (Pa)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

q_s	: Yüzeyde sabit ısı akısı (W/m^2)
$\dot{q}_x$	: x yönünde gerçekleşen ısı geçişi için geçerli olan birim alana dik bileşen (W/m^2)
T_a	: Akışkan sıcaklığı, (C°)
T_c	: Soğuk akışkan giriş sıcaklığı (C°)
T_{cfd}	: HAD analiz sıcaklığı (C°)
T_h	: Sıcak akışkan giriş sıcaklığı (C°)
T_{in}	: Giriş sıcaklık değeri (C°)
T_m	: Ortalama sıcaklık değeri (C°)
T_{max}	: Maksimum sıcaklık (C°)
T_{out}	: Çıkış sıcaklık değeri (C°)
T_s	: Yüzey sıcaklığı (C°)
T_{valid}	: Doğrulama çalışması sıcaklık değeri (C°)
V_{ort}	: Akışkanın sahip olduğu ortama hızı (m/s),
$L_{h,x}$	: Hidrodinamik giriş uzunluğu (m)
$L_{h,T}$	: Isıl giriş uzunluğu (m)
Δp_s	: Sürtünme basınç kaybı (Pa)
ΔT	: Mikrokanala giren ve çıkan akışkanın mutlak sıcaklık farkı (C°)

KISALTMALAR

HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği/Computational Fluid Dynamics
DNS	: Direct Numerical Simulation
Δp	: Basınç Düşüşü
EDL	: Elektro Ozmotik Etkiler
Exp	: Deneysel
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
MEMS	: Mikro Elektro Mekanik Sistemler
Nu	: Nusselt Sayısı
Ort	: Ortalama
PEEK	: Polietereterketon Malzeme
Pr	: Prandtl Sayısı
Re	: Reynolds Sayısı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

SS	: Paslanmaz Çelik Malzeme
Th	: Teorik
Valid	: Doğrulama
ZBEÜ	: Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi





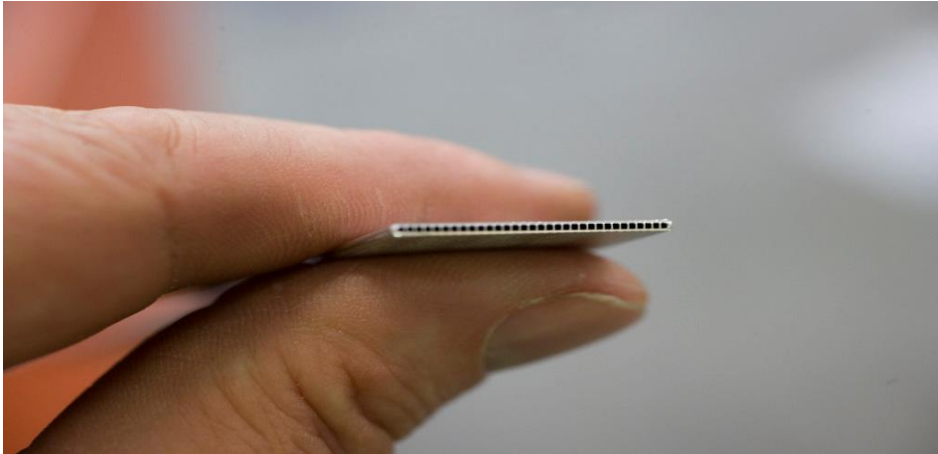
BÖLÜM 1

GİRİŞ

Tarihten günümüze yaşanan süreçte bilimsel çalışmalar teknolojinin gelişmesine paralel olarak ilerlemiştir. Dünyada özellikle 1980’li yıllardan itibaren başta uzay ve havacılık, tıp elektroniği, savunma sanayii ve haberleşme teknolojileri gibi endüstrinin çeşitli alanlarında, daha az yer kaplayan, ısıl etkenliği daha yüksek, daha hafif ve daha ekonomik ürünler üretmeye yönelik ihtiyaçlar artarak katlanmıştır.

Teknolojik gelişmeler, daha küçük boyutlarda üretilen ürünlerin, çok daha yüksek soğutma yükü ihtiyacını da beraberinde getirmiştir. Bu ihtiyaçlara çözüm olarak mikro ölçekte (kompakt) ısı değiştiricilere olan gereksinim ortaya çıkmıştır.

1990’lı yıllar mini ve mikro ölçekli kanalların ısı transferi etkilerinin daha detaylı incelendiği ve bu konuda araştırmacıların ilgisini üzerine çeken bir alan olmuştur. Böylelikle mini/mikro kanalların tarihte ortaya çıkışı ve gelişim süreci başlamıştır. Şekil 1.1’de mikro boyutlu bir ısı değiştiricinin boyutları görülmektedir.



Şekil 1.1 Mikro ısı değiştirici. Flickr (2023).

Günümüzde imalat teknolojilerin gelişmesi bu tip kanalların üretimini mümkün kılmış ve yaygınlaşmasını sağlamıştır. Bu gelişmeler ise bu alanda araştırma ve geliştirme çalışması yapan kişilerin farklı geometrilerde, farklı deneysel düzeneklerde çalışmalarını gerçekleştirmelerini mümkün kılmıştır.

Bununla birlikte bilgisayar donanımlarının ve ticari yazılımların yaygınlaşarak, fiyat olarak ulaşılabilir hale gelmesi hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) alanında yapılan çalışma sayısını artırmıştır. Bilgisayar destekli analiz çalışmalarının bir deney düzeneği kurulumu gerektirmemesi sebebiyle ekonomik olması, parametrik yapılan çalışmalarda hızlı şekilde sonuç alınabilmesi, istenildiği zaman ve istenilen yerde bu çalışmaların yapılabilmesi gibi avantajları sebebiyle bu alanda çalışma yapanlarca yaygın kullanılmasını sağlamıştır.

Günümüzde hızla gelişen teknoloji beraberinde güçlü bir rekabeti ortaya çıkarmıştır. Bu rekabette yer almak, tercih edilebilir ürünler ortaya koymak, ihtiyaca yönelik olarak ürün ve sistem tasarımı gerçekleştirmek için mikro ölçekte bu tip araştırma ve geliştirme çalışmalarının yapılmasını gerektirmiştir.

Literatürde incelenen çalışmalar genel olarak, mini/mikro kanal akışlarını, değişken geometrili, kanaldaki akış hızını ve ısı transferi etkenliğini artırmaya yönelik düzeneklere sahip kanallarda yapılan çalışmalarla, farklı akış rejimlerinde gerçekleştirilen ısı değiştirici analizleri gibi çeşitli konular ele alınmıştır. İncelenen literatür çalışmaları geçmiş tarihten güncel tarihe doğru sıralanmıştır.

Literatürde bu alanda yapılan çalışmalar, deneysel yapılan çalışmalar ve bilgisayar destekli yapılan analiz çalışmaları ve derleme çalışmalar olmak üzere iki ana başlık altında ve üç grupta incelenmiştir. İncelenen çalışmaların özeti her iki farklı yöntem için ilgili bölüm sonlarında çizelge şeklinde paylaşılmıştır.

1.1 DENEYSEL METOT İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR

Lelea vd. (2003), mikro kanallı ısı transferi ve akışkan akışıyla ilgili deneysel ve sayısal metotlarla çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Paslanmaz çelik malzemeden oluşan çapları sırasıyla 0,1 mm, 0,3 mm ve 0,5 mm olan mini borularda gerçekleştirdikleri bu çalışmada akışkan olarak saf su seçilmiştir. İncelemeleri sonucunda geleneksel ve klasik sonuçların daha büyük boyutlardaki borular için geçerli olduğu tespitinde bulunmuşlardır.

Morini (2004), mikro kanallar yoluyla taşınım ısı transferine ilişkin yapılan çalışmaların bibliyografik incelemesini sunmuştur. Çoğu durumda mikro kanallardaki sürtünme faktörü ve Nusselt sayısı gibi parametrelere ilişkin deneysel veriler geleneksel teoriyle çeliştiği gibi kendi aralarında da tutarsız olduğunu tespit etmiştir. Bu farklılıkları açıklamak için araştırmacıların viskoz dağılım etkileri, elektro-ozmotik etkiler (EDL), özellik değişim etkileri, kanal yüzey koşulları (göreceli pürüzlülük) ve deneysel belirsizlikler gibi çeşitli nedenler öne sürdüğünü belirtmiştir. Bu konuyu daha iyi açıklamak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğu tespitinde bulunmuştur.

Herwig (2005), mikro kanallardaki akışın ölçek etkileri ve ölçümlerde meydana gelen sapmaları incelemiştir. Buna ek olarak bu konuda gerçekleştirilmiş olan sapma analizleri ve metodlarını da mercek altına alarak benzer çalışmalarda kullanılan yöntemleri irdelemiştir.

Li vd. (2007), çalışmasında mikro borulardaki sıvı laminar akışın, akış karakteristik özellikleri ve ısı transfer etkinliğini ortaya çıkarmak için deneysel ölçümler ve sayısal analiz çalışmaları gerçekleştirmiştir. Sırasıyla 50-100 µm ve 373-1570 µm hidrolik çaplarında hem pürüzsüz erimiş silika hem de kaba paslanmaz çelik mini/mikro borular kullanmışlardır. Çalışmalarını özellikle yüzey pürüzlülüğü ve eksenel ısı iletimi açısından irdelemişlerdir. Deneysel ölçüm ve sayısal analiz sonuçlarının Reynolds sayısı 100 ve yukarısı için yakın değerler aldığını tespit etmiştir.

Hasan vd. (2009), karşıt akışlı mikro kanallı bir ısı değiştiricide kanal geometrisinin basınç düşüşü ve ısı değiştirici etkinliği üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında kare, dikdörtgen, trapez, dairesel, üçgen gibi geometrik şekillerde kanal tipleri kullanmışlardır. Çalışma sonucunda en yüksek ısı değiştirici etkinliği değerini dairesel geometriye sahip kanal tipinde elde etmişlerdir. Ayrıca hacim sabit tutularak kanal sayısını artırmanın basınç düşüşü ve ısıl etkinlik üzerinde doğrusal orantıya sahip bir düşüşe sebep olduğu tespitinde bulunmuşlardır.

Şara vd. (2010), mikro kanallarda ısı ve kütle geçişi üzerine yapılan çalışmaların özetini sunmuştur. Isı transferi için önerilen bağıntıların makro kanallar için geçerli olan bağıntılar ile karşılaştırmasını yapmışlardır. İlgili araştırmaya ait bulguların, mevcut bulgularla kıyaslandığı zaman genel olarak kabul edilebilir bir ısı aktarımı bağıntısı ortaya koymanın zor olduğunu belirtmişlerdir. Son olarak, akışın hidrodinamik gelişimi ve eksenel ısı iletimi gibi faktörlerin analizlerde dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Tam vd. (2011), akışı geçiş bölgesinde ısıtmanın sürtünme faktörü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. 750 μm , 1000 μm ve 2000 μm çaplarında paslanmaz elik ve cam borular kullanmışlardır. Çalışma sonucunda izotermal koşullarda, mikro borunun ısıtılmasının laminar akış bölgesi ve geçiş bölgesinde sürtünme faktörünü azaltmakla birlikte akış rejiminde geçişin başlamasını geciktirdiği sonucuna varmışlardır. Ancak ısıtma işleminin geçiş bölgesinin son kısmında ve türbülanslı akış bölgesinde sürtünme faktörünü etkilemediğini tespit etmişlerdir. Barlak vd. (2011), çalışmalarında çeşitli boy ve çaplara sahip dairesel geometrilili mikro borularda basınç düşüşü ve sürtünme faktörü etkilerini deneysel yöntemle incelemişlerdir. Mevcut akış şartları altında sürtünme faktörü değer ve laminar rejimden türbülanslı akış rejimine geçiş Reynolds sayısı aralığının geleneksel kanal bağıntıları ile uyumlu olarak elde etmişlerdir.

Kandlikar vd. (2013), tek fazlı gaz akışı, tek fazlı sıvı akışındaki artış ve akışta kaynama, yoğuşma, elektronik soğutma ve mikro ölçekli ısı değeritiriciler olmak üzere altı ana başlık altında yaptıkları çalışmayla ele almışlardır. Mikro akışkanlar, MEMS (mikro elektro-mekanik sistemler) teknolojisi ve nano materyal üretimi konusundaki ilerlemelerin, mikro kanal ısı taşınım süreçlerini daha verimli ve pratik cihazlara uygulanabilir hale getirmede yeni imkanlar sağlamasına değermişlerdir. Elektronik soğutmanın yanı sıra mikro ölçekli ısı eşanjörlerine yönelik araştırma ihtiyaçları ve ürün geliştirme çalışmalarına değermişlerdir.

Cole vd. (2014), kayma akış hızına sahip sabit özellikli bir gaz kullanarak paralel plakalı bir ısı değeritiricide meydana gelen ısı transferini incelemişlerdir. İncelenen en büyük hava akışı değerleri dışındaki tüm değerler için, ısıtıcı sıcaklığına duvar iletiminin hkim olduğunu tespit etmişlerdir.

"Dixit ve Ghos (2015), paralel akışlı, karşıt akışlı ve çapraz akışlı mini/mikro kanallı ısı değeritiriciler üzerine yapılan çeşitli çalışmaları incelemişlerdir. Halen kullanılan imalat teknikleri ve farklı uygulamaları da çalışmalarında özetlemişlerdir. Sonuç olarak, yalnızca boyutsal doğruluğu sağlamakla kalmayıp aynı zamanda seri üretime de olanak tanıyan bir imalat teknolojisinin geliştirilmesine ihtiyaç olduğunu öne sürmüşlerdir. İster teorik ister deneysel teknikler kullanılarak, mikro kanallar için standart bir tasarım ve analiz metodolojisi olmadığını, bu yüzden veri yorumlamalarındaki farklılıkların, yayınlanmış farklı çalışmaları karşılaştırmada zorluklara sebep olduğunu belirtmişlerdir.

Çevrim vd. (2016), dikdörtgen kesitli 14 adeti eş olmak üzere 16 kanallı mini kanallı çapraz ısı değiştirici kullanarak deneysel olarak çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen ısı transferi ve sürtünme faktörü değerlerini teorik hesap sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda yerel Nusselt sayısı değerlerinin teorik referans değerler ile oldukça yakın değerler aldığını, sürtünme faktörü değerlerinin ise teorik değerlerden daha yüksek değerler aldığını tespit etmişlerdir. Buna sebebi olarak kanal içi eklentilerin ısı transferi etkinliği üzerindeki pozitif etkiden kaynaklandığı yorumunda bulunmuşlardır.

Yadav vd. (2016), farklı geometrilere sahip mikro kanallı ısı değiştiricilerinde ısı transferinin sistematik bir incelemesini sunmuşlardır. Deneysel çalışma sonucunda ölçülen basınç kaybı değerlerine göre hesap edilen sürtünme faktörü ve Nusselt sayısı değerleri hesaplanarak geleneksel teoriyle karşılaştırılmış ve sonuçlar arasındaki farklılığı göstermişlerdir. Mikro kanallar yoluyla tek fazlı konvektif ısı transferine ilişkin deneysel verilerin paralel hale getirilmesiyle, mikro kanallarda ısı transferindeki değişimden sorumlu olan taşıma mekanizmasının yeterli şekilde anlaşılması için ek metodik çalışmaların gerekli olduğunu bildirmişlerdir.

"Peleviç ve Meer (2016), yüzey pürüzlülüğü faktörünün bir mikro kanal içindeki ısı transferi ve akışkan akışı üzerindeki etkisini Lattice Boltzmann yöntemini kullanarak incelemiştir. Gauss fonksiyonu kullanılarak yüzey pürüzlülüğü elde etmiş ve ısı transferi ve akış olayını etkileyen iki ana unsurun olduğunu tespit etmişlerdir. Oluşturdukları basitleştirilmiş pürüzlülük modelinin gerçek pürüzlülük modelini elde etmek için kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Erdoğan (2016) gerçekleştirdiği çalışmada, sabit yüzey sıcaklığı sınır şartı altında daire kesitli, yatay mikro kanallarda Al_2O_3 , TiO_2 ve ZnO nanoakışkanlarının ısı performansları ve basınç düşüşleri deneysel olarak incelemiştir. Nanoakışkanların kullanıldığı ısı transferi uygulamalarında yüksek ısı performans ve düşük basınç düşüşü için hangi parametrelere odaklanılması gerektiği vurgulamıştır. Sonuç olarak kararlılığı sağlanmış nanoakışkanlar arasında Al_2O_3 nanoakışkanı için en uygun değerleri elde etmiştir.

Esmaili vd. (2018), 20 mm uzunluk ve 20 mm genişlikte bakır bir plakada farklı eğim açılarında 100 μm ve 200 μm boyunda kavisler (rib) oluşturarak bu durumun basınç düşüşü ve sıcaklık değişimine olan etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmanın sonuçlarını, literatürde düz kanallarla yapılan çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre ısı kanallarına

uygulanan nervür etkisinin ısı transferini pozitif yönde etkilediğini ve en etkili kavis açısının 45 derece olduğunu tespit etmişlerdir.

Liu vd. (2019), laminar kanal akışında pürüzlülüğün sürtünme direnci ve basınç düşüşü üzerine etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Kare blokajlar üzerinden yapılan analizin önceki çalışmaların çoğundan farklı olarak, akışın tamamen geliştirildiği bölgeye ek olarak akışın pürüzlülüğe uyum sağladığı bölgeyi de incelemişlerdir. Sonuç olarak laminar kanal akışının giriş bölgesindeki hidrodinamik ve ısı gelişiminin, bağıl pürüzlülük yüksekliğine güçlü bir şekilde bağlı olduğunu tespit etmişlerdir.

Ramesh vd. (2020), yaptıkları derleme çalışmasında son zamanlarda mikro ölçekli ısı değiştiricilerde (MCHEX) gerçekleştirilen ısı transferi ve iyileştirilmesi üzerine yapılmış deneysel ve sayısal çalışmaları irdelemişlerdir. Bu derlemede mikro kanallarda ısı transferini iyileştirme teknikleri, mikro kanalların incelenmesinde uygulanan sayısal yöntemler ve ısı transfer hızını etkileyen parametreler üzerinde durmuşlardır. Mikro kanallı ısı emicinin geometri değişiklikleri, jet çarpması, nano akışkanlar kullanımı, akış kaynaması vd. yöntemler yoluyla performansını artırmaya yönelik son çalışmalar bu makalede kapsamlı bir şekilde tartışılmıştır. İlgili çalışma yılı itibarıyla kompakt ısı değiştiriciler konusunda detaylı bir bilgi kaynağı olarak değerlendirilmiştir.

Wan (2021), mühendislik uygulamalarında ısı transfer katsayısının belirlenmesine yönelik üç farklı yöntem ve bunların uygulamalarını incelemiştir. Diğer yazarların araştırmalarını özetleyerek sıcaklık değerlerinin ısı transfer katsayısı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu görüşünde bulunmuştur.

Zhang vd. (2023), mikro kanallardaki akış ve ısı transferi mekanizmalarına odaklanarak mikro ölçekli akış ve ısı transferi ile ilgili araştırmaları sistematik olarak incelemişlerdir. İncelemelerini sadece ölçek etkilerini dikkate alan mikro ölçekli tek fazlı akış ve ısı transferi, diğer kısmını ise mikro ölçekli akışın özel akışkanlarla gerçekleştirilen ısı transferi çalışmaları olmak üzere iki ana başlıkta sınıflandırmışlardır. Kaldırma kuvveti ve termal ivmenin akış alanı üzerinde türbülans yoğunluğunun zayıflamasına yol açabilecek ve türbülanslı ısı transferi kabiliyetini azaltabilecek dolaylı etkilere sahip olduğunu savunmuşlardır. Özellikle, ısı transferi etkinliğinin bozulmasını etkili bir şekilde önleyerek ısı transfer performansının nasıl en üst düzeye çıkarılacağı hakkında daha fazla çalışma yapılması gerektiği sonucuna varmışlardır.

Jamil vd. (2023), yaptıkları çalışmada eş merkezli mikro borulu kanatçıklı madeni yağ soğutucusunun ayrıntılı bir tasarımını ve analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu analizi termal, hidrodinamik ve ekonomik açıdan ele almışlardır. Modeli önce deneysel verilerle doğrulamış, ardından ısı eşanjörünün performansını incelemek için detaylı bir parametrik analiz yapmışlardır. Lastik piroliz yağının, etilen glikol ve ham petrole kıyasla daha az güç sarfıyatı ve maliyetle birlikte daha iyi bir ısı transfer katsayısı sunduğunu tespit etmişlerdir. Deneysel literatür incelemeleri Çizelge 1.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 1.1 Deneysel metot ile gerçekleştirilen çalışmalar.

Sıra Nu	Tarih	Çalışma Konusu	Yazar	Malzeme	Akışkan	Geometri
1	2003	The Experimental Research On Microtube Heat Transfer And Fluid Flow Of Distilled Water	Dorin Lelea, Shigefumi Nishio, Kiyoshi Takano	Paslanmaz çelik	Damıtılmış su	Dairesel
2	2007	Experimental And Numerical Studies Of Liquid Flow And Heat Transfer In Microtubes	Zhuo Li, Ya-Ling He, Gui-Hua Tang, Wen-Quan Tao	Erimiş Silika Paslanmaz Çelik	Damıtılmış su	Dairesel
3	2009	Influence Of Channel Geometry On The Performance Of A Counter Flow Microchannel Heat Exchanger	Mushtaq I. Hasan, A.A. Rageh, M. Yaghoubi vd.		Damıtılmış su	Kare, Dikdörtgen, Trapez, Dairesel, Üçgen
4	2011	The Effect Of Inner Surface Roughness And Heating On Friction Factor In Horizontal Micro-Tubes	Tam Lin, Tam Hk, vd.	Paslanmaz çelik	Damıtılmış su	Dairesel
5	2011	Mikro Borularda Basınç Düşüşü	Semahat Barlak, Sinan Yapıcı, O. Nuri Şara	Çelik	Saf su	Dairesel
6	2014	Microchannel Heat Transfer With Slip Flow And Wall Effects	Kevin D. Cole, Barbaros Çetin and Lukas Brettmann	Plastik Cam Paslanmaz Çelik	Sabit özellikte gaz	Paralel Plaka
7	2016	Experimental Analysis Of Laminar Flow And Heat Transfer In A Multi-Port Finned Mini Channel	B.Çevrim, A.G Yazıcıoğlu, S.Kakaç		Damıtılmış su	H form
8	2016	Heat Transfer Analysis In Microchannel Heat Exchanger: A Review	Avinash Yadav, Satyendra Singh, Sanjeev Kumar Gangwar, vd.	Paslanmaz Çelik Cam	Damıtılmış su İsoopropanol Metanol	Dairesel Kare
9	2016	Heat Transfer And Pressure Drop In Microchannels With Random Roughness	N. Pelević, Th.H. van der Meer			
10	2016	Mini/Mikro Kanallarda Nanoakışkan İle Isı Transferinin Deneysel İncelenmesi	Beytullah ERDOĞAN	Paslanmaz Çelik PEEK	Saf su Al ₂ O ₃ , TiO ₂ ve ZnO	Dairesel
11	2018	Experimental Analysis Of Heat Transfer In Ribbed Microchannel	Qadir Esmaili, Ali Akbar Ranjbar, Soheil Pothkhal,	Bakır		
12	2023	On Design and Analysis Of A Concentric Tube Micro Fin Heat Exchanger For Applications Of Tire Pyrolysis Lube Oil Cooling	Muhammad Ahmad Jamil, Haseeb Yaqoob, vd.	Isı değiştirici metal boru (bakır, paslanmaz çelik)	piroliz yağı Etilen glikol Su (soğutucu akışkan)	Dairesel (finli)
Derleme Çalışmalar						
1	2004	Single-Phase Convective Heat Transfer In Microchannels: A Review Of Experimental Results	Gian Luca Morini			
2	2005	Single-Phase Heat Transfer In Microchannels	Heinz Herwig			
3	2010	Mikro Kanallarda Basınç Düşüşü Ve Isı/Kütle Aktarımı: II-Taşınım İle Isı Ve Kütle Aktarımı	O. Nuri Şara Sinan YAPICI, M. Emin Arzuoğlu			
4	2013	Heat Transfer In Microchannels—2012 Status And Research Needs.	Kandlikar, S. G., Colin, S., Peles, Y., Garimella, vd.			
5	2015	Review Of Micro- And Mini-Channel Heat Sinks And Heat Exchangers For Single Phase Fluids	Tisha Dixit, Indranil Ghosh			
6	2020	Latest Advancements In Heat Transfer Enhancement In The Micro-Channel Heat Sinks: A Review.	Ramesh, K.N., Shama, T.K. & Rao, G.A.P.			
7	2021	The Heat Transfer Coefficient Predictions In Engineering Applications	Junchi Wan			
8	2023	Review Of The Complex Flow And Heat Transfer Characteristics In Microchannels And Micromachines	Zhang, J.; Zou, Z.; Fu, C. A			

1.2. HAD METODU İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR

Nastoll ve Boyer (2010), mikro boyutlardaki plakalara sahip kompakt ısı değiştiricinin hidrodinamik değişimlerini ve ısı transferi etkisini HAD simülasyonları ile gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada kanalların içinden aktarılan ısı gücünü karşıt akışlı konfigürasyonunda %75-%85 oranları arasında, eş zamanlı akış konfigürasyonunda ise %35 - %70 oranları arasında değiştiğini hesaplamışlardır.

Mamun vd. (2011), mikro ölçekte ısı transferini gerektiren yapıdaki bileşenlerden ısının uzaklaştırılmasında kullanılabilecek bir mikro kanallı ısı eşanjörü tasarlamışlardır. Geometrinin mikro kanaldaki hız dağılımını doğrudan etkilediğini göstermek için üç farklı geometri önermişler ve iki boyutlu olarak tasarımı simüle etmişlerdir. Simülasyon sonuçlarının, mikro ısı değiştiricinin verimliliğinin, basınç farkı, hız dağılımı ve ısı transferi etkinliğine göre değiştiğini belirtmişlerdir. Sonuçlardaki temel farklılıkların çeşitli geometrilerin giriş ve çıkış konfigürasyonlarındaki farklılıktan kaynaklandığı tespitinde bulunmuşlardır. Çalışmaları sonucunda dört farklı kanal geometrisi önermişlerdir.

Khan vd. (2013), 13 x 0,35 x 0,5 mm kanal ölçülerinde 21 kanaldan oluşan bir ısı değiştirici tasarlamışlardır. Sınır şartı olarak sabit ısı akısı altında hidrojen ve nitrojen olmak üzere iki farklı akışkanı bu çalışmalarda karşılaştırmışlardır. Hidrojenin, kanallar arasında en düzgün akış dağılımını sağladığını tespit etmişlerdir. Gerçekleştirilen analizler, mikro ısı değiştiricinin etkinliğinin basınç farkına, giriş geometrisine ve ısı akısına göre değiştiğinin tespitinde bulunmuşlardır.

Al-Abbasi (2014), çalışmasında yatay bir boru iç yüzeyine üçgen, dairesel, prizmatik geometriye sahip eklentiler ekleyerek basınç düşüşü ve ısı transferi etkenliğini analiz etmiştir. HAD analiz sonuçlarını Dittus-Boelter teorik referans denklemi ile karşılaştırmışlardır. Akışkan olarak hava kullanan Al Abbasi, Nu sayısı değerini en yüksek disk formulu kanatçık kullandığında elde etmiştir. Ayrıca dairesel formdaki bu kanatçığın sürtünme faktörü değerini %600 oranında artırdığını tespit etmişlerdir.

Sivakumar ve Rajan (2015), çift borulu bir ısı değiştiricide karşıt ve paralel akış modellerini, ısı transferi etkinliği ve sürtünme faktörü açısından analiz etmişlerdir. Akışkan olarak su kullanılan çalışmada boru malzemesi olarak paslanmaz çelik ve döküm demir kullanılmıştır. Sonuç olarak deneysel olarak gerçekleştirilmiş sonuçların, HAD analiz sonuçları ile yakın değerlere sahip olduğunu

tespit etmişlerdir. Sürtünme faktörünün azalmasının ısı transferine olumlu etki yaptığını belirtmişlerdir.

Razali ve Sadikin (2015), mikro kanal içerisindeki akışının belirlenmesi amacıyla üç farklı modelde simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında kare ve dikdörtgen formlu kanallar tasarlayarak basınç, hız ve sıcaklık değerlerini elde etmişlerdir. En yüksek basınç düşüşü değerini kare geometrili mikro kanalda tespit etmişlerdir. Bununla birlikte mikro kanal çıkışında en yüksek hızı 0,57 m/s ile olarak hesap etmişlerdir. Sonuç olarak kare şekilli kanal geometrisinin, dikdörtgen geometriye sahip kanala göre daha iyi sonuçlara sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Çalışma sonuçlarının, doğrulama çalışması ile uyumlu bir şekilde gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

Marzougui vd. (2017), elektronik sistem soğutması için iki farklı mikro kanallı ısı değiştiricinin termal davranışlarını karşılaştırmalı incelemişlerdir. Her iki ısı değiştiricide yapılan çalışmalarda, akışkan olarak damıtılmış su kullanmışlardır. Isı akısı ve hacimsel akış hızının (laminer akış rejiminde) sıcaklık ve ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi üzerinde durmuşlardır. Cihazların avantajları ve sınırlamalarını deneysel sonuçlar ışığında irdelemişlerdir.

Alfarawi vd. (2017), kanal hidrolik çapları 1,5 mm, 1 mm ve 0,5 mm olan üç mini kanallı rejeneratif ısı değiştiricinin (MCRHX) ısı transferini ve akış sürtünmesi etkilerini araştırmak için darbeli metot yöntemine alternatif olarak deneysel çalışma ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD)'ne dayalı bir analiz yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, artan spesifik yüzey alanı nedeniyle 0,5 mm MCRHX'in en yüksek ara yer ısı transfer katsayısına sahip olduğunu göstermiştir.

Patel vd. (2017), kompakt bir ısı değiştirici tasarlamışlardır. Bu kompakt ısı değiştiricinin mikro işlemci için kullanılacak silikon çip gibi elektronik cihazların soğutulması amacıyla kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Özellikle termik santraller, nükleer denizaltılar, uzay taşıtları gibi ağırlığın, basıncın, sıcaklığın kritik olduğu yerlerde tercih edilebilir özellikte olduğunu da vurgulamışlardır. Bu noktada Phatel ve arkadaşları hangi tip ısı değiştiricinin daha verimli bir sonuç alacağını görmek için hem paralel hem de karşıt akışlı ısı değiştirici modellerini incelemişlerdir. Sıcak ve soğuk tarafta kütle akış hızının değiştirilmesiyle karşıt akışlı ısı

değiştiriciden elde edilen ısı transferi değerinin paralel akış tipine sahip ısı değiştiriciye göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Aracı ve Kınacı (2018), boru içi akışlarda oluşan yerel kayıpların, geleneksel boru çapları için kullanılan bağıntılar ile hesaplandığını fakat bu bağıntılardaki katsayıların sabit katsayılar olup akışın özelliklerinin dikkate alınmadığını belirtmişlerdir. Esasında dirsek vb. yerlerde oluşan yerel kayıpların Reynolds sayısının bir fonksiyonu olduğunu dolayısıyla akışkan hızı ve çap ölçüsü gibi parametrelerin kayıp katsayısını doğrudan etkilemekte olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında hem laminar hem de türbülanslı akış rejiminde çeşitli boru bağlantı elemanları için sayısal hesaplamalar gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra bu hesaplamalar literatürdeki katsayılarla karşılaştırılmıştır. HAD analizini, bu hesaplamaları karşılaştırmak için kullanılmışlardır. Sayısal analizler, dirseklerdeki kaybın Reynolds sayısına bağlı olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, iyi modelleme ve ağ yapısı ile bulunan sonuçlar arasında benzerlik olduğunu göstermiştir. Bu çalışmalarda, sayısal analizde ağ yapısının önemli bir faktör olduğunu ve güçlü bir bilgisayar ile ne kadar daha iyi hazırlanabilirse o kadar iyi sonuçlar elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Parkash (2018), yapmış olduğu çalışmada karşıt akışlı çift borulu ısı değiştiricideki akış sıcaklık değişimi ve basınç düşüşü yönünden sayısal analiz yöntemi ile incelemiştir. Birçok araştırmacı, akışkan sıcaklığını değişikliği ve/veya farklı akışkanlar kullanarak karşıt akışlı ısı değiştiricilerin geliştirilmesine yönelik analiz gerçekleştirdiğini bu çalışmada ise ısı değiştiricinin sıcaklık değişimi ve sıcaklık ve kütle akış hızı değişiminden kaynaklanan basınç düşüşü açısından HAD analizini gerçekleştirdiğini belirtmiştir. Gerçekleştirdiği analiz neticesinin literatürdeki örneklerden daha iyi sonuç verdiğini belirtmiştir.

Pasha vd. (2019), değişken termofiziksel özelliklerinin, Nusselt sayısı, yüzey pürüzlülüğü ve farklı kanal çapı, akışkan giriş hızları, ısı akıları ve basınç düşüşü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada değişken özellikler ve sabit özellikler olmak üzere iki kontrol grubu altında analizleri gerçekleştirmişlerdir. Çaplar, giriş hızları ve ısı akılarındaki artış için Nusselt sayısı ve basınç düşüşünün değişken özellikler için sabit özelliklerle karşılaştırıldığında daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Sıcaklığa bağlı değişken özellikler dikkate alındığında ısı transferinin ve basınç düşüşünün önemli ölçüde etkilendiği sonucuna varmışlardır.

Bhaskar ve Rao (2019), Çeşitli konularda akışkan literatürü ve mikro akışlar içindeki ısı transfer kapsamındaki araştırma bulgularına yönelik incelemede bulunarak deneysel ve HAD olmak üzere iki kısımda ayrı ayrı tablo halinde listelemişlerdir. İnceledikleri araştırmaları, mikro kanallarda ve dolayısıyla sabit boyutlara ilişkin devrelerde akışkan türü ve ısı transferi arasındaki farkları ortaya koymakla beraber mevcut literatür verilerinin, anlaşmazlıklara ilişkin kesin sonuçlar öneremediğini belirtmişlerdir. Mikro kanallar içerisinde taşınımı etkileyen parametre miktarlarının yer aldığı daha detaylı çalışmalara ihtiyaç olduğu tespitinde bulunmuşlardır.

Kumar ve Pendli (2020), dairesel bir boruda dikdörtgen geometrilik bir kanatçık (fin) kullanarak türbülanslı akış bölgesinde aynı yapıda kanatsız bir boruyla karşılaştırarak, kanatçık etkisinin ısı transferi ve sürtünme faktörü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Akışkan olarak havanın kullanıldığı bu çalışmada, kanatçık etkisinin ısı transferi değeri ile sürtünme faktörü değerini %400 oranında artırdığını tespit etmişlerdir.

Alsubaei vd. (2021), yaptıkları çalışmada mikro kanatlı boru kullanmışlardır. Bu kullanımın amacını ısı transfer katsayısını artırmaya yönelik pasif bir teknik olmakla birlikte genişletilmiş bir iç veya dış yüzey (kanatlı yüzey) kullanılarak, ısı transferinin gerçekleştiği temas alanı artırılarak kanal içinde kasıtlı olarak türbülans oluşturularak daha iyi ısı transferi kalitesi sağlanması için kullandıklarını ifade etmişlerdir. Bu çalışmada, 30° sabit helis açısına sahip mikro kanatlı bir boru tasarlamışlar ve normal bir boru ile mikro kanatlı bir boru arasındaki ısı transferi oranı ve kalitesinin karşılaştırılmasını göstermek için sayısal analiz yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. Reynolds sayısı çalışma aralığını 2000 – 30000 olarak belirlemişlerdir. Kanatsız boruya kıyasla mikro kanatlı borunun Nusselt sayısındaki artışı %23 oranında tespit etmişlerdir. Mikro kanatlı kanalların termal performans indeksiindeki artışın, düz kanala kıyasla %8 oranında gerçekleştiğini ve basınç kaybının %18 oranında arttığını gözlemlemişlerdir. Buna ek olarak Reynolds sayısı arttıkça çıkış verilerinin teorik sonuçlarla örtüştüğü tespitinde bulunmuşlardır.

Öztürk vd. (2022), bir mikro kanalda nitrojen gazının kayma akışını sayısal analiz yöntemi ile incelemişlerdir. Zaman, işgücü, malzeme, kurulum vb. açılardan HAD analiz yöntemi ile gerçekleştirilen çalışmaların, deneysel metoda karşı güçlü yanlarından bazıları olduğunu belirtmişlerdir.

Kaushik vd. (2023), yaptıkları çalışmada nano akışkan CuO+ZnO+H₂O ve su (H₂O) arasında deneysel ve simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırmalı akışkan akışı ve ısı değişimi özelliklerini incelemek için kanatçıklı veya kanatsız akışkanlı dikdörtgen formu bir mini kanalda çalışma

gerçekleştirmişlerdir. Dikdörtgen şerit kanatlı yapıdaki kanalın, türbülanstaki kazanç nedeniyle kanatsız yapıdaki kanalla karşılaştırıldığında sıvı akışı ve termal parametreler açısından en iyi performansı gösterdiği tespitinde bulunmuşlardır. Optimum sonuçların sağlanmasındaki temel nedenin, dikdörtgen mini kanal üzerinde bulunan kanatçıkların konumlandırılmasıyla elde edilen iyi türbülans, etkili basınç düşüşü ve sıcaklık düşüşü olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun aynı zamanda daha iyi ısı transferi açısından etkili olan artan alana da bağlı olduğunu, mikro kesici uçların geliştirilmiş alanı, kesici uçsuz basit mikro kanala kıyasla %9-%15 oranı arasında daha iyi performans göstererek sonuçları etkilediği tespitinde bulunmuşlardır.

Anjaneya vd. (2023), ANSYS Fluent programını kullanarak mikro kanallı bir ısı değiştiricinin ısıyı dağıtmadaki etkinliğini, hidrolik çap, yüzey alanı ve kanal sayısının faktörlerine bağlı olarak incelemişlerdir. Soğutucu olarak su kullanan dört alternatifli ısı değiştiricinin sayısal analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın sonuçları açısından kanal kesit alanı ve hidrolik çapın artmasıyla yüzey sıcaklığının basit dikdörtgen model için 361 K'den sırasıyla (5-8-11 kanallı kanatçık için) 332 K, 326 K ve 324 K'ye düştüğünü göstermişlerdir. Sekiz kanallı kanat modelinin, temel dikdörtgen modele göre %188 oranında bir artışla diğer modellerle karşılaştırıldığında en iyi genel ısı transfer katsayısına sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Araştırmalarına istinaden aynı giriş koşulları için kanal sayısını artırmanın soğutucunun performansını artırmadığını gözlemlemişlerdir. Gelecekteki çalışmalarda daha kaliteli mikro boru üretmenin önemine değinmişlerdir (çap küçüldükçe pürüzlülüğün yükselmesi vb.).

Guo vd. (2023), mikro kanalın hacimsel debisini ayarlayarak nasıl mikro jet soğutmaya dönüştürüldüğünü sistematik olarak göstermek ve elektronik cihazlarda kullanılan soğutma teknolojilerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamak için aralarında gerçek bir bağlantı olduğunu göstermişlerdir. Mikro kanal soğutmanın, genellikle homojen soğutma ve yoğun akışkan iletimi sağlamak istendiğinde avantajlı olduğunu, ancak mikro jet soğutma belirli noktalarda yoğun soğutma sağlamak istendiğinde tercih edilebilir olduğunu belirtmişlerdir. Tasarım ve uygulama detaylarına göre uygun soğutma yöntemi belirlenmesi gerektiğini ifade etmişlerdir.

Ren vd. (2023), mikro kompozit kanalların üretimi için ilk kez bu çalışmada, ürün işlevini iyileştirebilen ve işletme maliyetini azaltabilen ultra ince bir metal folyo haddeleme üretim yöntemi önermişlerdir. Çalışmalarında farklı hadde hızlarında denemeler yaparak kanal geometrisi, kanal pürüzlülüğü gibi kanal özellikleri incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, tüm numunelerde çıkıntıların ve kanalların asimetrik olduğunu, roller hızının azalmasıyla

çıkıntılarının daha yuvarlak hale geldiğini belirtmişlerdir. Görüş ve öneri olarak ise farklı yuvarlanma hızlarına sahip numuneler için daha düşük bir hızın, mikro kanalların daha yüksek şekillendirme doğruluğu ile üretilmesine yardımcı olacağını belirtmişlerdir. Haddeleme hızı arttıkça, haddeleme işlemi sırasında mikro kanalların yüzeylerindeki mikro çizikler, yapışmalar ve pürüzsüz yüzeyler azaltılabileceği tespitinde bulunmuşlardır. Bu bölümde yapılan çalışmalar Çizelge 1.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 1.2 HAD metodu ile gerçekleştirilen çalışmalar.

Sıra Nu.	Tarih	Çalışma Konusu	Yazar	Malzeme	Akışkan	Geometri
1	2010	CFD Simulation of Hydrodynamic and Thermal Performance of a Micro Heat Exchanger	Nastoll, W & Boyer, Christophe.	Bakır		Kare
2	2011	Analysis Of A Micro-Channel Heat Exchanger	Arif Hasan Mamun, Rakibul Hasan vd.		Nitrojen	Dikdörtgen
3	2013	Flow Behavior and Temperature Distribution in Micro-Channels for Constant Wall Heat Flux	Jane Alam Khan, Rakibul Hasan, vd.		Hidrojen Nitrojen	Dikdörtgen
4	2014	Cfd Analysis Of Enhancement Of Turbulent Flow Heat Transfer In A Horizontal Circular Tube With Different Inserts	Sajid Hussein Ali Al -Abbasi		Hava	Dairesel (finli)
5	2015	Performance Analysis of Heat Transfer and Effectiveness on Laminar Flow with Effect of Various Flow Rates.	K.Sivakumar ve Rajan K.	Aluminyum Döküm demir	Damıtılmış su	Dairesel
6	2015	A CFD Simulation Study On Pressure Drop And Velocity Across Single Flow Micro Channel Heat	Razali, Azizul Aizat & Sadikin, Azmahani.	Paslanmaz Çelik 304 Bakır	Su	Dikdörtgen ve Kare
7	2016	Experimental Investigation of Heat Transfer Characteristics and Cooling Performance of Mini- and Microheat Exchangers	Marzougui, Mbarek & Nmiri, Chiraz & Hammami, Mahmoud	Aluminyum	Su	Trapez ve Kare
8	2017	Transient Investigation Of Mini-Channel Regenerative Heat Exchangers: Combined Experimental And CFD Approach.	Alfarawi, Suliman & AL-Dadah, Raya & Mahmoud, Saad	Paslanmaz Çelik 304	Hava	Dairesel
9	2017	Cfd Analysis Of Minichannel Heat Exchanger Using Water As A Working Fluid	Bhaves K. Patel, Ravi S. Engineer, Mehulkumar H. Tandel	Bakır	Su	Dairesel
10	2018	Boru İçi Akışlarda Basınç Kaybının Sayısal Hesabı	Aracı, S., & Kınacı, Ö. K.		Su	Dairesel
11	2018	Numerical Investigation of Flow characteristics of counter flow heat exchanger-	O Parkash	Aluminyum	Su	Dairesel
12	2019	CFD Study of Variable Property Effects on Laminar Micro-convective Heat Transfer	Pasha, Amjad & Mohammed, Abdul Raheem & Islam, Nazrul & Juhany,		Hava	Dairesel
13	2019	Roughness Effects In Laminar Channel Flow	Liu, Y.; Li, J.; Smits, A.J.			Kare
14	2020	CFD Analysis of Heat transfer Enhancement in a Horizontal Circular Tube using Rectangular type Insert in Turbulent Region.	Kumar, V & Pendli, Dpvp		Hava	Dairesel (finli) Dairesel(finsiz)
15	2021	Numerical Analysis of Heat Transfer Enhancement in Heat Exchangers by using Micro-finned Tube.	Alsubaei, Bader & Akash, Zahid & Imam, Ali	Bakır	Su	Dairesel Boru (dikdörtgen fin)
16	2022	Bir Mikrokanaaldaki Kayma Akışında Basınç Kaybı Analizi	Öztürk, E., Çoştu, R. & Kaya, K.		Nitrojen	Konik Boru
17	2022	. Comparative Experimental and CFD Analysis of Fluid Flow Attributes in Mini Channel with Hybrid CuO+ZnO+H ₂ O Nano Fluid and (H ₂ O) Base Fluid	Kaushik, S., Uniyal, V., Verma, A.K., Jha, A.K., Joshi, S., Makhloga, M.,		Al ₂ O ₃ , ZnO, CuO Su	Dairesel Boru (dikdörtgen fin)
Derleme Çalışmalar						
1	2019	Heat Transfer Analysis Using Cfd Tools An Literature Based Review	Gadipelly Bhaskar & K. V. Narasimha Rao			
2	2023	Numerical simulation of microchannel heat exchanger using CFD	Anjaneya, G., Sunil, S., Kakkeri, S.			
3	2023	Flow And Thermal Analysis Of The Transition Scheme Between Micro-Channel And Micro-Jet Cooling Solution	Yuming Guo, Liang-Liang Fan, Liang Zhao,			

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde dairesel geometriye sahip mini/mikro çalışmalar mevcut olup farklı boru çaplarında, tek bir tip boru malzemesinde (Paslanmaz çelik, silika vb.) ve tek bir akış türünde (laminer ya da türbülanslı akış) çalışmalar yapıldığı tespit edilmiştir. Fakat literatürde farklı boru malzemelerinin (Paslanmaz çelik ve PEEK boru), farklı boru çaplarının ve farklı akış türlerinde aynı anda hem deneysel hem de HAD analizlerin yapılmadığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, literatürde yapılan çalışmalara ek olarak malzeme yönünden paslanmaz çelik ve polietereeterketon (PEEK) olarak iki farklı malzeme, 400, 500 ve 750 μm çaplarında 10, 20, 30, 40 ve 50 ml/dk farklı hacimsel debi değerlerinde deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları referans olarak kullanılmıştır. Çalışılan Reynolds sayısı (280-3200) aralığında olduğundan ANSY Fluent programı ile bilgisayar destekli analizler hem laminer akış yöntemiyle hem de türbülanslı akış yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda bu iki yöntem ile elde edilen değerler ısı transferi ve basınç düşüşü açısından hem kendi aralarında hem de teorik referans denklemlerle kıyaslanmıştır.

BÖLÜM 2

TEMEL KAVRAMLAR

2.1 KÜTLENİN KORUNUMU

Kapalı bir sistemin kütle korunumu bağıntısı, süreç boyunca sistemin kütlelerinin sabit kalacağını gösterir. Kontrol hacmi üzerine kurulu kütle denklemi, birim zamandaki giriş ve çıkışlara odaklanarak, kontrol hacmi sınırları içindeki kütle miktarının değişim hızını açıklar. (Çengel vd., 2008). Şekil 2.1’de bu duruma günlük hayattan basit bir örnek gösterilmiştir.

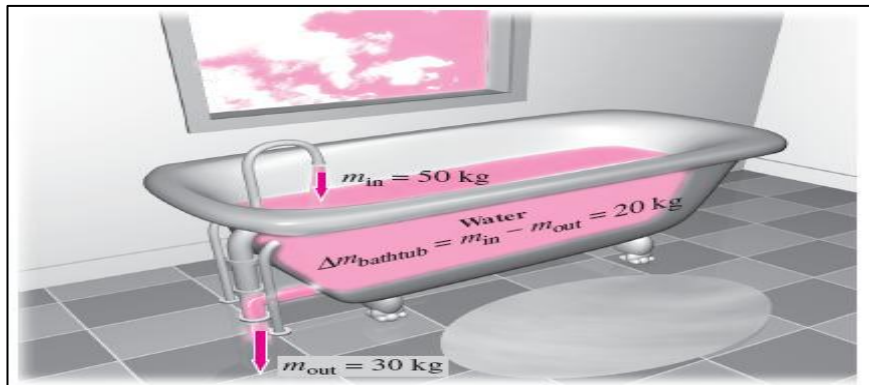
Kontrol hacmi için kütle dengesini, çıkan ve giren kütleli debiler şeklinde denklem 2.1’de şu şekilde ifade edilir;

$$\text{Kütlenin Korunumu: } \dot{m}_{giren} - \dot{m}_{çıkan} = \frac{dm_{kh}}{dt} \quad (2.1)$$

$\dot{m}_{giren}$: Kontrol hacmine giriş yapan kütleli debi

$\dot{m}_{çıkan}$: Kontrol hacminden çıkış yapan kütleli debi

$\frac{dm_{kh}}{dt}$: Kontrol hacmi sınırları dahilinde kütleli debi miktarının değişim hızı olarak tarif edilir.



Şekil 2.1 Kütlenin korunumu. (Çengel vd., 2008).

2.2 MOMENTUMUN DENKLEMİ

Newton'un ikinci kanununa göre, bir nesnenin ivmesi, nesneye etki eden net kuvvetle aynı doğrultuda nesnenin kütlesiyle ise ters orantılıdır. Nesnenin momentum değişim hızı ise nesneye etki eden net kuvvete eşittir (Çengel vd., 2008). Nesnenin kütlesiyle hızının vektörel çarpımı, momentumu (mv) olarak denklem 2.2.'de eşitliğe göre belirtilir.

$$\vec{F} = m\vec{a} = \frac{d(\overline{mv})}{dt} \quad (2.2)$$

2.3 TERMODİNAMİĞİN İKİNCİ YASASI

Bu kanun, faz değişikliklerinin ne yönde meydana gelebileceğini tespit eder. Bununla birlikte enerjinin kütlesinin ve miktarının (niceliği) olduğunu vurgular. Termodinamik 1. Yasa süreç değişiminin yönüne herhangi bir kısıtlama getirmez. Bir süreç değişikliğinin meydana gelmesi için Termodinamik 1. Yasanın karşılanması gerekir, ancak bu yasa hal değişikliklerini tanımlamakta yeterli değildir (Özbey, 2023).

Termodinamik 2. Yasa, 1. Yasanın süreç değişikliğinin olup olmadığının belirlenmesindeki eksikliklerini giderir. İlk yasa, enerjinin bir formdan diğerine değiştiğinde ne olacağını belirleyen enerji miktarıyla ilgilidir. İkinci yasa, faz değişiminin olup olmayacağını ve sistemin veriminin üst sınırını belirler daha basit bir ifade ile değişimin kalitesi ile ilgilenir (Özbey, 2023).

2.4 ISI GEÇİŞİ TANIMI VE ÇEŞİTLERİ

2.4.1 Isı Geçiş

Enerjinin farklı sıcaklıklara sahip birden fazla cisim arasında gerçekleştiği bir süreç ısı transferi olarak adlandırılır. Bu değişim iletkenlik, konveksiyon, ışıma veya üç yöntemin karışımı yoluyla gerçekleşir (Canay, 2007).

2.4.2 Isı Geçişi Çeşitleri

Isı geçişleri iletimle, taşınım, ışınlama ısı geçişi olmak üzere üç farklı yolla gerçekleşir. Bazı durumlarda ise bunların her ikisinin yahut üç durumun bir arada gerçekleştiği karma ısı geçişi de oluşabilir.

2.4.2.1 İletimle Isı Geçişi

Isı transferi, iletim yoluyla moleküllerin doğrudan birbirleriyle çarpışması sonucunda gerçekleşir. Daha yüksek enerji seviyelerine sahip olan kinetik enerji alanları, enerjiyi daha düşük kinetik enerji seviyelerine transfer eder. Bu transfer sırasında daha yüksek hızdaki parçacıklar, daha düşük hızdaki parçacıklarla çarpışır. Ancak, bu çarpışmalar sonucunda düşük hızdaki parçacıkların kinetik enerjisi artar. İletim, fiziksel temas yoluyla gerçekleşen en yaygın ısı transferi yöntemidir. Örneğin, bir metal nesneyi yanan bir ateşin üzerine yerleştirmek, iletimle ısı geçişinin bir örneğidir. Denklem 2.3 bağıntısı ile ısı iletimi;

$$\dot{q}_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

olarak ifade edilir.

Bu formülde:

$\dot{q}_x$: X yönünde gerçekleşen geçiş için geçerli olan birim alana dik bileşendir(W/m²).

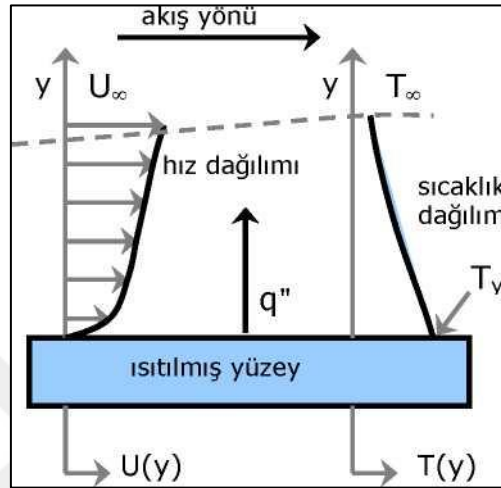
k : Isıl iletkenlik katsayısı (W/mK).

dT/dx: Isı geçiş yönündeki sıcaklık gradyeni, birim kelvin başına metrekaare cinsindendir.

Denklem 2.3'te yer alan eksi işaret, sıcaklığın azalan yönde gerçekleşen mekanizmasını temsil eder.

2.4.2.2 Taşınım İle Isı Geçişi ve Newton' un Soğuma Kanunu

Hareketsiz bir yüzey ile üzerinden akan akışkan arasındaki ısı alışverişine ısı taşınımı adı verilir. Bu durumda, hareketsiz yüzey ile akışkan arasındaki sınır tabakasında sıcaklık farkından kaynaklanan bir tür ısı iletimi meydana gelir.



Şekil 2.2 Levha üzerindeki akışta hız ve sıcaklık dağılımları. (Canay, 2007).

Şekil 2.2'deki gibi yüzey ile temas halinde olan akışkan arasındaki gerçekleşen ısı geçiş mekanizması görülmektedir. Denklem 2.4'de belirtildiği şekliyle bu eşitlik "Newton' un Soğuma Kanunu" olarak adlandırılır.

$$Q = hA(T_s - T_a) \quad (2.4)$$

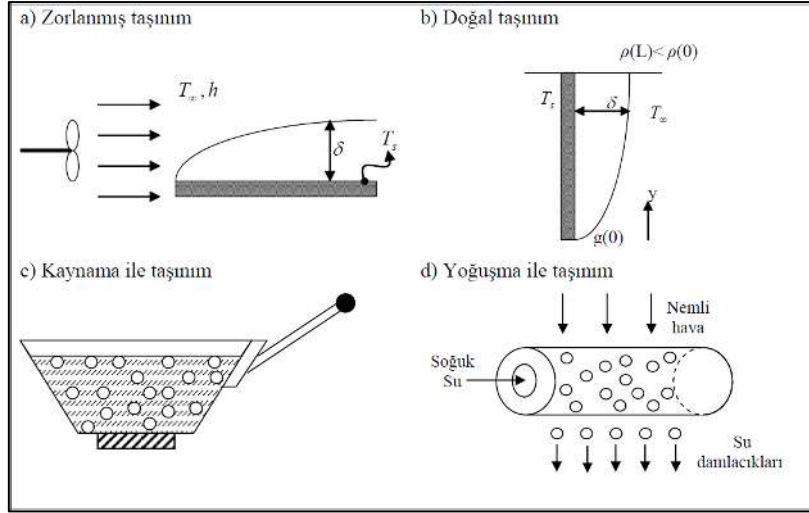
T_s : Yüzey sıcaklığı, (K)

T_a : Akışkan sıcaklığı, (K)

A : Yüzey alanı (m^2)

h : Isı taşınım katsayısı (W/m^2K)

Şekil 2.3'te ısı taşınım çeşitleri bazı örneklerle gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Isı taşınım çeşitleri. (Yeşilata, 2007).

2.4.2.3 Radyasyon (Işınım) ile Isı Geçişi

Sıcaklığın yükselmesi, taneciklerin hareketini artırarak ışıma enerjisini artırır; bu nedenle, elektromanyetik dalgalarla iletilen ısı akımına ısı ışıma (radyasyon) denir. Denklem 2.5’de görüldüğü üzere mutlak sıcaklık ve ışıınımı ile yayılan ısı enerjisi, alanla doğru bir orantıya sahiptir. Uzun boşluğu vb. ortamlarda ısı sadece ışıınım yoluyla gerçekleşir. Genel bir örnek olarak güneşten dünyamıza yayılan sıcaklık ve aydınlanma ışıınım yoluyla gerçekleşir (Canay, 2007).

$$Q = \sigma A T_y^4 \quad (2.5)$$

σ : Orantı katsayısı (Stefan-Boltzmann katsayısı) ($\text{W/m}^2\text{K}^4$)

A: Isı ışıınımı yayan yüzeyin alanı (m^2)

T_y : Yüzeyin mutlak sıcaklığı (K)

2.5 MİNİ/MİKRO KANALLARIN TANIMI VE GELİŞİMİ

2.5.1 Mini/Mikro Kanallar

Genel olarak literatürde milimetre ve mikrometre arasında değişen boyutlarda dar, uzun, helisel, konik vb. değişik geometrik şekillere sahip kanallar mikro ve mini kanal olarak isimlendirilir.

2.5.2 Mini/Mikro Kanalların Tarihi

Özellikle mikroelektronik ve mikrosistem teknolojilerinin gelişimi, mikro kanalların tarihiyle bağlantılıdır. 1981 yılında Stanford Electronics Laboratories kurumundan araştırmacılar Norman Tuckerman ve Robert Pease, ilk mikro kanal fikrini öneren kişilerdir. Bu araştırmacıların beklentisi, mikro kanalların cihazlar üzerinde oluşan ısıyı transfer ederek ortam sıcaklığının optimum seviyelerde olması ve entegre devrelerin performansını artırılması üzerine oluşmaktaydı (Andou vd., 2007).

Mikro kanallar, tarihsel serüveni boyunca ilgi uyandırdı ve çok sayıda uygulama ve araştırmada kullanılmaya devam edilmektedir. Günümüzde genellikle ısı transferi sistemlerinde kullanılmasının yanında, uzay ve havacılık alanında da kullanımın yaygınlaşmasıyla yoğun bir ilgi görerek üzerinde çok çeşitli araştırmalar gerçekleştirilmekte ve farklı projeler üzerinde başarı ile uygulanmaktadır.

2.5.3 Mikro Kanalların Sınıflandırılması

Bu kanallar, özellikle ısı transferi, akustik, optik, biyokimya gibi alanlarda, akışkan olarak su, yağ, amonyak, nano akışkan vb. akışkanların kullanıldığı özel kanallardır.

Mikro kanalların, kanal çap ölçüsüne göre yapılan bir sınıflandırma örneği Çizelge 2.1'deki gösterilmiştir. Ayrıca; bu konuda, araştırmacılar arasında bir uzlaşma da yoktur. 10 mm genişliğindeki dikdörtgen kanallar üzerinde yapılan çalışmalarla birlikte 1,5 mm çapındaki dairesel kesitli borularda yapılan çalışmalar da literatürde "mikro kanallar " olarak geçebilmektedir.

Çizelge 2.1 Mikro ve mini kanalların boyutsal sınıflandırması (Andou vd., 2007).

Mikro kanallar	$10 \mu\text{m} < D < 200 \mu\text{m}$
Mini kanallar	$200 \mu\text{m} < D < 3 \text{ mm}$
Makro kanallar	$D > 6 \text{ mm}$

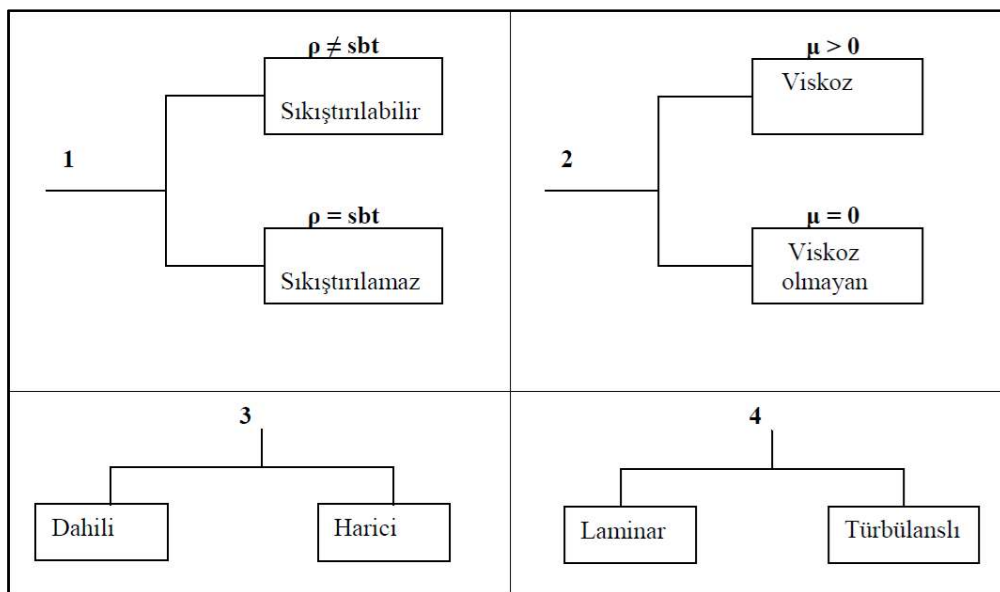
2.5.4 Mini/Mikro Kanalların Kullanım Sebepleri

Bir ısı değıştiricisinin tipik mikro kanal ölçüleri genellikle birkaç yüz mikrometre genişlik ve yüksekliğe sahiptir. Mikro kanallar, sahip oldukları bu boyutları sayesinde yüksek ısı transfer etkinliğine sahiptir. Ayrıca hafif yapıları ve düşük çalışma akışkan miktarı gereksinimleri, taşınabilir olmaları gibi önemli avantajlara sahip olduklarından ötürü tercih edilmektedirler.

2.6 MİKRO-MİNİ KANALLARDA ISI GEÇİŞİ VE AKIŞ

Mini/mikro kanallarda meydana gelen ısı transferi ve akış, geleneksel boyutlardaki kanal akışlarına göre farklı bir dinamik yapıya sahiptir.

Isı taşınımını genel olarak zorlanmış ısı taşınımını ve doğal ısı taşınımını olarak ikiye ayırılır. Akışkan hareketli olduğunda, yani bir fan, pompa, kompresör gibi araçlarla taşınım sağlandığında "Zorlanmış Isı Taşınımı" olarak adlandırılır. Diğer bir durumda, yoğunluk farkları nedeniyle taşınım sağlandığında, yani akışkan hareketsiz ise "Doğal Isı Taşınımı" olarak adlandırılır (Canay, 2007). Zorlanmış Isı Taşınımı Şekil 2.4'te olduğu gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 2.4 Taşınım ile ısı geçişi çeşitleri. (Yeşilata, 2007).

2.6.1 Sıkıştırılabilir ve Sıkıştırılamaz Akışlar

Eğer bir akışta yoğunluk değişiklikleri göz ardı edilebiliyorsa, yani yoğunlukları sabitse, bu durumu sıkıştırılamaz bir akış olarak tanımlanabilir. Genel olarak sıvıları sıkıştırılamaz kabul edebilir. Bu tanımın tam zıttı sahip akışkanlara da sıkıştırılabilir akışkan denir. Gazlar bu konuda en yaygın örnektir. Bununla birlikte her iki kategoride de bazı istisnalar vardır.

2.6.2 Viskoz ve Viskoz Olmayan Akışlar

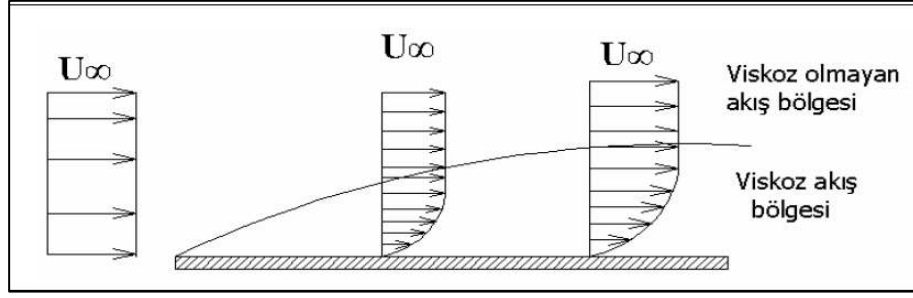
Moleküler sürtünme nedeniyle, viskoz akışlarda akışkanın hız profili genellikle taban seviyeden yükseldikçe değişir. Bu tür akışlar genellikle yağlı sıvılar veya kalın karışımlar gibi maddelerle ilişkilidir. İçsel sürtünme, bir akışkanın hız profili üzerinde bir düşüşe neden olabilir. Şekil 2.5'te bazı akışkanlar arasındaki viskozite farklılıkları gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Bazı akışkanlar arasındaki viskozite farklılıkları. Bilgiustam (2023).

Yağlar, sıvı gıdalar, kimyasal ürünler ve hatta kan gibi viskoz sıvılar tipik olarak viskoz akışlar olarak sınıflandırılır.

Viskoz olmayan akış, akışta viskozite etkisinin ihmal edildiği bir durumu ifade eder. Akışkan viskozitesi, taşınma sorunlarında yüzey ile akışkan arasında hidrodinamik (hız) ve termal (sıcaklık) bir sınır tabakası oluşturur (Yeşilata, 2007). Bu tabakanın evrimi Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Laminer akışta düz levha üzerinde sınır tabakanın evrimi. (Yeşilata, 2007).

2.6.3 Laminer ve Türbülanslı Akışlar

Akışkanın düzenli bir şekilde hareket ettiği, basit bir tabirle çarşaf gibi düzgün bir akış rejimine laminer akış denir. Laminer akışta her katman birbirinden ayrılır ve düzgün ve tanımlanmış hız profilleri vardır. Akış katmanları arasında rastgele hareket ve karışma yoktur. Düşük Reynolds sayısına sahip akışlarda sıklıkla görülür. Akışta mevcut olan viskoz etkiler güçlü ve belirgindir.

Türbülanslı akışta, ısı her yönde titreşimlerle taşınırken, laminer akışta ısı sadece dik yönde iletilir. Bu nedenle, türbülanslı akış, laminer akışa kıyasla daha yüksek bir ısı transfer etkinliğine sahiptir. (Erdoğan, 2016).

Isı taşınım katsayısını artırmak için, genellikle kanal veya boru içinde türbülans artırıcı yöntemler, denemesi yapılan pratikler arasında yer almaktadır. Akışkan ile kanal iç yüzeyi arasındaki ısı transferi ilişkisinde, ısıl sınır tabakası büyük bir öneme sahiptir. Sınır tabakası, laminer akışta kalın bir yapıda olup, türbülanslı akışta daha ince bir yapıya sahiptir (Incropera, 2002).

2.6.4 Akışın Giriş Bölgesi Gelişimi

Bir boru, kanal veya farklı geometrik yapıya sahip akışkan taşıyan sistemlerde, akışkanın hızı, sıcaklığı ve diğer özelliklerindeki değişikliklerin meydana geldiği yer giriş bölgesidir.

Giriş bölgesinde akışın gelişimi, akışkanın sisteme girişi sırasında düzensizliklerin ve etkileşimlerin azalmasıyla gösterilir. Akışkan bu bölgede sisteme adapte olur ve istikrarlı bir akış düzeni oluşturur. Genellikle giriş bölgesi, akışın tamamen gelişmiş ve istikrarlı hale geldiği bölgeden önce gelir (Çengel vd., 2014).

Bu bölgenin temel özellikleri şu şekilde belirtilebilir;

- **Hız Profili Değişiklikleri:** Akış, sisteme giriş sırasında giriş bölgesinde hız profili değişikliklerini gösterir. Başlangıçta hız profili düzensizdir, ancak zamanla bölgede düzene girmektedir.
- **Sıcaklık Dağılımı:** Giriş bölgesinde sıcaklık değişimi de olabilmektedir. Sıcaklık profili, sisteme ait ısı eşanjörleri tarafından değiştirilebilir.
- **Laminer ve Türbülans Akış Geçişi:** Giriş bölgesinde akış tipik olarak laminar akıştan türbülanslı akışa geçer. Bu geçiş tipik olarak karmaşıktır.
- **Basınç Kaybı ve Enerji Kaybı:** Giriş bölgesinde akışın düzensizliği basınç ve enerji kaybına neden olabilmektedir.
- **Karışma ve Homojenleşme:** Akışın giriş bölgesindeki giriş koşullarına uyarlanmasının bir sonucudur.

Giriş bölgesi, ısı transfer sistemlerinin tasarım ve analiz süreçlerinde çok önemlidir çünkü bu bölgede sistem parametrelerinin belirlenmesi ve akışın istikrarlı hale gelmesi gerekir. Mühendislik uygulamalarında sistemin performansını optimize etmek için, akışın bu bölgedeki davranışını anlamak çok önemlidir. Bu kısımları izah edecek olursak;

- **Akışkanın hidrodinamik giriş bölgesi:** Borunun girişinden hızın tam olarak geliştiği yere kadar olan bölümüne atıfta bulunulur.
- **Hidrodinamik giriş uzunluğu (L_h):** Hidrodinamik giriş bölgesinin uzunluğunu ifade eder. Hidrodinamik giriş uzunluğu genellikle boru girişinden itibaren, çeper kayma gerilmesi ve sürtünme faktörünün tam gelişmiş bölgedeki değeri ile %2'lik bir fark kaldığı mesafeye kadar ölçülmektedir. Denklem 2.6, 2.7 ve 2.8'de akış rejimlerine göre hidrodinamik giriş uzunlukları listelenmiştir.

$$\frac{L_{h,laminer}}{D} \cong 0,05 Re \quad \text{Laminer akış} \quad (2.6)$$

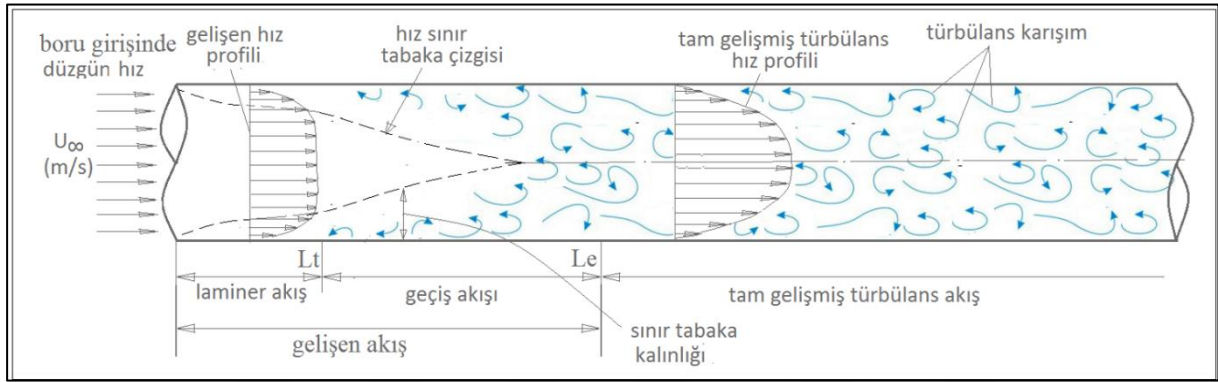
$$\frac{L_{h,türbülanslı}}{D} \cong 1,359 Re^{1/4} \quad \text{Türbülanslı Akış} \quad (2.7)$$

$$\frac{L_{h,türbülanslı}}{D} \cong 10$$

Türbülanslı Akış Ort. L_h

(2.8)

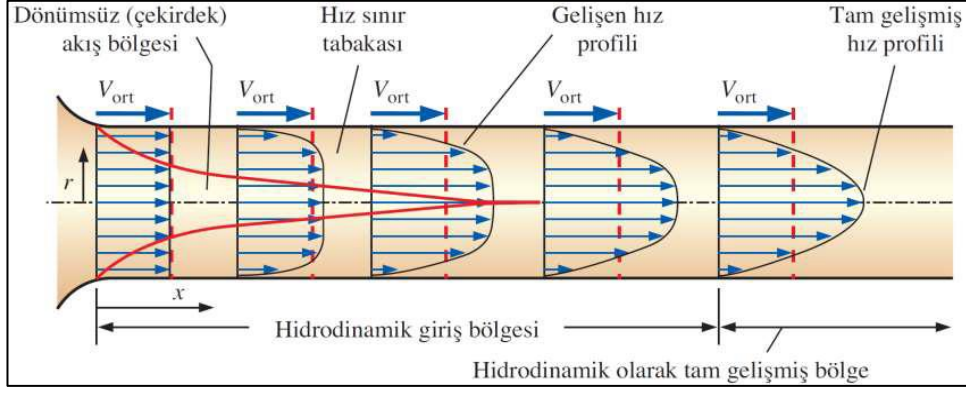
Pratikte kullanılan borular genellikle giriş bölgesi uzunluğuna kıyasla daha uzundur. Bu nedenle boru akışları genellikle boru boyunca tamamen gelişmiş olarak kabul edilir. Bu sadeleştirici yöntem, uzun borular için anlamlı sonuçlar ortaya koyabilirken kısa borular için uygun değildir. Bunun sebebi çeper kayma gerilmesi ve sürtünme faktörü, kısa borular için gereken değerlerin altında kalır (Cengel vd., 2014). Şekil 2.7’de dairesel bir geometri içerisinde meydana gelen hız sınır tabakasının gelişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Boru iç yüzeyinde gerçekleşen akış hız sınır tabakasının gelişimi. (Düz, 2018).

- **Hidrodinamik Gelişen Akış:** Bu aşamada hız profili gelişmeye devam etmektedir.
- **Hidrodinamik Olarak Tam Gelişmiş Akış:** Giriş bölgesinin ötesinde, hız profili tamamen gelişmiş ve değişmeyen bir bölgeye atıfta bulunur.
- **Tam Gelişmiş Akış:** Hidrodinamik gelişiminin yanı sıra ısı gelişimi yönünden de tamamen gelişmiş akışı tanımlar.

Şekil 2.8’de akışın hidrodinamik gelişim aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 2.8 Akış hidrodinamik giriş bölgesi. (Cengel vd., 2014).

2.6.5 Harici ve Dahili Akış

Akışın tamamen katı yüzeylerle çevrili olduğu tipte bir akış "dahili" veya "kanal içi" akış olarak adlandırılır. Sınırsız bir akış içerisindeki, katı cisimlerin yüzeyinde gerçekleşen akış ise harici yahut dış akış olarak isimlendirilir. Örneğin uçak kanadı etrafındaki akış yahut rüzgâr türbini kanadı üzerindeki akış bu tip bir akışa örnek verilebilir.

2.7 MİNİ/MİKRO KANALLARDA ISI GEÇİŞİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

2.7.1 Giriş Etkileri

Akışkan mekaniğinde ve ısı transferinde, "mikro kanal girişi" terimi sıklıkla kullanılır. Bu terim, mikro ölçekli boruların veya kanalların giriş bölgesinde meydana gelen farklı etkilere atıfta bulunur. Bu etkilerden kısaca bahsetmek gerekirse;

- **Laminer Akışta Meydana Gelen Bozulma:** Mikro kanallarda akış tipik olarak düz tabakalar şeklindedir. Ancak kanalın giriş bölümünde akış profili bozulabilir. Bu, özellikle kanalın giriş bölümünde meydana gelen hızlı değişiklikler nedeniyle olabilmektedir.
- **Giriş Eşiği Etkisi:** Mikro kanallarda, özellikle çok küçük çaplarda, akışın başlaması veya düzenli bir şekilde devam etmesi için belirli bir minimum akış hızı gereklidir. Bu kritik hız giriş eşiği olarak tanımlanır.
- **Akışta Ani Hızlanma:** Kanal girişinde ve kanal boyunca mikro ölçekte akışkan hızında belirli bir ivmelenme vardır. Bu ivmelenme ölçek etkisinin meydana getirdiği karakteristik bir özelliktir.

2.7.2 Ölçek Etkileri

Mini ve mikro kanalların uzunluklarına nispeten çaplarının çok küçük olması bazı özel etkiler meydana getirir. Buna bağlı durumları kısaca özetlemek gerekirse;

2.7.2.1 Yüzey Alanı ve Hacim Oranları

Mikro kanalların büyük yüzey alanı ve küçük hacim oranları, yüzey etkileşimlerini ve ısı transferini artırıcı bir etkiye sebep olabilir.

2.7.2.2 Viskozitenin Akışa Etkisi

Mikro ölçekli kanallarda, viskoz akışın etkisi genellikle daha belirgindir. Kanal boyutları küçüldükçe, viskoz kuvvetler diğer etkilere göre daha önemli hale gelebilir.

2.7.2.3 Yüzey Pürüzlülüğü

Akışkanlar mekaniğinde, yüzey pürüzlülüğü, bir akışkanın bir yüzey üzerindeki düzensizlikler nedeniyle oluşan etkileşimleri ve bu pürüzlülüklerin akışkan davranışına olan etkilerini inceler. Yüzey pürüzlülüğü, bir malzemenin veya yüzeyin düzensizliklerinin boyutu, şekli ve yüzeydeki dağılımı gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir.

2.8 BOYUTSUZ SAYILAR

Boyutsuz sayılar, akışkanın, yüzeyin ve ısı transferinin özelliklerini belirlemede önemli parametrelerdir. Taşınım ısı transferinde sıklıkla kullanılan bazı boyutsuz sayılar şunlardır:

2.8.1 Reynolds Sayısı (Re)

Reynolds sayısı, akışkanın hareketinin ve akışın belirli bir noktasındaki hızını ifade eder. Bu sayı, akışın laminar veya türbülanslı olup olmadığını belirlemede önemlidir (Yeşilata, 2007). Denklem 2.9’da bu kavram belirtilen kuvvetlerin oranı şeklinde ifade edilmiştir.

$$Re = \frac{vD_h}{\nu} = \frac{\text{Atalet Kuvveti}}{\text{Viskoz Kuvveti}} \quad (2.9)$$

V : Akışkanın sahip olduğu ortama hızı (m/s),
 D_h : Hidrolik Çap (mm),
 ν : Kinematik Viskozite (m^2/s)

$Re_D \leq 2300$ Laminer Akışı
 $2300 \leq Re_D \leq 4000$ Geçiş Bölgesi Akışı
 $Re_D \geq 4000$ Türbülanslı Akış

2.8.2 Nusselt Sayısı

Akışkan tabakasındaki ısı transferi, akışkanın hareket içerdiği durumda taşınım ile gerçekleşirken, akışkan tabakası hareketsiz olduğu durumlarda iletimle gerçekleşir. Nusselt sayısı, denklem 2.10'da gösterildiği gibi taşınım ile gerçekleşen ısı transferi değerinin iletimle gerçekleşen ısı transfer değerine bölünmesiyle elde edilir. (Incropera, 2002).

$$Nu = \frac{hL}{k} = \frac{\text{Akışkanın Taşınım ile Isı Transferi}}{\text{Akışkanın İletimle Isı Transferi}} \quad (2.10)$$

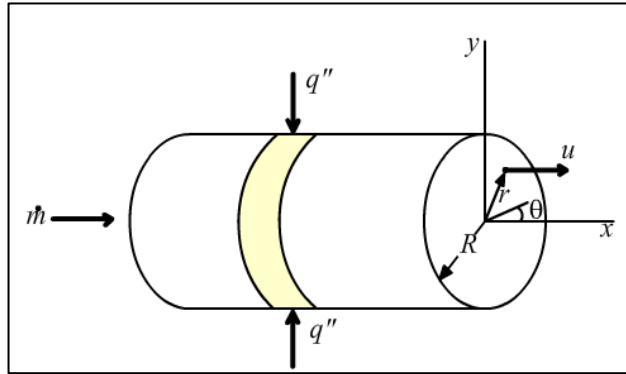
h : Isı taşınım katsayısı (W/mK),
 D_h : Hidrolik Çap/Uzunluk (m),
 k : Isıl iletkenlik katsayısı (W/mK)

2.9 ISI TRANSFERİ HESAPLAMALARINDA KULLANILAN TEMEL DENKLEMLER

2.9.1 Sabit Yüzey Sıcaklığında ($T_s=\text{sabit}$) Isı Transferi

Sabit yüzey sıcaklığı koşulu, borunun dış yüzeyinde kaynama veya yoğuşma gibi bir faz değişim prosesi meydana geldiğinde gerçekleşir. Sabit yüzey ısı akısı durumu, borunun her yönden eşit şekilde ışınlama ile ısı geçişine veya elektrik dirençli ısıtmaya tabi tutulmasıyla gerçekleşir. Dairesel kesitli bir kanalda tam gelişmiş laminer akış koşullarında, yüzeyde sabit sıcaklık gerçekleşen ısı transferinin olduğu durumda Nu sayısı sabit kalır ($Nu=3,66$).

Bir boru yüzeyinde ya sabit yüzey sıcaklığı ya da sabit yüzey akısı olabilir ancak her ikisi birden olamaz. Şekil 2.9’da silindirik bir kanalda ısı geçişi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Silindirik kanalda ısı geçişi. (Parlak, 2010).

2.9.2 Sabit Isı Akısı Şartlarında Isı Transferi ($q_s = \text{sabit}$)

Isı akısı, bir sistemden diğerine enerji transferinin bir ölçüsüdür ve bu enerji genellikle sıcak bir ortamdan soğuk bir ortama doğru taşınır. Isı akısı, birim zamanda birim alana düşen ısı transferini ifade eder. Fiziksel birimi (Watt/m^2) olarak ifade edilir (Hvac Global, 2023).

Dairesel kesitli bir kanalda tam gelişmiş laminar akış koşullarında, yüzeyde sabit ısı akısıyla gerçekleşen ısı transferinin olduğu durumda Nu sayısı sabit kalır ($\text{Nu}=4,66$). Çizelge 2.2’de zorlanmış ısı taşınımı için teorik bağıntılar listelenmiştir.

Çizelge 2.2 Boru içi zorlanmış akış için teorik denklemler.

Boru İçi Akışlar İçin Zorlanmış Isı Taşınım Bağıntıları			
Laminer Akış			
Laminer Akış Hidrodinamik Giriş Uzunluğu	$\left[\frac{x_h}{D} \right]_{\text{lam}} \cong 0,05 \text{Re}_D$	(Akışkan özellikleri T_m sıcaklığında)	(5.9)
Laminer Akış Isıl Giriş Uzunluğu	$\left[\frac{x_T}{D} \right]_{\text{lam}} \cong 0,05 \text{Re}_D \text{Gz}$	(Akışkan özellikleri T_m sıcaklığında)	(5.10)
Tam Gelişmiş Akış (Sabit Yüzey Sıcaklığı Şartı)	$\text{Nu}_D = 3,66$	(Tam gelişmiş akış, $T_m, q_s = \text{sbt}$, $\text{Pr} \geq 0,6$)	(5.11)
Tam Gelişmiş Akış (Sabit Isı Akısı Şartı)	$\text{Nu}_D = 4,36$	(Tam gelişmiş akış, $T_m, T_s = \text{sbt}$, $\text{Pr} \geq 0,6$)	(5.12)
Termal Giriş Bölgesindeki Laminer Akış	$\text{Nu}_D = 3,66 + \frac{0,0668 / (D/L) \text{Re}_D \text{Pr}}{1 + 0,04 \left[(D/L) \text{Re}_D \text{Pr} \right]^{2/3}}$	($T_m, \text{Pr} > 1$, $T_s = \text{sbt}$)	(5.13)
Türbülanslı Akış			
Hidrodinamik ve Isıl Giriş Uzunluğu	$\left[\frac{x_h}{D} \right]_{\text{turb}} = \left[\frac{x_T}{D} \right]_{\text{turb}} \geq 10^D$		(5.14)
Tam Gelişmiş Akış (Dittus -Boelter)	$\text{Nu}_D = 0,023 \text{Re}_D^{4/5} \text{Pr}^n$	Soğutma için $n=0,3$ Isıtma için $n=0,4$	(5.15)

2.10 HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) VE TARİHİ GELİŞİMİ

Akışkanlar mekaniği, akışkanın hem hareketli hem de durağan durumlarını inceler. Bu incelemeler gerçekleştirilirken akışın hareket özelliklerini belirleyen matematiksel denklemler kullanılır. Akışkanın hareketi deneysel, teorik ve sayısal yöntemlerle incelenir. Akışkanın hareketini tanımlamak için Lagrange ve Euler yöntemi olmak üzere iki farklı yaklaşım vardır.

2.10.1 Nümerik Yöntemler

2.10.1.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Mühendislik sorunlarını çözmek için en yaygın sayısal yöntemlerden biridir. Problemi matematiksel bir fonksiyon haline getirmek kısmi diferansiyel çözümün ilk adımıdır. Bu yöntemle karmaşık mühendislik sorunlarını kolayca çözebilir.

Bu metodun temelinde, karmaşık yapılar veya sistemler matematiksel modellemelerle temsil edilir ve bu modeller, daha küçük parçalara, yani elemanlara bölünür. Her eleman, üzerindeki fiziksel davranışı temsil etmek için matematiksel denklemlerle ifade edilir. Bu elemanlar bir araya getirilerek geniş bir sistem oluşturulur. Denklemler, yapı üzerindeki kuvvetler, deplasmanlar ve malzeme özellikleri gibi faktörlere dayanır. Sayısal çözüm yöntemleri kullanılarak elde edilen bu denklemler, bilgisayar programları aracılığıyla çözülerek sistem üzerindeki gerilme, deplasman, sıcaklık dağılımı gibi çeşitli büyüklükler hesaplanır.

2.10.1.2 Sonlu Hacimler Yöntemi

Bu yöntem, Sonlu Farklar Yöntemi ile oldukça benzerdir. Sonlu Hacimler Yöntemi (SHY), kısmi diferansiyel denklemlerin hacim integrallerini yüzey integrallerine dönüştürerek çalışır. Bu terimler ise her bir sonlu hacmin yüzeyindeki akışları temsil eder. Analiz edilen bölge, kontrol hacimleri olarak adlandırılan küçük parçalara ayrılır; bu hacimler üzerindeki kütle, enerjinin ve momentumun giriş ve çıkışları dengelenir. Denklemler, sayısal integrasyon yöntemleri ve iteratif çözüm teknikleri kullanılarak, akışkanların hareketi ve enerji transferi gibi karmaşık fiziksel olayların modellenmesine imkân sağlar.

2.10.2 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

Akışkanların dinamik hesaplamaları yapılırken matematiksel denklemleri çözmek için yüksek hesaplama gücüne sahip bilgisayar programları veya yazılım paketleri kullanılır. Bu programlar aracılığı ile nümerik simülasyonlar kullanılarak akışkan analizleri gerçekleştirilir. Şekil 2.10'da HAD yöntemiyle bir hava taşıtı üzerinde yapılan dış akış analizi görseli paylaşılmıştır.

Hesaplamalı Akışkan Dinamikleri (HAD) olarak da bilinen Computational Fluid Dynamic (CFD), bilgisayar tabanlı bir mühendislik yöntemidir ve akış alanı ile diğer fiziksel detayları gösterebilir. HAD, çok fazlı akışlar, katı-sıvı etkileşim analizleri, dönen parçaların analizleri ve ileri türbülans modelleri gibi birçok uygulamada doğru ve hızlı sonuçlar sağlamaktadır. (Karadeniz Teknik Üniversitesi Akademik Veri Yönetim Sistemi, 2023).



Şekil 2.10 HAD yöntemi ile dış akış çizgileri tasvir edilmiş bir uçak tasarımı. (Econ Engineering, 2019).

2.10.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin Tarihi Süreci

1920'li yıllar sayısal analizin ilk temellerinin atıldığı zamanlardır. 1950'li yıllarda ise önemli sayısal yöntemler geliştirilmiştir.

Thom (1933), silindir etrafındaki akış için ilk nümerik hesaplamayı geliştirmiştir. Kawaguti (1953), silindir çevresindeki akışın analizini Navier-Stoke denklemleri ile gerçekleştirmiştir.

1960'lı ve 1970'li yıllarda birçok HAD algoritması geliştirilmiştir. 1980'li yıllarda, aerodinamik çözümlerin ilk uygulama denemeleri yapılmıştır. Bu dönemde, araştırmacılar kendi konularına özgü ihtiyaçlar için kişisel yazılımlar geliştirmişlerdir. (Ansys, 2023).

1990'lı yıllar ilk ticari yazılımların piyasaya sürüldüğü zamanlardır. Donanımsal ve yazılımsal teknolojinin gelişmesi ve yaygınlaşması ile özel amaçlı ve genel amaçlı programlar ortaya çıkmıştır.

2000'li yıllardan güncel tarihe kadar HAD programlarının genel gelişimi ise genel başlıklar altında şu şekilde ele alınabilir:

- **Hesaplama Gücü ve Paralel İşleme:** Bilgisayarların hesaplama gücündeki önemli gelişmeler, daha karmaşık ve yüksek çözünürlüklü simülasyonların gerçekleştirilmesine izin verdi.
- **Kullanıcı Arayüzü ve Kullanılabilirlik:** Yazılımların kullanıcı arayüzü ve kullanılabilirliği büyük ölçüde iyileşti. Bu, daha geniş bir mühendislik topluluğunun HAD araçlarını daha iyi kullanmasına yol açtı.
- **Çeşitli Akış Koşullarının Modellenmesi:** Programlar artık çok çeşitli akış koşulları için kullanılabilir hale geldi. Bu durum, çok fazlı akış analizleri, aerodinamik, ısı analiz ve diğer karmaşık konularda daha iyi bir modelleme ve analiz imkânı sağladı.
- **Optimizasyon ve Tasarım Uygulamaları:** Tasarım süreçlerine daha fazla etkenliğin artması ile birlikte, mühendisler tasarımlarını geliştirmek için HAD simülasyonlarını daha iyi kullanma imkanına sahip oldular.
- **Hesaplama Maliyetleri:** Simülasyonlarının hesaplama maliyetlerinde azalma meydana gelmesi, daha fazla insanın büyük çaplı simülasyonları gerçekleştirmesine olanak sağladı.
- **Doğrulama ve Validasyon:** Analizin doğruluğunu artırmak için yapılan çabaların bir sonucu olarak, simülasyon sonuçları daha iyi ve gerçek dünya verileriyle uyumlu hale geldi. Bu nedenle, HAD analizleri endüstriyel uygulamalarda daha güvenilir hale geldi.

Şekil 2.11'de HAD programların endüstride kullanım alanlarından bazıları gösterilmiştir.



Şekil 2.11 HAD programlarının endüstride kullanım alanlarına örnekler. (Topçuoğlu, 2020).

Güncel piyasa da hali hazırda kullanılan belli başlı HAD programları;

- ANSYS Fluent
- OpenFOAM
- COMSOL Multiphysics
- Autodesk CFD
- Siemens Simcenter STAR-CCM
- NUMECA Fine/Marine
- Dassault Systèmes SIMULIA (Abaqus CFD)

olarak listelenebilir. Programların ismi ve etkenlikleri, birbirine göre güçlü yanları farklı olsa da genel olarak aynı mantık ve çözüm sistematığına sahiptir.

Bu çalışma kapsamındaki sayısal analizler, ANSYS Fluent programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.10.4 Ağ Bağımsızlığı (Mesh Independency)

HAD analizlerinde oluşturulan geometri için ağ yapısı hazırlanırken iki ana faktöre dikkat edilmesi gerekir:

1. Mesh kalite kriterleri,

2. Ağ yakınsaklığının sağlanması.

Ağ Yakınsaması, Grid Bağımsızlığı veya Mesh Yakınsaması gibi isimlerle bilinen bu kavram ağ yapısı oluştururken kullanılacak eleman sayısının optimum değerde seçilmesidir. Bu optimum değer analiz sonuçlarındaki elde edilen değerlerin belli bir eleman sayısından sonra sabitlenmesidir. Bu sınırı tayin etmek için birden fazla analiz gerçekleştirilerek analiz değerlerinin belirli bir eleman sayısından sonra değişmediği kritik sınır değeri tespit edilir.

Bir ağ yapısında gereksiz yere fazla eleman kullanılması, analizlerin süresini aşırı uzatmakta ve kullanılan bilgisayarı çok fazla yormakta, sistemsel hatalara sebep olabilmektedir. Gerekli eleman sayısından daha az sayıda eleman kullanmak ise hem değerlerde değişken sonuç vererek gerekli hassasiyet yakalanamayacağı için bu tip analizlerde kritik eleman sayısının tespit edilerek analizlerin optimum eleman sayısı aralığında gerçekleştirilmesi gerekir.

2.10.5 HAD Analizinin Tercih Edilme Sebepleri

Hesaplamalı akışkanlar mekaniği analizinin tercih edilme sebeplerinden bazılarını belirtmek gerekirse;

- Deney düzeneğinin kurulmasının ve bu imkanların fiziksel olayların modellenmesinde ve hesap edilmesinde meydana getirdiği zorluklar.
- HAD analizlerinin ekonomik olarak avantajlı olması, deney düzenekleri ve testler için gereken mali külfetten kurtarması.
- Analizlerin deney tehlikesi veya tehlikeli sistemleri incelemede insan etkileşimi ve kaza/ölüm riskini minimize etmesi.
- Zamandan tasarruf sağlanması açısından, değişkenlerin sisteme tekrar tekrar farklı değerlerde girilerek seri ve hızlı bir şekilde analiz imkânına sahip olunması.
- Mobilitesi yüksek seviyede olup, herhangi bir dizüstü bilgisayar ile istenilen yerde analizlerin gerçekleştirilebilmesi.

BÖLÜM 3

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 MİNİ/MİKRO KANALDA AKIŞIN DENEYSEL ANALİZİ

Deneysel çalışma aşamasında ilgili araştırma konusuna göre önce deneysel düzenek malzemelerinin seçimi yapılır daha sonra ise deney düzeneği kurulumuna geçilir.

Kurulum sonrası gerçekleştirilen deneysel çalışmada hedeflenen, en iyi ısı transferi performansını en optimal basınç düşüşü değerinde sağlayan mini/mikro malzeme, boru çapı ve hacimsel debi değerinin belirlenmesidir. Bu çalışmalar yapılırken boru çapları, malzeme cinsi ve debi gibi değişken parametrelerin ısı transferi ve basınç düşüşüne etkisi incelenir.

Bu çalışmada, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi (ZBEÜ) bünyesinde bulunan ‘mini/mikro kanal deney düzeneği’ ile daha önce gerçekleştirilen deneysel bir çalışmanın analiz sonuçları referans olarak alınmıştır. Bu bölümde kısaca deneysel çalışmanın içeriğinden ve elde edilen verilerden bahsedilecektir.

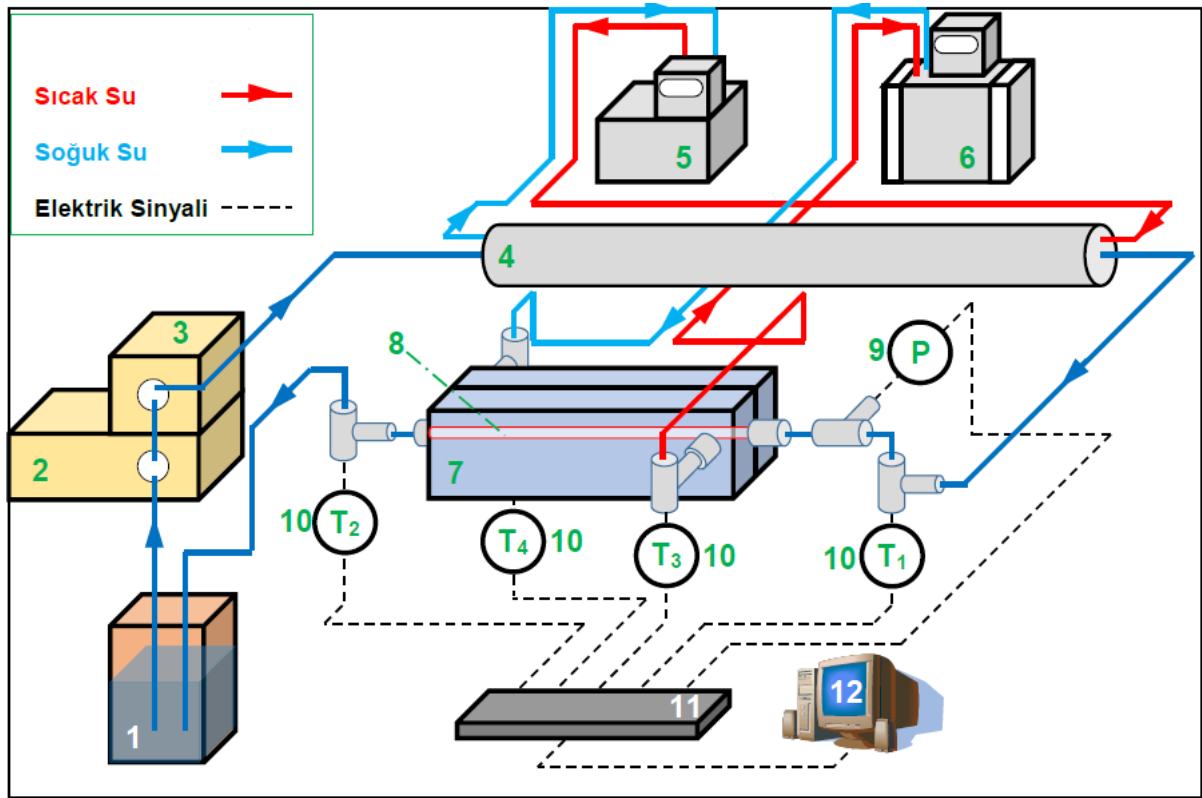
3.1.1 Deney Düzeneği

Genel olarak bir mini/mikro kanallı deney düzeneklerinde kullanılan teçhizatlar aşağıda listelenmiştir;

- Mini/Mikro borular
- Gerekli debiyi sağlayacak hassas bir pistonlu pompa
- Baz akışkan için depo
- Basınç ayarlaması ve kontrolü için basınç regülatörü
- Sıcaklık ölçümleri için kanal giriş ve çıkışlarına ayrıca gerekli yerlere sıcaklık ölçerler
- Isıtma ve soğutma işlemleri için ısı banyoları
- Isı değiştiricileri

- Sistem boru ve bağlantı elemanları
- Debi ölçümleri için hassas terazi yahut debimetre
- Veri toplama cihazı
- Verilerin alındığı bilgisayar ve bilgisayar programı

Temsili olarak Şekil 3.1’de ZBEÜ bünyesinde bulunan örnek bir mikro kanal deney düzeneği, Çizelge 3.1’de ise düzende kullanılan cihaz ve malzemeler verilmiştir.



Şekil 3.1 Temsili bir deney düzeneği. (Erdoğan, 2016)

Çizelge 3.1 Deney setinde kullanılan malzeme ve cihazlar (numaralı şekilde).

1: Nanoakışkan Tankı	7: Polimer Isı Değiştirici
2: Pompa	8: Mikro boru
3: Basınç Regülatörü	9: Basınç Sensörü
4: Paslanmaz Çelik Isı Değiştirici	10: Sıcaklık Sensörü
5: Isı Banyosu (Isıtma)	11: Veri Toplayıcı
6: Isı Banyosu (Soğutma)	12: Bilgisayar

3.1.2 Kullanılan Mini/Mikro Borular ve Pompa Seçimi

Bu tip deneysel çalışmalarda, mikro boru ile pompa arasında doğrudan bir ilişki bulunması ve bu ikilinin uyumlu olması önemli bir husustur. Bunun sebebi küçük çaplı borular için çok düşük debi ve yüksek basınç, büyük çaplarda ise yüksek debi sağlayabilen bir pompa gereksinimin ortaya çıkmasıdır. Ancak, aşırı yüksek maliyetleri nedeniyle hem yüksek basınçlı hem de yüksek debili pompaların kullanılması mümkün olmadığı için ya yüksek basınca sahip ya da yüksek bir debiye sahip daha ekonomik bir pompa seçilmesini gerektirir.

Bu durumda da yüksek basınçlı bir pompa tercih edildiği vakit sağlanan debi miktarı düşük olacaktır. Bu durum büyük iç çaplı mikro borularda küçük ve dar bir Reynolds sayısı aralığına neden olmakla birlikte anlamlı grafiksel sonuçlar elde etmek mümkün olmayacaktır (Erdoğan, 2016).

Bunun yerine yüksek debiye sahip bir pompa tercih edilirse, bu seferde küçük iç çaplı mikro borularda pompanın sağlayabileceği basınç belirli bir sınırdan kalarak yetersiz olacaktır. Sonuç olarak, debi ve basınç özellikleri bakımından bu zorlayıcı etmenler deneysel sınır şartlarının oluşturulmasında ana etkenlerden biri olmuştur. Bu durumlar göz önüne alındığında 400,500 ve 750 mikrometre çap değerlerinde, iki farklı akış türünde de deneysel çalışmalar yapabilmek için 0-50 ml/dk debi aralığında çalışan Gibson marka yüksek basınçlı (0-600 bar) pistonlu pompa seçilmiştir (Erdoğan, 2016).

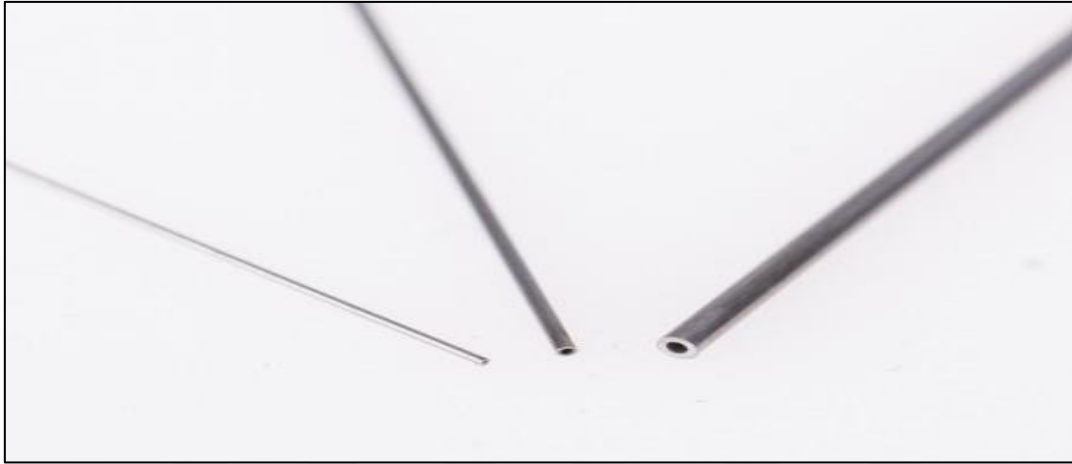
Hesaplanan basınç değerlerine ve çalışma sıcaklık değerlerine uygun şekilde, paslanmaz çelik ve polietereketon (PEEK) olarak iki farklı boru malzemesi kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan boruların anma çapları ve gerçek iç çap ölçüleri Çizelge 3.2’de paylaşılmıştır.

Çizelge 3.2 Deney düzeneğinde kullanılan boru anma çapları ve gerçek iç çap ölçüleri.

Malzeme Cinsi	Paslanmaz Çelik (SS)	Polietereketon (PEEK)	Gerçek Çap Ölçüleri	Yüzey Pürüzlülüğü
Boru Çap Ölçüsü-1	400 µm	400 µm	381 µm	50 µm (SS)- 12,5 µm PEEK
Boru Çap Ölçüsü-2	500 µm	500 µm	508 µm	50 µm (SS)- 12,5 µm PEEK
Boru Çap Ölçüsü-3	750 µm	750 µm	762 µm	50 µm (SS)- 12,5 µm PEEK

3.1.2.1 Paslanmaz Çelik ve Paslanmaz Çelik Borular

Paslanmaz çelik, demir alaşımlarının bir çeşididir. Paslanmaz çelikler içerlerinde belirli miktar krom ($Cr > \%10,5$) ve en fazla $\%1,2$ oranında karbon içermelidir. Krom oksit tabakası (Cr_2O_3) paslanmaz çeliğin yüzeyinde bir oksit tabakası oluşturarak malzemeyi oksijenle temastan korur (Borşen, 2023). Şekil 3.2’de farklı çap ölçülerinde paslanmaz çelik mini/mikro boru tipleri örnek olarak gösterilmiştir.

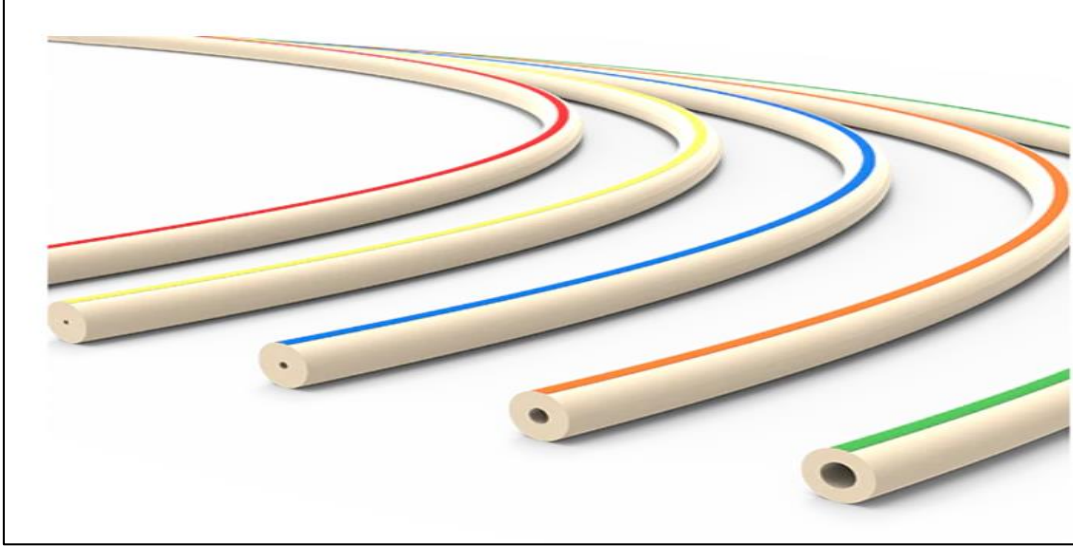


Şekil 3.2 Farklı çap ölçülerine sahip paslanmaz çelik mikro/mini borular ($P_{max}=400 - 1520$ bar, $T_{max}=289$ C°) (Heegermaterials, 2023).

Paslanmaz çelik borular, muhteviyatındaki krom ve nikel gibi elementlerin belirli bir yüzde dahilinde bulundurması sebebiyle çeşitli endüstriyel uygulamalarda korozyona karşı mukavemeti yüksek olduğu için tercih edilir (Sesinoks, 2023).

3.1.2.2 Poly Eter Eter Keton (PEEK) Borular

Kimyada polietereterketon olarak bilinen PEEK malzemesi, levha, çubuk ve içi boş çubuk vb. formlarda üretilir. PEEK, mükemmel kimyasal uyuma sahip bir yarı kristal mühendislik termoplastiğidir (Ensinger Plastics, 2023). Şekil 3.3’te bazı PEEK boru tipleri gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Farklı çap ölçülerine sahip PEEK mikro/mini borular ($P_{max}=138-690$ bar, $T_{max}=100$ C°) (Vici Jour, 2023).

PEEK polimeri yüksek sıcaklık plastiği kullanılarak yapılan parçaların erime noktası yaklaşık 341°C veya 614K'dir. Genellikle sıcak su veya buhar ortamlarında kullanılan PEEK plastik, çekme ve esneme gibi fiziksel özelliklerini önemli ölçüde korur (Ensinger Plastics, 2023).

3.1.3 Kullanılan Akışkan ve Hacimsel Debilerin Seçimi

Literatürde saf su ile yapılan çalışmaların çok olması, dolayısıyla mevcut deney düzeneğinde doğrulama deneyleri yapabilme ve literatürdeki çalışmalarla kıyaslama yapılabilmesi yönünden akışkan olarak saf su seçilmiştir.

Debi aralığının 0-50 ml/dk seçilmesinin sebebi ise deneysel çalışmalarda kullanılacak mevcut çaplarda (400, 500 ve 750 mikrometre) elde edilen Reynolds Sayısı aralığının laminar, geçiş bölgesi ve türbülanslı akış bölgelerinde ısı transferi ve basınç düşüşü değerlerini analiz etmek içindir. (Erdoğan, 2016).

3.1.4 Deneysel Analiz Sonuçlarının Elde Edilmesi

Deneysel çalışmalarda her iki farklı boru, üç farklı çap ve beş farklı debi değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Veriler Windcom markalı veri cihazı ile deneylerin en az üç kez tekrarlanması ile elde edilmiştir (Windcom, 2023). Şekil 3.4'te paslanmaz çelik malzeme için gerçekleştirilmiş bir deneysel analiz ölçümü paylaşılmıştır.



Şekil 3.4 SS400 paslanmaz boru için 20 ml/dk hacimsel debi ölçümü.

Elde edilen bu değerler her bir debi değeri için aritmetik ortalama değerleri baz alınarak sıcaklık değerleri tayin edilmiştir. Deneysel çalışmada basınç sensörleri vasıtasıyla ölçülen basınç kaybı değerlerine göre de sürtünme faktörü katsayıları hesaplanmıştır. Son olarak sıcak akışkan çıkış sıcaklık değerleri kullanılarak deneysel ısı transfer hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

Deneysel analiz çalışma parametreleri Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 Deneysel yöntem çalışma parametreleri.

Sıra	Deneysel Faktör	Seviyesi
1	Mikro kanal malzeme türü	Paslanmaz Çelik (SS) ve Polietereeterketon (PEEK)
2	Mikro kanal boru çapları	400-500-750 (μm)
3	Mikro kanal uzunluğu	20 cm
4	Sıcak akışkan giriş sıcaklığı	Ort. 30 C°
5	Sabit yüzey sıcaklığı değeri	10 C°
6	Kullanılan akışkan türü	Saf Su
7	Sıcak akışkan hacimsel debi	10-20-30-40-50 (ml/dk)
8	Soğutucu akışkan hacimsel debi	12 (l/dk)
9	Mikro kanal pürüzlülük değeri	$\epsilon_{\text{SS}} (400,500,750)=50 \text{ } (\mu\text{m})$ $\epsilon_{\text{PEEK-Tümü}}=12.5 \text{ } (\mu\text{m})$

3.1.5 Sürtünme Faktörü Katsayısı Hesaplamaları

Borulama sistemlerinde basınç kaybı hesaplamalarında genellikle üç tip problemle karşılaşılır (Çengel ve Cimbala, 2010).

- 1 Belirli bir hacimsel debi (veya hız) değeri için verilen boru uzunluğu ve çapıyla basınç düşüşünün hesaplanması.
- 2 Belirli bir basınç düşüşü için verilen boru uzunluğu ve çapıyla hacimsel debinin hesaplanması.
- 3 Belirli bir basınç düşüşü için verilen boru uzunluğu ve hacimsel debi değeri ile boru çapının hesaplanması.

Bu çalışmada hacimsel debi değerleri, boru uzunluğu ve boru çap ölçüleri belirli olduğu için ilk sıradaki problem yöntemine uymaktadır. Bu yöntemle göre gerçekleştirilen çözüm sıralaması; İlk aşamada hacimsel debi değerleri yardımı ile ortalama hız değerleri denklem 3.1 ile hesap edilir;

$$V_{ort} = \frac{\forall}{A_{c,in}} = \frac{\forall}{\pi D^2 / 4} \quad (3.1)$$

$\forall$: Hacimsel Debi (m³/s)

$A_{c,in}$: Mikro kanal iç kesit alanı (m²)

D : Mikro kanal iç çapı (m)

İkinci aşamada ortalama hız değerlerine göre Reynolds sayısı değerleri denklem 3.2 ile hesap edilir. Bu değer bize akışın rejimi hakkında ön bilgi verir.

$$Re = \frac{\rho V_{ort} D_h}{\mu} = \frac{v D_h}{\nu} \quad (3.2)$$

ρ : Yoğunluk (kg/m³)

μ : Dinamik Viskozite (kg/ms)

Üçüncü aşamada Moodys diyagramından ya da verildiyse eğer verilen değerleri kullanarak borunun bağıl pürüzlülük değeri denklem 3.3 yardımı ile hesap edilir.

$$Bağıl\ pürüzlülük = \frac{\varepsilon}{D} \quad (3.3)$$

Burada $\mathcal{E}$: Boru pürüzlülük katsayısıdır.

Deneysel çalışma özelinde basınç sensörleri vasıtası ile basınç kaybı değerleri ölçülmüştür fakat çalışmaya ait yerel basınç kaybı değerleri toplam basınç kaybı değerlerinden çıkarılarak net basınç kaybı şeklinde ilgili hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel hesaplamalara göre en fazla sürtünme basınç kaybı 16,11 bar ile 381 mikrometre çapındaki paslanmaz çelik boru da ve 50ml/dk hacimsel debi değerinde elde edilmiştir. PEEK boruda en fazla sürtünme basınç kaybı aynı çap ve debi değerinde 5,52 bar olarak tespit edilmiştir.

Bu çalışmada ölçülen basınç kaybı değerleri esas alınarak Darcy, Haaland ve Blasius, boru sürtünme faktörleri hesap edilmiştir.

Örnek olarak basınç kaybı ölçülen bir sistemde, Darcy-Weisbach eşitliği yardımı ile sürtünme faktörleri değerleri denklem 3.4 ile hesaplanabilir.

$$\Delta P = \Delta P_K = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_{ort}^2}{2} \quad (\text{Pa}) \quad (3.4)$$

Ölçülen sürtünme basınç kaybı değerlerine denk gelen pompalama güç hesapları ise hacimsel debi değerleri ile çarpılarak denklem 3.5 ile gösterilen şekilde hesap edilmiştir.

$$\dot{W}_{pompa} = \dot{V} \Delta P \quad (\text{Watt}) \quad (3.5)$$

Bu basınç kaybına paralel olarak en fazla pompalama güç ihtiyacı paslanmaz çelik mini/mikro boru için 1,34 W ve PEEK mini/mikro boru için 0,46 W olarak hesap edilmiştir. Çizelge 3.4'te deneysel analiz basınç ölçüm değerleri, sürtünme faktörü değeri hesaplamaları ve gerekli pompa yükü hesaplamaları paylaşılmıştır.

Çizelge 3.4 Deneysel analiz basınç kaybı ölçümleri ve diğer hesaplamalar.

HESAPLAMALAR						
Aşama 1 Basınç kaybı değerleri deneysel yöntemle ölçüldü.						
			Hacimsel		ṽ (mL/dk)	
			Debi			
			10	20	30	40
SS400	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f_{exp}} = (\text{bar})$	1,46	3,46	5,92	10,66
SS500	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f_{exp}} = (\text{bar})$	0,22	0,46	0,73	0,93
SS750	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f_{exp}} = (\text{bar})$	0,06	0,12	0,15	0,20
PEEK400	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f_{exp}} = (\text{bar})$	0,57	1,18	1,77	3,43
PEEK500	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f_{exp}} = (\text{bar})$	0,17	0,45	0,75	1,07
PEEK750	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f_{exp}} = (\text{bar})$	0,05	0,10	0,15	0,20
Aşama 2 Basınç kaybı değerleri yardımı ile sürtünme basınç faktörleri hesap edilir.						
			Hacimsel		ṽ (mL/dk)	
			Debi			
			10	20	30	40
SS400	Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f_{exp}} / [(L/D_n) \rho V^2 / 2]$	0,261	0,155	0,118	0,119
SS500	Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f_{exp}} / [(L/D_n) \rho V^2 / 2]$	0,166	0,087	0,061	0,044
SS750	Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f_{exp}} / [(L/D_n) \rho V^2 / 2]$	0,343	0,172	0,095	0,072
PEEK400	Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f_{exp}} / [(L/D_n) \rho V^2 / 2]$	0,102	0,053	0,035	0,038
PEEK500	Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f_{exp}} / [(L/D_n) \rho V^2 / 2]$	0,128	0,085	0,063	0,050
PEEK750	Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f_{exp}} / [(L/D_n) \rho V^2 / 2]$	0,286	0,143	0,095	0,072
Pompa Yüklü Hesabı						
Aşama-3 Hacimsel debi ile sürtünme basınç kaybı değerleri çarpılarak pompa yükü değerleri hesap edilir.						
			Hacimsel		ṽ (mL/dk)	
			Debi			
			10	20	30	40
			1,667E-07	3,333E-07	5,000E-07	6,667E-07
SS400	W_{pompa}	$\dot{V} \Delta P_{f_{exp}} \text{ (Watt)}$	0,024	0,115	0,296	0,711
SS500	W_{pompa}	$\dot{V} \Delta P_{f_{exp}} \text{ (Watt)}$	0,004	0,015	0,037	0,062
SS750	W_{pompa}	$\dot{V} \Delta P_{f_{exp}} \text{ (Watt)}$	0,001	0,004	0,008	0,013
PEEK400	W_{pompa}	$\dot{V} \Delta P_{f_{exp}} \text{ (Watt)}$	0,010	0,039	0,089	0,229
PEEK500	W_{pompa}	$\dot{V} \Delta P_{f_{exp}} \text{ (Watt)}$	0,003	0,015	0,038	0,071
PEEK750	W_{pompa}	$\dot{V} \Delta P_{f_{exp}} \text{ (Watt)}$	0,001	0,003	0,008	0,013

3.1.6 Isı Transferi Hesaplamaları

Akışkan olarak saf su kullanılan deney düzeneğinde, farklı debilerde ve 10 (C°) sabit yüzey sıcaklığı şartı altında ortalama 30 (C°) saf su giriş sıcaklığı ile sistem çalıştırılarak saf suyun çıkış sıcaklıkları ölçülmüştür. Saf suyun giriş ve çıkış sıcaklık farkları, kütleli debi ve özgül ısı değerleri kullanılarak soğutma yükleri denklem 3.6'ta belirtilen şekilde hesap edilmiştir.

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T \quad (3.6)$$

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T$$

$\dot{Q}$: ısı transferi (Watt)

$\dot{m}$: akışkanın kütleli debisi (kg / s)

c_p : akışkanın özgül ısı (kJ / kgK)

ΔT : mikro kanala giren ve çıkan akışkanın mutlak sıcaklık farkı (C°)

ile ifade edilir.

Soğutma yükü değerleri hesap edildikten sonra bu değerlerin mikro kanal iç yüzey alanı ile logaritmik sıcaklık farkı değerlerinin çarpımına bölünmesi ile ısı taşınım katsayıları (h) denklem (3.7) ile elde edilmiştir.

$$h_{exp,in}=Q_{exp}/A_{(s,in)}\Delta T_{ln} \quad (W/m^2K) \quad (3.7)$$

Isı taşınım katsayılarının da iç çap ölçüleri ile çarpımı sonucu elde edilen değer, ısı iletim katsayısına bölünmesi ile Nusselt sayı değerleri denklem 3.8'de gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.

$$Nu_{exp,in}=h_{(exp,in)}D_{in}/k \quad (3.8)$$

Çizelge 3.5'te deneysel çalışmanın ısı transferi hesaplamaları gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 Isı transferi hesaplamaları.

Q SOĞUTMA YÜKÜ						
Hacimsel Debi	$\dot{V}$ (mL/dk)	Hacimsel Debi		$\dot{V}$ (mL/dk)		
		10	20	30	40	50
SS400	$Q_{exp}=mC_p(T_{out}-T_{in})$ (W)	10,1	17,4	23,4	30,4	40,2
SS500	$Q_{exp}=mC_p(T_{out}-T_{in})$ (W)	11,4	21,4	27,3	34,8	39,6
SS750	$Q_{exp}=mC_p(T_{out}-T_{in})$ (W)	15,8	22,1	30,7	35,4	40,6
PEEK400	$Q_{exp}=mC_p(T_{out}-T_{in})$ (W)	7,7	14,3	18,9	24,2	29,7
PEEK500	$Q_{exp}=mC_p(T_{out}-T_{in})$ (W)	9,9	15,6	22,0	27,2	
PEEK750	$Q_{exp}=mC_p(T_{out}-T_{in})$ (W)	8,2	14,4	19,4	25,4	32,1
ISI TAŞINIM KATSAYILARI						
Hacimsel Debi	$\dot{V}$ (mL/dk)	Hacimsel Debi		$\dot{V}$ (mL/dk)		
		10	20	30	40	50
SS400	$h_{exp,in}=Q_{exp}/A_{(s,in)}\Delta T_{ln}$ (W/m²K)	3534	5624	6914	8929	11710
SS500	$h_{exp,in}=Q_{exp}/A_{(s,in)}\Delta T_{ln}$ (W/m²K)	3296	5871	6942	8445	9157
SS750	$h_{exp,in}=Q_{exp}/A_{(s,in)}\Delta T_{ln}$ (W/m²K)	3477	4208	5125	5648	5883
PEEK400	$h_{exp,in}=Q_{exp}/A_{(s,in)}\Delta T_{ln}$ (W/m²K)	2332	4159	5035	6369	7871
PEEK500	$h_{exp,in}=Q_{exp}/A_{(s,in)}\Delta T_{ln}$ (W/m²K)	2540	3449	4771	5531	
PEEK750	$h_{exp,in}=Q_{exp}/A_{(s,in)}\Delta T_{ln}$ (W/m²K)	1298	2087	2683	3384	4251
NUSELDT SAYISI						
Hacimsel Debi	$\dot{V}$ (mL/dk)	Hacimsel Debi		$\dot{V}$ (mL/dk)		
		10	20	30	40	50
SS400	$Nu_{exp,in}=h_{(exp,in)}D_{in}/k$	2,23	3,54	4,34	5,61	7,35
SS500	$Nu_{exp,in}=h_{(exp,in)}D_{in}/k$	2,78	4,94	5,84	7,09	7,68
SS750	$Nu_{exp,in}=h_{(exp,in)}D_{in}/k$	4,38	5,32	6,46	7,11	7,39
PEEK400	$Nu_{exp,in}=h_{(exp,in)}D_{in}/k$	1,96	2,61	3,15	3,98	4,92
PEEK500	$Nu_{exp,in}=h_{(exp,in)}D_{in}/k$	2,13	2,89	3,99	4,61	
PEEK750	$Nu_{exp,in}=h_{(exp,in)}D_{in}/k$	1,63	2,62	3,36	4,23	5,32

3.2 MİNİ/MİKRO KANALDA AKIŞIN HAD ANALİZİ

Bu bölümde analizin daha düzgün anlaşılması ve özgünlüğüne bağlı kalmak için çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde kullanılmış olan HAD terimleri listelenmiştir. Kullanılan programlar ithal kaynaklı olduğu (İngilizce) ve sektörde kullanılan bu terimlerden oluşan dil artık bir meslek dili haline geldiği için karşılıklarına Türkçe terim uydurmaktan ziyade orijinal terimlerle konuyu ifade etmenin, konunun anlaşılması açısından faydalı olacağı değerlendirilmiştir. Bu terimler kısaca:

- **CFD:** Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)
- **Geometry:** Çalışmanın iki (2D) veya üç (3D) boyutlu tasarımın gerçekleştirilmesi yahut gerçekleştirildiği kısım.
- **Mesh:** Çalışmanın hesaplamalarının yapılması için değişik yüzey şekillerinde (tetragonal, hexagonal vb.) yüzbinlerce yahut milyonlarca küçük parçaya ayrılarak ilgili nümerik denklemlerle çözümlemesi için oluşturulmuş ağ yapısı. Bu ağ yapısını oluşturmak bu işin ustalık kısmını oluşturmaktadır. Bu kısmı iyi oluşturmak analizin kalitesi için en önemli noktadır. İyi bir mesh ağı oluşturmak için çok iyi teorik ve pratik bilgiler daha önceki çalışma ve vakalardan elde edilen tecrübeler, keskin bir analiz ve gözlem gücü gerektirir. Bu çalışmada bu bölümü oluştururken literatürde oluşturulan benzer mesh ağ yapıları incelenmiş denenmiş tekrar tekrar analiz yapılarak en ideal mesh kalitesi oluşturulmaya çalışılmıştır.
- **Skewness** : Mesh kalite kriteridir. Skewness değeri genellikle 0 ile 1 arasında ölçülür. İdeal bir durumda, bir hücrenin kenarları birbirine tamamen eşit olduğunda skewness değeri 0'a eşittir. Ancak, hücrenin kenar uzunlukları arasındaki farklar arttıkça, skewness değeri artar. Bir nevi parçayı oluşturan mesh hücrelerinin çarpıklığının ölçüsüdür. Maksimum skewness değerinin 0'a yakın olması istenir.
- **Orthogonal Quality:** Mesh kalite kriteridir. Orthogonal quality değeri genellikle 0 ile 1 arasında ölçülür. İdeal durumda, orthogonal quality değeri 1'e eşittir, yani hücre kenarları birbirine tamamen dik açılar yapar. Düşük bir orthogonal quality değeri, hücrelerin düzensiz ve kenarlarının birbirine dik olmadığı bir yapıyı gösterir. Minimum orthogonal quality değerinin 1'e yakın olması istenir.
- **Aspect Ratio:** Mesh kalite kriteridir. Aspect ratio, uzunlamasına bir elemanın en geniş noktasındaki çapraz boyutu ile boyu arasındaki oranı hesaplamak için sıklıkla kullanılır. Bir elemanın aspect ratio değerinin 1 olması idealdir; bu durumda, eleman kare veya dikdörtgen şeklinde olacaktır. Elemanın perspektif oranı arttıkça, daha çok uzunlamasına veya daralmış bir şekle dönüşür. İdeal olanı 100 birimin altında olmasıdır. Bu çalışmada boy uzunluğu çap

büyüklüğüne göre çok uzun olan mikro-mini borular kullanıldığı için aspect ratio oranı yüksek çıkmıştır.

- **Inflation:** Özellikle geometride mevcut olan kritik yerlerin hassas bir şekilde mesh oluşturularak daha net analiz sonuçları almak için mesh eleman sayısının bu bölgelerde artırılma işlemine denir.
- **Setup:** Bu kısım ele alınan vakanın mesh yapısı oluşturulduktan sonra analiz edilebilmesi için oluşturulan ağ yapısında eldeki verilerin sisteme tanıtılarak ve çevresel ve sistemsel faktörlerin ayarlandığı analizin yapıldığı bölümdür.
- **Models:** HAD analizinde ele alınan çalışmanın(vaka) faz yapısı ısı transferi olup olmadığı, viskoz modellemesi, ısı değiştirici, radyasyon ışıınımı, faz ayrışması vb. durumların ayarlandığı kısımdır.
- **Materials:** Sistemde kullanılan akışkanın ve malzeme özelliklerinin ayarlandığı kısımdır.
- **Cell Zone Conditions:** Sistemdeki akışkanın sisteme tanıtıldığı ve özelliklerinin ayarlandığı kısımdır.
- **Boundary Conditions:** Sisteme elimizdeki çalışmanın sınır şartlarını girdiğimiz kısımdır. Bu kısım setup bölümünde önem arz etmektedir. Kontrollü değişikliklerin ana kısmı bu bölümde yapılarak analizler tekrarlanmaktadır. Boundary conditions bölümü, Inlet, Outlet, Wall diye isimlendirilen sırasıyla giriş, çıkış ve yüzey olmak üzere üç kısımdan oluşur.
- **Reference Values:** Bu kısım sisteme tanıtılan input (giriş) değerlerinin hangilerini referans alınarak analiz yapılacağı ve kontrolünün yapıldığı yerdir.
- **Solution:** Setup bölümünün çözümleme ayarlamalarının yapıldığı kısımdır.
- **Methods:** Analizin hangi metotla gerçekleştirileceğine karar verilen ve ayarlamaların yapıldığı kısımdır. Bu çalışmada gerçekleştirilecek analizler için farklı tipte metotlar denenmiş ve en ideal sonuçların alınabileceği metot tayin edilmiştir.
- **Report Definitions:** Analiz sonucunda hangi değerleri elde edilmek isteniyorsa, sisteme raporlama yapılabilmesi için raporlama ayarlarının tanımlandığı kısımdır.
- **Residual:** Anlam olarak “artık” anlamına gelmektedir. Bu değer genel olarak, residuals, çözüm sürecindeki her bir iterasyonun ardından, matematiksel denklemlerin gerçek çözümü ile yaklaşık çözüm arasındaki farkı(artık) ifade eder. Bu değer ne kadar düşük elde edilirse, çözümün o kadar yakın değerde elde edileceğinin(konverjans) ön göstergesidir.
Bu çalışmada residual değeri ortalama 10^{-11} olarak elde edilmiştir.
- **Initialization:** Çalışmanın ayarlanmış değerlerinin analize başlamadan son safha öncesi sisteme değerlerin toplu şekilde tanıtılıp onaylandığı kısımdır. Her analiz çalışması öncesi ve değişiklikler yapıp tekrar çalışma analiz edilmeden önce değerler revize edilmelidir.

- **Input Parameter:** Çalışmada giriş sınır değerleri olarak tanımlanan ve setup hazırlanırken sisteme tanıtılan analiz giriş değerleridir.
- **Output Parameter:** Gerçekleştirilen analiz sonucu elde edilen çıktı değerleridir.
- **Run Calculation:** Çalışmanın analiz öncesi son safhası olup hem setup kısmındaki kontrollerin yapılabildiği hem de analiz hesabında kullanılacak iterasyon sayısının ayarlandığı kısımdır.
- **Results:** Çalışmanın sonuç kısımlarının ve görselleştirilmelerinin elde edildiği kısımdır. Bu bölümde Grafikler kısmından çalışma sonucunun görselleri elde edilebilir, Plots kısmından yazdırılabilir, Animations kısmından animasyonları hazırlanabilmektedir.
- **Reports:** Bu bölümde analiz sonucundaki değerlerimizin görüntülenebileceği kısımdır.
- **Parameters & Customization:** Bu bölümde parametrik (çoklu test) çalışmanın ayarlama kısımlarının ve özelleştirme yapılmak istendiğinde kullanılan kısımdır. Bu çalışmada analizler, zamandan tasarruf sağlanması ve pratik bir yöntem olarak parametrik olarak gerçekleştirilmiştir.
- **Simulations Reports:** Çalışmanın sonuçlarını bir rapor halinde çeşitli dosya formatlarında elde etmek için kullanılan kısımdır.
- **Validation:** Doğrulama yapılan bir HAD analizinde yapılan analizin doğruluğunu ispatlamak için literatürdeki başka bir kişinin çalışmasını analiz ederek o çalışmanın değerlerine %10 sapma payının altında yakın değerler elde etmektir.
- **Volume Extract:** Analizi yapılacak cismin geometrisine ait akış hacminin ortaya çıkartılarak analiz yapılmasına uygun hale getirilmesidir.

Bunlarla birlikte programın onlarca alt fonksiyon ve farklı terimlere sahiptir. Yukarıda sadece belli başlı olan terimlere değinilmiştir.

3.2.1 HAD Doğrulama (Validasyon) Çalışması

Bu çalışmada 2021 yılında Küçükakça ve Parlak (2021) tarafından deneysel ve HAD yöntemlerle gerçekleştirilmiş birbirine eş 31 adet 490x490 (µm) ebatlarındaki kare kanallı ısı değiştirici analizi, doğrulama çalışması olarak seçilmiştir.

3.2.1.1 Doğrulama Çalışmasının Sınır Şartları

Doğrulama çalışması için gerekli olan sınır şartları Çizelge 3.6'da paylaşılmıştır.

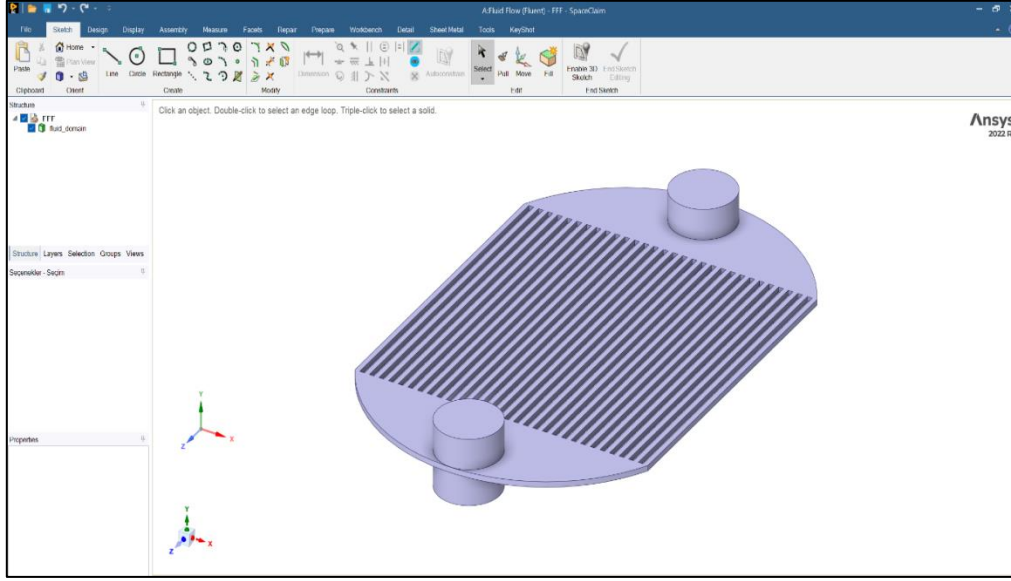
Çizelge 3.6 Doğrulama çalışması sınır değerleri.

Kullanılan Isı Değiştiricinin Plaka Ebatları	50x50x3mm
Isı Değiştirici Plaka Sayısı	2
Isı Değiştirici Malzeme Özelliği	Alüminyum
Kare Kanal Ölçüleri	490x490 μ m
Kare Kanal Sayısı	31
Isı Değiştirici Tipi ve Kullanılan Akışkan	Su buharı-Su Isı Değiştirici
Kullanılan Akış Analiz Yöntemi	Laminer-Simple
Dış Çevre İle İlişkisi	Sistemin alt ve yan duvarlar cam yünü ile yalıtılmıştır.
Akışın Karakteristik Özelliği 1	Sürekli
Akışın Karakteristik Özelliği 2	Sıkıştırılmaz
Residual	10^{-4}
Mesh Eleman Sayısı	1187955
Isı Değiştirici Akış Tipi	Çapraz Akış

Doğrulama çalışması yukardaki sınır ve özellik şartları altında iki adet plakanın birleştirilmesiyle oluşturulmuş 31 adet kare kanallı bir ısı değiştiriciden oluşmaktadır. Soğutucu akışkan olarak su kullanılmış, kanal yüzeyinde ise su buharı kullanılarak sabit yüzey sıcaklığı sağlanmış ve analizler bu şartlar altında gerçekleştirilmiştir.

3.2.1.2 Model (3D) Geometrisinin Çizilmesi

Doğrulama çalışmasına ait kanal geometrisi piyasadaki ticari bir tasarım programı ile oluşturulmuştur. İlgili kanal ve plakalara ait gerekli bütün ölçüler doğrulama çalışmasına ait makaleden referans alınmıştır. Sonraki aşamada ilgili plakalar, Ansys Fluent programına aktarılmış ve Space Claim modülünde plakalar birbirine montajlanarak kare kanallı ısı değiştirici oluşturulmuştur. Son olarak ısı değiştiriciye “volume extract” işlemi uygulanarak akışkan hacminin geometrisi elde edilmiştir. Şekil 3.5’te oluşturulan geometri görülmektedir.

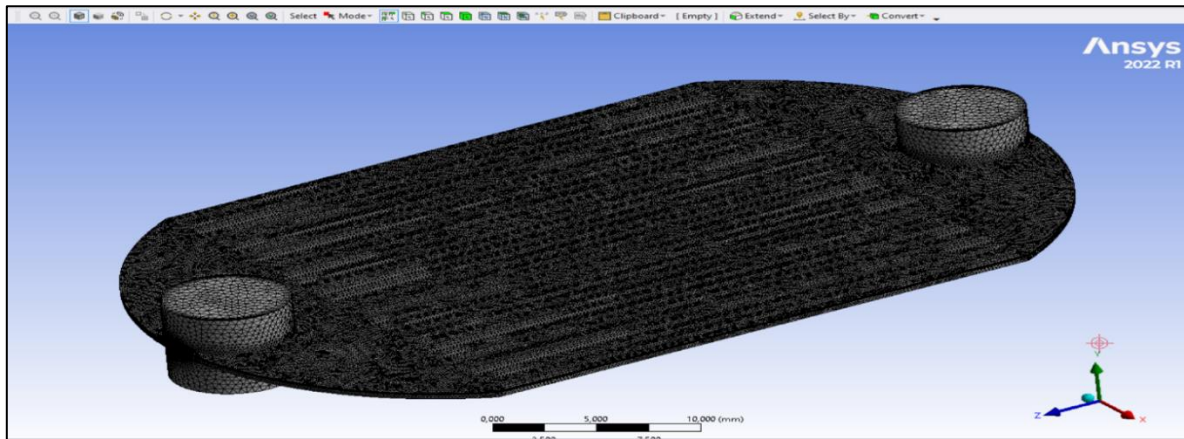


Şekil 3.5 Space Claim programında bu çalışmaya özgü kanal geometrisinin oluşturulması.

Akış geometrisi elde edildikten sonra ilgili geometrinin ağ yapısı oluşturulmuştur. Akışın giriş ve çıkış kısımları ile keskin kenar ve köşe noktalarına “inflation” verilerek hassas bir mesh yapısı elde edilmiştir. Şekil 3.6’da oluşturulan ağ yapısı gösterilmiştir. Ağ yapısına ait kalite değerleri Çizelge 3.7’de paylaşılmıştır.

Çizelge 3.7 Ağ yapısı (Mesh) kalite değerleri.

Mesh Kalite Değerleri	
Eleman Sayısı	1897104
Maks. Ortogonal Kalitesi	0,99
Maks. Aspect Ratio	45,99
Skewness Ort.	0,276



Şekil 3.6 Oluşturulan mesh yapısı.

3.2.1.3 Setup Kurulumu ve Analizi

Doğrulama çalışmasındaki sistemsel sınır şartları, doğrulama çalışması için referans sınır şartları olarak kabul edilmiştir. Referans kütleli debi değerleri kullanılarak parametrik çalışma ile HAD analiz değerleri elde edilmiştir. Elde edilen analiz değerleri Çizelge 3.8’de paylaşılmıştır.

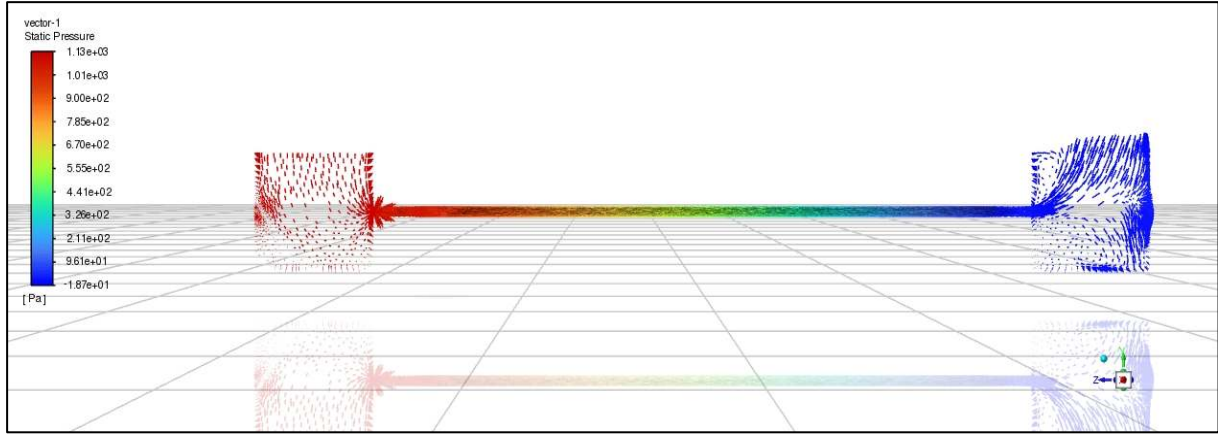
Çizelge 3.8 Doğrulama çalışması debi değerlerine göre elde edilen HAD analiz değerleri.

Analiz Sıra No	Kütleli Debi Değerleri (kg/s)	Isı Akısı (W/cm ²)	Sıcaklık (C°)	Basınç Düşüşü Δp (Pa)
1	0,000164	7	99,2	58,7
2	0,000328	12,5	99,8	182,0
3	0,000492	18,2	98,5	277,5
4	0,000657	23,5	96,4	376,0
5	0,000822	28,3	93,9	476,9
6	0,000987	32,5	91,4	579,9
7	0,001152	36,4	88,8	684,9
8	0,001318	39,9	86,3	792,7
9	0,001483	43,1	84,0	901,9
10	0,001649	46,1	81,9	1013,9
11	0,001814	48,9	80,0	1126,5
12	0,001979	51,6	78,1	1242,4
13	0,002144	54,0	76,6	1359,8
14	0,002309	56,4	75,1	1479,2
15	0,002474	58,6	73,8	1600,5
16	0,002639	60,8	72,5	1723,9
17	0,002805	62,9	71,3	1850,2
18	0,002971	64,9	70,3	1978,3
19	0,003137	66,9	69,2	2108,4
20	0,003304	68,8	68,4	2241,7

3.2.1.4 HAD Analiz Sonuçları ve Doğrulama Çalışması Sonuçları ile Karşılaştırılması

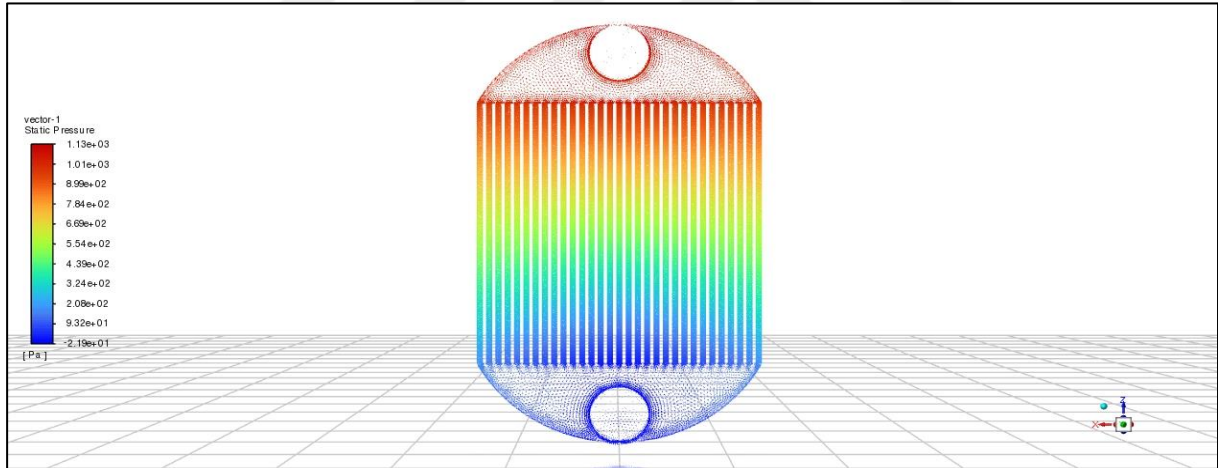
HAD Analiz Sonuçları

Bu bölümde referans çalışma kütleli debi değerleri ve akış tipi baz alınarak, akışkan çıkış sıcaklığı, ısı akısı, basınç kaybı gibi başlıklar altında doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Akışkanda meydana gelen belirli bir debi değerine ait basınç kaybının, sistem boyunca değişimi Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



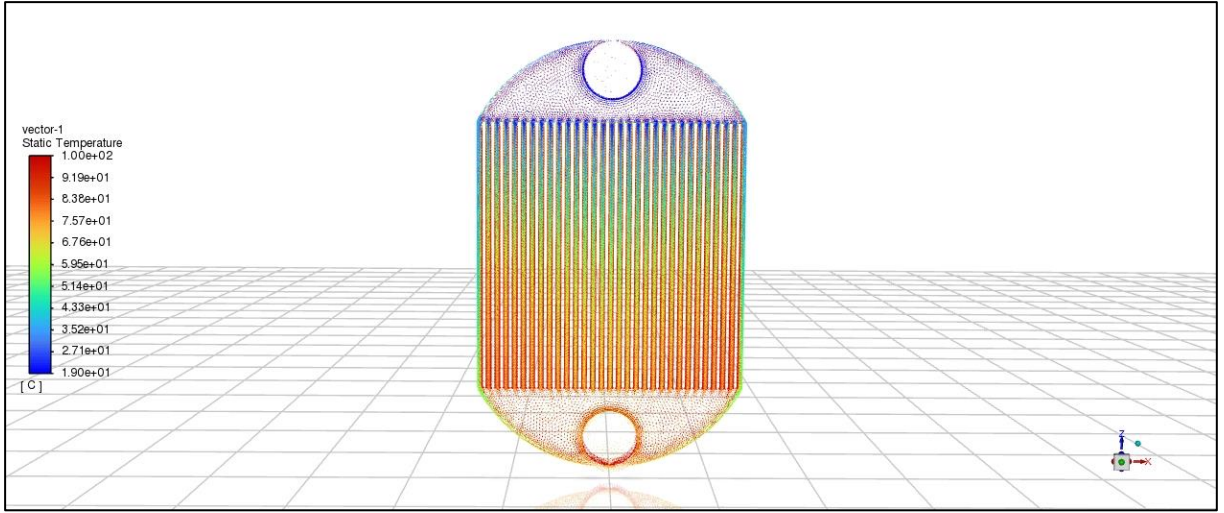
Şekil 3.7 Doğrulama çalışmasının 3 boyutlu görüntüsü.

Şekil 3.8’de akışkanın kanal girişlerinde basınç değerinin maksimum olduğu görülmektedir. Akışkanın kanal giriş bölgesinde kanal duvarları ve kanal geometrisine bağlı olarak karşılaştığı direncin bu duruma sebep olduğu değerlendirilmiştir. Kanal bölgesinde basınç düşüşü artarak devam etmiş ve kanal sonunda açık hava basıncı değerine eşitlenmiştir.



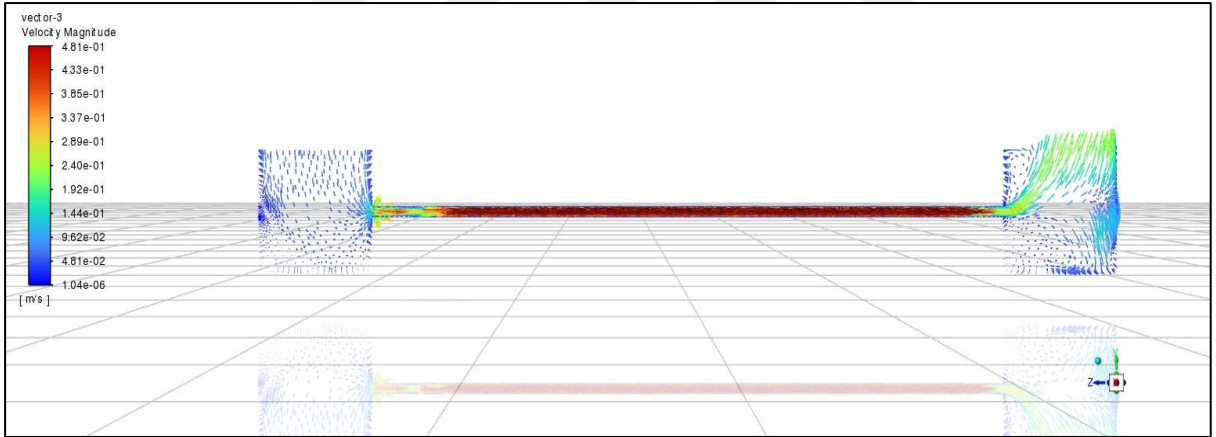
Şekil 3.8 Kanal boyunca basınç değişimi.

Şekil 3.8’de akışkanın sürtünme basınç kaybı değerinin kanal giriş bölgesinden itibaren kademeli bir şekilde azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.9 Kanal boyunca gerçekleşen sıcaklık dağılımı.

Isı değiştiriciye 19 C° de giren akışkanın 0,0005 kg/s kütleli debi değerinde maksimum yaklaşık 100 C° değerlerinde olduğu Şekil 3.9’de görülmektedir.



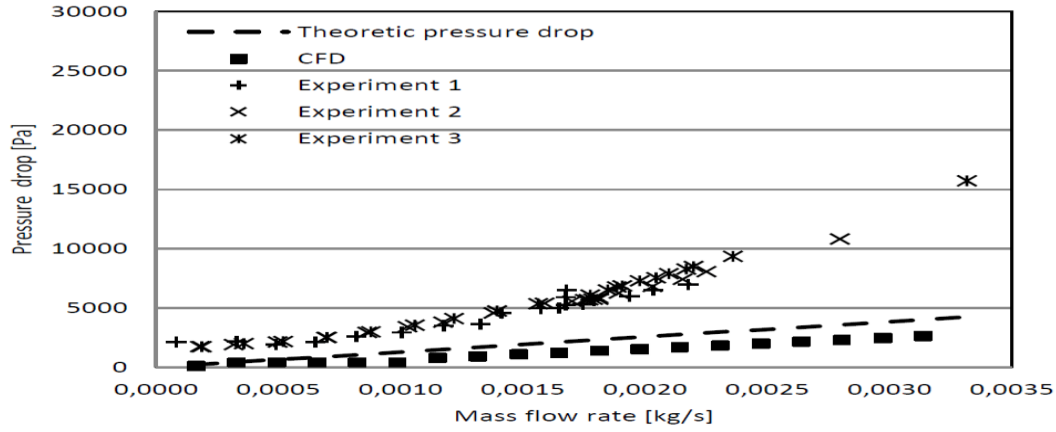
Şekil 3.10 Akışkan hızının kanal boyunca değişimi.

Şekil 3.10’da akışkanın kanala giriş yaptığı ilk kısımdan itibaren akışkan hızının artmaya başladığı ve kanal bölgesinde optimum hız değerine ulaşmakla birlikte son kısımda kanal bölgesinden çıkış yapmasıyla hız değerinde meydana gelen azalma görülmektedir.

Analiz Sonuçlarının Doğrulama Çalışması Sonuçları ile Karşılaştırılması

Bu bölümde gerçekleştirilen HAD analizleri sonucu elde edilen değerler, doğrulama çalışmasına ait değerler ile karşılaştırılmıştır. İlgili doğrulama çalışmasındaki analiz değerleri tablo şeklinde çalışma

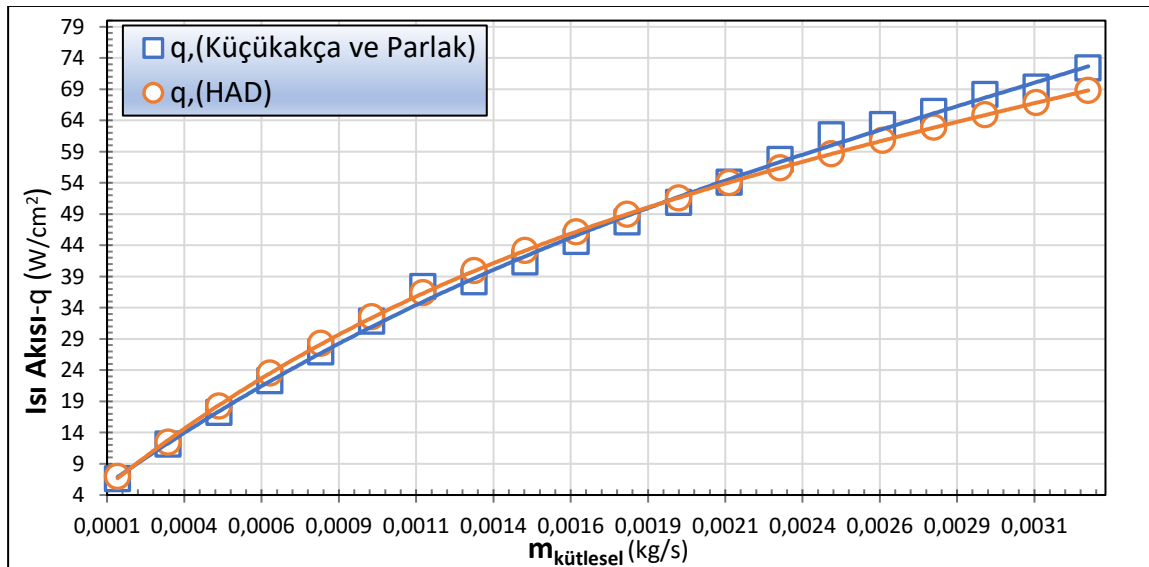
içeriğinde paylaşılmadığı için gerekli olan ısı akısı, çıkış sıcaklığı ve basınç düşüşü değerleri çalışmaya ait grafikler üzerinden alınarak elde edilmiştir. Bu durum gerçekleştirilen analizler ve doğrulama çalışması analiz değerleri arasındaki sapma oranlarında artışa neden olmuştur. Şekil 3.11’de doğrulama çalışmasına ait basınç kaybı grafiği paylaşılmıştır.



Şekil 3.11 Doğrulama çalışmasına ait basınç kaybı grafiği (Küçükakça ve Parlak (2021)).

a) Isı Akısı Değerlerinin Karşılaştırması

Yapılan HAD analizi ısı akısı değerleri ile doğrulama çalışması değerlerine ait değişim Şekil 3.12’de görülmektedir.



Şekil 3.11 Isı akısı değerlerinin karşılaştırılması.

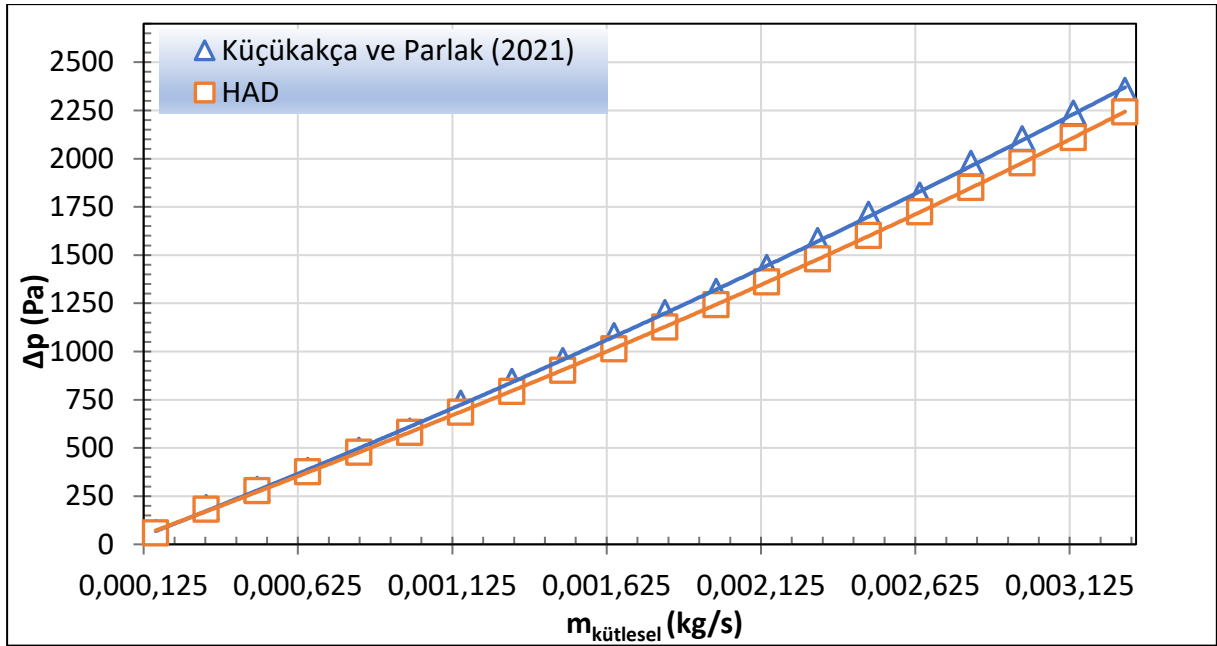
Doğrulama çalışması ile bu çalışmadaki analiz değerleri kıyaslandığı zaman maksimum sapma oranının %6 değerini geçmediği tespit edilmiştir. Elde edilen değerler Çizelge 3.9’da paylaşılmıştır.

Çizelge 3.9 Doğrulama çalışması değerleri ile HAD analiz ısı akısı değerleri.

Sıra No	Kütleli Debi Değerleri	Doğrulama Çalışması Isı Akısı Değerleri	HAD Isı Akısı Değerleri	Sapma Oranı
	kg/s	q _{K&P (2021)}	q _{HAD}	%
1	0,0002	6,6	7,0	5
2	0,0003	12,1	12,5	3
3	0,0005	17,2	18,2	6
4	0,0007	22,3	23,5	6
5	0,0008	26,9	28,3	5
6	0,0010	31,8	32,5	2
7	0,0012	37,4	36,4	3
8	0,0013	38,1	39,9	5
9	0,0015	41,3	43,1	4
10	0,0016	44,6	46,1	3
11	0,0018	47,7	48,9	3
12	0,0020	50,8	51,6	1
13	0,0021	54,1	54,0	0
14	0,0023	57,7	56,4	2
15	0,0025	61,6	58,6	5
16	0,0026	63,3	60,8	4
17	0,0028	65,4	62,9	4
18	0,0030	68,1	64,9	5
19	0,0031	69,3	66,9	4
20	0,0033	72,4	68,8	5

b) Basınç Düşüşü Değerlerinin Kıyaslanması

Sürtünme basınç kaybı HAD analiz değerleri ile doğrulama çalışmasında elde edilen değerler kıyaslandığında bütün debi değerlerinde benzer bir eğilim olduğu Şekil 3.13’de görülmektedir.



Şekil 3.12 Basınç düşüşü değerlerinin karşılaştırılması.

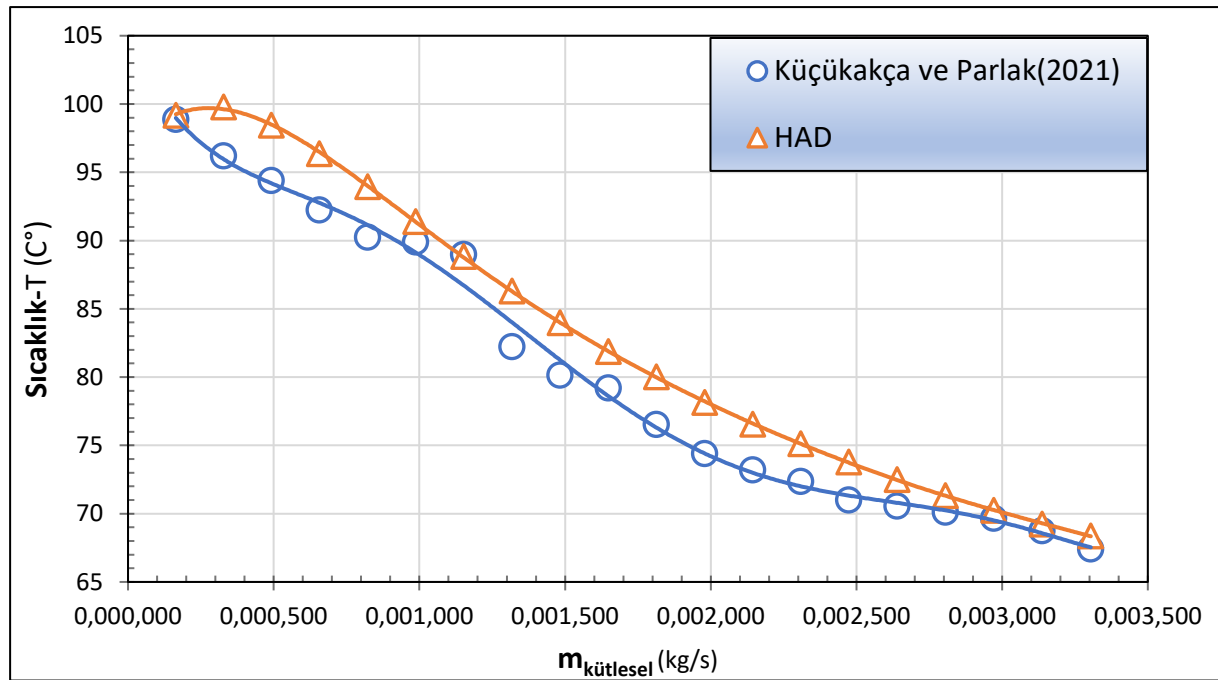
Çizelge 3.10’da farklı kütleli debi değerlerinde elde edilen basınç kaybı değerleri hem validasyon çalışma için hem de yapılan Had analizi için verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde en fazla sapma oranının %6,5 değerine ulaştığı görülmektedir.

Çizelge 3.10 Doğrulama çalışması değerleri ile HAD analiz basınç kaybı değerleri.

Sıra No	Kütleli Debi Değerleri kg/s	Doğrulama Çalışması Basınç Kaybı Değerleri $\Delta p_{K \& P (2021)}$ (Pa)	HAD Basınç Kaybı Değerleri Δp_{HAD} (Pa)	Sapma Oranı %
1	0,000164	61,2	58,7	4,1
2	0,000328	191,1	182,0	4,7
3	0,000492	384,1	277,5	2,7
4	0,000657	489,1	376,0	2,1
5	0,000822	588,1	476,9	2,5
6	0,000987	732,2	579,9	1,4
7	0,001152	732,2	684,9	6,5
8	0,001318	845,2	792,7	6,2
9	0,001483	954,2	901,9	5,5
10	0,001649	1083,3	1013,9	6,4
11	0,001814	1203,1	1126,5	6,4
12	0,001979	1311,2	1242,4	5,2
13	0,002144	1436,2	1359,8	5,3
14	0,002309	1576,4	1479,2	6,2
15	0,002474	1712,4	1600,5	6,5
16	0,002639	1812,1	1723,9	4,9
17	0,002805	1975,3	1850,2	6,3
18	0,002971	2103,1	1978,3	5,9
19	0,003137	2236,3	2108,4	5,7
20	0,003304	2354,2	2241,7	4,8

c) Akışkanın Çıkış Sıcaklığı Değerlerinin Karşılaştırması

Doğrulama çalışması ile elde edilen analiz değerleri karşılaştırıldığında iki değer arasındaki fark bütün debi değerleri için %10 oranının altında kalacak şekilde olduğu Şekil 3.14'te görülmektedir. Doğrulama çalışmasındaki 0,0011kg/s kütleli debi değerinde yaşanan ani düşüş hata oranında artmaya sebep olmuştur. Elde edilen sıcaklık değerleri Çizelge 3.11 de paylaşılmıştır. Çizelge incelendiğinde yapılan HAD analizi ile doğrulama çalışması kıyaslandığında benzer sıcaklık değerlerine sahip olduğu ve en fazla sapma oranının % 5 (@0,001318 kg/s) olduğu görülmektedir.



Şekil 3.13 Çıkış sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

Çizelge 3.11 Doğrulama çalışması T_{çıkış} değerleri ile HAD analiz T_{çıkış} değerleri.

Analiz Sıra No	Analiz Kütleli Debi Değerleri kg/s	Doğrulama Çalışması Sıcaklık Değerleri T _{K&P (2021)} (C°)	HAD Sıcaklık Değerleri T _{HAD} (C°)	Sapma Oranı %
1	0,000164	98,9	99,2	0,3
2	0,000328	96,2	99,8	3,7
3	0,000492	94,4	98,5	4,3
4	0,000657	92,2	96,4	4,5
5	0,000822	90,3	93,9	4,1
6	0,000987	89,9	91,4	1,7
7	0,001152	89,0	88,8	0,2
8	0,001318	82,2	86,3	5,0
9	0,001483	80,1	84,0	4,8

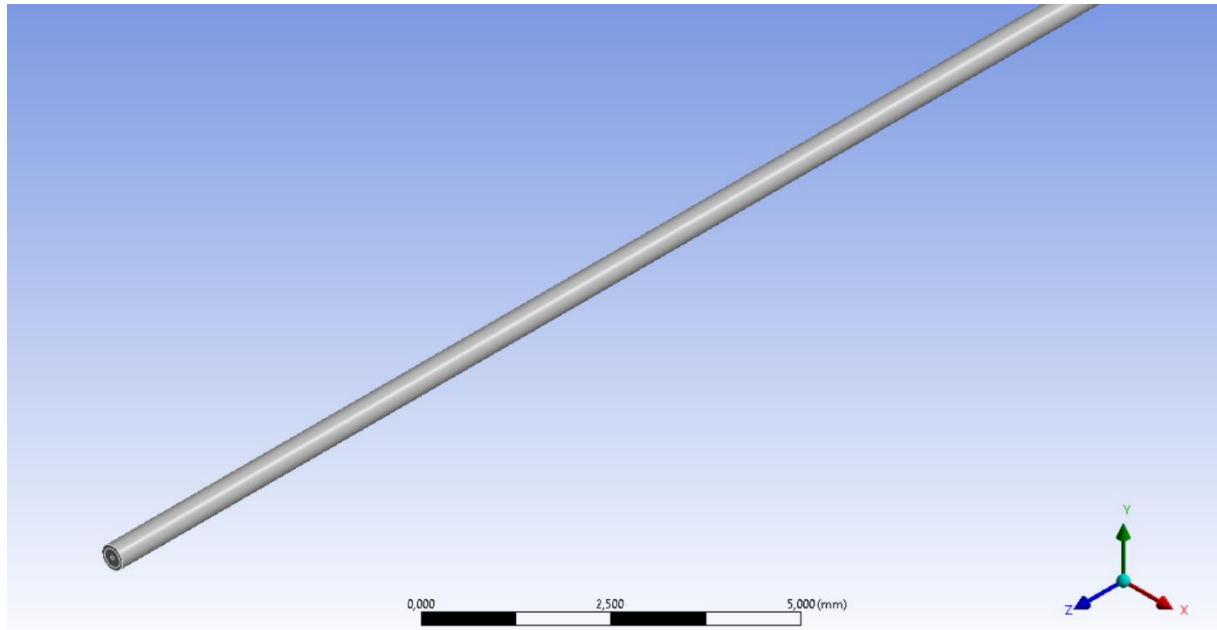
Çizelge 3.12 Doğrulama çalışması $T_{\text{çıkış}}$ değerleri ile HAD analiz $T_{\text{çıkış}}$ değerleri (devam ediyor).

10	0,001649	79,2	81,9	3,4
11	0,001814	76,5	80,0	4,6
12	0,001979	74,4	78,1	5,0
13	0,002144	73,2	76,6	4,6
14	0,002309	72,4	75,1	3,8
15	0,002474	71,0	73,8	3,9
16	0,002639	70,6	72,5	2,8
17	0,002805	70,1	71,3	1,7
18	0,002971	69,7	70,3	0,9
19	0,003137	68,8	69,2	0,7
20	0,003304	67,4	68,4	1,4

3.3 MİNİ/MİKRO KANALDA AKIŞIN HAD ANALİZİ

3.3.1 Geometrinin Hazırlanması

Çalışmanın geometri tasarım şartı üç boyutlu (3D) olarak belirlenmiştir. Mini/mikro boruların tasarımı ANSYS Fluent Design Modeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun dışında ANSYS Fluent programının tasarım geometrilerini hazırlamak için Space Claim ve Discovery olmak üzere iki farklı modüle sahiptir. Şekil 3.15'te çizimi yapılmış bir mini/mikro boru örnek olarak paylaşılmıştır.



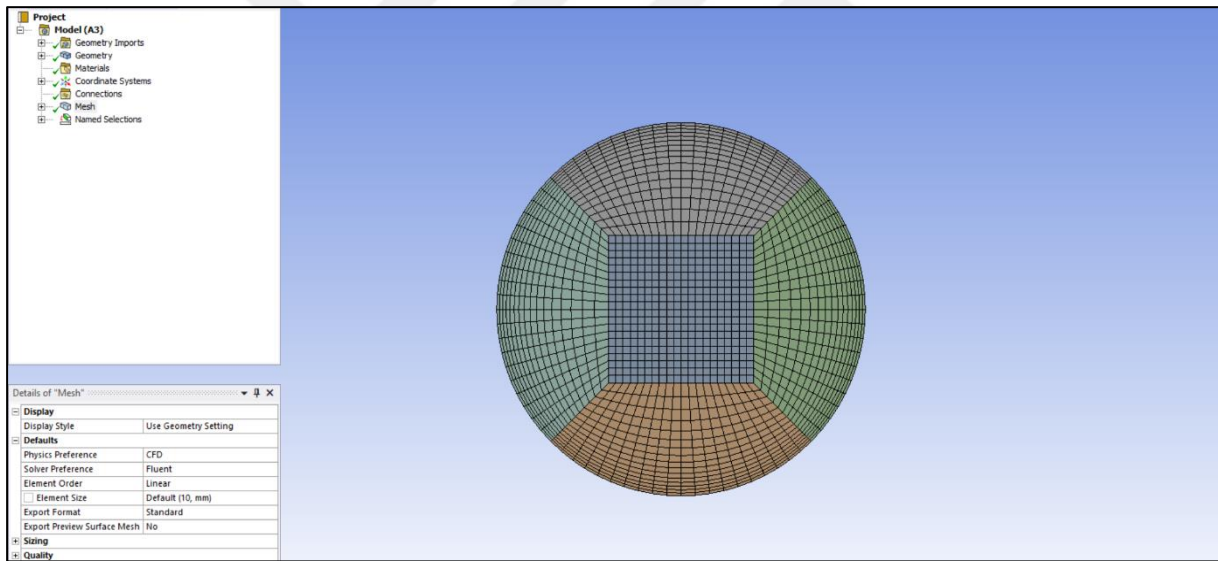
Şekil 3.14 Design modeller’de çizilmiş boru geometrisi.

3.3.2 Mesh (Ağ) Hazırlanması

Geometri hazırlandıktan sonra çalışmanın en önemli kısımlarından birisi analizi yapılacak çalışmanın mesh kısmının hazırlanmasıdır. Bu çalışmada önce borulardaki akış özellikleri ve sistem yapısı incelenmiş daha sonra literatürdeki benzer analizlere ait ağ yapısı tetkik edilerek bu çalışmaya esas teşkil edecek ağ yapısının oluşturulması için iki farklı yöntemde karar kılınmıştır. Bu yöntemler;

a) Kare Merkezli Yöntem

Bu yöntemde boru merkezinde kare bir bölge ve çevresinde eş yapıda dört parçayla birlikte toplamda beş parçadan oluşan bir ağ yapısı oluşturulur. İlgili ağ yapısı Şekil 3.16'da gösterilmiştir.

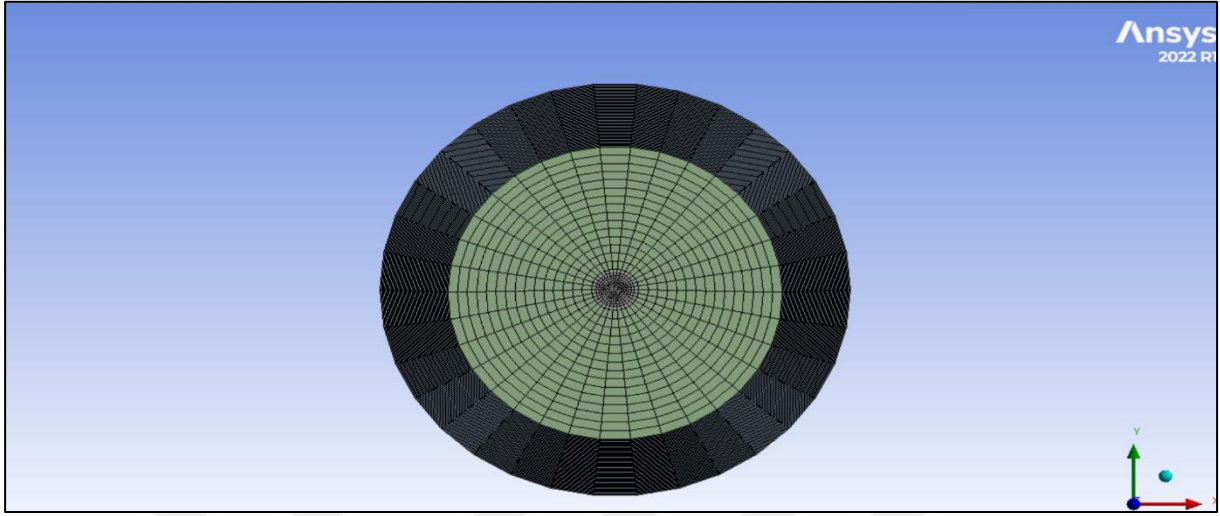


Şekil 3.15 Kare merkezli yöntem ile hazırlanmış mesh yapısı.

b) Dairesel Halkalar Yöntemi

Bu yöntemde eş merkezli halkalar şeklinde akış bölgesi üç ana bölgeye Şekil 3.17'de gösterildiği gibi ayrılmıştır. En dış bölgede boru iç yüzeylerine yakın hassas mesh yapısı oluşturulmuş ve eleman sayısı yüksek tutulmuştur. İkinci bölgede dairesel alan miktarı daha geniş tutularak akışın yapısal özelliklerini detaylı şekilde elde edilmesi hedeflenmiştir. Son çekirdek bölge ise akışın tam geliştiği ve akışın asıl detaylarının elde edilemediği bölge olduğu

için yaklaşık boru çap değerinin %10'luk kısmına denk bir oranda tutularak daha kaba bir ağ yapısı oluşturulmuştur.

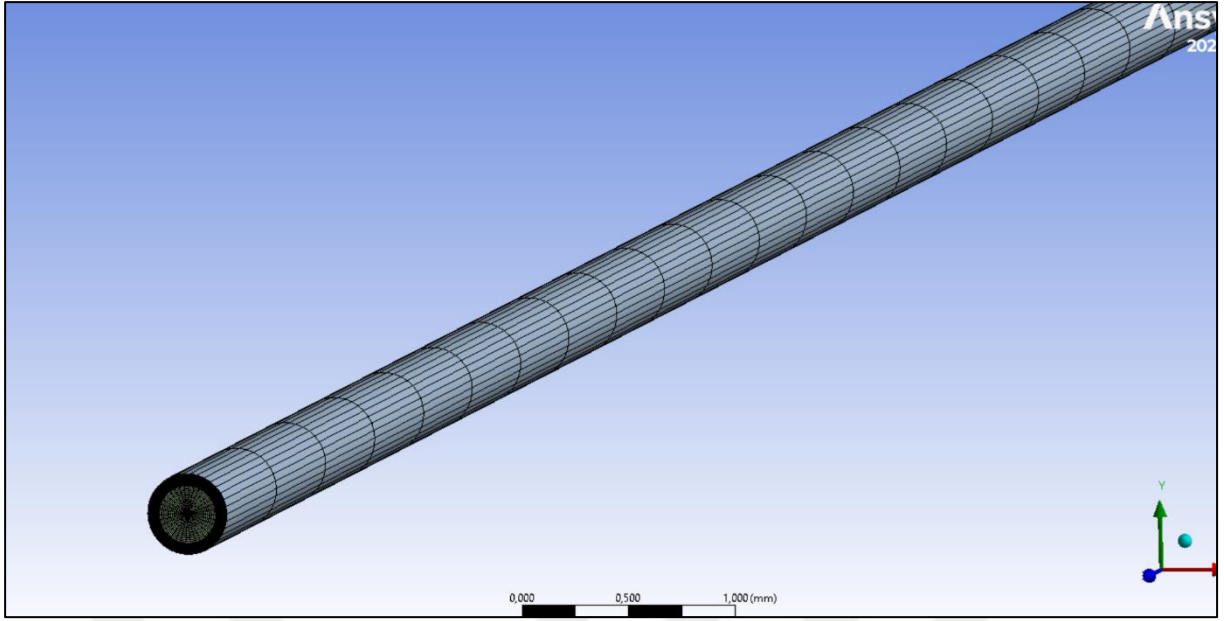


şekil 3.16 Eş merkezli halkalar yöntemi ile hazırlanmış mesh yapısı.

3.3.3 Ağ Yapısına Karar Verilmesi

Dairesel halkalar yöntemi ile basit şekilde ağ yapısı hazırlanması, analizler esnasında sistemsel hatalara sebebiyet vermemesi ve her iki yöntem ile elde edilen sonuçların birbirine yakın değerler alması sebebiyle dairesel halkalar yöntemiyle oluşturulan ağ yapısı tercih edilmiştir. Literatür araştırmalarında mini/mikro boru analizlerine özel olarak türbülans modelleri kullanıldığı (Reynolds Stress, Direct Numerical Simulation (DNS), Lattice-Boltzman vb.) gözlemlenmiştir. Ansys Fluent programı bünyesinde belirtilen özel metotlar bulunmadığı için bu yöntemlerle analiz gerçekleştirilememiştir.

Bu çalışmada tasarım üzerinde boru iç yüzeyine yakın tabaka ve gereken her bir bölgede yoğun bir ağ katmanı şekil 3.17'da gösterildiği gibi oluşturulmuştur. Eş merkezli halkaların alan büyüklükleri, analizler tekrar tekrar edilerek basınç, ısı taşınım katsayısı, hız gibi grafiklerin yakın değerler elde edilinceye kadar revize edilmiştir. şekil 3.18'de oluşturulan ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 3.17 Eş merkezli halkalar yöntemi ile oluşturulmuş boyuna ağ yapısı.

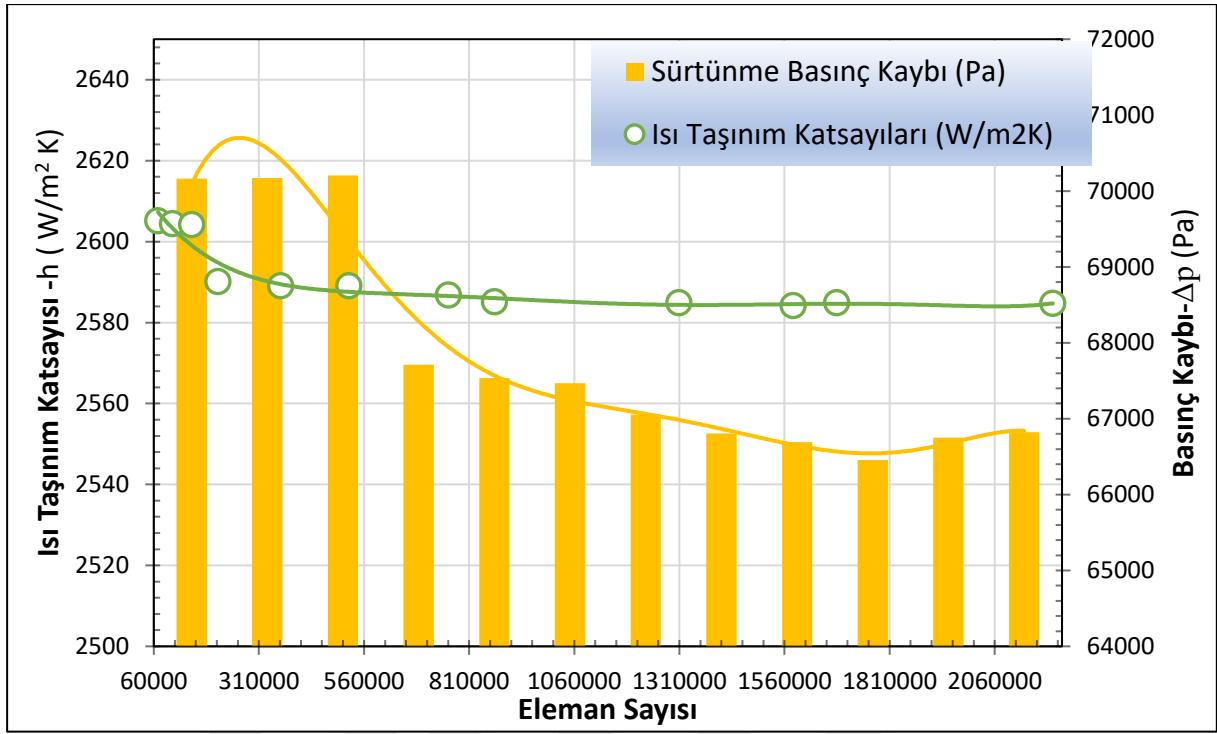
Çalışmanın ağ yapısı kalite değerleri Çizelge 3.12’de paylaşılmıştır. İlgili değerler incelendiğinde oluşturulan ağ yapısının kalite değerlerinin bölüm 3.2’de belirtilen standart ağ kalite değerleri ile uygun olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.13 Ağ yapısı (Mesh) kalite değerleri.

	Kalite Değeri	Min	Maks	Ortalama
1	Element Quality	7,29E-06	8,97E-02	6,67E-03
2	Aspect Ratio	12,87	1834	173,83
3	Skewwnes	2,43E-02	0,59	8,50E-02
4	Orthogonal Quality	0,536	0,999	0,989

3.3.4 Mesh Bağımsızlığı (Grid Independence)

Bu çalışmada grid bağımsızlığı için ağ yapısını oluşturan eleman sayısı artırılmış ve en ideal eleman sayısı değerinin 800.000 ile 1.000.000 eleman sayısı aralığında elde edildiği Şekil 3.19’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18 Mesh eleman sayısına göre analiz değerlerinin değişimi.

Ağ yakınsaklığı sayısal değerleri Şekil 6.7 'de gösterilmiştir. Çizelge 3.13 de yakınsaklık değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.14 Ağ bağımsızlığı analizi ısı transferi ve basınç düşüşü değerleri.

Sürtünme Basınç Kaybı (Pa)	Sapma Oranı (%ΔP)	Isı Taşınım Katsayıları (Wm ⁻² K ⁻¹)	Sapma Oranı (%h)	Eleman Sayısı
70165	0,006	2605	0,028	70000
70169	0,048	2604	0,010	105000
70203	3,677	2604	0,543	150500
67713	0,263	2590	0,041	213200
67536	0,103	2589	0,000	362400
67467	0,618	2589	0,089	524700
67053	0,373	2587	0,061	761000
66803	0,165	2585	0,011	870500
66693	0,361	2585	0,028	1309000
66453	0,444	2584	0,028	1581000
66749	0,107	2585	0,004	1684150
66821	-	2585	-	2198250

3.4 SINIR ŞARTLARI VE METOT TAYİNİ

Analizlerde laminer ve türbülanslı akış için değişik akış modelleri ve sınır şartları kullanılmıştır. Bu değerler Çizelge 3.14’de gösterilmiştir. Çalışmanın bu kısmında HAD analizleri için sekiz farklı metot oluşturulup, bu metotların içerisinde deneyssel ve teorik verilerle en uyumlu yöntem tespit edilmiş ve bu yönetime göre analizler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.14’de ilgili ayarlama parametreleri listelenmiştir.

Çizelge 3.15 HAD analiz sınır şartları ve parametre değerleri.

	Setup Parametreleri	Sınır Değerler
1	Models	Laminer Akış : laminer Türbülanslı Akış:k-omega
2	Viscous heating	Aktif
3	Energy	Aktif
4	Materials (liquid)	Su
5	Boundary Conditions	Mass Flow Inlet(Kütle akışlı giriş) Pressure Outlet (Basınç çıkış)
6	Wall	Stationary wall (Sabit yüzey) No slip -shear condition (kaymama koşulu)
7	Wall Roughness	Paslanmaz Çelik: 50 µm PEEK : 12,5 µm
8	Wall Temperature	Constant surface temperature 10 (C°)-Sabit yüzey sıcaklığı
9	Input temperature	Değişken değer
10	Reference Values	Compute from inlet (Giriş değerleri referans alınarak hesaplama)
11	Methods	Simple
12	Number of iterations	750

BÖLÜM 4

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Tezin bu bölümünde yapılan deneysel çalışmanın ölçüm değerleri ve bilgisayar destekli analiz yöntemi ile elde edilen sonuçlar altta belirtilen ana başlıklar altında grafikler üzerinden yorumlanmıştır;

- Sürtünme Faktörü- f_s
- Basınç Düşüşü- Δp
- Isı Taşınım Katsayısı- h
- Soğutma Yüğü- Q .

Değerlendirmeler ilk olarak deneysel çalışma sonuçlarının referans teorik denklemler ile kıyaslanması şeklinde gerçekleştirilmiş daha sonra ise deneysel çalışma sonuçları, HAD analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bu değerler daha sonra aynı çap ölçüsüne sahip borularda basınç kaybı ve soğutma yüğü arasındaki değişim aynı grafik üzerinden iki farklı metotla karşılaştırılmıştır.

Son bölümde ise soğutma yüğü ve basınç kaybı arasındaki ilişki, deneysel metot, HAD metot laminer ve HAD metot türbülanslı akış analizi olmak üzere üç farklı metot üzerinden karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda en düşük basınç kaybı ve en yüksek soğutma yüküne sahip borular her bir analiz sonucuna göre tespit edilmiştir.

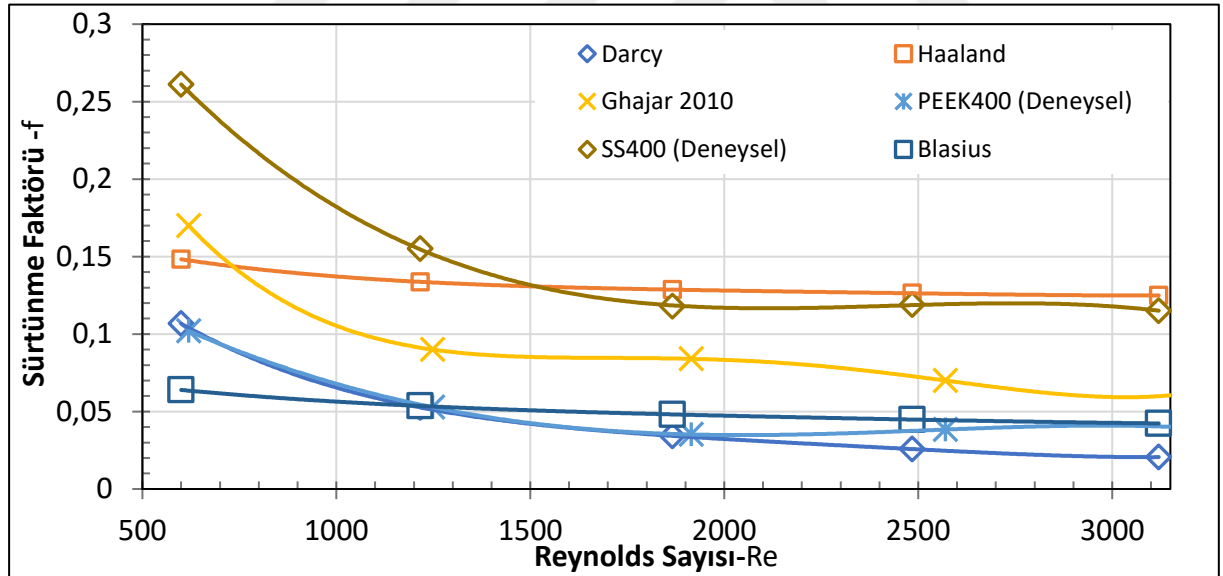
Bilgisayar destekli analizler hem laminer akış rejimine göre hem de türbülanslı akış rejimine göre gerçekleştirilmiş ve deneysel çalışma sonuçlarına hangi tip akış rejiminin daha benzer eğilimde olduğu ve daha yakın değerler aldığı yorumlanmıştır.

4.1 SÜRTÜNME FAKTÖRÜ-f

Gerçekleştirilen deneysel çalışma kapsamında basınç sensörleri yardımı ile basınç kaybı ölçümleri gerçekleştirilmiş, sonraki aşamada sürtünme faktörleri hesap edilerek teorik referans denklemlerle kıyaslanmıştır. Son aşama da ise deneysel sürtünme faktörü değerleri HAD analiz değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Bu bölümde bütün paslanmaz çelik boru çapları için Afshin J. Ghajar'ın (Okstate, 2010), benzer boru çapları ile 2010 yılında yapmış olduğu deneysel çalışma sonuçları referans alınmıştır. Gerçekleştirilen hesaplamalar neticesinde deneysel sürtünme faktörü hesaplamalarının Ghajar'ın (Okstate, 2010), yapmış olduğu çalışma sonuçları ile benzer eğilimde olduğu görülmüştür.

Aşağıdaki şekilde 400µm çaplı mini/mikro borulara ait hesap edilen sürtünme faktörü değerlerinin, Reynolds sayısına bağlı olarak teorik referans denklemlerle kıyaslanmıştır.

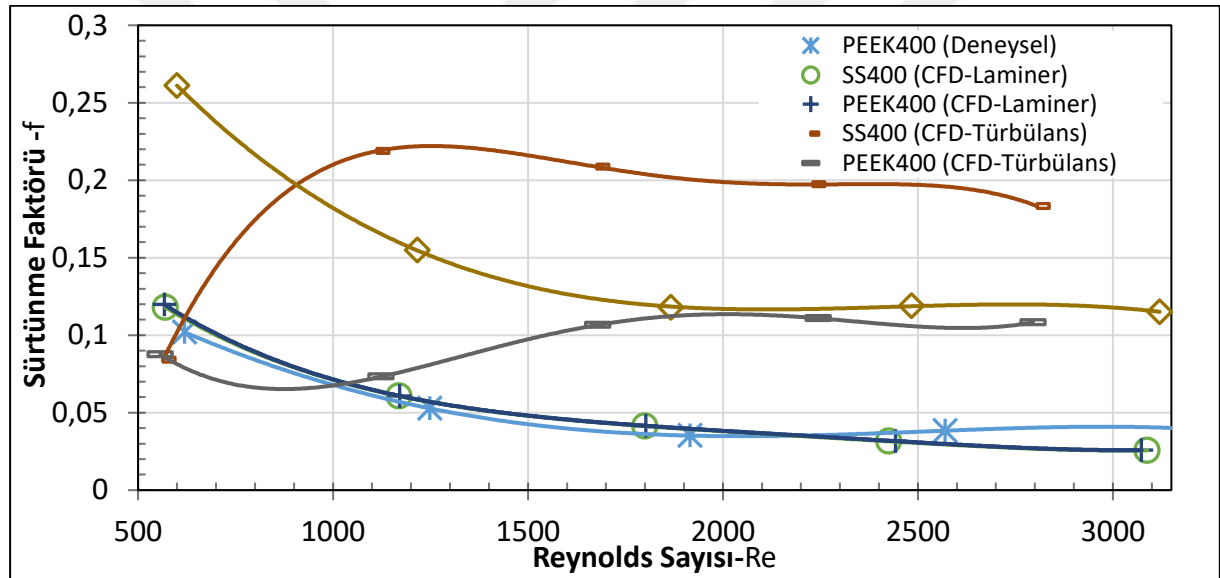


Şekil 4.1 D=400 µm çaplı mini/mikro borular için sürtünme faktörünün Re sayısına göre değişimi (Deneysel - Teorik).

Sürtünme faktörü değerlerinin Şekil 4.1'de yaklaşık $Re > 1200$ değerinden sonra sabitletme eğiliminde olduğu görülmektedir. Deneysel sürtünme faktörü değerlerinin Haaland referans denklemi ile Darcy referans denklemi arasında yer aldığı görülmektedir. Deneysel sonuçların

boru iç yüzeylerindeki pürüzlülük değerleri sebebiyle Darcy sürtünme faktörü değerinden yüksek çıktığı, tam gelişmiş türbülanslı akış olmadığı için de Haaland sürtünme faktörü değerinden düşük çıktığı değerlendirilmiştir. Yine sürtünme faktörü değerlerinin doğruluğunu kontrol etmek için benzer bir çalışmayı deneysel yöntemle 413 μm çap ölçüsünde paslanmaz çelik boru için inceleyen Afshin J. Ghajar'ın (Okstate, 2010) elde ettiği sonuçlar Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Ghajar'ın (Okstate, 2010) 413 μm iç çaplı mikro kanal için elde ettiği değerlerin bu çalışma özelinde yapılan paslanmaz çelik boru için deneysel analiz değerlerinden düşük, PEEK boru için ise elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 4.2'de deneysel çalışma sonuçları, HAD metodu ile gerçekleştirilen laminar ve türbülanslı akış analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



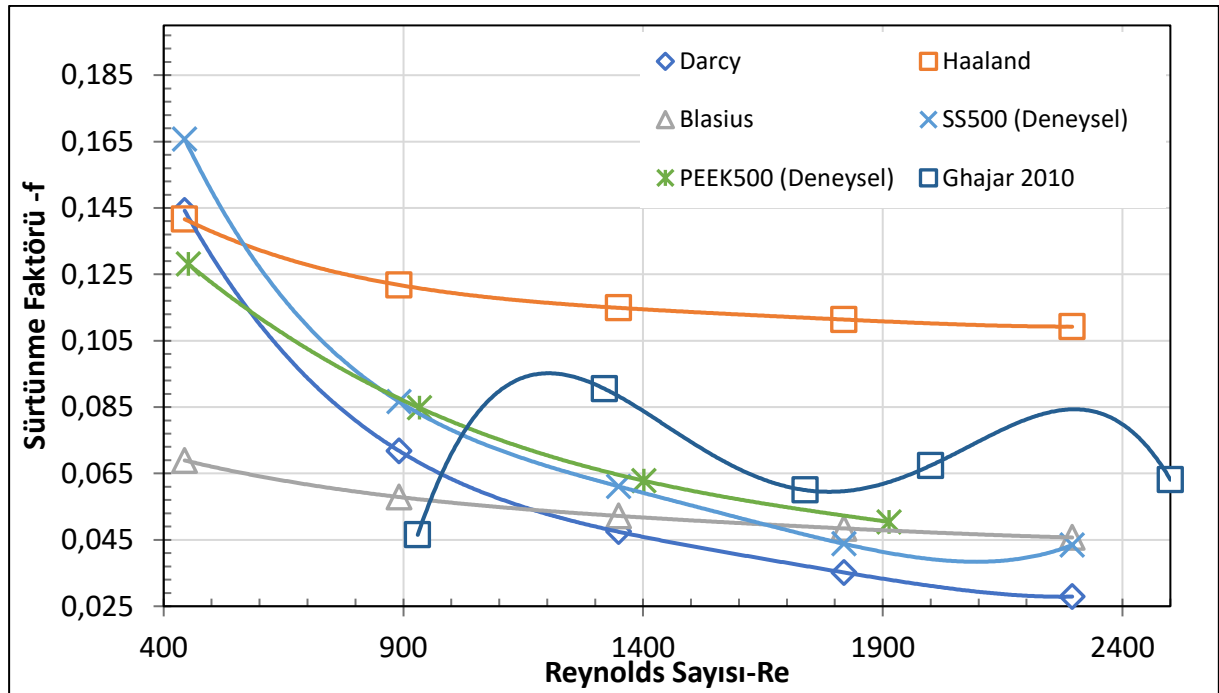
Şekil 4.2 D=400 μm çaplı mini/mikro borular için sürtünme faktörünün Re sayısına göre değişimi (Deneysel -HAD).

Şekil 4.2'de Bilgisayar destekli laminar akış rejiminde yapılan analize ait paslanmaz çelik ve PEEK boru sürtünme faktörü değerleri ile deneysel çalışma ile hesap edilen PEEK boru sürtünme faktörü değerinin, birbirlerine yakın değerlere sahip olduğu görülmektedir. Yine aynı akış rejiminde HAD metot paslanmaz çelik boru için elde edilen analiz değerlerinin aynı metot ile elde edilen PEEK boru analiz değerlerinden düşük olarak gerçekleşmiştir.

Genel olarak deneysel çalışma sürtünme faktörü değerlerinin, bilgisayar destekli analiz değerlerinden daha yüksek olarak gerçekleşmesi mini/mikro boruların imalatından kaynaklı

boru iç yüzey pürüzlülük değerinin daha yüksek değerlere sahip olduğunu göstermektedir. HAD metot türbülanslı akış rejiminde gerçekleşen analiz değerlerinin yüksek değerler elde ettiği ve gelişim eğrisinin $Re > 1500$ değerlerine kadar artıp sonra sabitlenmesi diğer analiz değerlerine göre farklı gerçekleşmiştir.

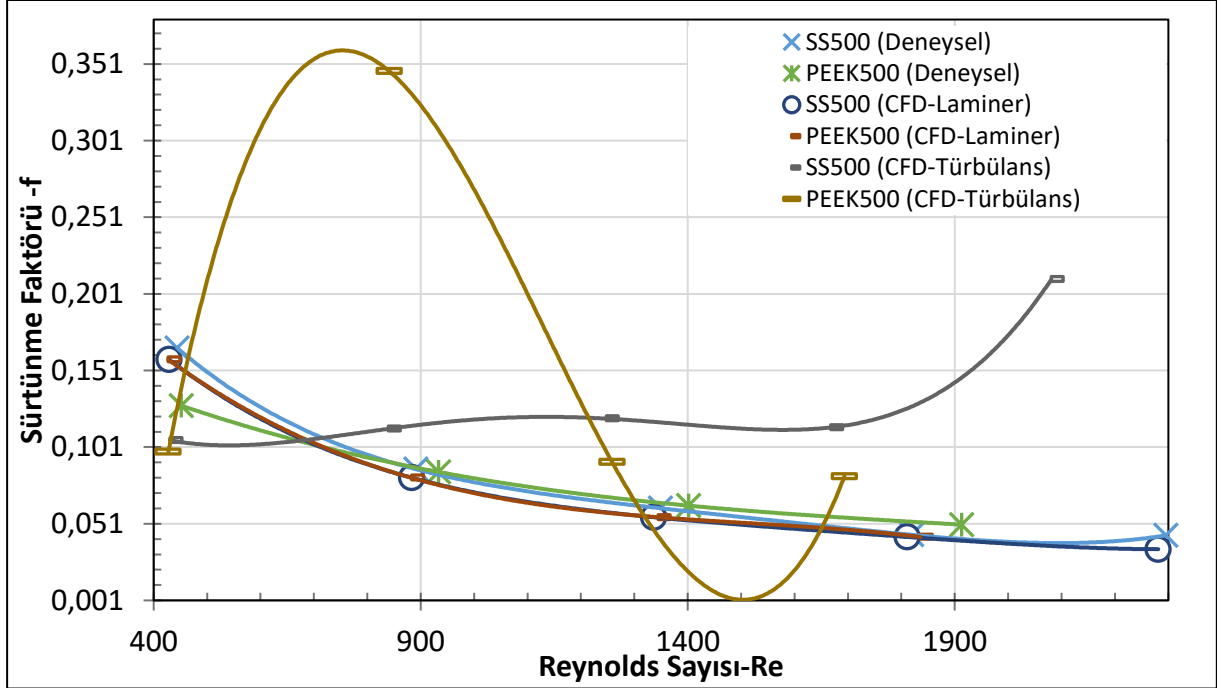
Şekil 4.3'te 500 μm çapa sahip mini/mikro boruların deneysel çalışma sonuçları, referans sürtünme faktörü değerleriyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.3 D=500 μm mini/mikro çaplı borular için sürtünme faktörünün Re sayısına göre değişimi (Deneysel -Teorik).

Boru çap değerlerinin artmasıyla orantılı olarak sürtünme faktörü değerlerindeki değişim incelendiği zaman, Şekil 4.3'te elde edilen sürtünme faktörü değerlerinin Şekil 4.2'de elde edilen sürtünme faktörü değerlerine göre ters orantılı olarak gerçekleştiği görülmektedir. Her iki malzemeye ait mini/mikro borulara ait deneysel sürtünme faktörü değerleri incelendiğinde yaklaşık $Re > 900$ değeri için birbirine yakın değerler aldığı görülmüştür. Ghajar'ın (Okstate, 2010) 508 μm çaplı paslanmaz çelik boru ile yaptığı çalışmanın sonuçları, $Re > 1000$ değerleri için deneysel çalışma sonuçlarından yüksek değerler aldığı tespit edilmiştir.

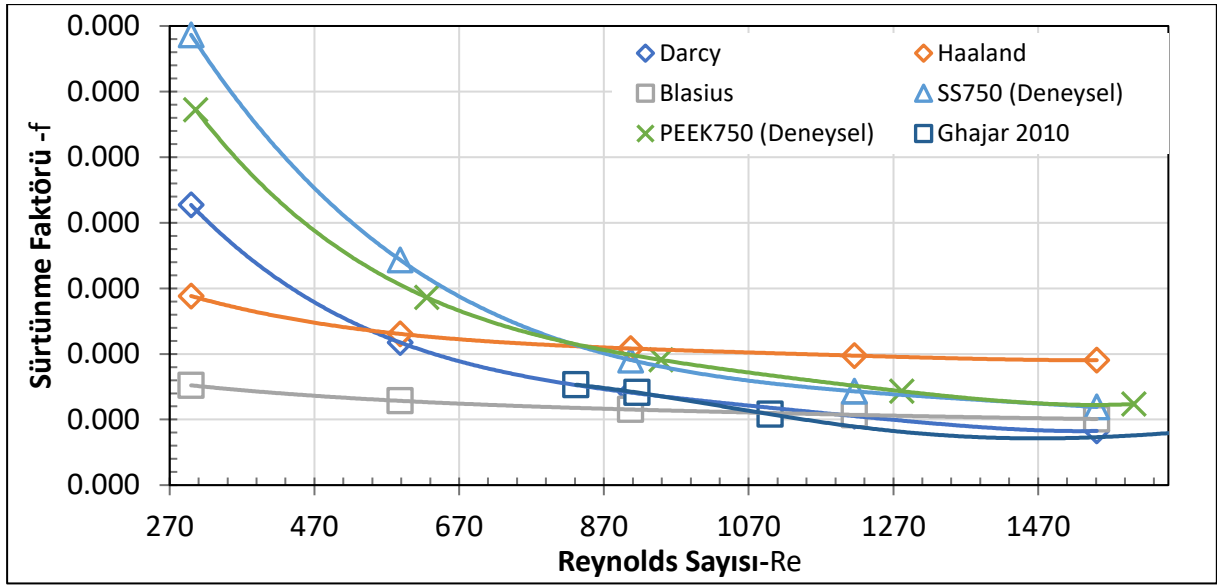
Şekil 4.4’de 500 µm çapa sahip mini/mikro borularla yapılan deneysel çalışma sonuçları, sayısal analiz metodu ile gerçekleştirilen laminar ve türbülanslı akış analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.4 D=500 µm çaplı mini/mikro borular için sürtünme faktörünün Re sayısına göre değişimi (Deneysel - HAD).

Deneysel çalışma sürtünme faktörü değerlerinin, sayısal analiz sonuçlarına ait değerlerden yüksek değerlere sahip olmasıyla birlikte her iki malzeme türüne ait sonuçlar irdelendiğinde laminar akış rejiminde birbirlerine yakın değerler aldığı Şekil 4.4’de görülmektedir. Türbülanslı akış rejimine göre yapılan analiz sonuçları irdelendiğinde, ilgili çap ölçüsüne ait sürtünme faktörü değerlerinde artış devam etmiştir.

Şekil 4.5’te 750µm çapa sahip mini/mikro boruların deneysel çalışma sonuçları, referans denklemlere ait sürtünme faktörü hesaplamalarıyla karşılaştırılmıştır.

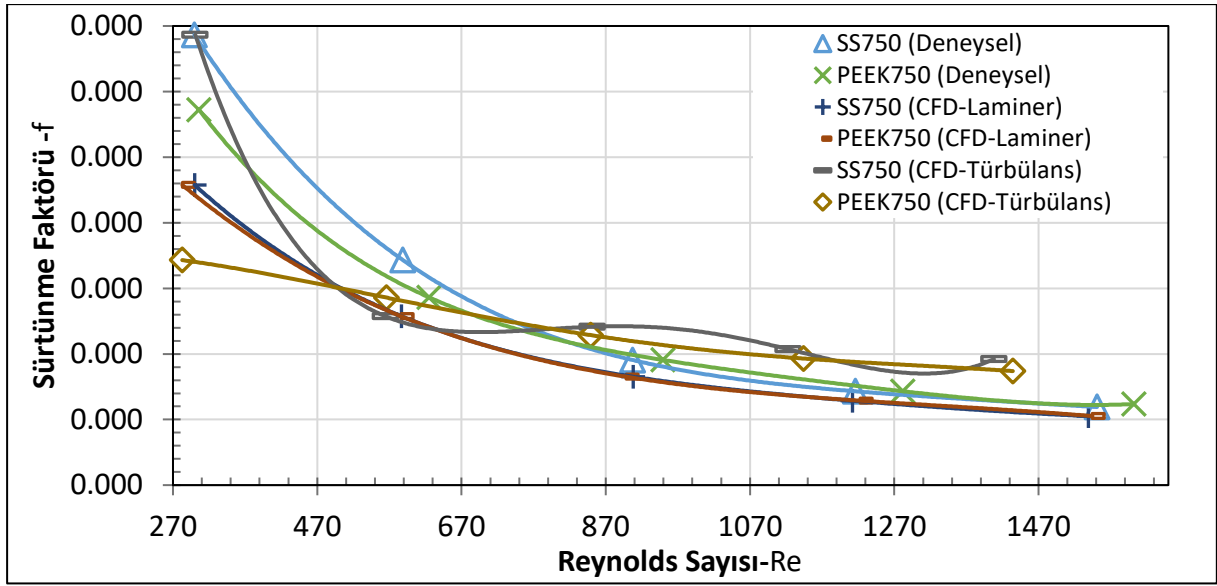


Şekil 4.5 D=750 µm çaplı mini/mikro borular için sürtünme faktörünün Re sayısına göre değişimi (Deneyssel -Teorik).

Re<870 değeri için deneyssel sürtünme faktörü değerlerinin teorik referans denklem değerlerinden daha yüksek olarak elde edildiği Şekil 4.5'te görülmektedir. 400 µm ve 500 µm mini/mikro boru çaplarına ait analiz değerleri incelendiğinde, incelenen çap değerleri için Re<1000 değeri altında deneyssel analiz değerlerin teorik referans denklemi değerlerinden (Haaland) yüksekte çıkması, akış rejimleri için geleneksel kabul edilmiş kritik Reynolds sayılarından farklı şekile gerçekleşmiştir. Bu durum mikro kanal pürüzlülük değerinin, laminar akış bölgesinde dahi güçlü etkisini göstermektedir.

Ghajar'ın (Okstate, 2010) 732 µm çapındaki paslanmaz çelik boru ile yaptığı deneyssel çalışma değerleri, tez çalışmasına ait deneyssel analiz değerlerinden düşük gerçekleşerek Darcy referans denklemi değerleri ile benzer şekilde gerçekleşmiştir. Bunun sebebinin paslanmaz çelik boru iç yüzeyleri ile Ghajar'ın (Okstate, 2010) kullandığı paslanmaz çelik borulara ait iç yüzey pürüzlülük değerlerinin imalat ve işlemeden kaynaklı farklı değerlere sahip olması sebebiyle gerçekleştiği düşünülmüştür.

Şekil 4.6'da 750µm çap değerine sahip mini/mikro borularla yapılan deneyssel çalışma sonuçları, sayısal metot ile gerçekleştirilen laminar ve türbülanslı akış analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.6 D=750 µm çaplı mini/mikro borular için sürtünme faktörünün Re sayısına göre değişimi (Deneyssel -HAD).

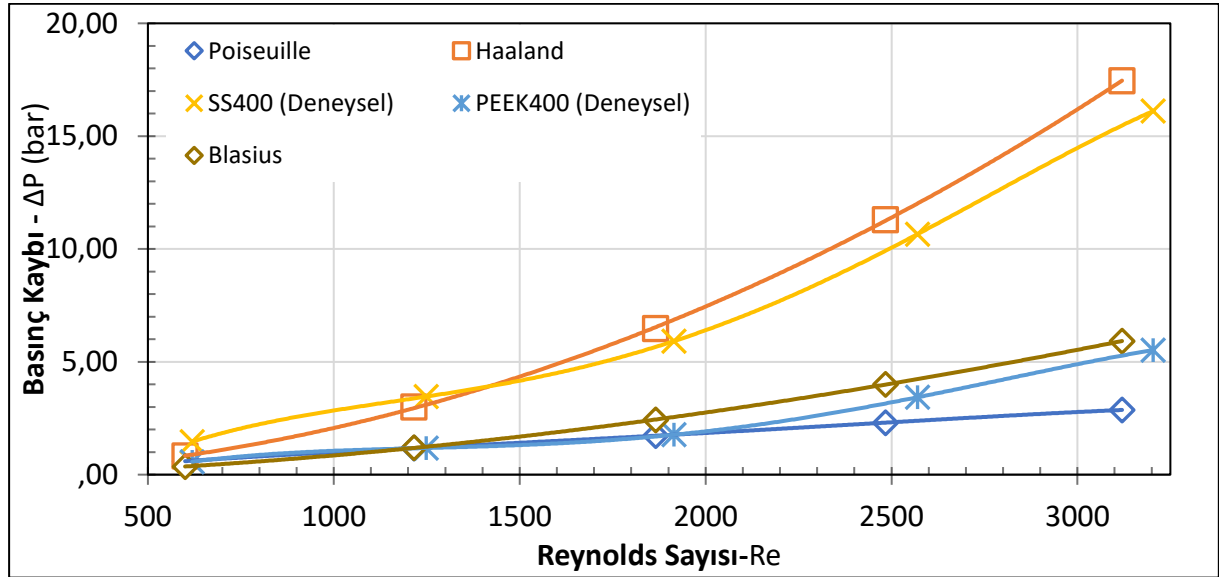
Deneyssel çalışma sürtünme faktörü değerleri ile bilgisayar destekli analiz değerleri incelendiğinde her iki malzeme türüne ait mini/mikro boru sürtünme faktörü değerlerinin birbirine yakın gerçekleştiği Şekil 4.6'da görülmektedir. Deneyssel sürtünme faktörü değerlerinin sayısal analiz laminar akış sürtünme faktörü değerlerinden yüksek değerler aldığı fakat yaklaşık olarak $Re \geq 700$ değerinden sonra sayısal metot türbülanslı akış rejiminde gerçekleştirilen analiz değerlerinin üzerinde gerçekleştiği görülmektedir. Bu durumun, mini/mikro borularda akışın laminar akış bölgesinden geçiş bölgesine geçiş yaptığı kritik Reynolds sayısı değerlerinin geleneksel boru çaplarına ait kritik Reynolds sayısı değerlerine göre daha düşük değerlere sahip olduğunu göstermiştir.

HAD metodu ile gerçekleştirilen türbülanslı akış analiz sonuçlarının boru çap değerleri büyüdükçe deneyssel ve teorik referans sürtünme faktörü değerlerine daha yakın değerler aldığı görülmüştür.

4.2 SÜRTÜNME BASINÇ KAYBI- ΔP_F

Bu bölümde ilgili analizler sonucunda elde edilen sürtünme basınç kaybı değerleri ilgili grafikler üzerinden yorumlanmıştır.

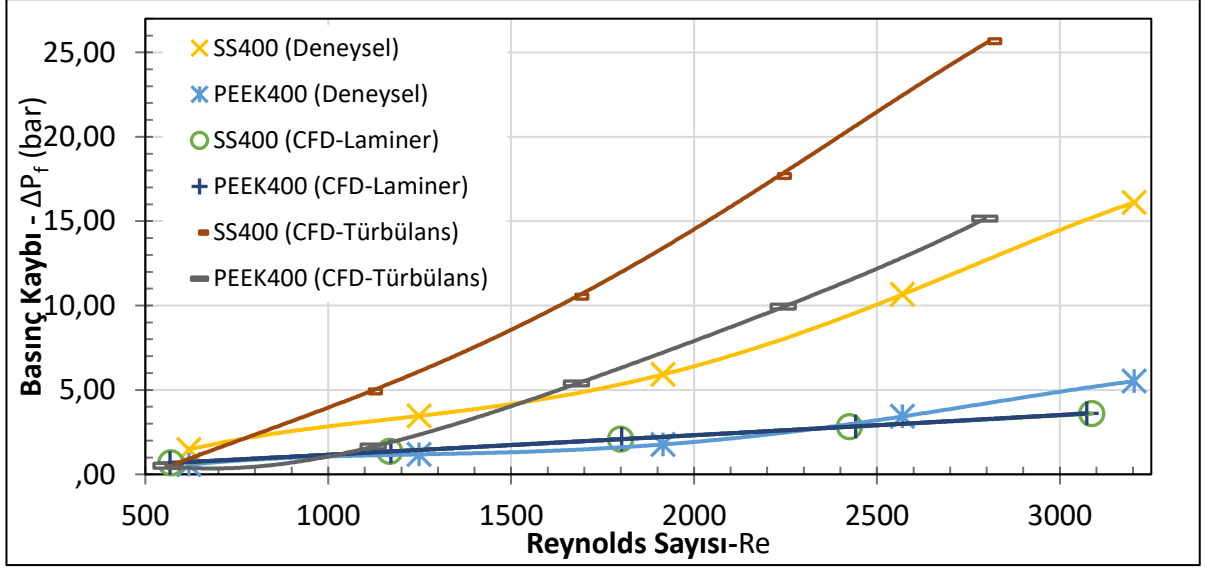
Şekil 4.7’de 400µm çapa sahip mini/mikro boruların deneysel yöntemle ölçülen basınç kaybı değerleri, referans denklem sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.7 D=400 µm çaplı mini/mikro borular için sürtünme basınç kaybının Re sayısına göre değişimi (Deneysel -Teorik).

Deneysel sürtünme basınç kaybı değerlerinin referans teorik denklemlerden Haaland ve Blasius teorik denklem değerleri arasında yer aldığı Şekil 4.7’de görülmektedir. $Re < 1250$ değeri için laminar akış bölgesinde paslanmaz çelik mini/mikro boru sürtünme basınç kaybı değerinin Haaland referans denkleminde yüksek değere sahip olmasının, deneysel analizde kullanılan paslanmaz boru yüzey pürüzlülüğünün kayda değer bir yüksekliğe sahip olduğunu göstermiştir. PEEK boru basınç kaybı değerinin paslanmaz çelik boru basınç düşüşünden düşük çıkması beklenildiği gibi daha düşük değerlerde gerçekleşmiştir.

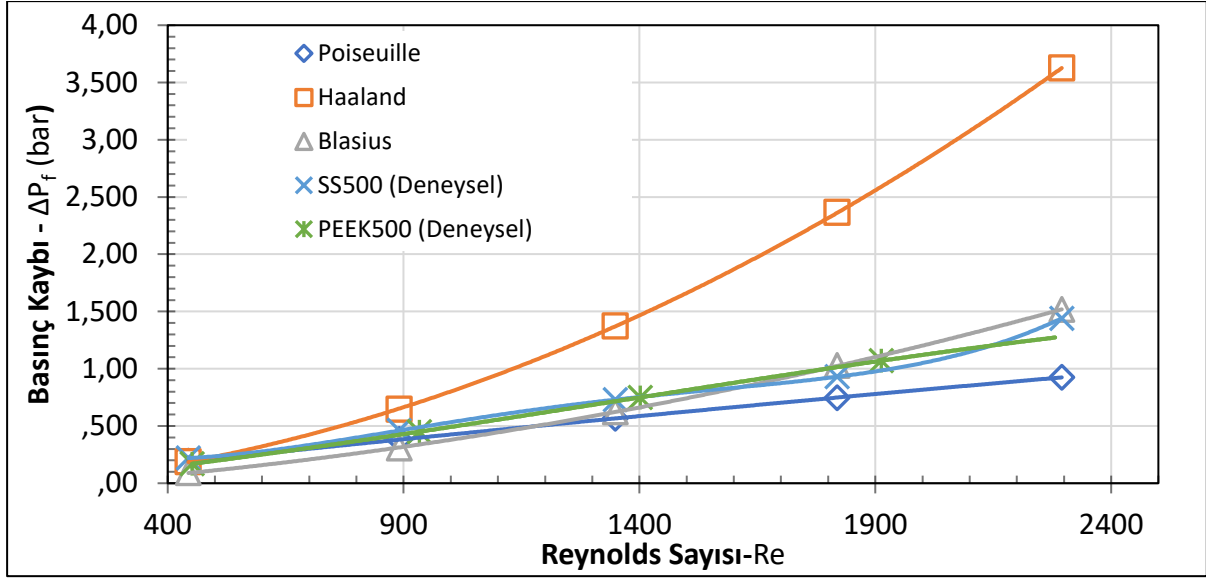
Şekil 4.8’te ölçülen deneysel çalışma basınç kaybı değerleri, sayısal analiz ile elde edilen basınç kaybı değerleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.8 D=400 µm çaplı mini/mikro borular için sürtünme basınç kaybının Re sayısına göre değişimi (Deneyisel -HAD).

Şekil 4.8’de deneysel basınç kaybı değerlerinin sayısal analiz türbülanslı akış rejiminde elde edilen değerlerinden düşük, laminar akış rejiminde gerçekleştirilen analiz değerlerinden ise yüksek olarak elde edildiği görülmüştür. Paslanmaz çelik mini/mikro boru sürtünme basınç kaybı değerinin, PEEK boru basınç kaybı değerinden daha yüksek olarak gerçekleşmiştir.

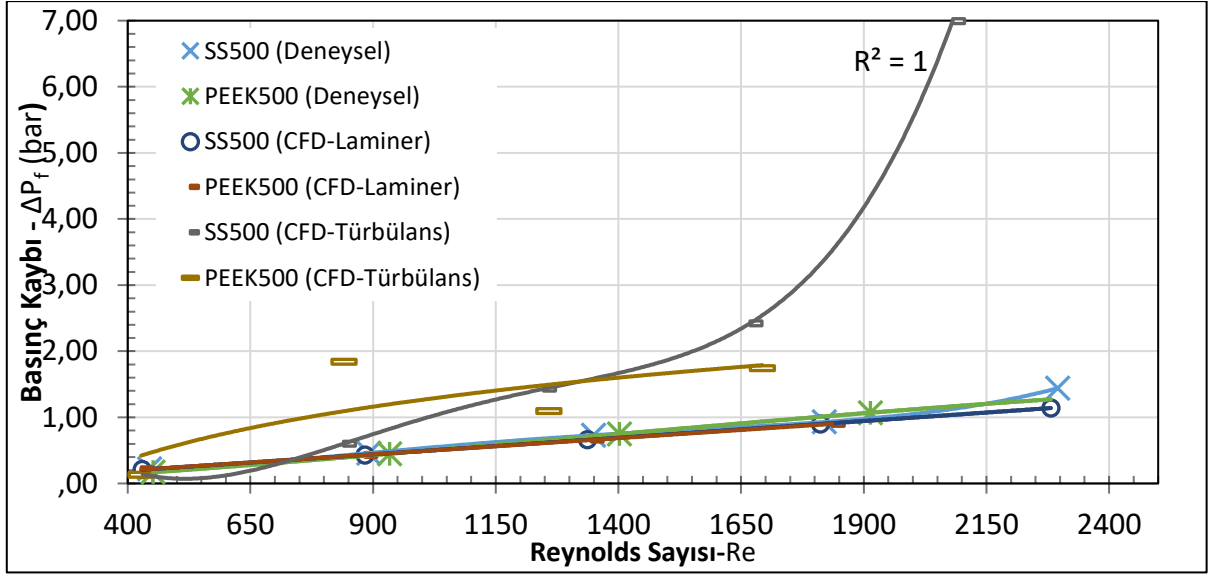
Şekil 4.9’da 500 µm çap ölçüsündeki mini/mikro boruların ölçülen basınç kaybı değerleri referans teorik denklemlerle kıyaslanmıştır.



Şekil 4.9 D=500 μ m çaplı mini/mikro borular için sürtünme basınç kaybının Re sayısına göre değişimi (Deneyisel -Teorik).

İlgili boru çap ölçüsüne ait paslanmaz çelik mini/mikro boru basınç kaybı değişimi, PEEK mini/mikro boru sürtünme basınç kaybı değerlerine Şekil 4.8’de görüldüğü üzere yakın değerlerde gerçekleşmiştir. PEEK malzeme mini/mikro boru için ilgili çap ölçülerine ait 50ml/dk debi değerlerinde deneysel veriye sahip olunmadığı için sadece dört hacimsel debi değeri üzerinden karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.10’da 500 μ m çaplı mini/mikro boruların deneysel basınç ölçüm sonuçları sayısal metot ile gerçekleştirilen analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

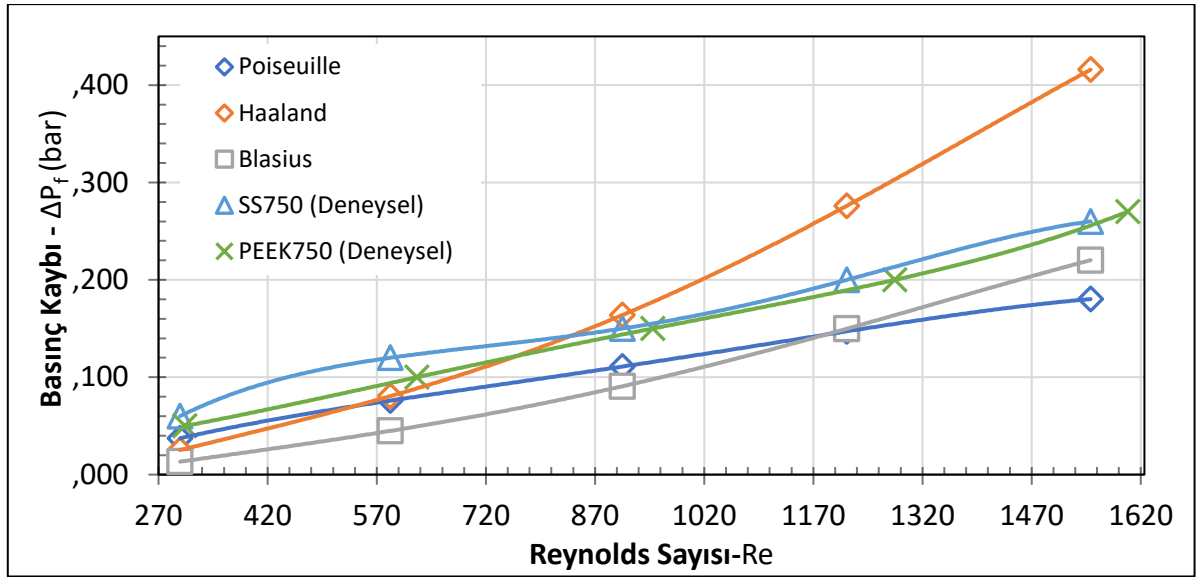


Şekil 4.10 D=500 μm çaplı mini/mikro borular için sürtünme basınç kaybının Re sayısına göre değişimi (Deneyisel -HAD).

İlgili çap ölçüsüne ait basınç kaybı değerleri incelendiğinde, laminar rejimde gerçekleştirilen çalışma sonuçlarının birbirine çok yakın değerlerde gerçekleştiği görülmüştür.

Sayısal analiz türbülanslı akış rejiminde elde edilen basınç kaybı değerlerinin, hem laminar akış rejiminde elde edilen basınç kaybı değerlerinden hem de deneysel çalışma basınç kaybı ölçümlerinden yüksek olduğu görülmüştür.

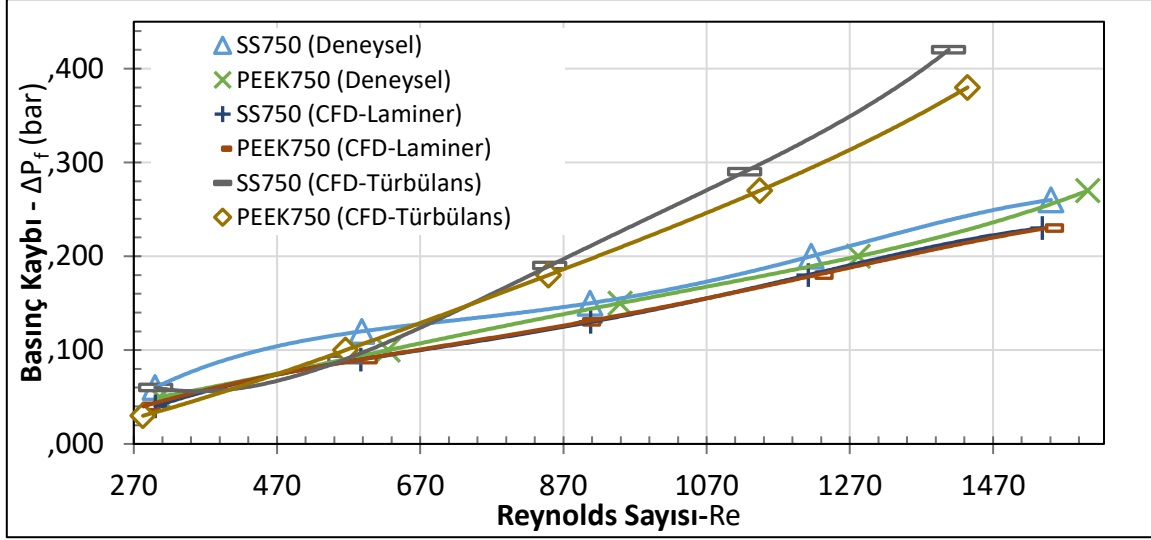
Şekil 4.11’de 750 μm boru çapına sahip mini/mikro borular teorik referans denklemleriyle elde edilen basınç kayıpları değerleri ile kıyaslanmıştır.



Şekil 4.11 D=750 µm çaplı mini/mikro borular için sürtünme basınç kaybının Re sayısına göre değişimi (Deneysel - Teorik).

Reynolds ≤ 870 değeri altında deneysel basınç kaybı değerlerinin, Haaland teorik referans basınç kaybı değerlerinden yüksek olduğu Şekil 4.11’de görülmektedir. $Re < 900$ değeri altında deneysel mini/mikro boru iç yüzey pürüzlülük değerlerinin basınç kaybında etkili olduğu değerlendirilmiştir. Basınç kaybı değerleri Reynolds sayısının artışıyla doğru orantılı olarak değişmekte olduğu görülmektedir.

Şekil 4.12’de 750µm çapa sahip mini/mikro borular, deneysel basınç kaybı ölçüm değerleri, sayısal analiz metodu ile gerçekleştirilen ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.12 D=750 µm çaplı mini/mikro borular için sürtünme basınç kaybının Re sayısına göre değişimi (Deneyssel - HAD).

270≤Re≤570 değer aralığında deneyssel basınç kaybı değerleri ile HAD metodu ile yapılan laminar akış analizinde elde edilen basınç kaybı değerlerinin benzer değerlerde olduğu Şekil 4.12’de görülmektedir. Bu çap değerinde hem deneyssel ölçüm sonuçları hem de sayısal analiz sonuçları birbiriyle yakın değerlerde gerçekleşmiştir.

Gerçekleştirilmiş analiz sonuçlarına esas olarak elde edilen basınç kaybı değerleri incelendiğinde genel olarak şu şekilde değerlendirmelerde bulunulmuştur;

1. Sürtünme basınç kaybı grafikleri incelendiğinde en fazla basınç kaybının 50ml/dk debide 400µm çaplı paslanmaz çelik boruda 50ml/dk hacimsel debi değerinde gerçekleştiği tespit edilmiştir.
2. PEEK boru basınç kaybı değerlerinin paslanmaz çelik boru basınç kaybı değerlerinden daha düşük değerde olması, PEEK boru bağlı pürüzlülük yüksekliğinin daha düşük olmasıyla ilişkilendirilmiştir.
3. Deneyssel çalışma sonuçlarının, sayısal analiz yöntemi laminar akış rejimi değerlerinden yüksek değerler aldığı tespit edilmiştir.
4. Reynolds sayısı ile basınç kaybı değerlerinin doğru orantılı olarak değiştiği görülmüştür.
5. Boru çap ölçülerindeki artış ile basınç kayıpları arasında ters bir orantı olduğu tespit edilmiştir.

6. Boru çap ölçüleri büyüdükçe, HAD analiz sonuçlarının deneysel çalışma sonuçları ve teorik referans denklem değerlerine yakın değer aldığı görülmüştür.

Deneysel elde edilen basınç kaybı değerleri Çizelge 4.1 de, HAD metot laminar analiz basınç kaybı değerleri Çizelge 4.2’te ve HAD metot türbülanslı akış basınç kaybı değerleri Çizelge 4.3’te paylaşılmıştır.

Çizelge 4.1 Deneysel çalışma sürtünme basınç kaybı ve pompa yükü değerleri.

HESAPLAMALAR								
Aşama 1		Sürtünme basınç kaybı değerleri deneysel çalışma sonucu elde edilir.						
					Hacimsel Debi	V' (mL/min)		
			10	20	30	40	50	
SS400	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f_{exp}} = (\text{bar})$	1,46	3,46	5,92	10,66	16,11	
SS500	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f_{exp}} = (\text{bar})$	0,22	0,46	0,73	0,93	1,44	
SS750	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f_{exp}} = (\text{bar})$	0,06	0,12	0,15	0,20	0,26	
PEEK400	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f_{exp}} = (\text{bar})$	0,57	1,18	1,77	3,43	5,52	
PEEK500	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f_{exp}} = (\text{bar})$	0,17	0,45	0,75	1,07		
PEEK750	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f_{exp}} = (\text{bar})$	0,05	0,10	0,15	0,20	0,27	
Aşama 2		Bu değerler yardımı ile sürtünme faktörleri hesap edilir.						
					Hacimsel Debi	V' (mL/min)		
			10	20	30	40	50	
SS400	Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f_{exp}} / [(L/Din)\rho V^2/2]$	0,261	0,155	0,118	0,119	0,115	
SS500	Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f_{exp}} / [(L/Din)\rho V^2/2]$	0,166	0,087	0,061	0,044	0,043	
SS750	Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f_{exp}} / [(L/Din)\rho V^2/2]$	0,343	0,172	0,095	0,072	0,060	
PEEK400	Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f_{exp}} / [(L/Din)\rho V^2/2]$	0,102	0,053	0,035	0,038	0,040	
PEEK500	Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f_{exp}} / [(L/Din)\rho V^2/2]$	0,128	0,085	0,063	0,050		
PEEK750	Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f_{exp}} / [(L/Din)\rho V^2/2]$	0,286	0,143	0,095	0,072	0,062	
Aşama 3		Pompa Yükü Hesabı Hacimsel debi değerleri ile sürtünme basınç kaybı değerleri çarpılarak pompa yükü değeri hesap edilir.						
					Hacimsel Debi	V' (mL/min)		
			10	20	30	40	50	
			1,667E-07	3,333E-07	5,000E-07	6,667E-07	8,333E-07	
SS400	W_{pompa}	$V * \Delta P_{f_{exp}} = (\text{Watt})$	0,02	0,12	0,30	0,71	1,34	
SS500	W_{pompa}	$V * \Delta P_{f_{exp}} = (\text{Watt})$	0,00	0,02	0,04	0,06	0,12	
SS750	W_{pompa}	$V * \Delta P_{f_{exp}} = (\text{Watt})$	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	
PEEK400	W_{pompa}	$V * \Delta P_{f_{exp}} = (\text{Watt})$	0,01	0,04	0,09	0,23	0,46	
PEEK500	W_{pompa}	$V * \Delta P_{f_{exp}} = (\text{Watt})$	0,00	0,02	0,04	0,07		
PEEK750	W_{pompa}	$V * \Delta P_{f_{exp}} = (\text{Watt})$	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	

Çizelge 4.2 HAD metot laminar analiz sürtünme basınç kaybı ve pompa yükü değerleri.

HESAPLAMALAR							
Aşama 1							
					Hacimsel Debi	V' (mL/min)	
			10	20	30	40	50
SS400	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f,cd} = (\text{bar})$	0,66	1,36	2,08	2,82	3,59
SS500	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f,cd} = (\text{bar})$	0,21	0,43	0,66	0,90	1,14
SS750	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f,cd} = (\text{bar})$	0,04	0,09	0,13	0,18	0,23
PEEK400	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f,cd} = (\text{bar})$	0,67	1,36	2,09	2,83	3,61
PEEK500	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f,cd} = (\text{bar})$	0,21	0,43	0,66	0,90	
PEEK750	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f,cd} = (\text{bar})$	0,04	0,09	0,13	0,18	0,23
Aşama 2							
					Hacimsel Debi	V' (mL/min)	
			10	20	30	40	50
SS400	Sürtünme Faktörü	$f_{cd} = \Delta P_{f,cd} / [(L/Din) \rho V^2/2]$	0,118	0,061	0,041	0,032	0,026
SS500	Sürtünme Faktörü	$f_{cd} = \Delta P_{f,cd} / [(L/Din) \rho V^2/2]$	0,158	0,081	0,055	0,042	0,034
SS750	Sürtünme Faktörü	$f_{cd} = \Delta P_{f,cd} / [(L/Din) \rho V^2/2]$	0,229	0,129	0,083	0,064	0,053
PEEK400	Sürtünme Faktörü	$f_{cd} = \Delta P_{f,cd} / [(L/Din) \rho V^2/2]$	0,120	0,061	0,042	0,032	0,026
PEEK500	Sürtünme Faktörü	$f_{cd} = \Delta P_{f,cd} / [(L/Din) \rho V^2/2]$	0,158	0,081	0,055	0,042	
PEEK750	Sürtünme Faktörü	$f_{cd} = \Delta P_{f,cd} / [(L/Din) \rho V^2/2]$	0,229	0,129	0,083	0,064	0,053
Aşama 3							
					Hacimsel Debi	V' (mL/min)	
			10	20	30	40	50
			1,667E-07	3,333E-07	5,000E-07	6,667E-07	8,333E-07
SS400	W_{pompa}	$V * \Delta P_{f,cd} = (\text{Watt})$	0,011	0,045	0,104	0,188	0,299
SS500	W_{pompa}	$V * \Delta P_{f,cd} = (\text{Watt})$	0,004	0,014	0,033	0,060	0,095
SS750	W_{pompa}	$V * \Delta P_{f,cd} = (\text{Watt})$	0,001	0,003	0,007	0,012	0,019
PEEK400	W_{pompa}	$V * \Delta P_{f,cd} = (\text{Watt})$	0,011	0,045	0,105	0,189	0,301
PEEK500	W_{pompa}	$V * \Delta P_{f,cd} = (\text{Watt})$	0,004	0,014	0,033	0,060	
PEEK750	W_{pompa}	$V * \Delta P_{f,cd} = (\text{Watt})$	0,001	0,003	0,007	0,012	0,019

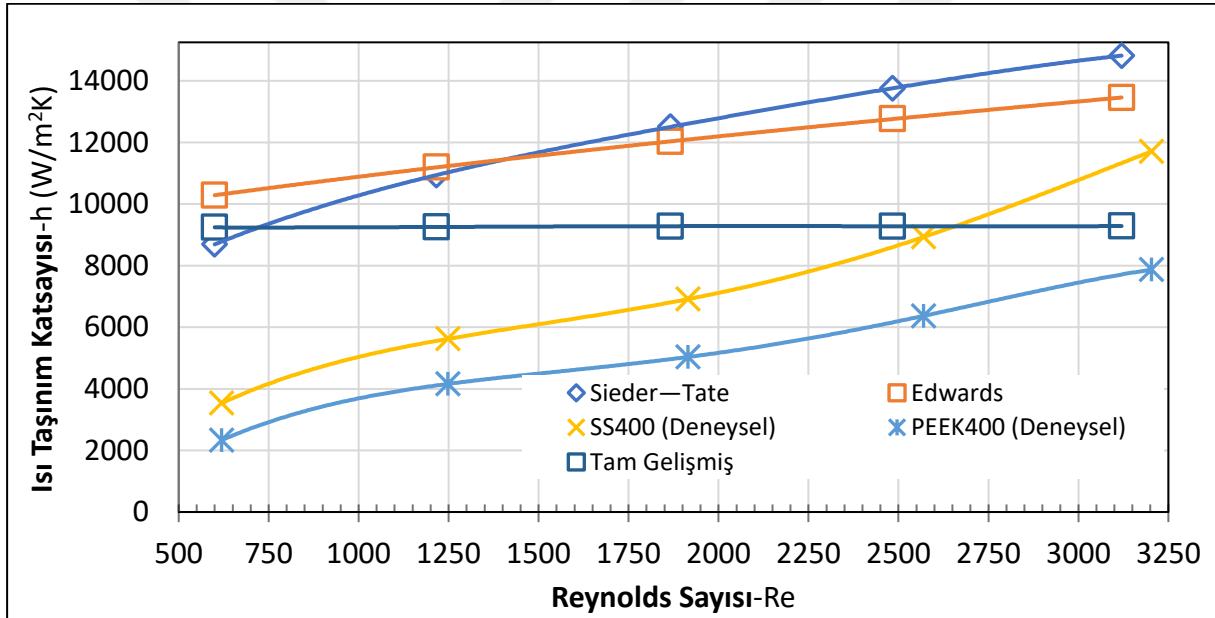
Çizelge 4.3 HAD metot türbülanslı analiz basınç kaybı ve pompa yükü değerleri.

HESAPLAMALAR							
Aşama 1							
					Hacimsel Debi	V' (mL/min)	
			10	20	30	40	50
SS400	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f,cd} = (\text{bar})$	0,47	4,90	10,51	17,67	25,65
SS500	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f,cd} = (\text{bar})$	0,14	0,60	1,43	2,42	6,99
SS750	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f,cd} = (\text{bar})$	0,06	0,09	0,19	0,29	0,42
PEEK400	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f,cd} = (\text{bar})$	0,49	1,64	5,37	9,93	15,15
PEEK500	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f,cd} = (\text{bar})$	0,13	1,84	1,09	1,74	
PEEK750	Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f,cd} = (\text{bar})$	0,03	0,10	0,18	0,27	0,38
Aşama 2							
					Hacimsel Debi	V' (mL/min)	
			10	20	30	40	50
SS400	Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f,cd} / [(L/Din) \rho V^2/2]$	0,084	0,219	0,209	0,197	0,183
SS500	Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f,cd} / [(L/Din) \rho V^2/2]$	0,105	0,113	0,120	0,114	0,210
SS750	Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f,cd} / [(L/Din) \rho V^2/2]$	0,343	0,129	0,121	0,104	0,096
PEEK400	Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f,cd} / [(L/Din) \rho V^2/2]$	0,088	0,073	0,107	0,111	0,108
PEEK500	Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f,cd} / [(L/Din) \rho V^2/2]$	0,098	0,346	0,091	0,082	
PEEK750	Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f,cd} / [(L/Din) \rho V^2/2]$	0,172	0,143	0,114	0,096	0,087
Aşama 3							
					Hacimsel Debi	V' (mL/min)	
			10	20	30	40	50
			1,667E-07	3,333E-07	5,000E-07	6,667E-07	8,333E-07
SS400	W_{pompa}	$V * \Delta P_{f,cd} = (\text{Watt})$	0,008	0,163	0,526	1,178	2,138
SS500	W_{pompa}	$V * \Delta P_{f,cd} = (\text{Watt})$	0,002	0,020	0,072	0,161	0,583
SS750	W_{pompa}	$V * \Delta P_{f,cd} = (\text{Watt})$	0,001	0,003	0,010	0,019	0,035
PEEK400	W_{pompa}	$V * \Delta P_{f,cd} = (\text{Watt})$	0,008	0,055	0,269	0,662	1,263
PEEK500	W_{pompa}	$V * \Delta P_{f,cd} = (\text{Watt})$	0,002	0,061	0,055	0,116	
PEEK750	W_{pompa}	$V * \Delta P_{f,cd} = (\text{Watt})$	0,001	0,003	0,009	0,018	0,032

4.3 ISI TAŞINIM KATSAYISI-H

Bu bölümde gerçekleştirilen analizler sonucu elde edilen ısı taşınım katsayısı değerleri grafikler üzerinden yorumlanmıştır. Çalışma değerlerini kıyaslamak için teorik referans denklemlerin seçiminde, deneysel analizlerden elde edilen Reynolds sayıları $Re \leq 3500$ olduğu için büyük Reynolds sayı aralıklarını esas alan teorik denklemler yerine, hidrodinamik olarak gelişmiş, ısı olarak gelişen akışlar için kullanılan referans denklem olarak "Edwards" ve hidrodinamik ve ısı olarak gelişen akışlar için kullanılan referans denklem "Sieder-Tate" tercih edilmiştir.

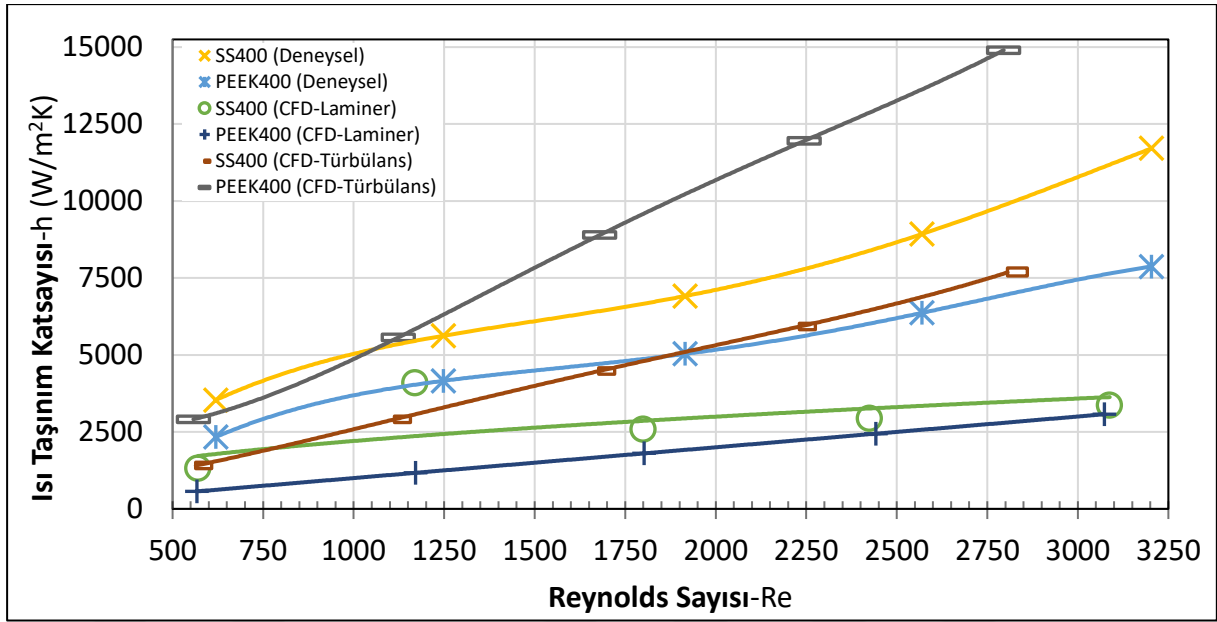
Şekil 4.13'te 400µm çap ölçüsüne sahip mini/mikro borularda elde edilen ısı taşınım katsayısı değerleri teorik denklemlerle elde edilen ısı taşınım katsayısı ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.13 D=400 µm çaplı mini/mikro borular için ısı taşınım katsayısının Re sayısına göre değişimi (Deneysel - Teorik).

Paslanmaz çelik boru deneysel ısı taşınım katsayısı değerlerinin, PEEK malzeme ısı taşınım katsayısı değerlerinden daha yüksek değerler aldığı Şekil 4.13'te görülmektedir. Deneysel çalışma ısı taşınım katsayısı değerlerinin Sieder-Tate ve Edwards referans denklemleri değerleriyle karşılaştırıldığında daha düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir.

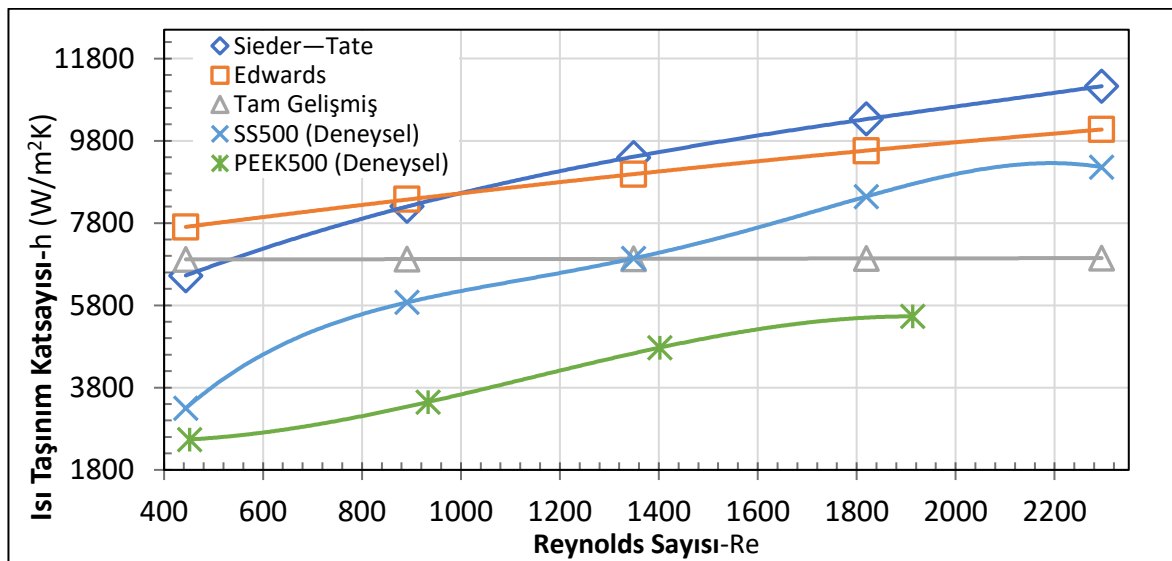
Şekil 4.14'te aynı çap ölçüsüne sahip mini/mikro borulara ait ısı taşınım katsayıları deneysel ve sayısal analiz yöntemiyle ile gerçekleştirilen analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.14 D=400 µm çaplı mini/mikro borular için ısı taşınım katsayısının Re sayısına göre değişimi (Deneyssel - HAD).

Re=1200 değerinden sonra hem deneyssel hem de HAD analiziyle elde edilen ısı taşınım katsayısı değerlerindeki düşüş Şekil 4.14’de dikkat çekicidir. Reynolds sayısı artışı ile ısı taşınım katsayılarındaki artı doğru orantılı şekilde gerçekleşmiştir.

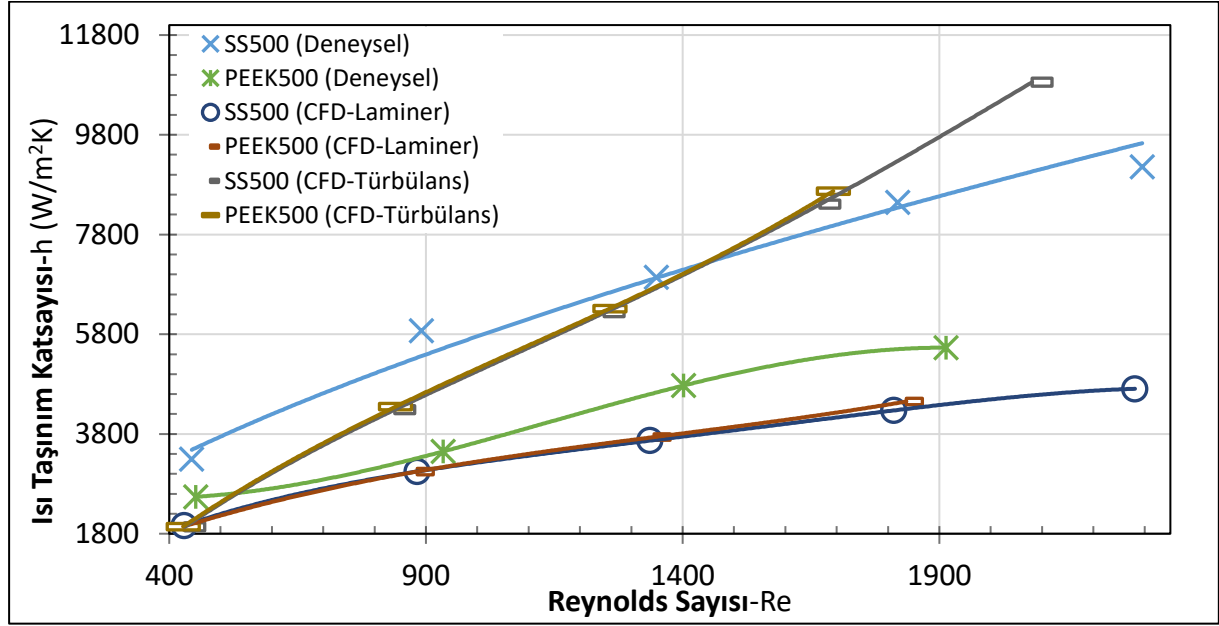
Şekil 4.15’te 500µm boru çaplı mini/mikro borulara ait ısı taşınım katsayıları referans denklemlerle elde edilen ısı taşınım katsayıları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.15 D=500 µm çaplı mini/mikro borular için ısı taşınım katsayısının Re sayısına göre değişimi (Deneyssel - Teorik).

Grafikte yer alan Reynolds sayısı aralığında deneysel olarak hesaplanan ısı taşınım katsayı değerleri, referans teorik denklem değerleri altında kaldığı Şekil 4.15’de görülmektedir. Bu durum akışın hem hidrodinamik hem de ısıl olarak gelişimine devam ettiğini göstermektedir.

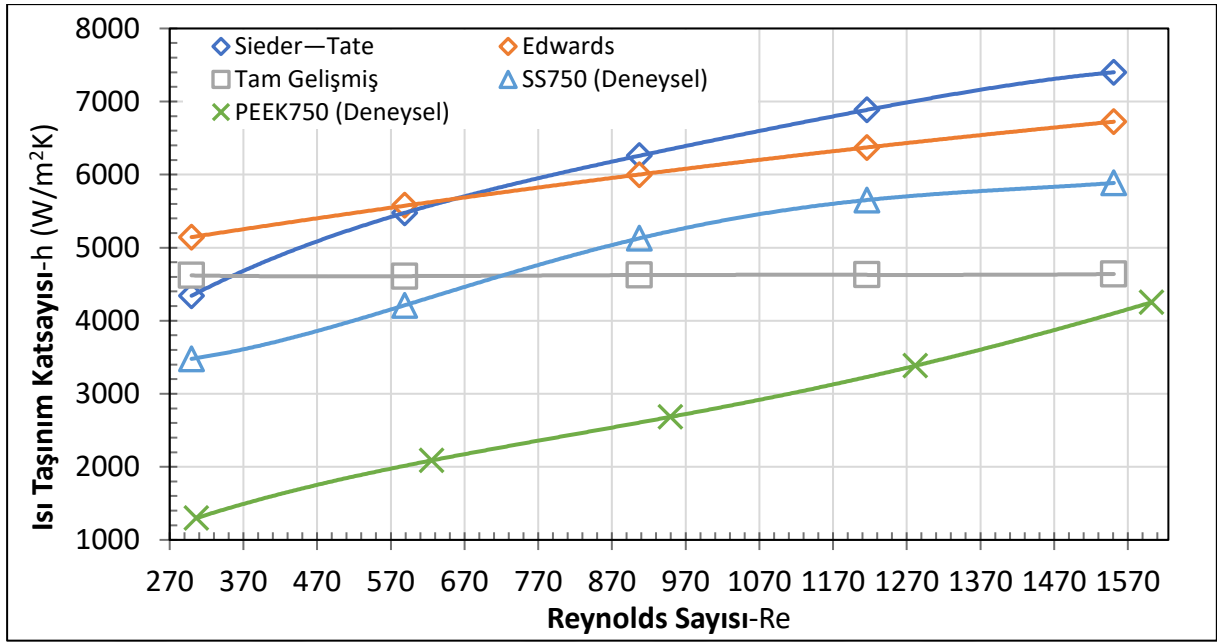
Şekil 4.16’da 500µm çap ölçüsüne sahip boruların deneysel ve sayısal analiz yöntemiyle elde edilen ısı taşınım katsayı değerleri irdelenmiştir.



Şekil 4.16 D=500 µm çaplı mini/mikro borular için ısı taşınım katsayısının Re sayısına göre değişimi (Deneyssel - HAD).

Her iki boru malzemesi için HAD metot laminer analiz sonuçlarının kendi aralarında, türbülans akış rejimine göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarının kendi aralarında yakın değerlere sahip olduğu Şekil 4.16’da görülmektedir. Deneysel çalışma değerleri, sayısal analiz ısı taşınım katsayısı değerlerinden yüksek olarak elde edilmiştir. Paslanmaz çelik mini/mikro boru deneysel ısı taşınım katsayısı değerleri PEEK mini/mikro boru ısı taşınım katsayısı değerlerinden yüksek değerde elde edilmiştir.

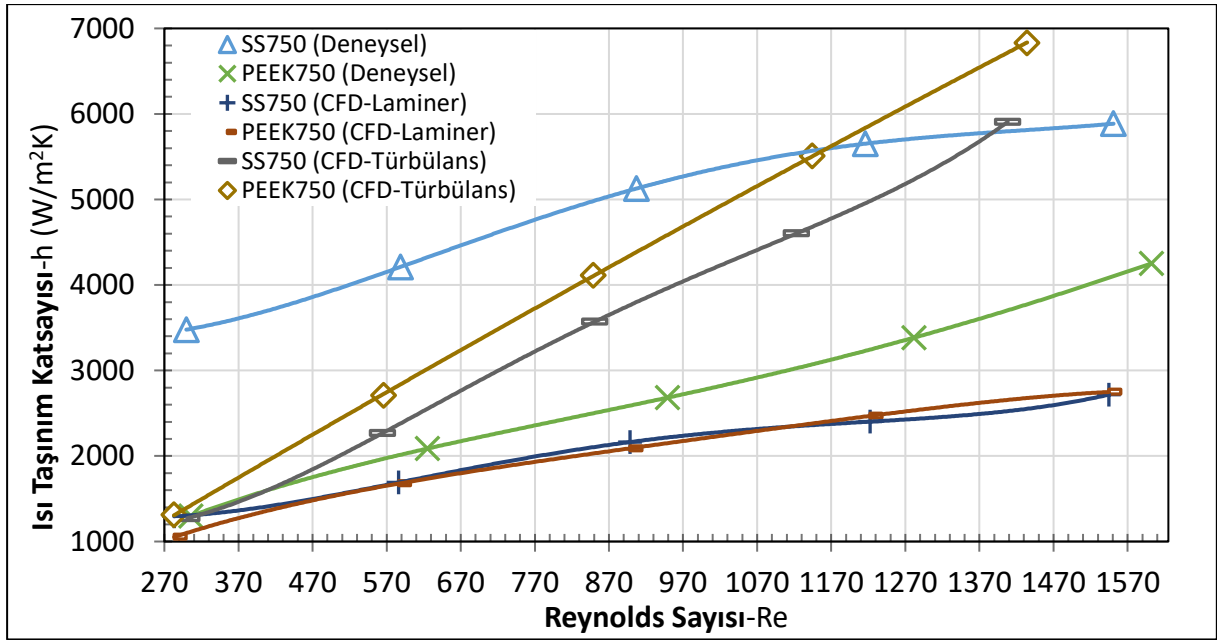
Şekil 4.17’de boruların deneysel yöntemle hesaplanan ısı taşınım katsayı değerleri, teorik denklemlerle karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.17 D=750 μm çaplı mini/mikro boruların ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi (Deneyisel - Teorik).

Şekil 4.17'deki ilgili grafikteki Reynolds sayısı aralığında deneysel analiz sonucu tespit edilen ısı taşınım katsayısı değerleri teorik referans denklem ısı taşınım katsayısı değerlerinin altında gerçekleşmiştir. Bu durum akışın ısı ve hidrodynamic olarak gelişimini sürdürdüğü değerlendirilmiştir.

Şekil 4.18'te HAD metot ile gerçekleştirilen analiz sonuçları deneysel yöntem analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır



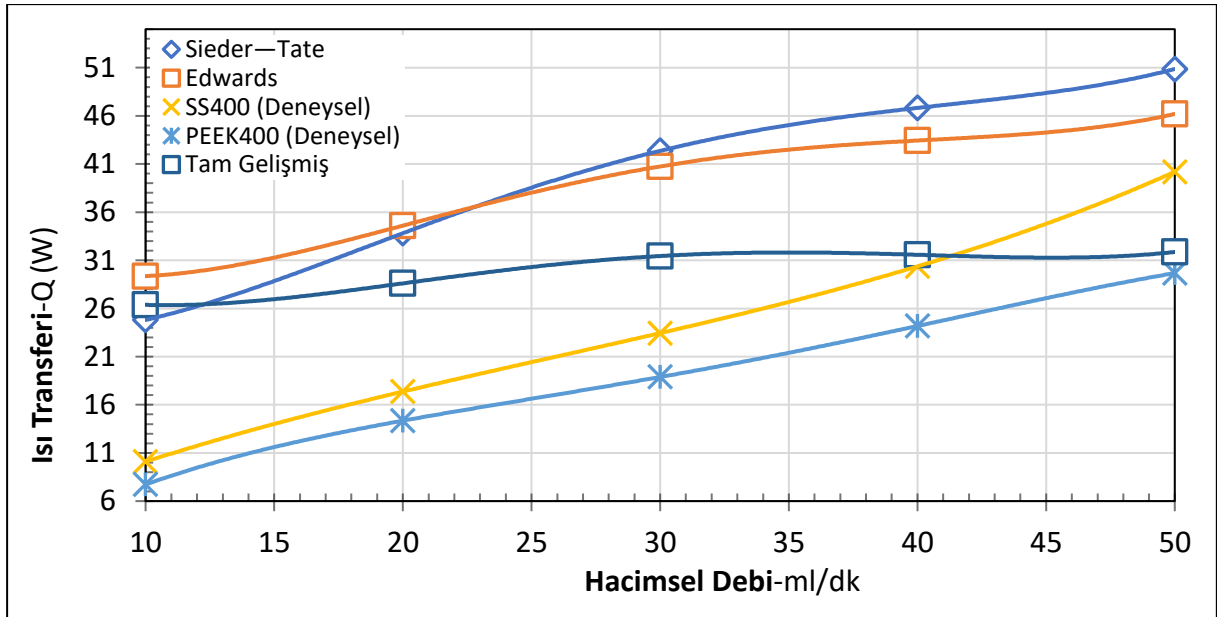
Şekil 4.18 D=750 µm çaplı mini/mikro boruların ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi (Deneyssel - HAD).

Paslanmaz çelik mini/mikro boru için deneyssel ısı taşınım katsayısı değerlerinin hem PEEK malzemeyle gerçekleştirilmiş analiz sonuçlarından hem de diğer yöntemlerle gerçekleştirilmiş çalışma ve analiz sonuçlarından yüksek değerlerde gerçekleştiği Şekil 4.18’de gösterilmiştir.

4.4 ISI TRANSFERİ - Q

Bu bölümde deneyssel ve bilgisayar destekli analiz yöntemlerine göre elde edilen ısı transferi değerleri (soğutma yükleri) hem teorik referans denklemlerle hem de sayısal analiz yöntemleriyle karşılaştırılmıştır.

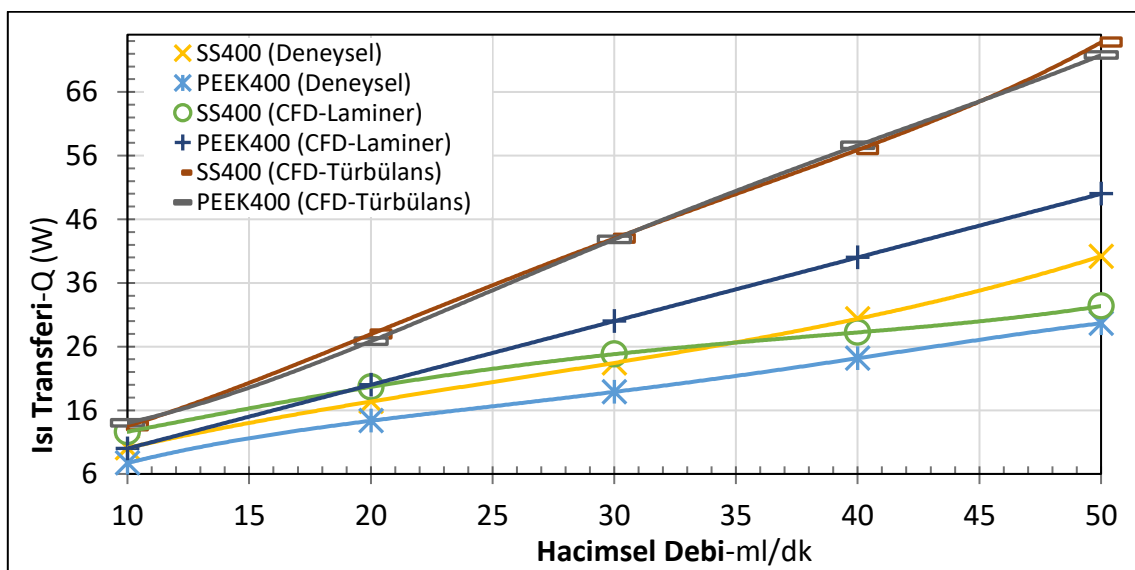
Şekil 4.19’da 400µm çaplı mini/mikro boruların soğutma yükleri referans denklemlerle kıyaslanmıştır.



Şekil 4.19 D=400 µm çaplı mini/mikro boruların ısı transferi değerlerinin akışkan debisine göre değişimi (Deneyssel - Teorik).

Deneyssel elde edilen ısı transfer değerlerinin teorik referans denklem değerlerinin altında elde edildiği Şekil 4.19da görülmektedir. Hacimsel debi değerlerindeki artışının ısı transferi değerleri ile doğrusal bir ilişkide olduğu görülmektedir.

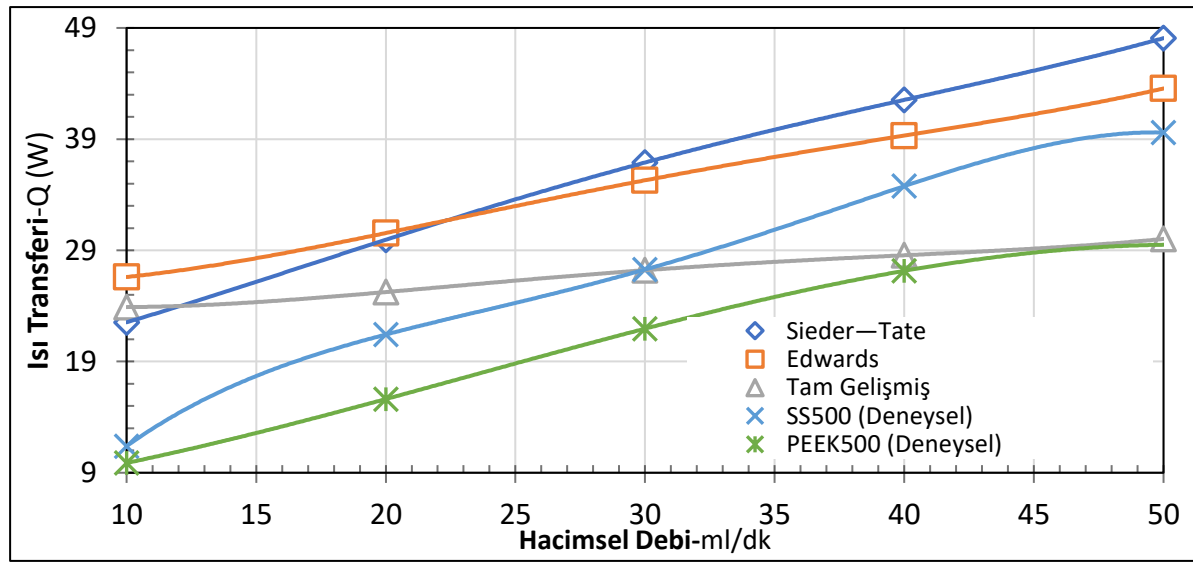
Şekil 4.20'de aynı çap ölçüsüne sahip borulara ait soğutma yükleri deneyssel ve nümerik yöntemle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.20 D=400 µm çaplı mini/mikro boruların ısı transferi değerlerinin akışkan debisine göre değişimi (Deneyssel - HAD).

30ml/dk hacimsel debi değerine kadar HAD laminar akış rejimine göre gerçekleştirilen analiz değerlerinin deneysel gerçekleştirilmiş analiz değerlerinden yüksek değerlere sahip olduğu Şekil 4.20’de görülmektedir. Hem deneysel çalışma sonuçlarına göre hem de sayısal analiz sonuçlarına göre PEEK boru ısı transferi değerleri, paslanmaz çelik boru ısı transferi değerinden yüksek olarak elde edilmiştir.

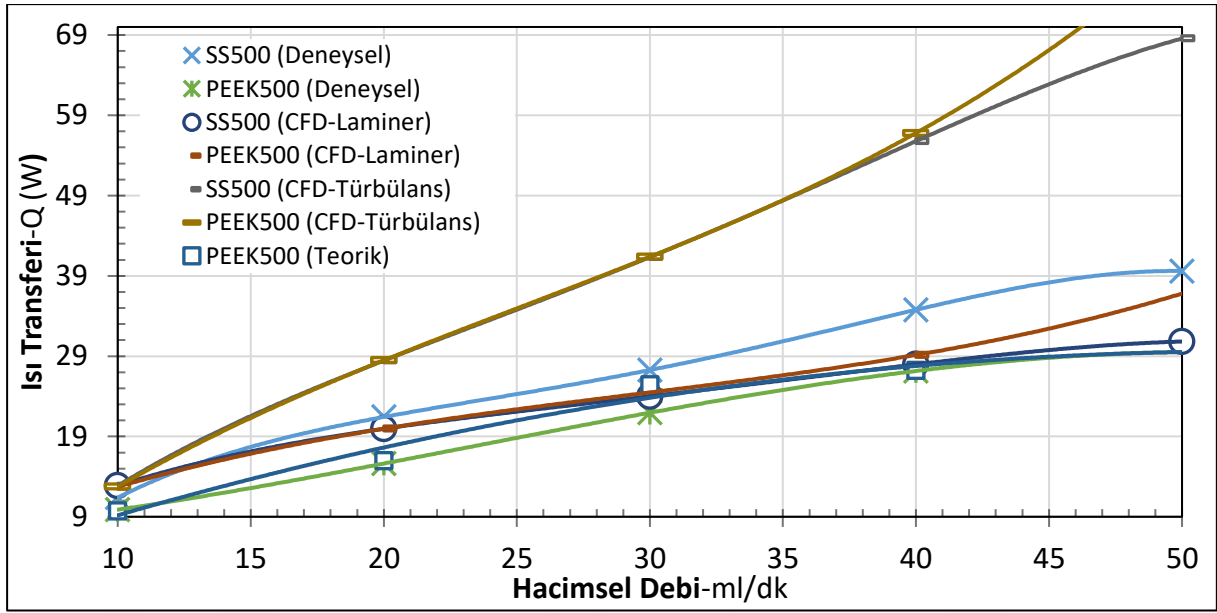
Şekil 4.21’de 500 μm çaplı ölçüsünde oluşan soğutma yüklerinin teorik referans denklem değerleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.21 D=500 μm çaplı mini/mikro boruların ısı transferinin akışkan debisine göre değişimi (Deneysel - Teorik).

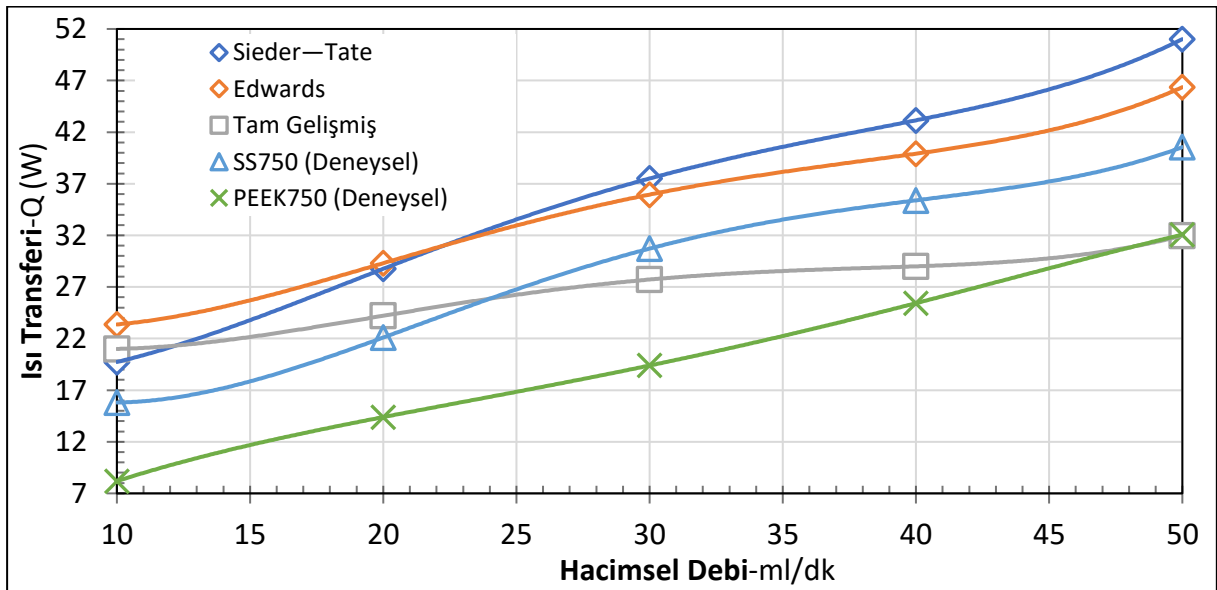
Deneysel çalışma sonucu elde edilen ısı transferi değerlerinin teorik referans denklemlere göre düşük değerler elde edildiği Şekil 4.21’de görülmektedir. Hacimsel debi değerlerinin artmasıyla doğrusal orantılı olarak ısı transferi değerlerinin arttığı görülmektedir.

Şekil 4.22’de bu çap ölçülerine ait soğutma yükleri deneysel yöntem ve sayısal analiz yöntemleri ile elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır.



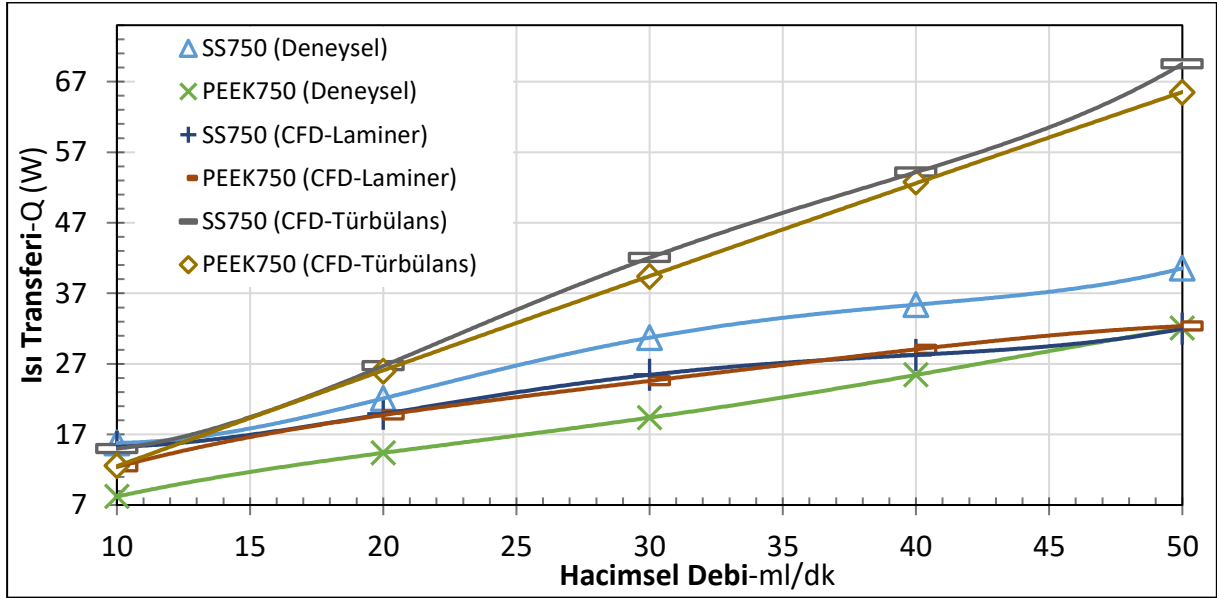
Şekil 4.22 D=500 µm çaplı mini/mikro boruların ısı transferinin akışkan debisine göre değişimi (Deneyssel - HAD).

Deneyssel olarak elde edilen PEEK mini/mikro boru ısı transferi değerlerinin diğer analiz değerlerinden daha düşük gerçekleştiği Şekil 4.22'de görülmektedir. Paslanmaz çelik deneyssel ısı transferi değerlerinin HAD metot laminar akış rejimine göre gerçekleştirilen analiz değerlerinden yüksek olarak gerçekleştiği yine aynı grafik üzerinde gözlemlenmektedir. Şekil 4.23'te deneyssel yöntemle elde edilen sonuçlar ile teorik referans denklem sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.23 D=750µm çaplı mini/mikro boruların ısı transferinin akışkan debisine göre değişimi (Deneyssel - Teorik).

Deneyisel elde edilen ısı transfer değerlerinin referans teorik denklem değerlerine göre düşük gerçekleştiği Şekil 4.23'te görülmektedir. Paslanmaz çelik mini/mikro boru ısı transfer değerleri, PEEK malzemeden imal mini/mikro boru ısı transfer değerlerinden yüksek olarak elde edilmiştir. Şekil 4.24'te deneyisel çalışmaya ait soğutma yükü değerleri ile sayısal analiz yöntemiyle elde edilen soğutma yükü değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.24 D=750µm çaplı mini/mikro boruların ısı transferinin akışkan debisine göre değişimi (Deneyisel-HAD).

Deneyisel olarak elde edilen PEEK boru ısı transferi değerlerinin diğer yöntemlerle elde edilen ısı transferi değerlerinden daha düşük değerde gerçekleştiği Şekil 4.24'de görülmektedir. Paslanmaz çelik mini/mikro borunun deneyisel ısı transferi değerlerinin HAD yöntemiyle gerçekleştirilen laminer akış rejimine ait ısı transfer değerlerinden yüksek olarak gerçekleştiği yine aynı grafik üzerinde görülmektedir.

İlgili grafikler genel olarak yorumlanacak olursa eğer;

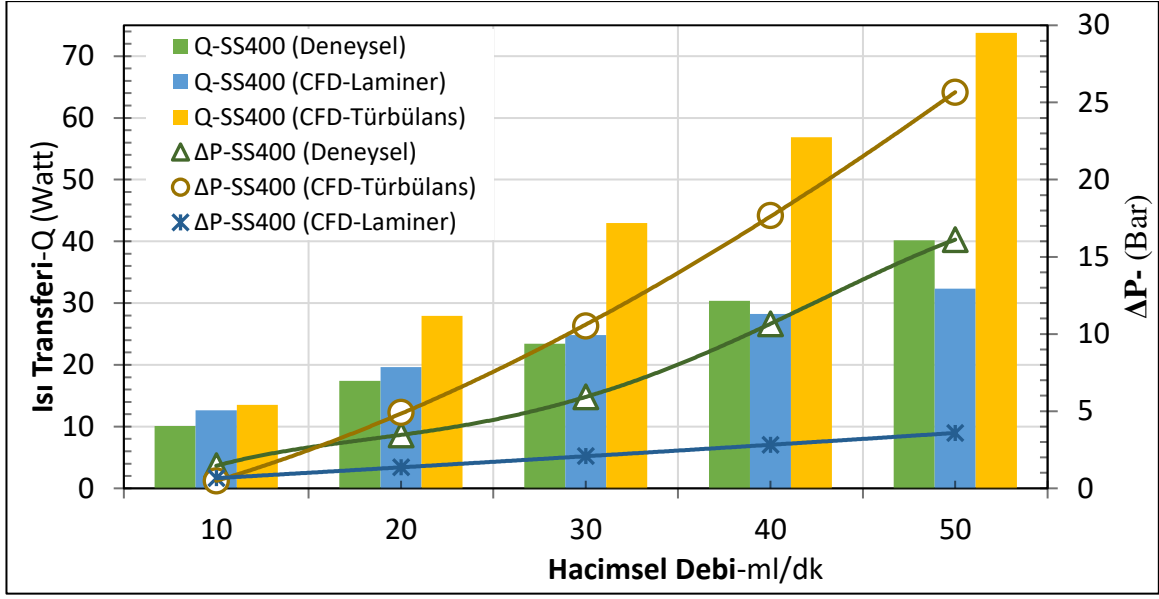
1. En yüksek soğutma yükü değeri, deneyisel çalışma sonuçlarına göre 750 µm çaplı paslanmaz çelik boruda 50 ml/dk hacimsel debi değerinde elde edilmiştir.
2. En yüksek ısı transfer değerleri HAD metot laminer akış rejimine göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre 400 µm çaplı paslanmaz çelik boruda 50 ml/dk hacimsel debi değerinde elde edilmiştir.

3. En yüksek ısı transfer değerleri HAD metot türbülanslı akış rejimine göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre 400 µm çaplı paslanmaz çelik boruda 50 ml/dk hacimsel debi değerinde elde edilmiştir
4. Paslanmaz çelik mini/mikro boruda sayısal analiz laminar rejimde elde edilen soğutma yükü değerleri deneysel yöntemle elde edilen soğutma yükü değerlerinden düşük olarak elde edilirken, PEEK mini/mikro boruda ise deneysel çalışma sonuçlarından yüksek olarak elde edilmiştir. Bu duruma PEEK mini/mikro boruların gerçek iç yüzey pürüzlülük değerinin sayısal yöntemlerdeki hesaplanan değerinden yüksek değere sahip olması sebebiyle gerçekleştiği değerlendirilmiştir.
5. Hacimsel debi artışı ile ısı transferi değerleri doğrusal orantılı olarak değiştiği tespit edilmiştir.

4.5 MİNİ/MİKRO BORU ÇAP ÖLÇÜLERİ VE MALZEME TÜRLERİNE GÖRE ISI TRANSFERİ – BASINÇ KAYBI İLİŞKİSİ

Bu bölümde mini/mikro borular, malzeme türüne göre ve boru çap ölçülerine göre soğutma yükleri ile basınç kaybı değerleri arasındaki ilişki değişen debi değerlerine bağlı olarak irdelenmiştir. Bu bölümde ilgili malzeme türleri aynı çap ölçüsü değerinde farklı metotlar ile gerçekleştirilen sonuçlar üzerinden değerlendirilmiştir.

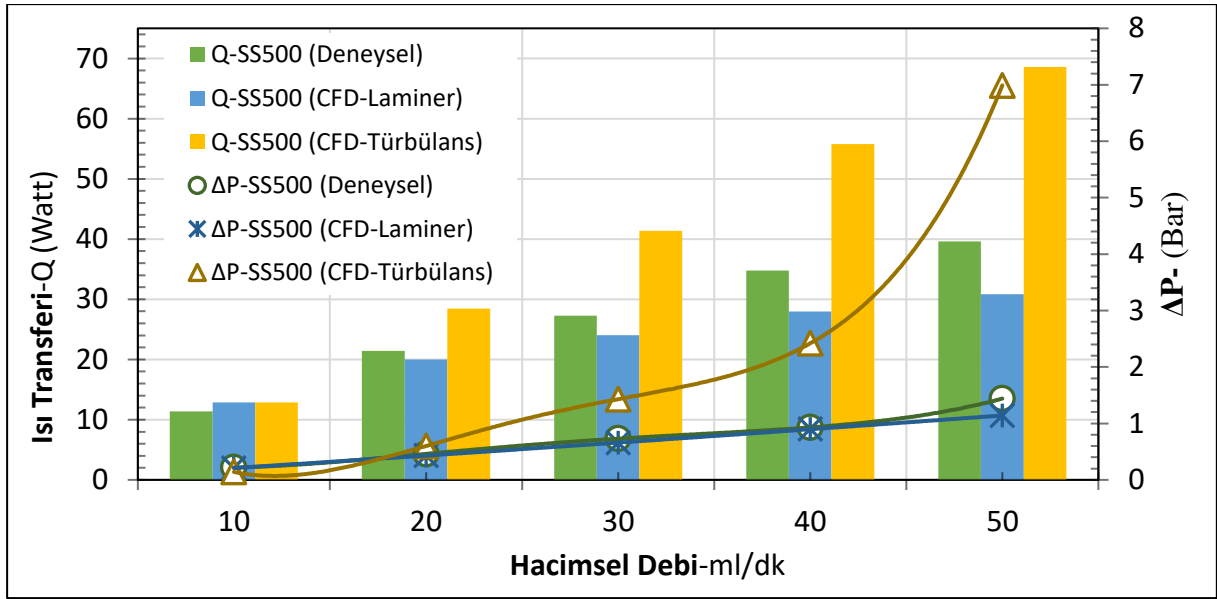
400 µm çaplı paslanmaz çelik mini/mikro boruya ait, deneysel çalışma ve sayısal analiz sonucu elde edilen soğutma yükü ve basınç düşüşü değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.25'te gösterilmiştir.



Şekil 4.25 SS400 çaplı mini/mikro boruya ait ısı transferi-basınç düşüşü arasındaki değişim.

İlgili şekil incelendiğinde en yüksek soğutma yükü değerinin HAD metot türbülanslı akış analiz sonuçlarında elde edildiği görülmektedir. Artan hacimsel debi miktarı ile basınç düşüşünün de doğrusal olarak değiştiği görülmektedir. 30 ml/dk hacimsel debi değerine kadar deneysel ölçüm sonuçlarının HAD metot laminer akış analiz sonuçlarından düşük değerlerde gerçekleştiği, artan hacimsel debi miktarıyla birlikte yükselişe geçtiği görülmektedir. Deneysel çalışma basınç kaybı değerlerinin HAD metot laminer rejim akış analizine ait basınç kaybı değerlerinden yüksek olarak gerçekleştiği görülmektedir.

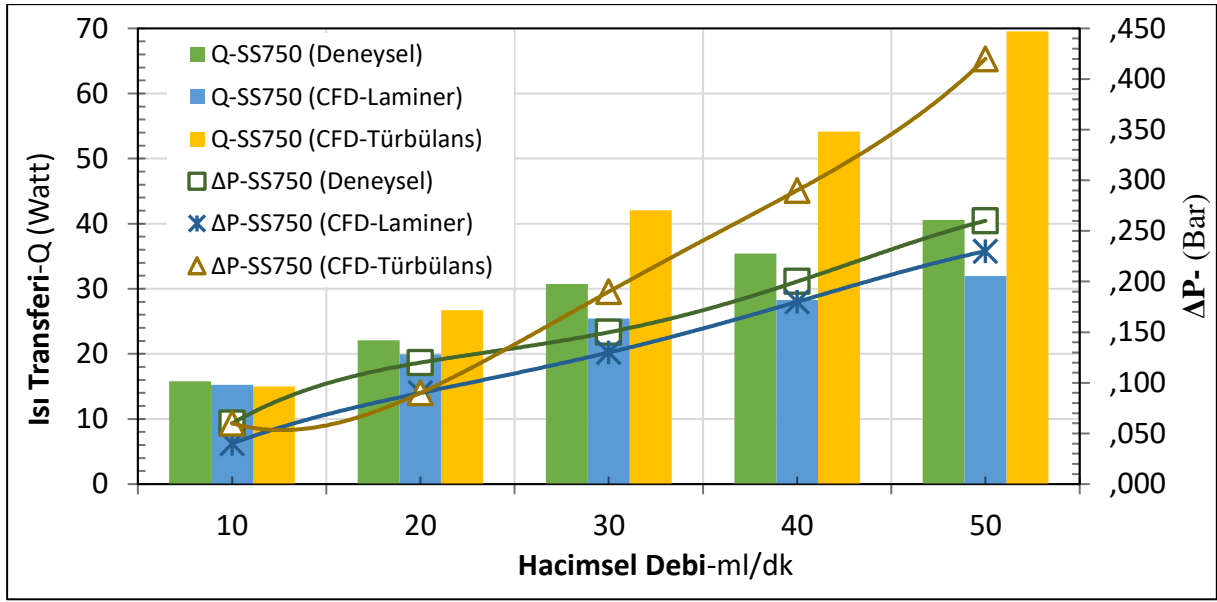
Şekil 4.26'da 500 μ m çaplı paslanmaz çelik mini/mikro boruya ait, deneysel çalışma ve sayısal analiz sonucu elde edilen soğutma yükü ve basınç kaybı değerleri arasındaki ilişki yorumlanmıştır.



Şekil 4.26 SS500 çaplı mini/mikro boruya ait ısı transferi-basınç düşüşü arasındaki değişim.

İlgili grafikte deneysel çalışma soğutma yükü değerlerinin HAD metot laminar akış analiz değerlerinden yüksek olarak gerçekleştiği görülmektedir. HAD metodu ile gerçekleştirilen türbülanslı akış analiz değerlerinin en yüksek soğutma yükü değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Basınç kaybı değerleri incelendiğinde deneysel çalışma ve HAD metot laminar rejimde gerçekleştirilen analiz değerlerinin birbirine yakın değerlerler aldığı görülmüştür.

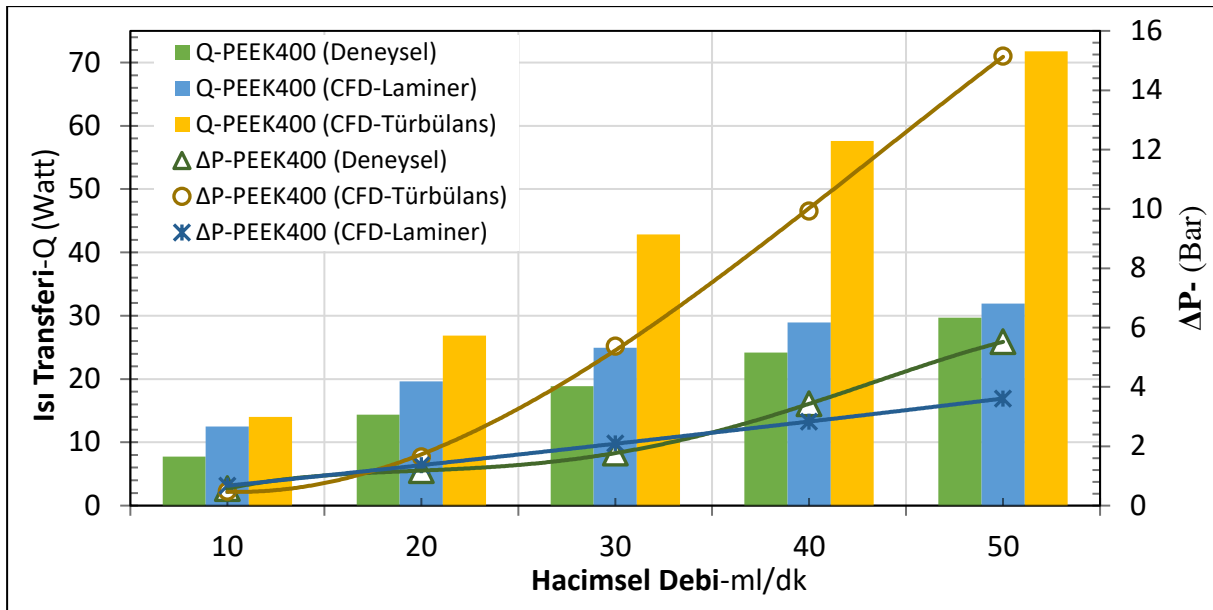
Şekil 4.27’de en geniş boru çapı ölçüsü olan 750 μm çaplı paslanmaz çelik mini/mikro boruya ait deneysel ve sayısal analiz yöntemiyle elde edilen soğutma yükü ve basınç kaybı arasındaki ilişki irdelenmiştir.



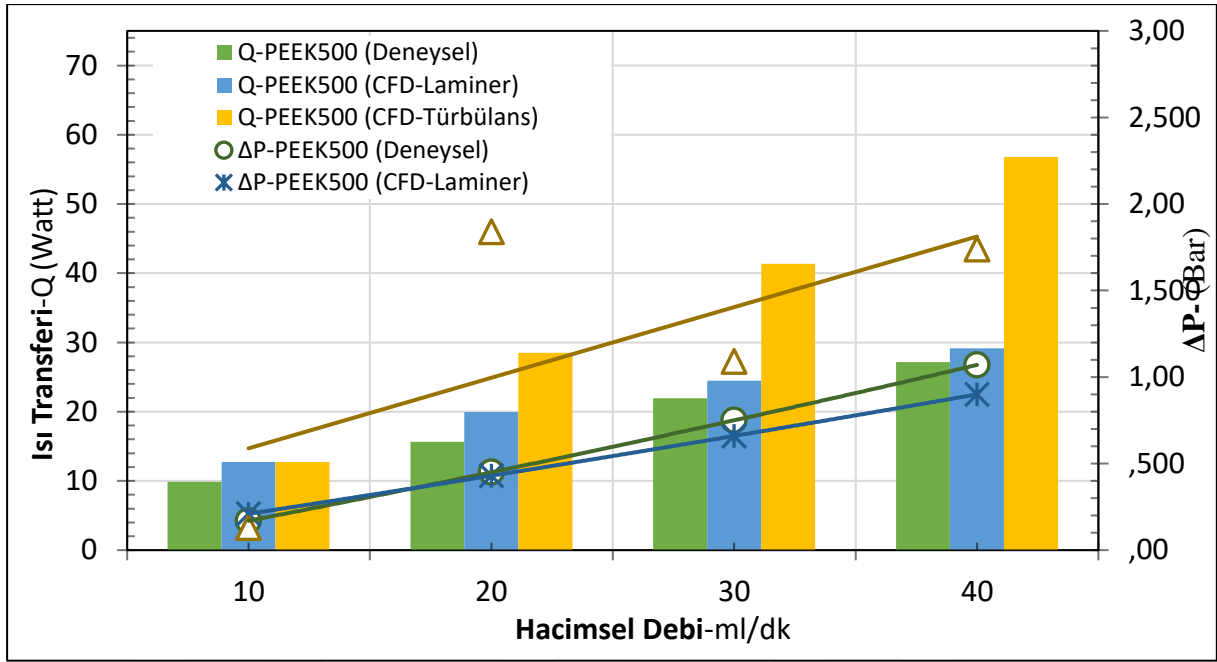
Şekil 4.27 SS750 çaplı mini/mikro boruya ait ısı transferi-basınç düşüşü arasındaki değişim.

Yukardaki grafik incelendiğinde en büyük boru çapı olan 750 μm çap ölçüsünde de HAD metot türbülanslı akış rejimine gerçekleştirilen analiz değerlerinin en yüksek değerleri elde ettiği görülmektedir. Basınç kaybı değerleri göz önüne alındığında deneysel çalışma değerleri ile sayısal analiz laminer akış rejiminde elde edilmiş değerlerinin birbirine yakın olarak elde edildiği görülmüştür.

Şekil 4.28'de PEEK malzemeden imal edilmiş mini/mikro boruya ait soğutma yükü ve basınç kaybı arasındaki gerçekleşen değişim irdelenmiştir.



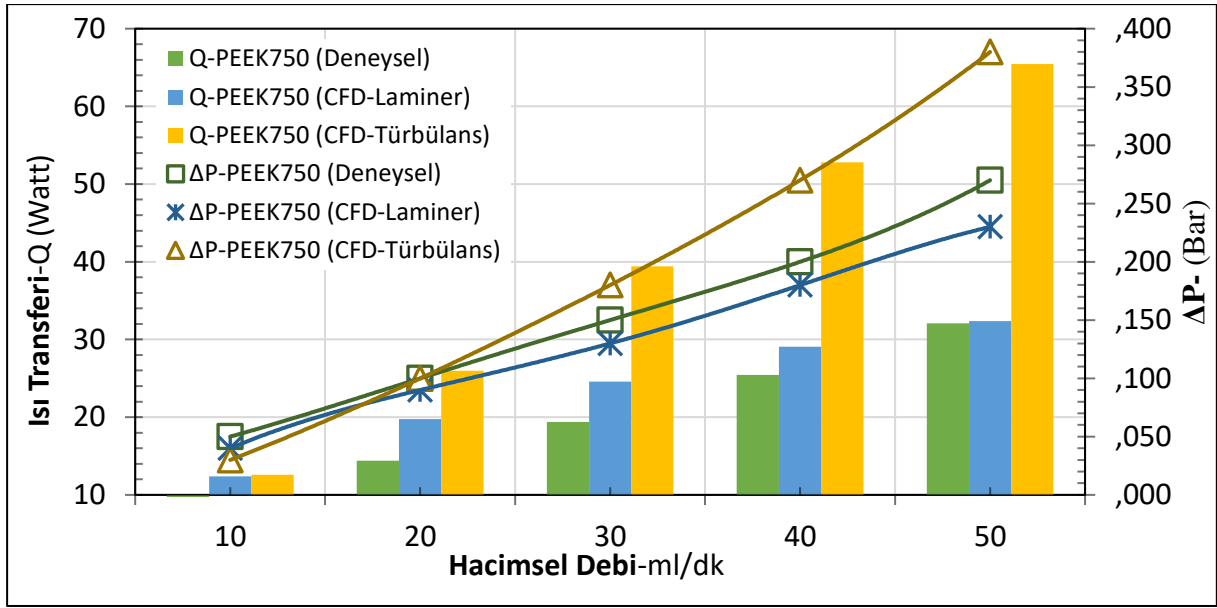
PEEK mini/mikro borunun 400 μm $\varnothing$ için en yüksek soğutma yükü değerini HAD metot türbülanslı akış rejimine ait analiz sonucunda elde ettiği görülmüştür. Sayısal analiz ile elde edilen soğutma yükü değerlerinin en küçük $\varnothing$ ölçüsü olan bu $\varnothing$ değeri için deneysel çalışma ile gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarından yüksek değerde gerçekleştiği tespit edilmiştir. HAD metot laminar rejimde gerçekleştirilen akış analizine ait basınç kaybı değerleri ile deneysel çalışma ölçüm sonuçlarının birbirine yakın değerler aldığı görülmüştür. Artan hacimsel debi değerleri ile ısı transferi ve basınç kaybı değerlerinin doğrusal olarak değiştiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.29 PEEK500 çaplı mini/mikro boruya ait ısı transferi-basınç düşüşü arasındaki değişim.

Bu çap ölçüsünde soğutma yükü değerleri ele alındığında sayısal analiz ile elde edilen değerlerin deneysel çalışma ölçüm sonuçlarından yüksek olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir. Basınç kaybı değişimi açısından deneysel çalışma sonuçları ile HAD metot laminer akış analiz değerlerinin birbirine yakın değerlerde gerçekleşmesi bu çalışma özelinde gerçekleştirilen çalışmaya ait akış rejiminin, laminer akış rejimine benzer özellikte olduğunu göstermektedir.

PEEK malzeme mini/mikro boru ölçüsü için 750 μm çap değeri için soğutma yükleri ve basınç kaybı değişimi Şekil 4.30'da ele alınmıştır.



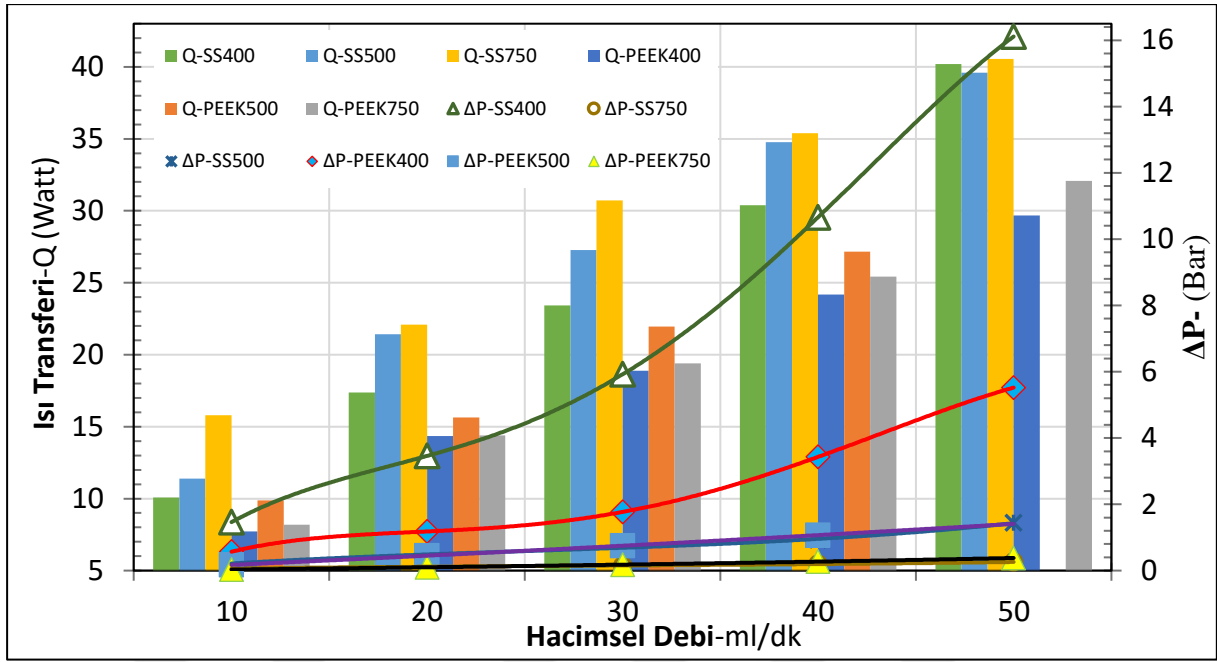
Şekil 4.30 PEEK750 çaplı mini/mikro boruya ait ısı transferi-basınç düşüşü arasındaki değişim.

Soğutma yükü değerleri açısından HAD metot türbülanslı akış rejiminde gerçekleştirilen analiz sonuçlarının en yüksek değerlere sahip olduğu, deneysel çalışma sonuçlarının sayısal analiz sonuçlarına nazaran düşük gerçekleşmesi görülmekle beraber artan hacimsel debi miktarı ile iki farklı yöntem soğutma yükü değerlerinin birbirine yakın değerler aldığı Şekil 4.30'da tespit edilmiştir.

4.6 GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMA YÖNTEMİNE GÖRE ISI TRANSFERİ – BASINÇ DÜŞÜŞÜ İLİŞKİSİ

Bu bölümde bütün mini/mikro boru çapları ve malzeme türleri gerçekleştirilen çalışma/analiz yöntemine göre ısı transferi ve basınç kaybı ilişkisi açısından değerlendirilmiştir. İlk olarak deneysel yöntemle elde edilen ölçüm sonuçları farklı boru çapları ve malzemeleri bir arada grafikler üzerinden irdelenmiştir. Daha sonra sayısal analiz yöntemiyle gerçekleştirilen laminar ve türbülanslı akış rejimlerinde gerçekleştirilen analiz sonuçları soğutma yükü ve basınç kaybı ilişkisi çerçevesinde değerlendirilmiştir.

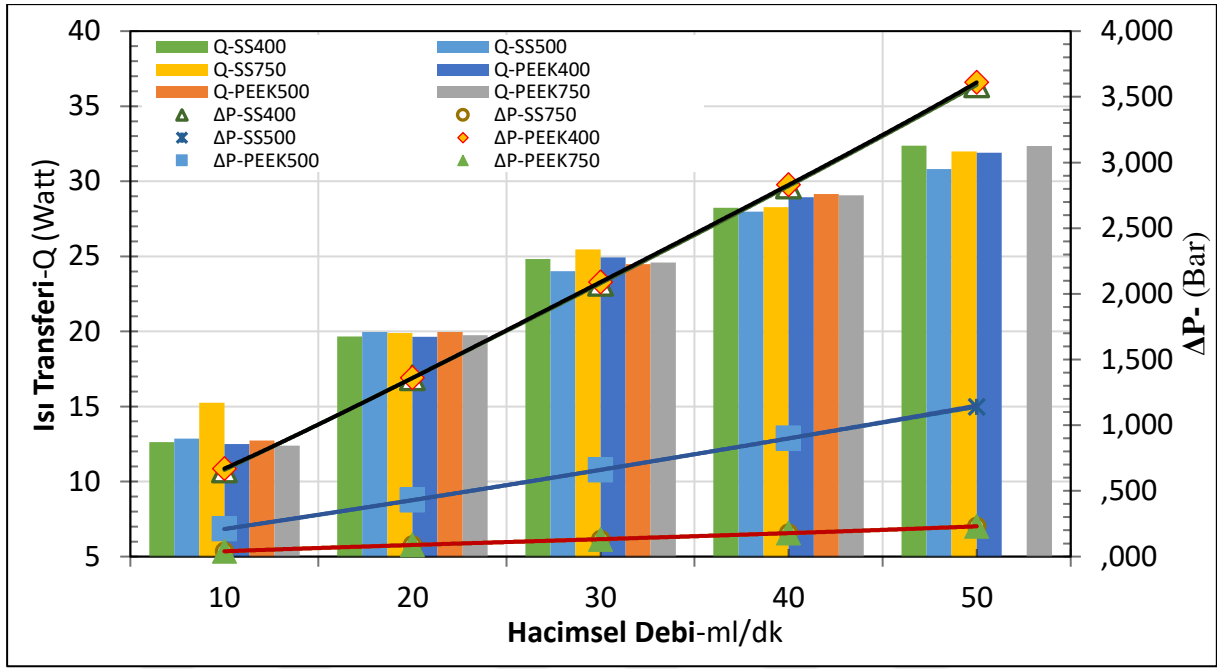
Şekil 4.31'de deneysel yöntemle gerçekleştirilen soğutma yükü ve basınç değişimi ölçüm sonuçları grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.31 DeneySEL yöntemle gerçekleştirilen çalışmaya ait ısı transferi-basınç düşüşü arasındaki değişim.

DeneySEL yöntemle gerçekleştirilen çalışmaya ait sonuçlar incelendiğinde, artan hacimsel debi değerleri ile birlikte soğutma yükü ve basınç kaybı değerlerinde de bir artış meydana geldiği görülmektedir. Paslanmaz çelik mini/mikro borularda en yüksek soğutma yükü değerlerinin 750 µm çap değerinde elde edildiği görülmekle beraber PEEK mini/mikro borularda en yüksek soğutma yükü 500µm çaplı mini/mikro borularda gerçekleşmiştir. Basınç kaybı değerleri göz önüne alındığında en yüksek basınç kaybı değerlerinin 400µm çaplı mini/mikro borularda gerçekleştiği görülmüştür.

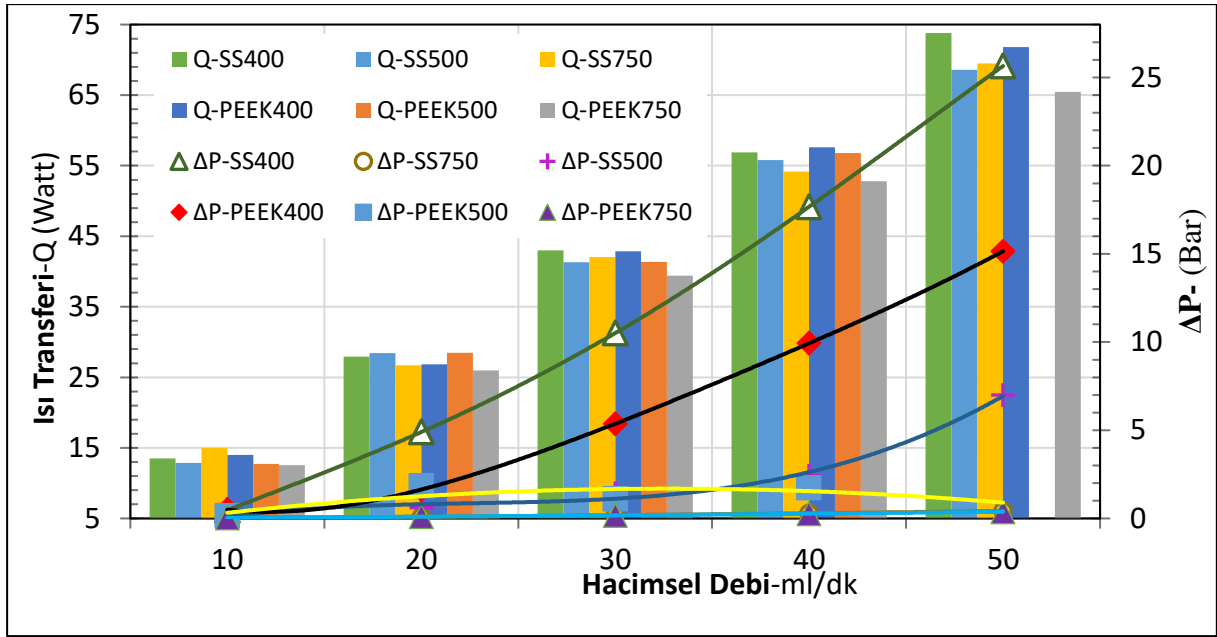
Şekil 4.12’de HAD metot laminer akış rejiminde gerçekleştirilen akış analizi sonucuna göre soğutma yükü ve basınç kaybı değişimi değerleri yorumlanmıştır.



Şekil 4.32 HAD metot laminar akış analiz yöntemiyle gerçekleştirilen çalışmaya ait ısı transferi-basınç düşüşü arasındaki değişim.

Yukardaki şekil incelendiğinde artan debi miktarı ile soğutma yükünde de doğrusal bir artış meydana geldiği görülmekle birlikte ilgili boru çap ölçüsünde paslanmaz çelik ve PEEK malzemeden imal edilmiş mini/mikro boruların birbirine yakın değerler aldığı tespit edilmiştir. En yüksek basınç kaybı değerlerinin 400µm çaplı borularda gerçekleştiği görülmekle birlikte aynı boru çap ölçülerinde basınç kaybı değerlerinin her iki malzeme türünde de benzer değerler aldığı görülmüştür.

Şekil 4.33'te HAD metot türbülanslı akış rejiminde gerçekleştirilen analizin sonuçları ısı transferi ve basınç kaybı yönünden irdelenmiştir. HAD yöntemde türbülanslı analiz rejimine göre gerçekleştirilen çalışmalar türbülanslı analizin kompleks ve çözümü zor bir yapıda olduğu için farklı değerlerde gerçekleşmesine sebep olmuştur. Bu akış rejiminde k-omega türbülans modeli seçilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Daha farklı yöntemlerle türbülans modellemeleri yapılabilmesine rağmen, bu çalışmaya ait analizlerin yapılmış olduğu ANSYS Fluent programında mevcut olan modeller değerlendirilerek analiz sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 4.33 HAD metot türbülanslı akış rejimiyle gerçekleştirilen analize ait ısı transferi-basınç kaybı arasındaki değişim.

Türbülanslı akış rejimine göre gerçekleştirilen sayısal analizlerde artan hacimsel debi miktarı ile soğutma yüklerinde doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. En yüksek soğutma yükü değerlerinin 400µm çaplı mikro borularda gerçekleştiği görülmekle birlikte çap ölçüsü değeri büyüdükçe basınç kaybı değerinde düşüş meydana geldiği görülmüştür. PEEK malzemeye ait mini/mikro borularda basınç kaybı değerleri yüzey pürüzlülüğünün etkisi ile paslanmaz çelik mini/mikro borulardaki basınç kaybı değerlerinden beklenildiği gibi daha düşük değere sahip olmuştur.

İlgili deneysel çalışma ve sayısal analizler sonucu elde edilen ısı transferi değerleri Çizelge 4.4'te, HAD metot laminar akış rejiminde gerçekleştirilen analize ait ısı transfer değerleri Çizelge 4.5'te ve HAD metot türbülans akış rejimine göre gerçekleştirilen akış analizine ait ısı transfer değerleri Çizelge 4.6'da paylaşılmıştır.

Çizelge 4.4 Deneysel çalışma yöntemine göre hesaplanan ısı transferi değerleri.

Q Soğutma						
Hacimsel Debi		10	20	30	40	50
SS400	$Q_{exp}=mC_p(T_{out}-T_{in})$ (W)	10,1	17,4	23,4	30,4	40,2
SS500	$Q_{exp}=mC_p(T_{out}-T_{in})$ (W)	11,4	21,4	27,3	34,8	39,6
SS750	$Q_{exp}=mC_p(T_{out}-T_{in})$ (W)	15,8	22,1	30,7	35,4	40,6
PEEK400	$Q_{exp}=mC_p(T_{out}-T_{in})$ (W)	7,7	14,3	18,9	24,2	29,7
PEEK500	$Q_{exp}=mC_p(T_{out}-T_{in})$ (W)	9,9	15,6	22,0	27,2	
PEEK750	$Q_{exp}=mC_p(T_{out}-T_{in})$ (W)	8,2	14,4	19,4	25,4	32,1
Isı Taşınım Katsayıları						
				Hacimsel Debi	$\dot{V}$ (mL/min)	
		10	20	30	40	50
SS400	$h_{exp,in}=Q_{exp}/A(s_{in})\Delta T_{ln}$ (W/m ² K)	3534	5624	6914	8929	11710
SS500	$h_{exp,in}=Q_{exp}/A(s_{in})\Delta T_{ln}$ (W/m ² K)	3296	5871	6942	8445	9157
SS750	$h_{exp,in}=Q_{exp}/A(s_{in})\Delta T_{ln}$ (W/m ² K)	3477	4208	5125	5648	5883
PEEK400	$h_{exp,in}=Q_{exp}/A(s_{in})\Delta T_{ln}$ (W/m ² K)	2332	4159	5035	6369	7871
PEEK500	$h_{exp,in}=Q_{exp}/A(s_{in})\Delta T_{ln}$ (W/m ² K)	2540	3449	4771	5531	
PEEK750	$h_{exp,in}=Q_{exp}/A(s_{in})\Delta T_{ln}$ (W/m ² K)	1298	2087	2683	3384	4251
Nusselt Sayısı						
				Hacimsel Debi	$\dot{V}$ (mL/min)	
		10	20	30	40	50
SS400	$Nu_{exp,in}=h_{exp,in}D_{in}/k$	2,23	3,54	4,34	5,61	7,35
SS500	$Nu_{exp,in}=h_{exp,in}D_{in}/k$	2,78	4,94	5,84	7,09	7,68
SS750	$Nu_{exp,in}=h_{exp,in}D_{in}/k$	4,38	5,32	6,46	7,11	7,39
PEEK400	$Nu_{exp,in}=h_{exp,in}D_{in}/k$	1,96	2,61	3,15	3,98	4,92
PEEK500	$Nu_{exp,in}=h_{exp,in}D_{in}/k$	2,13	2,89	3,99	4,61	
PEEK750	$Nu_{exp,in}=h_{exp,in}D_{in}/k$	1,63	2,62	3,36	4,23	5,32

Çizelge 4.5 Laminer akışta ısı transferinin HAD analizi ile elde edilen değerleri.

Isı Taşınım Katsayıları						
				Hacimsel Debi	$\dot{V}$ (mL/min)	
		10	20	30	40	50
SS400	(W/m ² K)	1314	4092	2582	2939	3368
SS500	(W/m ² K)	1964	3049	3667	4272	4707
SS750	(W/m ² K)	1295	1691	2163	2402	2718
PEEK400	(W/m ² K)	2589	4069	5165	5996	6609
PEEK500	(W/m ² K)	1944	3048	3739	4451	
PEEK750	(W/m ² K)	1053	1678	2089	2469	2749
Nusselt Sayısı						
				Hacimsel Debi	$\dot{V}$ (mL/min)	
		10	20	30	40	50
SS400	$Nu_{cfd,in}=h_{cfd,in}D_{in}/k$	0,83	2,59	1,63	1,85	2,12
SS500	$Nu_{cfd,in}=h_{cfd,in}D_{in}/k$	1,66	2,57	3,09	3,59	3,95
SS750	$Nu_{cfd,in}=h_{cfd,in}D_{in}/k$	1,63	2,14	2,72	3,02	3,42
PEEK400	$Nu_{cfd,in}=h_{cfd,in}D_{in}/k$	1,64	2,57	3,26	3,77	4,15
PEEK500	$Nu_{cfd,in}=h_{cfd,in}D_{in}/k$	1,64	2,57	3,14	3,73	
PEEK750	$Nu_{cfd,in}=h_{cfd,in}D_{in}/k$	1,34	2,12	2,63	3,11	3,45
Isı Akısı-q						
				Hacimsel Debi	$\dot{V}$ (mL/min)	
		10	20	30	40	50
SS400	W/m ²	52815	82258	103815	118130	135407
SS500	W/m ²	40320	62591	75283	87707	96626
SS750	W/m ²	31809	41544	53140	59013	66776
PEEK400	W/m ²	52304	82196	104326	121112	133492
PEEK500	W/m ²	39910	62570	76757	91386	
PEEK750	W/m ²	25876	41224	51333	60663	67549
Q Soğutma (Watt)						

Çizelge 4.5 Laminer akışta ısı transferinin HAD analizi ile elde edilen değerleri (devam ediyor)

				Hacimsel Debi	V' (mL/min)	
		10	20	30	40	50
SS400	$Q=q.A_{s,in} (W)$	12,6	19,7	24,8	28,2	32,4
SS500	$Q=q.A_{s,in} (W)$	12,9	20,0	24,0	28,0	30,8
SS750	$Q=q.A_{s,in} (W)$	15,2	19,9	25,5	28,3	32,0
PEEK400	$Q=q.A_{s,in} (W)$	12,5	19,6	24,9	28,9	31,9
PEEK500	$Q=q.A_{s,in} (W)$	12,7	20,0	24,5	29,2	
PEEK750	$Q=q.A_{s,in} (W)$	12,4	19,7	24,6	29,1	32,4

Çizelge 4.6 Türbülanslı akışta ısı transferinin HAD analiz ile elde edilen değerleri.

Isı Taşınım Katsayıları				Hacimsel Debi	V' (mL/min)	
		10	20	30	40	50
SS400	(W/m ² K)	1405	2909	4474	5921	7681
SS500	(W/m ² K)	1936	4288	6231	8406	10855
SS750	(W/m ² K)	1273	2269	3572	4602	5907
PEEK400	(W/m ² K)	2910	5570	8893	11954	14900
PEEK500	(W/m ² K)	1946	4350	6318	8671	
PEEK750	(W/m ² K)	1313	2710	4112	5510	6831
Nusselt Sayısı				Hacimsel Debi	V' (mL/min)	
		10	20	30	40	50
SS400	$Nu_{cfd,in}=h(cfd,in)D_{in}/k$	0,89	1,85	2,84	3,77	4,88
SS500	$Nu_{cfd,in}=h(cfd,in)D_{in}/k$	1,64	3,63	5,29	7,13	9,21
SS750	$Nu_{cfd,in}=h(cfd,in)D_{in}/k$	1,60	2,88	4,53	5,85	7,50
PEEK400	$Nu_{cfd,in}=h(cfd,in)D_{in}/k$	1,85	3,54	5,65	7,60	9,47
PEEK500	$Nu_{cfd,in}=h(cfd,in)D_{in}/k$	1,65	3,69	5,35	7,34	
PEEK750	$Nu_{cfd,in}=h(cfd,in)D_{in}/k$	1,67	3,44	5,22	6,99	8,66
Isı Akısı-q				Hacimsel Debi	V' (mL/min)	
		10	20	30	40	50
SS400	W/m ²	56486	116923	179856	238036	308772
SS500	W/m ²	40278	89192	129595	174852	214939
SS750	W/m ²	31278	55749	87755	113071	145126
PEEK400	W/m ²	58673	112298	179273	240996	300382
PEEK500	W/m ²	39944	89296	129700	178019	
PEEK750	W/m ²	26251	54207	82249	110196	136624
Q Soğutma (Watt)				Hacimsel Debi	V' (mL/min)	
		10	20	30	40	50
SS400	$Q=q.A_{s,in} (W)$	13,5	27,9	43,0	56,9	73,8
SS500	$Q=q.A_{s,in} (W)$	12,8	28,5	41,3	55,8	68,6
SS750	$Q=q.A_{s,in} (W)$	15,0	26,7	42,0	54,2	69,5
PEEK400	$Q=q.A_{s,in} (W)$	14,0	26,8	42,8	57,6	71,8
PEEK500	$Q=q.A_{s,in} (W)$	12,7	28,5	41,4	56,8	
PEEK750	$Q=q.A_{s,in} (W)$	12,6	2,0	39,4	52,8	65,4

4.7 SOĞUTMA YÜKÜ VE BASINÇ KAYBI KRİTERLERİNE GÖRE OPTİMUM MİNİ/MİKRO BORUNUN BELİRLENMESİ

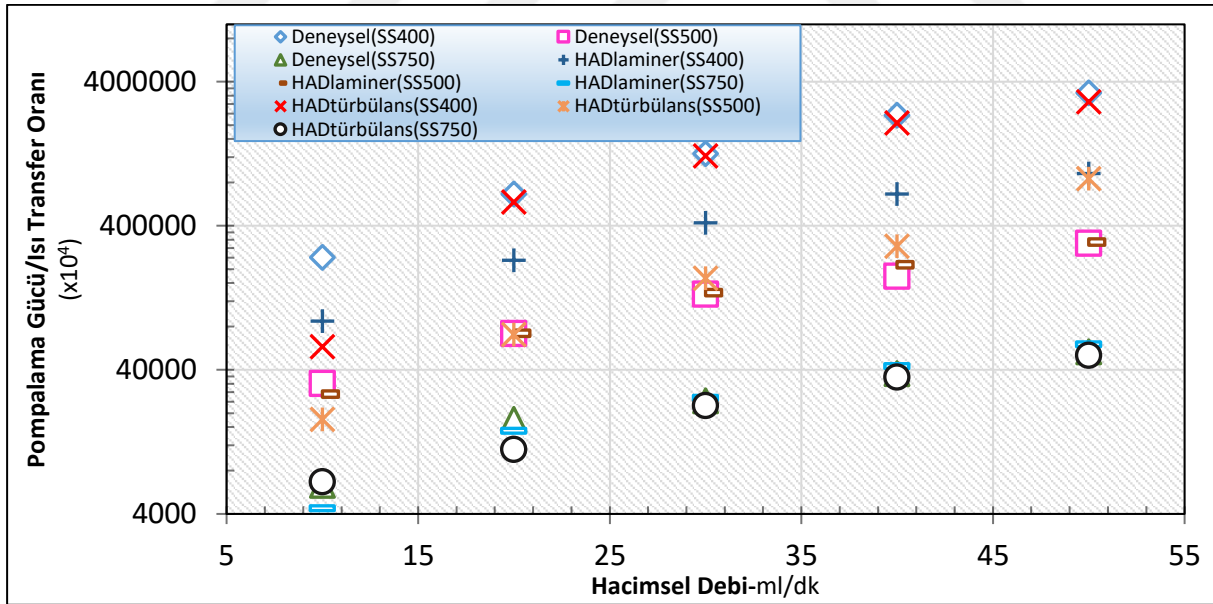
Bölüm 4.6 ve bölüm 4.7’de 400µm, 500µm ve 750µm çaplara sahip paslanmaz çelik ve PEEK mini/mikro borular soğutma yükü ve basınç kaybı değerlerinde değişimler, artan hacimsel debi değerlerine bağlı olarak irdelenmiştir. Boru çap değerleri küçüldükçe basınç kaybı değerleri artmaktadır.

Basınç kaybı değerleri ile hacimsel debi değerleri ile çarpılmasıyla pompa yükü değerleri denklem 4.1’de gösterildiği gibi elde edilir.

$$\text{Pompalama Gücü/Isı Transfer Oranı} = W_{\text{pompa}} (\text{Watt}) / Q_{\text{soğutma}} (\text{Watt}) \quad (4.2)$$

olarak hesap edilir.

Şekil 4.34’te paslanmaz çelik mini/mikro boruya ait pompalama gücünün ısı transferine oranı gösterilmiştir.

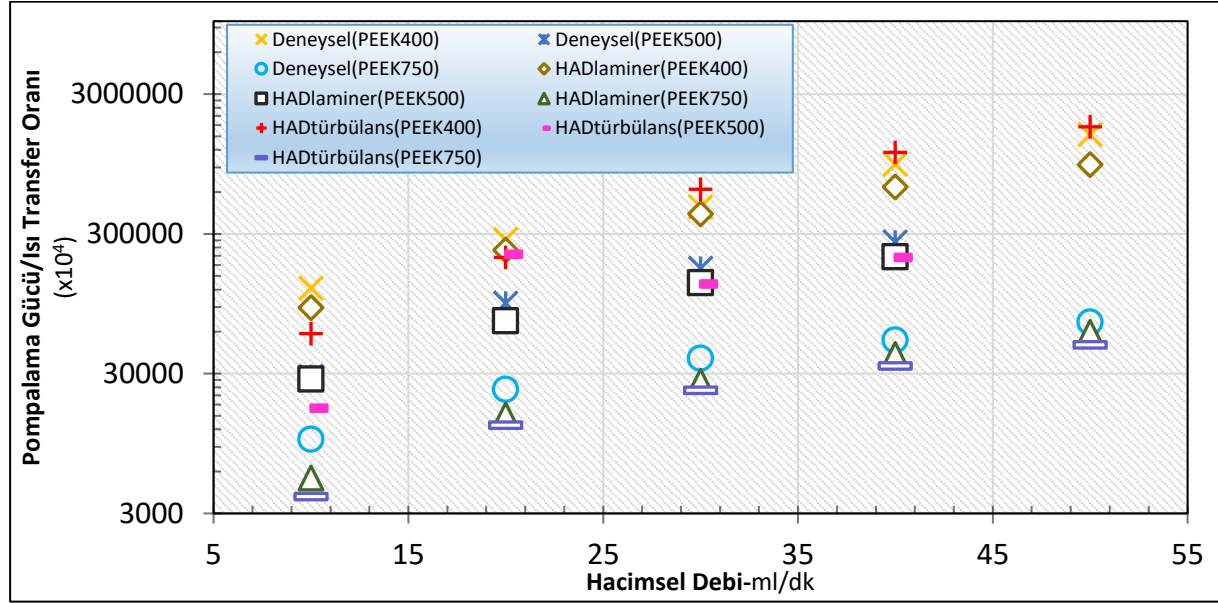


Şekil 4.34 Paslanmaz çelik mini/mikro boru pompalama gücünün ısı transferine oranının hacimsel debiye bağlı değişimi.

Yukardaki grafikte artan hacimsel debi miktarına bağlı olarak pompalama gücünde doğrusal orantıda artış gerçekleşmiştir. Bu duruma ek olarak boru çaplarındaki büyüme ile ters orantılı olarak

pompalama gücü ihtiyacındaki azalışta dikkat çekmektedir. Paslanmaz çelik malzeme için en ideal pompala gücü ve ısı transferi oranı 750 μ m $\varnothing$ nda mini/mikro boru için 0,04 oranda 10 ml/dk hacimsel debi değerinde HAD metot laminar analiz sonucu elde edilmiştir.

şekil 4.35'te PEEK malzemeden imal edilmiş mini/mikro boruya pompalama gücünün ısı transferine oranı gösterilmiştir.



şekil 4.35 PEEK mini/mikro boru pompalama gücünün ısı transferine oranının hacimsel debiye bağlı değişimi.

Hacimsel debi miktarındaki artışa paralel olarak pompalama gücünün ısı transferi oranına göre değişimi şekil 4.35'te görölmektedir. En yüksek pompalama gücü ihtiyaçları 400 μ m $\varnothing$ nda değerinde HAD metodu ile gerçekleştirilen türbölanslı akış analizlerinde elde edilmiştir. Yine paslanmaz çelik borudaki duruma benzer olarak, PEEK boru çaplarındaki artışla ters orantılı olarak pompalama gücü ihtiyacındaki azalış tespit edilmiştir. PEEK malzemeden imal mini/mikro boru için en ideal pompala gücü ve ısı transferi oranı 750 μ m $\varnothing$ nda değerinde 0,04 oranda 10 ml/dk hacimsel debi değerinde HAD metot türbölanslı analiz sonucu elde edilmiştir.

Çizelge 4.7 Isı transferi ve basınç kaybı açısından optimum mini/mikro borunun belirlenmesi

Boru Çapı	Bağıntı	Hacimsel Debi $\dot{V}$					Yöntem
		10 ml/dk	20 ml/dk	30 ml/dk	40 ml/dk	50 ml/dk	
SS400	$W_{pompa}/Q_{soğutma}$	2,42	6,64	12,64	23,39	33,41	Deneysel
SS500	$W_{pompa}/Q_{soğutma}$	0,32	0,72	1,34	1,78	3,03	Deneysel
SS750	$W_{pompa}/Q_{soğutma}$	0,06	0,18	0,24	0,38	0,53	Deneysel
PEEK 400	$W_{pompa}/Q_{soğutma}$	1,23	2,74	4,69	9,46	15,50	Deneysel
PEEK 500	$W_{pompa}/Q_{soğutma}$	0,29	0,96	1,71	2,63		Deneysel
PEEK 750	$W_{pompa}/Q_{soğutma}$	0,10	0,23	0,39	0,52	0,70	Deneysel
SS400	$W_{pompa}/Q_{soğutma}$	0,87	2,31	4,19	6,66	9,24	HAD-Lam.
SS500	$W_{pompa}/Q_{soğutma}$	0,27	0,72	1,37	2,14	3,08	HAD-Lam.
SS750	$W_{pompa}/Q_{soğutma}$	0,04	0,15	0,26	0,42	0,60	HAD-Lam.
PEEK 400	$W_{pompa}/Q_{soğutma}$	0,89	2,31	4,19	6,52	9,43	HAD-Lam.
PEEK 500	$W_{pompa}/Q_{soğutma}$	0,27	0,72	1,35	2,06		HAD-Lam.
PEEK 750	$W_{pompa}/Q_{soğutma}$	0,05	0,15	0,26	0,41	0,59	HAD-Lam.
SS400	$W_{pompa}/Q_{soğutma}$	0,58	5,84	12,23	20,71	28,96	HAD-Türb.
SS500	$W_{pompa}/Q_{soğutma}$	0,18	0,70	1,73	2,89	8,50	HAD-Türb.
SS750	$W_{pompa}/Q_{soğutma}$	0,07	0,11	0,23	0,36	0,50	HAD-Türb.
PEEK 400	$W_{pompa}/Q_{soğutma}$	0,58	2,04	6,27	11,49	17,59	HAD-Türb.
PEEK 500	$W_{pompa}/Q_{soğutma}$	0,17	2,15	1,32	2,04		HAD-Türb.
PEEK 750	$W_{pompa}/Q_{soğutma}$	0,04	0,13	0,23	0,34	0,48	HAD-Türb.

Çizelge 4.7 incelendiğinde deneysel çalışma yöntemine göre en ideal ısı transfer kazanımına sahip mini/mikro borunun 750µm çap değerine sahip paslanmaz çelik mini/mikro boru olduğu tespit edilmiştir.

HAD metot laminer akış rejiminde gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre en ideal ısı transfer kazanımı 400µm çap değerine sahip PEEK malzemeden imal edilmiş mini/mikro boruda gerçekleşmiştir.

HAD metot türbülanslı akış rejimine göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre ise en ideal ısı transfer kazanımı, 400µm çap değerine sahip paslanmaz elik mini/mikro boru da gerçekleşmiştir.



SONUÇ

İlgili literatür incelenmiş, araştırmalar gerçekleştirilmiş, bu minvalde deneysel çalışma gerçekleştirilmiş ve bu çalışmanın sonuçları referans alınarak ile bilgisayar destekli analizler laminar ve türbülanslı akış rejiminde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz değerleri daha sonra grafikler üzerinden yorumlanmış ve karşılaştırılmış son aşamada ise gerçekleştirilen her metot için en optimum boru ve çap ölçüsü tespit edilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlara ait genel değerlendirmeler şu şekilde kısaca açıklanmıştır:

1. Bu çalışmada literatürde mini/mikro borular olarak sürtünme katsayısı farklı iki malzemenin dairesel bir geometride belirli sınır şartlarında analiz edildiği bir çalışma olarak gerçekleştirilmiştir.
2. Deneysel çalışması yapılan mini/mikro borular, paslanmaz çelik ve PEEK malzemelerden imal edilmesi ve bu iki tür malzemenin bu çap değerlerinde belirli hacimsel debi değerlerine bağlı olarak gerçekleştirilmesi açısından özgün bir yapıdadır.
3. Paslanmaz çelik ve PEEK malzeme ele alındığında boru iç yüzey pürüzlülük değerlerinin basınç kaybı üzerinde doğrudan etkiye sahip olduğu söylenebilir.
4. Basınç kaybı grafikleri incelendiğinde en fazla basınç kaybının 50ml/dk debide 400 µm çaplı paslanmaz çelik boruda gerçekleştiği tespit edilmiştir.
5. Deneysel yöntemle gerçekleştirilen çalışma göz önüne alındığında, en yüksek ısı transfer değerine oranla en az basınç kaybı, 750 µm çap ölçüsüne sahip paslanmaz çelik mini/mikro boruda (SS750) 50ml/dk hacimsel debi değerinde gerçekleşmiştir.
6. HAD metot ile gerçekleştirilen laminar akış analizine göre en yüksek net ısı transfer değeri, PEEK malzeme 750 µm çaplı mini/mikro boruda 50ml/dk hacimsel debi değerinde gerçekleşmiştir.

7. HAD metot ile gerçekleştirilen türbülanslı akış rejimine ait analize göre en yüksek net ısı transfer değeri, paslanmaz elik malzeme 400  m çaplı boruda 50ml/dk hacimsel debi değerinde elde edilmiştir.
8. Çalışmanın basınç kaybı değerleri Afshin Ghajar'ın (Okstate, 2010) paslanmaz elik mini/mikro borularda gerçekleştirmiş olduğu deneysel çalışma değerleri de referans olarak kıyaslanmıştır. Ghajar'ın (Okstate, 2010) gerçekleştirdiği çalışma sonuçları ile bu çalışma özelinde elde edilen sonuçlar arasında sayısal farklılıklar olsa da, çalışma sonuçlarının benzer eğilimde gerçekleşmesi bu konuda gerçekleştirilen çalışmayı doğrular nitelikte olduğu düşünülmektedir.
9. PEEK malzemeden imal edilmiş mini/mikro borularda 50ml/dk debide deneysel veriler bulunmadığı için bu debi değeri için sayısal analizler gerçekleştirilememiştir.
10. Bu çalışmada analizlerin gerçekleştirildiği hacimsel debi aralığı bazı kısıtlamalar sebebiyle (pompa seçim şartları ve maliyet vb.) beş adet ile sınırlı kalmıştır. Daha fazla sayıda ve farklı hacimsel debi değerlerinde çalışmaların gerçekleştirilmesi konunun daha detaylı ele alınması sonuçların daha hassas ve kapsamlı şekilde elde edilmesine fayda sağlayacaktır.
11. Bundan sonraki çalışmalarda farklı geometrilere sahip kanal yapılarında farklı malzemeler ile ya da aynı kanal malzemeleri kullanarak farklı geometrilere benzer çalışmalar gerçekleştirilmesi elde edilen sonuçların kıyaslanmasına ve çalışmanın detaylanmasına katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- Advdel Phisys** (2023) https://www.advdelphisys.com/michael_maley/moody_chart/, Ziyaret tarihi: 29.07.2023.
- Alfarawi S, Al-Dadah R and Mahmoud S** (2017) Transient investigation of mini-channel regenerative heat exchangers: Combined experimental and CFD approach. *Applied Thermal Engineering*, 125: 346-358.
- Alsubaci B, Akash Z and Imam A** (2021) Numerical Analysis of Heat Transfer Enhancement in Heat Exchangers by using Micro-finned Tube, *Conference: International Journal of Engineering And Innovative Technology*, April 2021, Dubai.
- Andou F, Yamamoto A, Kawai T, Ohmori H, Ishida T and Takeuchi Y** (2007) Microchannel Array Creation By Means Of Ultraprecision Machining, *Mechatronics for Safety, Security and Dependability in a New Era*. Arai, Eiji; Arai, Tatsuo (Ed.), ISBN 978-0-08-044963-0, Elsevier, Oxford, 163-168 pp.
- Anjaneya G, Sunil S, Kakkeri S, Math M M, Vaibhav M N, Solaimuthu C and Vasudev H** (2023) Numerical Simulation of Microchannel Heat Exchanger Using CFD. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2023.
- Ansys** (2023) <https://support.ansys.com/Home/HomePage>, Ziyaret tarihi: 29.09.2023.
- Aracı S ve Kınacı Ö K** (2018) Boru İçi Akışlarda Basınç Kaybının Sayısal Hesabı. *Tezin Türü Gemi ve Deniz Teknolojisi*, 211: 39-60.
- Barlak S, Yapıcı S ve Şaraa O N** (2011) *Mikro Borularda Basınç Düşüşü*. Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Erzurum, 66 s.
- Bhaskar A and Rao K V N** (2019) Heat Transfer Analysis Using Cfd Tools An Literature Based Review. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 9(4): 1423-1432.
- Bilgiustam** (2023) <https://www.bilgiustam.com/fizikte-viskozite-nedir?>, Ziyaret tarihi: 13.01.2023.
- Borşen** (2023) *Paslanmaz Çelik Nedir? Çeşitleri Nelerdir?* <https://borsenboru.com/paslanmaz-celik-nedir?>, Ziyaret tarihi: 12.10.2023.
- Canay A** (2007) Mikro Kanallarda Isı Transferi. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sakarya, 109 s.
- Cengel Y A, Cimbala J M and Turner R H** (2014) Properties of Fluids. *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, 2: 37-73.
- Cole K D, Çetin B and Brettmann L** (2014) Microchannel heat transfer with slip flow and wall effects. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 28(3): 455-462.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Çengel Y A ve Cimbala J M** (2010) Bölüm 1 Giriş ve Temel Kavramlar. *Akışkanlar Mekaniği: Temelleri ve Uygulamaları*. 2st edition, ISBN:978-975-6240-18-2, McGraw-Hill, New York, 172-175.
- Çengel Y A ve Cimbala J M** (2015) *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları*. Palme Yayınevi, Ankara.
- Çengel Y A, Cimbala J M ve Engin T** (2008) *Akışkanlar Mekaniği: Temelleri ve Uygulamaları*. Güven Kitabevi, İstanbul.
- Donald F Y, Munson B R, Okiishi T H and Huebsch W W** (2011) *A Brief Introduction to Fluid Mechanics*. 5. Basım, ISBN 978-0-470-59679-1. John Wiley & Sons, New York, 95 s.
- Düz H** (2018) Daimi ve sıkıştırılmaz Boru Akışında Giriş Uzunluğunun Sayısal Analizi. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 8(2/2): 1-12.
- Econ Engineering** (2019) ANSYS Advantage – 2/2019
<https://www.econengineering.com/en/press/ansys-advantage-2-2019-2/>
- Ensinger Plastics** (2023) *Yüksek Performanslı Plastikler*,
<<https://www.ensingerplastics.com/tr-tr/yari-mamul/torlon-pai-polyamide-imide/peek>>, Ziyaret tarihi: 1.11.2023.
- Erdoğan B** (2016) Mini/Mikro Kanallarda Nanoakışkan ile Isı Transferinin Deneysel İncelenmesi. *Doktora Tezi*, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 143 s.
- Flickr** (2023) <<https://www.flickr.com/photos/norskhydro/5973073389>>, Ziyaret tarihi: 12.01.2023.
- Graebel W P** (2001) *Engineering Fluid Mechanics*. ISBN 978-1-56032-733-2. Taylor & Francis, New York, s. 16.
- Guo Y, Fan L L and Zhao L** (2023) Flow and Thermal Analysis of the Transition Scheme Between Micro-Channel and Micro-Jet Cooling Solution. *Applied Thermal Engineering*, 225: 120222.
- Heegermaterials** (2023) Tantalum Capillary/Micro Tube Ta Capillary/Micro Tube, <<https://heegermaterials.com/tantalum/1155-tantalum-capillary.html>>, Ziyaret tarihi: 16.11.2023.
- Herwig H** (2005) *Single-Phase Heat Transfer in Microchannels*. Technische Universität Hamburg-Conference: CISM-Course, Udine, Hamburg University of Technology, Hamburg, Germany.
- Hvac Global** (2023) *Isı Transferi Çeşitleri*, <<https://hvacglobal.org/isi-transferi-cesitleri/>>, Ziyaret tarihi: 24.10.2023.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Incropera F P and Dewitt D P** (2002) *Isı ve Kütlevi Geçişinin Temelleri*, Baskı No:4, ISBN: 9786053552826, Palme Yayınevi, Ankara, 1046 s.
- Jamil M A, Yaqoob H, Imteyaz B, Ali H M, Allahyar K, Goraya T S and Shahzad M W** (2023) On Design and Analysis of a Concentric Tube Micro Fin Heat Exchanger for Applications of Tire Pyrolysis Lube Oil Cooling. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 146: 106896.
- Kandlikar S G, Colin S, Peles Y, Garimella S, Pease R F, Brandner J J and Tuckerman D B** (2013) Heat Transfer in Microchannels - 2012 Status and Research Needs. *Journal of Heat Transfer*, 135(9): 091001.
- Karadeniz Teknik Üniversitesi Akademik Veri Yönetim Sistemi** (2023) *Akışkanlar Dinamiği*
<<https://avesis.ktu.edu.tr/resume/downloadfile/senermehmetzeki?key=3399fe60-2d1a-49ff-a175-b702ae49df95>>, Ziyaret tarihi: 29.10.2023.
- Kaushik S, Uniyal V, Verma A K, Jha A K, Joshi S, Makhloga M and Pal S** (2023) Comparative Experimental and CFD Analysis of Fluid Flow Attributes in Mini Channel with Hybrid CuO+ ZnO+ H₂O Nano Fluid and (H₂O) Base Fluid, Evergreen.
- Kawaguti M** (1953) Numerical Solution of the Navier-Stokes Equations for the Flow Around a Circular Cylinder at Reynolds Number 40. *Journal of the Physical Society of Japan*, 8(6): 747-757.
- Kılıç B İ** (2012) Bir Mikro Kanal Isı Alıcısında Gerçekleşen Isı Transferinin Sayısal Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara 94 s.
- Küçükakça Z** (2014) Bir Mikrokanallı Isı Değiştiricisi Tasarımı ve Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sakarya, 46 s.
- Küçükakça Meral, Z. K., & Parlak, N.** (2021). Experimental research and CFD simulation of cross flow microchannel heat exchanger. *Journal of Thermal Engineering*, 7(2): 270-283.
- Li Z, He Y L, Tang G H and Tao W Q** (2007) Experimental and Numerical Studies of Liquid Flow and Heat Transfer in Microtubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(17-18): 3447-3460.
- Liu Y, Li J and Smits A J** (2019) Roughness Effects in Laminar Channel Flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 876: 1129-1145.
- Mamun M A H, Khan M J A and Hasan M R** (2011) *Analysis of A Micro-Channel Heat Exchanger*. Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering Dhaka, Bangladesh.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Marzougui M, Nmiri C, Hammami M and Maad R B** (2017) Experimental Investigation of Heat Transfer Characteristics and Cooling Performance of Mini-and Microheat Exchangers. *Heat Transfer—Asian Research*, 46(7): 703-719.
- Morini G L** (2004) Single-Phase Convective Heat Transfer in Microchannels: A Review of Experimental Results. *International Journal of Thermal Sciences*, 43(7): 631-651.
- Okstate** (2010) <<https://aghajar.okstate.edu/content/minimicro-channel-heat-transfer-laboratory.html>>, Ziyaret tarihi: 24.10.2023.
- Özbey M** (2023) Termodinamiğin İkinci Kanunu, Ünite 5. <<https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/mozbey/126308/termodinami%C4%9Fin%20ikinci%20kanunu.pdf>>, Ziyaret tarihi: 12.09.2023.
- Öztürk E, Çoştur R ve Kaya K** (2022) Bir Mikrokanaldaki Kayma Akışında Basınç Kaybı Analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (45): 471-484.
- Parkash O** (2018) Numerical Investigation of Flow Characteristics of Counter Flow Heat Exchanger. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 5(5): 153-157.
- Parlak N** (2010) Mikrokanallarda Akış ve Isı Geçişinin Deneysel ve Teorik İncelenmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sakarya, 113 s.
- Pasha A A, Abdul Raheem M, Islam N, Juhany K A, Mushtaq A and Halkarni S S** (2019) CFD Study of Variable Property Effects on Laminar Micro-Convective Heat Transfer. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44: 5961-5972.
- Patel B K, Engineer R S and Tandel M H** (2017) CFD Analysis Of Mini Channel Heat Exchanger Using Water as a Working Fluid. *IJARIE-ISSN (O)-2395-4396*, 3(3): 422-429.
- Pilotaj Haber** (2023) Mach Sayısı Nedir? <<https://www.pilotajhaber.com/pilot-okulu-mach-sayisi-nedir>>, Ziyaret tarihi: 16.11.2023.
- Ramesh K N, Sharma T K and Rao G A P** (2021) Latest Advancements in Heat Transfer Enhancement in the Micro-Channel Heat Sinks: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28: 3135-3165.
- Razali A A and Sadikin A** (2015) CFD Simulation Study On Pressure Drop and Velocity Across Single Flow Microchannel Heat Sink. *Journal of Advanced Research Design*, 8: 12-21.
- Ren M, Lin F, Jia F, Xie H, Yang M and Jiang Z** (2023) Micro Rolling Fabrication of Copper/SS304L Micro Composite Channels. *Journal of Manufacturing Processes*, 90: 1-13.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Sesinoks** (2023) *Paslanmaz Çelik Borular*, <https://sesinoks.com.tr/kategori/paslanmaz-celik-malzemeler/paslanmaz-celik-borular/>, Ziyaret tarihi: 18.11.2023.
- Şara O N, Yapıcı S ve Arzutuğ M E** (2010) Mikro Kanallarda Basınç Düşüşü ve Isı/Kütle Aktarımı: II-Taşınım ile Isı ve Kütle Aktarımı. *Mühendis Makine*, 48(571): 20-27.
- Topçuoğlu OB** (2020). *SOLIDWORKS Flow Simulation Laminer ve Türbülanslı Akış Nedir?* <<https://blog.armadayazilim.com/2020/10/20/solidworks-flow-simulation-laminer-ve-turbulansli-akis-nedir>>, Ziyaret tarihi: 16.11.2023.
- Thom A** (1933) The Flow Past Circular Cylinders at Low Speeds. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 141(845): 651-669.
- Vici Jour** (2023) Striped Color-Coded PEEK Tubing, <<https://www.vicijour.com/products/stripped-color-coded-peek-tubing>>, Ziyaret tarihi: 16.11.2023.
- Wan J** (2021) The Heat Transfer Coefficient Predictions in Engineering Applications. In *Journal of Physics: Conference Series*, 2108(1): 012022.
- Windcom** (2023) <http://windcom.de/download/pdf_de/DatenloggerW323de.pdf>, Ziyaret tarihi: 23.10.2023.
- Yadav A, Singh S, Gangwar S K and Joshi L C** (2016) Heat Transfer Analysis in Microchannel Heat Exchanger: A Review. Department of Mechanical Engineering, B.T.K.I.T, Dwarahat Almora, Uttarakhand, India. *Journal of Material Science and Mechanical Engineering*, 3(5): 338-340.
- Yeşilata B** (2007) *Mühendislikte Temel Isı Transferi. (Termo-Akışkan Sistemler Ders Kitapları Serisi-2)*, Şanlıurfa.
- Zhang J, Zou Z and Fu C** (2023) A Review of the Complex Flow and Heat Transfer Characteristics in Microchannels. *Micromachines*, 14(7): 1451.
- Zhang L, Koo J M, Jiang L, Asheghi M, Goodson K E, Santiago J G and Kenny T W** (2002) Measurements and Modeling of Two-Phase Flow in Microchannels With Nearly Constant Heat Flux Boundary Conditions. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 11(1): 12-19.



EKLER

EK A SS400 Deneysel Ölçüm ve Hesaplama Tablosu

		SS400				
Hacimsel Debi	ϕ (mL/min)	10	20	30	40	50
Giriş Sıcaklığı	Tin (C°)	30,5	30,1	30,5	30,2	30,8
Çıkış Sıcaklığı	Tout (C°)	16,0	17,6	19,2	19,3	19,2
Yüzey Giriş Sıcaklığı	Ts,in (C°)	10,3	10,3	10,3	10,2	10,1
Yüzey Çıkış Sıcaklığı	Ts,out (C°)	9,7	9,7	9,8	9,7	9,7
DENEYSEL SONUÇLAR						
Isı Transferi	$Q_{exp}=mC_p(T_{out}-T_{in})$ (W)	10,1	17,4	23,4	30,4	40,2
Isı Taşınım Katsayısı	$h_{exp,in}=Q_{exp}/A(s_{in})\Delta T_{in}$ (W/m2K)	3535	5626	6915	8933	11713
Nusselt Sayısı	$Nu_{exp,in}=h_{exp,in}D_{in}/k$	2,23	3,54	4,34	5,61	7,35
	$\Delta P_{f,exp}$ = (Pa)	146221	346000	592000	1066000	1611250
Sürtünme Basıncı Kaybı	$\Delta P_{f,exp}$ = (bar)	1,46	3,46	5,92	10,66	16,11
Sürtünme Faktörü	$f_{exp}=\Delta P_{f,exp}/[(L/D_{in})\rho V^2/2]$	0,261	0,155	0,118	0,119	0,115
MİKRO/MİNİ KANAL ÖZELLİKLERİ						
Mikrokanal İç Çapı	Din (µm)	381	381	381	381	381
Mikrokanal İç Çapı	Din (m)	0,000381	0,000381	0,000381	0,000381	0,000381
Mikrokanal Uzunluğu	L (cm)	20	20	20	20	20
Mikrokanal Uzunluğu	L (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Mikrokanal İç Kesit Alanı	$A_{cs,in}=\pi D_{in}^2/4$ (m2)	1,1401E-07	1,1401E-07	1,1401E-07	1,1401E-07	1,1401E-07
Mikrokanal İç Yüzey Alanı	$A_{s,in}=\pi D_{in}L$ (m2)	0,000239	0,000239	0,000239	0,000239	0,000239
Hacimsel Debi	ϕ (m3/s)	1,667E-07	3,333E-07	5,000E-07	6,667E-07	8,333E-07
Kütleli Debi	$m=\rho\phi$ (kg/s)	1,662E-04	3,323E-04	4,984E-04	6,645E-04	8,306E-04
Mikrokanaldaki Ortalama Hız	$V=\phi/A_{cs,in}$ (m/s)	1,462	2,924	4,386	5,847	7,309
Mikrokanal Pürüzlülük Değeri	$\epsilon_{SS}(200,400-100,500,750,1000)=50-25$ (µm), $\epsilon_{PEEK-Tümüt}=12.5$ (µm), $\epsilon_{PEEKsil-Tümüt}=5$ (µm)	50	50	50	50	50
Lam. Hidro Giriş Uzunluğu	$L_{h,laminar}=0.05ReD_{in}$ (cm)	1,14	2,32	3,55	4,73	5,94
Lam. Hidro Gelişme Durumu	$L_{h,laminar}/L\leq 50$ ise Hidro. Gelişmiş	H. Gelişmiş	H. Gelişmiş	H. Gelişmiş	H. Gelişmiş	H. Gelişmiş
Lam. Isıl Giriş Uzunluğu	$L_{t,laminar}=0.05RePrD_{in}$ (cm)	7,33	14,63	21,87	29,17	36,44
Türb. Hidro—Isıl Giriş Uzunluğu	$L_{h,turbulent}=L_{t,turbulent}=10D_{in}$ (cm)	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Türb. Hidro—Isıl G. D.	$L_{turb}/L\leq 50$ ise Hidro-Isıl Gelişmiş	H-I Gelişmiş	H-I Gelişmiş	H-I Gelişmiş	H-I Gelişmiş	H-I Gelişmiş
DEİYONİZE SU ÖZELLİKLERİ						
Giriş Sıcaklığı	Tin (K)	303,5	303,1	303,5	303,2	303,8
Çıkış Sıcaklığı	Tout (K)	289,0	290,6	292,2	292,3	292,2
Ortalama Akışkan Sıcaklığı	$T=(T_{in}+T_{out})/2$ (K)	296,2	296,8	297,8	297,8	298,0
Yüzey Giriş Sıcaklığı	Ts,in (K)	283,3	283,3	283,3	283,2	283,1
Yüzey Çıkış Sıcaklığı	Ts,out (K)	282,7	282,7	282,8	282,7	282,7
Ortalama Yüzey Sıcaklığı	$T_s=(T_{s,in}+T_{s,out})/2$ (K)	283,0	283,0	283,0	282,9	282,9
Girişteki Sıcaklık Farkı	$\Delta T_{in}=T_{in}-T_{s,in}$ (K)	20,2	19,8	20,2	20,0	20,6
Çıkıştaki Sıcaklık Farkı	$\Delta T_{out}=T_{out}-T_{s,out}$ (K)	6,3	7,8	9,5	9,7	9,5
Logaritmik Ortalama Sıcaklık Farkı	$\Delta T_{ln}=(\Delta T_{in}-\Delta T_{out})/\ln(\Delta T_{in}/\Delta T_{out})$ (K)	11,9	12,9	14,2	14,2	14,3
Ort. Yoğunluk	ρ (kg/m3)	997	997	997	997	997
Ort. Özgül Isı	Cp (J/kgK)	4186	4186	4185	4185	4185
Ort. Isıl İletkenlik	k (W/mK)	0,604	0,605	0,607	0,607	0,607
Ort.Sıcaklıkta Dinamik Viskozite	μ_b (mPa.s)	0,9261	0,9137	0,8928	0,8940	0,8897
	μ_b (Pa.s)	9,261E-04	9,137E-04	8,928E-04	8,940E-04	8,897E-04
Ort. Yüzey Sıcaklığında Dinamik Viskozite	μ_s (mPa.s)	1,3083	1,3077	1,3074	1,3103	1,3103
	μ_s (Pa.s)	1,308E-03	1,308E-03	1,307E-03	1,310E-03	1,310E-03
Ortalama Kinematik Viskozite	$\nu=\mu_b/\rho$ (m2/s)	9,2873E-07	9,1642E-07	8,9569E-07	8,9694E-07	8,9264E-07
Ortalama Isıl Difüzyon	$\alpha=k/\rho C_p$ (m2/s)	1,4479E-07	1,4506E-07	1,4552E-07	1,4549E-07	1,4559E-07

EK A SS400 Deneysel Ölçüm ve Hesaplama Tablosu (devam ediyor)

BOYUTSUZ SAYILAR						
Prandtl Sayısı	$Pr = \eta/\alpha$	6,414	6,318	6,155	6,165	6,131
Reynolds Sayısı	$Re = VD/\eta$	600	1216	1866	2484	3120
Kritik Re Sayısı (Heat 5th Pg.517)**	Recr					
Akış Türü	$Re \leq Recr$ ise Laminer					
Peclet Sayısı	$Pe = RePr$	3847	7679	11483	15313	19129
Graetz Sayısı	$Gz = RePrD/\eta$	7,328	14,629	21,874	29,172	36,440
Graetz Sayısı Ters	$Gz = 1$	0,136	0,068	0,046	0,034	0,027
Poiseuille Sayısı (Tam Gelişmiş)	$Po_{the} = f_{the} Re$	64	64	64	64	64
Poiseuille Sayısı (Deneysel)	$Po_{exp} = f_{exp} Re$					
Viskozite Oranı (Sıcaklık etkisi için)	$\nu_r = \mu_b/\mu_s$	0,708	0,699	0,683	0,682	0,679
Malzeme Bağlı Pürüzlülük	ϵ/Din	0,131	0,131	0,131	0,131	0,131
Boy Çap Oranı (Giriş etkisi)	$L/(DinRe)$	0,875	0,432	0,281	0,211	0,168
ISI TRANSFERİ HESAPLARI BASINÇ KAYBI DEĞERLERİ						
Nusselt Sayıları						
Nusselt Sayısı (Sieder—Tate) ($0.6 \leq Pr \leq 5$) ($0.0044 \leq \mu_b/\mu_s \leq 9.75$) ($Re < 2300$) (Hidro ve Isıl gelişen)	$Nu_{the} = 1.86 Gz^{1/3} (\mu_b/\mu_s)^{0.14}$	3,442	4,326	4,931	5,427	5,841
Nusselt Sayısı (Edwards) ($Re < 2300$) (Hidro gelişmiş, Isıl gelişen) ($Pr \geq 5$) ise (Hidro ve Isıl gelişen)	$Nu_{the} = 3.66 + 0.065 Gz / (1 + 0.04 Gz^{2/3})$	4,074	4,427	4,743	5,035	5,305
Nusselt Sayısı (Tam Gelişmiş) ($Re < 2300$) (Hidro ve Isıl gelişmiş)	$Nu_{the} = 3.66$	3,66	3,66	3,66	3,66	3,66
Isı Taşıma Katsayıları						
Isı Taşıma Katsayısı (Sieder—Tate)	$h_{the} = Nu_{the} k / Din$ (W/m ² K)	8690	10940	12504	13760	14817
Isı Taşıma Katsayısı (Edwards)	$h_{the} = Nu_{the} k / Din$ (W/m ² K)	10285	11195	12027	12765	13458
Isı Taşıma Katsayısı (Tam Gelişmiş)	$h_{the} = Nu_{the} k / Din$ (W/m ² K)	9240	9255	9281	9279	9284
Isı Transferi Değerleri						
Isı Transferi (Sieder—Tate)	$Q_{the} = h_{the} A_s \ln \Delta T_{ln}$ (W)	24,8	33,8	42,4	46,8	50,9
Isı Transferi (Edwards)	$Q_{the} = h_{the} A_s \ln \Delta T_{ln}$ (W)	29,4	34,6	40,8	43,4	46,2
Isı Transferi (Tam Gelişmiş)	$Q_{the} = h_{the} A_s \ln \Delta T_{ln}$ (W)	26,4	28,6	31,4	31,6	31,9
Sürtünme Faktörü Değerleri						
Sürtünme Faktörü (Darcy) ($Re < 2300$)	$f_{the} = 64/Re$	0,107	0,053	0,034	0,026	0,021
Sürtünme Faktörü (Haaland) ($Re > 4000$)	$f_{the} = (1/(-1.8 \log(6.9/Re + (\epsilon/Din)^{1.11})))^2$	0,148	0,134	0,129	0,126	0,125
Sürtünme Faktörü (Blasius) ($4000 < Re < 100000$)	$f_{the} = 0.3164 Re^{-0.25}$	0,064	0,054	0,048	0,045	0,042
Sürtünme Faktörü (Colebrook-White) $4000 < Re < 10^8$ ve $0 < \epsilon/D < 0.05$		0,141	0,130	0,126	0,125	0,123
Sürtünme Faktörü (Ghajar 2010, 413)	f_{ref}	0,170	0,090	0,084	0,070	0,062
Re (Ghajar 2010 için)	Re_{ref}	810	1200	1900	2550	3100
Sürtünme Basınç Kayıpları						
Sürtünme Basınç Kaybı (Poiseuille)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / Din) V^{2/2} / 10^5$ (bar)	0,60	1,18	1,73	2,30	2,87
Sürtünme Basınç Kaybı (Haaland)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / Din) V^{2/2} / 10^5$ (bar)	0,83	2,99	6,47	11,30	17,45
Sürtünme Basınç Kaybı (Blasius)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / Din) V^{2/2} / 10^5$ (bar)	0,36	1,20	2,42	4,01	5,92
Sürtünme Basınç Kaybı (Colebrook-White)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / Din) V^{2/2} / 10^5$ (bar)	0,79	2,91	6,36	11,15	17,26
Sürtünme Basınç Kaybı (Ghajar 2010)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / Din) V^{2/2} / 10^5$ (bar)	0,95	2,01	4,23	6,26	8,67

EK B SS500 Deneyisel Ölçüm ve Hesaplama Tablosu

	SS500					
Hacimsel Debi	$\dot{v}$ (mL/min)	10	20	30	40	50
Giriş Sıcaklığı	T_{in} (°C)	30,9	30,5	29,8	30,0	29,8
Çıkış Sıcaklığı	T_{out} (°C)	14,5	15,1	16,7	17,5	18,4
Yüzey Giriş Sıcaklığı	$T_{s,in}$ (°C)	10,2	10,1	10,1	10,1	10,1
Yüzey Çıkış Sıcaklığı	$T_{s,out}$ (°C)	9,7	9,6	9,7	9,7	9,7
DENEYSEL SONUÇLAR						
Isı Transferi	$Q_{exp} = mC_p(T_{out} - T_{in})$ (W)	11,4	21,4	27,3	34,8	39,6
Isı Taşıma Katsayısı	$h_{exp,in} = Q_{exp}/A(s,in)\Delta T_{in}$ (W/m ² K)	3298	5875	6946	8450	9162
Nusselt Sayısı	$Nu_{exp,in} = h_{exp,in}D_{in}/k$	2,78	4,94	5,84	7,09	7,68
Sürtünme Basıncı Kaybı	$\Delta P_{f,exp}$ (Pa)	22000	46000	73000	93000	144000
Sürtünme Basıncı Kaybı	$\Delta P_{f,exp}$ (bar)	0,22	0,46	0,73	0,93	1,44
Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f,exp}/[(L/D_{in})\rho V^2/2]$	0,166	0,087	0,061	0,044	0,043
MIKROMINİ KANAL ÖZELLİKLERİ						
Mikrokanal İç Çapı	D_{in} (μm)	508	508	508	508	508
Mikrokanal İç Çapı	D_{in} (m)	0,000508	0,000508	0,000508	0,000508	0,000508
Mikrokanal Uzunluğu	L (cm)	20	20	20	20	20
Mikrokanal Uzunluğu	L (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Mikrokanal İç Kesit Alanı	$A_{cs,in} = \pi D_{in}^2/4$ (m ²)	2,02683E-07	2,027E-07	2,027E-07	2,027E-07	2,027E-07
Mikrokanal İç Yüzey Alanı	$A_{s,in} = \pi D_{in}L$ (m ²)	0,000319	0,000319	0,000319	0,000319	0,000319
Hacimsel Debi	$\dot{v}$ (m ³ /s)	1,667E-07	3,333E-07	5,000E-07	6,667E-07	8,333E-07
Kütleli Debi	$\dot{m} = \rho \dot{v}$ (kg/s)	1,662E-04	3,324E-04	4,986E-04	6,647E-04	8,308E-04
Mikrokanaldaki Ortalama Hız	$V = \dot{v}/A_{cs,in}$ (m/s)	0,822	1,645	2,467	3,289	4,112
Mikrokanal Pürüzlülük Değeri	$\epsilon_{SS}(200,400-100,500,750,1000) = 50-25$ (μm), $\epsilon_{PEEK-T\ddot{u}m\ddot{u}} = 12,5$ (μm), $\epsilon_{PEEKsil-T\ddot{u}m\ddot{u}} = 5$ (μm)	50	50	50	50	50
Lam. Hidro Giriş Uzunluğu	$L_{h,laminar} = 0,05 Re D_{in}$ (cm)	1,13	2,26	3,43	4,62	5,83
Lam. Hidro Gelişme Durumu	$L_{h,laminar}/L \leq \%50$ ise Hidro. Gelişmiş	H. Gelişmiş	H. Gelişmiş	H. Gelişmiş	H. Gelişmiş	H. Gelişmiş
Lam. Isıl Giriş Uzunluğu	$L_{t,laminar} = 0,05 Re Pr D_{in}$ (cm)	7,34	14,68	21,98	29,27	36,54
Türb. Hidro—Isıl Giriş Uzunluğu	$L_{h,turbulent} = L_{t,turbulent} = 10 D_{in}$ (cm)	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Türb. Hidro—Isıl G. D.	$L_{turb}/L \leq \%50$ ise Hidro-Isıl Gelişmiş	H-I Gelişmiş	H-I Gelişmiş	H-I Gelişmiş	H-I Gelişmiş	H-I Gelişmiş
DEİYONİZE SU ÖZELLİKLERİ						
Giriş Sıcaklığı	T_{in} (K)	303,9	303,5	302,8	303,0	302,8
Çıkış Sıcaklığı	T_{out} (K)	287,5	288,1	289,7	290,5	291,4
Ortalama Akışkan Sıcaklığı	$T = (T_{in} + T_{out})/2$ (K)	295,7	295,8	296,2	296,7	297,1
Yüzey Giriş Sıcaklığı	$T_{s,in}$ (K)	283,2	283,1	283,1	283,1	283,1
Yüzey Çıkış Sıcaklığı	$T_{s,out}$ (K)	282,7	282,6	282,7	282,7	282,7
Ortalama Yüzey Sıcaklığı	$T_s = (T_{s,in} + T_{s,out})/2$ (K)	283,0	282,8	282,9	282,9	282,9
Girişteki Sıcaklık Farkı	$\Delta T_{in} = T_{in} - T_{s,in}$ (K)	20,6	20,5	19,7	19,9	19,8
Çıkıştaki Sıcaklık Farkı	$\Delta T_{out} = T_{out} - T_{s,out}$ (K)	4,8	5,6	7,1	7,8	8,8
Logaritmik Ortalama Sıcaklık Farkı	$\Delta T_{lm} = (\Delta T_{in} - \Delta T_{out})/\ln(\Delta T_{in}/\Delta T_{out})$ (K)	10,8	11,4	12,3	12,9	13,5
Ort. Yoğunluk	ρ (kg/m ³)	997	997	997	997	997
Ort. Özgül Isı	C_p (J/kgK)	4186	4186	4186	4186	4185
Ort. Isıl İletkenlik	k (W/mK)	0,603	0,604	0,604	0,605	0,606
Ort. Sıcaklıkta Dinamik Viskozite	μ_b (mPas)	0,9385	0,9351	0,9263	0,9157	0,9072
	μ_b (Pas)	9,385E-04	9,351E-04	9,263E-04	9,157E-04	9,072E-04
Ort. Yüzey Sıcaklığında Dinamik Viskozite	μ_s (mPas)	1,3085	1,3145	1,3127	1,3112	1,3131
	μ_s (Pas)	1,309E-03	1,314E-03	1,313E-03	1,311E-03	1,313E-03
Ortalama Kinematik Viskozite	$\nu = \mu_b/\rho$ (m ² /s)	9,41077E-07	9,377E-07	9,29E-07	9,185E-07	9,1E-07
Ortalama Isıl Difüzyon	$\alpha = k/\rho C_p$ (m ² /s)	1,44531E-07	1,446E-07	1,448E-07	1,45E-07	1,452E-07
BOYUTSUZ SAYILAR						
Prandtl Sayısı	$Pr = \nu/\alpha$	6,511	6,485	6,416	6,334	6,267
Reynolds Sayısı	$Re = VD_{in}/\nu$	444	891	1349	1819	2295
Kritik Re Sayısı (Heat 5th Pg.517)**	Re_{cr}					
Akış Türü	$Re \leq Re_{cr}$ ise Laminer					
Peclet Sayısı	$Pe = Re Pr$	2890	5778	8655	11522	14385
Graetz Sayısı	$Gz = Re Pr D_{in}/L$	7,341	14,675	21,985	29,267	36,537
Graetz Sayısı Ters	$Gz - 1$	0,136	0,068	0,045	0,034	0,027
Poiseuille Sayısı (Tam Gelişmiş)	$Po_{the} = f_{lhc} Re$	64	64	64	64	64
Poiseuille Sayısı (DeneySEL)	$Po_{exp} = f_{exp} Re$					
Viskozite Oranı (Sıcaklık etkisi için)	$\nu_r = \mu_b/\mu_s$	0,717	0,711	0,706	0,698	0,691
Malzeme Bağlı Pürüzlülük	ϵ/D_{in}	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098
Boy Çap Oranı (Giriş etkisi)	$L/(D_{in} Re)$	0,887	0,442	0,292	0,216	0,172

EK B SS500 Deneysel Ölçüm ve Hesaplama Tablosu (devam ediyor)

ISI TRANSFERİ HESAPLARI BASINÇ KAYBI DEĞERLERİ						
Nusselt Sayıları						
Nusselt Sayısı (Sieder—Tate) ($0.6 \leq Pr \leq 5$) ($0.0044 \leq \mu_b/\mu_s \leq 9.75$) ($Re < 2300$) (Hidro ve Isıl gelişen)	$Nu_{the} = 1.86 Gz^{1/3} (\mu_b/\mu_s)^{0.14}$	3,451	4,342	4,962	5,451	5,861
Nusselt Sayısı (Edwards) ($Re < 2300$) (Hidro gelişmiş, Isıl gelişen) ($Pr \geq 5$) ise (Hidro ve Isıl gelişen)	$Nu_{the} = 3.66 + 0.065 Gz / (1 + 0.04 Gz^{2/3})$	4,075	4,429	4,748	5,039	5,309
Nusselt Sayısı (Tam Gelişmiş) ($Re < 2300$) (Hidro ve Isıl gelişmiş)	$Nu_{the} = 3.66$	3,66	3,66	3,66	3,66	3,66
Isı Taşınım Katsayıları						
Isı Taşınım Katsayısı (Sieder—Tate)	$h_{the} = Nu_{the} k / D_{in} \text{ (W/m}^2\text{K)}$	6523	8211	9396	10335	11124
Isı Taşınım Katsayısı (Edwards)	$h_{the} = Nu_{the} k / D_{in} \text{ (W/m}^2\text{K)}$	7703	8377	8989	9553	10077
Isı Taşınım Katsayısı (Tam Gelişmiş)	$h_{the} = Nu_{the} k / D_{in} \text{ (W/m}^2\text{K)}$	6919	6922	6930	6939	6947
Isı Transferi Değerleri						
Isı Transferi (Sieder—Tate)	$Q_{the} = h_{the} A_s \ln \Delta T_{ln} \text{ (W)}$	22,53	29,95	36,90	42,53	48,08
Isı Transferi (Edwards)	$Q_{the} = h_{the} A_s \ln \Delta T_{ln} \text{ (W)}$	26,6	30,6	35,3	39,3	43,6
Isı Transferi (Tam Gelişmiş)	$Q_{the} = h_{the} A_s \ln \Delta T_{ln} \text{ (W)}$	23,9	25,2	27,2	28,6	30,0
Sürtünme Faktörü Değerleri						
Sürtünme Faktörü (Darcy) ($Re < 2300$)	$f_{the} = 64 / Re$	0,144	0,072	0,047	0,035	0,028
Sürtünme Faktörü (Haaland) ($Re > 4000$)	$f_{the} = (1 / (-1.8 \log(6.9 / Re + (e / D_{in} / 3.7)^{1.11})))^2$	0,142	0,122	0,115	0,111	0,109
Sürtünme Faktörü (Blasius) ($4000 < Re \leq 100000$)	$f_{the} = 0.3164 Re^{-0.25}$	0,069	0,058	0,052	0,048	0,046
Sürtünme Faktörü (Colebrook-White) $4000 < Re < 10^8$ ve $0 < e/D < 0.05$		0,132	0,118	0,112	0,109	0,108
Sürtünme Faktörü (Ghajar 2010, 413) Re (Ghajar 2010 için)	f_{ref} R_{ref}	0,047 930	0,091 1319	0,060 1738	0,067 2000	0,063 2500
Sürtünme Basınç Kayıpları						
Sürtünme Basınç Kaybı (Poiseuille)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / D_{in} V^{2/2}) / 10^5 \text{ (bar)}$	0,19	0,38	0,57	0,75	0,93
Sürtünme Basınç Kaybı (Haaland)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / D_{in} V^{2/2}) / 10^5 \text{ (bar)}$	0,19	0,65	1,37	2,36	3,62
Sürtünme Basınç Kaybı (Blasius)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / D_{in} V^{2/2}) / 10^5 \text{ (bar)}$	0,09	0,31	0,62	1,03	1,52
Sürtünme Basınç Kaybı (Colebrook-White)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / D_{in} V^{2/2}) / 10^5 \text{ (bar)}$	0,18	0,62	1,34	2,32	3,57
Sürtünme Basınç Kaybı (Ghajar 2010)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / D_{in} V^{2/2}) / 10^5 \text{ (bar)}$	0,06	0,48	0,72	1,43	2,10

EK C SS750 Deneysel Ölçüm ve Hesaplama Tablosu

SS750						
Hacimsel Debi	$\dot{v}$ (mL/min)	10	20	30	40	50
Giriş Sıcaklığı	Tin (C°)	34,6	30,4	31,0	30,2	30,6
Çıkış Sıcaklığı	Tout (C°)	11,9	14,5	16,3	17,5	18,9
Yüzey Giriş Sıcaklığı	Ts.in (C°)	10,1	10,0	10,1	10,0	9,6
Yüzey Çıkış Sıcaklığı	Ts.out (C°)	9,5	9,5	9,5	9,6	9,5
DENEYSEL SONUÇLAR						
Isı Transferi	$Q_{exp}=mC_p(T_{out}-T_{in})/W$	15,8	22,1	30,7	35,4	40,6
Isı Taşıma Katsayısı	$h_{exp,in}=Q_{exp}/A(s_{in})\Delta T_{ln} (W/m^2K)$	3478	4211	5128	5652	5886
Nusselt Sayısı	$Nu_{exp,in}=h_{exp,in}D_{in}/k$	4,39	5,32	6,46	7,11	7,39
Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f,exp}=(Pa)$	6000	12000	15000	20000	26000
Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P_{f,exp}=(bar)$	0,06	0,12	0,15	0,20	0,26
Sürtünme Faktörü	$f_{exp}=\Delta P_{f,exp}/[(L/D_{in})\rho V^2/2]$	0,343	0,172	0,095	0,072	0,060
MIKRO/MİNİ KANAL ÖZELLİKLERİ						
Mikrokanal İç Çapı	Din (µm)	762	762	762	762	762
Mikrokanal İç Çapı	Din (m)	0,000762	0,000762	0,000762	0,000762	0,000762
Mikrokanal Uzunluğu	L(cm)	20	20	20	20	20
Mikrokanal Uzunluğu	L(m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Mikrokanal İç Kesit Alanı	$A_{cs,in}=\pi D_{in}^2/4 (m^2)$	4,56036E-07	4,56E-07	4,56E-07	4,56E-07	4,56E-07
Mikrokanal İç Yüzey Alanı	$A_{s,in}=\pi D_{in}L (m^2)$	0,000479	0,000479	0,000479	0,000479	0,000479
Hacimsel Debi	$\dot{v} (m^3/s)$	1,667E-07	3,333E-07	5,000E-07	6,667E-07	8,333E-07
Kütleli Debi	$\dot{m}=\rho \dot{v} (kg/s)$	1,662E-04	3,324E-04	4,985E-04	6,647E-04	8,306E-04
Mikrokanaldaki Ortalama Hız	$V=\dot{v}/A_{cs,in} (m/s)$	0,365	0,731	1,096	1,462	1,827
Mikrokanal Pürüzlülük Değeri	$\epsilon_{SS}(200,400-100,500,750,1000)=50-25 (\mu m)$, $\epsilon_{PEEK-Tümü}=12,5 (\mu m)$, $\epsilon_{PEEKsil-Tümü}=5 (\mu m)$	50	50	50	50	50
Lam. Hidro Giriş Uzunluğu	$L_{h,laminar}=0,05ReD_{in} (cm)$	1,14	2,24	3,46	4,63	5,91
Lam. Hidro Gelişme Durumu	$L_{h,laminar}/L\leq\%50$ ise Hidro. Gelişmiş	Gelişmiş	Gelişmiş	Gelişmiş	Gelişmiş	Gelişmiş
Lam. Isıl Giriş Uzunluğu	$L_{t,laminar}=0,05RePrD_{in} (cm)$	7,33	14,69	21,96	29,26	36,47
Türb. Hidro—Isıl Giriş Uzunluğu	$L_{t,turbulent}=L_{t,turbulent}=10D_{in} (cm)$	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
Türb. Hidro—Isıl G. D.	$L_{turb}/L\leq\%50$ ise Hidro-Isıl Gelişmiş	Gelişmiş	Gelişmiş	Gelişmiş	Gelişmiş	Gelişmiş
DEİYONİZE SU ÖZELLİKLERİ						
Giriş Sıcaklığı	Tin (K)	307,6	303,4	304,0	303,2	303,6
Çıkış Sıcaklığı	Tout (K)	284,9	287,5	289,3	290,5	291,9
Ortalama Akışkan Sıcaklığı	$T=(T_{in}+T_{out})/2 (K)$	296,2	295,4	296,6	296,8	297,7
Yüzey Giriş Sıcaklığı	Ts.in (K)	283,1	283,0	283,1	283,0	282,6
Yüzey Çıkış Sıcaklığı	Ts.out (K)	282,5	282,5	282,5	282,6	282,5
Ortalama Yüzey Sıcaklığı	$T_s=(T_{s,in}+T_{s,out})/2 (K)$	282,8	282,8	282,8	282,8	282,6
Girişteki Sıcaklık Farkı	$\Delta T_{in}=T_{in}-T_{s,in} (K)$	24,5	20,4	20,9	20,2	21,0
Çıkıştaki Sıcaklık Farkı	$\Delta T_{out}=T_{out}-T_{s,out} (K)$	2,4	5,0	6,8	7,9	9,4
Logaritmik Ortalama Sıcaklık Farkı	$\Delta T_{ln}=(\Delta T_{in}-\Delta T_{out})/\ln(\Delta T_{in}/\Delta T_{out}) (K)$	9,5	11,0	12,5	13,1	14,4
Ort. Yoğunluk	$\rho (kg/m^3)$	997	997	997	997	997
Ort. Özgül Isı	$C_p (J/kgK)$	4186	4186	4186	4186	4185
Ort. Isıl İletkenlik	$k (W/mK)$	0,604	0,603	0,605	0,605	0,607
Ort.Sıcaklıkta Dinamik Viskozite	$\mu_b (mPa.s)$	0,9268	0,9436	0,9182	0,9133	0,8948
Ort. Yüzey Sıcaklığında Dinamik Viskozite	$\mu_b (Pa.s)$	9,268E-04	9,436E-04	9,182E-04	9,133E-04	8,948E-04
Ort. Yüzey Sıcaklığında Dinamik Viskozite	$\mu_s (mPa.s)$	1,3162	1,3173	1,3158	1,3152	1,3245
Ort. Yüzey Sıcaklığında Dinamik Viskozite	$\mu_s (Pa.s)$	1,316E-03	1,317E-03	1,316E-03	1,315E-03	1,324E-03
Ortalama Kinematik Viskozite	$\nu=\mu_b/\rho (m^2/s)$	9,29486E-07	9,461E-07	9,209E-07	9,16E-07	8,977E-07
Ortalama Isıl Difüzyon	$\alpha=k/\rho C_p (m^2/s)$	1,44777E-07	1,444E-07	1,45E-07	1,451E-07	1,455E-07
BOYUTSUZ SAYILAR						
Prandtl Sayısı	$Pr=\dot{v}/\alpha$	6,420	6,551	6,353	6,315	6,171
Reynolds Sayısı	$Re=VD_{in}/\nu$	300	589	907	1216	1551
Kritik Re Sayısı (Heat 5th Pg.517)**	Recr					
Akış Türü	$Re\leq Recr$ ise Laminer					
Peclet Sayısı	$Pe=RePr$	1924	3856	5763	7679	9572
Graetz Sayısı	$Gz=RePrD_{in}/L$	7,329	14,693	21,958	29,256	36,469
Graetz Sayısı Ters	Gz^{-1}	0,136	0,068	0,046	0,034	0,027
Poiseuille Sayısı (Tam Gelişmiş)	$Pe_{th}=f_{th}Re$	64	64	64	64	64
Poiseuille Sayısı (Deneysel)	$Pe_{exp}=f_{exp}Re$					
Viskozite Oranı (Sıcaklık etkisi için)	$\nu_r=\mu_b/\mu_s$	0,704	0,716	0,698	0,694	0,676
Malzeme Bağıl Pürüzlülük	ϵ/D_{in}	0,066	0,066	0,066	0,066	0,066
Boy Çap Oranı (Giriş etkisi)	$L/(D_{in}Re)$	0,876	0,446	0,289	0,216	0,169

EK C SS750 Deneysel Ölçüm ve Hesaplama Tablosu (devam ediyor)

ISI TRANSFERİ HESAPLARI BASINÇ KAYBI DEĞERLERİ						
Nusselt Sayıları						
Nusselt Sayısı (Sieder—Tate) ($0.6 \leq Pr \leq 5$) ($0.0044 \leq \mu_b/\mu_s \leq 9.75$) ($Re < 2300$) (Hidro ve Isıl gelişen)	$Nu_{the} = 1.86 Gz^{1/3} (\mu_b/\mu_s)^{0.14}$	3,440	4,348	4,953	5,446	5,839
Nusselt Sayısı (Edwards) ($Re < 2300$) (Hidro gelişmiş, Isıl gelişen) ($Pr \geq 5$) ise (Hidro ve Isıl gelişen)	$Nu_{the} = 3.66 + 0.065 Gz / (1 + 0.04 Gz^{2/3})$	4,074	4,430	4,746	5,038	5,306
Nusselt Sayısı (Tam Gelişmiş) ($Re < 2300$) (Hidro ve Isıl gelişmiş)	$Nu_{the} = 3.66$	3,66	3,66	3,66	3,66	3,66
Isı Taşınım Katsayıları						
Isı Taşınım Katsayısı (Sieder—Tate)	$h_{the} = Nu_{the} k / D_{in} (W/m^2K)$	4342	5476	6258	6886	7400
Isı Taşınım Katsayısı (Edwards)	$h_{the} = Nu_{the} k / D_{in} (W/m^2K)$	5142	5580	5998	6370	6726
Isı Taşınım Katsayısı (Tam Gelişmiş)	$h_{the} = Nu_{the} k / D_{in} (W/m^2K)$	4620	4610	4625	4628	4639
Isı Transferi Değerleri						
Isı Transferi (Sieder—Tate)	$Q_{the} = h_{the} A_s \ln \Delta T_{ln} (W)$	19,7	28,8	37,5	43,1	51,0
Isı Transferi (Edwards)	$Q_{the} = h_{the} A_s \ln \Delta T_{ln} (W)$	23,4	29,3	36,0	39,9	46,4
Isı Transferi (Tam Gelişmiş)	$Q_{the} = h_{the} A_s \ln \Delta T_{ln} (W)$	21,0	24,2	27,7	29,0	32,0
Sürtünme Faktörü Değerleri						
Sürtünme Faktörü (Darcy) ($Re < 2300$)	$f_{the} = 64/Re$	0,214	0,109	0,071	0,053	0,041
Sürtünme Faktörü (Haaland) ($Re > 4000$)	$f_{the} = (1/(-1.8 \log(6.9/Re + (e/D_{in}/3.7)^{1.11})))^2$	0,144	0,115	0,104	0,099	0,095
Sürtünme Faktörü (Blasius) ($4000 \leq Re \leq 100000$)	$f_{the} = 0.3164 Re^{-0.25}$	0,076	0,064	0,058	0,054	0,050
Sürtünme Faktörü (Colebrook-White) $4000 < Re < 10^8$ ve $0 < e/D < 0.05$		0,130	0,109	0,100	0,096	0,093
Sürtünme Faktörü (Ghajar 2010, 413) Re (Ghajar 2010 için)	f_{ref} R_{ref}	0,077	0,071	0,054	0,041	0,033
Sürtünme Basınç Kayıpları						
Sürtünme Basınç Kaybı (Poiseuille)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / D_{in}) V^{2/2} / 10^5 (bar)$	0,04	0,08	0,11	0,15	0,18
Sürtünme Basınç Kaybı (Haaland)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / D_{in}) V^{2/2} / 10^5 (bar)$	0,03	0,08	0,16	0,28	0,42
Sürtünme Basınç Kaybı (Blasius)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / D_{in}) V^{2/2} / 10^5 (bar)$	0,01	0,04	0,09	0,15	0,22
Sürtünme Basınç Kaybı (Colebrook-White)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / D_{in}) V^{2/2} / 10^5 (bar)$	0,02	0,08	0,16	0,27	0,41
Sürtünme Basınç Kaybı (Ghajar 2010)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / D_{in}) V^{2/2} / 10^5 (bar)$	0,01	0,05	0,08	0,11	0,15

EK D PEEK400 Deneyisel Ölçüm ve Hesaplama Tablosu

PEEK400						
Hacimsel Debi	$\dot{v}$ (mL/min)	10	20	30	40	50
Giriş Sıcaklığı	T_{in} (°C)	30,2	30,2	30,6	30,7	30,5
Çıkış Sıcaklığı	T_{out} (°C)	19,1	19,8	21,5	22,0	21,9
Yüzey Giriş Sıcaklığı	$T_{s,in}$ (°C)	10,4	10,4	10,0	10,4	10,4
Yüzey Çıkış Sıcaklığı	$T_{s,out}$ (°C)	9,9	9,7	9,8	9,8	9,8
DENEYSEL SONUÇLAR						
Isı Transferi	$Q_{exp} = mC_p(T_{out} - T_{in})$ (W)	7,7	14,3	18,9	24,2	29,7
Isı Taşınım Katsayısı	$h_{exp,in} = Q_{exp}/A(s,in)\Delta T_{in}$ (W/m ² K)	2332	4160	5035	6369	7871
Nusselt Sayısı	$Nu_{exp,in} = h_{exp,in}D_{in}/k$	1,46	2,61	3,15	3,98	4,92
Sürtünme Basıncı Kaybı	$\Delta P_{f,exp} = (Pa)$	57000	118000	177000	343000	552000
Sürtünme Basıncı Kaybı	$\Delta P_{f,exp} = (bar)$	0,57	1,18	1,77	3,43	5,52
Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f,exp}/[(L/D_{in})\rho V^2/2]$	0,102	0,053	0,035	0,038	0,040
MIKROMINİ KANAL ÖZELLİKLERİ						
Mikrokanal İç Çapı	D_{in} (µm)	381	381	381	381	381
Mikrokanal İç Çapı	D_{in} (m)	0,000381	0,000381	0,000381	0,000381	0,000381
Mikrokanal Uzunluğu	L (cm)	20	20	20	20	20
Mikrokanal Uzunluğu	L (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Mikrokanal İç Kesit Alanı	$A_{cs,in} = \pi D_{in}^2/4$ (m ²)	1,14009E-07	1,14E-07	1,14E-07	1,14E-07	1,14E-07
Mikrokanal İç Yüzey Alanı	$A_{s,in} = \pi D_{in}L$ (m ²)	0,000239	0,000239	0,000239	0,000239	0,000239
Hacimsel Debi	$\dot{v}$ (m ³ /s)	1,667E-07	3,333E-07	5,000E-07	6,667E-07	8,333E-07
Kütleli Debi	$\dot{m} = \rho \dot{v}$ (kg/s)	1,661E-04	3,322E-04	4,982E-04	6,642E-04	8,303E-04
Mikrokanaldaki Ortalama Hız	$V = \dot{v}/A_{cs,in}$ (m/s)	1,462	2,924	4,386	5,847	7,309
Mikrokanal Pürüzlülük Değeri	$\epsilon_{SS}(200,400-100,500,750,1000) = 50-25$ (µm), $\epsilon_{PEEK-T\ddot{u}m\ddot{u}l\ddot{u}l\ddot{u}k} = 12,5$ (µm), $\epsilon_{PEEKsil-T\ddot{u}m\ddot{u}l\ddot{u}l\ddot{u}k} = 5$ (µm)	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Lam. Hidro Giriş Uzunluğu	$L_{h,laminar} = 0,05 Re D_{in}$ (cm)	1,18	2,38	3,65	4,90	6,10
Lam. Hidro Gelişme Durumu	$L_{h,laminar}/L \leq \%50$ ise Hidro. Gelişmiş	H. Gelişmiş	H. Gelişmiş	H. Gelişmiş	H. Gelişmiş	H. Gelişmiş
Lam. Isıl Giriş Uzunluğu	$L_{t,laminar} = 0,05 Re Pr D_{in}$ (cm)	7,30	14,58	21,79	29,03	36,31
Türb. Hidro—Isıl Giriş Uzunluğu	$L_{t,turbulent} = L_{t,turbulent} = 10 D_{in}$ (cm)	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Türb. Hidro—Isıl G. D.	$L_{turb}/L \leq \%50$ ise Hidro-Isıl Gelişmiş	H-I Gelişmiş	H-I Gelişmiş	H-I Gelişmiş	H-I Gelişmiş	H-I Gelişmiş
DEİYONİZE SU ÖZELLİKLERİ						
Giriş Sıcaklığı	T_{in} (K)	303,2	303,2	303,6	303,7	303,5
Çıkış Sıcaklığı	T_{out} (K)	292,1	292,8	294,5	295,0	294,9
Ortalama Akışkan Sıcaklığı	$T = (T_{in} + T_{out})/2$ (K)	297,6	298,0	299,0	299,3	299,2
Yüzey Giriş Sıcaklığı	$T_{s,in}$ (K)	283,4	283,4	283,0	283,4	283,4
Yüzey Çıkış Sıcaklığı	$T_{s,out}$ (K)	282,9	282,7	282,8	282,8	282,8
Ortalama Yüzey Sıcaklığı	$T_s = (T_{s,in} + T_{s,out})/2$ (K)	283,1	283,1	282,9	283,1	283,1
Girişteki Sıcaklık Farkı	$\Delta T_{in} = T_{in} - T_{s,in}$ (K)	19,8	19,8	20,5	20,3	20,1
Çıkıştaki Sıcaklık Farkı	$\Delta T_{out} = T_{out} - T_{s,out}$ (K)	9,2	10,1	11,7	12,1	12,1
Logaritmik Ortalama Sıcaklık Farkı	$\Delta T_{lm} = (\Delta T_{in} - \Delta T_{out})/\ln(\Delta T_{in}/\Delta T_{out})$ (K)	13,8	14,4	15,7	15,9	15,7
Ort. Yoğunluk	ρ (kg/m ³)	997	997	996	996	996
Ort. Özgül Isı	C_p (J/kgK)	4185	4185	4184	4184	4184
Ort. Isıl İletkenlik	k (W/mK)	0,607	0,607	0,609	0,609	0,609
Ort. Sıcaklıkta Dinamik Viskozite	μ_b (mPas)	0,8967	0,8895	0,8693	0,8637	0,8662
	μ_b (Pas)	8,967E-04	8,895E-04	8,693E-04	8,637E-04	8,662E-04
Ort. Yüzey Sıcaklığında Dinamik Viskozite	μ_s (mPas)	1,3023	1,3059	1,3103	1,3040	1,3042
	μ_s (Pas)	1,302E-03	1,306E-03	1,310E-03	1,304E-03	1,304E-03
Ortalama Kinematik Viskozite	$\nu = \mu_b/\rho$ (m ² /s)	8,99571E-07	8,924E-07	8,724E-07	8,669E-07	8,693E-07
Ortalama Isıl Difüzyon	$\alpha = k/\rho C_p$ (m ² /s)	1,4543E-07	1,456E-07	1,46E-07	1,462E-07	1,461E-07
BOYUTSUZ SAYILAR						
Prandtl Sayısı	$Pr = \nu/\alpha$	6,186	6,130	5,973	5,930	5,950
Reynolds Sayısı	$Re = VD_{in}/\nu$	619	1248	1915	2570	3203
Kritik Re Sayısı (Heat 5th Pg.517)**	Re_{cr}					
Akış Türü	$Re \leq Re_{cr}$ ise Laminer					
Peclet Sayısı	$Pe = Re Pr$	3830	7651	11441	15241	19059
Graetz Sayısı	$Gz = Re Pr D_{in}/L$	7,296	14,576	21,795	29,034	36,307
Graetz Sayısı Ters	Gz^{-1}	0,137	0,069	0,046	0,034	0,028
Poiseuille Sayısı (Tam Gelişmiş)	$Po_{the} = f_{the} Re$	64	64	64	64	64
Poiseuille Sayısı (Deneyisel)	$Po_{exp} = f_{exp} Re$					
Viskozite Oranı (Sıcaklık etkisi için)	$\nu_r = \mu_b/\mu_s$	0,689	0,681	0,663	0,662	0,664
Malzeme Bağlı Pürüzlülük	ϵ/D_{in}	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033
Boy Çap Oranı (Giriş etkisi)	$L/(D_{in} Re)$	0,848	0,421	0,274	0,204	0,164

EK D PEEK400 Deneysel Ölçüm ve Hesaplama Tablosu (devam ediyor)

ISI TRANSFERİ HESAPLARI BASINÇ KAYBI DEĞERLERİ						
Nusselt Sayıları						
Nusselt Sayısı (Sieder—Tate) ($0.6 \leq Pr \leq 5$) ($0.0044 \leq \mu_b/\mu_s \leq 9.75$) ($Re < 2300$) (Hidro ve Isıl gelişen)	$Nu_{the} = 1.86 Gz^{1/3} (\mu_b/\mu_s)^{0.14}$	3,424	4,306	4,906	5,396	5,816
Nusselt Sayısı (Edwards) ($Re < 2300$) (Hidro gelişmiş, Isıl gelişen) ($Pr \geq 5$) ise (Hidro ve Isıl gelişen)	$Nu_{the} = 3.66 + 0.065 Gz / (1 + 0.04 Gz^{2/3})$	4,072	4,425	4,740	5,030	5,300
Nusselt Sayısı (Tam Gelişmiş) ($Re < 2300$) (Hidro ve Isıl gelişmiş)	$Nu_{the} = 3.66$	3,66	3,66	3,66	3,66	3,66
Isı Taşınım Katsayıları						
Isı Taşınım Katsayısı (Sieder—Tate)	$h_{the} = Nu_{the} k / D_{in} \text{ (W/m}^2\text{K)}$	8677	10923	12478	13738	14801
Isı Taşınım Katsayısı (Edwards)	$h_{the} = Nu_{the} k / D_{in} \text{ (W/m}^2\text{K)}$	10320	11225	12057	12804	13489
Isı Taşınım Katsayısı (Tam Gelişmiş)	$h_{the} = Nu_{the} k / D_{in} \text{ (W/m}^2\text{K)}$	9276	9285	9310	9317	9314
Isı Transferi Değerleri						
Isı Transferi (Sieder—Tate)	$Q_{the} = h_{the} A_{s,in} \Delta T_{ln} \text{ (W)}$	28,7	37,7	46,8	52,2	55,8
Isı Transferi (Edwards)	$Q_{the} = h_{the} A_{s,in} \Delta T_{ln} \text{ (W)}$	34,2	38,7	45,2	48,6	50,8
Isı Transferi (Tam Gelişmiş)	$Q_{the} = h_{the} A_{s,in} \Delta T_{ln} \text{ (W)}$	30,7	32,0	34,9	35,4	35,1
Sürtünme Faktörü Değerleri						
Sürtünme Faktörü (Darcy) ($Re < 2300$)	$f_{the} = 64/Re$	0,103	0,051	0,033	0,025	0,020
Sürtünme Faktörü (Haaland) ($Re > 4000$)	$f_{the} = (1/(-1.8 \log(6.9/Re + (e/D_{in}/3.7)^{1.11})))^2$	0,097	0,080	0,073	0,070	0,068
Sürtünme Faktörü (Blasius) ($4000 < Re \leq 100000$)	$f_{the} = 0.3164 Re^{-0.25}$	0,063	0,053	0,048	0,044	0,042
Sürtünme Faktörü (Colebrook-White) $4000 < Re < 10^8$ ve $0 < e/D < 0.05$		0,092	0,078	0,072	0,069	0,067
Sürtünme Faktörü (Ghajar 2010, 413)	f_{ref}					
Re (Ghajar 2010 için)	Re_{ref}					
Sürtünme Basınç Kayıpları						
Sürtünme Basınç Kaybı (Poiseuille)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / D_{in} V^{2/2}) / 10^5 \text{ (bar)}$	0,58	1,15	1,68	2,23	2,79
Sürtünme Basınç Kaybı (Haaland)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / D_{in} V^{2/2}) / 10^5 \text{ (bar)}$	0,54	1,78	3,69	6,26	9,51
Sürtünme Basınç Kaybı (Blasius)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / D_{in} V^{2/2}) / 10^5 \text{ (bar)}$	0,35	1,19	2,41	3,97	5,88
Sürtünme Basınç Kaybı (Colebrook-White)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / D_{in} V^{2/2}) / 10^5 \text{ (bar)}$	0,51	1,74	3,63	6,19	9,43

EK E PEEK500 Deneysel Ölçüm ve Hesaplama Tablosu

PEEK500					
Hacimsel Debi	$\dot{v}$ (mL/min)	10	20	30	40
Giriş Sıcaklığı	T_{in} (°C)	30,5	30,5	30,2	30,9
Çıkış Sıcaklığı	T_{out} (°C)	16,3	19,3	19,7	21,1
Yüzey Giriş Sıcaklığı	$T_{s,in}$ (°C)	10,3	10,2	10,2	10,3
Yüzey Çıkış Sıcaklığı	$T_{s,out}$ (°C)	9,7	9,8	9,7	9,9
DENEYSEL SONUÇLAR					
Isı Transferi	$Q_{exp} = mC_p(T_{out} - T_{in})$ (W)	9,9	15,6	22,0	27,2
Isı Taşıma Katsayısı	$h_{exp,in} = Q_{exp}/A(s,in)\Delta T_{in}$ (W/m ² K)	2540	3450	4772	5531
Nusselt Sayısı	$Nu_{exp,in} = h_{exp,in}D_{in}/k$	2,13	2,89	3,99	4,62
Sürtünme Basıncı Kaybı	$\Delta P_{f,exp}$ (Pa)	17000	45000	75000	107000
Sürtünme Basıncı Kaybı	$\Delta P_{f,exp}$ (bar)	0,17	0,45	0,75	1,07
Sürtünme Faktörü	$f_{exp} = \Delta P_{f,exp} [(L/D_{in})\rho V^2/2]$	0,128	0,085	0,063	0,050
MIKRO/MİNİ KANAL ÖZELLİKLERİ					
Mikrokanal İç Çapı	D_{in} (μm)	508	508	508	508
Mikrokanal İç Çapı	D_{in} (m)	0,000508	0,000508	0,000508	0,000508
Mikrokanal Uzunluğu	L (cm)	20	20	20	20
Mikrokanal Uzunluğu	L (m)	0,2	0,2	0,2	0,2
Mikrokanal İç Kesit Alanı	$A_{cs,in} = \pi D_{in}^2/4$ (m ²)	2,02683E-07	2,027E-07	2,027E-07	2,027E-07
Mikrokanal İç Yüzey Alanı	$A_{s,in} = \pi D_{in}L$ (m ²)	0,000319	0,000319	0,000319	0,000319
Hacimsel Debi	$\dot{v}$ (m ³ /s)	1,667E-07	3,333E-07	5,000E-07	6,667E-07
Kütleli Debi	$\dot{m} = \rho \dot{v}$ (kg/s)	1,662E-04	3,322E-04	4,984E-04	6,643E-04
Mikrokanaldaki Ortalama Hız	$V = \dot{v}/A_{cs,in}$ (m/s)	0,822	1,645	2,467	3,289
Mikrokanal Pürüzlülük Değeri	$\epsilon_{SS}(200,400-100,500,750,1000) = 50-25$ (μm), $\epsilon_{PEEK-Tümü} = 12,5$ (μm), $\epsilon_{PEEKsil-Tümü} = 5$ (μm)	12,5	12,5	12,5	12,5
Lam. Hidro Giriş Uzunluğu	$L_{h,laminar} = 0,05 Re D_{in}$ (cm)	1,15	2,37	3,56	4,86
Lam. Hidro Gelişme Durumu	$L_{h,laminar}/L \leq \%50$ ise Hidro. Gelişmiş	H. Gelişmiş	H. Gelişmiş	H. Gelişmiş	H. Gelişmiş
Lam. Isıl Giriş Uzunluğu	$L_{t,laminar} = 0,05 Re Pr D_{in}$ (cm)	7,32	14,58	21,87	29,06
Türb. Hidro—Isıl Giriş Uzunluğu	$L_{t,turbulent} = L_{t,turbulent} = 10 D_{in}$ (cm)	0,51	0,51	0,51	0,51
Türb. Hidro—Isıl G. D.	$L_{turb}/L \leq \%50$ ise Hidro-Isıl Gelişmiş	H-I Gelişmiş	H-I Gelişmiş	H-I Gelişmiş	H-I Gelişmiş
DEİYONİZE SU ÖZELLİKLERİ					
Giriş Sıcaklığı	T_{in} (K)	303,5	303,5	303,2	303,9
Çıkış Sıcaklığı	T_{out} (K)	289,3	292,3	292,7	294,1
Ortalama Akışkan Sıcaklığı	$T = (T_{in} + T_{out})/2$ (K)	296,4	297,9	297,9	299,0
Yüzey Giriş Sıcaklığı	$T_{s,in}$ (K)	283,3	283,2	283,2	283,3
Yüzey Çıkış Sıcaklığı	$T_{s,out}$ (K)	282,7	282,8	282,7	282,9
Ortalama Yüzey Sıcaklığı	$T_s = (T_{s,in} + T_{s,out})/2$ (K)	283,0	283,0	282,9	283,1
Girişteki Sıcaklık Farkı	$\Delta T_{in} = T_{in} - T_{s,in}$ (K)	20,3	20,3	20,0	20,5
Çıkıştaki Sıcaklık Farkı	$\Delta T_{out} = T_{out} - T_{s,out}$ (K)	6,6	9,5	10,0	11,2
Logaritmik Ortalama Sıcaklık Farkı	$\Delta T_{lm} = (\Delta T_{in} - \Delta T_{out}) / \ln(\Delta T_{in}/\Delta T_{out})$ (K)	12,2	14,2	14,4	15,4
Ort. Yoğunluk	ρ (kg/m ³)	997	997	997	996
Ort. Özgül Isı	C_p (J/kgK)	4186	4185	4185	4184
Ort. Isıl İletkenlik	k (W/mK)	0,605	0,607	0,607	0,609
Ort. Sıcaklıkta	μ_b (mPas)	0,9222	0,8921	0,8910	0,8704
Dinamik Viskozite	μ_b (Pas)	9,222E-04	8,921E-04	8,910E-04	8,704E-04
Ort. Yüzey Sıcaklığında	μ_s (mPas)	1,3082	1,3078	1,3104	1,3036
Dinamik Viskozite	μ_s (Pas)	1,308E-03	1,308E-03	1,310E-03	1,304E-03
Ortalama Kinematik Viskozite	$\nu = \mu_b/\rho$ (m ² /s)	9,24896E-07	8,95E-07	8,939E-07	8,735E-07
Ortalama Isıl Difüzyon	$\alpha = k/\rho C_p$ (m ² /s)	1,44875E-07	1,455E-07	1,456E-07	1,46E-07
BOYUTSUZ SAYILAR					
Prandtl Sayısı	$Pr = \nu/\alpha$	6,384	6,150	6,141	5,982
Reynolds Sayısı	$Re = VD_{in}/\nu$	452	933	1402	1913
Kritik Re Sayısı (Heat 5th Pg.517)**	Re_{crit}				
Akış Türü	$Re \leq Re_{crit}$ ise Laminer				
Peclet Sayısı	$Pe = Re Pr$	2883	5741	8610	11443
Graetz Sayısı	$Gz = Re Pr D_{in}/L$	7,324	14,581	21,869	29,065
Graetz Sayısı Ters	$Gz - 1$	0,137	0,069	0,046	0,034
Poiseuille Sayısı (Tam Gelişmiş)	$Pe_{th} = f_{th} Re$	64	64	64	64
Poiseuille Sayısı (DeneySEL)	$Pe_{exp} = f_{exp} Re$				
Viskozite Oranı (Sıcaklık etkisi için)	$\nu_r = \mu_b/\mu_s$	0,705	0,682	0,680	0,668
Malzeme Bağlı Pürüzlülük	ϵ/D_{in}	0,025	0,025	0,025	0,025
Boy Çap Oranı (Giriş etkisi)	$L/(D_{in} Re)$	0,872	0,422	0,281	0,206

EK E PEEK500 Deneysel Ölçüm ve Hesaplama Tablosu (devam ediyor)

ISI TRANSFERİ HESAPLARI BASINÇ KAYBI DEĞERLERİ					
Nusselt Sayıları					
Nusselt Sayısı (Sieder—Tate) ($0.6 \leq Pr \leq 5$) ($0.0044 \leq \mu_b/\mu_s \leq 9.75$) ($Re < 2300$) (Hidro ve Isıl gelişen)	$Nu_{the} = 1.86 Gz^{1/3} (\mu_b/\mu_s)^{0.14}$	3,440	4,307	4,928	5,404
Nusselt Sayısı (Edwards) ($Re < 2300$) (Hidro gelişmiş, Isıl gelişen) ($Pr \geq 5$) ise (Hidro ve Isıl gelişen)	$Nu_{the} = 3.66 + 0.065 Gz / (1 + 0.04 Gz^{2/3})$	4,074	4,425	4,743	5,031
Nusselt Sayısı (Tam Gelişmiş) ($Re < 2300$) (Hidro ve Isıl gelişmiş)	$Nu_{the} = 3.66$	3,66	3,66	3,66	3,66
Isı Taşınım Katsayıları					
Isı Taşınım Katsayısı (Sieder—Tate)	$h_{the} = Nu_{the} k / D \text{ (W/m}^2\text{K)}$	6516	8192	9374	10309
Isı Taşınım Katsayısı (Edwards)	$h_{the} = Nu_{the} k / D \text{ (W/m}^2\text{K)}$	7717	8416	9022	9597
Isı Taşınım Katsayısı (Tam Gelişmiş)	$h_{the} = Nu_{the} k / D \text{ (W/m}^2\text{K)}$	6933	6961	6962	6982
Isı Transferi Değerleri					
Isı Transferi (Sieder—Tate)	$Q_{the} = h_{the} A_s \ln \Delta T \text{ (W)}$	25,4	37,1	43,1	50,6
Isı Transferi (Edwards)	$Q_{the} = h_{the} A_s \ln \Delta T \text{ (W)}$	30,0	38,1	41,5	47,1
Isı Transferi (Tam Gelişmiş)	$Q_{the} = h_{the} A_s \ln \Delta T \text{ (W)}$	27,0	31,5	32,0	34,3
Sürtünme Faktörü Değerleri					
Sürtünme Faktörü (Darcy) ($Re < 2300$)	$f_{the} = 64/Re$	0,142	0,069	0,046	0,033
Sürtünme Faktörü (Haaland) ($Re > 4000$)	$f_{the} = (1/(-1.8 \log(6.9/Re + (\epsilon/D)^{1.11})))^2$	0,104	0,081	0,073	0,068
Sürtünme Faktörü (Blasius) ($4000 < Re \leq 100000$)	$f_{the} = 0.3164 Re^{-0.25}$	0,069	0,057	0,052	0,048
Sürtünme Faktörü (Colebrook-White) $4000 < Re < 10^8$ ve $0 < \epsilon/D < 0.05$		0,096	0,078	0,071	0,067
Sürtünme Faktörü (Ghajar 2010, 413)	f_{ref}				
Re (Ghajar 2010 için)	Re_{ref}				
Sürtünme Basınç Kayıpları					
Sürtünme Basınç Kaybı (Poiseuille)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / D) \rho V^2 / 2 \times 10^{-5} \text{ (bar)}$	0,19	0,36	0,55	0,71
Sürtünme Basınç Kaybı (Haaland)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / D) \rho V^2 / 2 \times 10^{-5} \text{ (bar)}$	0,14	0,43	0,87	1,45
Sürtünme Basınç Kaybı (Blasius)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / D) \rho V^2 / 2 \times 10^{-5} \text{ (bar)}$	0,09	0,30	0,62	1,02
Sürtünme Basınç Kaybı (Colebrook-White)	$\Delta P_{f,the} = (f_{the} L / D) \rho V^2 / 2 \times 10^{-5} \text{ (bar)}$	0,13	0,41	0,85	1,42

EK F PEEK750 Deneysel Ölçüm ve Hesaplama Tablosu

PEEK750						
Hacimsel Debi	ϕ (mL/min)	10	20	30	40	50
Giriş Sıcaklığı	T_{in} (°C)	30,0	30,3	30,3	30,8	30,8
Çıkış Sıcaklığı	T_{out} (°C)	18,2	19,9	21,0	21,6	21,6
Yüzey Giriş Sıcaklığı	$T_{s,in}$ (°C)	10,2	10,3	10,3	10,2	10,2
Yüzey Çıkış Sıcaklığı	$T_{s,out}$ (°C)	10,0	9,9	9,9	9,9	9,8
DENEYSEL SONUÇLAR						
Isı Transferi	$Q_{exp}=mC_p(T_{out}-T_{in})$ (W)	8,2	14,4	19,4	25,4	32,1
Isı Taşınım Katsayısı	$h_{exp,in}=Q_{exp}/A(s,in)\Delta T_{in}$ (W/m ² K)	1298	2087	2683	3384	4251
Nusselt Sayısı	$Nu_{exp,in}=h_{exp,in}D_{in}/k$	1,63	2,62	3,36	4,23	5,32
Sürtünme Basıncı Kaybı	$\Delta P_{f,exp}$ (Pa)	5000	10000	15000	20000	27000
Sürtünme Basıncı Kaybı	$\Delta P_{f,exp}$ (bar)	0,05	0,10	0,15	0,20	0,27
Sürtünme Faktörü	$f_{exp}=\Delta P_{f,exp}/[(L/D_{in})\rho V^2/2]$	0,286	0,143	0,095	0,072	0,062
MİKRO/MİNİ KANAL ÖZELLİKLERİ						
Mikrokanal İç Çapı	D_{in} (μm)	762	762	762	762	762
Mikrokanal İç Çapı	D_{in} (m)	0,000762	0,000762	0,000762	0,000762	0,000762
Mikrokanal Uzunluğu	L (cm)	20	20	20	20	20
Mikrokanal Uzunluğu	L (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Mikrokanal İç Kesit Alanı	$A_{cs,in}=\pi D_{in}^2/4$ (m ²)	4,56036E-07	4,56E-07	4,56E-07	4,56E-07	4,56E-07
Mikrokanal İç Yüzey Alanı	$A_{s,in}=\pi D_{in}L$ (m ²)	0,000479	0,000479	0,000479	0,000479	0,000479
Hacimsel Debi	ϕ (m ³ /s)	1,667E-07	3,333E-07	5,000E-07	6,667E-07	8,333E-07
Kütleli Debi	$m=\rho\phi$ (kg/s)	1,662E-04	3,322E-04	4,983E-04	6,643E-04	8,303E-04
Mikrokanaldaki Ortalama Hız	$V=\phi/A_{cs,in}$ (m/s)	0,365	0,731	1,096	1,462	1,827
Mikrokanal Pürüzlülük Değeri	$\epsilon_{SS}(200,400-100,500,750,1000)=50-25$ (μm), $\epsilon_{PEEK-Tümü}=12,5$ (μm), $\epsilon_{PEEKsil-Tümü}=5$ (μm)	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Lam. Hidro Giriş Uzunluğu	$L_{h,laminar}=0,05ReD_{in}$ (cm)	1,17	2,38	3,62	4,88	6,10
Lam. Hidro Gelişme Durumu	$L_{h,laminar}/L \leq 50$ ise Hidro. Gelişmiş	H. Gelişmiş	H. Gelişmiş	H. Gelişmiş	H. Gelişmiş	H. Gelişmiş
Lam. Isıl Giriş Uzunluğu	$L_{t,laminar}=0,05RePrD_{in}$ (cm)	7,31	14,57	21,82	29,04	36,31
Türb. Hidro—Isıl Giriş Uzunluğu	$L_{t,turbulent}=L_{t,turbulent}=10D_{in}$ (cm)	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
Türb. Hidro—Isıl G. D.	$L_{turb}/L \leq 50$ ise Hidro-Isıl Gelişmiş	H-I Gelişmiş	H-I Gelişmiş	H-I Gelişmiş	H-I Gelişmiş	H-I Gelişmiş
DEİYONİZE SU ÖZELLİKLERİ						
Giriş Sıcaklığı	T_{in} (K)	303,0	303,3	303,3	303,8	303,8
Çıkış Sıcaklığı	T_{out} (K)	291,2	292,9	294,0	294,6	294,6
Ortalama Akışkan Sıcaklığı	$T=(T_{in}+T_{out})/2$ (K)	297,1	298,1	298,6	299,2	299,2
Yüzey Giriş Sıcaklığı	$T_{s,in}$ (K)	283,2	283,3	283,3	283,2	283,2
Yüzey Çıkış Sıcaklığı	$T_{s,out}$ (K)	283,0	282,9	282,9	282,9	282,8
Ortalama Yüzey Sıcaklığı	$T_s=(T_{s,in}+T_{s,out})/2$ (K)	283,1	283,1	283,1	283,1	283,0
Girişteki Sıcaklık Farkı	$\Delta T_{in}=T_{in}-T_{s,in}$ (K)	19,8	20,0	20,0	20,5	20,6
Çıkıştaki Sıcaklık Farkı	$\Delta T_{out}=T_{out}-T_{s,out}$ (K)	8,2	10,0	11,1	11,7	11,8
Logaritmik Ortalama Sıcaklık Farkı	$\Delta T_{lm}=(\Delta T_{in}-\Delta T_{out})/\ln(\Delta T_{in}/\Delta T_{out})$ (K)	13,2	14,4	15,1	15,7	15,8
Ort. Yoğunluk	ρ (kg/m ³)	997	997	997	996	996
Ort. Özgül Isı	C_p (J/kgK)	4185	4185	4185	4184	4184
Ort. Isıl İletkenlik	k (W/mK)	0,606	0,607	0,608	0,609	0,609
Ort.Sıcaklıkta Dinamik Viskozite	μ_b (mPas)	0,9073	0,8880	0,8771	0,8659	0,8659
	μ_b (Pas)	9,073E-04	8,880E-04	8,771E-04	8,659E-04	8,659E-04
Ort. Yüzey Sıcaklığında Dinamik Viskozite	μ_s (mPas)	1,3034	1,3038	1,3046	1,3046	1,3066
	μ_s (Pas)	1,303E-03	1,304E-03	1,305E-03	1,305E-03	1,307E-03
Ortalama Kinematik Viskozite	$\nu=\mu_b/\rho$ (m ² /s)	9,10115E-07	8,909E-07	8,802E-07	8,691E-07	8,691E-07
Ortalama Isıl Difüzyon	$\alpha=k/\rho C_p$ (m ² /s)	1,45196E-07	1,456E-07	1,459E-07	1,461E-07	1,461E-07
BOYUTSUZ SAYILAR						
Prandtl Sayısı	$Pr=\nu/\alpha$	6,268	6,118	6,034	5,947	5,947
Reynolds Sayısı	$Re=VD_{in}/\nu$	306	625	949	1282	1602
Kritik Re Sayısı (Heat 5th Pg.517)**	$Recr$					
Akış Türü	$Re < Recr$ ise Laminer					
Peclet Sayısı	$Pe=RePr$	1918	3825	5727	7623	9529
Graetz Sayısı	$Gz=RePrD_{in}/L$	7,308	14,572	21,822	29,044	36,305
Graetz Sayısı Ters	$Gz-1$	0,137	0,069	0,046	0,034	0,028
Poiseuille Sayısı (Tam Gelişmiş)	$Po_{the}=f_{the}Re$	64	64	64	64	64
Poiseuille Sayısı (Deneysel)	$Po_{exp}=f_{exp}Re$					
Viskozite Oranı (Sıcaklık etkisi için)	$\nu_r=\mu_b/\mu_s$	0,696	0,681	0,672	0,664	0,663
Malzeme Bağlı Pürüzlülük	ϵ/D_{in}	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
Boy Çap Oranı (Giriş etkisi)	$L/(D_{in}Re)$	0,858	0,420	0,277	0,205	0,164

EK F PEEK750 Deneysel Ölçüm ve Hesaplama Tablosu (devam ediyor)

ISI TRANSFERİ HESAPLARI BASINÇ KAYBI DEĞERLERİ						
Nusselt Sayıları						
Nusselt Sayısı (Sieder—Tate) ($0.6 \leq Pr \leq 5$) ($0.0044 \leq \mu_b/\mu_s \leq 9.75$) ($Re < 2300$) (Hidro ve Isıl gelişen)	$Nuthe = 1.86 Gz^{1/3} (\mu_b/\mu_s)^{0.14}$	3,431	4,305	4,917	5,399	5,814
Nusselt Sayısı (Edwards) ($Re < 2300$) (Hidro gelişmiş, Isıl gelişen) ($Pr \geq 5$) ise (Hidro ve Isıl gelişen)	$Nuthe = 3.66 + 0.065 Gz / (1 + 0.04 Gz^{2/3})$	4,073	4,425	4,741	5,030	5,300
Nusselt Sayısı (Tam Gelişmiş) ($Re < 2300$) (Hidro ve Isıl gelişmiş)	$Nuthe = 3.66$	3,66	3,66	3,66	3,66	3,66
Isı Taşınım Katsayıları						
Isı Taşınım Katsayısı (Sieder—Tate)	$hthe = Nuthe k / Din$ (W/m ² K)	4341	5462	6247	6870	7398
Isı Taşınım Katsayısı (Edwards)	$hthe = Nuthe k / Din$ (W/m ² K)	5154	5613	6023	6401	6745
Isı Taşınım Katsayısı (Tam Gelişmiş)	$hthe = Nuthe k / Din$ (W/m ² K)	4631	4643	4650	4657	4657
Isı Transferi Değerleri						
Isı Transferi (Sieder—Tate)	$Qthe = hthe A_s \ln \Delta T_{ln}$ (W)	27,4	37,7	45,1	51,6	55,8
Isı Transferi (Edwards)	$Qthe = hthe A_s \ln \Delta T_{ln}$ (W)	32,5	38,7	43,5	48,1	50,9
Isı Transferi (Tam Gelişmiş)	$Qthe = hthe A_s \ln \Delta T_{ln}$ (W)	29,2	32,0	33,6	35,0	35,1
Sürtünme Faktörü Değerleri						
Sürtünme Faktörü (Darcy) ($Re < 2300$)	$fi_{the} = 64 / Re$	0,209	0,102	0,067	0,050	0,040
Sürtünme Faktörü (Haaland) ($Re > 4000$)	$fi_{the} = (1 / (-1.8 \log(6.9 / Re + (e / Din)^{1.11})))^2$	0,120	0,088	0,076	0,070	0,065
Sürtünme Faktörü (Blasius) ($4000 < Re \leq 100000$)	$fi_{the} = 0.3164 Re^{-0.25}$	0,076	0,063	0,057	0,053	0,050
Sürtünme Faktörü (Colebrook-White) $4000 < Re < 10^8$ ve $0 < e/D < 0.05$		0,107	0,083	0,073	0,068	0,064
Sürtünme Faktörü (Ghajar 2010, 413)	f_{ref}					
Re (Ghajar 2010 için)	Re_{ref}					
Sürtünme Basınç Kayıpları						
Sürtünme Basınç Kaybı (Poiseuille)	$\Delta P_{f,the} = (fi_{the} L / Din) V^{2/2} / 10^5$ (bar)	0,04	0,07	0,11	0,14	0,17
Sürtünme Basınç Kaybı (Haaland)	$\Delta P_{f,the} = (fi_{the} L / Din) V^{2/2} / 10^5$ (bar)	0,02	0,06	0,12	0,19	0,29
Sürtünme Basınç Kaybı (Blasius)	$\Delta P_{f,the} = (fi_{the} L / Din) V^{2/2} / 10^5$ (bar)	0,01	0,04	0,09	0,15	0,22
Sürtünme Basınç Kaybı (Colebrook-White)	$\Delta P_{f,the} = (fi_{the} L / Din) V^{2/2} / 10^5$ (bar)	0,02	0,06	0,12	0,19	0,28

EK G HAD Metot Laminer Akış Analiz ve Hesaplama Tablosu

LAMİNER ANALİZ															
	Kütleli Debi	T _{giriş}	T _{hıkış}	ΔP	ΔP	Isı Taşıma Katsayısı H	T _{hıkış} CFD sonuç	T _{hıkış} CFD sonuç	Isı Akısı q	V _{ort}	Re	Nu	Q	Fs	F _{s,eff}
	kg s ⁻¹	K	K	Pa	Bar	W m ⁻² K ⁻¹	K	C°	W m ⁻²	m/s			W		
SS400	1.650E-04	303,5	289,0	66407	0,66	1314	284,6	11,6	52815	1,46	570	0,83	12,62	0,118	0,030
	3.307E-04	303,1	290,6	135790	1,36	4092	287,2	14,2	82258	2,92	1169	2,59	19,66	0,061	0,015
	4.958E-04	303,5	292,2	207507	2,08	2582	289,1	16,1	103815	4,38	1800	1,63	24,81	0,041	0,090
	6.608E-04	303,2	292,3	281889	2,82	2939	290,2	17,2	118130	5,84	2425	1,85	28,23	0,032	0,121
	8.257E-04	303,8	292,2	358864	3,59	3368	291,3	18,3	135407	7,30	3088	2,12	32,36	0,026	0,152
SS500	1.660E-04	303,8	287,6	21099	0,21	1964	284,6	11,6	40320	0,82	429	1,66	12,86	0,158	0,039
	3.320E-04	303,5	288,1	43060	0,43	3049	287,4	14,4	62591	1,65	883	2,57	19,97	0,081	0,079
	4.990E-04	302,8	289,7	66054	0,66	3667	288,9	15,9	75283	2,48	1337	3,09	24,02	0,055	0,119
	6.650E-04	303,0	290,5	89744	0,90	4272	290,1	17,1	87707	3,30	1811	3,59	27,98	0,042	0,160
	8.310E-04	302,8	291,4	114197	1,14	4707	290,9	17,9	96626	4,13	2281	3,95	30,82	0,034	0,202
SS750	1.662E-04	307,6	284,9	4183	0,04	1295	284,9	11,9	31809	0,37	300	1,63	15,24	0,229	0,059
	3.324E-04	303,4	287,5	8538	0,09	1691	287,3	14,3	41544	0,73	587	2,14	19,90	0,129	0,118
	4.985E-04	304,0	289,3	13061	0,13	2163	289,3	16,3	53140	1,10	908	2,72	25,45	0,083	0,179
	6.647E-04	303,2	290,5	17755	0,18	2402	290,2	17,2	59013	1,47	1212	3,02	28,27	0,064	0,240
	8.306E-04	303,6	291,9	22609	0,23	2718	291,2	18,2	66776	1,83	1539	3,42	31,99	0,053	0,303
PEEK400	1.661E-04	303,2	292,1	66858	0,67	2589	284,6	11,6	52304	1,47	568	1,64	12,50	0,120	0,294
	3.322E-04	303,2	292,8	136375	1,36	4069	287,3	14,3	82196	2,94	1171	2,57	19,64	0,061	0,059
	4.982E-04	303,6	294,5	208568	2,09	5165	289,1	16,1	104326	4,40	1802	3,26	24,93	0,042	0,089
	6.642E-04	303,7	295,0	283446	2,83	5996	290,4	17,4	121112	5,87	2442	3,77	28,95	0,032	0,120
	8.303E-04	303,5	294,9	361046	3,61	6609	291,2	18,2	133492	7,34	3073	4,15	31,90	0,026	0,151
PEEK500	1.662E-04	303,5	289,3	21060	0,21	1944	284,6	11,6	39910	0,83	427	1,64	12,73	0,158	0,040
	3.322E-04	303,5	292,2	43106	0,43	3048	287,4	14,4	62570	1,65	883	2,57	19,96	0,081	0,078
	4.984E-04	303,2	292,7	65969	0,66	3739	289,0	16,0	76757	2,48	1345	3,14	24,49	0,055	0,119
	6.643E-04	303,9	294,1	89641	0,90	4451	290,4	17,4	91386	3,30	1836	3,73	29,15	0,042	0,159
	1.662E-04	303,0	291,2	4183	0,04	1053	284,6	11,6	25876	0,37	283	1,34	12,39	0,229	0,058
PEEK750	3.322E-04	303,3	292,9	8533	0,09	1678	287,3	14,3	41224	0,73	586	2,12	19,75	0,129	0,118
	4.983E-04	303,3	294,0	13055	0,13	2089	289,1	16,1	51333	1,10	898	2,63	24,59	0,083	0,179
	6.643E-04	303,8	294,6	17744	0,18	2469	290,4	17,4	60663	1,47	1223	3,11	29,06	0,064	0,240
	8.303E-04	303,8	294,6	22601	0,23	2749	291,3	18,3	67549	1,83	1545	3,45	32,36	0,053	0,303

EK H HAD Metot Türbülanslı Akış Analiz ve Hesaplama Tablosu

TURBULANSLI ANALİZ														
Kütleli Debi	T _{giriş}	T _{hıkış}	ΔP	ΔP	Isı Taşınım Katsayısı H	T _{hıkış} CFD sonuç	T _{hıkış} CFD sonuç	Isı Akısı q	V _{ort}	Re	Nu	Q	Fs	Fs _{edf}
kg s ⁻¹	K	K	Pa	Bar	W m ⁻² K ⁻¹	K	C°	W m ⁻²	m/s			W		
1.650E-04	303,5	289,0	47328	0,47	1405	283,8	10,8	56486	1,46	564	0,89	13,50	0,084	0,0210
3.307E-04	303,1	290,6	489744	4,90	2909	283,0	10,0	116923	2,92	1113	1,85	27,94	0,219	0,1100
4.958E-04	303,5	292,2	1051261	10,51	4474	283,0	10,0	179856	4,38	1677	2,84	42,99	0,209	0,2330
6.608E-04	303,2	292,3	1766837	17,67	5921	283,0	10,0	238036	5,84	2231	3,77	56,89	0,197	0,3875
8.257E-04	303,8	292,2	2564729	25,65	7681	283,1	10,1	308772	7,31	2806	4,88	73,80	0,183	0,5780
1.660E-04	303,8	287,6	13976	0,14	1936	284,9	11,9	40278	0,82	431	1,64	12,85	0,105	0,0299
3.320E-04	303,5	288,1	59517	0,60	4288	283,0	10,0	89192	1,65	839	3,63	28,45	0,113	0,1138
4.990E-04	302,8	289,7	142562	1,43	6231	283,0	10,0	129595	2,47	1248	5,29	41,34	0,120	0,2336
6.650E-04	303,0	290,5	241646	2,42	8406	283,0	10,0	174852	3,30	1668	7,13	55,78	0,114	0,3974
8.310E-04	302,8	291,4	699170	6,99	10855	283,0	10,0	214939	4,14	2081	9,21	68,57	0,210	0,0233
1.650E-04	307,6	284,9	5664	0,06	1273	285,2	12,2	31278	0,37	301	1,60	14,98	0,343	0,0474
3.307E-04	303,4	287,5	9434	0,09	2269	284,0	11,0	55749	0,73	565	2,88	26,70	0,129	0,1096
4.958E-04	304,0	289,3	18627	0,19	3572	283,8	10,8	87755	1,10	851	4,53	42,03	0,121	0,2428
6.608E-04	303,2	290,5	28867	0,29	4602	283,7	10,7	113071	1,47	1123	5,85	54,16	0,104	0,3800
8.257E-04	303,6	291,9	41633	0,42	5907	283,6	10,6	145126	1,84	1408	7,50	69,52	0,096	0,5509
1.661E-04	303,2	292,1	49356	0,49	2910	283,0	10,0	58673	2,94	557	1,85	14,02	0,088	0,0177
3.322E-04	303,2	292,8	163954	1,64	5570	283,8	10,8	112298	4,40	1124	3,54	26,84	0,073	0,0447
4.982E-04	303,6	294,5	537042	5,37	8893	283,1	10,1	179273	5,87	1679	5,65	42,85	0,107	0,0710
6.642E-04	303,7	295,0	993150	9,93	11954	283,2	10,2	240996	7,34	2245	7,60	57,60	0,111	0,1025
8.303E-04	303,5	294,9	1515331	15,15	14900	283,1	10,1	300382	1,47	2795	9,47	71,79	0,108	0,0105
1.662E-04	303,5	289,3	12571	0,13	1946	284,6	11,6	39944	0,82	427	1,65	12,74	0,098	0,0373
3.322E-04	303,5	292,2	183839	1,84	4350	283,3	10,3	89296	1,67	841	3,69	28,49	0,346	0,1186
4.984E-04	303,2	292,7	108535	1,09	6318	283,4	10,4	129700	2,48	1259	5,35	41,37	0,091	0,2030
6.643E-04	303,9	294,1	174220	1,74	8671	283,5	10,5	178019	3,30	1693	7,34	56,79	0,082	0,3131
1.662E-04	303,0	291,2	3405	0,03	1313	284,5	11,5	26251	0,37	283	1,67	12,57	0,172	0,0632
3.322E-04	303,3	292,9	10221	0,10	2710	284,3	11,3	54207	0,73	566	3,44	25,97	0,143	0,1268
4.983E-04	303,3	294,0	18277	0,18	4112	284,3	11,3	82249	1,10	849	5,22	39,40	0,114	0,2557
6.643E-04	303,8	294,6	27305	0,27	5510	284,7	11,7	110196	1,47	1144	6,99	52,78	0,096	0,3828
8.303E-04	303,8	294,6	38135	0,38	6831	284,9	11,9	136624	1,83	1434	8,66	65,44	0,087	0,5295

ÖZGEÇMİŞ

Yalçın CESUR, 2015 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2016 yılında vatani görevini Hava Kuvvetleri Komutanlığı emrinde mühendis yedek subay olarak yerine getirdi. 2017 yılında Kocaeli ve İstanbul şehirlerinde endüstrinin çeşitli alanlarında makine mühendisi olarak görev yaptı. 2019 yılında Millî Savunma Bakanlığı'nda makine mühendisi olarak görev yapmaya başladı. Halihazırda Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Teknik Başkanlığı/Gemi İnşa Daire Başkanlığı'nda Bakanlık/Silahlı Kuvvetler Uzman Yardımcısı olarak görev yapmaktadır. Evli ve bir kız bir erkek evlat sahibidir.

