T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM KÖPÜĞÜN ISI DEĞİŞTİRİCİSİ OLARAK TASARIMI VE ISI TRANSFERİ MODELİ

Ahmet Ali SERTKAYA

DOKTORA TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Konya, 2008

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM KÖPÜĞÜN ISI DEĞİŞTİRİCİSİ OLARAK TASARIMI VE ISI TRANSFERİ MODELİ

Ahmet Ali SERTKAYA

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 15.05.2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Kemal ALTINIŞIK
(Danışman)

Prof. Dr. Şefik BİLİR
(Üye)

Prof. Dr. Süleyman YALDIZ
(Üye)

Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM
(Üye)

Yrd. Doç. Dr. Ali ATEŞ
(Üye)

ÖZET

Doktora Tezi

ALÜMİNYUM KÖPÜĞÜN ISI DEĞİŞTİRİCİSİ OLARAK TASARIMI VE ISI TRANSFERİ MODELİ

Ahmet Ali SERTKAYA

Selçuk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman:Prof. Dr. Kemal ALTINIŞIK
2008. 138 Sayfa

Jüri: : : Prof. Dr. Kemal ALTINIŞIK
Prof. Dr. Şefik BİLİR
Prof. Dr. Süleyman YALDIZ
Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM
Yrd. Doç. Dr. Ali ATEŞ

Bu çalışmada, geniş bir kullanım alanı bulunan açık hücreli Alüminyum köpüğün ısı değiştiricisi olarak kullanımı amaçlandı. Çalışma teorik ve deneysel olarak gerçekleştirildi. Alüminyum köpük ısı değiştiricisinin ısı transfer modeli için üç boyutlu matematik model kuruldu. Üç boyutlu olarak elde edilen diferansiyel denklemin çözümü için sınır şartları yazıldı. Denklem ayrıklaştırılarak bilgisayar çözümü için kompakt form haline getirildi. **Turbo Pascal 7.0** programı kullanılarak **Gauss – Seidel İterasyon Yöntemi** ile diferansiyel denklem çözüldü. θ-X, θ-Y ve θ-Z'in porozite ve birim hacimdeki yüzey alanına göre değişimlerinin grafikleri elde edildi.

Deneysel çalışmada 200x200x100mm boyutlarında üç geçişli, her geçişte 6 boru bulunan ve saptırmalı olarak dizilen üç ayrı ısı değiştiricisi dizayn edildi.

PPI 10, 20 ve 30 özelliklerine sahip ısı değiştiricilerin ısıl etkenliklerini karşılaştırmak için, toplam 500'ün üzerinde deney yapıldı, hesaplamalarda sadece 252'si dikkate alındı.

Deney sonuçları **SPSS 11 İstatistik Paket Programı** yardımıyla Reynold sayısının $\mathbf{5.10^3<Re<9.10^4}$ aralıklarında ısı transfer katsayısı ve sürtünme faktörü için birer ampirik bağıntı geliştirildi.

Anahtar Sözcükler: Metal köpük, açık hücreli alüminyum köpük, matematiksel model

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

THE PRODUCTION OF ALUMINIUM FOAM AS HEAT EXCHANGER & HEAT TRANSFER MODELLING

Ahmet Ali SERTKAYA

Selcuk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineerng
Supervisor:Prof. Dr. Kemal ALTINIŞIK
2008. 138 Page

Jury: Prof. Dr. Kemal ALTINIŞIK
Prof. Dr. Şefik BİLİR
Prof. Dr. Süleyman YALDIZ
Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM
Yrd. Doç. Dr. Ali ATEŞ

The aim of this study is to use the open cell aluminium foam as heat exchanger. The study has been achieved as theoritical and experimental. There are a wide application of Aluminium metal foam. Three dimensionals heat transfer model of the Aluminium metal foam heat exchanger have been done, and the boundary conditions of the differential equation obtained as three dimensional have been written. The differential equation has been discreted and written in compact form for computer solution. It has been solved by using Turbo Pascal 7.0 program, and the Gauss-Seidel method has been applied for solution.

The variations of θ-X, θ-Y and θ-Z have been examined according to porosity and the surface area in unit volume. In experimental study, three different heat exchangers have been designed. Their dimensions are 200X200X100 mm and there are three passing, and six pipes in every passing The thermal

efficiencies of heat exchangers having three different PPI, such as PPI 10, 20 and 30, have been compared with each other. Total experiment number are nearly 500. 252 experiments have been considered for calculations.

The empirical equations for the heat transfer coefficient and the firiction factor have been found. SPSS 11 Statistic Package program has been used for calculations. The experiments have been done in interval $\mathbf{5.10^3<Re<9.10^4}$

Keywords: Metal foam, open celled aluminium foam, mathematical modelling

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın başlangıcından bu güne kadar hep yanımda olan ve her türlü yardımı esirgemeyen değerli hocam **Prof. Dr. Kemal ALTINIŞIK**'a, Yıldız Teknik Üniversitesi'nden kıymetli hocam **Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM**'e, **Arş. Gör. Muhittin TEKİN**'e, deney düzeneğinin projelendirilmesi ve deneylerin yapılması hususunda yardımlarını esirgemeyen başta **Eti Alüminyum A.Ş. Makina Techizat ve Haddehane Müdürü Şakir PARLAK** olmak üzere tüm kurum yetkililerine şükranlarımı ifade etmek isterim. Ayrıca çalışmamda her zaman beni destekleyen ve her türlü fedakârlığı yapan, eşim ve çocuklarıma en içten sevgilerimi sunarım.

Ahmet Ali SERTKAYA

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGE VE KISALTMALAR	xi
BÖLÜM 1. ALÜMİNYUM METAL KÖPÜKLER	1
1.1 Giriş	1
1.1.1 Açık Ve Kapalı Hücreli Alüminyum Köpük Metaller	2
1.1.2 Alüminyum Köpük Metal Üretim Yöntemleri	3
1.1.3 Alüminyum Köpük Metallerin Uygulama Alanları	6
BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	
2.1 Giriş	10
2.2 Metal Köpüklerle İlgili Yapılan Çalışmalar	10
BÖLÜM 3. MATERYAL VE METOT	14
3.1 Materyal	14
3.1.1 Alüminyum Köpük Üretim Ünitesi	14
3.1.1.1 Pota	16
3.1.1.2 Fırın Tuğlaları Ve Isıtıcılar	16
3.1.1.3 Karıştırıcı	17
3.1.1.4 Gaz Üfleme Elemanı	18
3.1.1.5 Kullanılan Alaşım	19
3.1.1.6 Kararlaştırıcı (Çekirdekleyici) Parçacıklar	20
3.1.2 Alüminyum Köpük Isı Eşanjör Test Ünitesi	20
3.2 Metod	27
BÖLÜM 4. TEORİ	28
4.1 Giriş	28
4.2 Isı Transferi Modeli	28
4.2.1 Sınır Şartları	33
4.2.2 Boyutsuzlaştırma	33
4.2.2.1 Boyutsuz Denklemin Ayrıklaştırılması	36
4.2.2 Sınır Şartlarının Ayrıklaştırılması	40

4.3 Nümerik Çalışma 44
BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMA 48
5.1 Giriş 48
BÖLÜM 6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA 72
BÖLÜM 7. SONUÇ VE ÖNERİLER 76
7.1 Elde Edilen Sonuçların Yorumu 76
7.2 Sonuçların Literatür İle Karşılaştırılması 76
BÖLÜM 8 KAYNAKLAR 78
EKLER
EK –1 Alüminyum Köpük Deneyleri 81
EK–2 Alüminyum Köpük Isı Transfer Modeli İçin Turbo Pascal 7.0 ile Hazirlanan Bilgisayar Proğrami Kaynak Kodlari 88
EK-3 Deneylerde Ölçülen Datalar 103
EK-4 Deney Düzeneği SPSS 11 İstatistik Sistemine Göre Model Dökümanı 110
BÖLÜM 9. ÇİZELGELER
ÇİZELGE 1 Doymuş Suyun Özellikleri 134
EK 5 Literatür Taraması Grafikleri 137

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Açık hücreli alüminyum köpük ve temsili köpük hücresi
Şekil 1.2 Metal köpük örnekleri
Şekil 1.3 Açık hücreli alüminyum köpük
Şekil 1.4 Kapalı hücreli alüminyum köpük
Şekil 1.5 Gaz üfleme metodu ile alüminyum köpük elde edilmesi
Şekil 1.6 Köpükleştirici ajan kullanarak alüminyum köpük eldesi
Şekil 1.7 Toz metalürjisi yöntemi ile alüminyum köpük üretimi
Şekil 1.8 Polimer köpük kullanarak alüminyum köpük eldesi
Şekil 1.9 Alüminyum sandviç panelden yapılmış bir kaldırma kolu
Şekil 1.10 Çarpışma kutusu örnekleri
Şekil 1.11 Raylı sistemlerde çarpışma emici
Şekil 1.12 Alüminyum köpükten yapılmış ısı değiştiriciler
Şekil 3.1 Alüminyum köpük üretim ünitesi şematik resmi
Şekil 3.2 Alüminyum köpük üretim ünitesi
Şekil 3.3 Metal köpük üretim potası
Şekil 3.4 Fırın tuğlası ve ısıtıcı rezistanslar
Şekil 3.5 Karıştırıcı mil ve elektrik motoru
Şekil 3.6 Gaz üfleme ekupmantı
Şekil 3.7 Deneylerde kullanılan alüminyum alaşım ingotları
Şekil 3.8 Alüminyum köpük örnekleri
Şekil 3.9 Alüminyum köpük içine boruların yerleşimi
Şekil 3.10 Alüminyum köpük ısı eşanjör test ünitesi
Şekil 3.11 Depo , pompa ve dijital göstergeli sayaç
Şekil 3.12 Digital flowmetre
Şekil 3.13 Digital anomometre
Şekil 3.14 Fan ve sürücü (Frekans Kontrol Cihazı)
Şekil 3.15 Deney sistemi
Şekil 3.16 Deney sistemi
Şekil 3.17 Trafo ve termokupullar
Şekil 4.1 Alüminyum köpük içinde kenarları dx,dy ve dz olan kontrol hacmi
Şekil 4.2 Kontrol hacmi için merkezi fark
Şekil 4.3 θ – X'e göre oluşturulan grid

Şekil 4.4 θ – Y'ye göre oluşturulan grid
Şekil 4.5 θ – Z'ye göre oluşturulan grid
Şekil 4.6 Boyutsuz θ-X'in **ε**'a göre değişimi
Şekil 4.7 Boyutsuz θ-Y'nin **ε**'a göre değişimi
Şekil 4.8 Boyutsuz θ-Z'nin **ε**'a göre değişimi
Şekil 4.9 Boyutsuz θ-X'in σ'ya göre değişimi
Şekil 4.10 Boyutsuz θ-Y'nin σ'ya göre değişimi
Şekil 4.11 Boyutsuz θ-Z'nin σ'ya göre değişimi
Şekil 5.1 PPI 10 için deneysel olarak Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi
Şekil 5.2 PPI 20 için deneysel olarak Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi
Şekil 5.3 PPI 30 için deneysel olarak Reynolds - Nusselt sayılarının değişim
Şekil 5.4 PPI 10, 20, 30 için deneysel olarak Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi
Şekil 5.5 PPI 10 için geliştirilen ampirik bağıntıya göre Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi
Şekil 5.6 Deneysel sonuçlar ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 10 için Reynolds – Nusselt sayılarının değişimi
Şekil 5.7 PPI 20 için geliştirilen ampirik bağıntıya göre Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi
Şekil 5.8 Deneysel sonuçlar ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 20 için Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi
Şekil 5.9 PPI 30 için geliştirilen ampirik bağıntıya göre Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi
Şekil 5.10 Deneysel sonuçlar ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 30 için Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi
Şekil 5.11 PPI 10,20,30 için geliştirilen ampirik bağıntıya göre Reynolds -Nusselt sayılarının değişimi
Şekil 5.12 Tüm deneysel sonuçlara göre PPI 10,20,30 için Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi
Şekil 5.13 Tüm deneysel sonuçlar ve geliştirilen ampirik bağıntılara göre PPI 10,20,30 için Reynolds - Nusselt değişimi
Şekil 5.14 Toplam deney sonuçlara göre PPI 10,20,30 için deneysel ve ampirik Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi
Şekil 5.15 PPI 10 için etkenlik – hız değişimi
Şekil 5.16 PPI 20 için etkenlik – hız değişimi

Şekil 5.17 PPI 30 için etkenlik – hız değişimi
Şekil 5.18 PPI 10,20,30 için etkenlik – hız değişimi
Şekil 5.19 PPI 10 için basınç düşümü – hız değişimi
Şekil 5.20 PPI 20 için basınç düşümü – hız değişimi
Şekil 5.21 PPI 30 için basınç düşümü – hız değişimi
Şekil 5.22 PPI 10,20,30 için basınç düşümü – hız değişimi
Şekil 5.23 Deneysel değerlere göre PPI 10 için sürtünme - Reynolds değişimi
Şekil 5.24 Geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 10 için sürtünme - Reynolds değişimi
Şekil 5.25 PPI 10 için deneysel sonuçlara ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre sürtünme - Reynolds sayısı değişimi
Şekil 5.26 Deneysel değerlere göre PPI 20 için sürtünme - Reynolds değişimi
Şekil 5.27 Geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 20 için sürtünme - Reynolds değişimi
Şekil 5.28 PPI 20 için deneysel sonuçlara ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre sürtünme - Reynolds sayısı değişimi
Şekil 5.29 Deneysel değerlere göre PPI 30 için sürtünme - Reynolds değişimi
Şekil 5.30 Geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 30 için sürtünme - Reynolds değişimi
Şekil 5.31 PPI 30 için deneysel sonuçlara ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre sürtünme - Reynolds sayısı değişimi
Şekil 5.32 Deneysel değerlere göre PPI 10,20,30 için sürtünme - Reynolds sayısı değişimi
Şekil 5.33 Geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 10,20,30 için sürtünme - Reynolds sayısı değişimi
Şekil 5.34 Tüm sistem için deneysel sonuçlara ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre sürtünme - Reynolds sayısı değişimi
Şekil 1 PPI 10,20 ve 40 için basınç düşümü – hız değişimi
Şekil 2 PPI 10, 30 ve 60 için Nusselt –Reynolds sayısı değişimi
Şekil 3 PPI 10, 20 ve 40 için basınç düşümü- hız değişimi

SİMGE VE KISALTMALAR

Simge	Açıklama
a	Kanal kenar uzunluğu, m
a_{fm}	Deney setinde sınır şartlarından bulunan katsayı
A_c	Toplam akışa dik yüzey alanı, m^2
A_p	Boşlukların oluşturduğu alan, m^2
A_{cond}	İletim ısı transferi yüzey alanı, m^2
$A_{cond(x)s}$	Katı parçanın x yönündeki ısı iletimi yüzey alanı, m^2
$A_{cond(x)f}$	Akışkanın x yönünde temasta olduğu ısı iletimi yüzey alanı, m^2
$A_{cond(y)s}$	Katı parçanın y yönünde ısı iletimi yüzey alanı, m^2
$A_{cond(y)f}$	Akışkanın y yönünde temasta olduğu ısı iletimi yüzey alanı, m^2
$A_{cond(z)s}$	Katı parçanın z yönünde ısı iletimi yüzey alanı, m^2
$A_{cond(z)f}$	Akışkanın z yönünde temasta olduğu ısı iletimi yüzey alanı, m^2
A_p	Boşluk tarafından işgal edilen alan, m^2
c_p	Sabit basınçta özgül ısı, W/kg ^oC
c_{ph}	Sıcak akışkanın (su) özgül ısısı, W/kg ^oC
c_{pc}	Soğuk akışkanın (hava) özgül ısısı, W/kg ^oC
d	Çap, m
dx	Kontrol hacminin yüksekliği, m
dy	Kontrol hacminin derinliği, m
dz	Kontrol hacminin genişliği, m
f	Sürtünme
h_{fm}	Gözenekli yapı içinden taşınımla ısı transferi katsayısı, W/ m^2 ^oC
k_s	Metal köpük için iletkenlik katsayısı, W/ m ^oC
k_f	Akışkan için iletkenlik katsayısı, W/ m ^oC
L	Metal köpük uzunluğu, m
L_b	Deney düzeneği boyu , m
m_{fm}	Metal köpük parametresi, $1/m^2$
$\dot{m}$	Kütlesel debi, kg/s
M	Boyutsuz metal köpük parametresi
Nu	Nusselt sayısı

N	Boru sayısı
PPI	Metal köpüğün bir inch uzunluğundaki boşluk sayısı
Pr	Prandtl sayısı
P	Çevre uzunluğu, m
q_{conv}	Konveksiyonla ısı transferi miktarı, W
q_x	x yönünde taşınılma olan ısı akısı, W/ m^2
q_y	y yönünde taşınılma olan ısı akısı, W/ m^2
q_z	z yönünde taşınılma olan ısı akısı, W/ m^2
Re	Reynolds sayısı
t	Örnek metal köpüğün kalınlığı, m
T_b	Metal köpük yüzey sıcaklığı,^oK
T_{fm}	Metal köpük ortalama sıcaklığı, ^oK
T_∞	Akışkan sıcaklığı, ^oK
T_{hg}	Sıcak akışkanın (su) giriş sıcaklığı, ^oK
$T_{hç}$	Sıcak akışkanın (su) çıkış sıcaklığı, ^oK
T_{cg}	Soğuk akışkanın (hava) giriş sıcaklığı, ^oK
$T_{cç}$	Soğuk akışkanın (hava) çıkış sıcaklığı, oK
T_{hgw}	Su girişindeki boru cidar sıcaklığı , ^oK
$T_{hçw}$	Su çıkışındaki boru cidar sıcaklığı, ^{oK}
S_T	Akış yönüne dik eksenler arası mesafe
S_L	Akış yönüne paralel eksenler arası mesafe
U_∞	Hava hızı, m/s
ν	Akışkanın kinematik viskozitesi, m^2/s
μ	Dinamik viskozite, Ns/m^2
ε	yüzey porozitesi, etkenlik $\varepsilon = 1-(\frac{V_s}{V_{tot}})$
V_s	Katı kısmın hacmi, m^3
V_{air}	Metal köpük içindeki havanın hacmi, m^3
V_{tot}	Örnek parçanın toplam hacmi, m^3
X	Boyutsuz konum
Y	Boyutsuz konum
Z	Boyutsuz konum

ΔP	Basınç farkı, Pa

Yunan Harfleri

α	Akışkanın termal yayınım katsayısı, m^2/s
ρ	Metal köpük bağıl yoğunluğu = ρ_{fm}/ρ_s
θ_{fm}	Boyutsuz ısı transferi katsayısı
ρ	Yoğunluk , kg/ m^3
σ	Birim hacimdeki yüzey alanı, m^2/ m^3

Alt indisler

b	alt
c	soğuk
ç	çıkış
e	doğu
f	akışkan
fm	köpük
g	giriş
h	sıcak
n	kuzey
p	porozite
s	katı, güney
t	üst
tot.	toplam
w	batı, duvar
∞	ortam

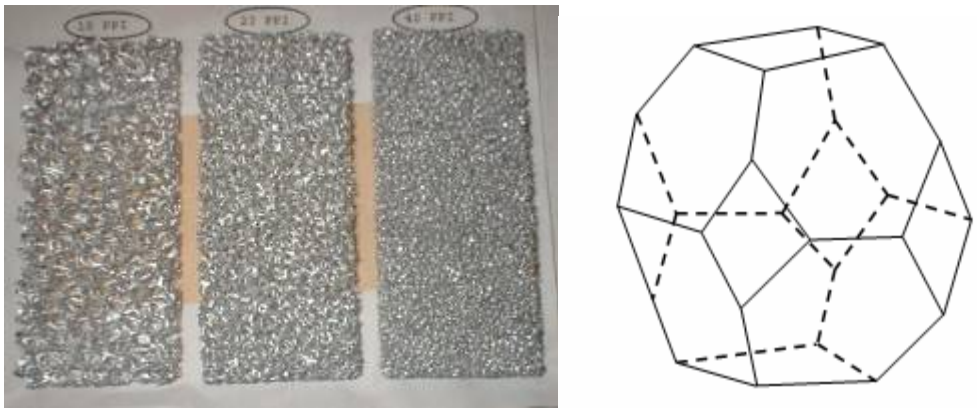
BÖLÜM 1

ALÜMİNYUM METAL KÖPÜKLER

1.1 Giriş

Dünyada yaklaşık 140 milyar ton boksit bulunmaktadır. Buna karşın, yılda 20 milyon ton boksit tüketilmekte ve sadece 5 milyon ton alüminyum geri kazanımla üretime tekrar dönmektedir. Yeryüzünde bu derece bol olan alüminyum, günlük hayatımızda spordan uzay araçlarına kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir ve yüzyıllar boyunca da önemini kaybetmeyecektir. Bilim adamları çağımıza alüminyum çağı adını vermektedirler. Her alanda kullanımı yaygınlaşan alüminyumun ülkemizde de kullanım alanları sürekli artmaktadır. Gelişmiş ülkelerde yıllık alüminyum kullanım artışı % 2,5 dolayında iken ülkemizde bu oran % 4 civarındadır.

Alüminyum, demir, nikel, kurşun, çinko ve titanyum köpük metal yapımında kullanılan malzemelerdir. Ancak günümüzde düşük yoğunluğu, korozyon direnci ve düşük ergime sıcaklığı gibi özellikleri nedeniyle, alüminyum köpükler en çok kullanılan metal köpüklerdir. Bir alüminyum köpük hücresinde yaklaşık olarak 12 ile 14 yüzey mevcuttur. Yüzeyler pentegonal ve hegzagonal (hexagonal) şekillerden oluşurlar. Her bir yüzey aynı veya farklı uzunluklarda 4 ile 6 flament ile diğer yüzeylere bağlanır. Şekil1.1'de açık hücreli alüminyum köpük ve temsili köpük hücresi görülmektedir.



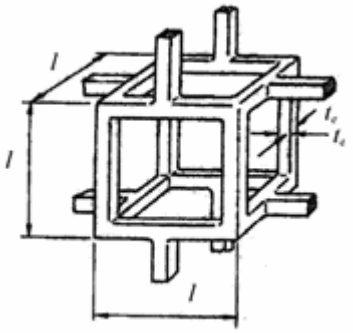
Şekil 1.1 Açık hücreli alüminyum köpük ve temsili köpük hücresi (2)

1.1.1 Açık Ve Kapalı Hücreli Alüminyum Köpük Metaller

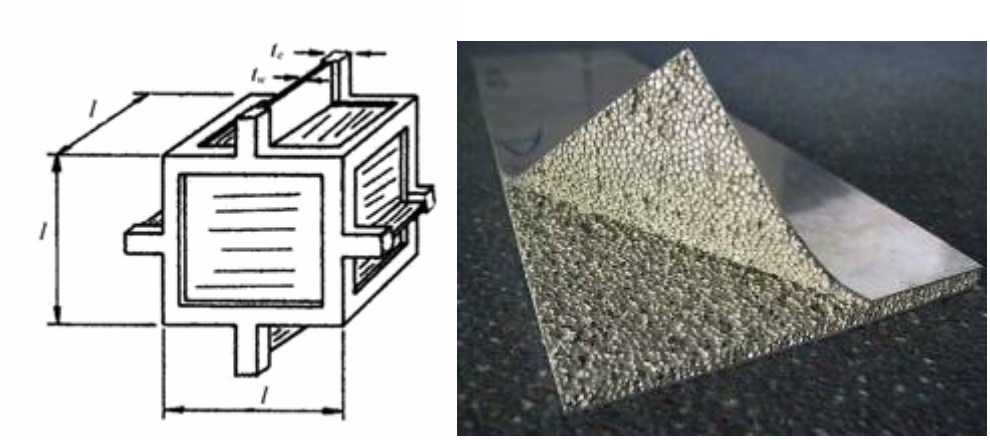
Köpük metal üretimi üzerine 1960'lı yıllarda çalışılmaya başlanmış, bu güne kadar birçok yöntem denenmiş ve halen birçok üniversite ve araştırma merkezinde üretim yöntemleri ve maliyetlerin düşürülmesi üzerine çalışmalara devam edilmektedir. Alüminyum köpük metaller açık hücreli ve kapalı hücreli olmak üzere iki yapı biçiminde üretilmektedir. Her iki yapı biçimide %(80-95) oranına varan boşluk ve %(05-20) oranında malzemeden oluşurlar. Eğer gözenekler birbiri ile bağlantılı bir halde bulunuyorsa, bu tür yapıya **"açık hücreli" (open cell)**, hücrelerin her birinin içerisinde gaz hapsedilmiş ve birbirinden sızdırmazlık derecesinde duvarlarla ayrılmış ise **"kapalı hücreli" (closed cell)** alüminyum köpükler olarak adlandırılır. **Şekil 1.2**'de metal köpük örnekleri, **Şekil 1.3**'de açık hücreli ve **Şekil 1.4**'de kapalı hücreli alüminyum köpüklerin hücre yapısı görülmektedir.



Şekil1.2 Metal köpük örnekleri a. Açık hücreli b.Kapalı hücreli (gaz enjeksiyon) yöntemi ile üretilmiş c.Kapalı hücreli (toz metalurjisi yöntemi) (2)



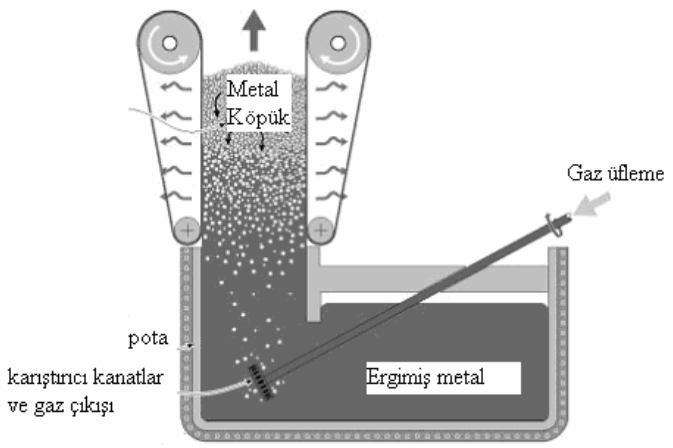
Şekil 1.3 Açık hücreli alüminyum köpük (16)



Şekil 1.4 Kapalı hücreli alüminyum köpük (6)

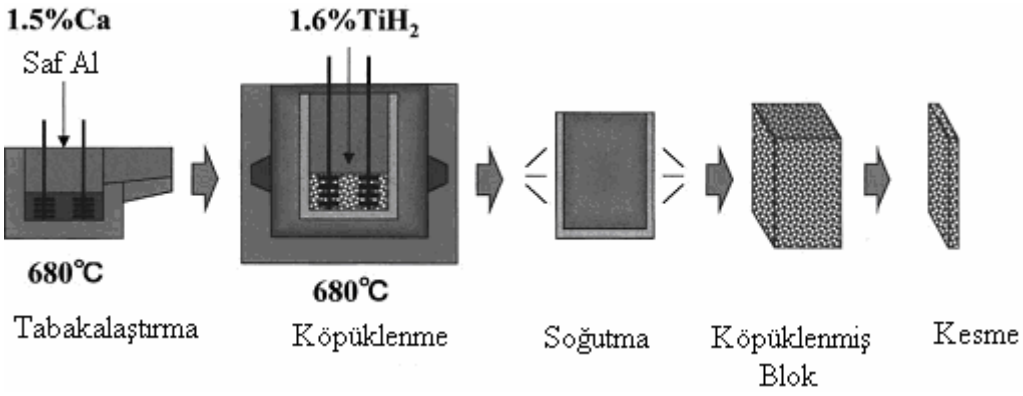
1.1.2 Alüminyum Köpük Metal Üretim Yöntemleri

Eriyik içine gaz üfleyerek alüminyum köpük elde etmek en çok kullanılan üretim yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde ergimiş alüminyum içine %5-15 arasında SiC veya Al_2O_3 gibi tozlar çekirdeklenmeyi başlatmak üzere kararlaştırıcı olarak ilave edilir. Karışım içine argon, azot, hava gibi gazlar salınır. Yoğunluk farkı nedeniyle gazlar yukarı çıkarken bünyelerine bir miktar ergimiş alüminyum alırlar. Sıvı metalin soğutulması esnasında bünyede oluşan boşluklarla alüminyum köpük elde edilir. Bu yöntem ucuz ve sürekli döküme uygun olması bir avantaj olmakla beraber, hücre boyutunun kontrol edilememesi bir dezavantajdır. **Şekil 1.5'**de gaz üfleme metodu ile alüminyum köpüğün elde edilmesi şematik olarak görülmektedir.



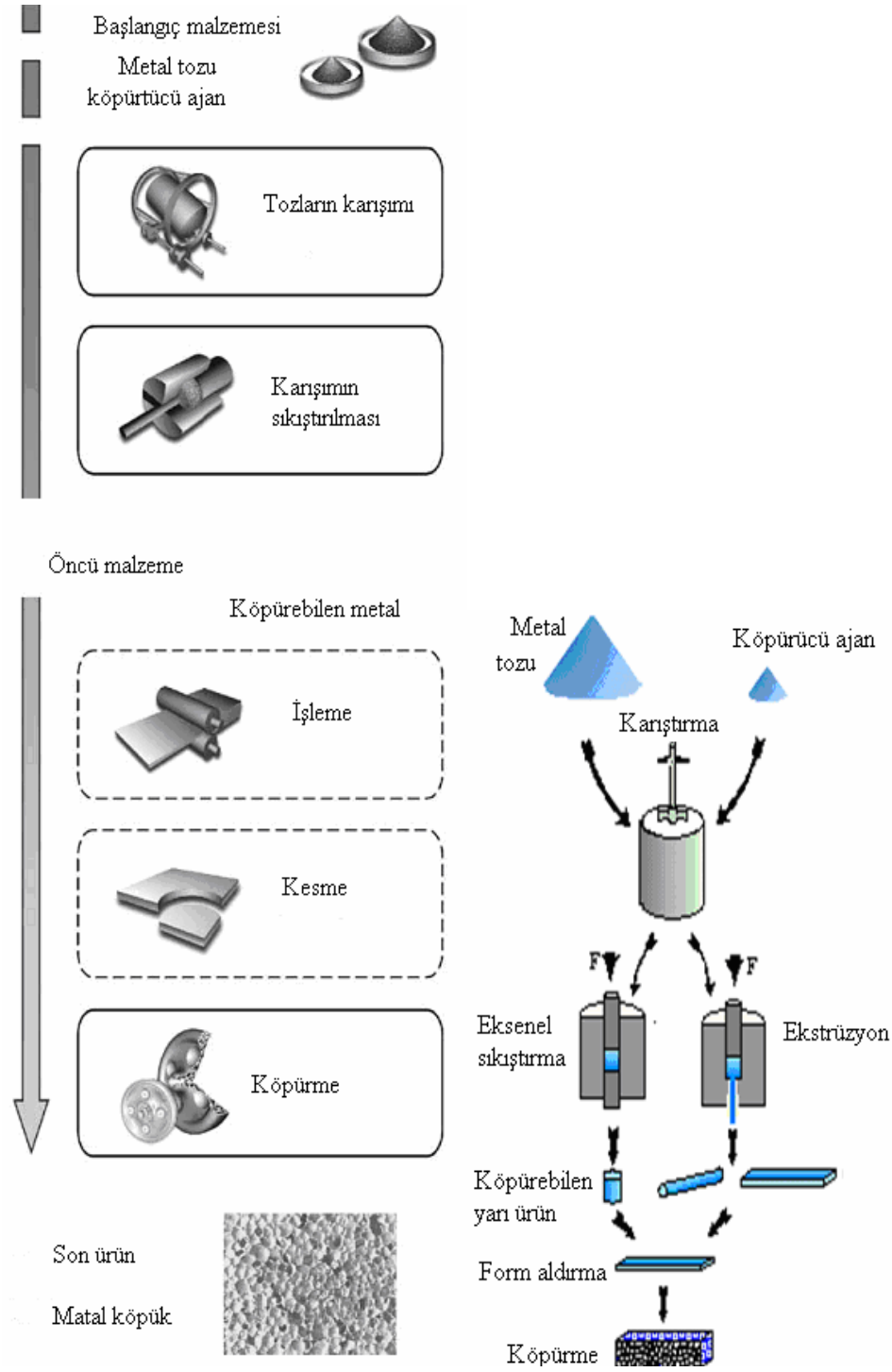
Şekil 1.5 Gaz üfleme metodu ile alüminyum köpük elde edilmesi (24)

Alüminyum köpük metalin elde edilmesinde kullanılan bir başka yöntemde eriyik içine gaz yerine köpükleştirici başka bir metal ilave edilmesidir. Köpükleştirici metal uygun bir sıcaklıkta çözünerek gaz salmakta ve köpükleşmeyi sağlamaktadır. Köpükleştirici metal olarak genellikle titanyum hidrid (TiH_2) kullanılır. Köpüren malzeme uygun bir kalıba alınarak istenilen boyutlarda kesilebilir. Katkı malzemeleri nedeniyle, pahalı bir yöntem olması bir dezavantaj olmakla birlikte, istenilen boşluk boyutunda alüminyum köpük elde edilmesi bir avantajdır. **Şekil1.6**'da köpükleştirici metal kullanılarak alüminyum köpük elde edilmesi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil1.6 Köpükleştirici ajan kullanarak alüminyum köpük eldesi (6)

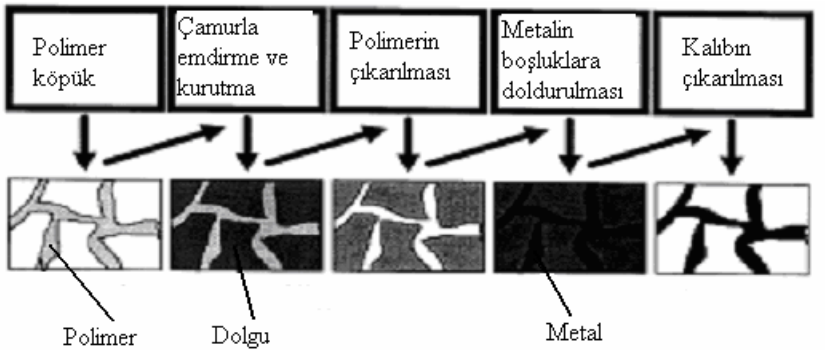
Toz metalürjisi yöntemi ile de alüminyum köpük üretimi mümkündür. Bu yöntemde toz metal ve köpük yapıcı madde karıştırıldıktan sonra, presleme, ekstrüzyon ve haddeleme gibi metal şekillendirme yöntemleri ile yarı ürün elde edilir. Köpükleşecek yarı ürün metalin ergime sıcaklığının üstündeki bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Bu esnada köpük yapıcı malzeme gaz açığa çıkarır. Çıkan gaz ergimiş metalin genişlemesine ve gözenekli bir yapı oluşmasına neden olur. Tozların maliyetlerinin yüksek olması ve çok büyük parçaların üretiminin mümkün olmaması bir dezavantajdır. Ancak son ürüne yakın üretimin olması kararlaştırıcı ek malzemelere ihtiyaç duyulmaması bir avantajdır. **Şekil 1.7**'de toz metalürjisi yöntemi ile alüminyum köpük üretimi şematik olarak görülmektedir.



Şekil 1.7 Toz metalürjisi yöntemi ile alüminyum köpük üretimi (6)

Polimer esaslı malzemeler yardımıyla da alüminyum köpük metal elde edilmesi mümkündür. Bu yöntemde polimer esaslı malzeme ısıl dirence sahip malzemelerle (mullit, kalsiyum karbonat veya alçı) doldurulur. Polimer esaslı malzeme her hangi bir yöntemle bünyeden uzaklaştırılır. Ortaya çıkan boşluklara sıvı alüminyum

malzeme dökülür. Kalıp malzeme bünyeden ayrıştırılıp alüminyum köpük sünger formunda elde edilir. **Şekil 1.8**'de Polimer köpük kullanarak alüminyum köpük üretimi görülmektedir. Bu yöntemde en büyük sorun bünyedeki malzemelerin alüminyum köpükten ayrılmasının güçlüğüdür.



Şekil 1.8 Polimer köpük kullanarak alüminyum köpük eldesi (14)

Gerek alüminyum köpük gerekse diğer köpük metallerin elde edilmesinde kullanılan başka özel yöntemlerde bulunmaktadır. Burada bahsedilenler en yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir.

1.1.3 Alüminyum Köpük Metallerin Uygulama Alanları

Köpük metaller hücre yapısının açık veya kapalı oluşuna göre değişik kullanım alanlarına sahiptir. Otomotiv endüstrisinde; hafifliği, sönümleyici özellikleri ile diğer metallere göre tercih edilir. Hafif ve sağlam yapıdaki alüminyum köpük sandviç paneller çelik panellere göre %25 daha hafif ve 8 kata varan sağlamlıktadır. **Şekil 1.9**'da alüminyum sandviç panelden yapılmış bir kaldırma kolu görülmektedir.



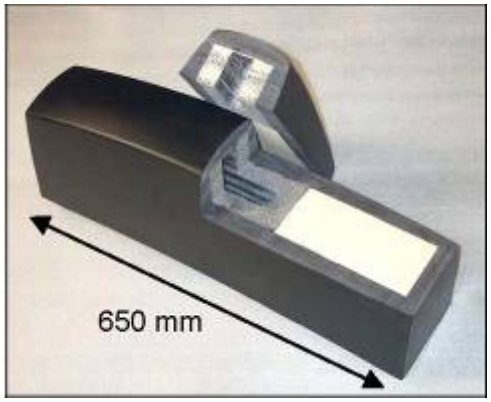
Şekil 1.9 Alüminyum sandviç panelden yapılmış bir kaldırma kolu (6)

Alüminyum köpükler otomotiv sanayinde çarpışma emici olarak da kullanılmıştır. Çarpışma kutuları darbe tamponu altına konularak çarpışma anında oluşan enerjiyi emerek araçta meydana gelecek hasarı azaltmaktadır. **Şekil 1.10**'da tampon altına konulan çarpışma kutusu görülmektedir.



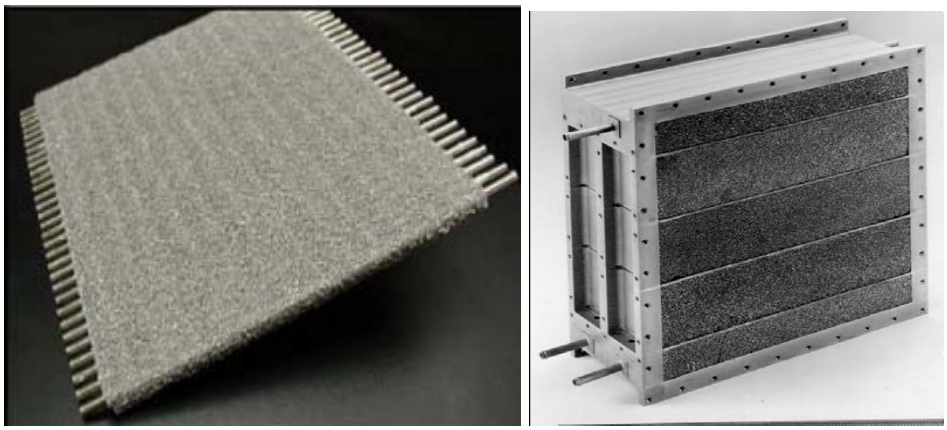
Şekil 1.10 Çarpışma kutusu örnekleri (23)

Enerji emiciler aynı zamanda raylı sistemlerde de kullanılmaktadır. Tramvaylar ve trenlerde her hangi bir çarpma anında hasarı azaltmak için tasarlanan çarpışma emici sistemi **Şekil 1.11** de görülmektedir.



Şekil1.11 Raylı sistemlerde çarpışma emici (6)

Korozyon direnci ve yüksek ısı iletkenliği nedeniyle, açık hücreli alüminyum köpükler ısı değiştiricisi olarak kullanılabilirler. Kapalı hücreli köpük metaller ise düşük ısı iletkenlikleri nedeniyle, termal kalkan olarak kullanılmaktadırlar. Bu uygulamalara örnek olarak soğutma radyatörleri, bilgisayar çipleri ve güç elektroniği için mikro elektronik cihazlar verilebilir. **Şekil 1.12**'de alüminyum köpükten yapılmış ısı değiştiriciler görülmektedir.



Şekil 1.12 Alüminyum köpükten yapılmış ısı değiştiriciler (24)

Alüminyum köpükler uzay ve havacılık endüstrisinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum sandviç paneller uçak gövde ve helikopter kuyruk elemanlarında tercih edilmektedir. Alüminyum ürünlerin hafifliği nedeniyle, gemi inşa sektöründe büyük bir kullanım alanı bulmaktadır. Modern yolcu gemileri alüminyum ekstrüzyon ürünler, alüminyum levha ve alüminyum köpüğün yaygın olarak kullanıldığı alanlardan biridir.

Alüminyum köpükler hafifliğin esas olduğu asansör kabinlerinde, inşaat yardımcı elemanlarında kullanılabilmektedirler. Ses ve gürültünün kontrol edilmesi gereken köprü ve viyadüklerin altlarında, gürültülü çalışan (kompresör gibi) makinelerde susturucu olarak, su arıtıcılarda katı parçaları gaz veya sıvıdan veya iki sıvıyı birbirinden ayırmak için kullanılabilir. Alüminyum köpükler sanatsal yapılarda, mobilya ve oturma gruplarının şasi kısımlarında, bisiklet gibi günlük kullanılan bineklerden sporcuların dizliğine varana kadar oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu kadar çok kullanıma sahip bir malzemenin çok fazla yaygınlaşamamasının tek nedeni, üretim yöntemlerindeki zorluklar ve maliyetin fazla

olmasıdır. Çalışmaların birçoğu maliyeti azaltmaya yöneliktir. 1995'de 20 €/kg olan üretim maliyeti 2005'de 5 €/kg değerine kadar düşürülmüştür.

Bu çalışmada, önce ısıl sistemlerde kullanılacak olan, açık hücreli alüminyum köpük üretilmesi amaçlandı. Bu konuda ETİ Alüminyum A:Ş. üretim atölyelerinde ergimiş metal içine gaz enjeksiyon yöntemi ile alüminyum köpük üretilmeye çalışıldı. İstenilen sonuç tam olarak gerçekleştirilememesi nedeniyle, Almanya'da bulunan **m-pore** firmasından özel sipariş ile örnekler getirildi. PPI 10, 20 ve 30 özelliklerine sahip; 200mmx200mmx100mm boyutlarında çok sayıda kanatçığa sahip, boyutları küçük fakat, birim hacimde daha geniş yüzey alanı olan, kompakt ve hafif bir ısı değiştiricisinin üç ayrı prototip modeli gerçekleştirildi.

Çalışma teorik ve deneysel olarak yapıldı. Farklı gözenek boyutlarına sahip (PPI) açık hücreli alüminyum metal köpük ısı değiştiricisi için 3 boyutlu ısı transfer modeli geliştirildi.

Farklı PPI değerlerine sahip açık hücreli Alüminyum metal köpük ısı değiştiricilerinin etkenlikleri (ε) hesaplandı. Deneysel çalışmalar sonunda, taşınım katsayısı için bir ampirik bağıntı geliştirildi.

BÖLÜM 2

KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Giriş

Alüminyum köpükler üzerine yapılan çalışmalar 1960'lı yıllara dayanmaktadır. Birçok üniversite ve araştırma enstitüsünde üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ve maliyetin düşürülmesi üzerine araştırmaya devam edilmektedir. Ticari olarak üretilen alüminyum köpük metaller genellikle eriyik temelli üretim esasına dayanmaktadır.

2.2 Metal Köpüklerle İlgili Yapılan Çalışmalar

Hernández, Á. (2005). Açık ve kapalı hücreli metal köpüklerin üretim proseslerini incelemiştir. Havacılıkta ve ısı eşanjörlerinde kullanım alanlarını araştırmıştır. Sıvı alüminyumun köpük alüminyum haline gelene kadar ısıl modellenmesini ve bunun teorik olarak elde edilen değerlerle deneysel değerlerin karşılaştırılması ve grafiklerinin çizilmesi üzerine çalışmıştır.

Rabiei, A. O'Neill, A.T. (2005). Kapalı hücreli kompozit metal köpüklerin yoğunluk farkından yararlanarak elde edilmesini incelemişlerdir. Yoğunluğu 2,4 gr/cm^3 olan malzemeler kullanmışlardır. Üretilen köpük elemanının filtre elemanı olarak, havacılık, biomedikal, otomotiv sanayinde kullanılmasını ve çarpışmalarda enerji absorbsiyonunu incelemişlerdir.

Montanini, R. (2005). Yoğunluğu (0,14 -0,75) g/cm^3 arasında değişen gaz enjeksiyon, toz metalurjisi ve ileri döküm yöntemleri ile üretilmiş üç ayrı üretim şirketinin ürünleri üzerinde(M-PORE, CYMAT, SCHUNK) alüminyum köpük alaşımlarının statik ve dinamik yüklemeler altında yapısal performansını incelemiştir.

Liqun, M. Zhenlun, S. Deping, H. (1999). Düşük basınçla infilitrasyon yöntemi ile elde edilen alüminyum köpük üretimlerinin geliştirilmesine çalışmışlardır. Yoğunlukları %(73-79) arasında, hücre çapları 2,66 ile 2,85 arasında değişen

alüminyum köpüklerin yüksek basınç altında infilitrasyon prosesi yöntemiyle üretimini denemişlerdir.

Yamada, Y. Shimojima, K. Sakaguchi,Y. Mabuchi, M. Nakamaru, M. Asahina, T. Mukai, T. Kanahashi, H. Higashi, K. (2000). Değişik yoğunluklarda AZ91 Mg ve SG91A Al açık hücreli köpük metallerin ısı transferine etkilerini incelemişlerdir. Değişik bağıl yoğunlukta köpük metallerin basınç altında durum değişimlerini deneylerle ve teorik olarak inceleyip karşılaştırma yapmışlardır. Bağıl yoğunluk arttıkça stres geriliminin daha da arttığını tespit etmişlerdir.

Koza, E. Leonowicz, M. Wojciechowski, S. Simancik, F. (2003). Yoğunlukları 0,186 ile 0,199 arasında olan alüminyum köpükler üzerinde deneyler yapmışlardır. Malzemelerin değişik boy ve çap oranlarında basınç altında elastikiyetlerini ve basma kuvveti altında durum değişimlerini incelemişlerdir.

Amjad, S. (2001). Metalik köpüklerin üretim yöntemlerinden ergitme yöntemini, gaz enjeksiyon yöntemini, ve toz metalurjisi ile üretimini incelemişlerdir. Uygulama alanlarından; yapısal alanlarda, yüksek sıcaklıklarda filtre olarak kullanılması ve akustik alanlardaki kullanımını araştırmışlardır. Köpük metallerin katı ve gaz fazda kondüksiyonla ısı iletimlerini, konveksiyon ve radyasyon etkilerini araştırmışlardır.

Banhart, J. (2003). Alüminyum köpüğün araçlarda kullanım alanlarını araştırmıştır. Metal köpüklerin üretim yöntemlerini incelemiştir. Hafif metal konstrüksiyonu olarak liftlerde kaldırma kolu amacıyla, çarpışmalarda enerji emici olarak, termal ve akustik olarak araçların iyileştirilmesi, motor parçalarının hafifleştirilmesi konularında çalışmıştır. Tren vagonlarında darbe emici olarak kullanımını araştırmıştır. Polümer esaslı köpüklere göre 20 MPa daha yüksek darbe emici özelliğe sahip olduğunu tespit etmiştir.

Gui, M.C. Wang, D. B. Wu, J.J. Yuan, G. J. Li, C. G. (2000). A356:20SiCp kompozit malzemenin farklı gözenek ve hücre boyutlarında üretilmesini incelemişlerdir. Lineer elastik bölge çok küçük bir bölüm de (<0.03) görülmüştür. Lineer elastik bölgede mekanik özellikleri (modül) Ashby modeli ile açıklamışlardır. Köpüğün bağıl yoğunluğunun elastiklik kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip

olduğunu belirtmişlerdir. Bu etkinin dinamik kompozit modül üzerinde çok küçük olduğunu tespit etmişlerdir.

Kennedy, A.R. Asavavisitchai, S. (2003). Alüminyum köpükler üzerine TiB_2 ilave edilmesinin mekanik özellikler ve mikroyapısına etkilerini incelemişlerdir.

Markaki, A.E. Clyne, T.W. (2001). Metal köpük ve seramik kaplamanın çatlak etkisi ve enerji absorbsiyonu üzerinde çalışmışlardır.

Kádár, Cs. Kenesei, P. Lendvai, J. Rajkovits, Z. Yüksek ve düşük yoğunluktaki hücresel köpük metallerin enerji absorbsiyonunu incelemişlerdir.

Song, Z. Zuhu, J. Ma, L. He, D. (2001). Alüminyum esaslı köpük metalin ergime zamanını deneysel olarak incelemişler, hücresel yapının ergime derecesine etkisini analiz etmişlerdir.

Degischer, H. P. (1998). Değişik sınıflarda metal matriksli komponentlerin karşılaştırmasını yapmıştır. Bunların ağırlık, yoğunluk ve basınç etkisi altındaki davranışlarını incelemiştir.

Back, W. Borman, D. Wilk, P. Kucharski, R. (2004). Darbe emici hücresel mağnezyum metal köpük silindirleri üretmişler ve alüminyum köpük silindirlerle karşılaştırmasını yapıp mikro yapısını incelemişlerdir.

Banhart, J. (2001). Hücresel metallerin üretimi, katı durum prosesleri(sinterleme, boşluk yapıları vb.), hücresel metallerin elektirik , ısı, ses etkileri, vibrasyon emme durumları ve X- ray durumlarının tespiti konularında araştırma yapmıştır.

Gibson, L. J. (2000). Metal köpüklerin katı hücresel yapıları, özellikleri, modülleri ve gerilim dayanımlarını araştırmış, değişik firmalara ait numuneler üzerinden karşılaştırmalar yapmıştır.

Coxa, S.J. Bradley, G. Weaire, D. (2001). Köpük metallerin ergimiş durumdan katı hale geçerken gerçekleşen ısı transferini ve fiziksek değişimi incelemişlerdir.

Banhart, J. (2000). Köpük metallerin hücresel metal, gözenekli metal, metal köpük ve metal sünger tanımları üzerinde durmuş, üretim yöntemlerinden metal tozları, sıvı metal, toz metal ve metal ionları yöntemleri ile üretim kademeleri üzerinde durmuş şu anki engeller ve geleceği hakkında incelemelerde bulunmuştur.

Park, S. H. Um, Y. S. Kum, C. H. Hur, B. Y. (2005). Metal köpüklerin yüzey gerilimi ve viskozitelerinin sıcaklıkla değişimini ölçmüşlerdir. Al köpük içinde yüzey gerilimi ve viskozitenin sıcaklık artışı ile birlikte düştüğünü Si, Cu ve Zn oranlarının artmasıyla birlikte arttığını tespit etmişlerdir.

Babcsan, N. Meszaros, I. Hegman, N. (2003). 30 ^{O}C dan 500 ^{O}C kadar değişik sıcaklıklarda alüminyum köpük metallerin termal ve elektrik iletkenliklerini ölçmüşlerdir. Köpük metalin bağıl yoğunluğu azaldıkça elektrik ve termal iletkenliğinin düştüğünü, bağıl yoğunluk arttıkça iletkenliğin arttığını tespit etmişlerdir.

Dukhan, N., Quinones, P., 2003, açık hücreli metal köpükler için bir boyutlu ısı transferinin modellenmesi üzerinde çalıştılar ve farklı yüzey alanlarına, bağıl yoğunluklara, filament çaplarına ve gözenek boyutlarına sahip alüminyum köpükler üzerinde deneysel çalışmalar yaptılar.

BÖLÜM - 3

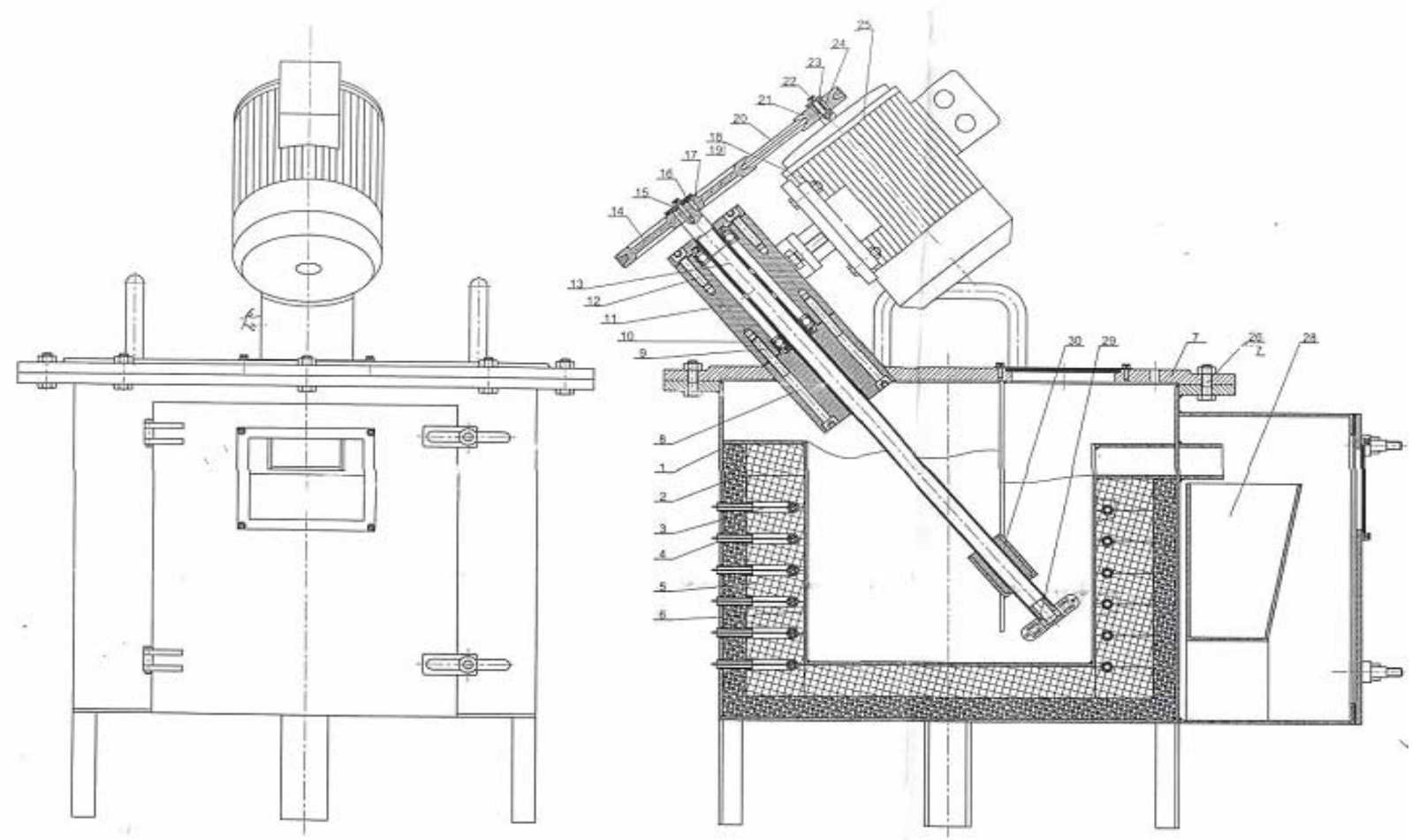
MATERYAL VE METOT

3.1 Materyal

Deneysel çalışmalar iki bölümden oluşturuldu. Deneysel çalışmanın ilk bölümünde, deney düzeneğinin hazırlanması ve alüminyum köpüğün üretimi, ikinci bölümünde ise PPI 10, PPI 20 ve PPI 30 ile hazırlanan özel ısı değiştiricisinin etkenlik katsayısı deneysel olarak incelendi.

3.1.1 Alüminyum Köpük Üretim Ünitesi

Üretim ünitesi için Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü ile Eti Alüminyum A.Ş. atölye ve ısı laboratuarı kullanıldı. Alüminyum köpük üretiminin yapılabilmesi için bir makina tasarımı gerçekleştirildi. Tasarımı yapılan makina Eti Alüminyum A.Ş çelik konstrüksiyon ve mekanik atölyelerinde imal edildi. Tasarlanan makine ile metalin ergitilmesi, ergitilen metale çekirdek oluşturucu diğer malzemenin verilmesi, boşlukları oluşturacak köpükleştirici gazın eklenmesi ve köpük metal karışımının dışarı alınarak istenilen formun verilmesi için, sistemde kontrollü güç kaynağı (trafo), metal ergitme ocağı (fırın), metal karıştırıcı mikser, sisteme eriyik içine gaz verici ekupmant (üretimde argon gazı kullanılmıştır) ve köpük metali dışarı alıp istenilen formda kalıplayacak ünite hazırlandı. Deney düzeneğine ait şematik resim ve fotoğraf **Şekil 3.1** ve **3.2**'de gösterildi.



Şekil 3.1 Hazırlanan Alüminyum köpük üretim ünitesine ait şematik görünüm



Şekil 3.2 Alüminyum köpük üretim ünitesi

3.1.1.1 Pota

Alüminyum köpük üretiminde kullanılacak pota malzemesi, ergimiş alüminyumun bünyeye yapışmayacağı bir malzeme olması gerekir. Bu amaçla deneysel çalışmada grafitten daha kolay şekillendirilebilen paslanmaz çelik kullanıldı. 6 mm kalınlığında 316 paslanmaz çelik, özel formda kıvrıldı**(Şekil 3.3).**



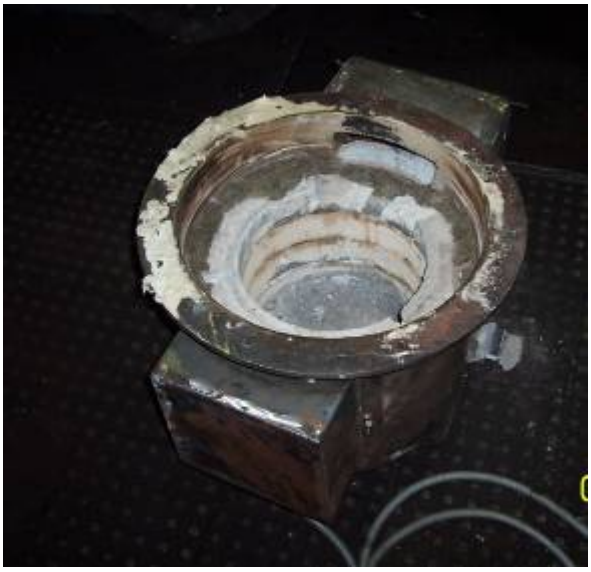
Şekil 3.3 Metal köpük üretim potası

3.1.1.2 Fırın Tuğlaları Ve Isıtıcılar

Makinada kullanılan tuğlalar şamot harcından yapıldı. Bu amaçla hazırlanan özel

kalıplara, su ve cam suyu karışımı yardımıyla hamur haline getirilip dökülerek preslendi. Uygun bir süre kurutulduktan sonra 1100 ºC sıcaklıkta sinterlendi. Tuğlalar, rezistansların yerleştirilmesi için kat kat yapıldı ve her tuğlada rezistanslara kılavuzluk yapacak kanallar oluşturuldu.

Fırının ısıtılması için 1100 ºC sıcaklığa kadar ısıtıcı özelliği olan ve ergime derecesi 1400ºC olan krom nikel rezistans kullanıldı. Fırın sıcaklığını 800 ºC'ye çıkarabilecek tel çapı ve uzunluğu hesap edilerek sardırıldı. Isıtıcı teller tuğlalar içine açılan kanallara yerleştirildi. Tellerin çıkışları tek bir güç kaynağında birleştirildi.Tuğlaların dış tarafı ile gövde sacı arasında kalan bölüm taş yünü ile kaplanarak ısı kaybı önlendi. **Şekil 3.4**'de fırın tuğlası ve ısıtıcı rezistanslara ait resim görülmektedir.



Şekil 3.4 Fırın tuğlası ve ısıtıcı rezistanslar

3.1.1.3 Karıştırıcı

Ergimiş metal ile çekirdekleyici alaşımın birbirine karışmasını sağlayacak ve boşlukların oluşması için, gazı karışımın içine üfleyecek karıştırıcı ünite tasarlandı. Bu ünite bir elektrik motoru tarafından kayış kasnak mekanizması ile tahrik edilmektedir. Mil değişik noktalardan yataklanarak ucuna fan bağlandı. Mil

içerisinde gazın sisteme gitmesini yönlendiren mekanizma mevcuttur. Karıştırıcı mil olarak paslanmaz çelik malzeme kullanıldı. Fan hem metali homojen bir şekilde karıştırmakta, hem de sisteme verilen gazın yukarı çıkışını kolaylaştırmaktadır. Fan yüzeyinde 4 kanat mevcut olup, kanatların yüzeylerine delikler açılmıştır. Motor çıkış devri 800 dev/dak. dır. Kasnakların değiştirilmesi sayesinde karıştırıcı devri artırılabilir veya azaltılabilir. Literatür taramasında en uygun karıştırıcı devri 700-1200 dev/dak. arasındaki olduğu belirlenmştir. **Şekil 3.5**'de karıştırıcı mil, elektrik motoru ve donanımlarının fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 3.5 Karıştırıcı mil ve elektrik motoru

3.1.1.4 Gaz Üfleme Elemanı

Alüminyum köpüğün oluşturulabilmesi için argon gazı kullanıldı. Argon tüpü üzerinde gaz ısıtıcı, basınç ve hacim kontrol valfleri bulunmaktadır. Gaz sisteme basınca dayanıklı pilastik bir hortumla bağlandı. Sisteme giden gazın basıncı ve debisi, kısma vanaları ile ayarlandı. Ayrıca sisteme direkt verilmeyip belli bir sıcaklığa kadar ısıtılarak verildi. **Şekil 3.6**'da gaz üfleme düzeneği görülmektedir.



Şekil 3.6 Gaz üfleme düzeneği

3.1.1.5 Kullanılan Alaşım

Alüminyum köpük üretimi için literatür taramasında, en uygun alaşım AlSi7Mg ve ETİAL 160 olarak belirlendi. Bu alaşımlara ait bileşim aşağıda verildi. Alüminyum alaşımları ingot şeklinde hazırlandı. **Şekil 3.7**'de deneylerde kullanılan alüminyum alaşımlarına ait ingotların resimleri görülmektedir.

Çizelge 3.1 ETİAL 160 ve AlSi7Mg (%) bileşimi (25)

Cu	Fe	Si	Zn	Mg	Ni	Ti	Mn	TSE
3,0-4,0	1,0	7,5-9,0	3-4	0,30	0,20	0,20	0,50	Al-Si8Cu3Fe
0,10	0,20	6,5-7,5	0,10	0,25-0,45	0,05	0,20	0,10	AlSi7Mg



Şekil 3.7 Deneylerde kullanılan alüminyum alaşım ingotları

3.1.1.6 Kararlaştırıcı (Çekirdekleyici) Parçacıklar

Alüminyum köpük üretiminde kararlaştırıcı veya çekirdekleyici olarak tanımlanan malzeme kullanılmaktadır. Literatür taramasında en çok kullanılan kararlaştırıcı SiC ve Al_2O_3 olarak verilmektedir. Kararlaştırıcının karışım içindeki oranı ise %5 ile %20 arasında değişmektedir. Kararlaştırıcı tanecik boyutu literatür taramasında 20µ'un altında olduğu görüldü. Deneylerde kullanılan kararlaştırıcı tanecik boyutu 20µ'dur.

Alüminyum köpük üretimi için yapılan deney düzeneği üzerinde çok sayıda ve değişik varyasyonlar ile deneyler yapıldı. Alaşımın ergitme sıcaklığı, ergimiş metale gaz verme sıcaklığı, kararlaştırıcı (çekirdekleyici) oranı ve boyutları, gaz basıncı ve sıcaklığı, gibi çok problem aşılmasına rağmen henüz istenilen randımanda üretim gerçekleştirilemedi. Bu amaçla deneylere devam edilmektedir. Yapılan deneyler ve karşılaşılan problemler **EK-1**'de verilmiştir.

.

3.1.2 Alüminyum Köpük Isı Değiştiricisi Test Ünitesi

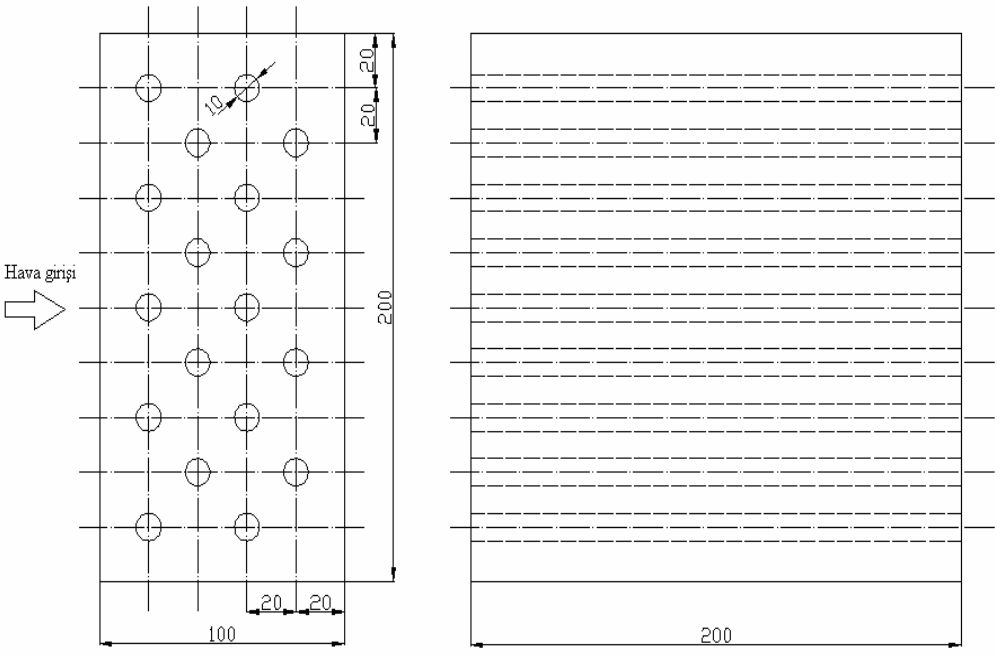
Alüminyum köpük ısı değiştiricisi test ünitesi için yurt dışından getirilen alüminyum köpükler kullanıldı. Bu amaçla Almanya da üretim yapan **m-pore** firmasına özel sipariş verilerek 10, 20 ve 30 PPI özelliklerine sahip 200 mmx200 mmx100 boyutlarında 3 adet AlSi7Mg alaşımlı Alüminyum köpük malzeme getirtildi. Bu malzemenin porozitesi, % 90 olarak üretici firma tarafından verildi. Alüminyum köpükler deney düzeneği için taşıtlarda yağ soğutucusu üretimi yapan bir firma tarafından verilen şekle uygun olarak ısı değiştiricisi formuna getirildi. 10 mm çapında Alüminyum borular şekilde gösterildiği gibi saptırmalı olarak yerleştirildi. Toplam olarak 18 boru, köpük içerisine yerleştirildi ve şişirilerek boru ve köpüğün iyi bir kontak oluşturması gerçekleştirildi. Toplam boru sayısı 18 olup, her geçişte 6 boru olmak üzere toplam 3 geçişli ısı değiştiricisi dizayn edildi (**Şekil 3.8)**, **Şekil 3.9**'da Alüminyum köpük içine boruların saptırmalı olarak yerleşimi şematik verildi.

Şekil 3.10'da ısı değiştiricisi test ünitesi, **Şekil 3.11**'de ise depo pompa ve dijital göstergeli sayaç görülmektedir.

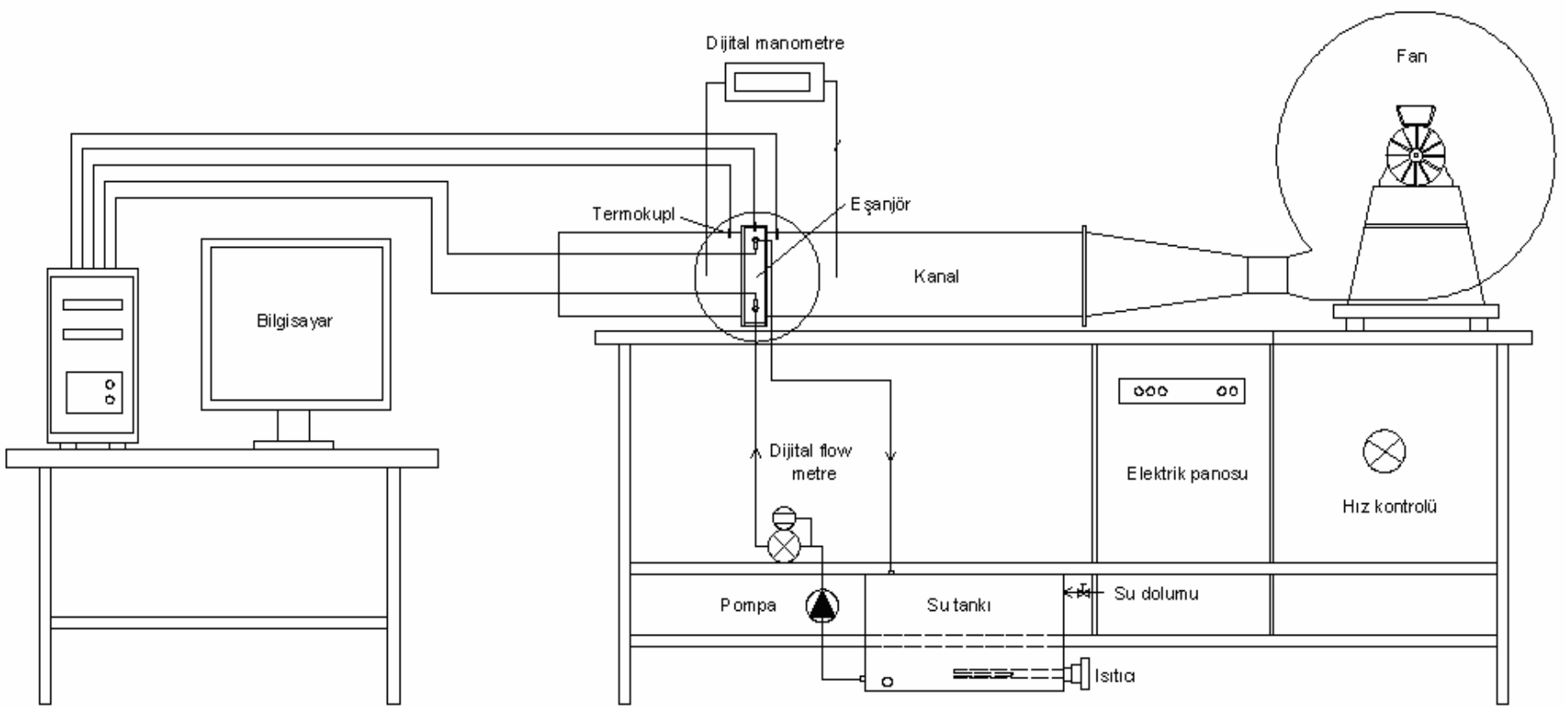


(a) (b)

Şekil 3.8 Alüminyum köpük örnekleri (a) PPI 20, (b) PPI 30

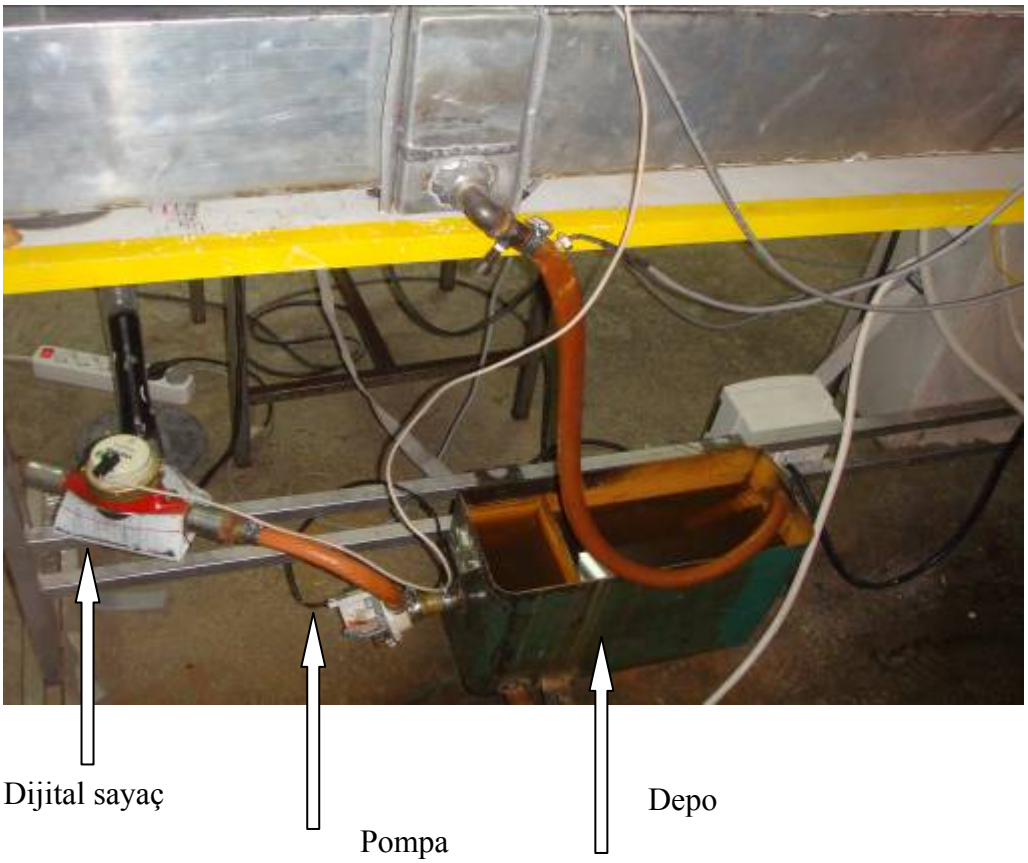


Şekil 3.9 Alüminyum köpük içine boruların yerleşimi



Şekil 3.10 Alüminyum köpük ısı değiştiricisi test ünitesi

Sistemde sıcak akışkan olarak su kullanıldı. Sıcak su 2 kW'lık güce sahip bir ısıtıcı ile sağlandı. 20 litrelik hacme sahip depo, 100 ^{o}C sıcaklığa kadar çıkabilen ve termostatla istenilen sıcaklığa ayarlanabilen bir ısıtıcı ile kontrol edildi. Depo suyu kapalı devre olarak bir pompa ile sistem içerisinde sürekli devir daim yaptırıldı. Sisteme giden suyun debisi dijital Flow- metre ile okundu **(Şekil 3. 12**).



Şekil 3.11 Depo , pompa ve dijital göstergeli sayaç

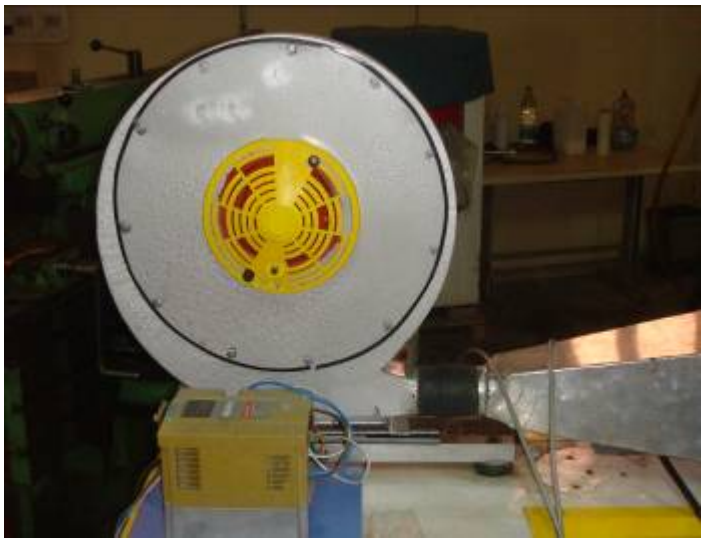


Şekil 3.12 Digital flow-metre

Sistemde soğutucu akışkan olarak hava kullanıldı. Akışkan, anomometre ile devri ayarlanabilen bir fan tarafından alüminyum köpük ısı değiştiricisi test ünitesi üzerine üflendi. Hava hızı %1 hassasiyette ayarlandı. Hava hızı kanalın çıkış noktasında bulunan anomometre ile ölçüldü **(Şekil 3.13)**. **Şekil 14, 15, 16, ve 17**'de deney düzeneği ile ilgili olarak çeşitli resimler verildi.



Şekil 3.13 Digital anomometre



Şekil 3.14 Fan ve sürücü frekans kontrol cihazı

Hava giriş(T_{cg}) ve hava çıkış sıcaklıkları($T_{cç}$), sıcak su giriş(T_{hg}) ve çıkış sıcaklıkları($T_{hç}$), boru yüzey giriş(T_{hgw}) ve boru yüzeyi çıkış sıcaklıkları($T_{hçw}$) ölçümü için birer termokupul yerleştirildi. Termokupulların dış ortamdan etkilenmemesi için sıvı conta kullanıldı. Termokupullar 0-120 ^{o}C arasında 0,01 hata ile ölçüm yapmaktadır. Bütün bu sıcaklıklar Fe-constantan termokupullar yardımıyla anolog sinyal işlem bölümüne ve daha sonra Anolog/sayısal çevirici kartlara iletilmektedir. Çevirici kartlar bilgiyi sayısal hale getirerek bilgisayara aktarmaktadır. Bilgisayar veriler doğrultusunda yapılan bilgisayar programına uygun olarak hesaplama ve mantıksal işlemleri yaparak sonuçları istenilen şekilde vermektedir.

Sürtünme faktörünü ampirik ve deneysel olarak hesaplayabilmek için test bölgesinin giriş ve çıkışı arasında oluşacak basınç farkını okumak üzere bir U tipi manometre kullanıldı. Bu çalışmada yapılan verilerin değerlendirilmesi işlemi **Delphi 7.0** da yapılan bilgisayar programlama diliyle yapıldı.



Şekil 3.15 Deney sistemi



Şekil 3.16 Deney sistemi



Şekil 3.17 Trafo ve termokupullar

3.2 Metod

Bu çalışmanın sonuçları deneysel esaslar üzerine kuruldu. Isı transferi katsayısının korelasyonu için deneysel veriler kullanıldı. Korelâsyon denkleminin geliştirilmesi için ısı transferinin temel yasalarından, Fourier ısı iletim yasası ve Newton ‘un soğuma yasası ile termodinamiğin temel yasalarından yararlanıldı. Bu yasalarla birlikte özellikle mühendislikte uygulama kolaylığı nedeniyle ampirik bağıntının geliştirilmesinde **SPSS 11** istatistik paket proğramı kullanıldı.

BÖLÜM 4

TEORİ

4.1 Giriş

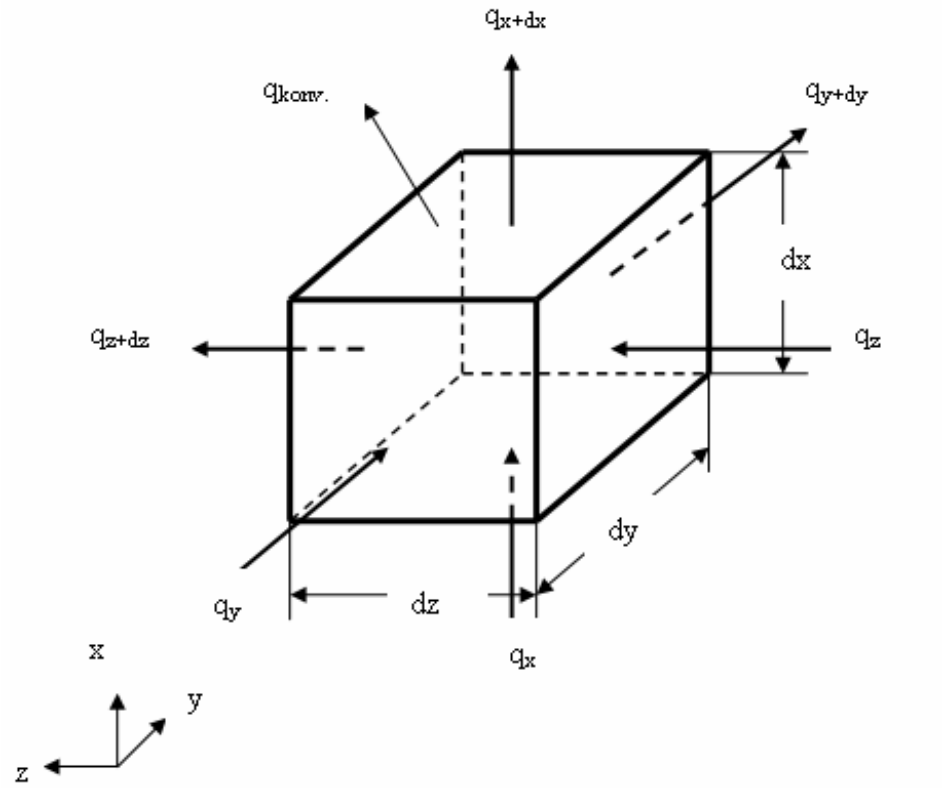
Alüminyum köpük esaslı ısı değiştiricisinin ısı transfer modelini kurabilmek için, kenarları dx, dy ve dz olan bir kontrol hacmi göz önüne alındı ve bu kontrol hacmine enerjinin korunumu yasası uygulandı. Alüminyum filamentler arasında iletimle, köpük boşlukları arasına ise taşınımla ısı transferi gerçekleşmektedir. Bu nedenle, ısı transferinin temel yasalarından Fourier ısı iletim yasası ve Newton'un soğuma yasası, yüzey porozitesi de dikkate alınarak yazıldı. Üç boyutlu olarak elde edilen ifadeyi çözebilmek için, ifade boyutsuz hale getirildi ve daha sonra sınır şartları uygulandı. Ön görülen sınır şartları için ifade integral formda yazılarak ifadenin integrali alındı ve kontrol hacmi için merkezi fark yazıldı. Dikkate alınan kontrol hacmi için merkezi fark yazılarak bilgisayar çözümü için uygun hale getirildi. Çözüm için **Turbo Pascal 7.0** programı kullanıldı. Çözümler için **Gauss – Seidel İterasyon Yöntemi** uygulandı ve grafikler bu çözüme göre elde edildi.

4.2 Isı Transferi Modeli

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, alüminyum köpüğe ait kontrol hacminde enerji dengesi,

$$q_x+q_y+q_z = q_{x+dx}+q_{y+dy}+q_{z+dz}+q_{conv} \tag{4.1}$$

şeklinde yazılabilir.



Şekil 4.1 Alüminyum köpük içinde kenarları dx,dy ve dz olan kontrol hacmi

Alüminyum köpükte bulunan katı kısımlar ile boşluklar için Fourier ısı iletim yasası ve Newton'un soğuma yasası kontrol hacminin yüzeyleri için aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$q_x = -k_s\, dy\, dz\, (1-\varepsilon)\, \frac{\partial T_{fm}}{\partial x} - k_f\, dy\, dz\, \varepsilon\, \frac{\partial T_{fm}}{\partial x} \tag{4.2}$$

$$q_y = -k_s\, dx\, dz\, (1-\varepsilon)\, \frac{\partial T_{fm}}{\partial y} - k_f\, dx\, dz\, \varepsilon\, \frac{\partial T_{fm}}{\partial y} \tag{4.3}$$

$$q_z = -k_s\, dx\, dy (1-\varepsilon)\, \frac{\partial T_{fm}}{\partial z} - k_f\, dx\, dy\, \varepsilon\, \frac{\partial T_{fm}}{\partial z} \tag{4.4}$$

$$q_{x+dx} = -k_s dydz(1-\varepsilon)\frac{\partial T_{fm}}{\partial x} - k_s dxdydz(1-\varepsilon)\frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial x^2}$$

$$-\varepsilon k_f dydz\frac{\partial T_{fm}}{\partial x}-\varepsilon k_f dxdydz\frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial x^2} \quad (4.5)$$

$$q_{y+dy}=-k_s dxdz(1-\varepsilon)\frac{\partial T_{fm}}{\partial y}-k_s dxdydz(1-\varepsilon)\frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial y^2}$$

$$-\varepsilon k_f dxdz\frac{\partial T_{fm}}{\partial y}-\varepsilon k_f dxdydz\frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial y^2} \quad (4.6)$$

$$q_{z+dz}=-k_s dxdy(1-\varepsilon)\frac{\partial T_{fm}}{\partial z}-k_s dxdydz(1-\varepsilon)\frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial z^2}$$

$$-\varepsilon k_f dydz\frac{\partial T_{fm}}{\partial z}-\varepsilon k_f dxdydz\frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial z^2} \quad (4.7)$$

İfadelerde yer alan katı parçacığın ve boşlukların alanı için,

$$A_{cond}=A_c-A_p \quad (4.8)$$

$$A_{cond}=A_c(1-\varepsilon) \quad (4.9)$$

$$dA_{cond(x)s}=(1-\varepsilon)\,dy\,dz \quad (4.10)$$

$$dA_{cond(x)f}=\varepsilon\,dy\,dz \quad (4.11)$$

$$dA_{cond(y)s}=(1-\varepsilon)\,dx\,dz \quad (4.12)$$

$$dA_{cond(y)f}=\varepsilon\,dx\,dz \quad (4.13)$$

$$dA_{cond(z)s}=(1-\varepsilon)\,dx\,dy \quad (4.14)$$

$$dA_{cond(z)f}=\varepsilon\,dx\,dy \quad (4.15)$$

bağıntıları yazılabilir.

Burada **s** indisi katı parçacığı, **f** indisi ise sıvı akışkanı ifade eder**. ε** yüzey porozitesi olup, aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\varepsilon = 1-(\frac{V_s}{V_{tot}}) \tag{4.16}$$

Kontrol hacminden taşınımla olan ısı transferi,

$$q_{conv.}=h_{fm}\,\sigma\,dx\,dy\,dz\,(T_{fm}-T_\infty) \tag{4.17}$$

şeklindedir. Burada **σ** üretici firmalar tarafından tanımlanan bir özellik olup; birim hacimdeki konvektif yüzey alanını gösterir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\sigma=\frac{A_{conv.}}{dx\,dy\,dz} \tag{4.18}$$

Yazılan bu ifadeler **(4.1)**' de yerine konulup gerekli sadeleştirmeler yapılırsa,

$$k_s(1-\varepsilon)(\frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial z^2})+\varepsilon\,k_f(\frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial z^2})-$$
$$h_{fm}\sigma(T_{fm}-T_\infty)=0 \tag{4.19}$$

bağıntısı elde edilir. **(4.19)** ifadesinde,

$$\frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial z^2}=\nabla^2 T_{fm} \tag{4.20}$$

olduğu hatırlanarak, **(4.19)** ifadesi yeniden,

$$k_s\,(1-\varepsilon)\;\nabla^2\,T_{fm}+\varepsilon\,k_f\,\nabla^2\,T_{fm}-h_{fm}\,\sigma\,(T_{fm}-T_\infty)=0 \tag{4.21}$$

şeklinde yazılabilir. Buradan $\nabla^2\,T_{fm}$,

$$\nabla^2 T_{fm}[k_s(1-\varepsilon) + \varepsilon k_f] = h_{fm}\sigma (T_{fm}-T_\infty)$$

$$\nabla^2 T_{fm} = \frac{h_{fm}\sigma(T_{fm}-T_\infty)}{k_s(1-\varepsilon)+\varepsilon k_f} \quad (4.22)$$

veya

$$\nabla^2 T_{fm} = \frac{h_{fm}\sigma}{k_s(1-\varepsilon)+\varepsilon k_f}(T_{fm}-T_\infty) \quad (4.23)$$

olacaktır. Bağıntı içinde bulunan sabit değerler için,

$$m^2_{fm} = \frac{h_{fm}\sigma}{k_s(1-\varepsilon)+\varepsilon k_f} \quad (4.24)$$

tanımı verilebilir. Buna göre **(4.22),**

$$\nabla^2 T_{fm} = m^2_{fm}(T_{fm}-T_\infty) \quad (4.25)$$

şeklini alır. **(4.25)** ifadesi açık şekilde yazılırsa,

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial T_{fm}}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial T_{fm}}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial T_{fm}}{\partial z}\right)- m^2_{fm}(T_{fm}-T_\infty)=0 \quad (4.26a)$$

Veya

$$\frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T_{fm}}{\partial z^2}- m^2_{fm}(T_{fm}-T_\infty)=0 \quad (4.26b)$$

sonucu elde edilir.

Burada akışkan giriş sıcaklığı $\mathbf{T_\infty}$, boyutsuz sıcaklık $\boldsymbol{\theta_{fm}}$ ve metal köpük tabanındaki sabit sıcaklık $\mathbf{T_b}$ olarak verildi. **(4.26b)** ile verilen bağıntının çözümü iki adımda yapılabilir.

4.2.1 Sınır Şartları

(4.26b) bağıntısı için sınır şartları,

$$x=0 \text{ da, } T_{fm}=T_b \quad \text{ve} \quad x=L\text{'de} \quad \frac{\partial T_{fm}}{\partial x}=0 \tag{4.27a}$$

$$y=0 \text{ da, } T_{fm}=T_b \quad \text{ve} \quad y=L\text{'de} \quad \frac{\partial T_{fm}}{\partial y}=0 \tag{4.27b}$$

$$z=0 \text{ da, } T_{fm}=T_b \quad \text{ve} \quad z=L\text{'de} \quad \frac{\partial T_{fm}}{\partial z}=0 \tag{4.27c}$$

şeklinde yazılabilir.

4.2.2 Boyutsuzlaştırma

(4.26b) ifadesini boyutsuz hale getirmek için;

$$X=\frac{x}{L}, \qquad Y=\frac{y}{L}, \qquad Z=\frac{z}{L} \tag{4.28}$$

ve boyutsuz sıcaklık için;

$$\theta_{fm}=\frac{T_{fm}-T_\infty}{T_b-T_\infty} \tag{4.29}$$

ifadeleri yazılabilir. (4.24) ifadesinde verilen ve sabit değerleri içeren $\mathbf{m^2_{fm}}$ ifadesi metal köpüğün boyu olan L'nin karesi ile çarpılarak boyutsuz yeni bir ifade aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$M^2=L^2\, m_{fm}^2 \tag{4.30}$$

(4.29) ifadesinden T_{fm} çekilirse,

$$T_{fm}= \theta_{fm}(T_b-T_\infty)+ T_\infty \tag{4.31}$$

elde dilir. **(4.28)** denkleminden,

$$x=X.L, \qquad y=Y.L, \qquad z=Z.L \tag{4.32}$$

ifadeleri **(4.26a)** denkleminde yerine yazılırsa,

$$\frac{\partial}{\partial XL}(\frac{\partial T_{fm}}{\partial XL})+\frac{\partial}{\partial YL}(\frac{\partial T_{fm}}{\partial YL})+\frac{\partial}{\partial ZL}(\frac{\partial T_{fm}}{\partial ZL})- m_{fm}^2(T_{fm}-T_\infty)=0$$

veya

$$\frac{\partial}{L^2\partial X}(\frac{\partial T_{fm}}{\partial X})+\frac{\partial}{L^2\partial Y}(\frac{\partial T_{fm}}{\partial Y})+\frac{\partial}{L^2\partial Z}(\frac{\partial T_{fm}}{\partial Z})- m_{fm}^2(T_{fm}-T_\infty)=0 \tag{4.33}$$

şeklinde elde edilir.

$\theta_{fm}=\theta$ kabulü ve T_{fm} yerine **(4.31)** bağıntısı yazılarak,

$$\frac{\partial}{L^2\partial X}\frac{\partial[\theta(T_b-T_\infty)+T_\infty]}{\partial X}+\frac{\partial}{L^2\partial Y}\frac{\partial[\theta(T_b-T_\infty)+T_\infty]}{\partial Y}$$

$$+\frac{\partial}{L^2\partial Z}\frac{\partial[\theta(T_b-T_\infty)+T_\infty]}{\partial Z}- m_{fm}^2\ [\theta(T_b-T_\infty)+T_\infty-T_\infty]=0$$

$$\frac{T_b-T_\infty}{L^2}(\frac{\partial^2\theta}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial Y^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial Z^2}-m_{fm}^2L^2\theta)=0 \tag{4.34}$$

Elde edilir.. **(4.34)** ifadesinde **(4.30)** bağıntısı kullanılırsa,

$$\frac{T_b - T_\infty}{L^2}(\nabla^2\theta - M^2\theta)=0 \qquad (4.35)$$

veya,

$$\nabla^2\theta - M^2\theta = 0 \qquad (4.36)$$

sonucu bulunur.

(4.36) ifadesi açık şekilde,

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial Y^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial Z^2}-M^2\theta=0 \qquad (4.37a)$$

veya

$$\frac{\partial}{\partial X}(\frac{\partial\theta}{\partial X})+\frac{\partial}{\partial Y}(\frac{\partial\theta}{\partial Y})+\frac{\partial}{\partial Z}(\frac{\partial\theta}{\partial Z})-M^2\theta=0 \qquad (4.37b)$$

şeklinde (4.26b) ifadesinin boyutsuz formu elde edilir.

Boyutsuz denklem için sınır şartları;

$$\text{x=0'da, X=}\frac{x}{L}\Rightarrow \text{X=0 için; } T_{fm}=T_b \text{ ve } \theta_{fm}(0,Y,Z)=\frac{T_b - T_\infty}{T_b - T_\infty}=1 \qquad (4.38a)$$

$$\text{y=0'da, Y=}\frac{y}{L}\Rightarrow \text{Y=0 için; } T_{fm}=T_b \text{ ve } \theta_{fm}(X,0,Z)=\frac{T_b - T_\infty}{T_b - T_\infty}=1 \qquad (4.38b)$$

$$\text{z=0'da, Z=}\frac{z}{L}\Rightarrow \text{Z=0 için; } T_{fm}=T_b \text{ ve } \theta_{fm}(X,Y,0)=\frac{T_b - T_\infty}{T_b - T_\infty}=1 \qquad (4.38c)$$

$$\text{x=L'de, X=}\frac{x}{L}\Rightarrow \text{X=1 için; } \frac{\partial\theta_{fm}}{\partial X}(1,Y,Z)=0 \qquad (4.39a)$$

y=L'de, $Y=\frac{y}{L} \Rightarrow$ Y=1 için; $\frac{\partial \theta_{fm}}{\partial Y}(X,1,Z)=0$ (4.39b)

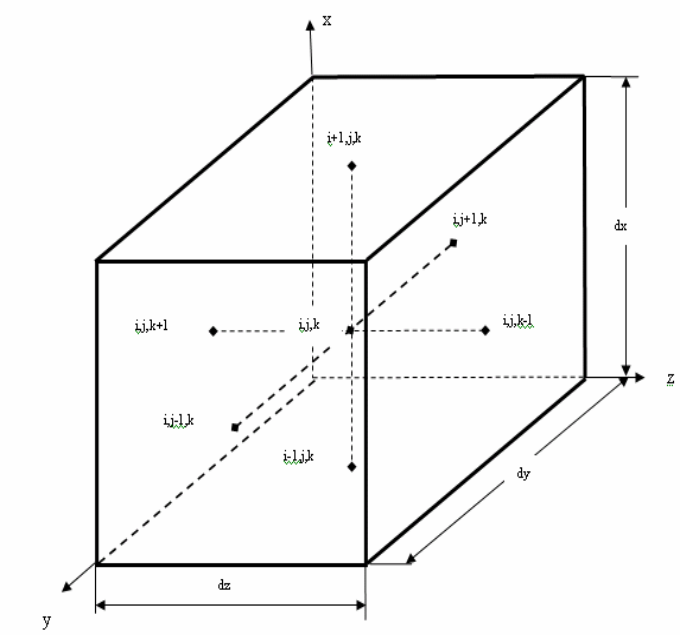
z=L'de, $Z=\frac{z}{L} \Rightarrow$ Z=1 için; $\frac{\partial \theta_{fm}}{\partial Z}(X,Y,1)=0$ (4.39c)

şeklinde yazılabilir.

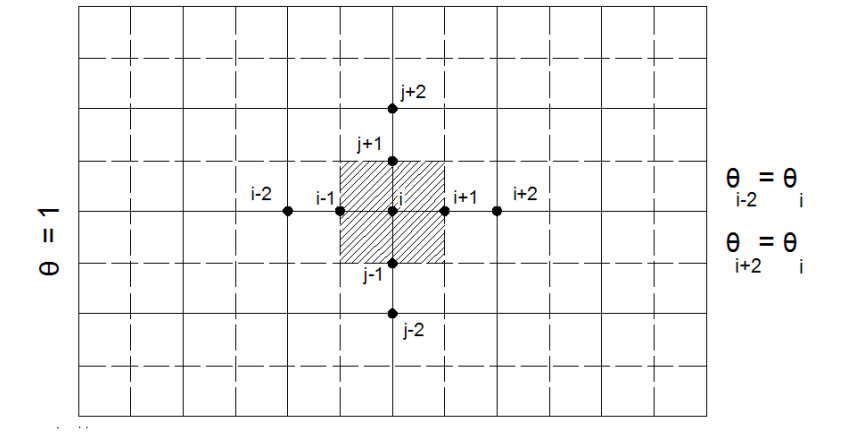
4.2.2.1 Boyutsuz Denklemin Ayrıklaştırılması

Diferansiyel denklemlerin sayısal çözümü için ayrıklaştırma gerekir. Ayrıklaştırma için çeşitli metotlar kullanılabilir. En çok kullanılan ayrıklaştırma metodu merkezi fark yöntemidir. Bu çalışmada merkezi fark yöntemi kullanıldı.

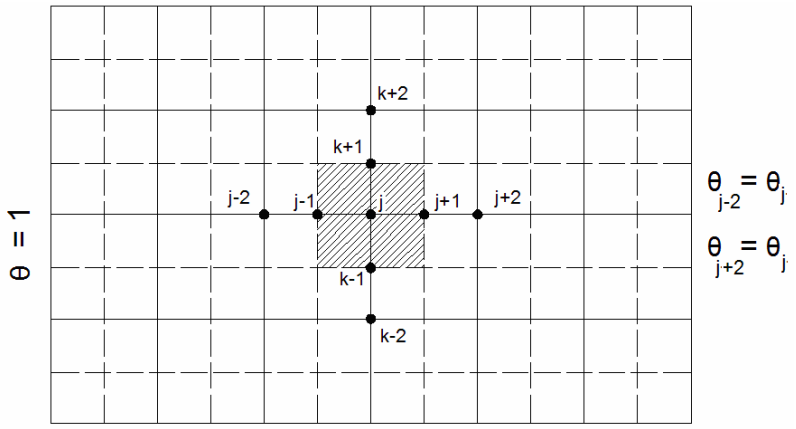
Şekil 4.2'de kenarları dx, dy ve dz olan bir kontrol hacmi dikkate alındı. Kontrol hacmin merkezinin koordinatları i, j ve k olsun. Dikkate alınan kontrol hacminin merkezi fark yöntemi θ - X, θ - Y ve θ – Z' e göre oluşturulan grid sistemleri **Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5**'de verildi.



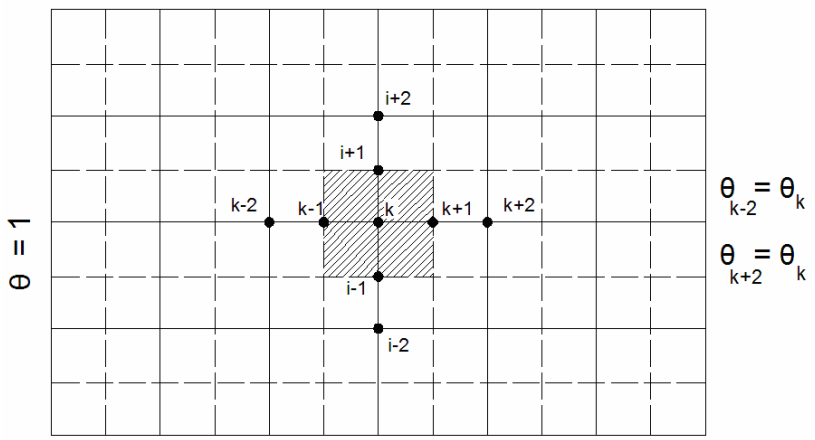
Şekil 4.2 Kontrol hacmi için merkezi fark



Şekil 4.3 θ – X'e göre oluşturulan grid



Şekil 4.4 θ – Y'ye göre oluşturulan grid



Şekil 4.5 θ – Z'ye göre oluşturulan grid

Şekil 4.2'de verilen kontrol hacmi dikkate alınarak **(4.37b)** bağıntısı integral formda, aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\int_{k-1}^{k+1}\int_{j-1}^{j+1}\int_{i-1}^{i+1}\frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{\partial\theta}{\partial X}\right)\mathrm{dXdYdZ}+\int_{k-1}^{k+1}\int_{i-1}^{i+1}\int_{j-1}^{j+1}\frac{\partial}{\partial Y}\left(\frac{\partial\theta}{\partial Y}\right)\mathrm{dYdXdZ}$$
$$+\int_{i-1}^{i+1}\int_{j-1}^{j+1}\int_{k-1}^{k+1}\frac{\partial}{\partial Z}\left(\frac{\partial\theta}{\partial Z}\right)\mathrm{dZdYdX}-\int_{k-1}^{k+1}\int_{j-1}^{j+1}\int_{i-1}^{i+1}M^2\theta\ \mathrm{dXdYdZ}=0 \qquad (4.40)$$

dX, dY ve dZ için verilen sınır şartları dikkate alınarak (4.39) ifadesinin integrali alınırsa;

$$\left[\frac{d\theta}{dX}\Big|_{i+1}-\frac{d\theta}{dX}\Big|_{i-1}\right]\Delta\mathrm{Y}\Delta\mathrm{Z}+\left[\frac{d\theta}{dY}\Big|_{j+1}-\frac{d\theta}{dY}\Big|_{j-1}\right]\Delta\mathrm{X}\Delta\mathrm{Z}$$
$$+\left[\frac{d\theta}{dZ}\Big|_{k+1}-\frac{d\theta}{dZ}\Big|_{k-1}\right]\Delta\mathrm{X}\Delta\mathrm{Y}-\int_{k-1}^{k+1}\int_{j-1}^{j+1}\int_{i-1}^{i+1}M^2\theta\ \mathrm{dXdYdZ}=0 \qquad (4.41)$$

elde edilir. Verilen bağıntıda i+1, i-1, j+1, j-1, k+1, k-1 noktaları civarında sayısal türevler için aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$\left[\frac{\theta_{i+2}-\theta_i}{(\delta X)_{i+1}}-\frac{\theta_i-\theta_{i-2}}{(\delta X)_{i-1}}\right]\Delta\mathrm{Y}\Delta\mathrm{Z}+\left[\frac{\theta_{j+2}-\theta_j}{(\delta Y)_{j+1}}-\frac{\theta_j-\theta_{j-2}}{(\delta Y)_{j-1}}\right]\Delta\mathrm{X}\Delta\mathrm{Z}$$
$$+\left[\frac{\theta_{k+2}-\theta_k}{(\delta Z)_{k+1}}-\frac{\theta_k-\theta_{k-2}}{(\delta Z)_{k-1}}\right]\Delta\mathrm{X}\Delta\mathrm{Y}-\int_{k-1}^{k+1}\int_{j-1}^{j+1}\int_{i-1}^{i+1}M^2\theta\ \mathrm{dXdYdZ}=0 \qquad (4.42)$$

(4. 42) bağıntısındaki son terim;

$$\int_{k-1}^{k+1}\int_{j-1}^{j+1}\int_{i-1}^{i+1}M^2\theta\ \mathrm{dXdYdZ}=\overline{S}\ \Delta\mathrm{X}\Delta\mathrm{Y}\Delta\mathrm{Z} \qquad (4.43)$$

şeklinde verilebilir. Burada $\overline{S}$ lineerleştirilmiş kaynak teriminin ortalama değeri olup,

$$\overline{S} = \text{Sc+Sp } \theta \tag{4.44}$$

şeklinde tanımlanır. **(4. 44)** ile verilen ifade de **Sc**; lineerleştirilmiş kaynak terimin sabit kısmı, **Sp** ise lineerleştirilmiş kaynak terimindeki sıcaklık katsayısıdır.
Bu durumda (4. 41) bağıntısı,

$$\left[\frac{\theta_{i+2}-\theta_i}{(\delta X)_{i+1}}-\frac{\theta_i-\theta_{i-2}}{(\delta X)_{i-1}}\right]\Delta \text{Y}\,\Delta \text{Z}+\left[\frac{\theta_{j+2}-\theta_j}{(\delta Y)_{j+1}}-\frac{\theta_j-\theta_{j-2}}{(\delta Y)_{j-1}}\right]\Delta \text{X}\,\Delta \text{Z}$$

$$+\left[\frac{\theta_{k+2}-\theta_k}{(\delta Z)_{k+1}}-\frac{\theta_k-\theta_{k-2}}{(\delta Z)_{k-1}}\right]\Delta \text{X}\,\Delta \text{Y}-(\text{Sc+Sp }\theta)\,\Delta \text{X}\,\Delta \text{Y}\,\Delta \text{Z}=0 \tag{4.45}$$

olarak elde edilir. $a_{i,j,k}$ için aşağıdaki verilen ifade yazılabilir. **(4. 45)** ifadesinin bilgisayar programına uygun hale getirilmesi için kompakt formda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$a_{Pi,j,k}.\theta_{i,j,k}=a_{Ei,j,k}.\theta_{i+2,j,k}+a_{Wi,j,k}.\theta_{i-2,j,k}+a_{Ni,j,k}.\theta_{i,j+2,k}$$
$$+a_{Si,j,k}.\theta_{i,j2,k}+a_{Ti,j,k}.\theta_{i,j,k+2}+a_{Bi,j,k}.\theta_{i,j,k-2}+b \tag{4.46}$$

$$a_{P\,i,j,k} = a_{E\,i,j,k} + a_{W\,i,j,k} + a_{N\,i,j,k} + a_{S\,i,j,k} + a_{T\,i,j,k} + a_{B\,i,j,k}+\text{Sp} \tag{4.47}$$

$$a_{Ei,j,k}=\frac{(\Delta Y)_{i,j,k}.(\Delta Z)_{i,j,k}}{(\delta X)_{i+1,j,k}} \tag{4.48a}$$

$$a_{Wi,j,k}=\frac{(\Delta Y)_{i,j,k}.(\Delta Z)_{i,j,k}}{(\delta X)_{i-1,j,k}} \tag{4.48b}$$

$$a_{Ni,j,k}=\frac{(\Delta X)_{i,j,k}.(\Delta Z)_{i,j,k}}{(\delta Y)_{i,j+1,k}} \tag{4.48c}$$

$$a_{Si,j,k}=\frac{(\Delta X)_{i,j,k}.(\Delta Z)_{i,j,k}}{(\delta Y)_{i,j-1,k}} \tag{4.48d}$$

$$a_{Ti,j,k}=\frac{(\Delta X)_{i,j,k}.(\Delta Y)_{i,j,k}}{(\delta Z)_{i,j,k+1}} \qquad (4.48e)$$

$$a_{Bi,j,k}=\frac{(\Delta X)_{i,j,k}.(\Delta Y)_{i,j,k}}{(\delta Z)_{i,j,k-1}} \qquad (4.48f)$$

burada b=Sc=0 ve Sp=-M^2 şeklinde tanımlanabilir.

4.2.2 Sınır Şartlarının Ayrıklaştırılması

(4.38a)'ya göre X=0'da θ_{fm}=1 dır.

(4.39a)'ya göre X=1'de

$\frac{\partial \theta_{fm}}{\partial X}$=0 dır. Buna göre $\left.\frac{\partial \theta_{fm}}{\partial X}\right)_e=\frac{\theta_{i+2}-\theta_i}{(\delta X)_e}$, $\theta_{i+2}=\theta_i$

olduğu anlaşılır.

Aynı şekilde $\left.\frac{\partial \theta_{fm}}{\partial X}\right)_w=\frac{\theta_i-\theta_{i-2}}{(\delta X)_w}$ de $\theta_{i-2}=\theta_i$

olur.

(4.45) denklemi,

$$\left[\frac{\theta_{j+2}-\theta_j}{(\delta Y)_{j+1}}-\frac{\theta_j-\theta_{j-2}}{(\delta Y)_{j-1}}\right]\Delta X\Delta Z+\left[\frac{\theta_{k+2}-\theta_k}{(\delta Z)_{k+1}}-\frac{\theta_k-\theta_{k-2}}{(\delta Z)_{k-1}}\right]\Delta X\Delta Y$$

$$-(Sc+Sp\ \theta)\Delta X\Delta Y\Delta Z=0 \qquad (4.49)$$

halini alır.

(4.46) ve **(4.47)** denklemlerinden yararlanılarak ayrıklaştırılmış **(4.49)** ifadesi kompakt formda;

$$a_{Ei,j,k}=0; \qquad (4.50a)$$

$a_{Wi,j,k}=0;$ (4.50b)

$$a_{Ni,j,k}=\frac{(\Delta X)_{i,j,k}.(\Delta Z)_{i,j,k}}{(\delta Y)_{i,j+1,k}} \quad (4.50c)$$

$$a_{Si,j,k}=\frac{(\Delta X)_{i,j,k}.(\Delta Z)_{i,j,k}}{(\delta Y)_{i,j-1,k}} \quad (4.50d)$$

$$a_{Ti,j,k}=\frac{(\Delta X)_{i,j,k}.(\Delta Y)_{i,j,k}}{(\delta Z)_{i,j,k+1}} \quad (4.50e)$$

$$a_{Bi,j,k}=\frac{(\Delta X)_{i,j,k}.(\Delta Y)_{i,j,k}}{(\delta Z)_{i,j,k-1}} \quad (4.50f)$$

şeklinde yazılabilir.

(4.38b)'ya göre Y=0'da $\theta_{fm}=1$ dır.

(4.39b)'ya göre Y=1'de

$\frac{\partial \theta_{fm}}{\partial Y}=0$ dır. Buna göre $\left.\frac{\partial \theta_{fm}}{\partial Y}\right)_n=\frac{\theta_{j+2}-\theta_j}{(\delta Y)_n}$, $\theta_{j+2}=\theta_j$

olduğu anlaşılır.

Aynı şekilde $\left.\frac{\partial \theta_{fm}}{\partial Y}\right)_s=\frac{\theta_j-\theta_{j-2}}{(\delta Y)_s}$ de $\theta_{j-2}=\theta_j$

olur.

(4.45) denklemi,

$$\left[\frac{\theta_{i+2}-\theta_i}{(\delta X)_{i+1}}-\frac{\theta_i-\theta_{i-2}}{(\delta X)_{i-1}}\right]\Delta Y\Delta Z+\left[\frac{\theta_{k+2}-\theta_k}{(\delta Z)_{k+1}}-\frac{\theta_k-\theta_{k-2}}{(\delta Z)_{k-1}}\right]\Delta X\Delta Y$$

$$-(Sc+Sp\ \theta)\Delta X\Delta Y\Delta Z=0 \quad (4.51)$$

şeklinde yazılabilir. (**4.46)** ve **(4.47)** denklemlerinden yararlanılarak ayrıştırılmış **(4.51)** ifadesi kompakt formda;

$$a_{Ei,j,k}=\frac{(\Delta Y)_{i,j,k}.(\Delta Z)_{i,j,k}}{(\delta X)_{i+1,j,k}} \qquad (4.52a)$$

$$a_{Wi,j,k}=\frac{(\Delta Y)_{i,j,k}.(\Delta Z)_{i,j,k}}{(\delta X)_{i-1,j,k}} \qquad (4.52b)$$

$$a_{Ni,j,k}=0; \qquad (4.52c)$$

$$a_{Si,j,k}=0; \qquad (4.52d)$$

$$a_{Ti,j,k}=\frac{(\Delta X)_{i,j,k}.(\Delta Y)_{i,j,k}}{(\delta Z)_{i,j,k+1}} \qquad (4.52e)$$

$$a_{Bi,j,k}=\frac{(\Delta X)_{i,j,k}.(\Delta Y)_{i,j,k}}{(\delta Z)_{i,j,k-1}} \qquad (4.52f)$$

şeklinde yazılabilir.

(4.38c)'ya göre Z=0'da θ_{fm}=1 dır.

(4.39c)'ya göre Z=1'de

$\frac{\partial \theta_{fm}}{\partial Z}$ =0 dır.

Buna göre $\frac{\partial \theta_{fm}}{\partial Z}\Big)_t=\frac{\theta_{k+2}-\theta_k}{(\delta Z)_t}$, $\theta_{k+2}=\theta_k$

olduğu anlaşılır.

$\frac{\partial \theta_{fm}}{\partial Z}\Big)_b=\frac{\theta_k-\theta_{k-2}}{(\delta Z)_b}$ de $\theta_{k-2}=\theta_k$

olur. **(4.45)** denklemi,

$$\left[\frac{\theta_{i+2}-\theta_i}{(\delta X)_{i+1}}-\frac{\theta_i-\theta_{i-2}}{(\delta X)_{i-1}}\right]\Delta Y\Delta Z+\left[\frac{\theta_{j+2}-\theta_j}{(\delta Y)_{j+1}}-\frac{\theta_j-\theta_{j-2}}{(\delta Y)_{j-1}}\right]\Delta X\Delta Z$$

$$-(Sc+Sp\ \theta)\Delta X\Delta Y\Delta Z=0 \tag{4.53}$$

(4.46) ve **(4.47)** denklemlerinden yararlanılarak ayrıklaştırılmış **(4.53)** ifadesi kompakt formda;

$$a_{Ei,j,k}=\frac{(\Delta Y)_{i,j,k}.(\Delta Z)_{i,j,k}}{(\delta X)_{i+1,j,k}} \tag{4.54a}$$

$$a_{Wi,j,k}=\frac{(\Delta Y)_{i,j,k}.(\Delta Z)_{i,j,k}}{(\delta X)_{i-1,j,k}} \tag{4.54b}$$

$$a_{Ni,j,k}=\frac{(\Delta X)_{i,j,k}.(\Delta Z)_{i,j,k}}{(\delta Y)_{i,j+1,k}} \tag{4.54c}$$

$$a_{Si,j,k}=\frac{(\Delta X)_{i,j,k}.(\Delta Z)_{i,j,k}}{(\delta Y)_{i,j-1,k}} \tag{4.54d}$$

$$a_{Ti,j,k}=0; \tag{4.54e}$$

$$a_{Bi,j,k}=0; \tag{4.54f}$$

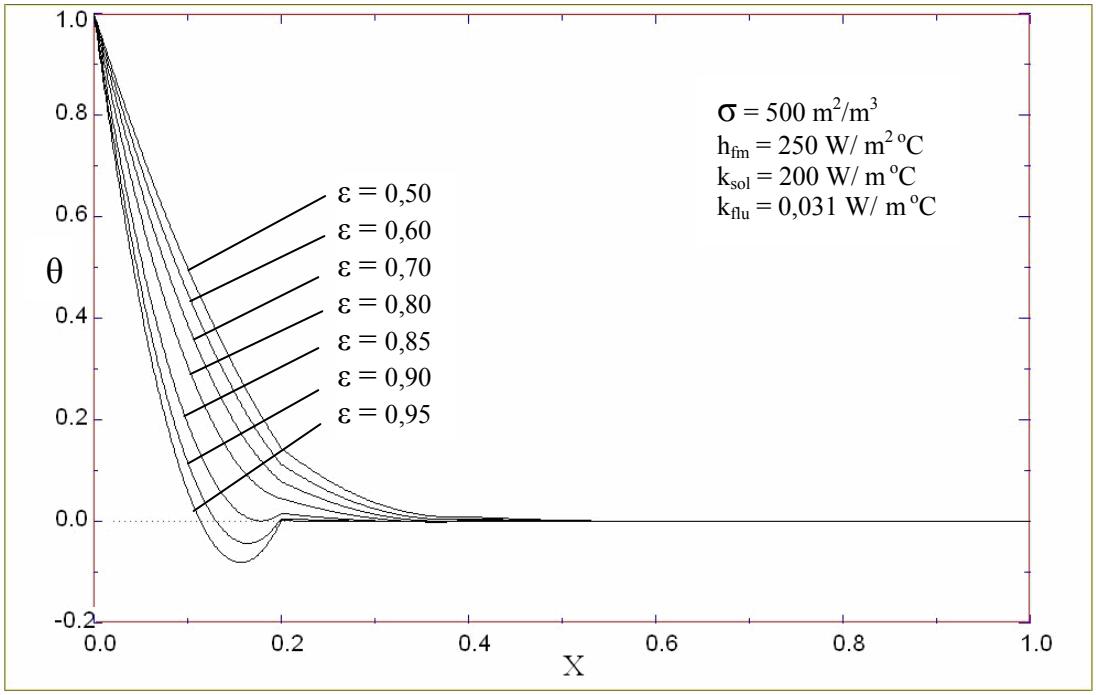
şeklinde yazılabilir.

Elde edilen bu denklemlerin çözümü için **Turbo Pascal 7.0**'da proğram hazırlandı ve **Gaus Seidel İterasyon yöntemi** ile modelin grafikleri çıkarıldı. Proğramın bir bölümü ise **Ek-2**'de verildi.

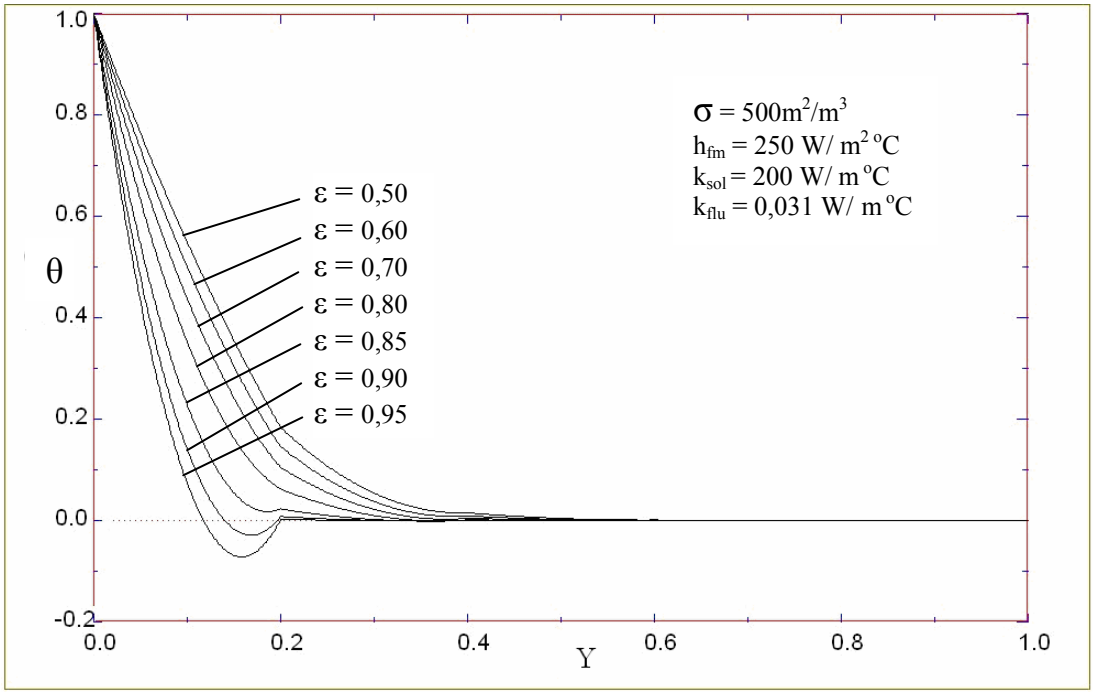
4.3 Nümerik Çalışma

Alüminyum köpüğün porozitesi 0,50-0,95 arasında değiştiği kabul edildi. Birim hacimdeki konvektif yüzey alanı olarak verilen **σ** üretici firmalar tarafından verilir. **(4.36)** bağıntısında sabit değerleri karakterize eden **(4.24)** ifadesinde **σ,** h_{fm} k_{sol} ve k_{flu} sabit tutulup, porozite **(ε)** değiştirildi. Diğer taraftan ε, h_{fm}, k_{sol} ve k_{flu} sabit tutularak **σ** değiştirildi. **θ-X, θ-Y ve θ-Z'**e göre değişimler grafik olarak **Şekil 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10** ve **4.11**'de gösterildi.

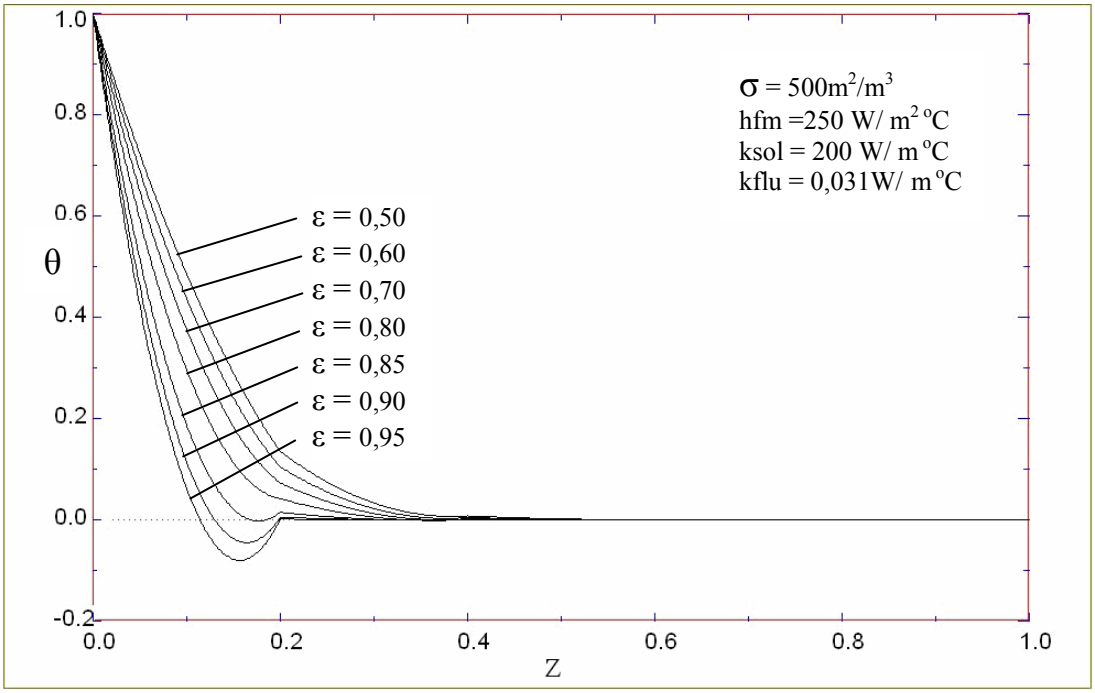
Burada porozite arttıkça sıcaklığın düştüğü **X,Y** ve **Z** değerlerinin merkeze yakın olduğu görülmektedir. Daha düşük porozite değerlerinde ise **θ** değerlerinin daha büyük olduğu gözlenmektedir. **σ** değerleri büyüdükçe **X, Y** ve **Z** değerlerinin küçüldüğü ve sıcaklık değerlerinin düştüğü gözlenmektedir. Daha küçük **σ** değerleri için **X, Y** ve **Z** değerleri büyümektedir.



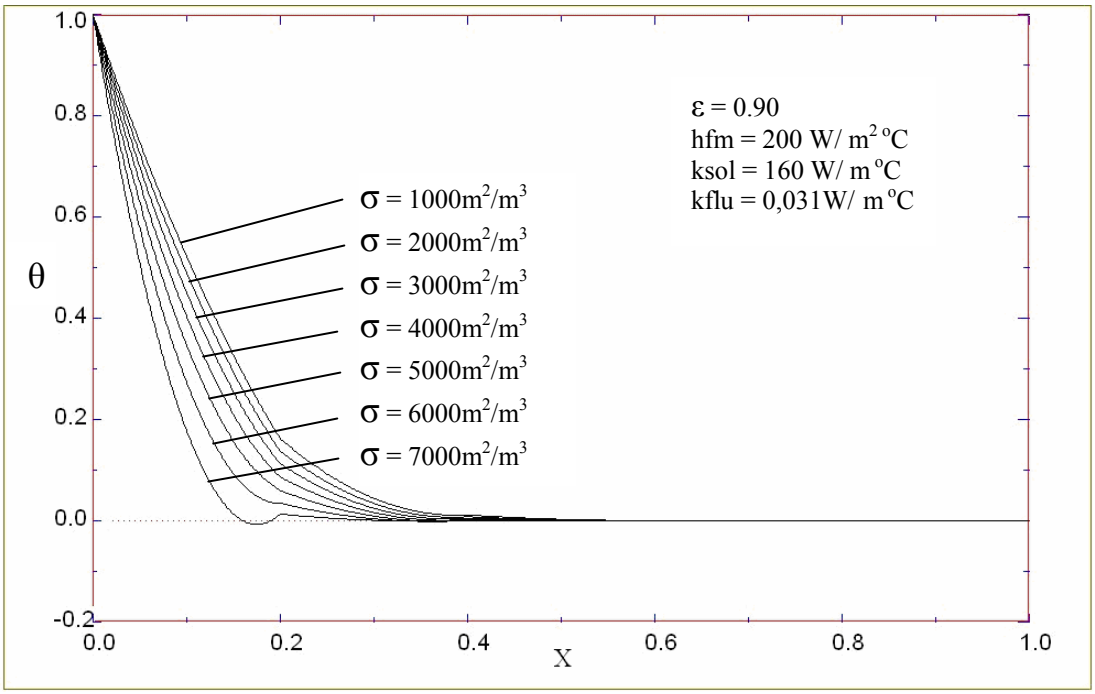
Şekil 4.6 Boyutsuz θ-X'in **ε**'a göre değişimi



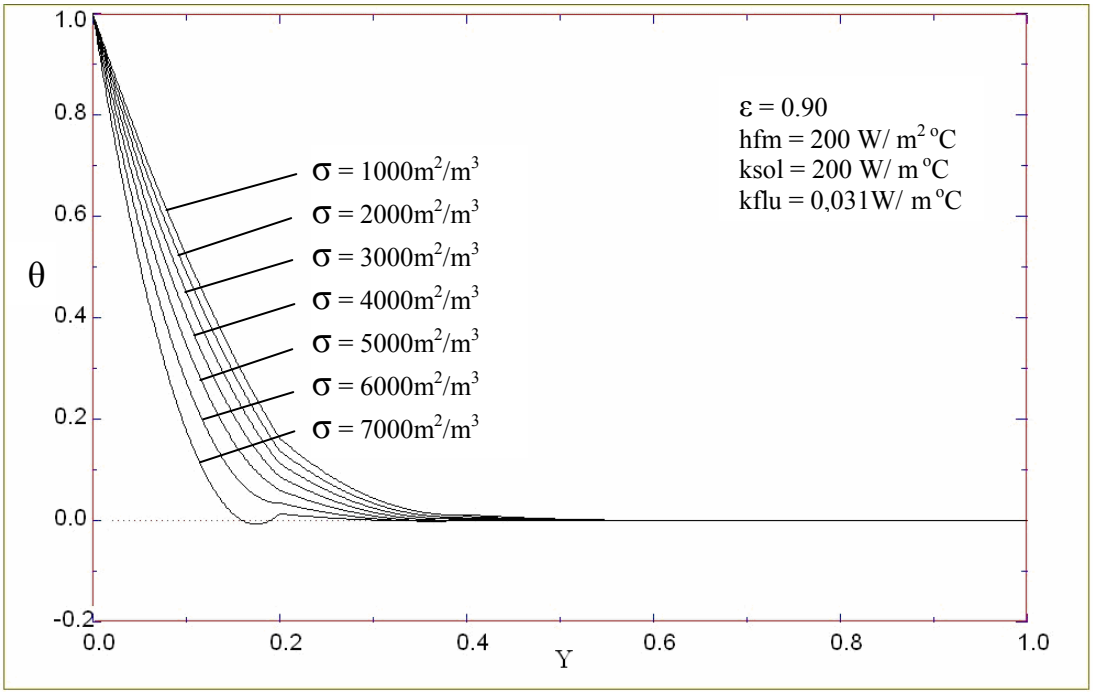
Şekil 4.7 Boyutsuz θ-Y'nin **ε**'a göre değişimi



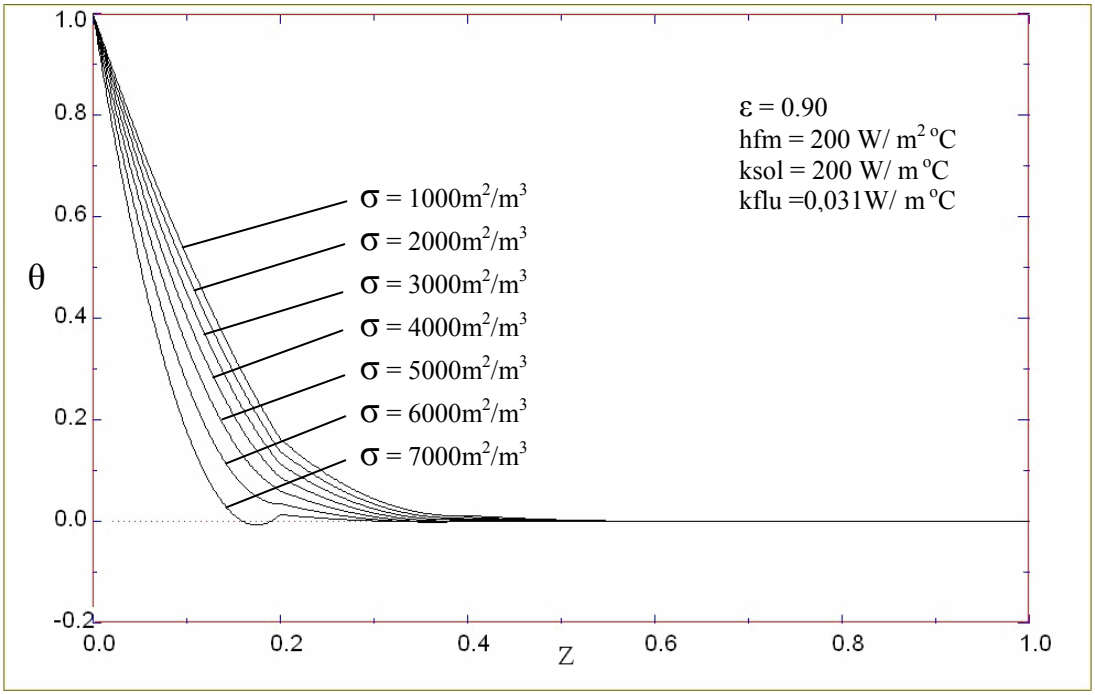
Şekil 4.8 Boyutsuz θ-Z'nin **ε**'a göre değişimi



Şekil 4.9 Boyutsuz θ-X'in σ'ya göre değişimi



Şekil 4.10 Boyutsuz θ-Y'nin σ'ya göre değişimi



Şekil 4.11 Boyutsuz θ-Z'nin σ'ya göre değişimi

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1 Giriş

Alüminyum köpük ısı değiştiricisi test ünitesi üzerinde yapılan deneyler, S.Ü. Makine Mühendisliği ısı laboratuarında gerçekleştirildi. Deneylerde bir kısım değerler deneye başlamadan önce, bazıları deney verilerinden, bir kısım değerler ise deney verilerine karşılık gelen tablolardan alındı. Deneyde kullanılan sıcak akışkan su olup, sıcaklığı depo içine yerleştirilen 2 kW gücünde bir ısıtıcı yardımı ile sağlandı ve sıcaklığı termostat ile ayarlandı. Suyun sıcaklığı istenilen seviyeye gelinceye kadar beklendi. Su sıcaklığı istenilen değere ulaşınca, deney düzeneği üzerinde bulunan ve bir invertör yardımıyla kontrol edilen soğuk akışkan olan hava ısı değiştiricisi üzerine çapraz olarak gönderildi. Hava hızı %1 hassasiyetle ayarlanabilmektedir. Bu hızda sistemin rejime girmesi beklendi. Bu durum bilgisayar ekranından gözlendi. Sistem rejime girdikten sonra "**deneye başla**" butonu ile deney başlatıldı. Hava hızı ve basınç düşümü elle bilgisayar ekranına girildi. "**Deney sonuçlarını al**" butonu ile belirlenen hıza ait sıcaklıklar ve onlara karşılık gelen tablo değerleri tablolardan alındı ve ilgili formüllerden hesaplamalar yapılarak çizelge şeklinde kaydedildi. Her hız için bu işlemler tekrarlandı.

PPI 10 için 0,5 m/sn hızdan başlanarak 0,5 m/sn aralıklarla 8 m/sn hıza kadar çıkılarak her bir ısı değiştiricisi için 16 deney yapıldı. Değişik sıcaklık kademelerinde bu deneyler 6 kez tekrarlanarak toplam 96 deney verisi alındı.

PPI 20 için 0,5 m/sn hızdan başlanarak 0,5 m/sn aralıklarla 7 m/sn hıza kadar çıkılarak 14 deney yapıldı. Değişik sıcaklık kademelerinde bu deneyler 6 kez tekrarlanarak toplam 84 deney verisi alındı.

PPI 30 için 0,5 m/sn hızdan başlanarak 0,5 m/sn aralıklarla 6 m/sn hıza kadar çıkılarak 12 deney yapıldı. Değişik sıcaklık kademelerinde bu deneyler 6 kez tekrarlanarak toplam 72 deney verisi alındı.

Sıcak akışkan olarak kullanılan su ve soğuk akışkan olarak kullanılan hava ya ait 0^oC - $150\ ^oC$ arasındaki tüm değerler bilgisayar proğramına daha önce yüklendi. Her hız ve sıcaklık değerinde hava ve suya ait olan özellikler değişmektedir. Değişen bu değerleri bilgisayar proğramı doğrudan kullanmaktadır. Toplam deney sayısı 500' ü bulmakla birlikte, bunların sadece 252' si değerlendirildi. Deneylerde ölçülen datalar **EK-3'**de her biri için tablolar halinde verildi. Deney sonuçları **SPSS 11 istatistik paket proğram** yardımı ile korelasyon denklemleri elde edildi. PPI 10, 20 ve 30 için **SPSS 11 istatistik paket proğramı** ile elde edilen sonuçlar **EK-4**'de verildi. Deney sonuçları ve denklemler Microsost Office Excel programı yardımıyla grafikleri çizilerek değerlendirildi.

Programın hazırlanması aşamasında sabit olan değerler; sıcak akışkanın (suyun) kütlesel debisi **(** $\dot{m}_h$ **),** porozite **(** ε **=0,90),** Alüminyum köpüğün katı kısmının hacmi **(V_s),** Alüminyum köpüğün toplam hacmi **(V_{tot}),** akış yönüne paralel sıra sayısı **(** N_T **=9),** akış yönüne dik sıra sayısı **(N_L =4),** akış yönüne dik eksenler arası mesafe (S_T **=0,040 m),** akış yönüne paralel eksenler arası mesafe **(** S_L **=0,020 m),** boru sayısı **(N=18),** derinlik **(Z =1),** boru çapı **(d =0,010 m),** hidrolik çap **(d_h =0,20m),** çevre uzunluğu **(P=4x0,020m),** kanal akış alanı **(A =0,020mx0,020m) ve** kanalın bir kenarının uzunluğu **(a=0,020m)** sisteme girildi.

Deneyin yapılışı esnasında değişken olan soğuk akışkanın (hava) kütlesel debisi **(** $\dot{m}_c$ **)** ve soğuk akışkanın (hava) hızı **(** U_∞ **)** her deney kademesinde ayrı ayrı girildi. Yine her deney kademesinde; sıcak akışkanın (su) giriş sıcaklığı **(T_{hg}),** sıcak akışkanın (su) çıkış sıcaklığı **(** $T_{hç}$ **)** soğuk akışkanın (hava) giriş sıcaklığı **(T_{cg}),** soğuk akışkanın (hava) çıkış sıcaklığı **(** $T_{cç}$ **),** su girişindeki boru cidar sıcaklığı (T_{hgw} **)** ve su çıkışındaki boru cidar sıcaklığı **(** $T_{hçw}$ **)** sıcaklık değerleri

termokupullarla ilgili noktalardan ölçüldü ve yazılan proğramla bilgisayar ortamına aktarıldı.

Sıcak ve soğuk akışkana ait özellikler film sıcaklığında alındı. Buna göre sıcak akışkanın (su) özgül ısısı (c_{ph}), $\frac{T_{hg}+T_{hç}}{2}$, soğuk akışkanın (hava) özgül ısısı (c_{pc}), $\frac{T_{cg}+T_{cç}}{2}$, soğuk akışkanın (hava) yoğunluğu (ρ_c), $\frac{T_{cg}+T_{cç}}{2}$, kinematik viskozite (ν), $\frac{T_{cg}+T_{cç}}{2}$, dinamik viskozite (μ), $\frac{T_{cg}+T_{cç}}{2}$ akışkan film sıcaklığında Prandl sayısı (Pr_∞), cidar sıcaklığında Prandl sayısı $(\mathbf{Pr_w})$, $(\mathbf{T_{hgw}+T_{hçw}})/\mathbf{2}$ sıcaklıklarındaki değerleri tablodan alındı.

Sıcak akışkanın verdiği ısı,

$$q = \dot{m}_h c_{ph} (T_{hg} - T_{hç}) \qquad (5.1)$$

Soğuk akışkanın aldığı ısı,

$$q = \dot{m}_c c_{pc} (T_{cç} - T_{cg}) \qquad 5.2)$$

$$\text{Porozite} \quad \varepsilon_p = (1 - \frac{V_s}{V_{tot}}) \qquad (5.3)$$

şeklindedir.

$C_h > C_c$ olduğundan $C_{min} = C_c$ dir.

Isı değiştiricisinin etkenliği için aşağıdaki bağıntı yazılabilir.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{C_c (T_{cç} - T_{cg})}{C_{min} (T_{hg} - T_{cg})} \qquad (5.4)$$

bağıntısı elde edilir.

Taşınımla transfer olan ısı,

$$q = \bar{h}.A(\frac{T_{hgw} + T_{hçw}}{2} - \frac{T_{cg} + T_{cç}}{2}) \quad (5.5)$$

$$q = \bar{h}.(\pi.N.d.Z).(\frac{T_{hgw} + T_{hçw}}{2} - \frac{T_{cg} + T_{cç}}{2}) \quad (5.6)$$

şeklinde yazılabilir. Aynı zamanda soğuk akışkanın aldığı ısı aşağıdaki gibi verilebilir.

$$q = \dot{m}_c c_{pc}(T_{cç} - T_{cg}) = \rho_c.N_T.S_T.Z.\ U_\infty.c_{pc}(T_{cç} - T_{cg}) \quad (5.7)$$

Buradan taşınım katsayısı için,

$$\bar{h} = \frac{\rho_c.N_T.S_T.Z.U_\infty.c_{pc}(T_{cç} - T_{cg})}{(\pi.N.d.Z)(\frac{T_{hg} + T_{hç}}{2} - \frac{T_{cg} + T_{cç}}{2})} \quad (5.8)$$

bağıntısı yazılabilir.

Nusselt sayısı,

$$Nu = \frac{\bar{h}.d_h}{k} \quad (5.9)$$

Hidrolik çap,

$$d_h = \frac{4.A}{P} = \frac{4.a^2}{P} \quad (5.10)$$

Reynolds sayısı,

$$Re_{dmax} = \frac{d_h.U_\infty}{\nu} \quad (5.11)$$

olarak yazılır. Sürtünme faktörü ise,

$$f = \frac{\Delta P}{4.\left(\frac{L_b}{d_h}\right).\left(\frac{\rho_c . u_\infty^{\,2}}{2}\right)} \qquad (5.12)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Bilindiği gibi, Nusselt sayısı Re ve Pr sayılarının bir fonksiyonudur. Bu nedenle, Nu sayısını porozite ve etkenlik de dikkate alınarak aşağıdaki gibi yazmak mümkündür.

$$\overline{Nu} = a.(Re)^b.(\varepsilon_p)^c(\varepsilon_t)^d\left(\frac{Pr_\infty}{Pr_w}\right)^e \qquad (5.13)$$

Burada etkenlik ve porozite doğrudan Re sayısına etkisi nedeniyle, **(5.13)** ile verilen bağıntıda bu terimler ihmal edilebilir. Buna göre **(5.13)** bağıntısı yeniden aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\overline{Nu} = a.(Re)^b.\left(\frac{Pr_\infty}{Pr_w}\right)^c \qquad (5.14)$$

Verilen bu ifadede a, b ve c katsayılarını bulmak için her iki tarafın log alınarak;

$$\log \overline{Nu} = \log a + b*\log Re + c*\log\left(\frac{Pr_\infty}{Pr_w}\right) \qquad (5.15)$$

şeklinde lineer regresyon modeli elde edilir. Regresyon parametresi **SPSS 11** istatistik paket proğramı ile analiz edildiğinde korelasyon denklemleri;

PPI 10 için r=0,977 ve

$$\overline{Nu} = (13{,}423).(Re)^{0{,}727}.\left(\frac{Pr_\infty}{Pr_w}\right)^{1.216} \quad (5.16)$$

PPI 20 için r=0,985 ve

$$\overline{Nu} = (4{,}508).(Re)^{0{,}839}.\left(\frac{Pr_\infty}{Pr_w}\right)^{0{,}999} \quad (5.17)$$

PPI 30 için r=0,997 ve

$$\overline{Nu} = (0{,}223).(Re)^{0{,}863}.\left(\frac{Pr_\infty}{Pr_w}\right)^{-0{,}676} \quad (5.18)$$

Tüm sistem için r=0,913 ve

$$\overline{Nu} = (0{,}633).(Re)^{0{,}290}.\left(\frac{Pr_\infty}{Pr_w}\right)^{-3{,}249} \quad (5.19)$$

şeklinde elde edilmiştir. Çalışma Reynolds sayısının $5.000 \leq Re \leq 90.000$ aralıklarında gerçekleştirildi.

Sürtünme faktörü fonksiyon olarak;

$$f = f(u, d, \rho, \mu) \quad (5.20)$$

şeklinde yazılabilir. Bu değişkenler sürtünme faktörünün değişkenleridir. Bu nedenle (5.20) ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$f = f(Re) \quad (5.21)$$

Buna göre sürtünme faktörü

$$f = a.(Re)^{b} \quad (5.22)$$

şeklinde yazılabilir. Model parametresi olan a ve b yi tahmin etmek için her iki tarafın log alınarak;

$$\log f = \log a + b.\log Re \quad (5.23)$$

şeklinde lineer regresyon modeli elde edilir.

Regresyon parametresi SPSS 11 istatistik paket proğramı ile analiz edildiğinde korelasyon denklemleri;

PPI 10 için r=0,755 ve

$$f = (0,8589).(Re)^{-0,919} \quad (5.24)$$

PPI 20 için r=0,553 ve

$$f = (0,0635).(Re)^{-0,594} \quad (5.25)$$

PPI 30 için r=0,893 ve

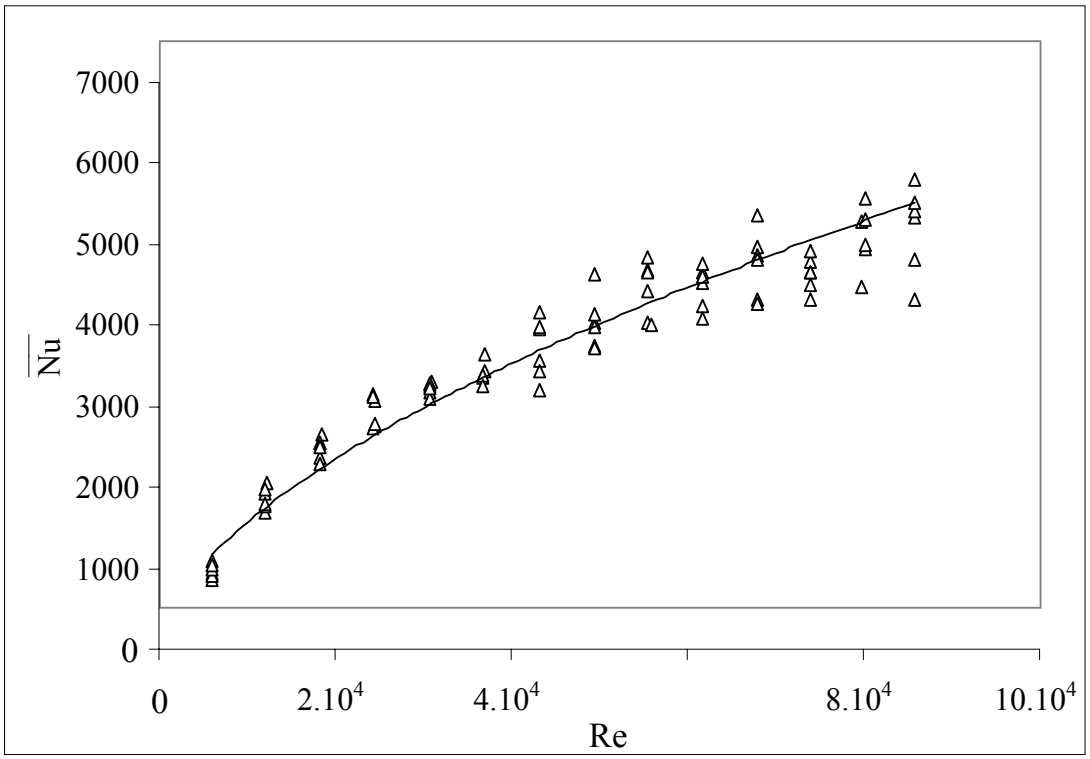
$$f = (0,0814).(Re)^{-0,563} \quad (5.26)$$

Tüm sistem için r=0,623 ve

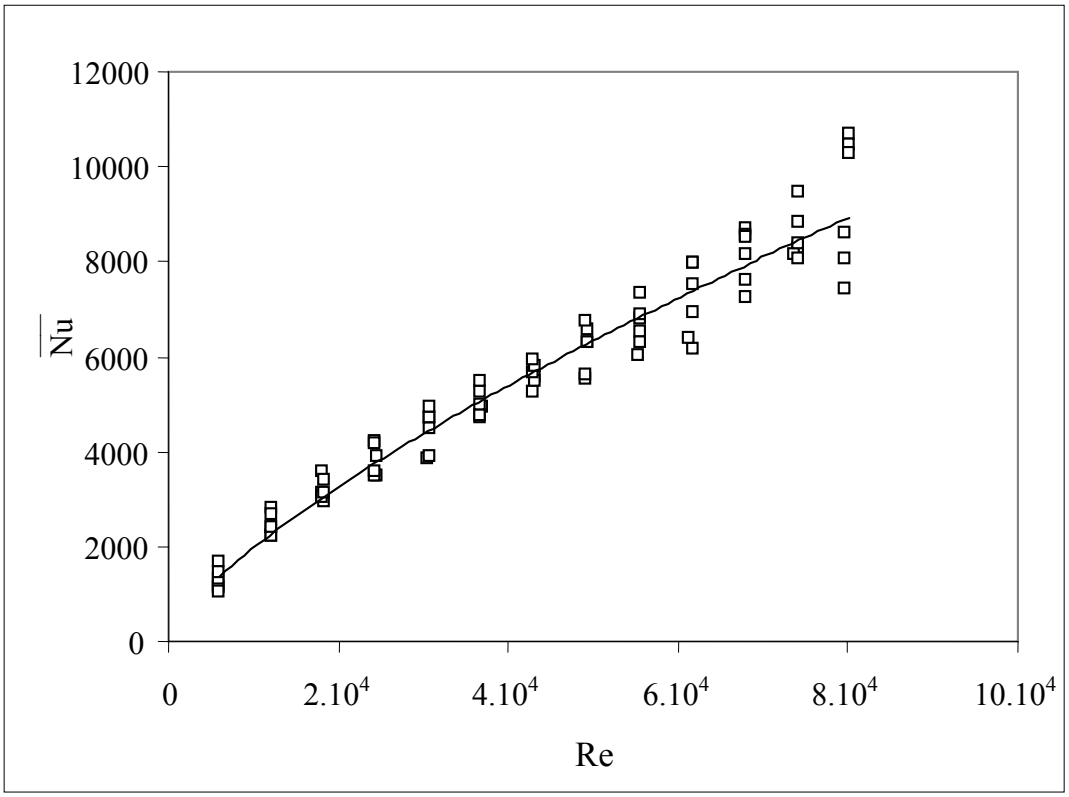
$$f = (0,3937).(Re)^{-0,794} \quad (5.27)$$

şeklinde elde edilir.

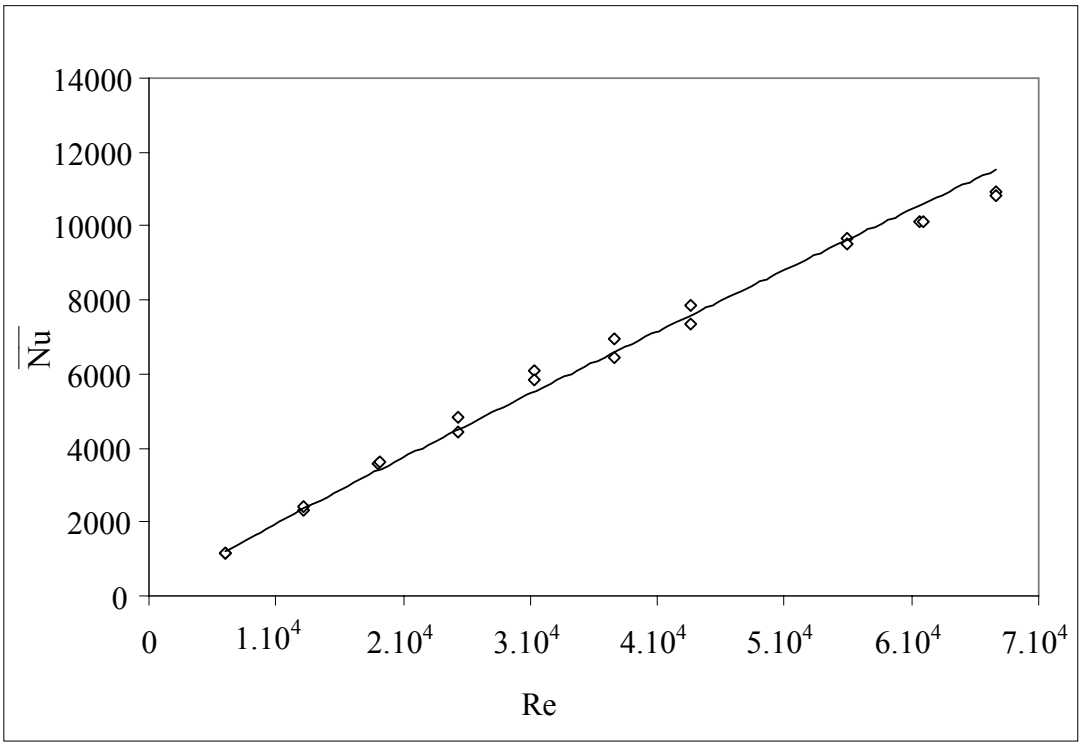
Bu denklemlerden elde edilen sonuçlarla grafikler çizilip teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldı.



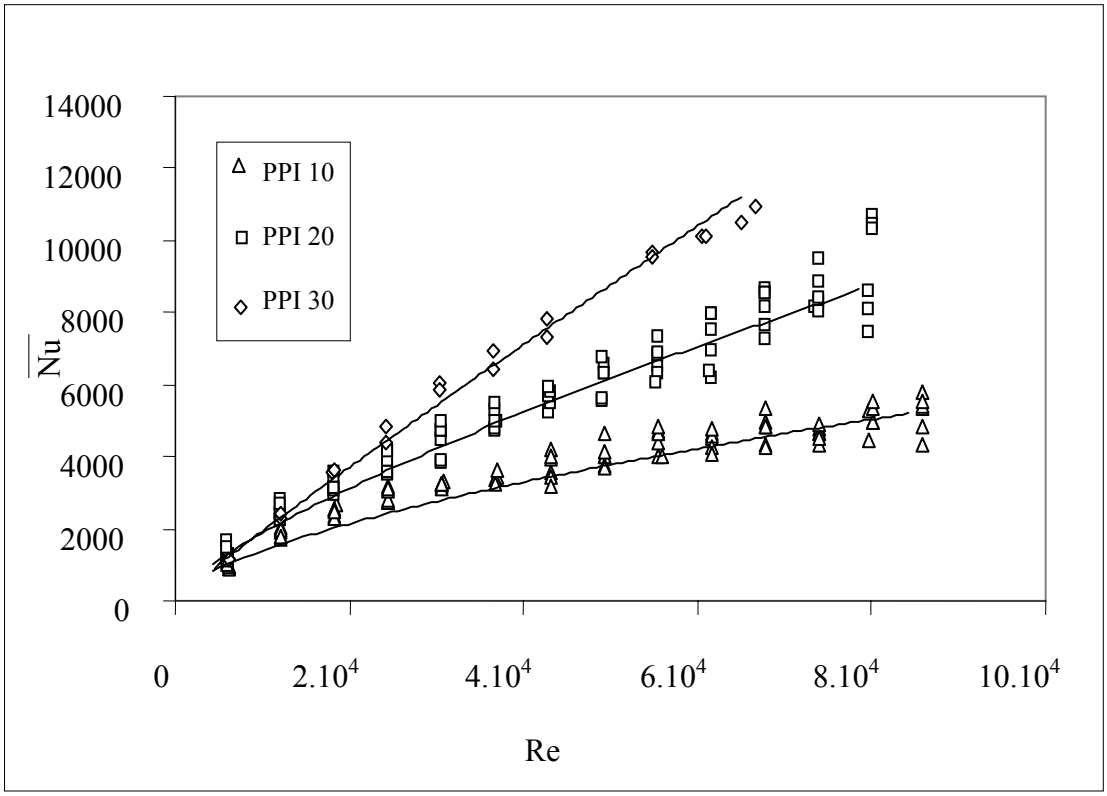
Şekil 5.1 PPI 10 için deneysel olarak Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi



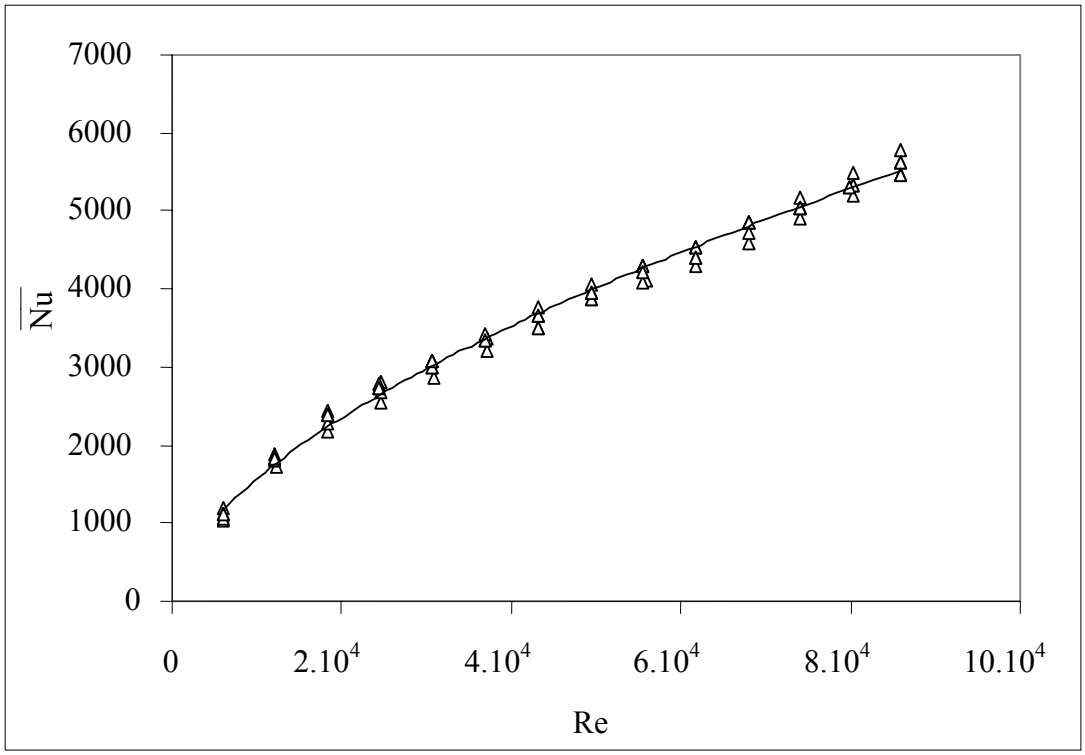
Şekil 5.2 PPI 20 için deneysel olarak Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi



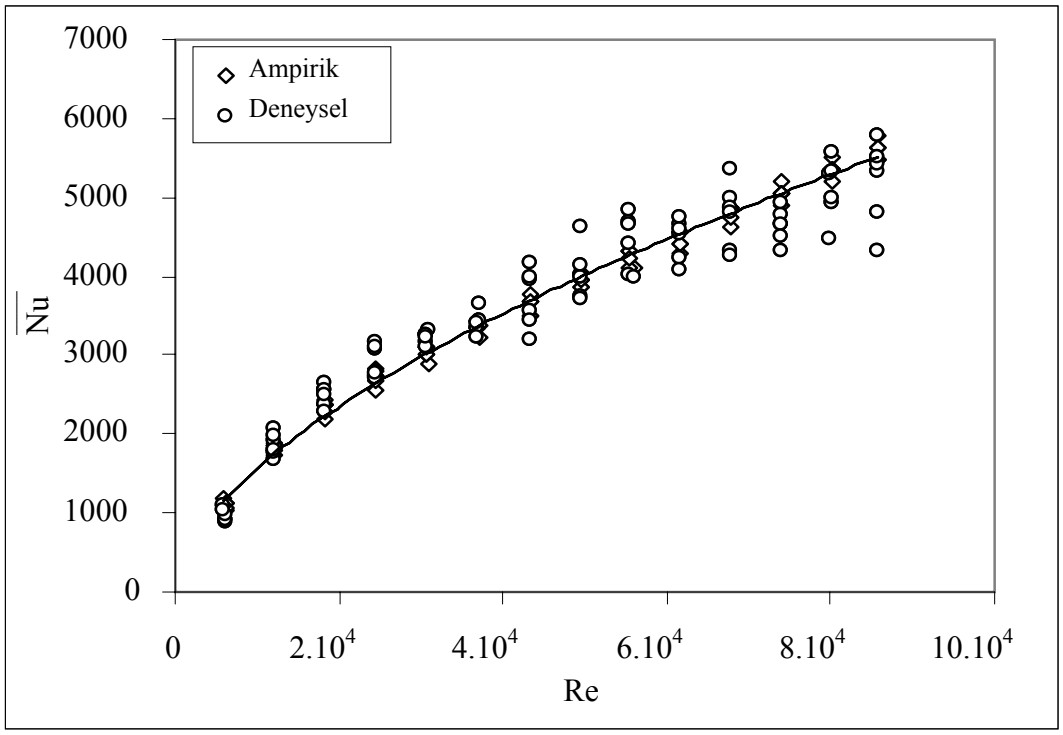
Şekil 5.3 PPI 30 için deneysel olarak Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi



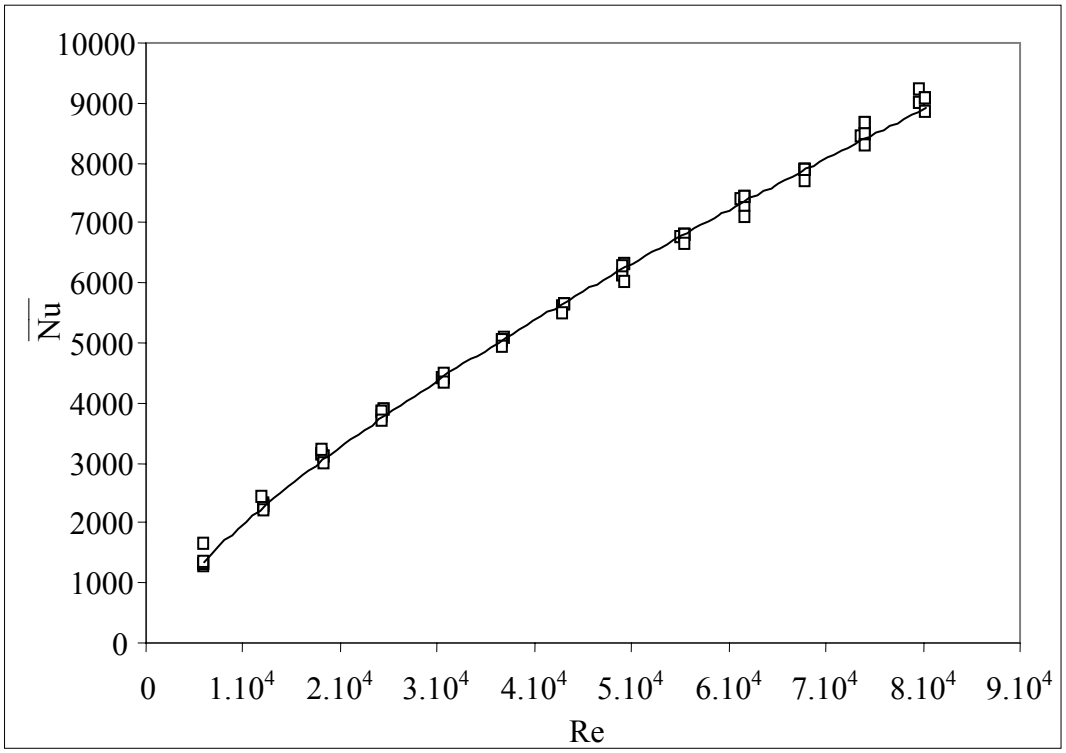
Şekil 5.4 PPI 10, 20 ve 30 için deneysel olarak Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi



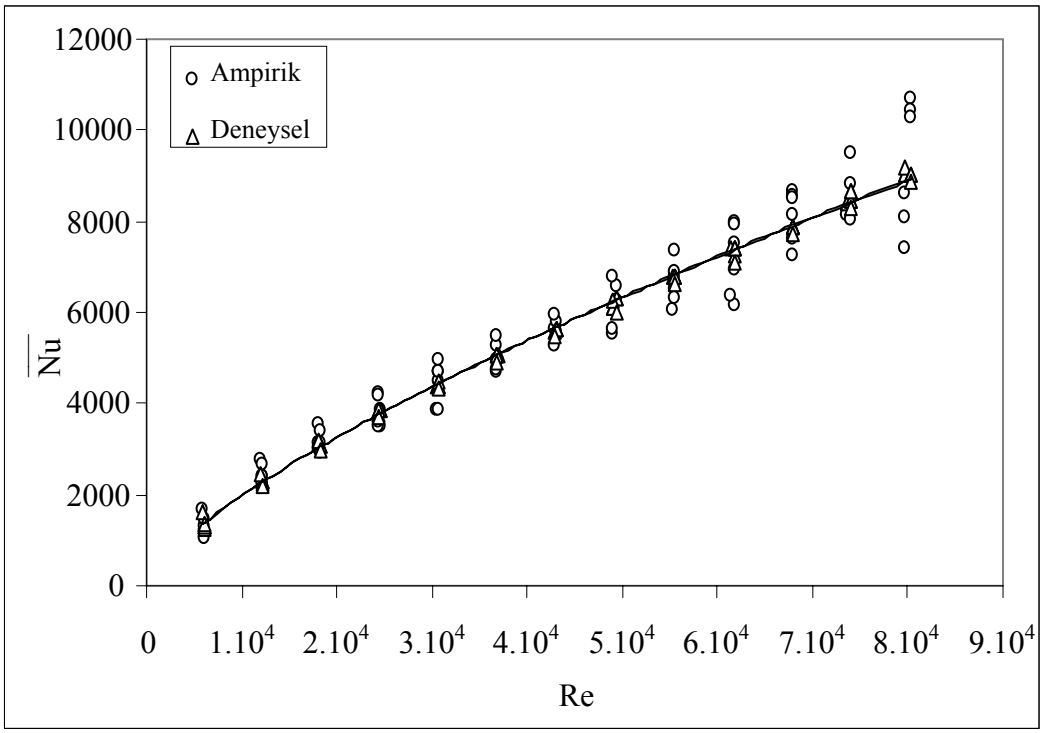
Şekil 5.5 PPI 10 için geliştirilen ampirik bağıntıya göre Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi



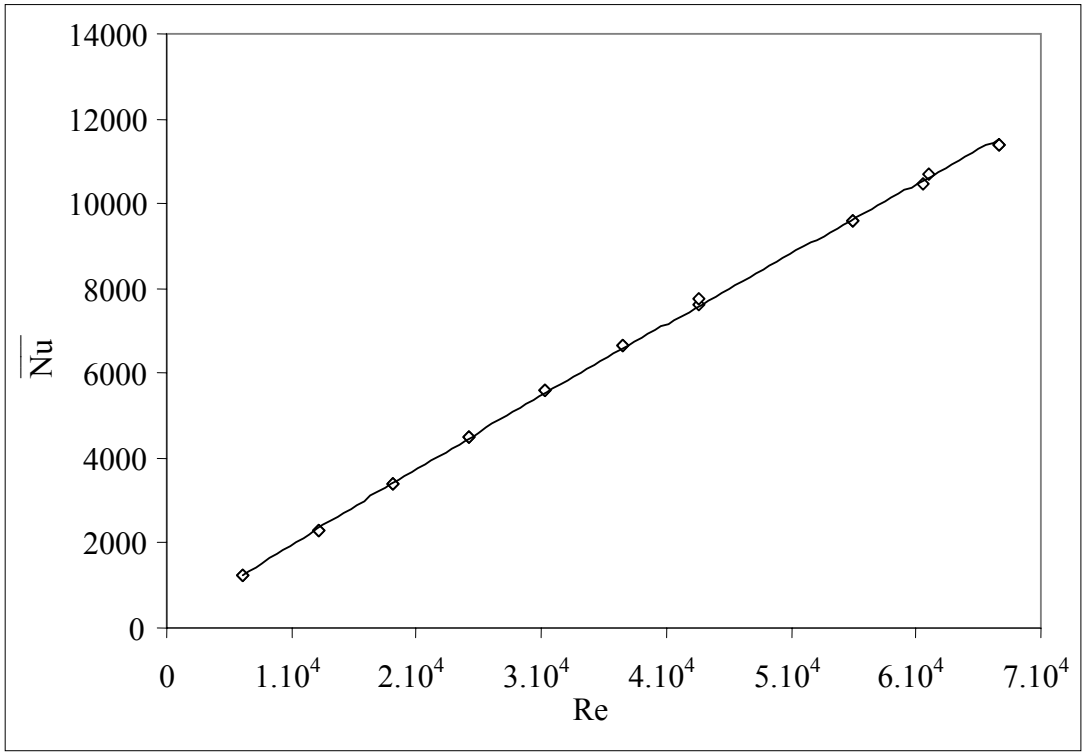
Şekil 5.6 Deneysel sonuçlar ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 10 için Reynolds – Nusselt sayılarının değişimi



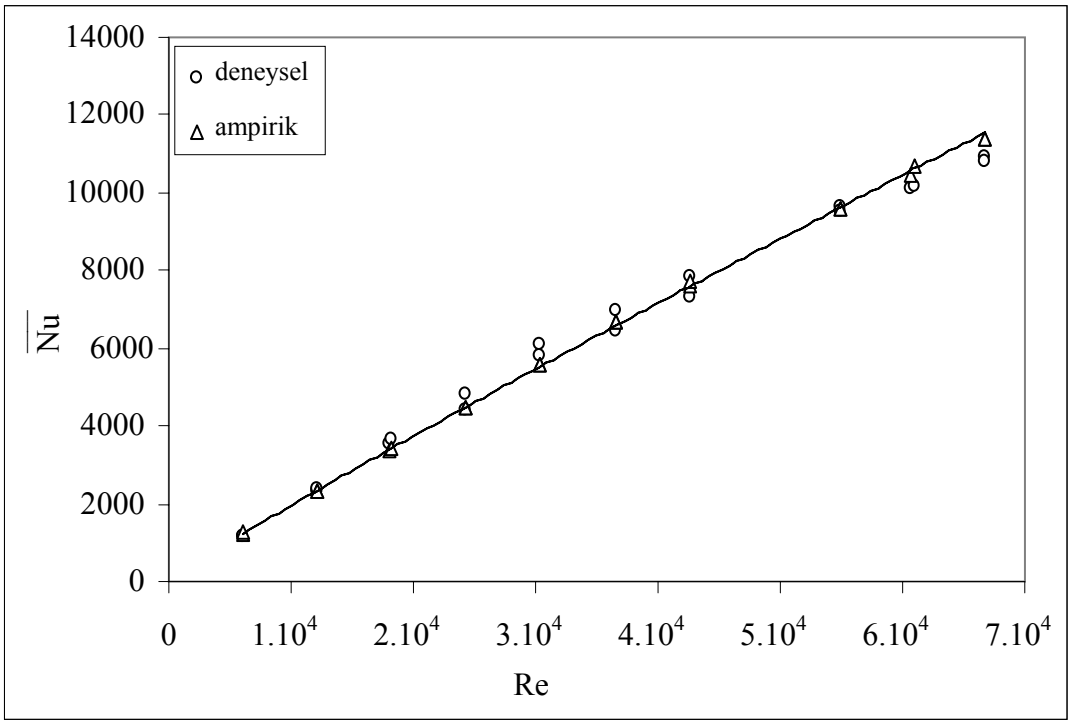
Şekil 5.7 PPI 20 için geliştirilen ampirik bağıntıya göre Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi



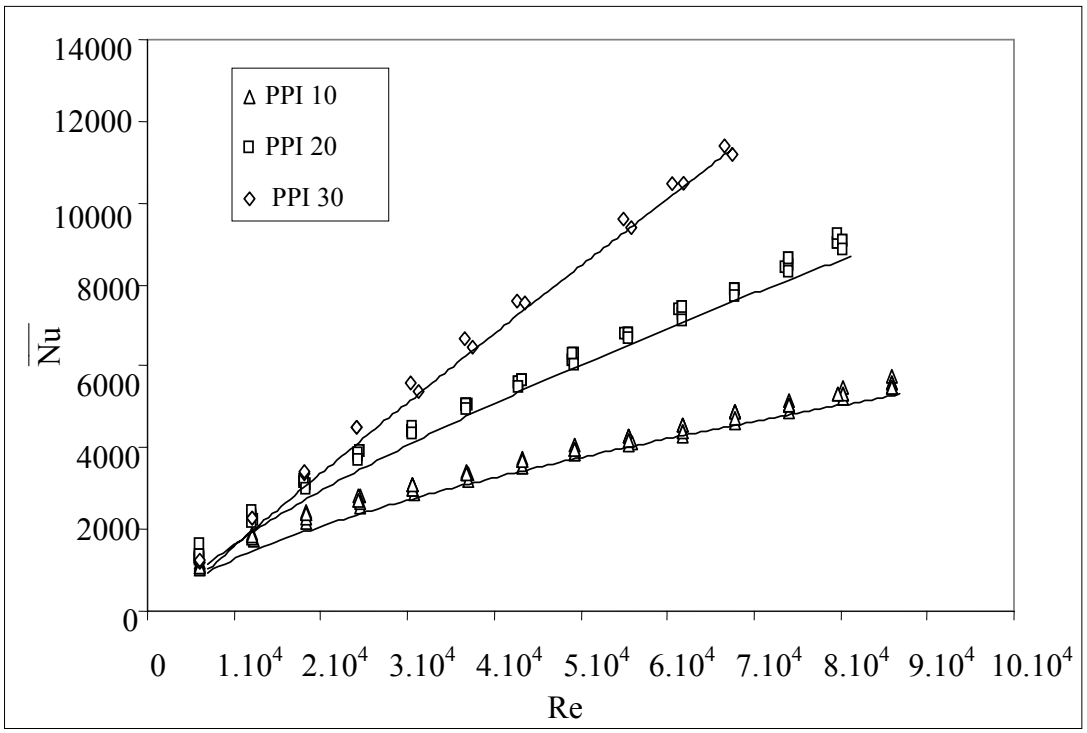
Şekil 5.8 Deneysel sonuçlar ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 20 için Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi



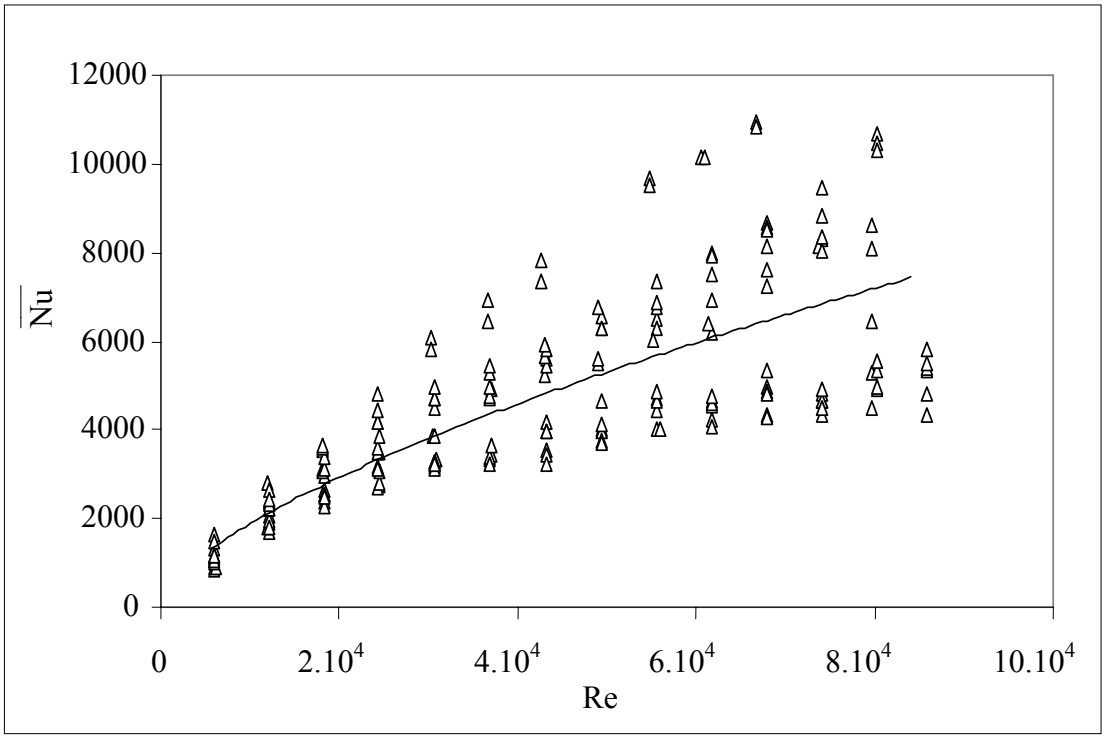
Şekil 5.9 PPI 30 için geliştirilen ampirik bağıntıya göre Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi



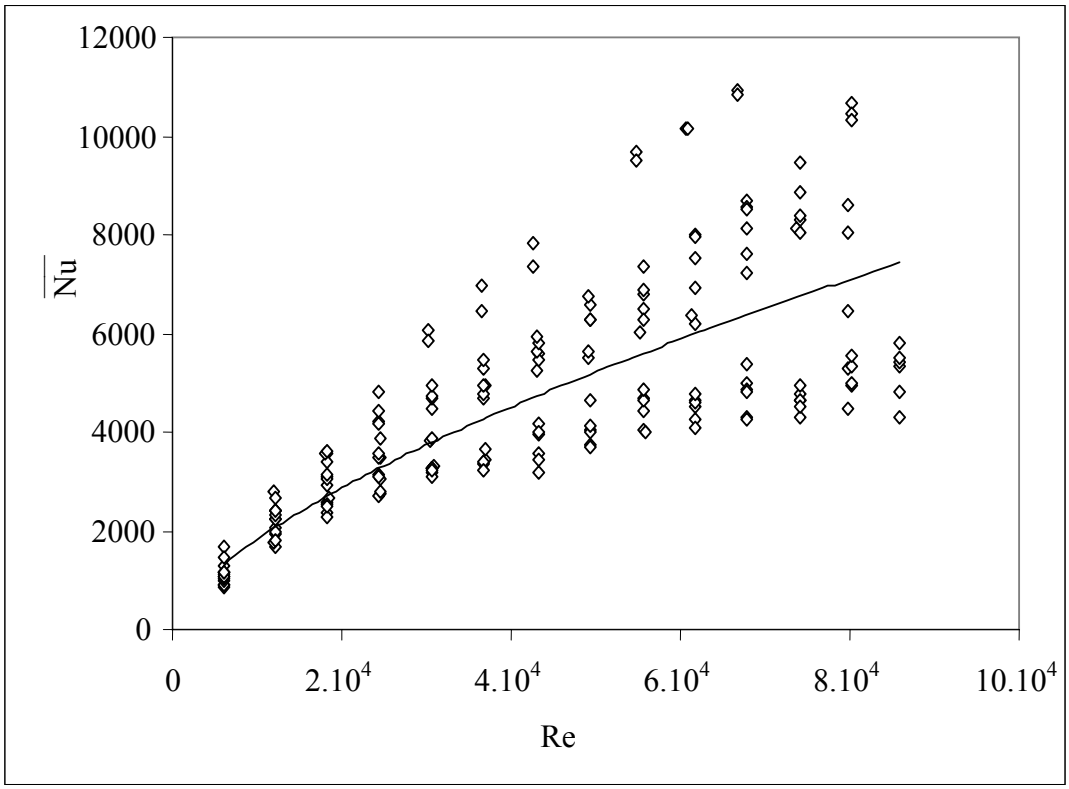
Şekil 5.10 Deneysel sonuçlar ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 30 için Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi



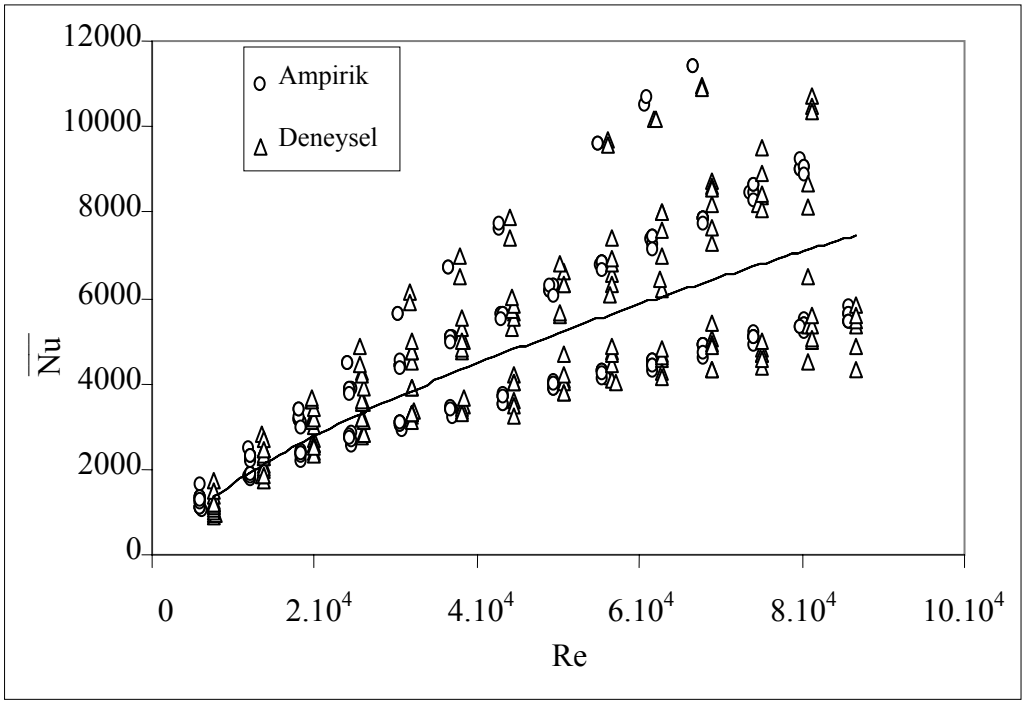
Şekil 5.11 PPI 10, 20 ve 30 için geliştirilen ampirik bağıntıya göre Reynolds -Nusselt sayılarının değişimi



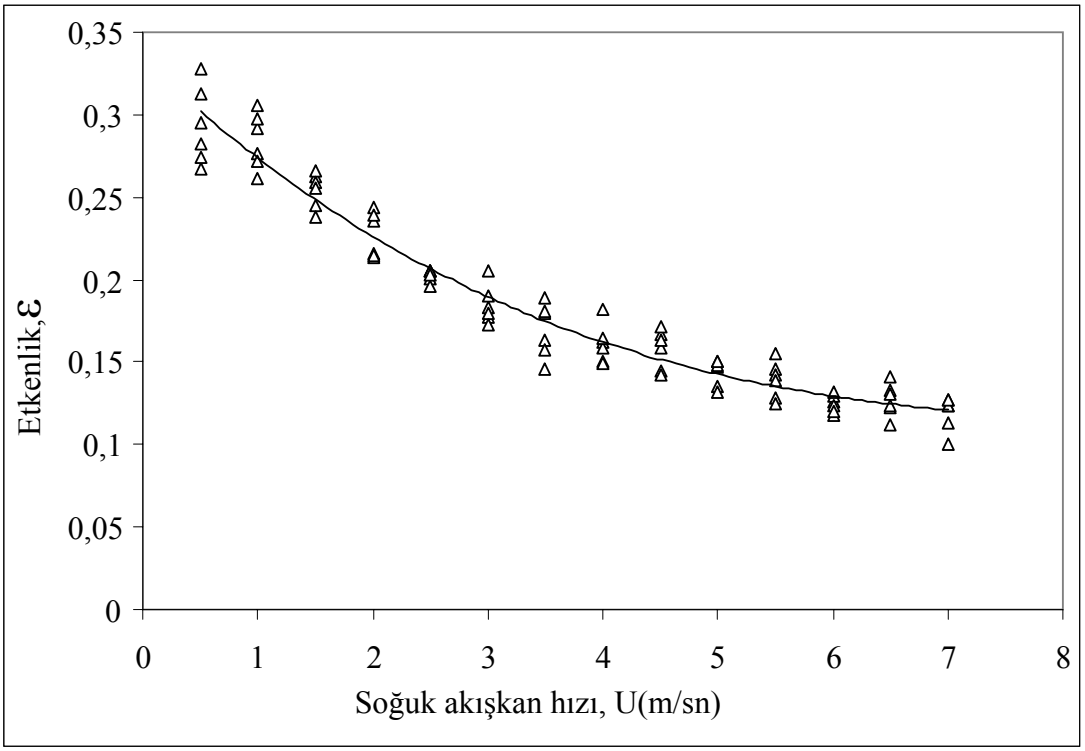
Şekil 5.12 Tüm deneysel sonuçlara göre PPI 10, 20 ve 30 için Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi



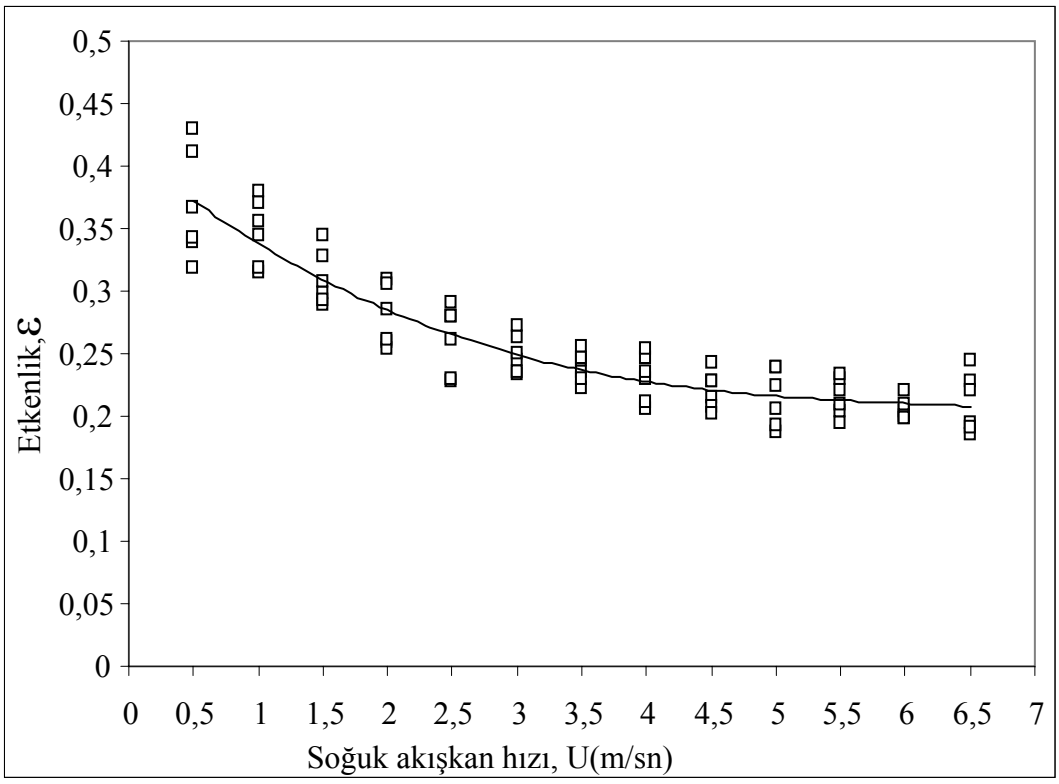
Şekil 5.13 Tüm deneysel sonuçlar ve geliştirilen ampirik bağıntılara göre PPI 10, 20 ve 30 için Reynolds - Nusselt değişimi



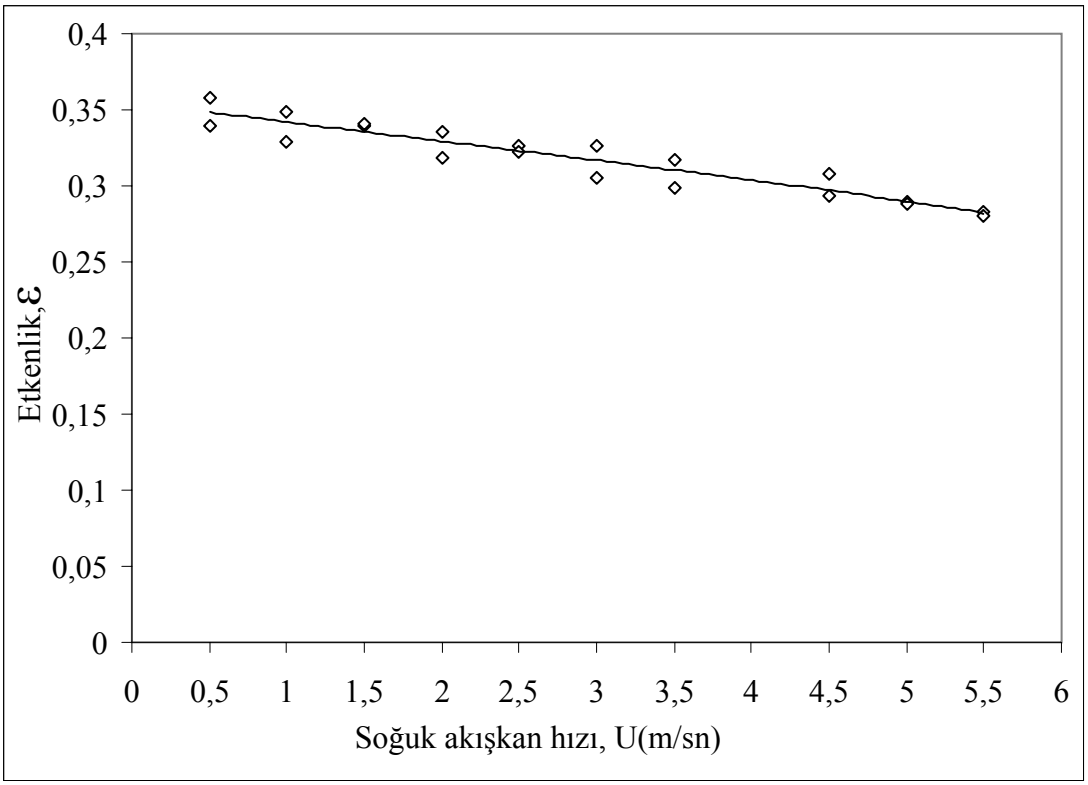
Şekil 5.14 Toplam deney sonuçlara göre PPI 10, 20 ve 30 için deneysel ve ampirik Reynolds - Nusselt sayılarının değişimi



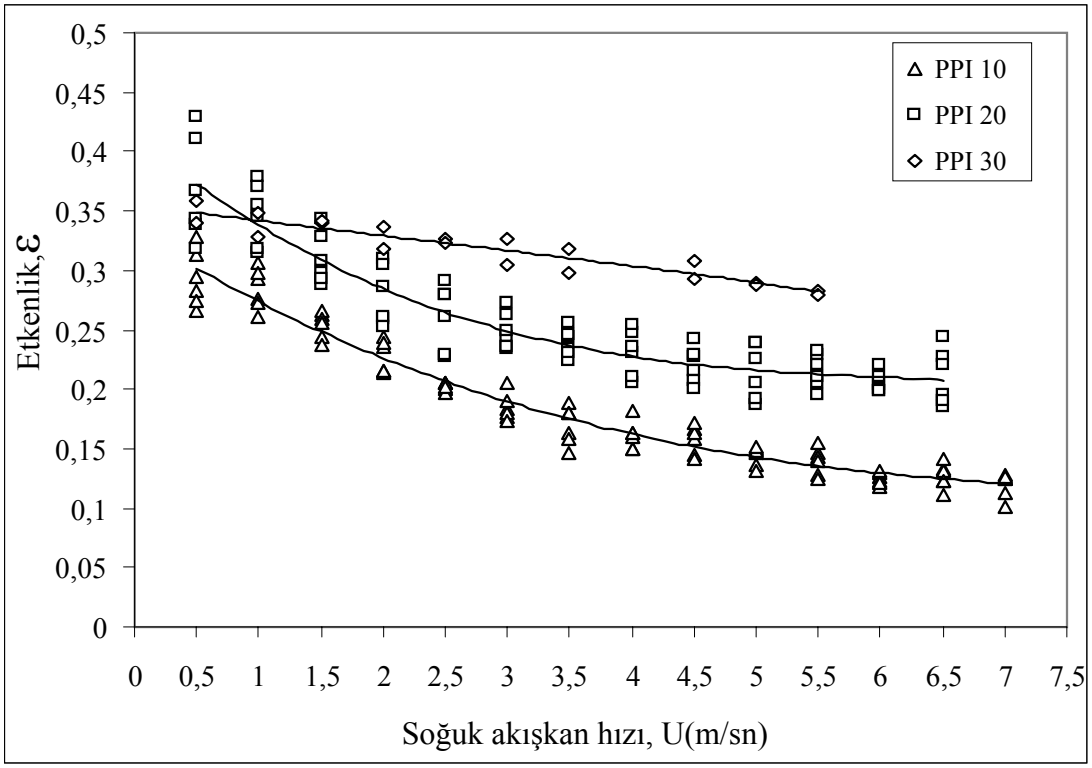
Şekil 5.15 PPI 10 için etkenlik – hız değişimi



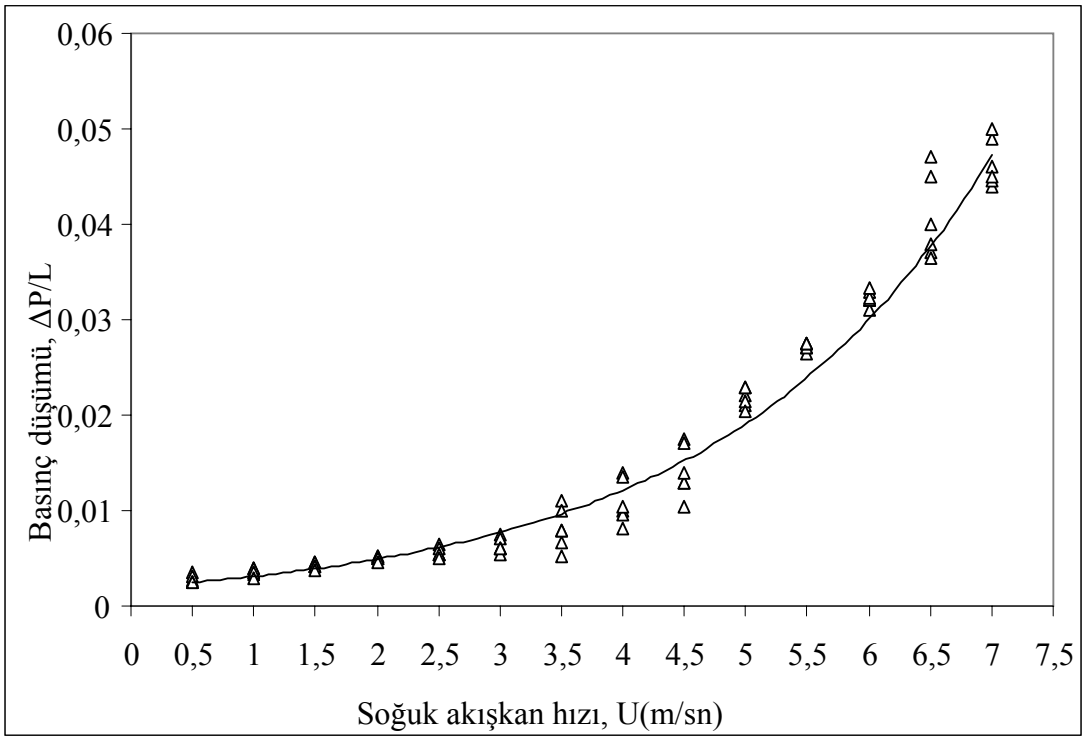
Şekil 5.16 PPI 20 için etkenlik – hız değişimi



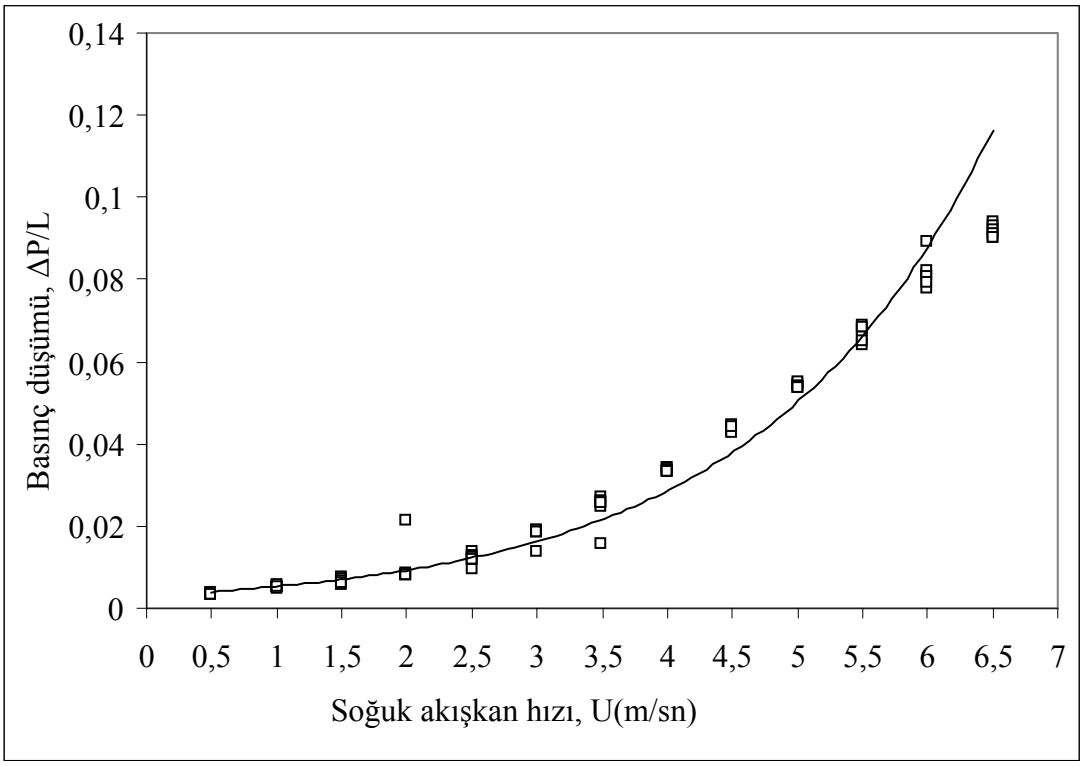
Şekil 5.17 PPI 30 için etkenlik – hız değişimi



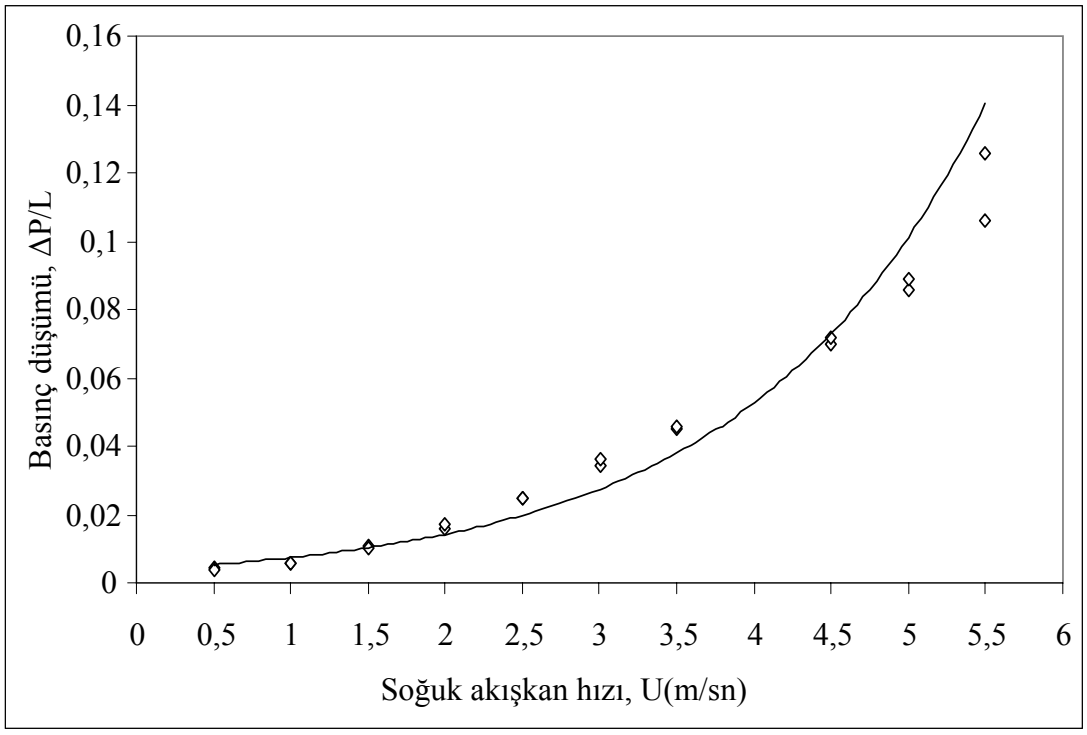
Şekil 5.18 PPI 10, 20 ve 30 için etkenlik – hız değişimi



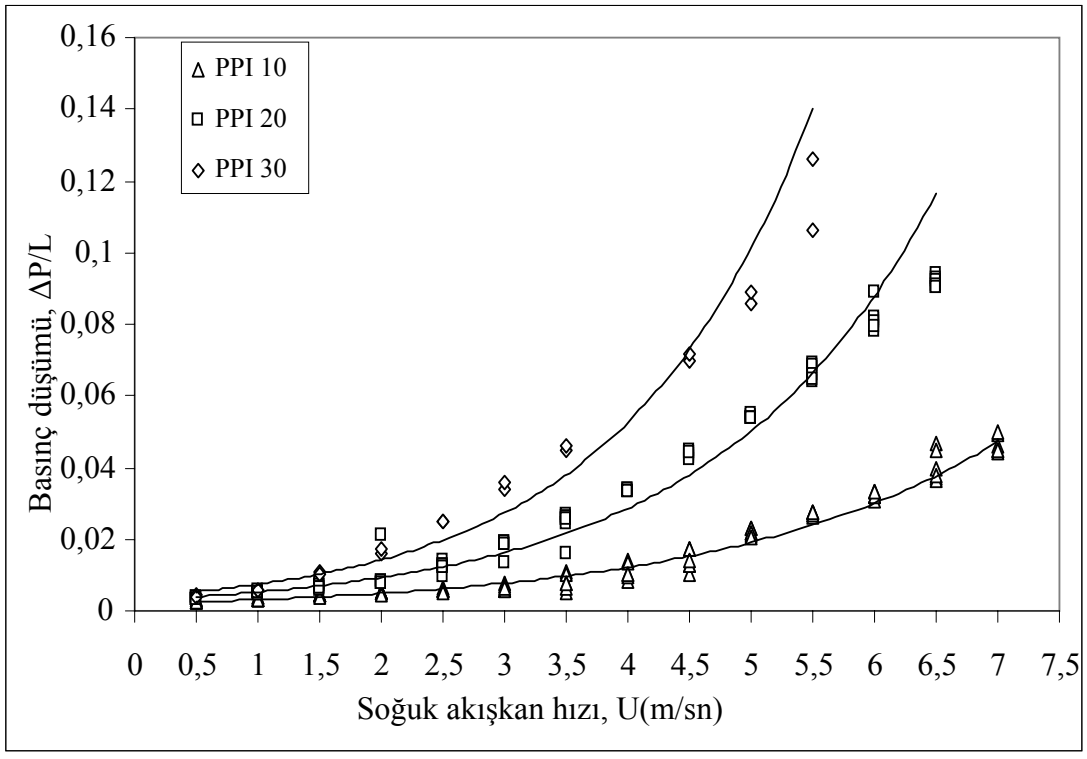
Şekil 5.19 PPI 10 için basınç düşümü – hız değişimi



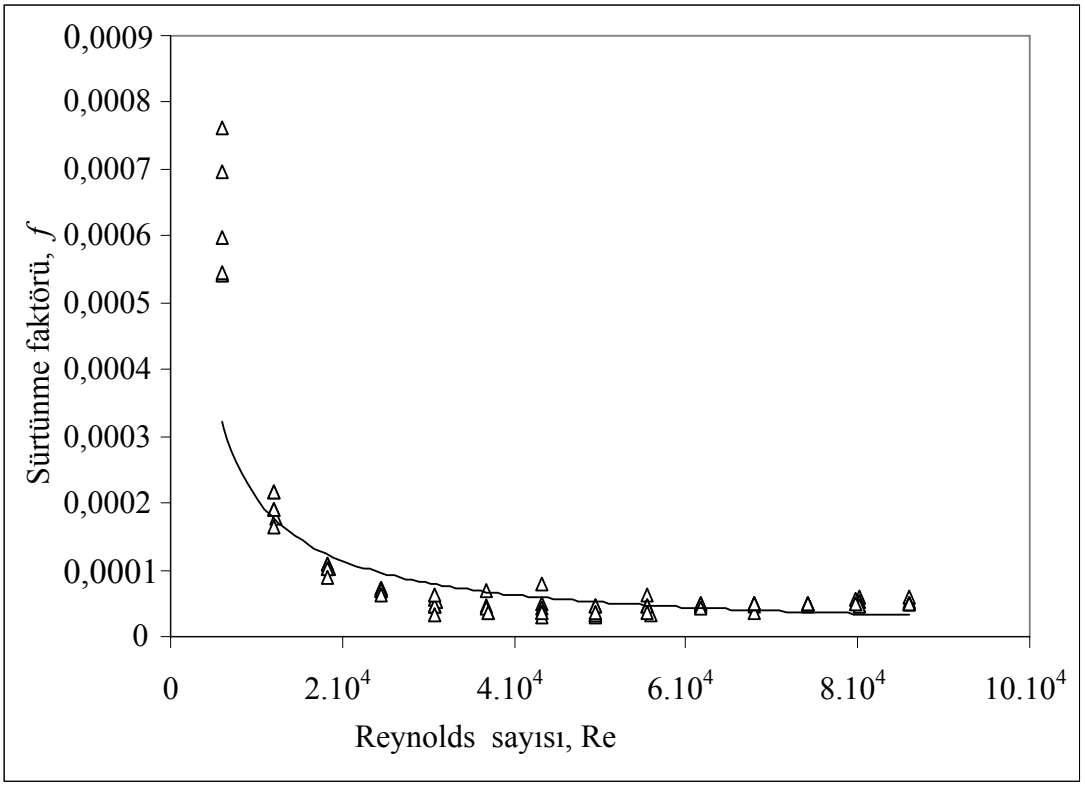
Şekil 5.20 PPI 20 için basınç düşümü – hız değişimi



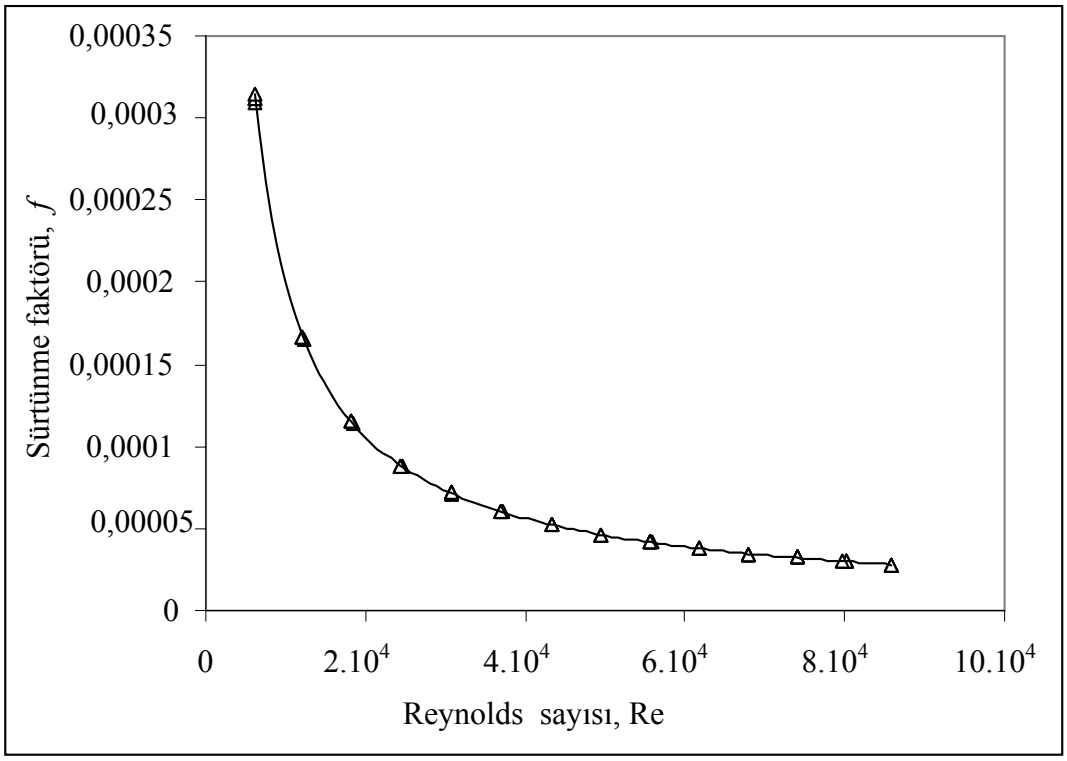
Şekil 5.21 PPI 30 için basınç düşümü – hız değişimi



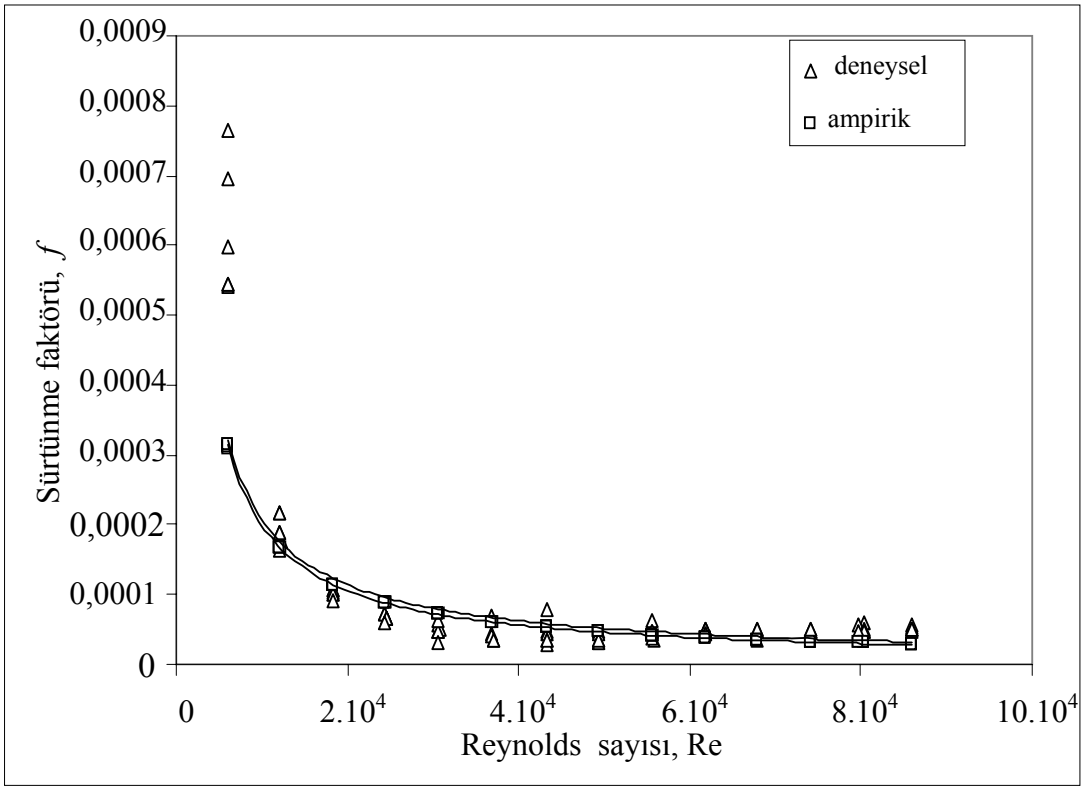
Şekil 5.22 PPI 10, 20 ve 30 için basınç düşümü – hız değişimi



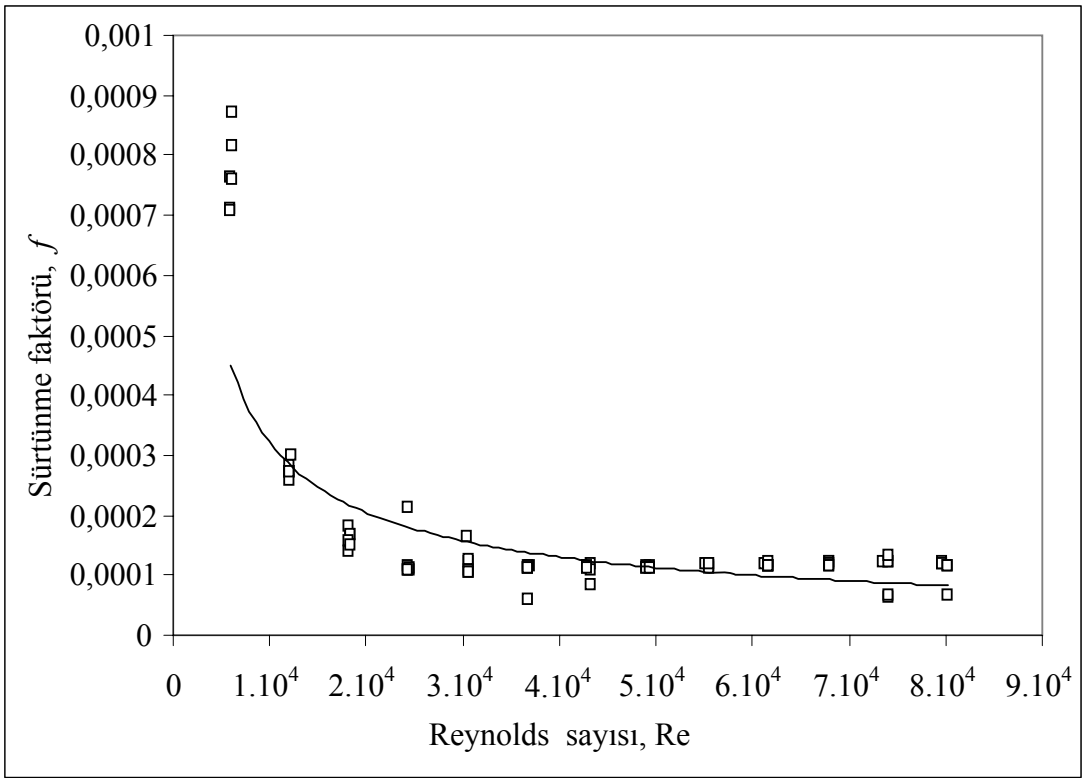
Şekil 5.23 Deneysel değerlere göre PPI 10 için sürtünme faktörü - Reynolds değişimi



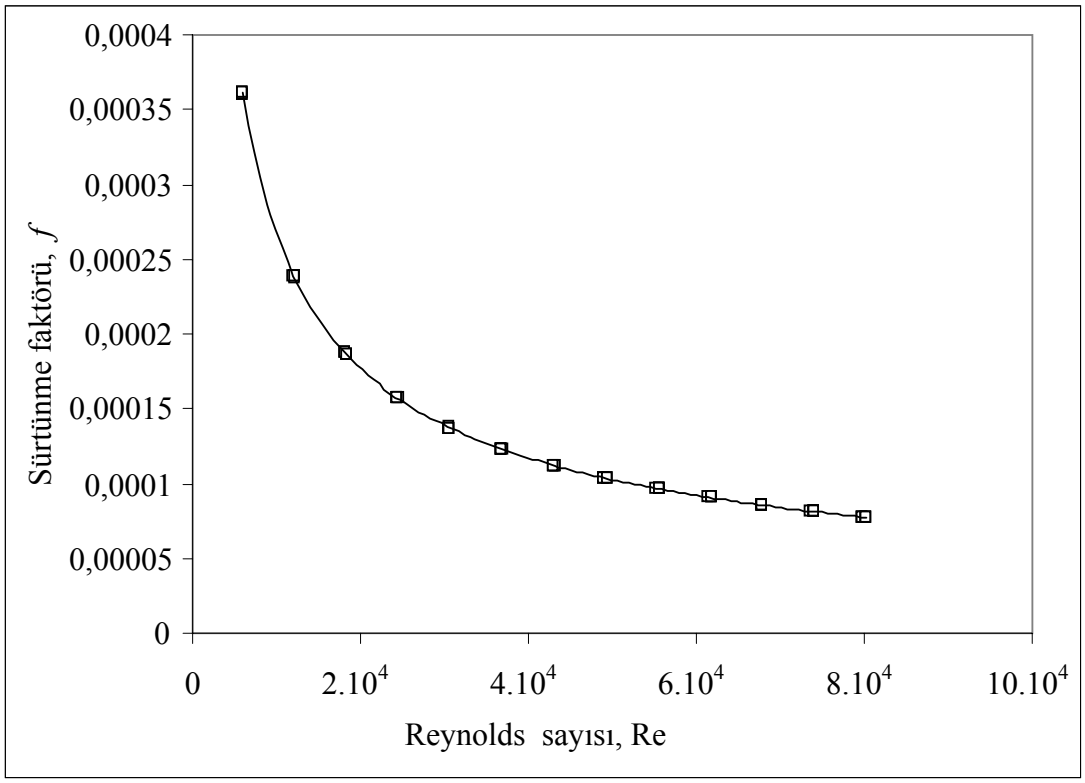
Şekil 5.24 Geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 10 için sürtünme faktörü-Reynolds değişimi



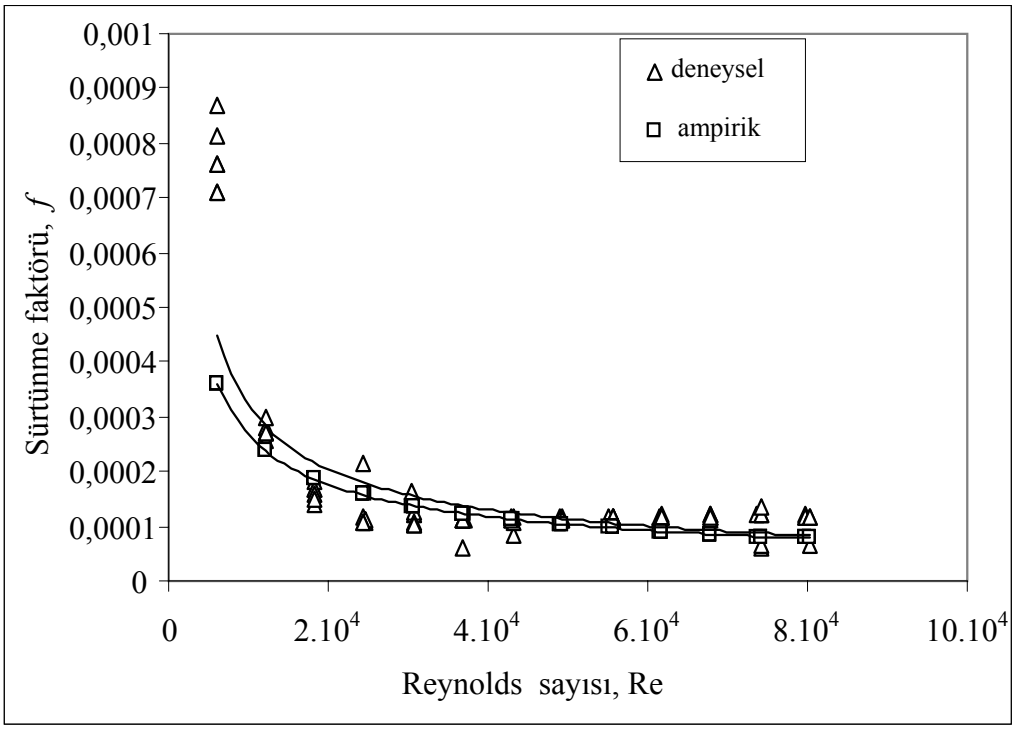
Şekil 5.25 PPI 10 için deneysel sonuçlara ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre sürtünme faktörü - Reynolds sayısı değişimi



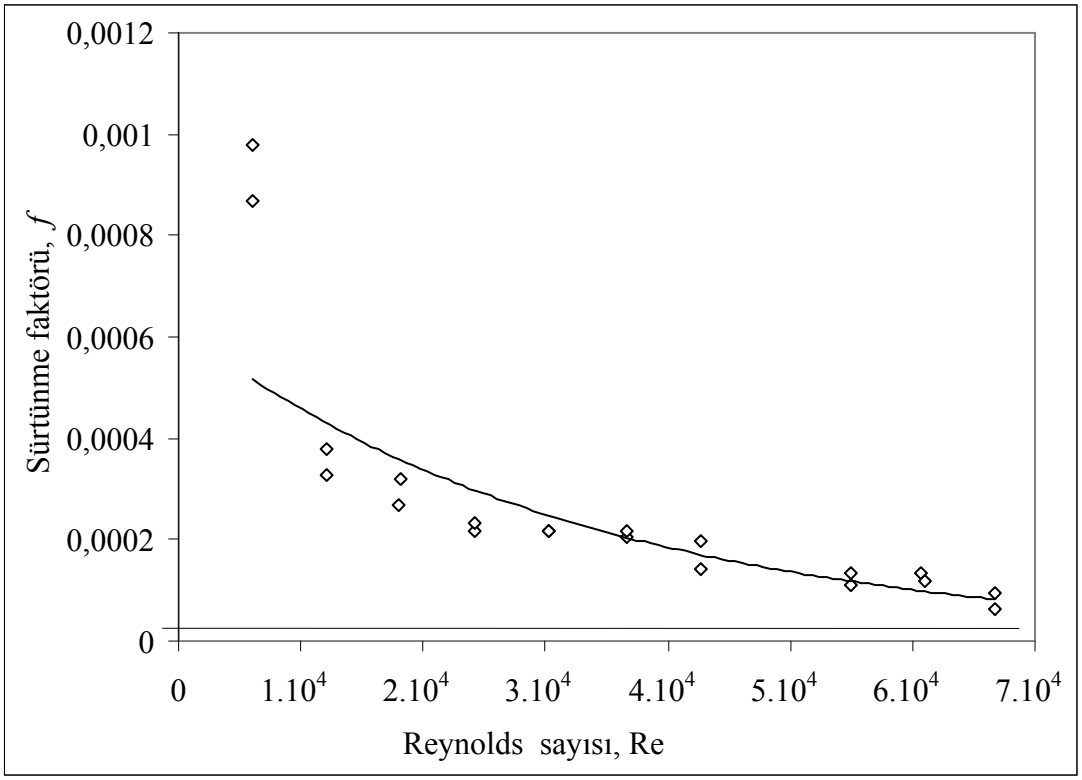
Şekil 5.26 Deneysel değerlere göre PPI 20 için sürtünme faktörü- Reynolds değişimi



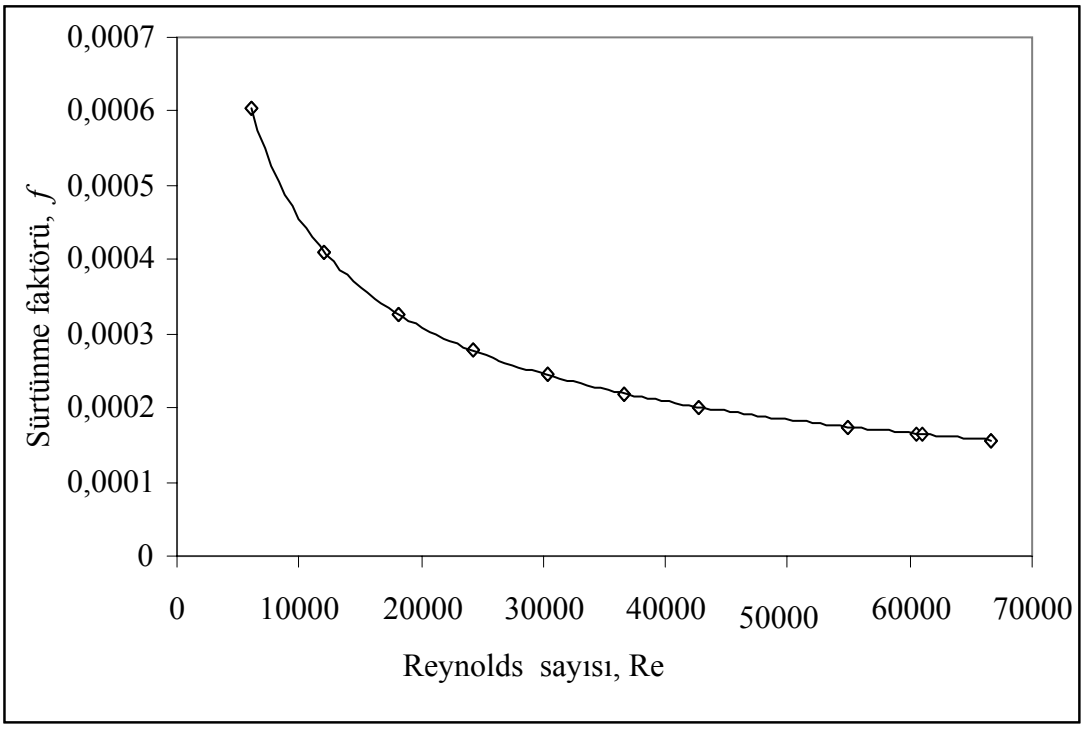
Şekil 5.27 Geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 20 için sürtünme faktörü-Reynolds değişimi



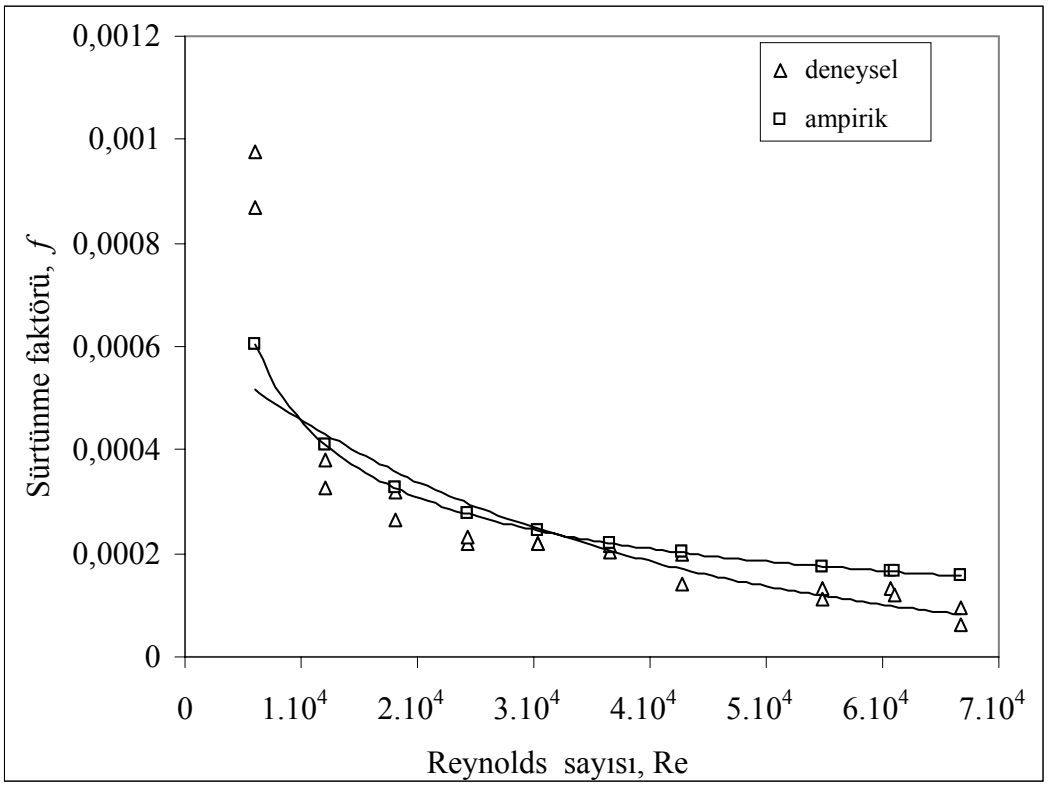
Şekil 5.28 PPI 20 için deneysel sonuçlara ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre sürtünme faktörü - Reynolds sayısı değişimi



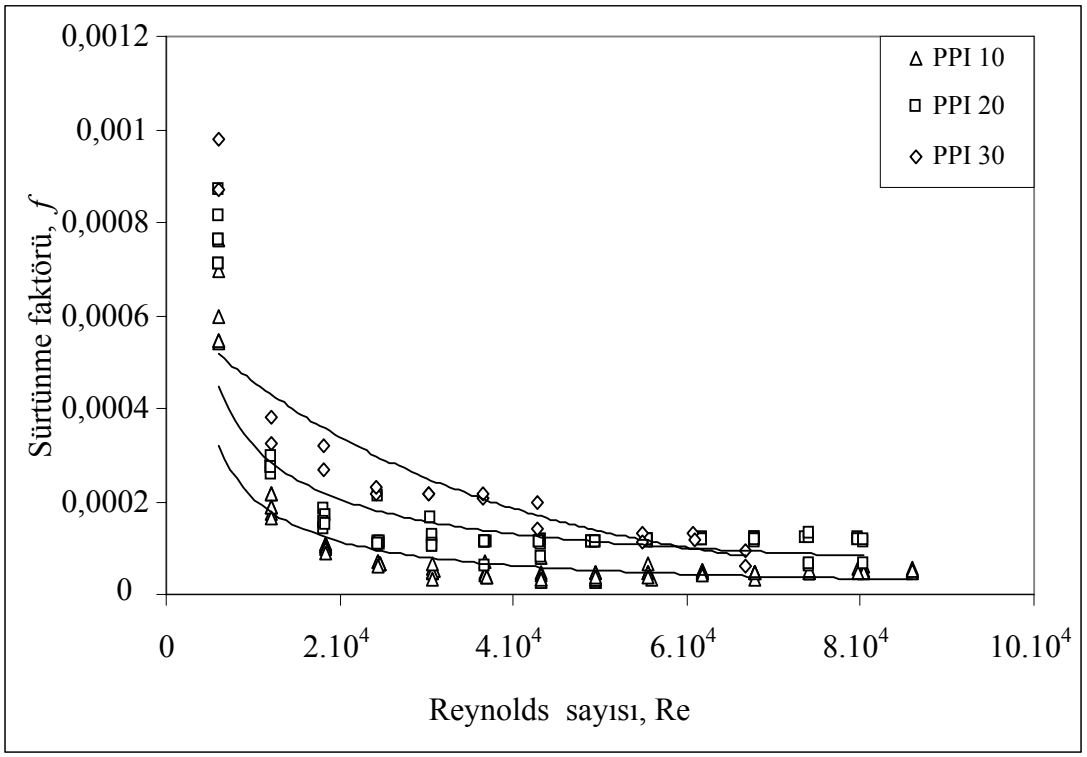
Şekil 5.29 Deneysel değerlere göre PPI 30 için sürtünme faktörü- Reynolds değişimi



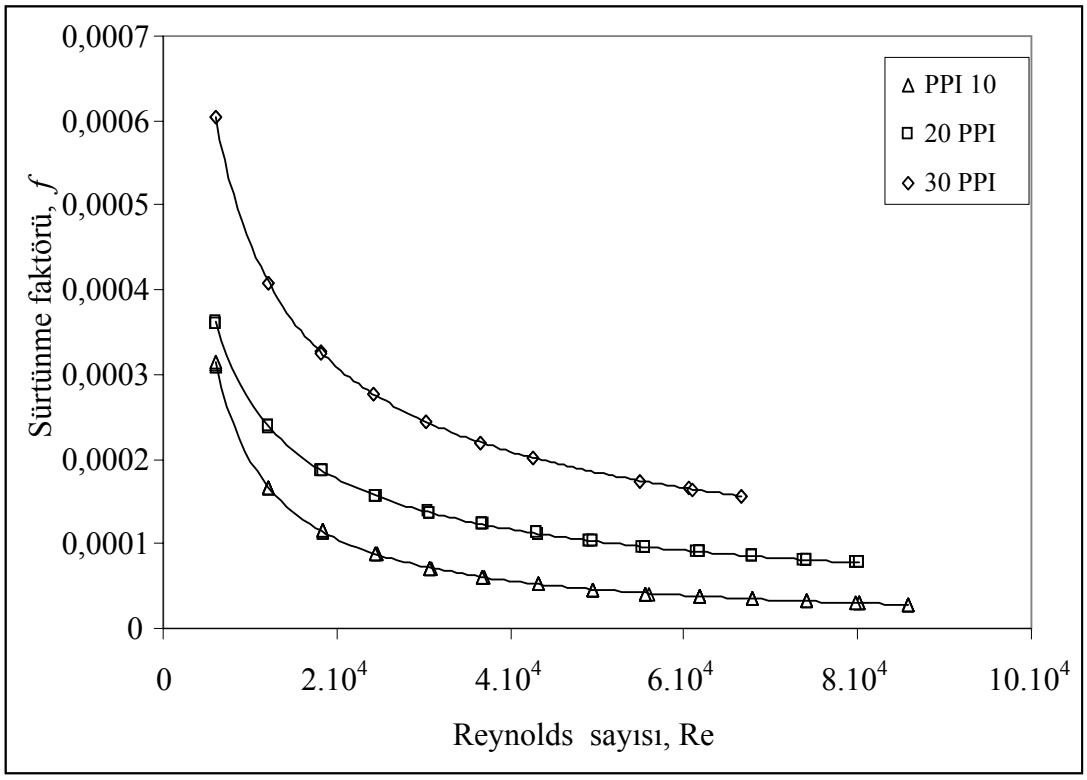
Şekil 5.30 Geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 30 için sürtünme faktörü-Reynolds değişimi



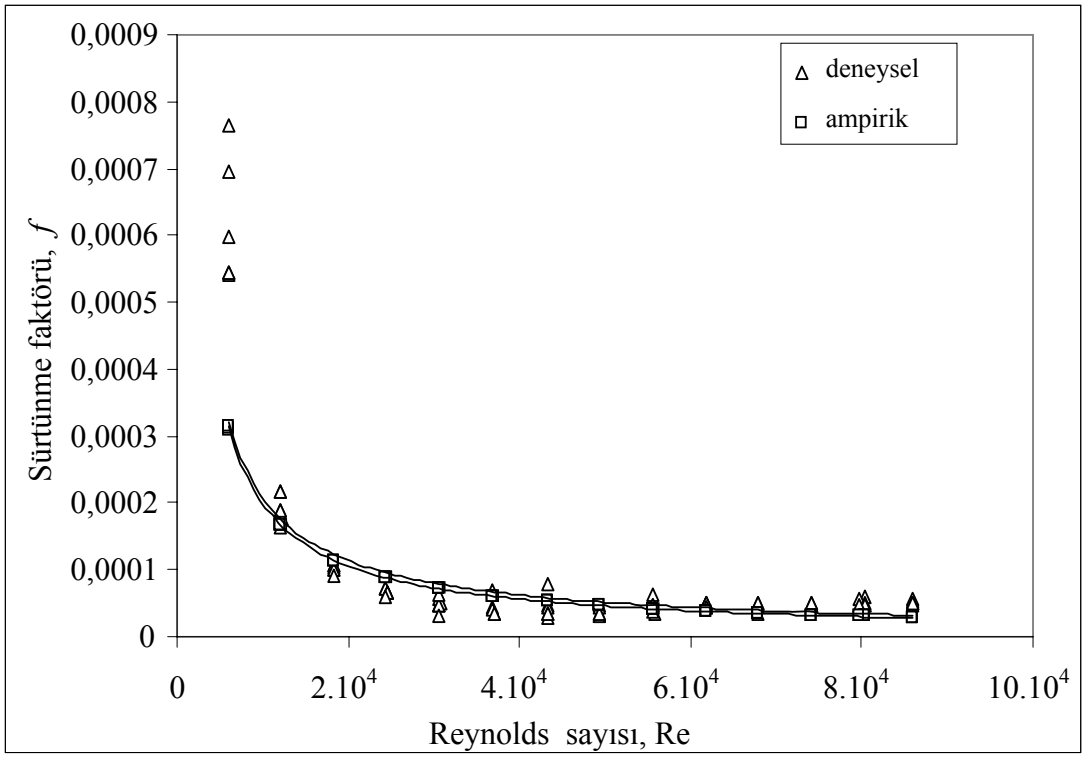
Şekil 5.31 PPI 30 için deneysel sonuçlara ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre sürtünme faktörü- Reynolds sayısı değişimi



Şekil 5.32 Deneysel değerlere göre PPI 10, 20 ve 30 için sürtünme faktörü- Reynolds sayısı değişimi



Şekil 5.33 Geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 10,20 ve 30 için sürtünme faktörü-Reynolds sayısı değişimi



Şekil 5.34 Tüm sistem için deneysel sonuçlara ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre sürtünme faktörü - Reynolds sayısı değişimi

BÖLÜM 6

DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMALARI

Şekil 5.1 'de PPI-10 için deneysel olarak, **Şekil 5.5** 'de PPI-10 için ampirik olarak geliştirilen Nusselt sayısı ile Reynolds sayısının değişimi verildi. **Şekil 5.6**'da ise deneysel sonuçlar ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 10 için Reynolds ve Nusselt sayılarının değişimi gösterildi. Şekillerden görüldüğü gibi; $\mathbf{6.10^3<Re_d<9.10^4}$ değerleri arasında deneysel değerlerle, ampirik değerler tam olarak örtüşmektedir. Sadece yüksek Reynolds sayılarında çok az bir sapma meydana gelmektedir. Bu aralıkta elde edilen bağıntı için korelasyon katsayısı R= **0,977** ve bağıl hata **% 9,72** olarak elde bulundu.

Şekil 5.2 'de PPI-20 için deneysel olarak, **Şekil 5.7** 'de PPI-20 için ampirik olarak geliştirilen Nusselt sayısı ile Reynolds sayısının değişimi gösterildi. **Şekil 5.8'**de deneysel sonuçlar ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 20 için Reynolds ve Nusselt sayılarının değişimi verildi. Şekillerden görüldüğü gibi; $\mathbf{5.10^3<Re_d<9.10^4}$ değerleri arasında deneysel değerlerle ampirik değerler tam olarak örtüşmektedir. Bu aralıkta elde edilen bağıntı için korelasyon katsayısı R= **0,985** ve bağıl hata **% 9,71** olarak elde edildi. Şekilde görülen küçük sapmalar ölçüm hatalarından kaynaklanmaktadır.

Şekil 5.3 'de PPI-30 için deneysel olarak, **Şekil 5.9** 'da PPI-30 için ampirik olarak geliştirilen Nusselt sayısı ile Reynolds sayısının değişimi verildi. **Şekil 5.10**'da ise deneysel sonuçlar ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 30 için Reynolds ve Nusselt sayılarının değişimi gösterildi. Şekillerden görüldüğü gibi; $\mathbf{6.10^3<Re_d<7.10^4}$ değerleri arasında deneysel değerlerle ampirik değerler tam olarak örtüşmektedir. Sadece yüksek Reynolds sayılarında çok az bir sapma meydana gelmektedir. Söz konusu sapmalar ölçüm hatalarına bağlıdır. Bu aralıkta elde edilen bağıntı için korelasyon katsayısı R= **0,997** ve bağıl hata **% 5.35** olarak elde edildi.

Şekil 5.4'de PPI 10 ,20 ve 30 için deneysel olarak Nusselt sayısı ile Reynolds sayısının değişimi, **Şekil 5.11**'de ise PPI 10,20 ve 30 için geliştirilen ampirik bağıntıya göre Reynolds ve Nusselt sayılarının değişimi verildi. Şekilde görüldüğü gibi PPI-30'da, Nu sayısı değerlerinin PPI-10 ve PPI-20'ye göre daha büyük olduğu görüldü. Bunun nedeni, **akışkan sürtünmesiyle ısı transferi arasındaki ilişkidir**. **Şekil 5.12**'de tüm deneysel sonuçlara göre PPI 10,20 ve 30 için Reynolds ve Nusselt sayılarının değişimi, **Şekil 5.13**'te ise tüm deneysel sonuçlar ve geliştirilen ampirik bağıntılara göre PPI 10,20 ve 30 için Reynolds ve Nusselt sayılarının değişimi ve **Şekil 5.14**'de toplam deney sonuçlara göre PPI 10,20, ve 30 için deneysel ve ampirik Reynolds ve Nusselt sayılarının değişimi verildi. Görüldüğü gibi $5.10^3<Re_d<9.10^4$ değerleri arasında deneysel ve ampirik sonuçlar tam olarak örtüşmektedir. Bu aralıkta elde edilen bağıntı için korelasyon katsayısı R=0,913 ve bağıl hata % 22 olarak elde edildi.

Şekil 5.15 PPI 10 için etkenlik ve hız değişimi, **Şekil 5.16** PPI 20 için etkenlik ve hız değişimi, **Şekil 5.17** PPI 30 için etkenlik - hız değişimi ve **Şekil 5.18** PPI 10, 20 ve 30 için etkenlik ve hız değişimi verildi. Şekillerden görüldüğü gibi her 3 sistem için de düşük hız değerlerinde etkenliğin yüksek olduğu, hızın artması ile birlikte etkenliğin düştüğü tespit edildi. Sebep olarak; **düşük hızlarda soğuk akışkanın sıcak akışkan temas yüzeyi ile daha fazla süreyle iletişimde bulunması, hız arttıkça temas süresinin azalması olarak ifade edilebilir.** Belli bir hızdan sonra etkenliğin sabit olduğu da tespit edildi. Ayrıca grafikler incelendiği zaman aynı çalışma aralığında PPI 30 ile yapılan deneylerde elde edilen etkenlik değerlerinin sırasıyla PPI 20'den yüksek PPI 10 'dan ise daha yüksek olduğu görüldü. Bunun sebebi olarak; akışkan sürtünmesi ile ısı transferi arasındaki ilişki söylenebilir. Gözenek sayısının artmasıyla birlikte, akışta türbülansın dolayısıyla da ısı transferinin artmasıdır.

Şekil 5.19'da PPI 10 için basınç düşümü ve hız değişimini, **Şekil 5.20**'de PPI 20 için basınç düşümü ve hız değişimini, **Şekil 5.21**'de PPI 30 için basınç düşümü ve hız değişimini, **Şekil 5.22**'de PPI 10, 20 ve 30 için basınç düşümü ve hız değişimini gösteren grafikleri verildi. Şekillerden de görüldüğü gibi düşük hızlarda basınç

düşümü düşük, hız arttıkça basınç düşümü yükselmektedir. Ayrıca yine grafikler incelendiğinde aynı çalışma aralığında; PPI 30 ile yapılan deneylerde ortaya çıkan basınç düşümü değerlerinin sırasıyla PPI 20'den yüksek PPI 10 'dan ise daha yüksek olduğu görüldü. Bunun sebebi; **gözenek sayısının artmasıyla birlikte, akışta türbülansın ve sürtünmenin artması sonuçta da basınç düşümünün artması şeklinde açıklanabilir.**

Şekil 5.23'de deneysel değerlere göre PPI 10 için sürtünme faktörü ve Reynolds değişimi, **Şekil 5.24**'de geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 10 için sürtünme faktörü ve Reynolds değişimi, **Şekil 5.25**'de ise PPI 10 için deneysel sonuçlara ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre Sürtünme - Reynolds sayısı değişimi verildi. Reynolds sayısının $\mathbf{5.10^3<Re_d<9.10^4}$ aralığında çalışıldı. Şekillerden görüldüğü gibi deneysel değerlerle çizilen grafiklerin ampirik değerlerle çizilen grafiklere göre çok az bir fark olduğu, hemen hemen örtüştüğü söylenebilir. Bu farklılık ölçüm hatasından kaynaklanabilir. Düşük Reynolds sayılarında sürtünme faktörünün yüksek, hız arttıkça sürtünme faktörünün düştüğü görüldü. Yüksek Reynolds sayılarında düşüşün yavaşladığı hatta belli bir değerde artışın ihmal edilebilecek seviyeye geldiği gözlendi. Bu aralıkta elde edilen bağıntı için korelasyon katsayısı **0,755** ve bağıl hata **0,60** olarak elde edildi.

Şekil 5.26'de deneysel değerlere göre PPI 20 için sürtünme faktörü Reynolds değişimi, **Şekil 5.27**'de geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 20 için sürtünme faktörü Reynolds değişimi, **Şekil 5.28**'de PPI 20 için deneysel sonuçlara ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre sürtünme faktörü Reynolds sayısı değişimi verildi. Reynolds sayısının $\mathbf{5.10^3<Re_d<8.10^4}$ aralığında çalışıldı. Şekillerden görüldüğü gibi deneysel değerlerle çizilen grafiklerin ampirik değerlerle çizilen grafiklere göre çok az bir fark olduğu, neredeyse örtüştüğü söylenebilir. Bu sapma ihmal edilebilecek seviyededir ve farklılık ölçüm hatasından kaynaklanmış olabilir. Düşük Reynolds sayılarında sürtünme faktörünün yüksek, hız arttıkça sürtünme faktörünün düştüğü görülmektedir. Yüksek Reynolds sayılarında düşüşün yavaşladığı hatta belli bir değerde artışın ihmal edilebilecek seviyeye geldiği söylenebilir. Bu aralıkta elde edilen bağıntı için korelasyon katsayısı **0,553** ve bağıl hata **0,67** olarak elde edildi.

Şekil 5.29'de deneysel değerlere göre PPI 30 için sürtünme - Reynolds değişimi **Şekil 5.30**'de Geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 30 için sürtünme - Reynolds değişimi, **Şekil 5.31**'de PPI 30 için deneysel sonuçlara ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre sürtünme - Reynolds sayısı değişimi verildi. Reynolds sayısının $\mathbf{5.10^3<Re_d<7.10^4}$ aralığında çalışıldı. Şekillerden görüldüğü gibi deneysel değerlerle çizilen grafiklerin ampirik değerlerle çizilen grafiklere göre neredeyse örtüştüğü söylenebilir. Bu sapma ihmal edilebilecek seviyededir farklılığın ölçüm hatasından kaynaklandığı düşünüldü. Düşük Reynolds sayılarında sürtünme faktörünün yüksek, hız arttıkça sürtünme faktörünün düştüğü görüldü. Yüksek Reynolds sayılarında düşüşün yavaşladığı hatta belli bir değerde artışın durduğu gözlendi. Bu aralıkta elde edilen bağıntı için korelasyon katsayısı **0,893** ve bağıl hata **0,218** olarak elde edildi.

Şekil 5.32'de Deneysel değerlere göre PPI 10, 20 ve 30 için sürtünme ve Reynolds sayısı değişimi, **Şekil 5.33**'de Geliştirilen ampirik bağıntıya göre PPI 10, 20 ve 30 için sürtünme ve Reynolds sayısı değişimi, **Şekil 5.34**'de Tüm sistem için deneysel sonuçlara ve geliştirilen ampirik bağıntıya göre sürtünme ve Reynolds sayısı değişimi verildi. Eğriler incelendiğinde aynı çalışma aralığı için PPI 30 ile yapılan deneylerde elde edilen sürtünme faktörü değerlerinin sırasıyla PPI 20'den yüksek PPI 10 'dan ise daha yüksek olduğu görüldü. Bunun sebebi; gözenek sayısının artmasıyla birlikte, akışta türbülansın ve dolayısıyla da sürtünmenin artması şeklinde açıklanabilir. Bu aralıkta elde edilen bağıntı için korelasyon katsayısı **0,623** ve bağıl hata **0,751** olarak elde edildi.

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1 Elde Edilen Sonuçların Yorumu

Bu çalışmada alüminyum köpüğün ısı değiştiricisi olarak tasarımı ve ısı transferi modeli üzerinde duruldu. Açık hücreli alüminyum köpüğün üretimi için, **ergimiş metal içine gaz enjeksiyon yöntemi** ile üretimi üzerinde çalışıldı. Sistemin tasarımı, kompozisyonun oluşturulması, eriyik metal içine uygun gazın verilmesi, gaz basıncının ayarlanması, kararlaştırıcı (çekirdekleyici) malzemenin seçimi ve oranı, metal içine en uygun gaz verme sıcaklığı gibi konularda başarıya ulaşıldı. Ancak ergimiş metal içinde boşluk oluşturucu gazın homojen dağılımı yeterince sağlanamaması nedeniyle, arzu edilen metal köpük elde edilemedi.

Kenarları dx, dy ve dz olan kontrol hacim elemanına enerjinin korunumu yasası uygulandı. Açık hücreli alüminyum köpük, boşlukları çevreleyen flamentler ile boşluklardan oluşmaktadır. Boşluklar ve flamentler için ısı transfer yüzey alanı dikkate alınırken Alüminyum köpüğün porozitesi de göz önüne alındı.

(4.36) ifadesinde bulunan ve **(4.24)** ile verilen sabit değerleri içeren bağıntıda, θ-X, θ-Y ve θ-Z'in poroziteye göre değişiminde , porozite arttıkça X, Y ve Z değerleri küçülmektedir.

Porozitenin sabit değeri için θ-X, θ-Y ve θ-Z'in birim hacimdeki yüzey alanına göre değişiminde σ değeri büyüdükçe X, Y ve Z değerleri düşer ve sıfıra çok yakın değer alır. Ortam akışkan sıcaklığının (T_∞), metal köpük yüzey sıaklığından (T_{fm}) büyük olması durumunda θ negatif değer almaktadır.

PPI 10, 20 ve 30 özelliklerine sahip Alüminyum köpük ile boyutları 200mmx200mmx100mm olan ve toplam 18 boru kullanılarak bir ısı değiştiricisi dizayn edildi. Isı değiştiricisi üç geçişli olarak dizayn edildi. **SPSS 11 İstatistik**

paket programında lineer regresyon analizi kullanılarak ortalama Nusselt sayısı için; $5.10^3<Re<9.10^4$ aralığında;

$$\overline{Nu} = (0,633).(Re)^{0,290}.\left(\frac{Pr_\infty}{Pr_w}\right)^{-3,249}$$

bağıntısı elde edildi. Çoklu belirleyicilik (determinasyon) katsayısı $R^2=0.834$ dür. Aynı zamanda modelin korelasyon katsayısı r=0,913'dür. Aynı aralıkta sürtünme faktörü için,

$$f = (0,3937).(Re)^{-0,794}$$

ampirik bağıntısı bulundu. Korelasyon karsayısı r=0,623'dür.

Isı değiştiricisinin etkenlik katsayısı konvansiyonel ısı değiştiricilere göre daha düşük elde edildi. Bunun nedeni borular, Alüminyum köpük malzeme içine sonradan yerleştirilmesinden kaynaklanmaktadır. Yeni bir çalışma için ergime sıcaklığı Alüminyum köpük malzemeden biraz daha yüksek olan boru malzemesi seçilip, köpüklenme esnasında boru Alüminyum köpük içine daldırılarak, Alüminyumun boru malzemesine iyice kaplanması sağlanmalıdır. Bu takdirde etkenlik çok daha artacaktır.

7.2 Sonuçların Literatür İle Karşılaştırılması

EK - 5 Şekil 2 referans (11) ile PPI 10, 30 ve 60 için verilen değerler ile bu çalışmada **Şekil 5.4**'de verilen, PPI 10, 20 ve 30 için deneysel olarak Reynolds-Nusselt sayılarının değişimi karşılaştırıldığı zaman; PPI değerleri farklı olmalarına karşın değişim trendlerinin uyum içinde olduğu görülmektedir. Aynı zamanda **Şekil 5.11** ile verilen PPI 10, 20 ve 30 için geliştirilen ampirik bağıntıda, Reynolds-Nusselt sayılarının değişiminin referans 11'de belirtilen değişim ile uyum içinde olduğu rahatlıkla görülebilir.

EK 5 Şekil 1 ve **Şekil 3'**de basınç düşümünün akışkan hızına göre değişimi referans (1)'de gösterildiği gibi bu çalışmada **Şekil 5.22'**de verilen PPI 10, 20 ve 30 için basınç ve hız düşümü arasındaki değişim, farklı PPI değerlerine karşın uyum içinde olduğu açıkça görülür.

BÖLÜM 8

KAYNAKLAR

1 - Hernández, Á. 2005. Combıned Flow And Heat Transfer Characterızatıon of Open Cell Alumınum Foams, Mechanıcal Engıneerıng, Unıversıty Of Puerto Rıco.

2 - Montanini, R. 2005. Measurement of Strain Rate Sensitivity of Aluminium Foams for Energy Dissipation, International Journal of Mechanical Sciences, 47 26–42

3-Yamada, Y. Shimojima, K. Sakaguchi, Y. Mabuchi, M. Nakamaru, M. Asahina, T. Mukai, T. Kanahashi, H. Higashi, K. 2000. Processing of Cellular Magnesium Materials, Advanced Engıneerıng Materıals.

4 - Koza, E. Leonowicz, M. Wojciechowski, S. Simancik, F. 2003. Compressive Strength of Aluminium Foams, Science Direct.

5 - Amjad, S. College, W. 2001. Thermal Conductivity and Noise Attenuation in Aluminium Foams, University of Cambridge, October.

6 -Banhart, J. 2003. Aluminium Foams for Lighter Vehicles, International Journal of Vehicle Design.

7 - Gui, M.C. Wang, D. B. Wu, J.J. Yuan, G. J. Li, C. G. 2000. Deformation and Damping Behaviors of Foamed, Materials Science and Engineering A286 282–288.

8 -Kennedy, A.R. Asavavisitchai, S. 2003. Effects of Tib2 Particle Addition on the Expansion, Structure and Mechanical Properties of PM Al Foams , Science Direct, September.

9 - Markaki, A.E. Clyne, T.W. 2001. Energy Absorptıon Durıng Faılure of Layered Metal Foam /Ceramıc Lamınates, Department of Materials Science & Metallurgy Cambridge University, Materials Science and Engineering.

10 - Kádár, Cs. Kenesei, P. Lendvai, J. Rajkovits, Z. Energy Absorptıon Propertıes of Metal Foams, Department of General Physics, Eötvös University, Pázmány P. sétány 1/A, Budapest, H-1117.

11 - Song, Z. Zuhu, J. Ma, L. He, D. 2001. Evolution of Foamed Aluminum Structure in Foaming Process, Elsevier Science, July.

12 - Degischer, H. P. 1998. Innovative Light Metals: Metal Matrix Composites and Foamed Aluminium, *Materials & Design,*Vol. 18, Nos. 4r6, pp. 221-226.

13 - Back, W. Borman, D. Wilk, P. Kucharski, R. Production and Properties of Foamed Magnesium, Cellular Metals and Polymers, 2004.

14- Banhart, J. 2001. Manufacture Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams, Progress in Materials Science 46, 559–632

15- Liqun, M. Zhenlun, S. Deping, H. 1999. Cellular Structure Controllable Alumınıum Foams Produced By Hıgh Pressure Infıltratıon Process, Department of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Pergamon Vol. 41, No. 7, pp. 785–789.

16 – Gibson, L. J. 2000. Mechanical Behavior of Metallic Foams, Materials Science, 191- 227.

17 - Coxa, S.J. Bradley, G. Weaire, D. 2001. Metallic Foam Processing from the Liquid State, The European Physical Journal Applied Physics,January.

18 - Banhart, J. 2000. Metallic Foams: Challenges and Opportunities, Eurofoam , pp. 13-20.

19 - Park, S H. Um, Y. S. Kum, C. H. Hur, B. Y. 2005. Thermophysical Properties of Al And Mg Alloys for Metal Foam Fabrication, Colloids and Surfaces ,Aspects 263 , 280–283.

20 -Babcsan, N. Meszaros I. Hegman, N. 2003. Thermal and Electrical Conductivity Measurements on Aluminum Foams, Werkstofftech. 34, 391–394.

21-Rabiei. A. O'Neill, A.T. 2005. A Study On Processing of a Composite Metal Foam Via Casting, Department of Mechanical & Aerospace Engineering, North Carolina State University, Materials Science and Engineering, 159–164.

22- Dukhan, N. and Quinones, P. 2003. Convective Heat Transfer Analysis of Open Cell Metal Foam for Solar Air Heaters, Proceeding International Solar Energy Conference, Hawaii, USA

23- Cymat Corp. 2000. Technical Manual for Stabilized Alüminum Foam, Mississauga, Ontario, Canada L5T 2L7,

24- Ashby, M.F., Evans, A.G. Fleck, N.A. Gibson,L.J.Hutchinson, J.W. and Wadley, H.N.G. 2000. Metal Foams: A Design Guide, Boston Oxford Auckland Johannesburg, Melbourne, New Delhı

25- www. etialuminyum.com.tr,2008

26 – Patankar, S.V. 1980. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, New York.

BÖLÜM 9
EKLER
EK – 1 ALÜMİNYUM KÖPÜK DENEYLERİ

Deneylerin yapılışı

Metal köpük eldesi ile ilgili deneylerde Eti Alüminyum A.Ş. laboratuarları kullanıldı. Deney setinin potası yaklaşık 25 kg alüminyum alacak kapasitededir. Her deney için alüminyum esaslı alaşım elementinden 20 kg tartıldı ve harici bir fırında yaklaşık 750-800 ºC sıcaklığa kadar ısıtılarak ergitildi. Ergitme işlemi deney düzeneği potası içinde de yapılabilirdi, ancak ergitme işleminin uzun sürmesi bu yönde bir çalışmayı gerektirdi. Ergimiş alaşım belli sıcaklığa kadar ısıtılmış makinanın potasına dökülüp bir süre karıştırıldı. Karışım içine yine başka bir fırında 800-1200 ºC sıcaklığa kadar ısıtılmış kararlaştırıcı parçacıklar %5-20 arasında değişen oranda ilave edildi. Alaşım ve kararlaştırıcı bir süre birlikte karıştırılarak karışımın ıslanması ve homojen bir karışım haline gelmesi sağlandı. Müteakiben potadaki malzeme sıcaklığı düşerken uygun sıcaklıkta bir süre gaz üflenerek alüminyum köpük elde edilmeye çalışıldı. Deneyler ve elde edilen sonuçlar aşağıdadır.

Deney No:01

Deneylerin yapılması için AlSi7Mg alaşımı hazırlandı. Bu alaşım daha önceden Alulight firmasından getirtilen numune alaşımlarının terkibi ile benzer olarak üretildi. Alaşıma ingotlarına ait resim **Şekil 3.7'**de, içinde bulunan elementler Çizelge 3.1'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan alüminyum alaşım ingotları Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Karışım 750 ºC sıcaklığa kadar başka bir fırında ısıtıldı. Ergimiş halde yaklaşık 650 ºC sıcaklığındaki fırın-karıştırıcı içine döküldü. 10 dakika 750 ºC sıcaklıkta karıştırıldı. Karışım içine %5 oranında 800 ºC sıcaklıkta alüminyum oksit ilave edildi. 20 dakika karıştırıldı. Devamında 60 dakika süreyle 4 bar basınçta sisteme argon gazı verildi. Sistemin ısı kaybetmediği, sıcaklığın çok yavaş düştüğü görüldü. Bir sonraki deneyde, deney düzeneği sıcaklığının biraz daha düşük tutulması fikri ortaya çıktı. Alüminyum oksidin ana malzemeye karışmadığı gözlendi. Köpürme sağlanamadı.

Deney No:02

Bu deneyde de daha önce kullanılan alaşım elementi olan AlSi7Mg alaşımı hazırlandı. Karışım 800 ºC sıcaklığa kadar başka bir fırında ısıtıldı. Ergimiş halde yaklaşık 600 ºC sıcaklığındaki fırın-karıştırıcı içine döküldü. 30 dakika süre ile 750ºC sıcaklıkta karıştırıldı. Karışım içine %7,5 oranında 850 ºC sıcaklıkta alüminyum oksit ilave edildi. 60 dakika süre ile karıştırıldı. Devamında 60 dakika süreyle 4 bar basınçta sisteme argon gazı verildi. 600 ºC sıcaklığa düşünceye kadar karıştırmaya ve gaz üflemeye devam edildi. Alüminyum oksidin ana malzemeye tam anlamıyla karışmadığı gözlendi.. Karıştırıcı mil ucunda bulunan pervane kırıldı. Köpürme sağlanamadı.

Deney No:03

Bu deneyde de daha önce kullanılan alaşım elementi olan AlSi7Mg alaşımı kullanıldı. Karışım 800 ºC sıcaklığa kadar başka bir fırında ısıtıldı. Ergimiş halde yaklaşık 550 ºC sıcaklığındaki fırın-karıştırıcı içine 800 ºC döküldü. 30 dakika süre ile 700 ºC sıcaklıkta karıştırıldı. Karışım içine %10 oranında 900 ºC sıcaklıkta alüminyum oksit ilave edildi. 60 dakika süre ile karıştırıldı. Devamında 60 dakika süreyle 4,5 bar basınçta sisteme argon gazı verildi. 600 ºC sıcaklığa düşünceye kadar karıştırmaya ve gaz üflemeye devam edildi. Alüminyum oksidin ana malzemeye tam anlamıyla karışmadığı gözlendi. Sıcaklığın çok yavaş düştüğü, ergimiş malzeme içinde gaz kabarcıklarının kümelendiği parçalara ayrılmadığı görüldü. İstenilen bir köpük malzeme elde edilemedi.

Deney No:04

Bu deneyde de daha önce kullanılan alaşım elementi olan AlSi7Mg alaşımı yeniden hazırlandı. Karışım 800 ºC sıcaklığa kadar başka bir fırında ısıtıldı. Ergimiş halde yaklaşık 550 ºC sıcaklığındaki fırın-karıştırıcı içine döküldü. 30 dakika süre ile 750 ºC sıcaklıkta karıştırıldı. Karışım içine %12,5 oranında 1000 ºC sıcaklıkta alüminyum oksit ilave edildi. 60 dakika süre ile karıştırıldı. Devamında 60 dakika

süreyle 4,5 bar basınçta sisteme argon gazı verildi. 600 ºC sıcaklığa düşünceye kadar karıştırmaya ve gaz üflemeye devam edildi. Alüminyum oksidin ana malzemeye tam anlamıyla karışmadığı gözlendi. Köpürme sağlanamadı.

Deney No:05

Bu deneyde de daha önce kullanılan alaşım elementi olan AlSi7Mg alaşımı kullanıldı. Karışım 800 ºC sıcaklığa kadar başka bir fırında ısıtıldı. Ergimiş halde yaklaşık 550 ºC sıcaklığındaki fırın-karıştırıcı içine döküldü. 30 dakika süre ile 750 ºC sıcaklıkta karıştırıldı. Karışım içine %15 oranında 1100 ºC sıcaklıkta alüminyum oksit ilave edildi. 60 dakika süre ile karıştırıldı. Devamında 60 dakika süreyle 4,5 bar basınçta sisteme argon gazı verildi. 580 ºC sıcaklığa düşünceye kadar karıştırmaya ve gaz üflemeye devam edildi. Alüminyum oksidin ana malzemeye kısmen karıştığı gözlendi. İstenilen boyutta köpürme sağlanamadı.

Deney No:06

Bu deneyde de daha önce kullanılan alaşım elementi olan AlSi7Mg alaşımı kullanıldı. Karışım 800 ºC sıcaklığa kadar başka bir fırında ısıtıldı. Ergimiş halde yaklaşık 550 ºC sıcaklığındaki fırın-karıştırıcı içine döküldü. 30 dakika süre ile 750 ºC sıcaklıkta karıştırıldı. Karışım içine %15 oranında 1200 ºC sıcaklıkta alüminyum oksit ilave edildi. 60 dakika süre ile karıştırıldı. Devamında 60 dakika süreyle 5 bar basınçta sisteme argon gazı verildi. 580 ºC sıcaklığa düşünceye kadar karıştırmaya ve gaz üflemeye devam edildi. Alüminyum oksidin ana malzemeye biraz daha fazla karıştığı gözlendi. İstenilen boyutta köpürme sağlanamadı.

Deney No:07

Bu deneyde Eti Alüminyum A.Ş. ürünlerinden ETİAL-160 alaşımı kullanıldı. Karışım 800 ºC sıcaklığa kadar başka bir fırında ısıtıldı. Ergimiş halde yaklaşık 600 ºC sıcaklığındaki fırın-karıştırıcı içine döküldü. 30 dakika süre ile 750 ºC sıcaklıkta karıştırıldı. Karışım içine %10 oranında 1000 ºC sıcaklıkta alüminyum oksit ilave

edildi. 60 dakika süre ile karıştırıldı. Devamında 60 dakika süreyle 4 bar basınçta sisteme argon gazı verildi. 600 ºC sıcaklığa düşünceye kadar karıştırmaya ve gaz üflemeye devam edildi. Alüminyum oksidin ana malzemeye tam karışmadığı gözlendi. İstenilen boyutta köpürme sağlanamadı.

Deney No:08

Bu deneyde Eti Alüminyum A.Ş. ürünlerinden ETİAL-160 alaşımı kullanıldı. Karışım 800 ºC sıcaklığa kadar başka bir fırında ısıtıldı. Ergimiş halde yaklaşık 550 ºC sıcaklığındaki fırın-karıştırıcı içine döküldü. 30 dakika süre ile 750 ºC sıcaklıkta karıştırıldı. Karışım içine %15 oranında 1200 ºC sıcaklıkta alüminyum oksit ilave edildi. 60 dakika süre ile karıştırıldı. Devamında 60 dakika süreyle 4,5 bar basınçta sisteme argon gazı verildi. 600 ºC sıcaklığa düşünceye kadar karıştırmaya ve gaz üflemeye devam edildi. Alüminyum oksidin ana malzemeye tam karışmadığı gözlendi. İstenilen boyutta köpürme sağlanamadı.

Deney No:09

Bu deneyde Eti Alüminyum A.Ş. ürünlerinden ETİAL-160 alaşımı kullanıldı. Karışım 800 ºC sıcaklığa kadar başka bir fırında ısıtıldı. Ergimiş halde yaklaşık 550 ºC sıcaklığındaki fırın-karıştırıcı içine döküldü. 30 dakika süre ile 750 ºC sıcaklıkta karıştırıldı. Karışım içine %5 oranında 800 ºC sıcaklıkta **zirkonyum oksit** ilave edildi. 60 dakika süre ile karıştırıldı. Devamında 60 dakika süreyle 4,5 bar basınçta sisteme argon gazı verildi. 600 ºC sıcaklığa düşünceye kadar karıştırmaya ve gaz üflemeye devam edildi. zirkonyum oksidin ana malzemeye tam karışmadığı gözlendi. İstenilen boyutta köpürme sağlanamadı.

Deney No:10

Bu deneyde Eti Alüminyum A.Ş. ürünlerinden ETİAL-160 alaşımı kullanıldı. Karışım 800 ºC sıcaklığa kadar başka bir fırında ısıtıldı. Ergimiş halde yaklaşık 550

ºC sıcaklığındaki fırın-karıştırıcı içine döküldü. 30 dakika süre ile 750 ºC sıcaklıkta karıştırıldı. Karışım içine %10 oranında 1000 ºC sıcaklıkta zirkonyum oksit ilave edildi. 60 dakika süre ile karıştırıldı. Devamında 60 dakika süreyle 5 bar basınçta sisteme argon gazı verildi. 580 ºC sıcaklığa düşünceye kadar karıştırmaya ve gaz üflemeye devam edildi. zirkonyum oksidin ana malzemeye tam karışmadığı gözlendi. İstenilen boyutta köpürme sağlanamadı.

Deney No:11

Bu deneyde Eti Alüminyum A.Ş. ürünlerinden ETİAL-160 alaşımı kullanıldı. Karışım 800 ºC sıcaklığa kadar başka bir fırında ısıtıldı. Ergimiş halde yaklaşık 550 ºC sıcaklığındaki fırın-karıştırıcı içine döküldü. 30 dakika süre ile 750 ºC sıcaklıkta karıştırıldı. Karışım içine %12,5 oranında 1100 ºC sıcaklıkta zirkonyum oksit ilave edildi. 60 dakika süre ile karıştırıldı. Devamında 60 dakika süreyle 5 bar basınçta sisteme argon gazı verildi. 580 ºC sıcaklığa düşünceye kadar karıştırmaya ve gaz üflemeye devam edildi. zirkonyum oksidin ana malzemeye tam karışmadığı gözlendi. İstenilen boyutta köpürme sağlanamadı.

Deney No:12

Bu deneyde Eti Alüminyum A.Ş. ürünlerinden ETİAL-160 alaşımı kullanıldı. Karışım 800 ºC sıcaklığa kadar başka bir fırında ısıtıldı. Ergimiş halde yaklaşık 550 ºC sıcaklığındaki fırın-karıştırıcı içine döküldü. 30 dakika süre ile 750 ºC sıcaklıkta karıştırıldı. Karışım içine %15 oranında 1200 ºC sıcaklıkta zirkonyum oksit ilave edildi. 60 dakika süre ile karıştırıldı. Devamında 60 dakika süreyle 5 bar basınçta sisteme argon gazı verildi. 580 ºC sıcaklığa düşünceye kadar karıştırmaya ve gaz üflemeye devam edildi. Zirkonyum oksidin ana malzemeye kısmen karıştığı gözlendi. İstenilen boyutta köpürme sağlanamadı.

Deney No:13

Bu deneyde de daha önce kullanılan alaşım elementi olan AlSi7Mg alaşımı hazırlandı. Karışım 800 ºC sıcaklığa kadar başka bir fırında ısıtıldı. Ergimiş halde

yaklaşık 600 ºC sıcaklığındaki fırın-karıştırıcı içine döküldü. 30 dakika süre ile 750ºC sıcaklıkta karıştırıldı. Karışım içine %7,5 oranında 850 ºC sıcaklıkta zirkonyum oksit ilave edildi. 60 dakika süre ile karıştırıldı. Devamında 60 dakika süreyle 4 bar basınçta sisteme argon gazı verildi. 600 ºC sıcaklığa düşünceye kadar karıştırmaya ve gaz üflemeye devam edildi. Zirkonyum oksidin ana malzemeye tam anlamıyla karışmadığı gözlendi.. Karıştırıcı mil ucunda bulunan pervane kırıldı. Köpürme sağlanamadı.

Deney No:14

Bu deneyde de daha önce kullanılan alaşım elementi olan AlSi7Mg alaşımı kullanıldı. Karışım 800 ºC sıcaklığa kadar başka bir fırında ısıtıldı. Ergimiş halde yaklaşık 550 ºC sıcaklığındaki fırın-karıştırıcı içine 800 ºC döküldü. 30 dakika süre ile 700 ºC sıcaklıkta karıştırıldı. Karışım içine %10 oranında 900 ºC sıcaklıkta zirkonyum oksit ilave edildi. 60 dakika süre ile karıştırıldı. Devamında 60 dakika süreyle 4,5 bar basınçta sisteme argon gazı verildi. 600 ºC sıcaklığa düşünceye kadar karıştırmaya ve gaz üflemeye devam edildi. Zirkonyum oksidin ana malzemeye tam anlamıyla karışmadığı gözlendi. Sıcaklığın çok yavaş düştüğü, ergimiş malzeme içinde gaz kabarcıklarının kümelendiği parçalara ayrılmadığı görüldü. İstenilen bir köpük malzeme elde edilemedi.

Deney No:15

Bu deneyde de daha önce kullanılan alaşım elementi olan AlSi7Mg alaşımı kullanıldı. Karışım 800 ºC sıcaklığa kadar başka bir fırında ısıtıldı. Ergimiş halde yaklaşık 550 ºC sıcaklığındaki fırın-karıştırıcı içine döküldü. 30 dakika süre ile 750 ºC sıcaklıkta karıştırıldı. Karışım içine %15 oranında 1100 ºC sıcaklıkta zirkonyum oksit ilave edildi. 60 dakika süre ile karıştırıldı. Devamında 60 dakika süreyle 4,5 bar basınçta sisteme argon gazı verildi. 580 ºC sıcaklığa düşünceye kadar karıştırmaya ve gaz üflemeye devam edildi. Zirkonyum oksidin ana malzemeye kısmen karıştığı gözlendi. İstenilen boyutta köpürme sağlanamadı.

Deney No:16

Bu deneyde de daha önce kullanılan alaşım elementi olan AlSi7Mg alaşımı kullanıldı. Karışım 800 ºC sıcaklığa kadar başka bir fırında ısıtıldı. Ergimiş halde yaklaşık 550 ºC sıcaklığındaki fırın-karıştırıcı içine döküldü. 30 dakika süre ile 750 ºC sıcaklıkta karıştırıldı. Karışım içine %15 oranında 1200 ºC sıcaklıkta zirkonyum oksit ilave edildi. 60 dakika süre ile karıştırıldı. Devamında 60 dakika süreyle 5 bar basınçta sisteme argon gazı verildi. 580 ºC sıcaklığa düşünceye kadar karıştırmaya ve gaz üflemeye devam edildi. Zirkonyum oksidin ana malzemeye biraz daha fazla karıştığı gözlendi. İstenilen boyutta köpürme sağlanamadı.

EK – 2

ALÜMİNYUM KÖPÜK ISI TRANSFER MODELİ İÇİN TURBO PASCAL 7.0'DA HAZIRLANAN BİLGİSAYAR PROĞRAMI KAYNAK KODLARI

AlKopukHesap.pas

```
Unit AlKopukHesap;
Interface
uses  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
StdCtrls, Unit1;
Procedure Teta_Katsayilar;
Procedure Teta_Hesap;
Procedure Nusselt;
Procedure Lagrange(var h,l : Integer; xi,xo,xs,yi,yo,ys : double; sclx,scly : word);
Implementation
uses Degisken,AlKopukIsilCozum;


Procedure Lagrange(var h,l : integer; xi,xo,xs,yi,yo,ys : double; sclx,scly : word);
var
  L0,L1,L2,xl,yl,lxy,lyy,adm : real;
  i,j      : integer;
  yzz1,yzz2,yzz3,yzz4,yzz5,yzz6 : st80;
Begin
  For i:=1 to 4000 do begin
     Lx[i]:=0.0;
     Ly[i]:=0.0;
  end;
  xl:=xo-xi; yl:=yo-yi;
  if (abs(xl)<0.002) and (abs(yl)<1) Then adm:=(xl) else begin
   repeat
     xl:=xl/2.0;   yl:=yl/2.0;
   until (abs(xl)<0.002) and (abs(yl)<1);
   adm:=(xl);
  end;

  xl:=xs-xo;  yl:=ys-yo;
  if (abs(xl)<0.002) and (abs(yl)<1) Then adm:=(xl) else begin
   repeat
     xl:=xl/2.0;   yl:=yl/2.0;
   until (abs(xl)<0.002) and (abs(yl)<1);
   if abs(adm)>abs(xl) Then adm:=(xl);
  end;
  xl:=xi;

  while (xl<=xs) and (h<=4000) do begin
```

```
      l0:=(xl-xo)*(xl-xs)/((xi-xo)*(xi-xs));
      l1:=(xl-xi)*(xl-xs)/((xo-xi)*(xo-xs));
      l2:=(xl-xi)*(xl-xo)/((xs-xi)*(xs-xo));
      yl:=l0*yi+l1*yo+l2*ys;
      if (yl<yi) and (yl<yo) and (yl<ys) and (yi<yo) and (yo<ys) Then Begin
        xl:=xl+adm;
        continue;
      end;


      if (yl>yi) and (yl>yo) and (yl>ys) and (ys<yo) and (yo<yi) Then Begin
        xl:=xl+adm;
        continue;
      end;

      h:=h+1;
      Lx[h]:=xl;                ///   +(xl/100);
      Ly[h]:=yl;                ///   +(yl/100);
      xl:=xl+adm;
    end;

end;

Procedure Nusselt;    //  radyal yonde esit aralık formülü...
Var

   Df1,Df2,Df3,Df12,Df23,Df123 : Row_arr;
   i,j,sut     : integer;
Begin
   ebd1:=-999.0;
   ebd2:=-999.0;
   For i:=0 to 2*lxd Do Begin
     Df1[i]:=0;  Df2[i]:=0; Df3[i]:=0;  Tb^[i]:=2.0;
   End;

   i:=0;
   while i<=2*lxd  do begin
     Df1[i]:=Teta^[i,2*myd-6,2*nzd-6]-Teta^[i,2*myd-4,2*nzd-4];
     Df2[i]:=Teta^[i,2*myd-4,2*nzd-4]-Teta^[i,2*myd-2,2*nzd-2];
     Df3[i]:=Teta^[i,2*myd-2,2*nzd-2]-Teta^[i,2*myd,2*nzd];
     Df12[i]:=Df1[i]-Df2[i];
     Df23[i]:=Df2[i]-Df3[i];
     Df123[i]:=Df12[i]-Df23[i];
     Qwi^[i]:=(Df1[i]+(Df12[i]/2)+(Df123[i]/3))/DelX;     ///  (du/cd);
     inc(i,2);
   end;

   i:=2;
```

```
  while i<=2*lxd-2  do begin
   Nu^[i]:=2.0*Qwi^[i]/(Tb^[i]-Teta^[i,2*myd,2*nzd]);
   if Qwi^[i]>ebd1 then ebd1:=Qwi^[i];
   if Nu^[i]>ebd2 then ebd2:=Nu^[i];
   inc(i,2);
  End;
End;



Procedure Teta_Hesap;
var
  i,j,k,m,sat,sut : Integer;
  Rrr           : Double;
  s  : Longint;
Begin
  i:=0;    its:=0;   s:=0;
 repeat
  ebf:=0.0;
  i:=2;
  while i<=2*lxd do   begin
   j:=2;
   While j<=2*myd do Begin
    k:=2;
    While k<=2*nzd do Begin
     if (Atpp^[i,j,k]=0.0) Then
      rrr:=0.0
     Else

      Rrr:=(Atee^[i,j,k]*Teta^[i+2,j,k]+Atww^[i,j,k]*Teta^[i-
2,j,k]+Atnn^[i,j,k]*Teta^[i,j+2,k]+Atss^[i,j,k]*Teta^[i,j-
2,k]+Attt^[i,j,k]*Teta^[i,j,k+2]+Atbb^[i,j,k]*Teta^[i,j,k-2]+source^[i,j,k])
            /(1.0*Atpp^[i,j,k])-Teta^[i,j,k];
      Teta^[i,j,k]:=Teta^[i,j,k]+Rrr;
      If abs(Rrr)>ebf then ebf:=abs(Rrr);
      inc(k,2);
      s:=s+1;
     End;

    inc(j,2);
   end;

   inc(i,2);
  end;

  inc(its);
  until (ebf<Thlim);
End;
```

```
Procedure Teta_Katsayilar;
var
   i,j,k : Integer;
Begin
  i:=0;
  While i<=2*lxd+4 do Begin
    j:=0;
    While j<=2*myd+4 do Begin
      k:=0;
      While k<=2*nzd+4 do Begin
        Atee^[i,j,k]:=0.0;
        Atww^[i,j,k]:=0.0;
        Atnn^[i,j,k]:=0.0;
        Atss^[i,j,k]:=0.0;
        Attt^[i,j,k]:=0.0;
        Atbb^[i,j,k]:=0.0;
      source^[i,j,k]:=0.0;
        Atpp^[i,j,k]:=0.0;
        inc(k,2);
      End;

      inc(j,2);
    end;

    inc(i,2);
  end;

//    İç taraftaki katsayılar..
  i:=2;
  While i<=(2*lxd-2) Do Begin
    j:=2;
    While j<=(2*myd-2) do begin
      k:=2;
      While k<=(2*nzd-2) do Begin
        Atee^[i,j,k]:=DelY*DelZ/deltaX;
        Atww^[i,j,k]:=DelY*DelZ/deltaX;
        Atnn^[i,j,k]:=DelX*DelZ/deltaY;
        Atss^[i,j,k]:=DelX*DelZ/deltaY;
        Attt^[i,j,k]:=DelX*DelY/deltaZ;
        Atbb^[i,j,k]:=DelX*DelY/deltaZ;
      source^[i,j,k]:=0.0;

Atpp^[i,j,k]:=Atee[i,j,k]+Atww[i,j,k]+Atnn[i,j,k]+Atss[i,j,k]+Attt[i,j,k]+Atbb[i,j,k]+
M2*DelX*DelY*DelZ;
        inc(k,2);
      End;
```

```
      inc(j,2);
    End;

     inc(i,2);
  End;

//  Dış taraftaki katsayılar..
  j:=0;
  While j<=(2*myd+2) do begin
    k:=0;
    While k<=(2*nzd+2) do Begin
      Atee^[0,j,k]:=0.0;
      Atww^[0,j,k]:=0.0;
      Atnn^[0,j,k]:=0.0;
      Atss^[0,j,k]:=0.0;
      Attt^[0,j,k]:=0.0;
      Atbb^[0,j,k]:=0.0;
    source^[0,j,k]:=0.0;

Atpp^[0,j,k]:=Atee[i,j,k]+Atww[i,j,k]+Atnn[i,j,k]+Atss[i,j,k]+Attt[i,j,k]+Atbb[i,j,k]+
M2*DelX*DelY*DelZ;
      Atee^[lxd,j,k]:=0.0;
      Atww^[lxd,j,k]:=0.0;
      Atnn^[lxd,j,k]:=0.0;
      Atss^[lxd,j,k]:=0.0;
      Attt^[lxd,j,k]:=0.0;
      Atbb^[lxd,j,k]:=0.0;
    source^[lxd,j,k]:=0.0;

Atpp^[lxd,j,k]:=Atee[i,j,k]+Atww[i,j,k]+Atnn[i,j,k]+Atss[i,j,k]+Attt[i,j,k]+Atbb[i,j,k
]+M2*DelX*DelY*DelZ;
      Atee^[lxd+2,j,k]:=0.0;
      Atww^[lxd+2,j,k]:=0.0;
      Atnn^[lxd+2,j,k]:=0.0;
      Atss^[lxd+2,j,k]:=0.0;
      Attt^[lxd+2,j,k]:=0.0;
      Atbb^[lxd+2,j,k]:=0.0;
    source^[lxd+2,j,k]:=0.0;

Atpp^[lxd+2,j,k]:=Atee[i,j,k]+Atww[i,j,k]+Atnn[i,j,k]+Atss[i,j,k]+Attt[i,j,k]+Atbb[i,
j,k]+M2*DelX*DelY*DelZ;
      inc(k,2);
    End;

    inc(j,2);
  End;

/////
```

```
  i:=0;
  While i<=(2*lxd+2) do begin
    k:=0;
    While k<=(2*nzd+2) do Begin
      Atee^[i,0,k]:=0.0;
      Atww^[i,0,k]:=0.0;
      Atnn^[i,0,k]:=0.0;
      Atss^[i,0,k]:=0.0;
      Attt^[i,0,k]:=0.0;
      Atbb^[i,0,k]:=0.0;
    source^[i,0,k]:=0.0;

Atpp^[i,0,k]:=Atee[i,j,k]+Atww[i,j,k]+Atnn[i,j,k]+Atss[i,j,k]+Attt[i,j,k]+Atbb[i,j,k]+
M2*DelX*DelY*DelZ;
      Atee^[i,myd,k]:=0.0;
      Atww^[i,myd,k]:=0.0;
      Atnn^[i,myd,k]:=0.0;
      Atss^[i,myd,k]:=0.0;
      Attt^[i,myd,k]:=0.0;
      Atbb^[i,myd,k]:=0.0;
    source^[i,myd,k]:=0.0;

Atpp^[i,myd,k]:=Atee[i,j,k]+Atww[i,j,k]+Atnn[i,j,k]+Atss[i,j,k]+Attt[i,j,k]+Atbb[i,j,
k]+M2*DelX*DelY*DelZ;
      Atee^[i,myd+2,k]:=0.0;
      Atww^[i,myd+2,k]:=0.0;
      Atnn^[i,myd+2,k]:=0.0;
      Atss^[i,myd+2,k]:=0.0;
      Attt^[i,myd+2,k]:=0.0;
      Atbb^[i,myd+2,k]:=0.0;
    source^[i,myd+2,k]:=0.0;

Atpp^[i,myd+2,k]:=Atee[i,j,k]+Atww[i,j,k]+Atnn[i,j,k]+Atss[i,j,k]+Attt[i,j,k]+Atbb[
i,j,k]+M2*DelX*DelY*DelZ;
      inc(k,2);
    End;
    inc(i,2);
  End;
//////////
  i:=0;
  While i<=(2*lxd+2) do begin
    j:=0;
    While j<=(2*myd+2) do begin
      Atee^[i,j,0]:=0.0;
      Atww^[i,j,0]:=0.0;
      Atnn^[i,j,0]:=0.0;
      Atss^[i,j,0]:=0.0;
      Attt^[i,j,0]:=0.0;
```

```
      Atbb^[i,j,0]:=0.0;
    source^[i,j,0]:=0.0;

Atpp^[i,j,0]:=Atee[i,j,k]+Atww[i,j,k]+Atnn[i,j,k]+Atss[i,j,k]+Attt[i,j,k]+Atbb[i,j,k]+
M2*DelX*DelY*DelZ;
      Atee^[i,j,nzd]:=0.0;
      Atww^[i,j,nzd]:=0.0;
      Atnn^[i,j,nzd]:=0.0;
      Atss^[i,j,nzd]:=0.0;
      Attt^[i,j,nzd]:=0.0;
      Atbb^[i,j,nzd]:=0.0;
    source^[i,j,nzd]:=0.0;

Atpp^[i,j,nzd]:=Atee[i,j,k]+Atww[i,j,k]+Atnn[i,j,k]+Atss[i,j,k]+Attt[i,j,k]+Atbb[i,j,k
]+M2*DelX*DelY*DelZ;
      Atee^[i,j,nzd+2]:=0.0;
      Atww^[i,j,nzd+2]:=0.0;
      Atnn^[i,j,nzd+2]:=0.0;
      Atss^[i,j,nzd+2]:=0.0;
      Attt^[i,j,nzd+2]:=0.0;
      Atbb^[i,j,nzd+2]:=0.0;
    source^[i,j,nzd+2]:=0.0;

Atpp^[i,j,nzd+2]:=Atee[i,j,k]+Atww[i,j,k]+Atnn[i,j,k]+Atss[i,j,k]+Attt[i,j,k]+Atbb[i,
j,k]+M2*DelX*DelY*DelZ;
      inc(j,2);
    End;

    inc(i,2);
  End;

End;

End.
```

Degisken.Pas

```
Unit Degisken;
interface
uses graphics;
var
   aEpsi  : array[1..7] of real   = (0.20,0.35,0.50,0.65,0.80,0.90,0.95);
   aSigma : array[1..7] of Double = (200,400,600,800,1000,2000,5000);
   aFilmk : array[1..7] of Double = (20,50,150,300,500,1000,3000);
   kwf    : array[1..5] of Double = (0.1,1.0,10.0,100.0,1000.0);
   awf    : array[1..5] of Double = (0.1,1.0,10.0,100.0,1000.0);
   CiKaOr : array[1..3] of Double = (0.02,0.1,0.3);
   indis  : array[1..5] of byte   = (0,0,0,0,0);
   eksx   : array[1..6] of Integer= (12,22,28,34,40,48);
   rady   : array[1..6] of Integer= (4,8,12,16,20,24);
   zaman  : array[1..6] of Integer= (10,20,30,40,50,60);
   renk   : array[1..7] of TColor =
(clMaroon,clBlue,ClRed,clGray,clGreen,clBlack,clOlive);

//  Problemin Ana Parametreleri .....
   Pe     : Double = 20;
   Pr     : Double = 0.0;
   Bi     : Double = 0.0;
   ksf    : Double = 10.0;
   asf    : Double = 1.0;
   du     : Double = 0.1;
   Phlim  : Double = 0.0001;
   Thlim  : Double = 0.00000001;
   DelT   : Double = 0.0001;
   Tdt    : Double = 0.0;
   satir  : integer=1;
   tits   : longint=1;
   DeltaT : Double= 0.0001;

   bgmy   : Double = 0.001;
   bgmd   : Double = 0.0001;
   gacy   : Double = 1.33;
   gacd   : Double = 1.0;
   gacc   : Double = 1.0;
   lxd    : word = 40;
   myd    : word = 40;
   nzd    : word = 40;
   hfm    : Double = 250;
   ksol   : Double = 200;
   kflu   : Double = 0.031;
   Lboy   : Double = 2;
   sigma  : Double = 500;
   epsilon: Double = 0.90;
```

```
    dVdif  : Double = 5.0;
    Aconv  : Double = 8.0;

//  Grafik Alanin Duzenlenmesi .....
    YeEtik : String[22]='X';
    DeEtik : String[22]='Teta';
    yegarl : integer=850;
    dearlk : integer=550;
    yesol  : Double = 0.0;
    yesag  : Double = 1.0;
    yeadm  : Double = 0.2;
    yesme  : word = 85;
    ysifir : word = 0;
    yeara  : word = 100;
    dealt  : Double = -0.2;
    deust  : Double = 1.0;
    deadm  : Double = 0.20;
    deame  : word = 102;
    dsifir : word =0;
    deara  : word = 100;

    sat : integer =0;
const
    maxy = 99;
    maxx = 99;
    maxz = 99;
Type
    Mat_arr  = array[0..maxx, 0..maxy] of Double;
    Row_arr  = array[0..maxx] of Double;
    Col_arr  = array[0..maxy] of Double;
    Ten_arr  = array[0..maxx, 0..maxy, 0..maxz] of Double;
    Sut_arr  = array[0..6, 0..maxy] of Double;
    St80     = String[80];

var
    Atee,Atww,Atnn,Atss,Attt,Atbb,Atpp,source,Teta : ^Ten_arr;
    Tg : ^Ten_arr;
    xx,xr,xp,DelXx,DeltaXX,DelXr,DeltaXr,delXp,DeltaXp : ^Row_arr;
    Tb,Nu,Qwi,Qwt  : ^Col_arr;
    Tbg,Nug,Qwig : ^Sut_arr;

DelX,DelY,DelZ,deltaX,deltaY,deltaZ,mfm2,M2,ebf,Rux,Ruy,RRp,ebd1,ebd2,isa,is
u : Double;
    isn,tsy,its              : longint;
    na,z,rk                  : word;
    ciz,yaz,rbInd,son,ztp    : byte;
    tus                      : char;
    alan1,alan2,adt,bas      : word;
```

```
    resim1,resim2              : pointer;
    Lx,Ly                      : array[1..4000] of double;
    zmn                        : array[0..7] of double;
    yol                        : String;
implementation
end.
```

AlKopukIsilCozum;

```
unit AlKopukIsilCozum;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls, Degisken, CizimFrm, Buttons, ExtCtrls, Grids;

type
  TGirisFrm = class(TForm)
    Label1: TLabel;
    Label3: TLabel;
    BitBtn1: TBitBtn;
    BitBtn2: TBitBtn;
    CheckBox1: TCheckBox;
    RGrpSec: TRadioGroup;
    BitBtn3: TBitBtn;
    procedure BitBtn1Click(Sender: TObject);
    procedure BitBtn2Click(Sender: TObject);
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
    procedure RGrpSecClick(Sender: TObject);
    procedure BitBtn3Click(Sender: TObject);
    procedure FormActivate(Sender: TObject);
    Procedure EksRadKonumGir(baslik:String; var gir: Integer);
    Procedure EnerjiHes(zm:Integer);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  GirisFrm: TGirisFrm;
  zi,zarl,sat,sut:Byte;

implementation
uses Yazdir, AlKopukHesap, Unit1, Paramform, Cizimler, KonumGirUnit;
{$R *.DFM}

Procedure TGirisFrm.EksRadKonumGir(baslik:String; var gir: Integer);
var
  f2:TKonumGir;
Begin
   f2:=TKonumGir.Create(self);
```

```
   f2.KonGir.Text:=inttostr(gir);
   f2.StaticText1.Caption:=baslik;
   F2.ShowModal;
   gir:=strtoint(f2.KonGir.Text);
   f2.Free;
end;

Procedure TGirisFrm.EnerjiHes(zm: Integer);
var
  i1,j1,k1:Integer;
Begin


   its:=99;  tits:=0;  zarl:=0;  zi:=0;  tdt:=0.0;   DelT:=DeltaT;
   if zm<1 Then zi:=ztp+1;
//   SICAKLIKLARIN BAŞLANGIÇ DEGERLERI (Tahmini)....
    For i1:=0 To 2*lxd+4 do
      For j1:=0 To 2*myd+4 do
        For k1:=0 To 2*nzd+4 do
          Teta^[i1,j1,k1]:=0.0;
    For i1:=0 To 2*lxd+4 do
      For j1:=0 To 2*myd+4 do
        For k1:=0 To 2*nzd+4 do  Begin
          Teta^[0,j1,k1]:=1.0;
          Teta^[i1,0,k1]:=1.0;
          Teta^[i1,j1,0]:=1.0;
          Teta^[1,j1,k1]:=1.0;
          Teta^[i1,1,k1]:=1.0;
          Teta^[i1,j1,1]:=1.0;
        End;

  DelX:=Lboy/lxd;  DelY:=Lboy/myd;  DelZ:=Lboy/nzd;
  deltaX:=DelX;  deltaY:=DelY;  deltaZ:=DelZ;
  dVdif:=DelX*DelY*DelZ;
Aconv:=(DelX*DelY*2)+(DelX*DelZ*2)+(DelY*DelZ*2);   ///   Kontrol hacminin
hacmi ve yüzey alanı..
  mfm2:=(hfm*Sigma)/(ksol*(1-epsilon)+epsilon*kflu);
  M2:=Lboy*Lboy*mfm2;
     Teta_Katsayilar;
     Teta_Hesap;
     Nusselt;
     tits:=tits+its;
     tdt:=tdt+DelT;
End;


procedure TGirisFrm.BitBtn1Click(Sender: TObject);
var i,j,sas,sus,i1,j1,erk: Integer;
```

```
begin
  canvas.Pen.Color:=clRed;
  Canvas.font.Size:=14;
  Refresh;
  canvas.TextOut(270,555,' Hesaplama Işlemleri Devam Ediyor..  Lutfen
bekleyiniz... ');
  Color:=clBtnFace;
  Canvas.font.Size:=10;
  its:=99;
  tdt:=0.0; adt:=0; tits:=0;    tsy:=0;  yaz:=1;  rk:=0;  i:=1;
   erk:=9999;
   EnerjiHes(erk);
  canvas.Pen.Color:=clOlive;
  Canvas.font.Size:=14;
  Refresh;
  canvas.TextOut(366,555,' Hesaplama Işlemleri Bitti... ');

end;

procedure TGirisFrm.BitBtn2Click(Sender: TObject);
begin
  Close;
end;

procedure TGirisFrm.RGrpSecClick(Sender: TObject);
var erk,ss,i: Integer;
begin
  erk:=-999;
  rbInd:=GirisFrm.RGrpSec.ItemIndex;
  CzmFrm.Show;
  GirisFrm.Hide;

  case rbInd of
    0, 1, 2: Begin
       if CzmFrm.PrmPan1.Visible=False Then CzmFrm.PrmPan1.Visible:=True;
       CizdirTeta(rbInd);
       End;
    3: Begin
       if CzmFrm.PrmPan1.Visible=False Then CzmFrm.PrmPan1.Visible:=True;
       CizdirM2(0);
       End;
    4: CizdirNusselt(0);
    5: Begin
         EksRadKonumGir('Kaçıncı Eksenel Konum',erk);
         if erk=-999 Then erk:=zaman[1];
         CizdirParam(erk);
       End;
    6: CizdirQwi;
```

```
  end;
  GirisFrm.RGrpSec.ItemIndex:=-1;
end;

procedure TGirisFrm.BitBtn3Click(Sender: TObject);
begin
end;

procedure TGirisFrm.FormActivate(Sender: TObject);
var hata,i : Integer;
  dosya : TextFile;
begin
  DelT:=DeltaT;
  GirisFrm.RGrpSec.ItemIndex:=-1;
  ActiveControl:=Bitbtn1;
end;

procedure TGirisFrm.FormCreate(Sender: TObject);
begin
     getmem(Atee,((maxx+4)*(maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
     getmem(Atww,((maxx+4)*(maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
     getmem(Atnn,((maxx+4)*(maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
     getmem(Atss,((maxx+4)*(maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
     getmem(Attt,((maxx+4)*(maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
     getmem(Atbb,((maxx+4)*(maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
     getmem(Atpp,((maxx+4)*(maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
   getmem(source,((maxx+4)*(maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
     getmem(Teta,((maxx+4)*(maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
       getmem(Nu,((maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
       getmem(Tb,((maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
      getmem(Qwi,((maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));

  DelT:=DeltaT;

end;

procedure TGirisFrm.FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
begin
     freemem(Atee,((maxx+4)*(maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
     freemem(Atww,((maxx+4)*(maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
      getmem(Atnn,((maxx+4)*(maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
     freemem(Atss,((maxx+4)*(maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
     freemem(Attt,((maxx+4)*(maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
     freemem(Atbb,((maxx+4)*(maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
     freemem(Atpp,((maxx+4)*(maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
   freemem(source,((maxx+4)*(maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
     freemem(Teta,((maxx+4)*(maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
```

```
      freemem(Nu,((maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
      freemem(Tb,((maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
     freemem(Qwi,((maxy+4)*(maxz+4)+(maxx+4))*sizeof(Double));
end;

end.
```

EK-3

DENEYLERDE ÖLÇÜLEN DATALAR

PPI 10

D. No	c_{ph}	T_{hg}	T_{hc}	q	c_{pc}	T_{cc}	T_{cg}	ε_p	ε_t	q_{max}	Nu	ρ_c	U_s	T_{hgw}	T_{hcw}	υ	P_{rs}	P_{rw}	k	h	Re	ΔP	f	μ
1	4190	70	69,3	2933	1005,9	42,7	29,4	0,9	0,3276	13378	1086,7	1,146	0,5	60	50	1,66	0,712	3,25	0,027	145,24	6024	0,0035	0,000763	1,9
2	4190	70,9	69,9	4190	1005,8	41,1	28,8	0,9	0,2922	12371	1915,57	1,15	1	57,9	47,2	1,65	0,712	3,37	0,027	255,35	12121	0,004	0,000217	1,89
3	4190	71,2	69,8	5866	1005,7	39,7	28,5	0,9	0,2623	11264	2562,11	1,153	1,5	55,8	45,5	1,64	0,712	3,49	0,027	340,63	18293	0,0045	0,000108	1,89
4	4190	71,2	69,8	5866	1005,6	37,8	28,6	0,9	0,216	9251,5	2753,46	1,157	2	53,1	42,6	1,63	0,712	3,69	0,027	365,11	24540	0,005	6,75E-05	1,88
5	4190	71,1	69,8	5447	1005,6	37,3	28,8	0,9	0,2009	8547,6	3171,45	1,157	2,5	50,3	40,1	1,63	0,712	3,91	0,027	420,53	30675	0,0055	4,76E-05	1,88
6	4190	71	69,9	4609	1005,5	36,2	28,4	0,9	0,1831	7842,9	3442,48	1,16	3	48,3	38,6	1,62	0,712	4,07	0,026	455,27	37037	0,006	3,59E-05	1,88
7	4191	71,6	70	6705	1005,5	36,3	28,1	0,9	0,1885	8245,1	4172,96	1,16	3,5	46,8	37,5	1,62	0,712	4,16	0,026	551,87	43210	0,001	4,4E-06	1,88
8	4191	71,3	70,3	4190,6	1005,5	35,8	28,9	0,9	0,1627	6938	4028,68	1,16	4	45,5	36,4	1,62	0,712	4,24	0,026	532,79	49383	0,0013	4,38E-06	1,88
9	4190	71,3	69,3	8380	1005,5	35,1	29	0,9	0,1442	6133,6	4027,73	1,16	4,5	44,8	36,4	1,62	0,712	4,24	0,026	532,67	55556	0,0017	4,52E-06	1,88
10	4190	71,3	69,4	7961	1005,5	35,6	29,3	0,9	0,15	6334,7	4664,67	1,16	5	44,4	36,6	1,62	0,712	4,32	0,026	616,9	61728	0,022	4,74E-05	1,88
11	4190	71,3	69,6	7123	1005,5	35,1	28,9	0,9	0,1462	6234,1	4977,46	1,16	5,5	43,6	36,1	1,62	0,712	4,32	0,026	658,27	67901	0,027	4,81E-05	1,88
12	4190	70,8	68,7	8799	1005,5	34,7	29,5	0,9	0,1259	5228,6	4650,93	1,16	6	43,5	35,8	1,62	0,712	4,32	0,026	615,08	74074	0,032	4,79E-05	1,88
13	4189	70,4	67,9	10474	1005,5	34,7	29,7	0,9	0,1229	5027,5	4936,49	1,16	6,5	43,1	36,1	1,62	0,712	4,32	0,026	652,85	80247	0,047	5,99E-05	1,88
14	4189	70,7	67,8	12149	1005,6	35	31	0,9	0,1008	4022,4	4311,42	1,157	7	43,3	35,7	1,63	0,712	4,32	0,027	571,69	85890	0,049	5,4E-05	1,88
15	4189	70,1	68,4	7122	1005,8	40,7	30	0,9	0,2668	10762	871,291	1,15	0,5	57,1	46,5	1,65	0,712	3,43	0,027	116,14	6060,6	0,0028	0,000598	1,89
16	4190	70,3	69,2	4609	1005,8	40,4	29,8	0,9	0,2617	10661	1688,93	1,15	1	57,2	46,4	1,65	0,712	3,43	0,027	225,13	12121	0,0035	0,00019	1,89
17	4190	70,7	69,4	5447	1005,7	39,2	29	0,9	0,2446	10258	2362,56	1,153	1,5	54,9	44,6	1,64	0,712	3,55	0,027	314,1	18293	0,0043	0,000102	1,89
18	4190	70,8	68,9	7961	1005,7	38	29,1	0,9	0,2134	8950,7	2722,1	1,153	2	52,1	41,4	1,64	0,712	3,77	0,027	361,9	24390	0,0053	7,11E-05	1,89
19	4190	71	69,5	6285	1005,6	37	28,7	0,9	0,1962	8346,5	3096,83	1,157	2,5	49,9	39,3	1,63	0,712	3,91	0,027	410,64	30675	0,0055	4,76E-05	1,88
20	4190	71,4	69,4	8380	1005,6	36,6	29,1	0,9	0,1773	7542	3344,59	1,157	3	48,9	37,9	1,63	0,712	4,07	0,027	443,49	36810	0,0075	4,5E-05	1,88
21	4190	70,8	69,4	5866	1005,5	36,2	28,6	0,9	0,1801	7641,8	3959,95	1,16	3,5	47,3	37,7	1,62	0,712	4,16	0,026	523,7	43210	0,011	4,84E-05	1,88
22	4190	71,5	69,5	8380	1005,5	35,6	28,8	0,9	0,1593	6837,4	3985,84	1,16	4	46,6	36,5	1,62	0,712	4,16	0,026	527,13	49383	0,014	4,71E-05	1,88
23	4190	70,6	69,1	6285	1005,5	35,6	28,6	0,9	0,1667	7038,5	4683,21	1,16	4,5	45,4	36,1	1,62	0,712	4,24	0,026	619,35	55556	0,0175	4,66E-05	1,88
24	4190	70,7	69,3	5866	1005,5	35,3	29,2	0,9	0,147	6133,6	4534,53	1,16	5	44,7	35,8	1,62	0,712	4,32	0,026	599,69	61728	0,023	4,96E-05	1,88

D. No	c_{ph}	T_{hg}	T_{hc}	q	c_{pc}	T_{cc}	T_{cg}	ε_p	ε_t	q_{max}	Nu	ρ_c	U_s	T_{hgw}	T_{hcw}	υ	P_{rs}	P_{rw}	k	h	Re	ΔP	f	μ
25	4190	70,6	68,7	7961	1005,5	35,1	29,2	0,9	0,1425	5932,5	4856,61	1,16	5,5	43,7	35,7	1,62	0,712	4,32	0,026	642,29	67901	0,0265	4,72E-05	1,88
26	4190	70,7	69,2	6285	1005,5	34,9	30,1	0,9	0,1182	4826,4	4316,09	1,16	6	43,5	35,1	1,62	0,712	4,42	0,026	570,8	74074	0,031	4,64E-05	1,88
27	4190	70,4	69	5866	1005,6	35,3	29,9	0,9	0,1333	5430,2	4823,73	1,157	6,5	42,9	35,6	1,63	0,712	4,42	0,027	700,24	85890	0,045	5,76E-05	1,88
28	4189	70,5	68,1	10055	1005,6	35,1	30,6	0,9	0,1128	4525,2	5280,85	1,157	7	42,8	36	1,63	0,712	4,42	0,027	639,63	79755	0,05	5,51E-05	1,88
29	4190	70,4	69,1	5447	1005,8	40,9	29,3	0,9	0,2822	11667	924,132	1,15	0,5	57,3	47,1	1,65	0,712	3,43	0,027	123,19	6060,6	0,0032	0,000696	1,89
30	4190	70,2	69,6	2514	1005,9	41,2	30,1	0,9	0,2768	11165	1779,47	1,146	1	57,7	46,9	1,66	0,712	3,43	0,027	237,83	12048	0,004	0,000218	1,9
31	4190	70,6	69,5	4609	1005,7	39,2	29,4	0,9	0,2379	9855,9	2282,61	1,153	1,5	55,4	45	1,64	0,712	3,55	0,027	303,47	18293	0,0045	0,000108	1,89
32	4190	70,7	69,2	6285	1005,7	39,1	28,9	0,9	0,244	10258	3150,08	1,153	2	53,4	42,6	1,64	0,712	3,69	0,027	418,8	24390	0,0053	7,11E-05	1,89
33	4190	70,6	69,5	4609	1005,6	37,4	28,8	0,9	0,2057	8648,2	3247,84	1,157	2,5	50,8	39,5	1,63	0,712	3,91	0,027	430,66	30675	0,0065	5,62E-05	1,88
34	4190	71,1	69,3	7542	1005,6	36,5	28,9	0,9	0,1801	7642,6	3393,7	1,157	3	48,8	38,3	1,63	0,712	3,99	0,027	450,01	36810	0,007	4,2E-05	1,88
35	4190	70,9	69,6	5447	1005,5	35,7	28,8	0,9	0,1639	6938	3566,84	1,16	3,5	47,5	37,9	1,62	0,712	4,07	0,026	471,71	43210	0,01	4,4E-05	1,88
36	4190	71,4	69,3	8799	1005,5	35,3	28,9	0,9	0,1506	6435,2	3756,28	1,16	4	46,2	36,5	1,62	0,712	4,24	0,026	496,77	49383	0,0135	4,55E-05	1,88
37	4190	70,7	69,6	4609	1005,5	35,7	29,1	0,9	0,1587	6636,3	4415,59	1,16	4,5	45,4	36,1	1,62	0,712	4,24	0,026	583,96	55556	0,017	4,52E-05	1,88
38	4190	71	69,4	6704	1005,5	35,5	29,3	0,9	0,1487	6234,1	4602,77	1,16	5	44,4	35,9	1,62	0,712	4,32	0,026	608,72	61728	0,023	4,96E-05	1,88
39	4190	70,8	69,2	6704	1005,5	34,7	29,4	0,9	0,128	5329,2	4310,99	1,16	5,5	43,7	36,1	1,62	0,712	4,32	0,026	570,13	67901	0,0274	4,88E-05	1,88
40	4190	70,6	68,4	9218	1005,5	34,9	29,6	0,9	0,1293	5329,2	4791,27	1,16	6	43,1	35,6	1,62	0,712	4,42	0,026	633,65	74074	0,033	4,94E-05	1,88
41	4189	70,8	67,9	12149	1005,5	35	29,6	0,9	0,1311	5429,7	5317,02	1,16	6,5	42,8	35,5	1,62	0,712	4,42	0,026	703,18	80247	0,04	5,1E-05	1,88
42	4189	69,9	67,7	9216,7	1005,6	35,3	30,4	0,9	0,1241	4927,4	5325,56	1,157	7	43,1	35,7	1,63	0,712	4,42	0,027	706,17	85890	0,046	5,07E-05	1,88
43	4185	59,5	58,3	5021,5	1005,7	38,1	30	0,9	0,2746	8146,2	904,729	1,153	0,5	53,5	45	1,64	0,712	3,62	0,027	120,28	6097,5	0,0025	0,000542	1,89
44	4185	62	60,5	6278,1	1005,7	39,1	29	0,9	0,3061	10158	2061,31	1,153	1	53,4	44,2	1,64	0,712	3,62	0,027	274,05	12195	0,0033	0,000176	1,89
45	4186	62,6	60,9	7115,9	1005,6	37,8	28,8	0,9	0,2663	9050,4	2648,63	1,157	1,5	50,9	41,7	1,63	0,712	3,84	0,027	351,21	18405	0,0043	0,000102	1,88
46	4186	63,5	61,7	8371,6	1005,6	35,6	29	0,9	0,2151	7441,4	2781,48	1,157	2	47,3	38,2	1,63	0,712	3,99	0,027	368,82	24540	0,005	6,75E-05	1,88
47	4186	63,6	61,9	7116,5	1005,5	35,8	28,6	0,9	0,2057	7239,6	3306,82	1,16	2,5	47,3	37,7	1,62	0,712	4,16	0,026	437,33	30864	0,006	5,17E-05	1,88
48	4186	63,9	62,1	7535,2	1005,5	35,4	28,7	0,9	0,1903	6736,9	3644,9	1,16	3	45,4	36,9	1,62	0,712	4,24	0,026	482,04	37037	0,006	3,59E-05	1,88
49	4187	64,2	62,8	5861,2	1005,5	34,3	28,7	0,9	0,1577	5630,8	3437,6	1,16	3,5	43,7	35,5	1,62	0,712	4,32	0,026	454,62	43210	0,008	3,52E-05	1,88
50	4187	64,3	62,9	5861,2	1005,5	34,2	28,9	0,9	0,1497	5329,2	3712,42	1,16	4	43,5	36	1,62	0,712	4,32	0,026	490,97	49383	0,01	3,37E-05	1,88
51	4187	64,7	62,8	7954,5	1005,4	33,9	28,8	0,9	0,1421	5127,5	3997,29	1,163	4,5	42,6	35,4	1,61	0,712	4,42	0,026	527,24	55901	0,013	3,45E-05	1,87
52	4187	65,3	62,9	10048	1005,5	34,1	29,2	0,9	0,1357	4927	4237,42	1,16	5	42,3	35,2	1,62	0,712	4,42	0,026	560,4	61728	0,021	4,53E-05	1,88
53	4187	65,3	62,7	10885	1005,5	34,4	29,4	0,9	0,1393	5027,5	4808,14	1,16	5,5	41,5	35,1	1,62	0,712	4,52	0,026	635,88	67901	0,027	4,81E-05	1,88
54	4187	65,6	62,3	13816	1005,5	34,3	29,9	0,9	0,1232	4424,2	4652,05	1,16	6	41,5	35,1	1,62	0,712	4,52	0,026	615,23	74074	0,032	4,79E-05	1,88

D. No	c_{ph}	T_{hg}	T_{hc}	q	c_{pc}	T_{cc}	T_{cg}	ε_p	ε_t	q_{max}	Nu	ρ_c	U_s	T_{hgw}	T_{hcw}	υ	P_{rs}	P_{rw}	k	h	Re	ΔP	f	μ
55	4187	65,1	62,5	10885	1005,5	34,8	29,8	0,9	0,1416	5027,5	5563,68	1,16	6,5	41,4	35,3	1,62	0,712	4,52	0,026	765,81	80247	0,037	4,72E-05	1,88
56	4187	65,3	62,3	12560	1005,6	35,1	30,7	0,9	0,1272	4424,6	5790,59	1,157	7	40,8	35,6	1,63	0,712	4,52	0,027	737,74	85890	0,044	4,85E-05	1,88
57	4187	65,3	63,6	7117,2	1005,8	40,4	30	0,9	0,2946	10460	981,492	1,15	0,5	55,1	45,7	1,65	0,712	3,55	0,027	130,83	6060,6	0,0025	0,000544	1,89
58	4187	65,4	64,1	5443,1	1005,8	40,1	29,4	0,9	0,2972	10762	1969,12	1,15	1	55,3	45,9	1,65	0,712	3,49	0,027	262,48	12121	0,0035	0,00019	1,89
59	4187	66,1	64,2	7955,3	1005,7	38,6	29	0,9	0,2588	9654,7	2549,85	1,153	1,5	53	43,7	1,64	0,712	3,69	0,027	339	18293	0,0042	0,000101	1,89
60	4187	65,8	64	7536,6	1005,6	37,6	28,9	0,9	0,2358	8748,7	3068,64	1,157	2	50,4	40,7	1,63	0,712	3,84	0,027	406,9	24540	0,005	6,75E-05	1,88
61	4187	66	64,3	7117,9	1005,6	36,5	28,9	0,9	0,2049	7642,6	3268,2	1,157	2,5	48	39,3	1,63	0,712	3,99	0,027	433,36	30675	0,0055	4,76E-05	1,88
62	4187	66	64,3	7117,9	1005,6	36,5	28,9	0,9	0,2049	7642,6	3268,2	1,157	3	48	39,3	1,63	0,712	3,99	0,027	433,36	30675	0,0055	3,3E-05	1,88
63	4188	66,6	64,4	9212,7	1005,5	34,5	29	0,9	0,1463	5530,3	3201,15	1,16	3,5	44,6	36,2	1,62	0,712	4,32	0,026	423,35	43210	0,0067	2,95E-05	1,88
64	4188	66,8	64,5	9631,5	1005,5	34,7	28,4	0,9	0,1641	6334,7	4147,59	1,16	4	44,3	36,1	1,62	0,712	4,32	0,026	548,52	49383	0,0095	3,2E-05	1,88
65	4188	66,8	64,4	10050	1005,5	35	28,8	0,9	0,1632	6234,1	4260,82	1,16	4,5	43,4	35,9	1,62	0,712	4,32	0,026	614,5	67901	0,013	3,46E-05	1,88
66	4188	67	64,4	10888	1005,5	34,9	29,2	0,9	0,1508	5731,4	4646,48	1,16	5	42,8	35,7	1,62	0,712	4,42	0,026	628,64	55556	0,0215	4,63E-05	1,88
67	4188	67,3	64,5	11725	1005,5	34,2	29,5	0,9	0,1243	4725,9	4753,46	1,16	5,5	41,4	35,3	1,62	0,712	4,52	0,026	563,49	61728	0,0275	4,9E-05	1,88
68	4187	66,7	64	11305	1005,5	34,3	29,4	0,9	0,1314	4927	4925,52	1,16	6	41,4	35,7	1,62	0,712	4,42	0,026	651,4	74074	0,0322	4,82E-05	1,88
69	4187	66,5	64	10468	1005,5	34,6	30,1	0,9	0,1236	4524,8	4989,76	1,16	6,5	41,5	36,1	1,62	0,712	4,42	0,026	659,9	80247	0,0365	4,65E-05	1,88
70	4187	67	63,9	12980	1005,6	35,2	30,7	0,9	0,124	4525,2	5410	1,157	7	40,6	35,5	1,63	0,712	4,52	0,027	717,37	85890	0,0445	4,91E-05	1,88
71	4188	66,6	65,1	6281,4	1005,9	41,5	30,1	0,9	0,3123	11467	1041,5	1,146	0,5	57	46,8	1,66	0,712	3,43	0,027	139,2	6024	0,0025	0,000545	1,9
72	4188	67	64,8	9212,7	1005,8	39,7	29,5	0,9	0,272	10259	1799,14	1,15	1	56,6	46,5	1,65	0,712	3,43	0,027	239,83	12121	0,003	0,000163	1,89
73	4188	67,1	65,6	6281,4	1005,7	39,1	29,5	0,9	0,2553	9654,7	2494,16	1,153	1,5	54,9	44,6	1,64	0,712	3,55	0,027	331,6	18293	0,0038	9,03E-05	1,89
74	4188	67,5	65,3	9212,7	1005,7	38,2	29	0,9	0,239	9252,4	3114,11	1,153	2	51,7	41,7	1,64	0,712	3,77	0,027	414,02	24390	0,0045	6,1E-05	1,89
75	4188	67,7	65,7	8376,4	1005,6	37	29,2	0,9	0,2026	7843,7	3239,41	1,157	2,5	50	39,5	1,63	0,712	3,91	0,027	429,55	30675	0,005	4,32E-05	1,88
76	4188	67,8	66,2	6701,1	1005,6	36,2	29,6	0,9	0,1728	6637	3241,02	1,157	3	47,1	38,2	1,63	0,712	4,07	0,027	429,76	36810	0,0061	3,66E-05	1,88
77	4188	67,7	66,2	6282,3	1005,5	35,9	28,9	0,9	0,1804	7038,5	3979,86	1,16	3,5	45,9	37,4	1,62	0,712	4,16	0,026	526,34	43210	0,0079	3,47E-05	1,88
78	4188	67,8	65,8	8376,4	1005,5	35,9	28,8	0,9	0,1821	7139,1	4626,78	1,16	4	45	36,9	1,62	0,712	4,24	0,026	611,89	49383	0,0105	3,54E-05	1,88
79	4188	67,4	65,8	6701,1	1005,5	35,5	28,9	0,9	0,1714	6636,3	4845,6	1,16	4,5	43,4	36,1	1,62	0,712	4,32	0,026	640,83	55556	0,014	3,72E-05	1,88
80	4188	67,7	65,7	8376,4	1005,5	34,2	29,1	0,9	0,1321	5128,1	4083,21	1,16	5	42,6	35,6	1,62	0,712	4,42	0,026	540	61728	0,0205	4,42E-05	1,88
81	4188	67,7	65,4	9632,9	1005,5	35	29	0,9	0,155	6033	5360,63	1,16	5,5	42,2	35,8	1,62	0,712	4,42	0,026	708,94	67901	0,0276	4,92E-05	1,88
82	4188	67,9	65,1	11725	1005,5	34,4	29,8	0,9	0,1207	4625,3	4502,98	1,16	6	41,7	35,4	1,62	0,712	4,42	0,026	595,52	74074	0,0333	4,98E-05	1,88
83	4188	67,4	64,6	11725	1005,6	34,8	30,7	0,9	0,1117	4123	4473,79	1,157	6,5	41,5	35,6	1,63	0,712	4,42	0,027	593,22	79755	0,038	4,86E-05	1,88
84	4188	67,3	64,6	11307	1005,6	35,7	31,1	0,9	0,1271	4625,8	5521,73	1,157	7	40,8	35,6	1,63	0,712	4,52	0,027	732,18	85890	0,045	4,96E-05	1,88

PPI 20

D. No	c_{ph}	T_{hg}	T_{hc}	q	c_{pc}	T_{cc}	T_{cg}	ε_p	ε_t	q_{max}	Nu	ρ_c	U_s	T_{hgw}	T_{hcw}	υ	P_{rs}	P_{rw}	k	h	Re	ΔP	f	μ
1	4186	64,3	61,7	10884	1005,8	41,2	29,4	0,9	0,3381	11868	1175,93	1,15	0,5	53,3	43,3	1,65	0,712	3,69	0,027	156,75	6060,6	0,004	0,00087	1,89
2	4186	62,5	62,1	1674,3	1005,8	41,1	29,3	0,9	0,3554	11868	2403,93	1,15	1	52,7	42,7	1,65	0,712	3,69	0,027	320,44	12121	0,005	0,000272	1,89
3	4186	64,7	61,9	11721	1005,7	39,3	29	0,9	0,2885	10359	2942,25	1,153	1,5	50,7	39,8	1,64	0,712	3,91	0,027	391,17	18293	0,007	0,000169	1,89
4	4187	65,3	62,2	12978	1005,6	38,2	28,7	0,9	0,2596	9553,2	3500,11	1,157	2	48,9	38,1	1,63	0,712	3,99	0,027	464,11	24540	0,008	0,000108	1,88
5	4187	66,2	62,2	16746	1005,6	37,7	27,6	0,9	0,2617	10157	4467,17	1,157	2,5	46,2	36	1,63	0,712	4,24	0,027	592,35	30675	0,014	0,000121	1,88
6	4187	66,6	63,3	13817	1005,5	37	27,4	0,9	0,2449	9652,8	4935,5	1,16	3	44,7	35,5	1,62	0,712	4,32	0,026	652,72	37037	0,019	0,000114	1,88
7	4187	66,9	62,4	18842	1005,5	36,6	27,3	0,9	0,2348	9351,2	5586,67	1,16	3,5	43,5	34,9	1,62	0,712	4,42	0,026	738,84	43210	0,027	0,000119	1,88
8	4187	67	62,2	20098	1005,5	36,6	27,5	0,9	0,2304	9150,1	6276,25	1,16	4	43,1	34	1,62	0,712	4,42	0,026	830,03	49383	0,034	0,000114	1,88
9	4187	67	62,6	18423	1005,5	36,4	28	0,9	0,2154	8446,2	6507,65	1,16	4,5	42,7	33,7	1,62	0,712	4,52	0,026	860,64	55556	0,044	0,000117	1,88
10	4187	66,4	62	18421	1005,5	35,9	28,9	0,9	0,1867	7038,5	6177,19	1,16	5	42,8	33,2	1,62	0,712	4,52	0,026	816,93	61728	0,054	0,000116	1,88
11	4187	66,7	61,5	21770	1005,5	36,2	28,8	0,9	0,1953	7440,7	7228,65	1,16	5,5	41,5	32,7	1,62	0,712	4,63	0,026	955,99	67901	0,069	0,000123	1,88
12	4187	66,3	60,9	22608	1005,5	36,2	28,5	0,9	0,2037	7742,4	8297,39	1,16	6	41,1	33	1,62	0,712	4,63	0,026	1097,3	74074	0,081	0,000121	1,88
13	4186	66,2	60,6	23443	1005,6	36,2	29,4	0,9	0,1848	6838,1	8062,53	1,157	6,5	41,1	33,3	1,63	0,712	4,63	0,027	1069,1	79755	0,094	0,00012	1,88
14	4187	66,2	61,6	19258	1005,9	41,4	29,8	0,9	0,3187	11668	1125,3	1,146	0,5	52,8	43,7	1,66	0,712	3,69	0,027	150,4	6024	0,0035	0,000763	1,9
15	4187	66,6	62	19258	1005,8	40,9	29,1	0,9	0,3147	11868	2223,43	1,15	1	51	42,2	1,65	0,712	3,77	0,027	296,38	12121	0,005	0,000272	1,89
16	4187	66,6	62,2	18421	1005,8	40,4	29,3	0,9	0,2976	11164	3110,76	1,15	1,5	50,1	41,2	1,65	0,712	3,84	0,027	414,66	18182	0,0075	0,000181	1,89
17	4187	67,3	62,1	21772	1005,7	38,7	29	0,9	0,2533	9755,3	3490,89	1,153	2	47,2	37,9	1,64	0,712	4,07	0,027	464,11	24390	0,0085	0,000115	1,89
18	4187	67,5	62,4	21354	1005,7	37,9	29,2	0,9	0,2272	8749,6	3845,21	1,153	2,5	45,7	36,1	1,64	0,712	4,24	0,027	511,22	30488	0,0013	1,13E-05	1,89
19	4187	67,3	63,5	15911	1005,6	37,5	28,4	0,9	0,2339	9151	4695,89	1,157	3	44,7	35,5	1,63	0,712	4,32	0,027	622,68	36810	0,0185	0,000111	1,88
20	4187	67,3	62,8	18842	1005,6	37	28,3	0,9	0,2231	8748,7	5245,81	1,157	3,5	43,5	34,8	1,63	0,712	4,42	0,027	695,59	42945	0,026	0,000115	1,88
21	4187	67,4	62,5	20516	1005,6	36,6	28,6	0,9	0,2062	8044,8	5521,36	1,157	4	43,1	33,9	1,63	0,712	4,52	0,027	732,13	49080	0,034	0,000115	1,88
22	4187	67,4	62,3	21354	1005,5	36,4	28,3	0,9	0,2072	8144,6	6294,54	1,16	4,5	42,6	33,7	1,62	0,712	4,52	0,026	832,45	55556	0,043	0,000114	1,88
23	4187	67,6	62,5	21354	1005,6	36,4	29	0,9	0,1917	7441,4	6384,07	1,157	5	41,5	33,5	1,63	0,712	4,52	0,027	846,53	61350	0,0545	0,000118	1,88
24	4187	67,5	62,1	22610	1005,5	36,4	28,4	0,9	0,2046	8044	7621,8	1,16	5,5	41,5	32,7	1,62	0,712	4,63	0,026	1008	67901	0,068	0,000121	1,88
25	4187	66,7	61	23864	1005,6	36,4	28,8	0,9	0,2005	7642,6	8144,89	1,157	6	40,8	33,3	1,63	0,712	4,63	0,027	1080	73620	0,082	0,000123	1,88
26	4187	66,9	60,7	25957	1005,6	36,3	28,9	0,9	0,1947	7441,4	8605,2	1,157	6,5	41,1	33,7	1,63	0,712	4,63	0,027	1141	79755	0,093	0,000119	1,88

D. No	c_{ph}	T_{hg}	T_{hc}	q	c_{pc}	T_{cc}	T_{cg}	ε_p	ε_t	q_{max}	Nu	ρ_c	U_s	T_{hgw}	T_{hcw}	υ	P_{rs}	P_{rw}	k	h	Re	ΔP	f	μ
27	4187	67	62,2	20098	1005,8	41	29,8	0,9	0,3011	11265	1058,8	1,15	0,5	51,5	43,4	1,65	0,712	3,77	0,027	141,14	6060,6	0,0038	0,000815	1,89
28	4187	67,1	62,9	17585	1005,8	41,2	29,1	0,9	0,3184	12170	2237,95	1,15	1	51,6	43	1,65	0,712	3,77	0,027	298,32	12121	0,0052	0,000283	1,89
29	4187	67,4	62,9	18842	1005,8	40,3	29,1	0,9	0,2924	11265	3046,01	1,15	1,5	50,4	41	1,65	0,712	3,84	0,027	406,03	18182	0,0058	0,00014	1,89
30	4188	67,9	63,2	19682	1005,7	39	28,8	0,9	0,2609	10258	3578,05	1,153	2	48	39	1,64	0,712	3,99	0,027	475,7	24390	0,0012	1,63E-05	1,89
31	4187	67,6	63	19260	1005,6	37,7	28,8	0,9	0,2294	8949,8	3875	1,157	2,5	46,1	36,7	1,63	0,712	4,24	0,027	513,83	30675	0,0018	1,56E-05	1,88
32	4188	67,7	63,7	16750	1005,6	37,6	28,3	0,9	0,236	9352,1	4755,14	1,157	3	44,7	35,7	1,63	0,712	4,32	0,027	630,53	36810	0,0021	1,26E-05	1,88
33	4187	67,8	63,1	19679	1005,5	37	27,8	0,9	0,23	9250,6	5468,07	1,16	3,5	43,9	35	1,62	0,712	4,42	0,026	723,15	43210	0,0027	1,19E-05	1,88
34	4187	67,6	63,2	18423	1005,6	36,9	28,7	0,9	0,2108	8245,9	5615,99	1,157	4	43,1	33,9	1,63	0,712	4,52	0,027	744,68	49080	0,0335	0,000113	1,88
35	4187	67,6	62,8	20098	1005,6	36,6	28,8	0,9	0,201	7843,7	6028,29	1,157	4,5	43,1	33,9	1,63	0,712	4,52	0,027	799,35	55215	0,0445	0,000119	1,88
36	4187	67,9	62,8	21354	1005,5	36,2	28	0,9	0,2055	8245,1	6437,02	1,16	5	41,9	33,9	1,62	0,712	4,52	0,026	915,25	79755	0,055	0,000119	1,88
37	4187	67,6	62	23447	1005,5	36,4	27,1	0,9	0,2296	9351,2	6920,57	1,16	5,5	41,3	33,2	1,62	0,712	4,63	0,026	1148,7	61728	0,0685	0,000122	1,88
38	4187	67,4	61,8	23447	1005,5	36,2	28,5	0,9	0,1979	7742,4	8040,11	1,16	6	41,1	33,7	1,62	0,712	4,63	0,026	1063,3	74074	0,0805	0,00012	1,88
39	4187	67,1	61,8	22189	1005,6	36,2	30,7	0,9	0,1511	5530,8	8686,08	1,157	6,5	40,8	33,1	1,63	0,712	4,63	0,027	853,55	67901	0,092	0,000118	1,88
40	4189	69,2	66	13404	1005,8	42,6	27,2	0,9	0,3667	15489	1300,03	1,15	0,5	52,7	43,3	1,65	0,712	3,69	0,027	173,29	6060,6	0,0035	0,000761	1,89
41	4189	69,5	67,2	9634,2	1005,7	41,8	27,2	0,9	0,3452	14683	2394,33	1,153	1	51,5	41,3	1,64	0,712	3,84	0,027	318,33	12195	0,0055	0,000298	1,89
42	4189	69,9	67,3	10892	1005,7	40,4	27,3	0,9	0,3075	13175	3139,05	1,153	1,5	50,3	39,4	1,64	0,712	3,91	0,027	417,34	18293	0,007	0,000169	1,89
43	4189	69,9	66,9	12566	1005,6	39,4	27,2	0,9	0,2857	12268	3880,19	1,157	2	49,4	37,6	1,63	0,712	3,99	0,027	514,51	24540	0,0083	0,000111	1,88
44	4189	69,8	67	11729	1005,6	39,3	27,5	0,9	0,279	11866	4704,62	1,157	2,5	46,6	35,7	1,63	0,712	4,24	0,027	623,83	30675	0,0125	0,000108	1,88
45	4189	70	67,1	12149	1005,6	38,3	27	0,9	0,2628	11363	5270,79	1,157	3	45,9	34,4	1,63	0,712	4,32	0,027	698,91	36810	0,019	0,000114	1,88
46	4189	69,5	66,8	11310	1005,6	37,7	27,4	0,9	0,2447	10358	5652,3	1,157	3,5	44,6	33,5	1,63	0,712	4,42	0,027	749,5	42945	0,0255	0,000112	1,88
47	4189	69,5	66,8	11310	1005,5	37,2	26,6	0,9	0,2471	10658	6564,59	1,16	4	44,2	33,4	1,62	0,712	4,42	0,026	868,17	49383	0,033	0,000111	1,88
48	4189	69,6	66,3	13823	1005,5	37	27,4	0,9	0,2275	9652,8	6781,99	1,16	4,5	43,5	32,8	1,62	0,712	4,52	0,026	896,92	55556	0,0435	0,000116	1,88
49	4189	69,4	65,9	14661	1005,5	36,9	26,7	0,9	0,2389	10256	7984,19	1,16	5	42,8	32,5	1,62	0,712	4,52	0,026	1055,9	61728	0,054	0,000116	1,88
50	4188	69,4	64,9	18847	1005,5	36,5	27,2	0,9	0,2204	9351,2	8132,44	1,16	5,5	42,2	32,6	1,62	0,712	4,63	0,026	1075,5	67901	0,066	0,000118	1,88
51	4188	68,9	64,8	17172	1005,5	36,4	27,2	0,9	0,2206	9250,6	8838,95	1,16	6	42,6	32,9	1,62	0,712	4,52	0,026	1169	74074	0,089	0,000133	1,88
52	4188	68,3	64,6	15494	1005,5	36,7	26,5	0,9	0,244	10256	10677,3	1,16	6,5	41,6	32,9	1,62	0,712	4,63	0,026	1412,1	80247	0,09	0,000115	1,88
53	4190	70,7	69,2	6285	1006	47	26,9	0,9	0,4589	20221	1663,02	1,143	0,5	64,6	58,8	1,67	0,712	2,89	0,027	222,84	5988	0,0033	0,000711	1,9
54	4190	71,3	69,1	9218	1005,9	44,5	27	0,9	0,395	17603	2789,18	1,146	1	56,2	46,3	1,66	0,712	3,49	0,027	372,77	12048	0,0048	0,000259	1,9
55	4190	71,3	68,9	10056	1005,8	42,3	27,1	0,9	0,3439	15288	3555,83	1,15	1,5	52,7	41,6	1,65	0,712	3,77	0,027	473,99	18182	0,0065	0,000157	1,89
56	4190	71,1	68,6	10475	1005,7	40,5	26,8	0,9	0,3093	13778	4201,77	1,153	2	50	38,3	1,64	0,712	3,99	0,027	558,63	24390	0,008	0,000108	1,89

D. No	c_{ph}	T_{hg}	T_{hc}	q	c_{pc}	T_{cc}	T_{cg}	ε_p	ε_t	q_{max}	Nu	ρ_c	U_s	T_{hgw}	T_{hcw}	υ	P_{rs}	P_{rw}	k	h	Re	ΔP	f	μ
57	4190	71,3	68,4	12151	1005,6	39,4	27	0,9	0,2799	12469	4721,26	1,157	2,5	48,2	35,9	1,63	0,712	4,16	0,027	626,04	30675	0,012	0,000104	1,88
58	4190	71	68,1	12151	1005,6	38,2	27,3	0,9	0,2494	10961	4959,87	1,157	3	45,5	33,7	1,63	0,712	4,32	0,027	657,68	36810	0,0185	0,000111	1,88
59	4189	71,1	67,5	15082	1005,5	37,8	26,9	0,9	0,2466	10960	5794,69	1,16	3,5	44,9	33,7	1,62	0,712	4,42	0,026	766,35	43210	0,0245	0,000108	1,88
60	4189	70,8	67,6	13406	1005,6	38,1	27	0,9	0,2534	11162	6762,06	1,157	4	44,3	33,2	1,63	0,712	4,42	0,027	896,65	49080	0,0333	0,000112	1,88
61	4189	71,1	66,9	17595	1005,5	37	26,9	0,9	0,2285	10156	6884,86	1,16	4,5	43,3	32,7	1,62	0,712	4,52	0,026	910,52	55556	0,0425	0,000113	1,88
62	4189	70,7	66,5	17595	1005,5	36,9	27,1	0,9	0,2248	9853,9	7513,89	1,16	5	43,1	32,9	1,62	0,712	4,52	0,026	993,71	61728	0,0535	0,000115	1,88
63	4189	69,9	66,3	15080	1005,5	37	27	0,9	0,2331	10055	8550,77	1,16	5,5	42,5	32,4	1,62	0,712	4,63	0,026	1130,8	67901	0,064	0,000114	1,88
64	4189	69,6	65,4	17593	1005,5	36,5	27,7	0,9	0,21	8848,4	8371,06	1,16	6	42,2	33,1	1,62	0,712	4,52	0,026	1107,1	74074	0,078	0,000117	1,88
65	4188	69,3	65,3	16753	1005,5	37,1	27	0,9	0,2388	10156	10452,6	1,16	6,5	42,3	32,6	1,62	0,712	4,63	0,026	1382,4	80247	0,091	0,000116	1,88
66	4188	68,2	66,4	7538,8	1005,9	44	27,1	0,9	0,4112	17000	1461,3	1,146	0,5	53,3	45,7	1,66	0,712	3,55	0,027	195,3	6024	0,0033	0,000709	1,9
67	4188	68,3	66,3	8376,4	1005,8	42,6	26,9	0,9	0,3792	15791	2662,92	1,15	1	48,7	40,9	1,65	0,712	3,91	0,027	354,97	12121	0,005	0,000272	1,89
68	4189	69,3	66,4	12148	1005,7	41	27,2	0,9	0,3278	13879	3404,76	1,153	1,5	47,3	39,1	1,64	0,712	4,07	0,027	452,66	18293	0,0063	0,000151	1,89
69	4189	69,3	66,3	12566	1005,7	40,1	27,3	0,9	0,3048	12873	4167,5	1,153	2	46,6	37	1,64	0,712	4,16	0,027	554,07	24390	0,008	0,000108	1,89
70	4188	68,8	66	11727	1005,6	39,3	27,2	0,9	0,2909	12168	4944,3	1,157	2,5	44,6	35,9	1,63	0,712	4,32	0,027	655,61	30675	0,012	0,000104	1,88
71	4189	69	66,5	10472	1005,6	38,5	27,1	0,9	0,2721	11464	5461,97	1,157	3	43,2	34,2	1,63	0,712	4,42	0,027	724,26	36810	0,0185	0,000111	1,88
72	4189	69,1	66,3	11729	1005,6	37,9	27,2	0,9	0,2554	10760	5946,98	1,157	3,5	42	33,6	1,63	0,712	4,52	0,027	788,57	42945	0,0255	0,000112	1,88
73	4189	69,3	66	13823	1005,5	37,2	27,3	0,9	0,2357	9954,5	6278,29	1,16	4	42	32,9	1,62	0,712	4,63	0,026	830,3	49383	0,0333	0,000112	1,88
74	4188	69,2	65,5	15496	1005,5	37,1	26,8	0,9	0,2429	10357	7348,46	1,16	4,5	41	32,6	1,62	0,712	4,63	0,026	971,83	55556	0,0442	0,000118	1,88
75	4188	68,7	65,7	12565	1005,5	37,2	27,3	0,9	0,2391	9954,5	7948,91	1,16	5	40,3	32,4	1,62	0,712	4,73	0,026	1051,2	61728	0,0538	0,000116	1,88
76	4188	68,4	64,8	15078	1005,5	36,6	27	0,9	0,2319	9652,8	8515,39	1,16	5,5	39,7	32,8	1,62	0,712	4,73	0,026	1126,2	67901	0,0648	0,000115	1,88
77	4188	68,4	64,4	16750	1005,5	36,8	27,1	0,9	0,2349	9753,3	9481,64	1,16	6	39,8	32,8	1,62	0,712	4,73	0,026	1253,9	74074	0,0792	0,000119	1,88
78	4188	68	64,4	15075	1005,5	36,7	27	0,9	0,2366	9753,4	10301,7	1,16	6,5	39,9	32,8	1,62	0,712	4,73	0,026	1362,4	80247	0,0903	0,000115	1,88

PPI 30

D. No	c_{ph}	T_{hg}	T_{hc}	q	c_{pc}	T_{cc}	T_{cg}	ε_p	ε_t	q_{max}	Nu	ρ_c	U_s	T_{hgw}	T_{hcw}	υ	P_{rs}	P_{rw}	k	h	Re	ΔP	f	μ
1	4187	66,1	62,6	14653	1005,8	41,3	29,3	0,9	0,3261	12070	1140,29	1,15	0,5	53,9	45,6	1,65	0,712	3,55	0,027	152	6060,6	0,0045	0,000978	1,89
2	4187	66	62,3	15490	1005,8	41,1	28,9	0,9	0,3288	12271	2310,63	1,15	1	50,7	42,9	1,65	0,712	3,77	0,027	308,01	12121	0,006	0,000326	1,89
3	4187	66,4	62,9	14655	1005,9	41,9	29,3	0,9	0,3396	12674	3572,26	1,146	1,5	47,9	40,5	1,66	0,712	3,99	0,027	477,43	18072	0,011	0,000267	1,9
4	4187	67	62,3	19679	1005,8	41,7	28,9	0,9	0,336	12874	4815,5	1,15	2	46,5	37,9	1,65	0,712	4,16	0,027	641,91	24242	0,016	0,000217	1,89
5	4187	66,3	62,4	16328	1005,8	41,5	28,6	0,9	0,3422	12975	6076,75	1,15	2,5	44,1	36,2	1,65	0,712	4,32	0,027	810,03	30303	0,025	0,000217	1,89
6	4187	66,7	62,3	18421	1005,7	40,1	28,4	0,9	0,3055	11767	6441,27	1,153	3	43	34,9	1,64	0,712	4,42	0,027	856,37	36585	0,034	0,000205	1,89
7	4187	66,7	62,1	19258	1005,7	39,9	28,5	0,9	0,2984	11465	7334,26	1,153	3,5	43	34,7	1,64	0,712	4,42	0,027	975,09	42683	0,045	0,000199	1,89
8	4187	66,2	62,4	15909	1005,7	39,9	28,2	0,9	0,3079	11767	9661,91	1,153	4,5	41,8	34,4	1,64	0,712	4,52	0,027	1284,6	54878	0,07	0,000187	1,89
9	4187	66,3	61,3	20933	1005,8	40	29,3	0,9	0,2892	10762	10132,7	1,15	5	41,3	34,1	1,65	0,712	4,52	0,027	1350,7	60606	0,086	0,000187	1,89
10	4186	65,4	60,4	20931	1005,8	40,1	30,1	0,9	0,2833	10058	10922,6	1,15	5,5	41	35,1	1,65	0,712	4,52	0,027	1456	66667	0,106	0,00019	1,89
11	4187	65,5	61,6	16328	1005,8	41,1	29,4	0,9	0,3241	11768	1141,24	1,15	0,5	52,1	44,6	1,65	0,712	3,69	0,027	152,13	6060,6	0,004	0,00087	1,89
12	4187	65,6	61,9	15490	1005,8	41,5	29,1	0,9	0,3397	12472	2406,29	1,15	1	50,8	42,6	1,65	0,712	3,77	0,027	320,76	12121	0,006	0,000326	1,89
13	4187	66	62,2	15909	1005,8	41,5	28,8	0,9	0,3414	12774	3632,92	1,15	1,5	48,6	40,2	1,65	0,712	3,99	0,027	484,27	18182	0,01	0,000242	1,89
14	4187	66,1	62,7	14234	1005,8	41	29,3	0,9	0,3179	11768	4416,71	1,15	2	45,8	37,8	1,65	0,712	4,16	0,027	588,75	24242	0,017	0,000231	1,89
15	4187	66,6	62,4	17584	1005,8	41	28,4	0,9	0,3298	12673	5835,84	1,15	2,5	43,9	36,4	1,65	0,712	4,32	0,027	777,92	30303	0,025	0,000217	1,89
16	4187	66,5	62,3	17584	1005,7	40,7	28,2	0,9	0,3264	12571	6950,64	1,153	3	43,3	35,4	1,64	0,712	4,42	0,027	924,09	36585	0,036	0,000217	1,89
17	4187	66	61,9	17165	1005,7	40	27,9	0,9	0,3176	12169	7836,5	1,153	3,5	42,5	34,5	1,64	0,712	4,52	0,027	1041,9	42683	0,046	0,000204	1,89
18	4187	66,2	61,6	19258	1005,7	39,7	28,3	0,9	0,3008	11465	9524,37	1,153	4,5	41,4	34,1	1,64	0,712	4,52	0,027	1266,3	54878	0,072	0,000193	1,89
19	4186	65,8	60,8	20931	1005,7	39,6	29	0,9	0,288	10660	10145,4	1,153	5	40,8	33,8	1,64	0,712	4,63	0,027	1348,8	60976	0,089	0,000193	1,89
20	4186	66,1	60,7	22605	1005,8	39,9	29,7	0,9	0,2802	10259	10829,4	1,15	5,5	40,8	34,5	1,65	0,712	4,52	0,027	1443,6	66667	0,107	0,000192	1,89

EK-4

DENEY DÜZENEĞİ SPSS 11 İSTATİSTİK SİSTEMİNE GÖRE MODEL DÖKÜMANI

PPI 10 için Regression

Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
LNNU	8,122634	,454697326	84
LNRE	10,51978	,756642847	84
LNPR	-1,74295	,092802303	84

Correlations

		LNNU	LNRE	LNPR
Pearson Correlation	LNNU	1,000	,974	-,897
	LNRE	,974	1,000	-,947
	LNPR	-,897	-,947	1,000
Sig. (1-tailed)	LNNU	,	,000	,000
	LNRE	,000	,	,000
	LNPR	,000	,000	,
N	LNNU	84	84	84
	LNRE	84	84	84
	LNPR	84	84	84

Variables Entered/Removed[b]

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	LNPR, LNRE[a]	,	Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: LNNU

Model Summary[b]

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	,977[a]	,955	,954	,097249481	,955	866,732	2	81	,000

a. Predictors: (Constant), LNPR, LNRE

b. Dependent Variable: LNNU

ANOVA[b]

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	16,394	2	8,197	866,732	,000[a]
	Residual	,766	81	,009		
	Total	17,160	83			

a. Predictors: (Constant), LNPR, LNRE

b. Dependent Variable: LNNU

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B		Correlations			Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound	Zero-order	Partial	Part	Tolerance	VIF
1	(Constant)	2,597	,239		10,874	,000	2,122	3,073					
	LNRE	,727	,044	1,209	16,513	,000	,639	,814	,974	,878	,388	,103	9,730
	LNPR	1,216	,359	,248	3,389	,001	,502	1,930	-,897	,352	,080	,103	9,730

a. Dependent Variable: LNNU

Coefficient Correlations[a]

Model			LNPR	LNRE
1	Correlations	LNPR	1,000	,947
		LNRE	,947	1,000
	Covariances	LNPR	,129	1,496E-02
		LNRE	1,496E-02	1,937E-03

a. Dependent Variable: LNNU

Collinearity Diagnostics[a]

Model	Dimension	Eigenvalue	Condition Index	Variance Proportions		
				(Constant)	LNRE	LNPR
1	1	2,997	1,000	,00	,00	,00
	2	2,695E-03	33,349	,45	,07	,00
	3	1,808E-04	128,762	,55	,93	1,00

a. Dependent Variable: LNNU

Residuals Statistics[a]

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	6,952424	8,660179	8,122634	,444432321	84
Residual	-,291157	,19683556	,00000000	,096070656	84
Std. Predicted Value	-2,633	1,210	,000	1,000	84
Std. Residual	-2,994	2,024	,000	,988	84

a. Dependent Variable: LNNU

PPI 20 Regression

Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
LNNU	8,488502	,549977346	78
LNRE	10,45570	,747100587	78
LNPR	-1,79104	,092175918	78

Correlations

		LNNU	LNRE	LNPR
Pearson Correlation	LNNU	1,000	,983	-,899
	LNRE	,983	1,000	-,936
	LNPR	-,899	-,936	1,000
Sig. (1-tailed)	LNNU	,	,000	,000
	LNRE	,000	,	,000
	LNPR	,000	,000	,
N	LNNU	78	78	78
	LNRE	78	78	78
	LNPR	78	78	78

Variables Entered/Removed[b]

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	LNPR, LNRE[a]	,	Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: LNNU

Model Summary[b]

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	,985[a]	,970	,969	,097194313	,970	1195,232	2	75	,000

a. Predictors: (Constant), LNPR, LNRE

b. Dependent Variable: LNNU

ANOVA[b]

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	22,582	2	11,291	1195,232	,000[a]
	Residual	,709	75	,009		
	Total	23,291	77			

a. Predictors: (Constant), LNPR, LNRE

b. Dependent Variable: LNNU

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B		Correlations			Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound	Zero-order	Partial	Part	Tolerance	VIF
1	(Constant)	1,506	,253		5,962	,000	1,003	2,009					
	LNRE	,839	,042	1,140	19,926	,000	,755	,923	,983	,917	,401	,124	8,064
	LNPR	,999	,341	,167	2,927	,005	,319	1,678	-,899	,320	,059	,124	8,064

a. Dependent Variable: LNNU

Coefficient Correlations[a]

Model			LNPR	LNRE
1	Correlations	LNPR	1,000	,936
		LNRE	,936	1,000
	Covariances	LNPR	,116	1,345E-02
		LNRE	1,345E-02	1,772E-03

a. Dependent Variable: LNNU

Collinearity Diagnostics[a]

Model	Dimension	Eigenvalue	Condition Index	Variance Proportions		
				(Constant)	LNRE	LNPR
1	1	2,997	1,000	,00	,00	,00
	2	2,622E-03	33,810	,44	,09	,00
	3	2,064E-04	120,509	,56	,91	1,00

a. Dependent Variable: LNNU

Casewise Diagnostics[a]

Case Number	Std. Residual	LNNU
36	-3,680	8,769820

a. Dependent Variable: LNNU

Residuals Statistics[a]

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	7,148447	9,127524	8,488502	,541547520	78
Residual	-,357704	,19431108	,00000000	,095923744	78
Std. Predicted Value	-2,474	1,180	,000	1,000	78
Std. Residual	-3,680	1,999	,000	,987	78

a. Dependent Variable: LNNU

PPI 30 Regression

Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
LNNU	8,555195	,701167313	20
LNRE	10,25368	,747832698	20
LNPR	-1,78081	,081175720	20

Correlations

		LNNU	LNRE	LNPR
Pearson Correlation	LNNU	1,000	,997	-,979
	LNRE	,997	1,000	-,978
	LNPR	-,979	-,978	1,000
Sig. (1-tailed)	LNNU	,	,000	,000
	LNRE	,000	,	,000
	LNPR	,000	,000	,
N	LNNU	20	20	20
	LNRE	20	20	20
	LNPR	20	20	20

Variables Entered/Removed[b]

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	LNPR, LNRE[a]	,	Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: LNNU

Model Summary[b]

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	,997[a]	,995	,994	,053571137	,995	1618,941	2	17	,000

a. Predictors: (Constant), LNPR, LNRE

b. Dependent Variable: LNNU

ANOVA[b]

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	9,292	2	4,646	1618,941	,000[a]
	Residual	,049	17	,003		
	Total	9,341	19			

a. Predictors: (Constant), LNPR, LNRE

b. Dependent Variable: LNNU

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B		Correlations			Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound	Zero-order	Partial	Part	Tolerance	VIF
1	(Constant)	-1,500	,534		-2,811	,012	-2,626	-,374					
	LNRE	,863	,079	,921	10,868	,000	,696	1,031	,997	,935	,190	,043	23,359
	LNPR	-,676	,732	-,078	-,924	,368	-2,220	,868	-,979	-,219	-,016	,043	23,359

a. Dependent Variable: LNNU

Coefficient Correlations[a]

Model			LNPR	LNRE
1	Correlations	LNPR	1,000	,978
		LNRE	,978	1,000
	Covariances	LNPR	,535	5,686E-02
		LNRE	5,686E-02	6,309E-03

a. Dependent Variable: LNNU

Collinearity Diagnostics[a]

Model	Dimension	Eigenvalue	Condition Index	Variance Proportions		
				(Constant)	LNRE	LNPR
1	1	2,997	1,000	,00	,00	,00
	2	2,560E-03	34,216	,11	,04	,00
	3	5,526E-05	232,902	,89	,96	1,00

a. Dependent Variable: LNNU

Residuals Statistics[a]

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	7,104705	9,338636	8,555195	,699333844	20
Residual	-,091719	,08548959	,00000000	,050673223	20
Std. Predicted Value	-2,074	1,120	,000	1,000	20
Std. Residual	-1,712	1,596	,000	,946	20

a. Dependent Variable: LNNU

Genel Denklem Regression

Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
LNNU	8,326969	,558095112	182
LNRE	10,46308	,751697812	182
LNPR	-1,76772	,093772889	182

Correlations

		LNNU	LNRE	LNPR
Pearson Correlation	LNNU	1,000	,880	-,896
	LNRE	,880	1,000	-,896
	LNPR	-,896	-,896	1,000
Sig. (1-tailed)	LNNU	,	,000	,000
	LNRE	,000	,	,000
	LNPR	,000	,000	,
N	LNNU	182	182	182
	LNRE	182	182	182
	LNPR	182	182	182

Variables Entered/Removed[b]

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	LNPR, LNRE[a]	,	Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: LNNU

Model Summary[b]

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	,913[a]	,834	,832	,228920833	,834	448,391	2	179	,000

a. Predictors: (Constant), LNPR, LNRE

b. Dependent Variable: LNNU

ANOVA[b]

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	46,996	2	23,498	448,391	,000[a]
	Residual	9,380	179	,052		
	Total	56,376	181			

a. Predictors: (Constant), LNPR, LNRE

b. Dependent Variable: LNNU

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B		Correlations			Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound	Zero-order	Partial	Part	Tolerance	VIF
1	(Constant)	-,456	,341		-1,338	,183	-1,128	,217					
	LNRE	,290	,051	,391	5,710	,000	,190	,391	,880	,393	,174	,198	5,050
	LNPR	-3,249	,408	-,546	-7,968	,000	-4,054	-2,444	-,896	-,512	-,243	,198	5,050

a. Dependent Variable: LNNU

Coefficient Correlations[a]

Model			LNPR	LNRE
1	Correlations	LNPR	1,000	,896
		LNRE	,896	1,000
	Covariances	LNPR	,166	1,857E-02
		LNRE	1,857E-02	2,588E-03

a. Dependent Variable: LNNU

Collinearity Diagnostics[a]

Model	Dimension	Eigenvalue	Condition Index	Variance Proportions		
				(Constant)	LNRE	LNPR
1	1	2,997	1,000	,00	,00	,00
	2	2,660E-03	33,564	,56	,14	,01
	3	3,540E-04	92,013	,44	,86	,99

a. Dependent Variable: LNNU

Casewise Diagnostics[a]

Case Number	Std. Residual	LNNU
137	3,449	7,416389

a. Dependent Variable: LNNU

Residuals Statistics[a]

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	6,626924	8,975613	8,326969	,509553201	182
Residual	-,554958	,78946507	,00000000	,227652564	182
Std. Predicted Value	-3,336	1,273	,000	1,000	182
Std. Residual	-2,424	3,449	,000	,994	182

a. Dependent Variable: LNNU

Sürtünme PPI 10 Regression

Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
LNF	-9,71690	,911313069	84
LNRE	10,51940	,757130523	84

Correlations

		LNF	LNRE
Pearson Correlation	LNF	1,000	-,755
	LNRE	-,755	1,000
Sig. (1-tailed)	LNF	,	,000
	LNRE	,000	,
N	LNF	84	84
	LNRE	84	84

Variables Entered/Removed[b]

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	LNRE[a]	,	Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: LNF

Model Summary[b]

					Change Statistics				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	,755[a]	,571	,565	,600770449	,571	108,984	1	82	,000

a. Predictors: (Constant), LNRE

b. Dependent Variable: LNF

ANOVA[b]

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	39,335	1	39,335	108,984	,000[a]
	Residual	29,596	82	,361		
	Total	68,931	83			

a. Predictors: (Constant), LNRE

b. Dependent Variable: LNF

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B		Correlations			Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound	Zero-order	Partial	Part	Tolerance	VIF
1	(Constant)	-,152	,919		-,166	,869	-1,979	1,675					
	LNRE	-,909	,087	-,755	-10,440	,000	-1,083	-,736	-,755	-,755	-,755	1,000	1,000

a. Dependent Variable: LNF

Coefficient Correlations[a]

Model			LNRE
1	Correlations	LNRE	1,000
	Covariances	LNRE	7,586E-03

a. Dependent Variable: LNF

Collinearity Diagnostics[a]

Model	Dimension	Eigenvalue	Condition Index	Variance Proportions (Constant)	Variance Proportions LNRE
1	1	1,997	1,000	,00	,00
	2	2,550E-03	27,990	1,00	1,00

a. Dependent Variable: LNF

Casewise Diagnostics[a]

Case Number	Std. Residual	LNF
7	-4,122	-12,3300
8	-3,926	-12,3400
9	-3,695	-12,3100

a. Dependent Variable: LNF

Residuals Statistics[a]

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	-10,4812	-8,06263	-9,71690	,688414753	84
Residual	-2,47617	,88262582	,00000000	,597140383	84
Std. Predicted Value	-1,110	2,403	,000	1,000	84
Std. Residual	-4,122	1,469	,000	,994	84

a. Dependent Variable: LNF

Sürtünme PPI 20 Regression

Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
LNF	-8,96853	,802301819	78
LNRE	10,45570	,747097998	78

Correlations

		LNF	LNRE
Pearson Correlation	LNF	1,000	-,553
	LNRE	-,553	1,000
Sig. (1-tailed)	LNF	,	,000
	LNRE	,000	,
N	LNF	78	78
	LNRE	78	78

Variables Entered/Removed[b]

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	LNRE[a]	,	Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: LNF

Model Summary[b]

					Change Statistics				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	,553[a]	,306	,297	,672682901	,306	33,533	1	76	,000

a. Predictors: (Constant), LNRE

b. Dependent Variable: LNF

ANOVA[b]

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	15,174	1	15,174	33,533	,000[a]
	Residual	34,390	76	,453		
	Total	49,564	77			

a. Predictors: (Constant), LNRE

b. Dependent Variable: LNF

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B		Correlations			Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound	Zero-order	Partial	Part	Tolerance	VIF
1	(Constant)	-2,756	1,076		-2,562	,012	-4,898	-,614					
	LNRE	-,594	,103	-,553	-5,791	,000	-,799	-,390	-,553	-,553	-,553	1,000	1,000

a. Dependent Variable: LNF

Coefficient Correlations[a]

Model			LNRE
1	Correlations	LNRE	1,000
	Covariances	LNRE	1,053E-02

a. Dependent Variable: LNF

Collinearity Diagnostics[a]

Model	Dimension	Eigenvalue	Condition Index	Variance Proportions (Constant)	Variance Proportions LNRE
1	1	1,997	1,000	,00	,00
	2	2,511E-03	28,207	1,00	1,00

a. Dependent Variable: LNF

Casewise Diagnostics[a]

Case Number	Std. Residual	LNF
18	-3,720	-11,3931
30	-3,372	-11,0268
31	-3,235	-11,0706
32	-3,387	-11,2811
33	-3,334	-11,3410

a. Dependent Variable: LNF

Residuals Statistics[a]

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	-9,46596	-7,92383	-8,96853	,443917308	78
Residual	-2,50218	,88365430	,00000000	,668300555	78
Std. Predicted Value	-1,121	2,353	,000	1,000	78
Std. Residual	-3,720	1,314	,000	,993	78

a. Dependent Variable: LNF

Sürtünme PPI 30 Regression

Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
LNF	-8,28072	,471480144	20
LNRE	10,25367	,747829831	20

Correlations

		LNF	LNRE
Pearson Correlation	LNF	1,000	-,893
	LNRE	-,893	1,000
Sig. (1-tailed)	LNF	,	,000
	LNRE	,000	,
N	LNF	20	20
	LNRE	20	20

Variables Entered/Removed[b]

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	LNRE[a]	,	Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: LNF

Model Summary[b]

					Change Statistics				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	,893[a]	,797	,786	,218065310	,797	70,819	1	18	,000

a. Predictors: (Constant), LNRE

b. Dependent Variable: LNF

ANOVA[b]

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	3,368	1	3,368	70,819	,000[a]
	Residual	,856	18	,048		
	Total	4,224	19			

a. Predictors: (Constant), LNRE

b. Dependent Variable: LNF

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B		Correlations			Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound	Zero-order	Partial	Part	Tolerance	VIF
1	(Constant)	-2,508	,688		-3,647	,002	-3,953	-1,063					
	LNRE	-,563	,067	-,893	-8,415	,000	-,704	-,422	-,893	-,893	-,893	1,000	1,000

a. Dependent Variable: LNF

Coefficient Correlations[a]

Model			LNRE
1	Correlations	LNRE	1,000
	Covariances	LNRE	4,475E-03

a. Dependent Variable: LNF

Collinearity Diagnostics[a]

Model	Dimension	Eigenvalue	Condition Index	Variance Proportions (Constant)	Variance Proportions LNRE
1	1	1,997	1,000	,00	,00
	2	2,517E-03	28,170	1,00	1,00

a. Dependent Variable: LNF

Residuals Statistics[a]

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	-8,76136	-7,41143	-8,28072	,421003335	20
Residual	-,298354	,48187363	,00000000	,212249187	20
Std. Predicted Value	-1,142	2,065	,000	1,000	20
Std. Residual	-1,368	2,210	,000	,973	20

a. Dependent Variable: LNF

Sürtünme Genel Regression

Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
LNF	-9,23853	,957688778	182
LNRE	10,46308	,751695236	182

Correlations

		LNF	LNRE
Pearson Correlation	LNF	1,000	-,623
	LNRE	-,623	1,000
Sig. (1-tailed)	LNF	,	,000
	LNRE	,000	,
N	LNF	182	182
	LNRE	182	182

Variables Entered/Removed[b]

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	LNRE[a]	,	Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: LNF

Model Summary[b]

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	,623[a]	,388	,385	,751127358	,388	114,239	1	180	,000

a. Predictors: (Constant), LNRE

b. Dependent Variable: LNF

ANOVA[b]

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	64,453	1	64,453	114,239	,000[a]
	Residual	101,555	180	,564		
	Total	166,007	181			

a. Predictors: (Constant), LNRE

b. Dependent Variable: LNF

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B		Correlations			Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound	Zero-order	Partial	Part	Tolerance	VIF
1	(Constant)	-,932	,779		-1,197	,233	-2,470	,605					
	LNRE	-,794	,074	-,623	-10,688	,000	-,940	-,647	-,623	-,623	-,623	1,000	1,000

a. Dependent Variable: LNF

Coefficient Correlations[a]

Model			LNRE
1	Correlations	LNRE	1,000
	Covariances	LNRE	5,517E-03

a. Dependent Variable: LNF

Collinearity Diagnostics[a]

Model	Dimension	Eigenvalue	Condition Index	Variance Proportions	
				(Constant)	LNRE
1	1	1,997	1,000	,00	,00
	2	2,557E-03	27,951	1,00	1,00

a. Dependent Variable: LNF

Casewise Diagnostics[a]

Case Number	Std. Residual	LNF
7	-3,899	-12,3342
8	-3,764	-12,3389
9	-3,596	-12,3062
102	-3,014	-11,3931

a. Dependent Variable: LNF

Residuals Statistics[a]

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	-9,95119	-7,83693	-9,23853	,596734927	182
Residual	-2,92837	1,193474	,00000000	,749049546	182
Std. Predicted Value	-1,194	2,349	,000	1,000	182
Std. Residual	-3,899	1,589	,000	,997	182

a. Dependent Variable: LNF

ÇİZELGE 1

DOYMUŞ SUYUN ÖZELLİKLERİ

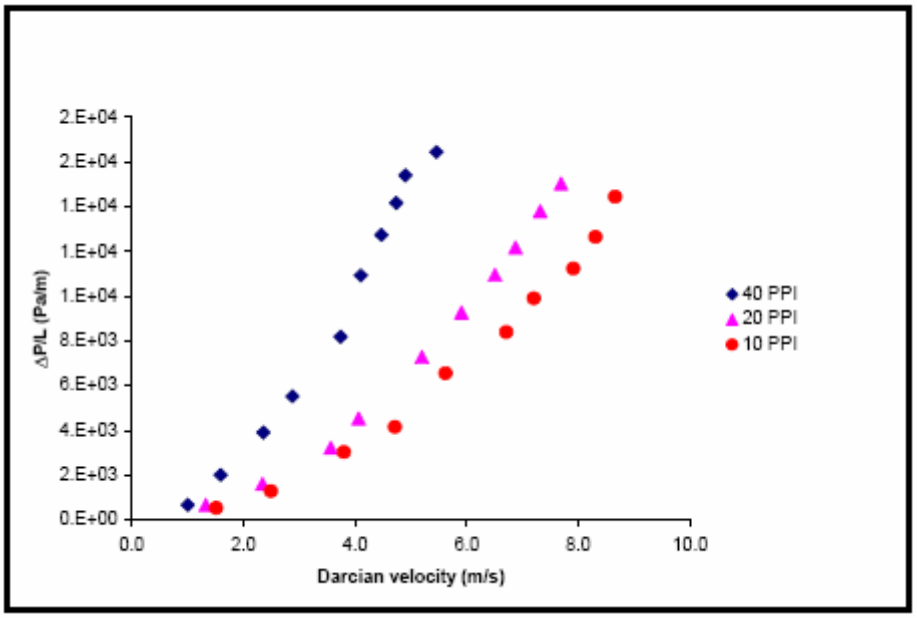
Sıcaklık (^oC)	Yoğunluk,(ρ) Kg/m^3	Özgül ısı,c_p (J/kg ^oC)	Isı iletim katsayısı,k (W/m ^oC)	Dinamik viskozite,μ (kg/ms)	Prandtl sayısı,Pr
0	999.80	4217.0	0.5610	$1.7920 X10^{-3}$	13.50
1	999.82	4214.6	0.5630	$1.7374 X10^{-3}$	13.04
2	999.84	4212.2	0.5650	$1.6828 X10^{-3}$	12.58
3	999.86	4209.8	0.5670	$1.6282 X10^{-3}$	12.12
4	999.88	4207.4	0.5690	$1.5736 X10^{-3}$	11.66
5	999.90	4205.0	0.5710	$1.519 X10^{-3}$	11.20
6	999.86	4202.8	0.5728	$1.4766 X10^{-3}$	10.85
7	999.82	4200.6	0.5746	$1.4342 X10^{-3}$	10.50
8	999.78	4198.4	0.5764	$1.3918 X10^{-3}$	10.15
9	999.74	4196.2	0.5782	$1.3494 X10^{-3}$	9.800
10	999.70	4194.0	0.5800	$1.307 X10^{-3}$	9.450
11	999.58	4192.4	0.5818	$1.2732 X10^{-3}$	9.178
12	999.46	4190.8	0.5836	$1.2394 X10^{-3}$	8.906
13	999.34	4189.2	0.5854	$1.2056 X10^{-3}$	8.634
14	999.22	4187.6	0.5872	$1.1718 X10^{-3}$	8.362
15	999.10	4186.0	0.5890	$1.1380 X10^{-3}$	8.090
16	999.88	4185.2	0.5908	$1.1108 X10^{-3}$	7.874
17	998.66	4184.4	0.5926	$1.0836 X10^{-3}$	7.658
18	998.44	4183.6	0.5944	$1.0564 X10^{-3}$	7.442
19	998.22	4182.8	0.5962	$1.0292 X10^{-3}$	7.226
20	998.00	4182.0	0.5980	$1.002 X10^{-3}$	7.010
21	997.80	4181.6	0.5998	$0.9798 X10^{-3}$	6.836
22	997.60	4181.2	0.6016	$0.9576 X10^{-3}$	6.662
23	997.40	4180.8	0.6034	$0.9354 X10^{-3}$	6.488
24	997.20	4180.4	0.6052	$0.9132 X10^{-3}$	6.314
25	997.00	4180.0	0.6070	$0.891 X10^{-3}$	6.140
26	996.80	4179.6	0.6086	$0.8724 X10^{-3}$	5.996
27	996.60	4179.2	0.6102	$0.8538 X10^{-3}$	5.852
28	996.40	4178.8	0.6118	$0.8352 X10^{-3}$	5.708
29	996.20	4178.4	0.6134	$0.8166 X10^{-3}$	5.564
30	996.00	4178.0	0.6150	$0.798 X10^{-3}$	5.420

Sıcaklık (^oC)	Yoğunluk,(ρ) Kg/m^3	Özgül ısı,c_p ($J/kg\,^oC$)	Isı iletim katsayısı,k ($W/m\,^oC$)	Dinamik viskozite,μ (kg/ms)	Prandtl sayısı,Pr
31	995.60	4178.0	0.6166	$0.7824\ X10^{-3}$	5.302
32	995.20	4178.0	0.6182	$0.7668\ X10^{-3}$	5.184
33	994.80	4178.0	0.6198	$0.7512\ X10^{-3}$	5.066
34	994.40	4178.0	0.6214	$0.7356\ X10^{-3}$	4.948
35	994.00	4178.0	0.6230	$0.720\ X10^{-3}$	4.830
36	993.62	4178.2	0.6246	$0.7066\ X10^{-3}$	4.728
37	993.24	4178.4	0.6262	$0.6932\ X10^{-3}$	4.626
38	992.86	4178.6	0.6278	$0.6798\ X10^{-3}$	4.524
39	992.48	4178.8	0.6294	$0.6664\ X10^{-3}$	4.422
40	992.10	4179.0	0.6310	$0.653\ X10^{-3}$	4.320
41	991.70	4179.2	0.6322	$0.6416\ X10^{-3}$	4.238
42	991.30	4179.4	0.6334	$0.6302\ X10^{-3}$	4.156
43	990.90	4179.6	0.6346	$0.6188\ X10^{-3}$	4.074
44	990.50	4179.8	0.6358	$0.6074\ X10^{-3}$	3.992
45	990.10	4180.0	0.6370	$0.596\ X10^{-3}$	3.910
46	989.70	4180.2	0.6384	$0.5862\ X10^{-3}$	3.838
47	989.30	4180.4	0.6398	$0.5764\ X10^{-3}$	3.766
48	988.90	4180.6	0.6412	$0.5666\ X10^{-3}$	3.694
49	988.50	4180.8	0.6426	$0.5568\ X10^{-3}$	3.622
50	988.10	4181.0	0.6440	$0.547\ X10^{-3}$	3.550
51	987.52	4181.4	0.6450	$0.5384\ X10^{-3}$	3.490
52	986.94	4181.8	0.6460	$0.5298\ X10^{-3}$	3.430
53	986.36	4182.2	0.6470	$0.5212\ X10^{-3}$	3.370
54	985.78	4182.6	0.6480	$0.5126\ X10^{-3}$	3.310
55	985.20	4183.0	0.6490	$0.504\ X10^{-3}$	3.250
56	984.82	4183.4	0.6500	$0.4966\ X10^{-3}$	3.198
57	984.44	4183.8	0.6510	$0.4892\ X10^{-3}$	3.146
58	984.06	4184.2	0.6520	$0.4818\ X10^{-3}$	3.094
59	983.68	4184.6	0.6530	$0.4744\ X10^{-3}$	3.042
60	983.30	4185.0	0.6540	$0.467\ X10^{-3}$	2.990
61	982.72	4185.4	0.6550	$0.4602\ X10^{-3}$	2.942
62	982.14	4185.8	0.6560	$0.4534\ X10^{-3}$	2.894
63	981.56	4186.2	0.6570	$0.4466\ X10^{-3}$	2.846
64	980.98	4186.6	0.6580	$0.4398\ X10^{-3}$	2.798
65	980.40	4187.0	0.6590	$0.433\ X10^{-3}$	2.750
66	979.82	4187.6	0.6598	$0.4272\ X10^{-3}$	2.710

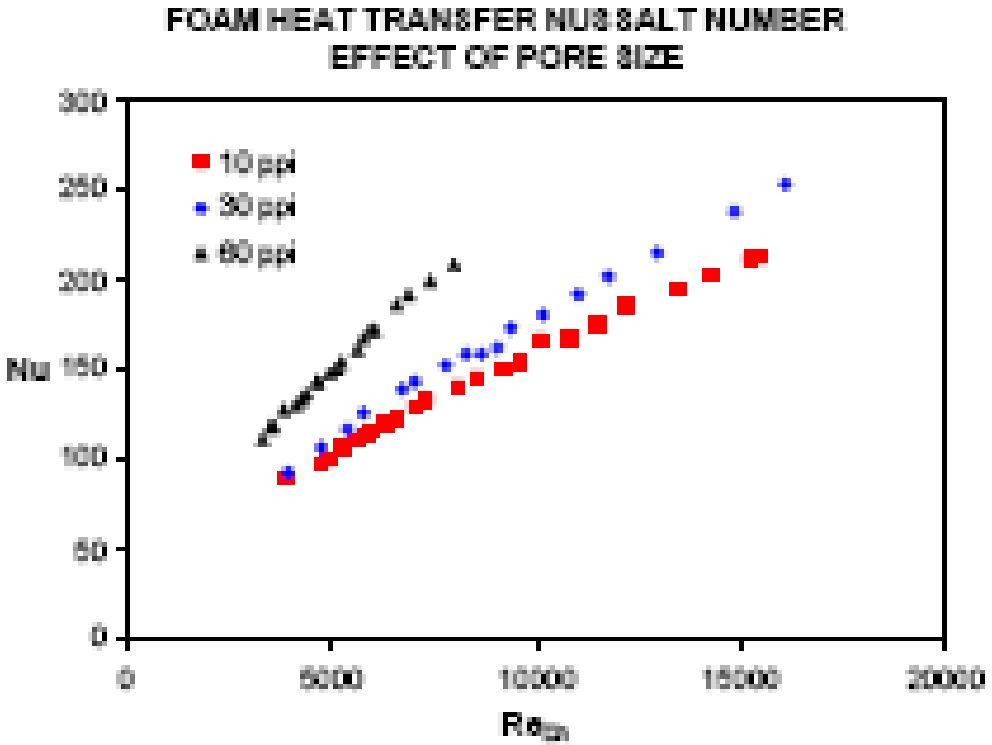
Sıcaklık (^oC)	Yoğunluk,(ρ) Kg/m^3	Özgül ısı,c_p $(J/kg\,^oC)$	Isı iletim katsayısı,k $(W/m\,^oC)$	Dinamik viskozite,μ (kg/ms)	Prandtl sayısı,Pr
67	979.24	4188.2	0.6606	$0.4214\ X10^{-3}$	2.670
68	978.76	4188.8	0.6614	$0.4156\ X10^{-3}$	2.630
69	978.08	4189.4	0.6622	$0.4098\ X10^{-3}$	2.590
70	977.50	4190.0	0.6630	$0.404\ X10^{-3}$	2.550
71	976.94	4190.6	0.6638	$0.3988\ X10^{-3}$	2.516
72	976.38	4191.2	0.6646	$0.3936\ X10^{-3}$	2.482
73	975.82	4191.8	0.6654	$0.3884\ X10^{-3}$	2.448
74	975.26	4192.4	0.6662	$0.3832\ X10^{-3}$	2.414
75	974.70	4193.0	0.6670	$0.378\ X10^{-3}$	2.380
76	974.12	4193.8	0.6676	$0.3734\ X10^{-3}$	2.348
77	973.54	4194.6	0.6682	$0.3688\ X10^{-3}$	2.316
78	972.96	4195.4	0.6688	$0.3642\ X10^{-3}$	2.284
79	972.38	4196.2	0.6694	$0.3596\ X10^{-3}$	2.252
80	971.80	4197.0	0.6700	$0.355\ X10^{-3}$	2.220
81	971.06	4197.8	0.6706	$0.3506\ X10^{-3}$	2.192
82	970.32	4198.6	0.6712	$0.3462\ X10^{-3}$	2.164
83	969.58	4199.4	0.6718	$0.3418\ X10^{-3}$	2.136
84	968.84	4200.2	0.6724	$0.3374\ X10^{-3}$	2.108
85	968.10	4201.0	0.6730	$0.333\ X10^{-3}$	2.080
86	967.54	4202.0	0.6734	$0.3294\ X10^{-3}$	2.056
87	966.98	4203.0	0.6738	$0.3258\ X10^{-3}$	2.032
88	966.42	4204.0	0.6742	$0.3222\ X10^{-3}$	2.008
89	965.86	4205.0	0.6746	$0.3186\ X10^{-3}$	1.984
90	965.30	4206.0	0.6750	$0.315\ X10^{-3}$	1.960
91	964.54	4207.2	0.6754	$0.3114\ X10^{-3}$	1.938
92	963.78	4208.4	0.6758	$0.3078\ X10^{-3}$	1.916
93	963.02	4209.6	0.6762	$0.3042\ X10^{-3}$	1.894
94	962.26	4210.8	06766	$0.3006\ X10^{-3}$	1.872
95	961.50	4212.0	0.6770	$0.297\ X10^{-3}$	1.850
96	960.78	4213.0	0.6774	$0.2940\ X10^{-3}$	1.830
97	960.06	4214.0	0.6778	$0.2910\ X10^{-3}$	1.810
98	959.34	4215.0	0.6782	$0.2880\ X10^{-3}$	1.790
99	958.62	4216.0	0.6786	$0.2850\ X10^{-3}$	1.770
100	957.90	4217.0	0.6790	$0.282\ X10^{-3}$	1.750

EK 5

LİTERATÜR TARAMASI GRAFİKLERİ



Şekil 9.1 PPI 10,20 ve 40 için basınç düşümü – hız değişimi (1)



Şekil 9.2 PPI 10, 30 ve 60 için Nusselt –Reynolds sayısı değişimi (11)

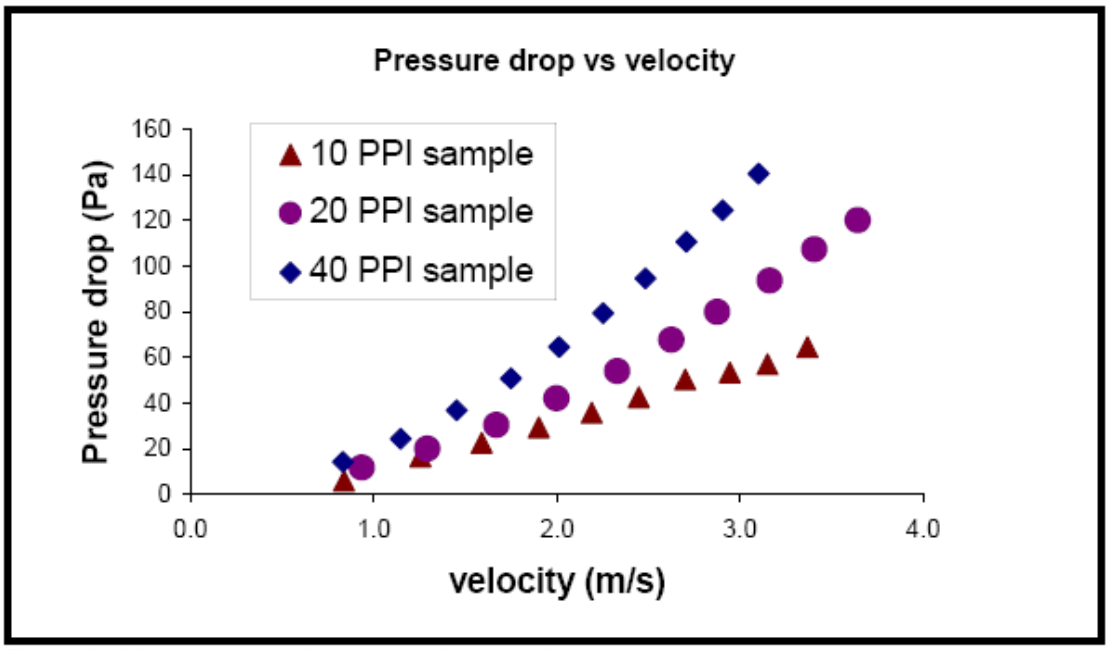


Figure 5.4 Metal foam samples pressure drop vs velocity plot

Şekil 9.3 PPI 10, 20 ve 40 için basınç düşümü- hız değişimi (1)