İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ KOLONLU TİTREŞİMLİ ISI BORUSUNUN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE DENEYSEL İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Gökhan ARSLAN
(503041131)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Aralık 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Ocak 2007

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mustafa ÖZDEMİR

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Feridun ÖZGÜÇ (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Ahmet DURMAYAZ (İ.T.Ü.)

OCAK 2007

ÖNSÖZ

Mevcut tez çalışması İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Isı ve Kütle Geçişi Araştırma Laboratuarında yapılmıştır. Bu çalışma esnasında fakültenin mevcut imkanlarını şahsıma sunan, engin bilgi tecrübesi ile her zaman bana yol gösteren değerli hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa Özdemir'e, deney düzeneğinin oluşturulması ve bakımı esnasında bana çok yardımı dokunan laboratuar sorumlu teknisyeni Selman Benli'ye, yaklaşık bir yıl süren deneyler esnasında karşılaştığım zorlukların üstesinden gelmemde bana destek olan Hidromekanik kürsüsü öğretim üyelerinden sayın Yrd. Doç. Dr. Murat Çakan hocama teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca akademik kariyerimin ilk adımı olan ve iki yıl süren yüksek lisans eğitimim boyunca yapmış olduğum çalışmalar kapsamında teknik bilgi ve tecrübesi ile her daim yanımda olan ve bana yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Feridun Özgüç'e teşekkür ederim.

Ocak 2006 Gökhan ARSLAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ii
İÇİNDEKİLER iii
TABLO LİSTESİ iv
ŞEKİL LİSTESİ v
SEMBOL LİSTESİ vii
ÖZET x
SUMMARY xii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 3
2.1. Isı Borusu Çeşitleri 4
2.1.1. Geleneksel Isı Borusu 4
2.1.2. Titreşimli Isı Borusu 5
2.1.3. Minyatür Isı Borusu 6
2.1.4. Döngülü Isı Borusu 6
2.1.5. Yassı Plaka Isı Borusu 7
2.2. Isı Borusunda Kullanılan Akışkanın Seçilmesi 8
2.3. Isı Borusu Uygulamaları 9

3. DENEYSEL ÇALIŞMA 11
3.1. Deney Düzeneği 11
3.1.1. Optik Algılayıcı Devresi 15
3.2. Deneylerin Yapılışı, Hesaplamalar ve Değerlendirme Metodu 17
3.3. Deney Sonuçları 28
3.4. Boyut Analizi 32

4. MATEMATİK MODEL 36
4.1. Kontrol Hacmi Formulasyonu 36
4.2. Matematik Model Sonuçları 46

5. DEĞERLENDİRME 52

KAYNAKLAR 53

EKLER 54
EK A. Sabit Soğutucu Sıcaklığına Göre Isıtıcı Eleman Üzerinde Sıcaklık Dağılımı 54
EK B. Sabit Isı Yüküne Göre Isıtıcı Eleman Üzerinde Sıcaklık Dağılımı 57
EK C. Sabit Isıtıcı Gücüne Göre Soğutucu Eleman Üzerinde Sıcaklık Dağılımı 59
EK D. Alt Yüzey Sıcaklık Dağılımı: 61
EK E. Prob Sıcaklık Dağılımları: 62
EK F. Boyutsuz Değişkenlere Ait Değerler 63
EK G. Isıtıcı Eleman Kalibrasyonu 64
EK H. Basınç Ölçer Kalibrasyonu 67
EK I. Belirsizlik Analizi 68
EK J. Q-Basic Programı 69

ÖZGEÇMİŞ 75

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1 : Isı Borularında Kullanılan Akışkanlar....8
Tablo 3.1 : Deney Düzeneği Boyutları....13
Tablo 3.2 : Isıtıcı Üzerinde Termoeleman Yerleşimi....13
Tablo 3.3 : Soğutucu Üzerinde Termoeleman Yerleşimi....14
Tablo 3.4 : Deneylerdeki Başlangıç Verileri....17
Tablo 3.5 : Veri Toplayıcıdan Alınan Algılayıcı ve BasınçVerileri ……22
Tablo D.1 : Alt Yüzey Sıcaklık Dağılımı....61
Tablo E.1 : Prob Sıcaklık Dağılımları....62
Tablo F.1 : Boyutsuz Değişkenlere Ait Değerler....63
Tablo G.1 : Isıtıcı Kalibrasyon Verileri....64

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Perkins Hermetik Boru Kazanı 3
Şekil 2.2: Gaugler'in Patentli Isı Borusu Kesit Resmi [1] 3
Şekil 2.3: Geleneksel Isı Borusu [2] 5
Şekil 2.4: (a)Kapalı Uçlu Döngülü Isı Borusu (b)Kapalı Uçlu Titreşimli Isı Borusu 5
Şekil 2.5: Döngülü Isı Borusu 7
Şekil 2.6: Yassı Plaka Isı Borusu 7
Şekil 2.7: Uçak Kanadında Isı Borusu Uygulaması 10
Şekil 3.1: Deney Düzeneği 12
Şekil 3.2: Deney Düzeneği Boyutları 12
Şekil 3.3: Isıtıcı Üzerinde Termoeleman Yerleşimi 13
Şekil 3.4: Soğutucu Üzerinde Termoeleman Yerleşimi 14
Şekil 3.5: Alt Yüzey Termoeleman Yerleşimi 15
Şekil 3.6: CNY70 Optik Algılayıcı ve Oluşturulan Devre 16
Şekil 3.7: CNY70 Optik Algılayıcısının Çalışma Prensibi 16
Şekil 3.8: Kolonlardaki Su Seviyesinin Zamanla Değişimi 20
Şekil 3.9: Buhar Basıncının Zamanla Değişimi 21
Şekil 3.10: Buhar Basıncının Hacim ile Değişimi 22
Şekil 3.11: Zaman Ötelemesi ile Buhar Basıncının Hacimle Değişimi 23
Şekil 3.12: 3 ve 4 Nolu Isıtıcı Termoelemanların Üzerinde Sıcaklığın Zamanla Değişimi 24
Şekil 3.13: 5 ve 6 Nolu Isıtıcı Termoelemanların Üzerinde Sıcaklığın Zamanla Değişimi 24
Şekil 3.14: Isıtıcı Üzerinde Ortalama Sıcaklık Dağılımı 25
Şekil 3.15: Soğutucu Üzerinde Ortalama Sıcaklık Dağılımı 26
Şekil 3.16: Alt Yüzey Sıcaklık Dağılımı 26
Şekil 3.17: Prob Sıcaklık Dağılımı 27
Şekil 3.18: 78 °C Sabit Soğutucu Su Sıcaklığına Göre Değişik Isı Yüklerinde Isıtıcı Üzerinde Sıcaklık Dağılımı 28
Şekil 3.19: 206.4 W Sabit Isıtıcı Yüküne Göre Değişik Soğutucu Su Sıcaklıklarında Isıtıcı Üzerinde Sıcaklık Dağılımı 29
Şekil 3.20: 230.1 W Isıtıcı Gücünde Soğutucu Eleman Sıcaklık Dağılımı 30
Şekil 3.21: 147.68 W Isıtıcı Gücünde Soğutucu Eleman Sıcaklık Dağılımı 30
Şekil 3.22: Buhar Basıncının Hacim ile Değişimi 31
Şekil 3.23: Isıtıcı Gücüne Göre Ortalama Isı Geçiş Katsayısının Değişimi 32
Şekil 3.24: Buhar Hacmi için Boyut Analizi 32

Şekil 3.25: Farklı Eşdeğer Jakop sayıları için Nusselt Sayısının Reynolds Sayısı ile Değişimi 34
Şekil 3.26: Nusselt Bağıntısının Deneysel Veriler ile Karşılaştırılması 35
Şekil 4.1: Seçilen Kontrol Hacimleri 36
Şekil 4.2: Isıtıcı ve Soğutucu Kolonda Oluşan Arayüzey 40
Şekil 4.3: Isıtıcı Elemandan Çekilen Isı Miktarı 41
Şekil 4.4: Düşey Yüzey Üzerinde Film Yoğuşması 42
Şekil 4.5: Buhar Kısmı Kontrol Hacmi 43
Şekil 4.6: Sistemde Bulunan Sıvı Faz için Kontrol Hacmi 45
Şekil 4.7: Te Bağlantı Noktası için Oluşturulan Kontrol Hacmi 45
Şekil 4.8: 1 nolu Deney İçin Elde Edilen Sayısal Çözüm Verileri 49
Şekil 4.9: 2 nolu Deney İçin Elde Edilen Sayısal Çözüm Verileri 50
Şekil 4.10: 3 nolu Deney İçin Elde Edilen Sayısal Çözüm Verileri 50
Şekil A.1: 88°C Soğutucu Sıcaklığına Göre Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı 54
Şekil A.2: 87°C Soğutucu Sıcaklığına Göre Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılım 54
Şekil A.3: 86°C Soğutucu Sıcaklığına Göre Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı 55
Şekil A.4: 85°C Soğutucu Sıcaklığına Göre Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı 55
Şekil A.5: 84°C Soğutucu Sıcaklığına Göre Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı 55
Şekil A.6: 82°C Soğutucu Sıcaklığına Göre Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı 56
Şekil A.7: 80°C Soğutucu Sıcaklığına Göre Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı 56
Şekil A.8: 78°C Soğutucu Sıcaklığına Göre Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı 56
Şekil B.1: 230.1 W Isı Gücünde Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı 57
Şekil B.2: 206.4 W Isı Gücünde Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı 57
Şekil B.3: 184 W Isı Gücünde Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı 57
Şekil B.4: 164.59 W Isı Gücünde Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı 58
Şekil B.5: 147.68 W Isı Gücünde Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı 58
Şekil C.1: 230.1 W Isıtıcı Gücünde Soğutucu Eleman Üzerinde Sıcaklık Dağılımı 59
Şekil C.2: 206.4 W Isıtıcı Gücünde Soğutucu Eleman Üzerinde Sıcaklık Dağılımı 59
Şekil C.3: 184 W Isıtıcı Gücünde Soğutucu Eleman Üzerinde Sıcaklık Dağılımı .. 59
Şekil C.4: 165 W Isıtıcı Gücünde Soğutucu Eleman Üzerinde Sıcaklık Dağılımı .. 60
Şekil C.5: 148 W Isıtıcı Gücünde Soğutucu Eleman Üzerinde Sıcaklık Dağılımı .. 60
Şekil G.1: Isıtıcı Üzerinde İç ve Dış Sıcaklık Dağılımı 65
Şekil H.1: Basınç Ölçer Kalibrasyon Eğrisi 67

SEMBOL LİSTESİ

A_0 : Alt kısım pirinç boru kesit alanı [m^2]
A_2 : Soğutucu kolon kesit alanı [m^2]
A_3 : Serbest kolon kesit alanı [m^2]
A_h : Isıtıcı yüzey alanı [m^2]
b : Salınım genliği [m]
C_f : Sürtünme katsayısı
c_p : Özgül ısı [kj/kgK]
d_0 : Alt kısım pirinç boru çapı [mm]
d_1 : Isıtıcı kolon çapı [mm]
d_2 : Soğutucu kolon çapı [mm]
d_3 : Serbest kolon çapı [mm]
d_b : Üst kısım pirinç boru çapı [mm]
d_c : Soğutucu eleman dış çapı [mm]
d_h : Isıtıcı eleman dış çapı [mm]
D_h : Hidrolik çap [mm]
F : Sürtünme kuvveti [N]
g : Yer çekimi ivmesi [m/s^2]
h_b : Su buharı entalpisi [kj/kg]
$\bar{h}_c$: Soğutucu üzerinde ortalama ısı taşınım katsayısı [W/m^2 K]
h_{fg} : Gizli ısı [kj/kg]
$h_ı$: Isıtıcı yüzey ısı taşınım katsayısı [W/m^2 K]
h_s : Salınımlı akış için ısı taşınım katsayısı [W/m^2 K]
h_t : Tam gelişmiş akış halinde ısı taşınım katsayısı [W/m^2 K]
L_0 : Serbest kolon ile ısıtıcı kolon arası mesafe [mm]
L_1 : 1 nolu prob ile serbest kolon arası mesafe [mm]
L_2 : 1 ve 2 nolu problar arası mesafe [mm]
L_c : Isıtıcı ve soğutucu kolon boyu [mm]
L_d : Isıtıcı kolon ile soğutucu kolon arası mesafe [mm]
L_h : Isıtıcı boyu [mm]
L_g : Isıtıcının alt yatay boruya olan uzaklığı [mm]
I : Akım [A]
Jc^* : Eşdeğer Jakob sayısı
K : Isı iletim katsayısı [W/mK]
$\dot{m}_b$: Buharlaşan kütle debisi [kg/s]
m_T : Toplam su kütlesi [kg]

$\dot{m}_y$: Yoğuşan kütle debisi [kg/s]
n : Yüzey normal vektörü
Nu : Nusselt sayısı
P : Basınç [Pa]
P_0 : Atmosfer basıncı [Pa]
P_b : Buhar basıncı [Pa]
P_{L1} : 1. kontrol hacmi çıkış basıncı [Pa]
P_{L2} : 2. kontrol hacmi çıkış basıncı [Pa]
Pr : Prandtl sayısı
P_x : 1. kontrol hacmi giriş basıncı [Pa]
P_y : 2. kontrol hacmi giriş basıncı [Pa]
P_z : 3. kontrol hacmi giriş basıncı [Pa]
$\dot{Q}$: Isıtıcı gücü [W]
$\dot{Q}_b$: Toplam ısının birim zamanda buharlaşma için harcanan kısmı [W]
$\dot{Q}_ç$: Yoğuşma için birim zamanda harcanan ısı [W]
$\dot{Q}_g$: Buharlaşma için birim zamanda harcanan ısı [W]
q''_g : Buharlaşma için harcanan ısı akısı (W/m^2)
$\dot{Q}_{imx}$: Birim zamanda ısıtıcıdan çekilen toplam ısı [W]
Re_w : Kinetik Reynolds sayısı
t : zaman(sn)
T_d : Suyun doyma sıcaklığı [^oC]
$\overline{T}_c$: Ortalama soğutucu yüzey sıcaklığı [^oC]
$\overline{T}_h$: Ortalama ısıtıcı yüzey sıcaklığı [^oC]
T_{ort} : Ortalama yüzey sıcaklığı [^oC]
T_s : Sabit sıcaklık havuzu su sıcaklığı [^oC]
U : Ortalama ısı geçiş katsayısı [W/m^2K]
u_b : Su buharı iç enerjisi [kj/kg]
V : Voltaj [V]
v : Kontrol hacim yüzey hızı [m/s]
$\mathbf{v_s}$: Arayüzey hızı [m/s]
v_1 : Suyun 1. kontrol hacmine giriş hızı [m/s]
v_2 : Suyun 2. kontrol hacmine giriş hızı [m/s]
v_3 : Suyun 3. kontrol hacmine giriş hızı [m/s]
v_{L1} : Buharlaşma ara yüzeyinde sıvı su hızı [m/s]
v_{L2} : Yoğuşma ara yüzeyinde sıvı su hızı [m/s]
V_b : Buhar hacmi [m^3]
V_T : Toplam su hacmi [m^3]
w : Frekans [rad/s]
$\dot{W}$: Kontrol hacminin birim zamanda çevreye karşı yapmış olduğu iş [W]
$\dot{W}_f$: Sürtünmelere karşı birim zamanda yapılan iş [W]
$\dot{W}_{f0}$: Te bağlantı noktasında sürtünme kuvvetinin birim zamanda yaptığı iş [W]
z_0 : Salınım ekseni [cm]
z_1 : Isıtıcı kolon su seviye yüksekliği [cm]
z_2 : Soğutucu kolon su seviye yüksekliği [cm]
z_3 : Serbest kolon su seviye yüksekliği [cm]

ρ_f : Sıvı su yoğunluğu [kg/m^3]
ρ_v : Su buharı yoğunluğu [kg/m^3]
φ : Faz farkı
μ : Dinamik Viskozite [Pa.s]
π : Boyutsuz parametre

ÜÇ KOLONLU TİTREŞİMLİ ISI BORUSUNUN MATEMATİK MODELLENMESİ VE DENEYSEL İNCELENMESİ

ÖZET

İlk uygulaması 1831 yılına dayanan ısı borusu fikri günümüze kadar ısı geçişi konusunda güncelliğini korumuştur. Isı borusu, buhar ve sıvı faz değişimi prensibi ile çalışan, sıcak ve soğuk kaynaklar arasında ısı taşımak için kullanılan bir cihazdır. Yüzeylerin soğutulmasında veya yüzeylerde eş sıcaklık dağılımı elde etmek için kullanılır. Isı taşıma kapasitesi, her boyutta tasarlanabilmesi, herhangi bir mekanik aksam içermemesi ve en önemlisi pasif bir cihaz oluşu araştırmacıların ilgisini çekmiş ve bu hususta birçok araştırma yapılmış ve hala yapılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, ısı borularına farklı bir bakış açısı getiren üç kolonlu titreşimli ısı borusunun matematiksel olarak modellenmesi ve yapılan deneyler ile karşılaştırılarak mevcut tasarımın incelenmesidir.

Sistem, birbirine bağlı üç düşey kolondan oluşmaktadır. Orta kolona ısıtıcı yerleştirilmiş ve soğutucu yerleştirilen diğer kolon ile döngü oluşturacak şekilde bağlanmıştır. Sistem çalıştırıldığında ısıtıcı ve soğutucu yerleştirilen kolonlar arasında buhar oluşmakta ve belli bir süre sonra buharlaşma ve yoğuşma arasındaki faz farkından ötürü kolonlardaki su salınım yapmaya başlamaktadır. Bu salınımdan ötürü buhar miktarı belli aralıklar içinde artıp azalmaktadır. Bu noktaya basınç ölçer yerleştirilerek buhar basıncının zamanla değişimi tespit edilmiştir. Buhar hacmi ise kolonlarda salınım yapan su yüksekliğine göre değişmektedir. Daha önce bu konuda yapılan çalışmalara ek olarak kolon seviye değişimi ile buhar basınç

değişimini eş zamanlı ölçmek için optik algılayıcıların kullanıldığı bir devre yapılmıştır. Bu sayede buhar hacminin basınçla değişimi elde edilmiştir.

Literatürde ısı boruları ile ilgili tariflenmiş ısı taşınım katsayıları, mevcut sistem salınım yaptığı için kullanılamadığından ortalama ısı geçiş katsayısı kullanılmıştır. Elde edilen veriler boyut analizi yapılarak incelenmiş ve sonuçta sistem için geçerli olan Nusselt bağıntısı elde edilmiştir.

Son olarak bu konu üzerinde daha önce çalışan araştırmacıların oluşturmuş oldukları matematiksel model geliştirilmiş ve deneysel veriler ışığı altında geçerliliği ayrıntılı bir şekilde irdelenmeye çalışılmıştır.

EXPERIMENTAL STUDY AND MATHEMATICAL MODELLING ON THE OSCILLATING LOOP HEAT PIPE CONSISTING OF THREE INTERCONNECTED COLUMNS

SUMMARY

The heat pipe idea, first application is based on 1831, is still preserving its currency in the field of heat transfer. Heat pipe is a vapor-liquid phase change device that transfers heat from a hot reservoir to a cold reservoir. It is used for cooling the surfaces or to obtain uniform temperature distribution over the surfaces. Due to its heat transfer rate, flexible design, working without any mechanic parts and being a passive device arose interest of the researchers and so many researches have been done on that field.

The aim of that study is to form a mathematical model of 'Oscillating Loop Heat Pipe Consisting of Three Interconnected Columns' which brings a different aspect to heat pipes and compare the experimental results with that model.

System consists of three vertical interconnected columns. An electric heater is inserted into the central column and that column is connected to other column which consists of a cooler to form a cycle. After the system turn on, water vapour starts to form between the columns which have the heater and the cooler. After a while, due to the phase lag between evaporation and condensation, water in the columns start to oscillate. Due to the oscillation, the amount of vapour is changing between certain limit. A pressure gauge inserted that point and the vapour pressure change with time is measured. Vapour volume is changing with the level of water oscillating in the columns. Adding to the studies which had been done on that field, to measure

the water level change in the columns with pressure change at the same time, a circuit with optic sensors is used. In that way the change of vapour volume with pressure is obtained.

Heat transfer coeficient described in the literature for heat pipes can not be used because of the oscillation. For that reason overall heat transfer coefficient is used. By using experimental data, dimensional analysis is done and a Nusselt correlation is obtained.

Lastly, the mathematical model which was formed by the researchers working on that field, is improved and with the experimental results, its validty is searched.

1. GİRİŞ

Isı boruları sıcak ve soğuk kaynaklar arasında az sıcaklık farkı ile yüksek miktarda ısı taşımak için tasarlanmış cihazlardır. Günümüzde çok değişik tipleri olan ısı boruları, ısı geçişini iyileştirmek amacıyla, bir çok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Isı boruları ısı kontrolü açısından çok esnek sistemlerdir. Isı pompaları, soğutucular ve diğer pek çok ısı transferi cihazlarının ısı değiştiricilerine kolayca uygulanabilirler.

Konvansiyonel ısı boruları (İki-fazlı kapalı termosifon-TPCT) 1970'lerde geliştirilmiş olsa da bu ısı borularının ısı geçiş karakteristikleri üzerine hala çalışmalar yapılmaktadır. Son zamanlarda ısı geçiş miktarını daha fazla arttırmak amacıyla hem faz değişimi hem de titreşimli akışkan hareketinin bir arada meydana gelebildiği ısı boruları üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Üzerinde çalışmalar yapılan kapalı ve açık uçlu titreşimli ısı borularında buharlaştırıcı ve yoğuşturucu kısımları arasında meydana gelen titreşim hareketinde kılcallık çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu sebeple akışkanın içinde hareket ettiği borular kılcal boru olmak zorundadır. Kılcal tüplü ısı borularında kılcal tüpler içinde ardı sıra oluşan buhar ve sıvı bölgeleri buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölgeleri etkisiyle titreşir.

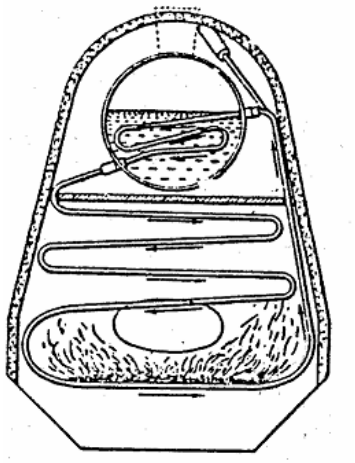
Bu tez çalışmasında mevcut titreşimli ısı borularından farklı yapıda bir ısı borusu göz önüne alınmaktadır. Bu ısı borusu birbirine bağlı üç sıvı kolonundan meydana gelmekte olup sıvı kolonları kılcallığın etkili olamayacağı ölçüde büyük çaplara sahiptir. Sabit ısı girişi ve ısı çekilmesine rağmen sıvı kolonları kendi kendine titreşebilmektedir. Isı borusunun geometrik yapısına da bağlı olan bu titreşimin buharlaşma ve yoğuşma olayları arasındaki faz farkına da bağlı olduğu düşünülmektedir.

Yapılan ön çalışmalara göre titreşimin başlamasından sonra buharlaştırıcı kolonunda havuz tipi kaynama sona ermektedir. Titreşimle birlikte ısıtıcı yüzey sıcaklığı ile akışkan doyma sıcaklığı arasındaki fark (kızma farkı=excess temperature) düşmektedir. Bu durumda habbecikli kaynamanın son bulduğu gözlenmiştir. Titreşimin meydana gelmesi ile bu çalışmada uygulanan bütün ısı akılarında habbecikli kaynamanın olmadığı bir faz değişimi söz konusu olmaktadır. Bu durum, yüksek ısı akıları uygulanarak habbecikli kaynamanın meydana gelmesi durumunda daha fazla ısı akısının çekilebileceğini düşündürmektedir.

Mevcut titreşimli ısı borularına göre imalatı kolay ve çok daha yüksek mertebelerde ısı geçişine imkan verebileceği gözüken bu tip ısı borusunun ısıl karakteristiklerinin deneysel olarak ortaya konmasına ihtiyaç vardır.

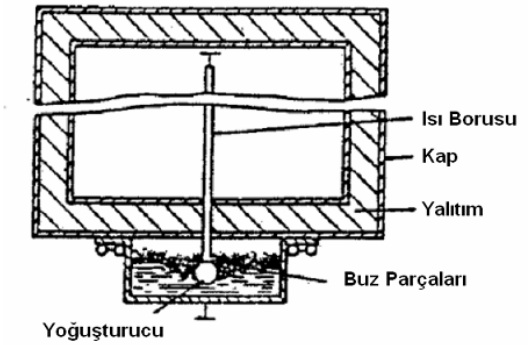
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1831 yılında Angier March Perkins tarafından tasarımı yapılan hermetik boru kazanı, ilk ısı borusu uygulaması olarak kabul edilir. Şekil 2.1'de gösterilen bu sistemde kızgın su buharı tek fazda ve yüksek basınçta dolaştırılmaktaydı [1].



Şekil 2.1: Perkins Hermetik Boru Kazanı

1944 yılında, Gaugler günümüz ısı borusunun temel prensiplerini teşkil eden bir ısı değiştirici tasarlamış ve bunu soğutma sisteminin bir parçası olarak tanımlayarak patentini almıştır.



Şekil 2.2: Gaugler'in Patentli Isı Borusu Kesit Resmi [1]

Gaugler'in içi buz dolu bir depo aracılığıyla soğutulacak ortamdan ısı çekmek için hazırladığı düzenek Şekil 2.2'de gösterilmiştir [1].

O devirde bu tip bir cihaza ihtiyaç duyulmaması, cihazın 20 yıla yakın bir zaman sürecinde etkin olarak kullanılmamasına sebep olmuştur. 1962 yılında Trefethen tarafından bu cihazın uzay çalışmalarında kullanılabileceği fikri ortaya atılmış ve 1963 yılında Wyatt tarafından patent alımı için bir ısı borusu tasarlanmıştır.

Isı borusunun aktif olarak kullanılması Gravier ve çalışma arkadaşları tarafından Los Alamos bilimsel araştırma laboratuvarında yapılan prototip ile gerçekleşmiştir. Isı borusu ismini ilk defa Gravier kullanmış ve belli çalışma sınırları altında günümüzde bilinen metallerin ısıl iletkenliklerinden daha yüksek değere sahip bir yapıya eşdeğer olabileceğini vurgulamıştır [2].

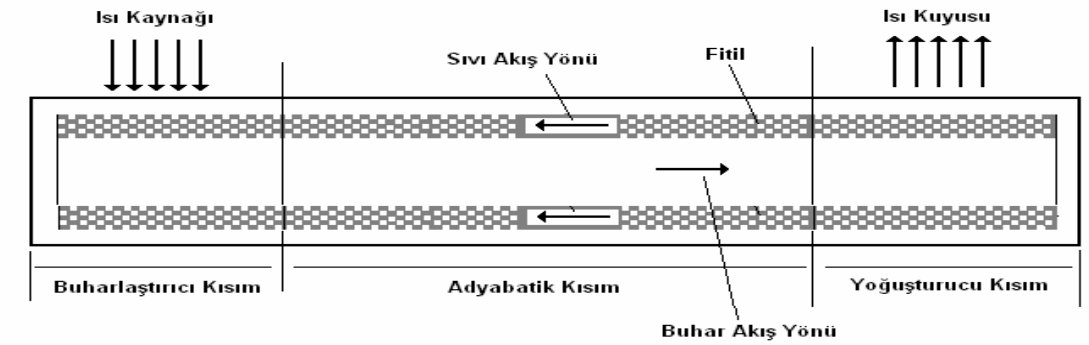
Teknolojinin gelişmesi ile tasarlanan cihazlardan ısı çekilmesi başlı başına bir sorun olmuştur. Isı borularının esnek tasarım boyutları ve etkin ısı geçiş kapasiteleri ile cihazlardaki aşırı ısınmanın önüne geçilmeye çalışılmıştır.

2.1. Isı Borusu Çeşitleri

2.1.1. Geleneksel Isı Borusu

Yoğuşturucu ve buharlaştırıcı kısımlarını kendi bünyesinde içeren, tamamen hava geçirmez şekilde vakumlanmış, içindeki akışkanın faz değiştirmesi ile çalışan bir sistemdir. Şekil 2.3'de bu ısı borusunun kısımları detaylı olarak gösterilmiştir. Buharlaştırıcı kısımda akışkanın ısınması sonucu faz değişimi gerçekleşir ve bu değişim basınç gradyanı oluşturur. Basınç gradyanı etkisi ile buhar yoğuşturucu kısıma doğru hareket eder. Buharlaştırıcı kısmın sonunda bulunan sıvı buhara dönüştükçe bu noktada buhar basıncı artar. Bunun sonucu sıvı-buhar arayüzeyi fitil içinde buharlaştırıcıya doğru çekilir. Geri çekilme sonucu oluşan kılcal basınç yoğuşturucu kısımda bulunan sıvıyı fitil içine çekerek buharlaştırıcı kısıma taşır.

Kılcal basıncın oluşmasında fitil çok önemlidir. Fitil içinde bulunan gözenekler ne kadar küçük ve düzgün olursa buharlaştırıcı ve yoğuşturucu kısım arasındaki basınç farkı o kadar çok olur [2].



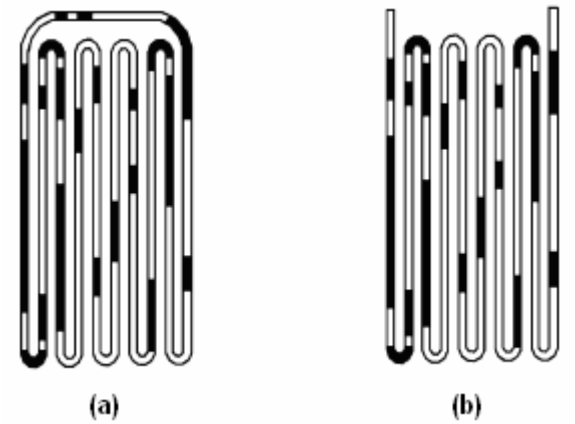
Şekil 2.3: Geleneksel Isı Borusu [2]

2.1.2. Titreşimli Isı Borusu

Kıvrım yapmış kılcal boru, buharlaştırıcı, yoğuşturucu ve adyabatik kısımlardan oluşmuştur. İçerisinde yoğuşan akışkanı buharlaştırıcı kısıma göndermek için fitil kullanılmamıştır. Akışkanın çevrimi kılcal boru ile birlikte gerçekleşir. Bu yüzden kullanılan borunun iç çapı çok önemlidir. Kılcallık etkisi ile akışkan boru içinde atma (pulse) ile ilerler.

Titreşimli ısı borusu genel olarak iki çeşittir. Şekil 2.4'de gösterilen bu borulardan birincisi kapalı uçlu döngülü titreşimli ısı borusu olarak adlandırılır. Kapalı bir çevrim sağlamak için borunun uçları birbirine bağlanmıştır. İkincisi ise kapalı uçlu titreşimli ısı borusu olarak adlandırılır. Boru uçları kapatılmıştır.

Bu tip ısı borularında ısı geçişi habbecikli kaynama ve buharlaşma sonucu oluşan basınç dalgası sonucu akışkanın titreşerek ilerlemesi sonucu oluşur [3].



Şekil 2.4: (a) Kapalı Uçlu Döngülü Isı Borusu. (b) Kapalı Uçlu Titreşimli Isı Borusu

2.1.3. Minyatür Isı Borusu

Bu tip ısı boruları uzay uygulamalarında kullanılan elektronik cihazların ısıl kontrolünü sağlamak amacıyla kullanılır. Buharlaştırıcı, yoğuşturucu ve fitilden meydana gelen minyatür ısı borusunun genel ısı borularından farkı boyutlarıdır. Boyları genellikle 100 mm ile 300 mm arasında değişmektedir [4].

Genellikle elektronik parçaların soğutulmasında kullanılır. 1998 yılında, Belarus Luikov Enstitisünde yapılan minyatür ısı borusu dış çapı 4 mm ve boyu 20 mm olarak imal edilmiştir. Bu tür ısı borularından da en fazla 50 W ısı çekilebilmektedir.

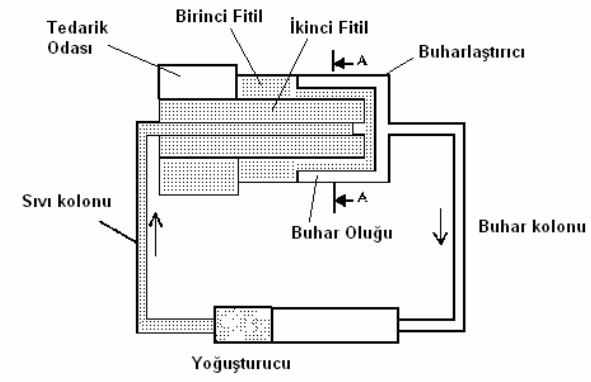
NASA Glenn Araştırma mekrezinde yapılan ısı borusu ise minyatür ısı borularına yeni bir örnek teşkil etmektedir. Silikonlu mikro ölçekli döngülü ısı borusu olarak adlandırılan bu cihaz chip seviyesinde elektronik parçaların soğutulmasında kullanılmaktadır. Bu ısı borusunun buharlaştırıcı kısmı silikondan imal edilerek ısı kaynağı ile buharlaştırıcı arasındaki ısıl direnç azaltılmak istenmiştir. Bu yeni teknoloji Mikroelektro Mekanik Sistemlere (MEMS) bir örnek teşkil etmektedir [5].

2.1.4. Döngülü Isı Borusu

Bu cihazların tarihi 1972 yılına kadar dayanır. İlk defa Ural Politeknik Enstitüsünde Rus bilim adamı Maydanik tarafından yapılmıştır. Genel ısı boruları gibi iki fazlı ve pasif çalışan, ısı geçişini sağlamak için tasarlanmış cihazlardır. Pasif oldukları için sisteme dışarıdan güç beslemesi yapılmaz ayrıca akışkan dışında herhangi bir hareketli parça olmaması bu cihazları güvenilir ve uzun süre sorunsuz çalışabilir yapmaktadır.

Geleneksel ısı borularında fitilin boru boyunca yerleşmesi bu cihazların ısıl iletkenliğini düşürmektedir. Şekil 2.5'de görüldüğü gibi döngülü ısı borularında buharlaştırıcı kısıma ek olarak birinci fitil, ikinci fitil, bunların ortasından geçen bir boru ve ara oda eklenmiştir. İkinci fitil aracılığıyla yoğuşturucudan çekilen sıvı fitillerin içindeki borunun buharlaştırıcı kısmına kadar çekilerek burada ara oda (compensation chamber) içinde toplanır. Buharlaştırıcı ile ara oda arasında akışkan taşınımını birinci fitil gerçekleştirir. Bu işlemde ara oda ikinci bir yoğuşturucu vazifesi görmektedir. Sonuçta buharlaştırıcı kısımda akışkanın buhar fazına geçmesi birinci fitilde kılcal basınç etkisi yaratarak sıvının sürekli olarak buharlaştırıcıya

akmasını sağlar. İkinci fitil kulanmaktaki ana gaye buharlaştırıcı kısıma sürekli olarak sıvı pompalanmasını sağlamaktır.

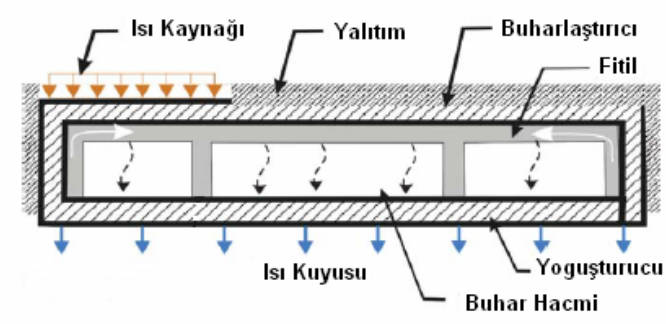


Şekil 2.5: Döngülü Isı Borusu

1972 yılında ilk defa Rus bilim adamları Gerasimov ve Maydanik tarafından yapılan döngülü ısı borusu 1.2 m uzunluğunda ve 1 kW ısı geçiş kapasitesine sahipti. Sistem içinde akışkan olarak su kullanılmaktaydı. Kulanılan akışkan ve fitilin özelliklerine göre bu cihazların etkenliği 10000 ile 100000 W/m^2K arasında değişmektedir [6].

2.1.5. Yassı Plaka Isı Borusu

Yassı plaka ısı borusu, dikdörtgen şeklindeki bakır levhaların birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Şekil 2.6'da gösterilen sistem tamamen sızdırmaz olup, ısı yassı yüzeylerin bir tarafından çekilir diğer tarafından uzaklaştırılır. Buharlaştırıcı kısmın iç yüzeyi fitil ile kaplanmıştır. Bu sayede oluşan kılcal kuvvetlerin etkisi ile akışkan buharlaştırıcı ve yoğuşturucu arasında dolaştırılır [7].



Şekil 2.6: Yassı Plaka Isı Borusu

2.2. Isı Borusunda Kullanılan Akışkanın Seçilmesi

Isı borusu tasarımında ilk yapılması gereken, boru içinde kullanılacak akışkanın seçilmesidir. Akışkan seçiminde en önemli rolü donma ve kaynama sıcaklıkları oynar. Isı borularında kullanılan çeşitli akışkanların atmosfer basıncında donma, kaynama noktaları ile kullanım aralıkları Tablo 2.1'de verilmiştir. Bunun yanında aynı çalışma aralığına sahip akışkanlar arasında tercih yapılırken, yüksek buharlaşma gizli ısısına ve ısıl iletkenliğe, sıvı ve buhar fazlarında düşük viskoziteye sahip akışkan tercih edilir.

Kullanılacak akışkanın tercihinde göz önüne alınacak diğer bir nokta ise maliyeti ve kolay bulunmasıdır.

Tablo 2.1: Isı Borularında Kullanılan Akışkanlar

Akışkan	Donma Noktası (°C)	Kaynama Noktası (°C)	Kullanım Aralığı (°C)
Helyum	-272	-269	-271 / -269
Azot	-210	-196	-203 / -160
Amonyak	-78	-33	-60 / 100
Freon 11	-111	24	-40 / 120
Metanol	-98	64	10 / 130
Etanol	-112	78	0 / 130
Su	0	100	30 / 200
Civa	-39	361	250 / 650
Sezyum	29	670	450 / 900
Potasyum	62	774	500 / 1000
Sodyum	98	892	600 / 1200
Lityum	179	1340	1000 / 1800
Gümüş	960	2212	1800 / 2300

Isı borusu uygulamaları çalışma sıcaklığı aralığına göre sınıflandırılır. Buna göre; ısı borusu uygulamaları kriyojenik, düşük sıcaklık, orta sıcaklık ve yüksek sıcaklık olarak dörde ayrılır.

Kriyojenik ısı boruları, 0 K (-273.14 °C) ile 200 K (-73 °C) arasında çalışacak şekilde tasarlanır. Çoğunlukla kullanılan akışkanlar ise helyum, argon, krypton, azot, oksijen, freon ve etandır.

Düşük sıcaklık ısı boruları ise 200 K (-73 °C) ile 500 K (227 °C) arasında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Kullanılan akışkanlar ise, Freon, amonyak, alkol, aseton, su ve bazı organik bileşiklerdir.

Orta sıcaklık ısı boruları ise 500 K (227 °C) ile 700 K (427 °C) arasında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Kullanılan akışkanlar ise sülfür, civa, alkali metaller (sezyum, rubidyum) dur.

Yüksek sıcaklık ısı boruları ise 700 K (427 °C) ve üzeri sıcaklıklarda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Potasyum, sodyum, lityum, kurşun, gümüş, indiyum gibi ağır metaller kullanılmaktadır [7].

2.3. Isı Borusu Uygulamaları

a) Kalıp İmalatı ve Plastik Enjeksiyon:

Ergimiş olarak kalıba doldurulan plastik veya metal alaşımlar çok kısa bir sürede katılaştırılarak istenilen şekli alması sağlanır. Soğutma süresi kısaltılarak seri üretim hızlandırılmış olur. Bu nedenle ısının kalıptan çekilmesi çok önemlidir ve bu işlem ısı boruları ile gerçekleştirilir.

b) Elektronik Parçaların Soğutulması:

Elektronik parçaların soğutulmasında en önemli sorun soğutma için kullanılan cihazın boyutudur. Isı borusu, küçük kesit alanından yüksek miktarda ısı geçiş kabiliyetine sahip olduğu için elektronik parçaların soğutulmasında en çok tercih edilen cihazdır. Isınan elektronik parçalara doğrudan monte edilerek aşırı ısınmanın önüne geçilir.

Herhangi bir mekanik parça içermemesi ısı borusunun bozulmadan uzun süre çalışmasını sağlamaktadır. Boru içindeki akışkanın dışarı akması elektronik parçalar için tehlike arz ettiği düşünülebilir ise de boru çapının çok küçük olmasından ötürü kullanılan akışkan hacminin 1 cc. den daha az olması bu tehlikeyi ortadan kaldırmaktadır.

c) Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Sistemleri:

İklimlendirme sistemlerinde kullanılan ısı borularında soğutucu akışkan kullanılır. Bu tür sistemlerde geri dönen sıcak hava ile ısı borusunun buharlaştırıcı kısmı temas ettirilerek boru içindeki akışkan buharlaştırılır. Buharlaşan akışkan borunun diğer

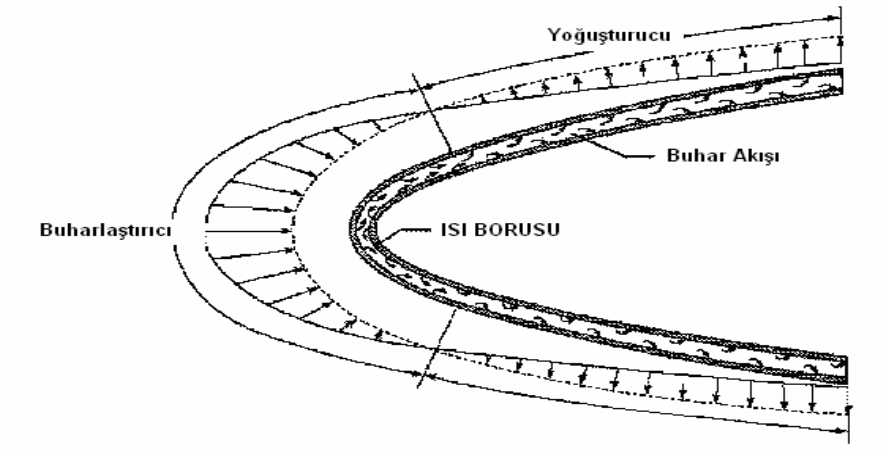
ucuna, yoğuşturucu kısmına hareket eder ve burada sistem içinde soğutulan hava ile soğutulur. Yoğuşan akışkan tekrar buharlaştırıcı kısma girerek çevrime devam eder. Bu sayede iklimlendirme konfor şartları iyileştirilir, havadaki nem miktarı azaltılır ve hava kalitesi arttırılır.

Klima sistemlerinde ısı borusunun kullanılması ile yıllık yaklaşık 1000 $ gibi bir kazanç elde edilmekte ve sistemden yaklaşık %15 oranında enerji tasarrufu sağlanmaktadır [5].

d) Uzay ve Havacılık:

Uzaya gönderilen uyduların güneş ışığına maruz kalan kısımları diğer taraflara oranla aşırı ısınır ve bu da çok büyük sıcaklık farklarına sebep olur. Uydu yüzeyinde eş sıcaklık dağılımı elde edebilmek için bu yüzeylere ısı boruları yerleştirilir.

Havacılık uygulamalarında, kanatların keskin uçları ve uçağın burun kısmı uçak hızı Mach sayısına yaklaştıkça 1500 K (1227 °C) gibi sıcaklık değerlerine ulaşmaktadır. Bu durum uçakta kullanılan malzeme ve uçuş güvenliği açısından tehlike arz etmektedir. Bu problemin çözümünde Şekil 2.7'de görüldüğü gibi ısı boruları kullanılmıştır. Kanadın sivri uçlu kısımları buharlaştırıcı görevi görürken, düz olan kısımları daha az ısındığı için yoğuşturucu görevi görür. Ayrıca gaz türbin kanatçıklarının soğutulması da mikro ölçekli, minyatür ısı boruları ile yapılmaktadır [8].



Şekil 2.7: Uçak Kanadında Isı Borusu Uygulaması

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Deney Düzeneği

Mevcut üç kolonlu titreşimli ısı borusu, bugüne kadar yapılan ısı borularına göre farklı bir yapı teşkil etmektedir. Bu ısı borusu deney düzeneği, birbirine bağlı üç tane camdan yapılmış sıvı kolonlarından oluşmaktadır. Bunlar Şekil 3.1'de görüldüğü gibi serbest, ısıtıcı ve soğutucu kolonlar olarak adlandırılmıştır. Isıtıcı ve soğutucu kolonlar bir döngü oluşturacak şekilde birbirine bağlanmıştır. Bu bağlantılar pirinç boru kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3.1'de kapalı olarak görülen kısımlar bu bağlantılardır ve dış yüzeyleri ısı kaybını azaltmak için yalıtılmıştır.

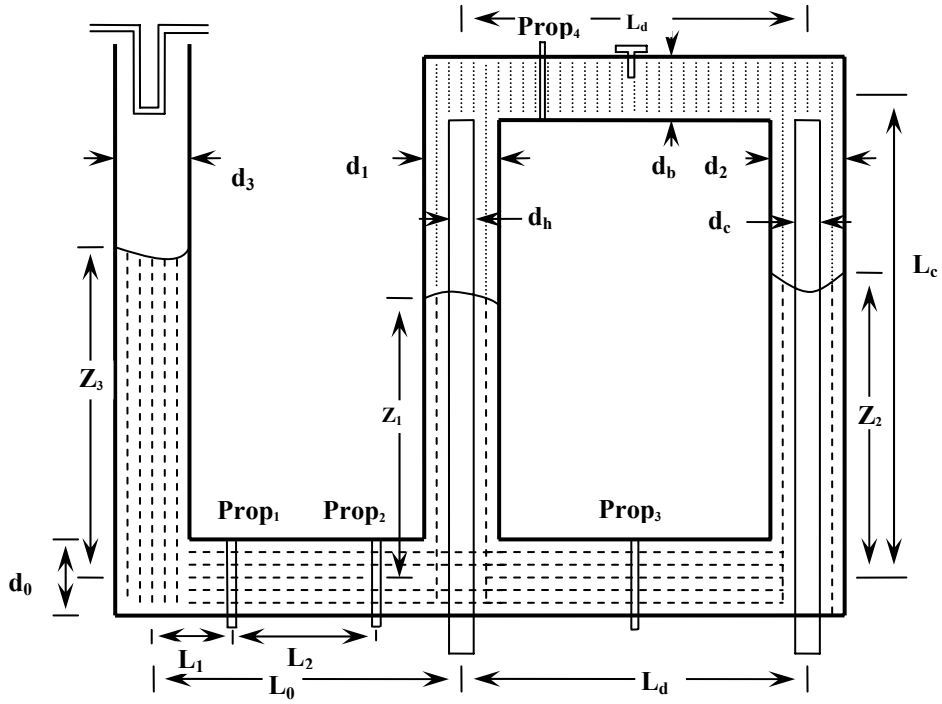
Sistem içi buhar basıncı ölçümü üst pirinç borunun ortasına yerleştirilen Validyne basınç ölçer ile yapılmıştır. Bu basınç ölçer iki parçadan oluşmaktadır. Birincisi basınç ölçümü yapılan yere yerleştirilen basınç dönüştürücüsü (transducer) olarak adlandırılır. İçerisinde hassas bir zar vardır. Basınç farkı nedeniyle bu zarda meydana gelen deformasyon sonucu basınç dönüştürücüsünde voltaj değişikliği meydana gelir. Bu değişim basınç ölçerin ikinci kısmı olan modulatör tarafından algılanır ve kalibrasyon ayarı bu modulatör üzerinde yapılır.

Düzenek üzerindeki sıcaklıklar belli yerlere yerleştirilen Ni-Cr tip termoelemanlar kullanılarak ölçülmüştür. Serbest kolondaki su seviyesi değişimi CNY70 optik algılayıcı kullanılarak elde edilmiştir. Optik algılayıcı ile oluşturulan devre Bölüm 3.1.1'de ayrıntılı olarak izah edilmiştir. Basınç ölçerden, termoelemanlardan ve optik algılayıcadan alınan veriler Keithley 2700 multimetre aracılığıyla ölçülmüştür. Deney boyunca belli aralıklarla saniyede 25 görüntü çerçevesi yakalayan Nikon Coolpix-9900 ile çekimler yapılmıştır .



Şekil 3.1: Deney Düzeneği

Bu çalışma süresince Şekil 3.2'de gösterilen deney düzeneği boyutlarında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Boyutlar Tablo 3.1'de verilmiştir.



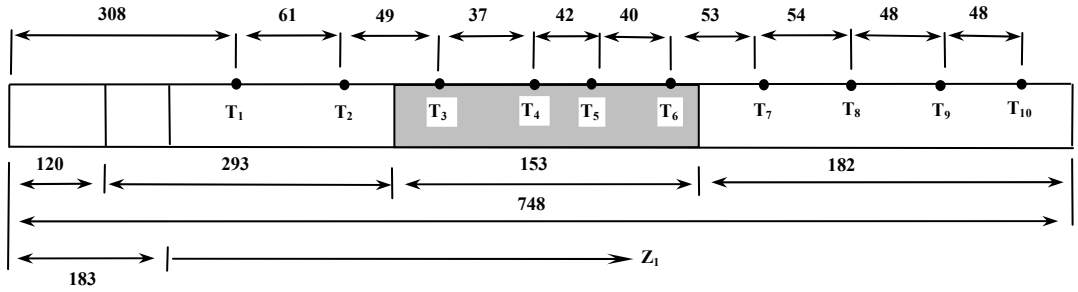
Şekil 3.2: Deney Düzeneği Boyutları

Tablo 3.1: Deney Düzeneği Boyutları

	mm
L_0	445
L_d	345
L_c	610
L_1	70
L_2	155
d_1,d_2, d_3	35.2
d_0, d_b	35.8
d_h, d_c	18

Isıtıcı eleman içerisine 10 adet, soğutucu eleman üzerine 9 adet, alt kısım pirinç boruların üzerine 5 adet termoeleman yerleştirilmiştir. Ayrıca pirinç boruların içine 4 adet prob daldırılmıştır. Her bir prob 2 adet termoeleman içermektedir.

a) Isıtıcı Üzerinde Termoeleman Yerleşimi;



Şekil 3.3: Isıtıcı Üzerinde Termoeleman Yerleşimi

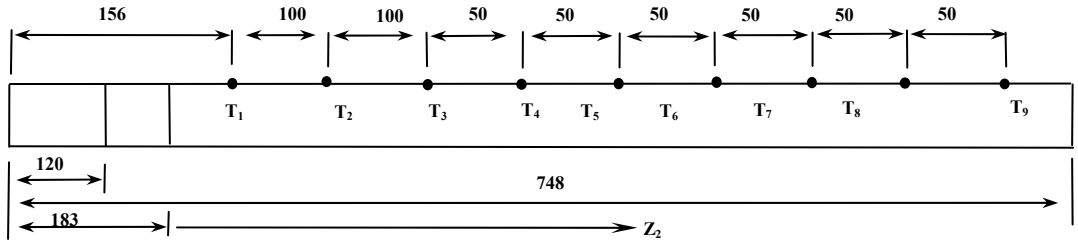
748 mm uzunluğundaki ısıtıcı eleman içerisine iç içe yerleştirilen seramik yalıtıcılar konulmuştur. Orta kısımda yer alan 16 cm uzunluğundaki seramik yalıtıcıya elektrik direnç telleri sarılmıştır. Doğru akım kaynağı ile beslenen ısıtıcı bakır borudan yapılmıştır. Ni-Cr tip termoelemanlar Şekil 3.3'de gösterilen aralıklarlarda su ile teması engellemek için bakır borunun iç tarafına toplam 10 adet olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu termoelemanların 4 tanesi rezistansı sarmalayan seramiklerle bakır boru arasında olacak şekilde yerleştirilmiştir. Analizler için bakır boru ile suyun temas ettiği yüzey sıcaklıkları gerekli olduğu için ısıtıcı eleman kalibre edilmiştir. Kalibrasyon işlemi Ek G kısmında ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Tablo 3.2: Isıtıcı Üzerinde Termoeleman Yerleşimi

Termoeleman	**T_1**	**T_2**	**T_3**	**T_4**	**T_5**	**T_6**	**T_7**	**T_8**	**T_9**	**T_{10}**
Konum (mm)	308	369	418	455	497	537	590	644	692	740

b) Soğutucu Eleman Üzerinde Sıcaklık Dağılımı;

Soğutucu eleman içiçe geçmiş iki bakır borudan oluşmaktadır. İç kısımdan gönderilen su dış boru ile soğutucudan uzaklaştırılmaktadır. Soğutucu eleman üzerine Şekil 3.4'de gösterildiği gibi 9 adet Ni-Cr tip termoeleman yerleştirilmiştir. Tablo 3.3'de bu termoelemanların konumları belirtilmiştir.



Şekil 3.4: Soğutucu Üzerinde Termoeleman Yerleşimi

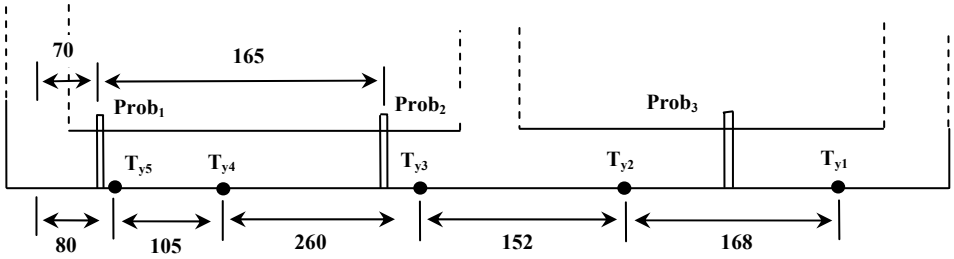
Neslab RTE300 sabit sıcaklık havuzundan çıkan su soğutucu eleman içerisinde dolaştırılarak sabit yüzey sıcaklığı elde edilmiştir.

Tablo 3.3: Soğutucu Üzerinde Termoeleman Yerleşimi

Termoeleman	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9
Konum (mm)	156	256	356	406	456	506	556	606	656

c) Alt Yüzey Termoeleman Dağılımı;

Daha önce de belirtildiği üzere sistemin kolon bağlantıları pirinç borudan yapılmıştır. Alt kısımı oluşturan bu pirinç borunun yüzeyine belli aralıklarla 5 adet Ni-Cr tip termoeleman yerleştirilmiştir. Ayrıca alt yüzeyde 3 ayrı noktadan problar daldırılmıştır. Bu sayede bu yüzeylerden olabilecek ısı kayıpları kontrol edilecektir. Termoeleman ve probların konumları Şekil 3.5'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



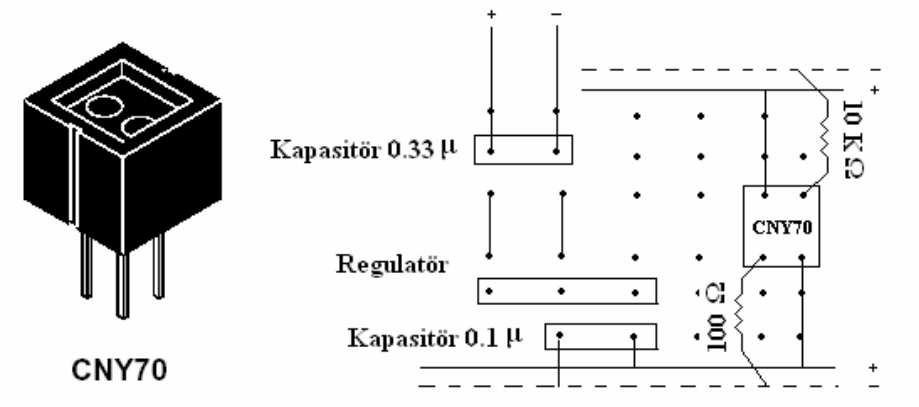
Şekil 3.5: Alt Yüzey Termoeleman Yerleşimi

Daha önceden belirtildiği gibi 4 adet prob noktası oluşturulmuştur. Şekil 3.5'de gösterilen 3 adet probun dışında dördüncü prob ise ısıtıcı ile soğutucu kolonu birbirine bağlayan üst kısımdaki pirinç boruya daldırılmıştır. Bu probdan alınan veriler ile buhar sıcaklığı tespit edilmektedir.

3.1.1. Optik Algılayıcı Devresi

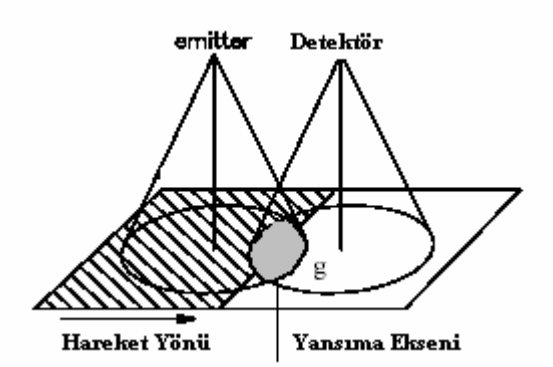
Yapılan deneylerde en büyük sorun basınç değişimi ile buhar hacim değişimi arasında bir ilişki kurabilmek için eş zamanlı olarak kolon seviye değişimi ve basınç değişimini ölçmektir. Kolon seviyeleri kamera çekimi ile tespit edilirken basınç değişimi Keithley 2700 multimetre cihazı ile tespit edilmiştir ve ölçümler farklı zaman dilimlerinde alınmaktadır. Her iki ölçümün eşzamanlı hale getirilmesi için multimetreye optik algılayıcı yerleştirilmiştir. Bu algılayıcı sayesinde kolon su seviyesi optik algılayıcının yerleştirildiği yere gelince multimetreden veri alınmış ve bu sayede aynı multimetreden alınan basınç verisi ile olan eş zaman sorunu çözülmüştür.

Optik algılayıcı olarak hem maliyet ucuzluğu hem de 5 V gibi düşük bir voltaj değerinde çalışması açısından CNY70 seçilmiştir. Oluşturulan devre Şekil 3.6'da ayrıntılı olarak gösterilmiştir



Şekil 3.6: CNY70 Optik Algılayıcı ve Oluşturulan Devre

CNY70 optik algılayıcı yansıyan ışık şiddetindeki değişime göre çalışır. Işık şiddeti değiştiği an anahtar görevi görerek devreyi açar. Algılayıcı hava içinde sürekli olarak 5 V çıkış vermektedir. Şekil 3.7'de CNY70 optik algılayıcının çalışma prensibi gösterilmektedir. Kolondaki su algılayıcının emitter kısmını gördüğü an CNY70 devreyi açar. Bu voltaj değişimine sebep olur. CNY70'in bağlı olduğu devredeki voltaj değişimi ile basınç verileri aynı multimetreden takip edildiği için kolon seviyesi ile basınç değişimi eş zamanlı hale getirilmiştir.



Şekil 3.7: CNY70 Optik Algılayıcısının Çalışma Prensibi

3.2. Deneylerin Yapılışı, Hesaplamalar ve Değerlendirme Metodu

Bu çalışmada 33 deney rapor edilmiştir. Tablo 3.4'de yapılan deneylere ait başlangıç verileri verilmiştir. Yapılan deneylerde izlenen yol seçilen bir deneyde ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Bütün deneylerde sistemdeki su kütlesi sabit tutulmuştur. Sadece ısıtıcı yükü ve soğutucu su sıcaklığı değiştirilmiştir.

Tablo 3.4: Deneylerdeki Başlangıç Verileri

Deney no	Voltaj(V)	Akım(A)	Q(W)	T_s(°C)
1	23.9	9.5	227.05	87
2	18.1	7.2	130.32	83
3	22.2	9.2	204.24	88.6
4	17.7	13	230.1	72
5	17.7	13	230.1	76
6	17.7	13	230.1	80
7	14.4	10.5	151.2	78
8	14.4	10.5	151.2	84
9	15.1	10.9	164.59	78
10	15.1	10.9	164.59	82
11	15.1	10.9	164.59	86
12	16	11.5	184	86
13	16	11.5	184	82
14	16.8	12	201.6	86
15	14.2	10.4	147.68	88
16	17.2	12	206.4	82
17	17.2	12	206.4	84
18	14.2	10.4	147.68	92
19	14.2	10.4	147.68	90
20	16	11.5	184	88
21	14.6	10.1	147.46	87
22	17.2	12	206.4	87
23	14.60	10.10	147.46	85
24	16.80	12.00	201.6	85
25	17.20	12.50	215	84
26	16.00	11.50	184	84
27	17.20	12.00	206.4	83.5
28	16.80	12.00	201.6	83
29	17	12.5	212.5	80
30	15.10	10.90	164.59	80
31	14.40	10.50	151.2	80
32	17.7	13	230.1	78
33	18.20	14.00	254.8	72

Deneylere başlamadan önce sistem içine konulan toplam su hacmi ve kütlesi Denklem (3.1) ve (3.2) kullanılarak hesaplanmıştır. Deney başlangıcında serbest kolon su yüksekliği 25 cm seviyesine kadar doldurulmuştur.

$$V_T = \left(\frac{\pi d_b^{\,2}}{4}\right)\left(L_d + \frac{d_1 + d_2}{2}\right) + \left(\frac{\pi d_1^{\,2}}{4}\right)\left(L_0 + L_d + \frac{d_2 + d_3}{2}\right)$$

$$+\left(\frac{\pi d_1^{\,2}}{4} - \frac{\pi d_h^{\,2}}{4}\right)\left(L_c - \frac{d_b + d_0}{2}\right) + \left(\frac{\pi d_2^{\,2}}{4} - \frac{\pi d_c^{\,2}}{4}\right)$$

$$\left(L_c - \frac{d_b + d_0}{2}\right) + \left(\frac{\pi d_3^{\,2}}{4}\right)\left(z_3 - \frac{d_0}{2}\right) \qquad \textbf{(3.1)}$$

$$V_T = 2.26 \times 10^{-3} \pm 0.181 \times 10^{-3}\ m^3$$

$$m_T = V_T\, \rho_f \qquad \textbf{(3.2)}$$

$$\rho_{su@25^oC} = 996.95\ \frac{kg}{m^3}$$

$$m_T = 2.26 \pm 0.18\ \ kg$$

Isıtıcı devreye sokulduktan sonra, ısıtıcı kolondaki su doyma sıcaklığına erişmekte ve buhar oluşmaktadır. Oluşan buhar ısıtıcı ve soğutucu kolonu birbirine bağlayan yatay boru içinde hareket ederek soğutucu kolona ulaşır. Bu noktada soğuk yüzey ile karşılaşan buhar yoğuşur. Buharlaşmanın yoğuşmadan fazla olmasından ötürü buhar miktarı belli bir süre sürekli artmaktadır. Buhar hacminin süreki artması serbest kolon su seviyesini artırır. Bu nedenle su taşmasını engellemek için sistemden 0.5 L su çekilmiştir.

Buna göre sistem çalıştırıldıktan sonra su kütlesi ;

$$m_T = 2.2576 - \frac{0.5 \times 996.95}{1000} = 1.76 \pm 0.14\ kg$$

Bu süreçte ısıtıcı kolonda habbecikli kaynama gözlemlenmiştir. Belli bir noktadan sonra buharlaşma ve yoğuşma miktarları birbirine yaklaşır ve buhar hacmi belli aralıklar içinde artıp azalmaya başlar. Bu da kolonlardaki suyun salınımına sebep olur. Salınım başladıktan sonra habbecikli kaynamanın sona erdiği gözlemlenmiştir.

Sistem salınıma başladığı zaman buhar hacmi ısıtıcı ve soğutucu kolon su seviyelerine bağlı olarak değişmektedir. Her hangi bir 't' anında kolon seviyeleri biliniyorsa buhar hacmi Denklem (3.3) kullanılarak hesaplanır.

$$V_b = \frac{\pi d_b^{\,2}}{4}\left(L_d + \frac{d_1 + d_2}{2}\right) + \frac{\pi}{4}\left(d_1^{\,2} - d_h^{\,2}\right)\left(L_c - z_1\right)$$

$$+\frac{\pi}{4}\left(d_2^{\,2} - d_c^{\,2}\right)\left(L_c - z_2\right) \qquad \textbf{(3.3)}$$

$$V_b = 1259486.75 - 718.67\,(z_1 + z_2) \quad [mm^3] \qquad \textbf{(3.3a)}$$

Buhar hacmi hesabı daha sonra yapılacak olan basınç değişimi ile eşleştirmede kullanılacaktır.

a) Deney Ölçümleri

Yapılan deneylerde izlenen metodun ayrıntılı bir şekilde gösterilmesi için örnek bir deney ele alınarak detaylıca incelenmiştir.

Deney No 1 (Örnek Deney) ;

$$\dot{Q} = V\,I \quad \rightarrow \quad V = 23.9 \pm 0.5\ V\ ,\ I = 9.5 \pm 0.2\ A \qquad (3.4)$$

$$\dot{Q} = 23.9 \times 9.5 = 227.05 \pm 7\ W$$

Sabit sıcaklık havuzu su sıcaklığı ise $T_s = 87\ ^oC$ olacak şekilde ayarlanmıştır. Salınım başladıktan sonra belli zaman dilimlerinde kolon su seviyelerinin üst ve alt noktaları kaydedilmiştir. Bu noktalarda değişim olmadığı an deney verileri toplanmıştır. Buna göre kolon su seviyeleri değişim aralığı;

Serbest Kolon : 58 – 44.5 cm

Isıtıcı Kolon : 41.5 – 22 cm

Soğutucu Kolon : 40 – 21 cm

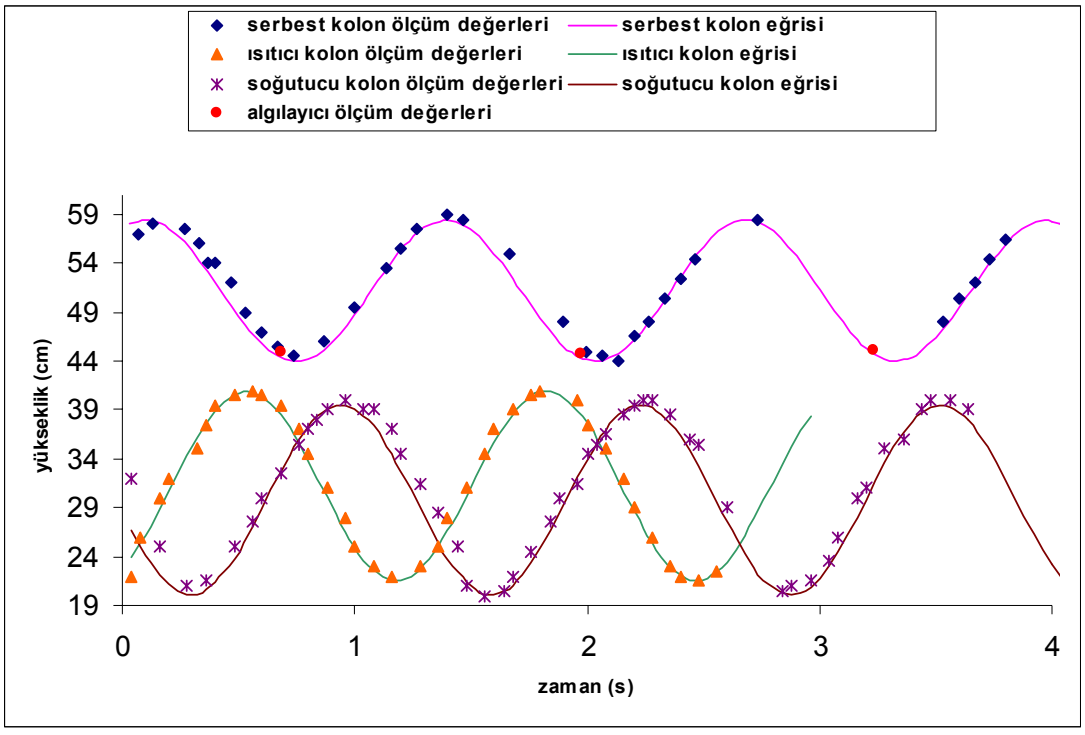
Serbest kolon üzerinde 45 cm konumuna yerleştirilen algılayıcıdan alınan veriler ve kamera çekimleri incelenerek eş zamanlı olarak su seviye değişimi ile algılayıcının suyu gördüğü an tespit edilmiştir. Bu sayede algılayıcı ile eş zamanlı olarak alınan basınç verileri, kolon seviye değişimi ile eşleştirilebilmektedir.

b) Kolon Su Seviyesi Değişimi

Kamera çekimleri incelendiği zaman, kolonlardaki su salınımının sinuzoidal olduğu gözlemlenmiştir. Bu konu ile ilgili olarak daha önceden yapılan çalışmalarda salınıma ait genlik, frekans ve faz farkının hesaplanabilmesi için Denklem (3.5) kullanılmıştır [9].

$$z(t) = z_0 + b\cos(wt + \varphi) \qquad \textbf{(3.5)}$$

Çekimlerden elde edilen verilere Denklem (3.5) uydurularak z_0, b, w, φ katsayıları bulunmuştur. Kamera görüntülerinden elde edilen veriler ile uydurulan eğri Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8: Kolonlardaki Su Seviyesinin Zamanla Değişimi

Isıtıcı Kolon;

$$z_1(t) = 31.2 + 9.7\cos(4.87t - 2.6) \qquad [cm] \tag{3.5a}$$

Soğutucu Kolon;

$$z_2(t) = 29.8 + 9.7\cos(4.87t + 1.7) \qquad [cm] \tag{3.5b}$$

Serbest Kolon;

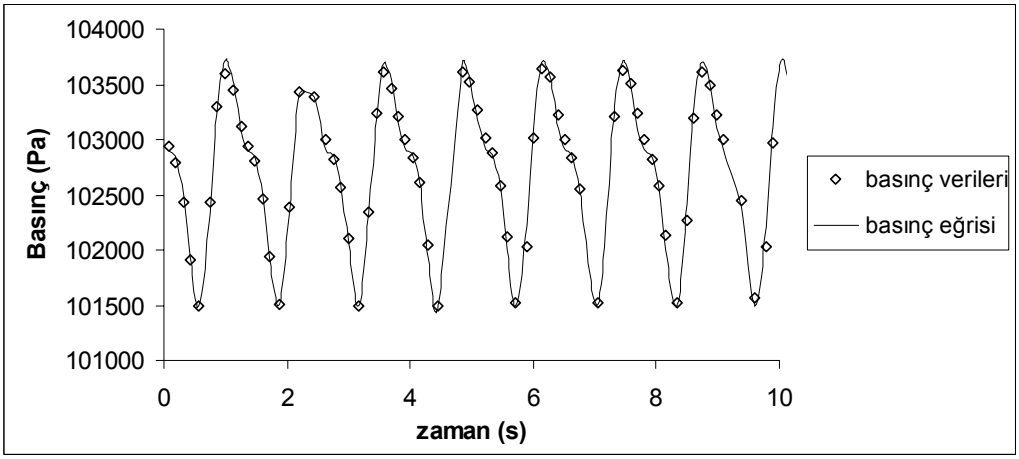
$$z_3(t) = 51.2 + 7.2\cos(4.87t - 0.5) \qquad [cm] \tag{3.5c}$$

Şekil 3.8 oluşturulurken algılayıcıdan alınan verilere zaman ötelemesi uygulanmıştır. Bu sayede algılayıcı ile eş zamanlı ölçülen basınç verileri ile kolon seviye değişimine bağlı olarak değişen buhar hacmi arasında ilişki kurulabilmesi mümkün olmuştur.

c) Hacim Basınç Değişimi:

Hacim basınç değişimini bulmak için ilk önce basıncın zamanla nasıl değiştiğini tespit etmek gerekmektedir. Deney verilerine göre basıncın zamanla değişiminde iki farklı frekans oluşmaktadır. Buna göre ölçülen verilere Denklem (3.6) kullanılarak eğri uydurulmuştur.

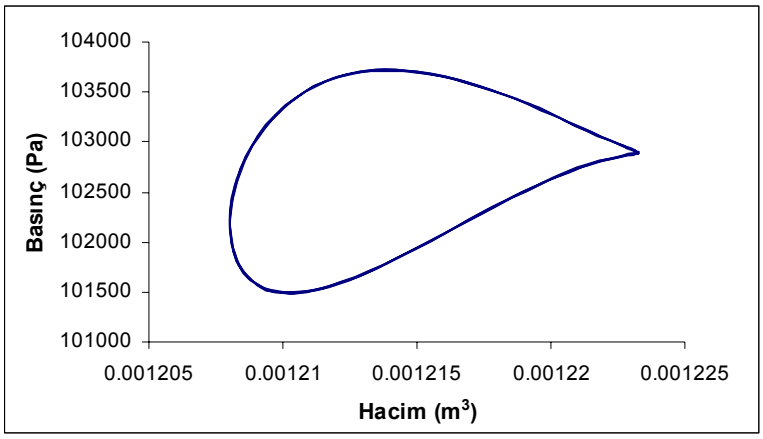
$$P_{fit} = P_o + P_a \sin\left(w_1\ t - \varphi_1\right) + P_b \sin\left(w_2\ t - \varphi_2\right) \quad [Pa] \tag{3.6}$$



Şekil 3.9: Buhar Basıncının Zamanla Değişimi

$$P_{fit} = 102694.8 + 895.3\ \sin\left(4.87t - 4\right) + 407\ \sin\left(9.74t - 1.3\right) \quad [Pa] \tag{3.6a}$$

Basınç ve algılayıcıdan alınan veriler eş zamanlı olduğu için kolon seviyelerine bağlı olarak buhar hacmi hesabı yapılmıştır. Buna göre buhar basıncının hacimle değişimi Şekil 3.10'da gösterildiği gibi çıkmıştır.



Şekil 3.10: Buhar Basıncının Hacim ile Değişimi

Deneyler sırasında mümkün olduğunca hassas ölçümler alınmaya çalışılmıştır. Veri toplama cihazı Keithley 2700 ait bağlantı kartında 1. kanala optik algılayıcı, 2. kanala ise basınç ölçer bağlanmıştır. Tablo 3.5'de görüldüğü gibi, Keithley 2700 iki veri arasında 0.076 saniye beklemektedir. Bu zaman zarfında ise basınç büyük oranlarda değişmektedir.

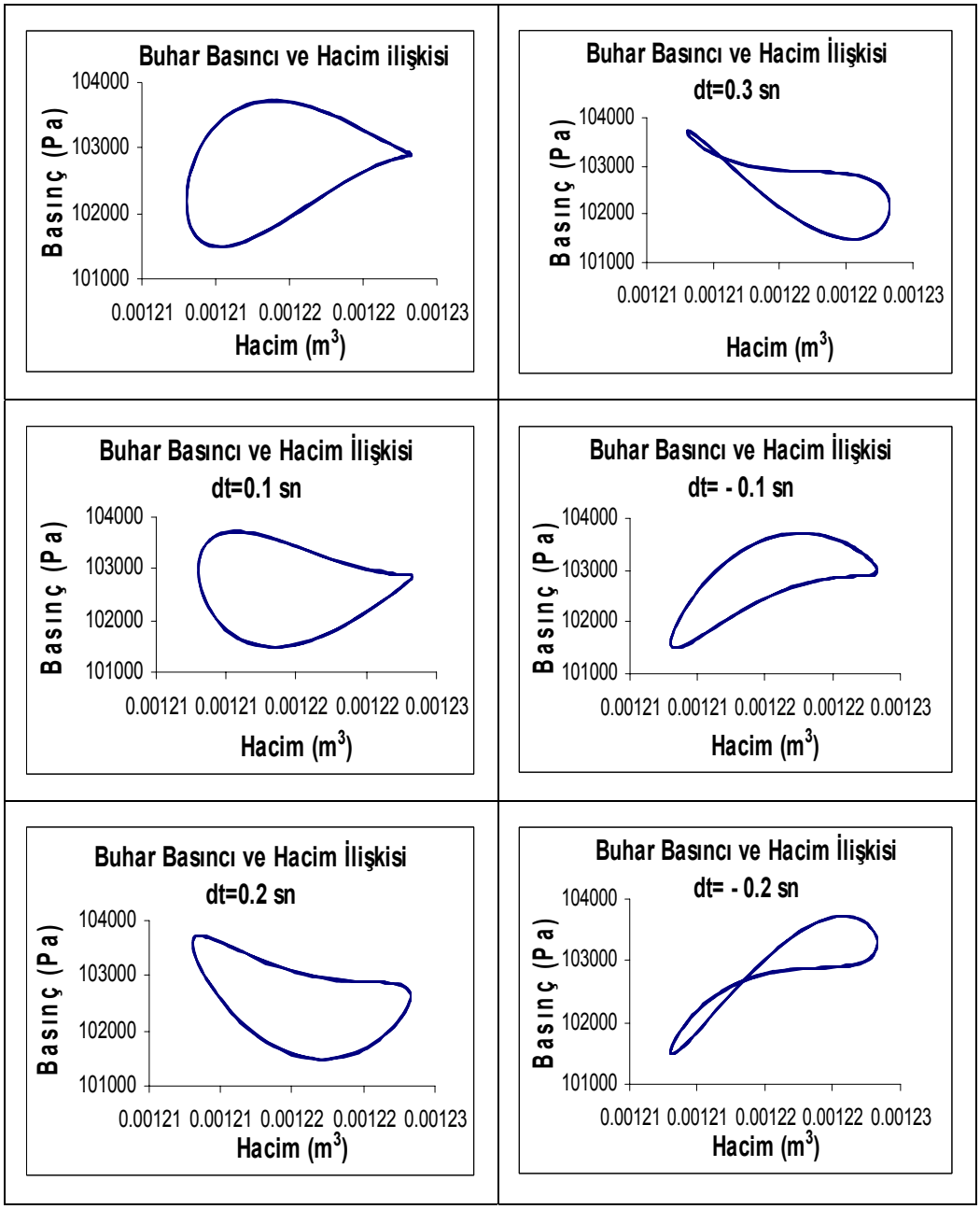
Tablo 3.5: Veri Toplayıcıdan Alınan Algılayıcı ve Basınç Verileri

1. Kanal zamanı (s)	algılayıcı(V)	2. Kanal Zamanı (s)	Basınç (V)	Kalibre Basınç (Pa)	$\Delta P(P_{t+dt}-P_t)$ (Pa)
0	4.25	0.076	2.71	102908.31	
0.111	4.25	0.187	2.57	102812.87	-95.43
0.223	3.96	0.324	2.30	102629.88	-182.99
0.359	3.91	0.434	1.75	102250.97	-378.91
0.471	4.21	0.576	0.76	101579.48	-671.49
0.684	1.08	0.785	0.94	101702.10	122.63
0.894	0.89	0.967	3.03	103124.56	1422.46
1.004	4.21	1.08	3.47	103420.23	295.67
1.116	3.94	1.214	3.18	103225.12	-195.11

Tablodan da anlaşılacağı gibi basınç ölçerden alınan aynı tür iki veri arası yaklaşık 0.11 saniyedir ve bu zaman farkında basınç değişimi 90 Pa ile 700 Pa arasında değişmektedir. Bunun yanısıra gözlem sonucu ölçülen kolon seviyeleri ±1 cm hatayla tespit edildiği düşünülürse buhar hacminde de belli bir sapma söz konusu olacaktır.

Ölçüm cihazlarından ve insandan kaynaklanan hatalardan ötürü basıncın buhar hacmi ile değişimi ± 0.2 saniye farkla ilişkilendirilmektedir.

Eğer Basınç eğrisi için kullanılan zaman, hacim hesabında kullanılan zaman sabit tutularak, 0.1 saniye ötelenirse P-V diagramının biçim değiştirdiği görülür. Şekil 3.11'de 0.1 saniyelik zaman ötelemeleri sonucu buhar hacminin basınç ile değişimi görülmektedir.

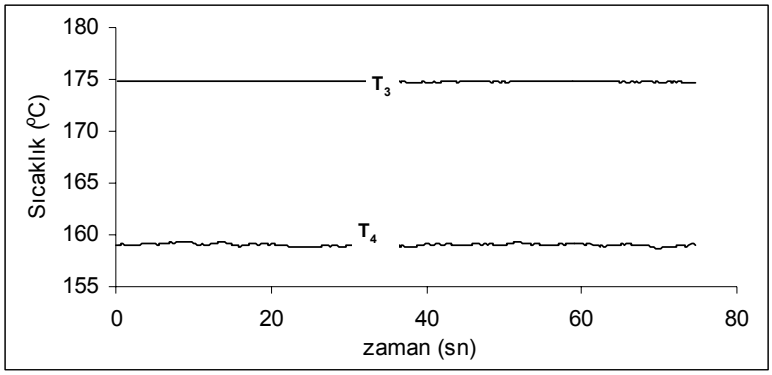


Şekil 3.11: Zaman Ötelemesi ile Buhar Basıncının Hacimle Değişimi

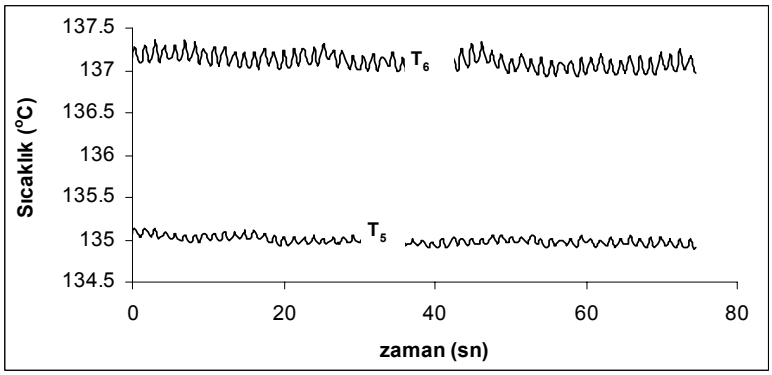
± 0.2 saniye zaman aralığında basınç-buhar hacmi değişimi grafikleri aynı karakterde olduğu için sistem için tahmin edilen basınç-buhar hacmi değişimi Şekil 3.10'daki gibi olması beklenmektedir.

d) Istıcı Eleman Üzerinde Sıcaklık Dağılımı

Isıtıcı yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi incelendiğinde sıcaklık genliği ısıtıcı kısmın dışında 0-0.3^{o}C arasında ısıtıcı kısımda ise 0-1^{o}C arasında değiştiği görülmüştür. Şekil 3.12 ve Şekil 3.13 incelendiğinde salınımın gerçekleştiği noktalarda sıcaklık değişiminin diğer noktalara nazaran sabit frekans ve genlikte gerçekleştiği tespit edilmiştir. Fakat termoelemanlar ile yüzey arasında bakırın oluşturmuş olduğu direnç ve ölçümlerde yapılan muhtemel hata nedeniyle sistem tepkisi tam olarak ifade edilememektedir. Isıtıcı kısımdaki termoelemanlar T_3, T_4, T_5, T_6 olarak belirtilmiştir.



Şekil 3.12: 3 ve 4 nolu Isıtıcı Termoelemanların Üzerinde Sıcaklığın zamanla değişimi



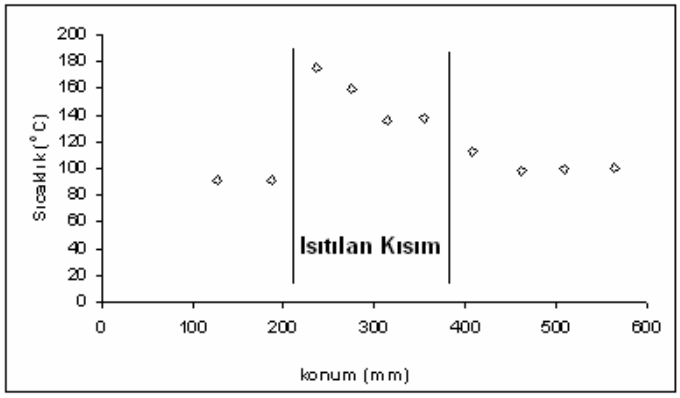
Şekil 3.13: 5 ve 6 nolu Isıtıcı Termoelemanların Üzerinde Sıcaklığın zamanla değişimi

Yukarıda yapılan analize ek olarak ısıtıcı eleman üzerine yerleştirilen 10 adet termoelemandan alınan verilerin zaman ortalamaları alınarak sıcaklıkların mesafe ile değişimleri tespit edilmiş ve Şekil 3.14'de gösterilmiştir. Bu değerlere kalibrasyon sonuçları uygulanmıştır. Şekil 3.14'de ısıtıcı rezistansların bulunduğu kısımın diğer noktalara nazaran daha sıcak olduğu görülmektedir. Bu noktaların sıcaklık ortalaması;

$$\overline{T}_h(T_3, T_4, T_5, T_6) = 143.7^o C$$

Isıtıcı üzerinde bulunan termoelemanların hepsinden alınan verilerin zaman ortalaması ise;

$$T_{ort} = 119^o C$$

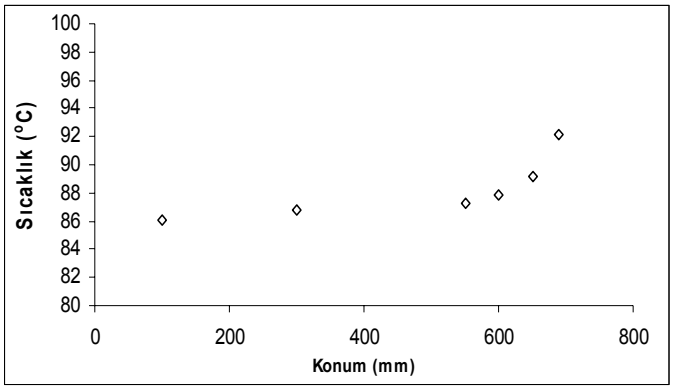


Şekil 3.14: Isıtıcı Üzerinde Ortalama Sıcaklık Dağılımı

Şekil 3.14'de görüldüğü gibi direnç tellerinin bulunduğu kısıma yerleştirilen termoelemanlardan diğerlerine göre daha yüksek değerler elde edilmiştir.

e) Soğutucu Eleman Üzerinde Sıcaklık Dağılımı:

Soğutucu yüzeyine yerleştirilen termoelemanların ortalaması alınarak soğutucu yüzey sıcaklık dağılımı tespit edilmiştir. Ortalama yüzey sıcaklığı, $\overline{T}_c = 88.2^o C$ olarak bulunmuştur.

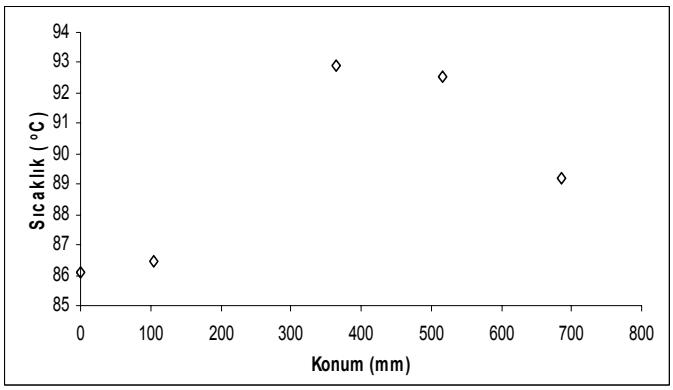


Şekil 3.15: Soğutucu Üzerinde Ortalama Sıcaklık Dağılımı

Soğutucu eleman üzerine yerleştirilen termoelemanlardan alınan veriler, Şekil 3.15'de görüldüğü gibi, soğutucunun buhar ile temas ettiği noktadan sonra yüzey sıcaklığının sabit sayılabileceğini göstermiştir.

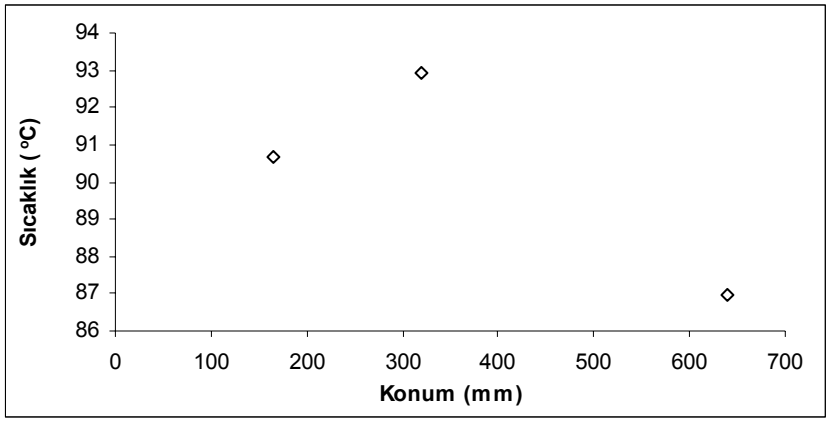
f) Yüzey ve Prob Sıcaklık Dağılımı:

Daha öncede belirtildiği gibi ısı borusunun alt kısmında yüzeye yerleştirilen termoelemanlar sıcaklığın ısıtıcı girişinde artığını serbest kolon ve soğutucu kolon taraflarında ise birbirine yakın değerler taşıdığını göstermektedir.



Şekil 3.16: Alt Yüzey Sıcaklık Dağılımı

Problardan üç tanesi alt kısımda bulunmaktadır. Sonuçta sıcaklık dağılımı hem yüzeyden hem de problar aracılığı ile iç kısımdan ölçülerek su sıcaklığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.17: Prob Sıcaklık Dağılımı

Buhar kısmında basıncın 101.5 -104 kPa arasında değiştiği tespit edilmişti. Buhar kısmına yerleştirilen probtan alınan sıcaklık ölçümü (T_{buhar}=98.5°C) ile de buharın sıcaklığı tespit edilmiş oldu.

g) Ortalama Isı Geçiş Katsayısı Hesabı :

Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu kolonlara ait ısı taşınım katsayılarının tespit edilmesi için her iki kolondaki ısı ve kütle geçişinin gerçekçi bir matematiksel model ile açıklanması gerekir. Geleneksel ısı boruları için birçok ısı taşınım katsayıları bulunmuştur fakat mevcut incelenen ısı borusunda titreşim olduğu için bu korelasyonlar kullanılamamaktadır. Bu nedenle sistem için ortalama bir ısı geçiş katsayısı tariflenmiştir. Buna göre; sisteme verilen ısının tamamen soğutucu ile uzaklaştırıldığı kabul edilip, ortalama ısıtıcı ve soğutucu yüzey sıcaklıkları kullanılarak ortalama ısı geçiş katsayısı bulunmuştur. Elde edilen bu değer ısıtıcı, buhar hacmi ve soğutucu kısımlarındaki toplam direnç göz önüne alınarak elde edilmiştir.

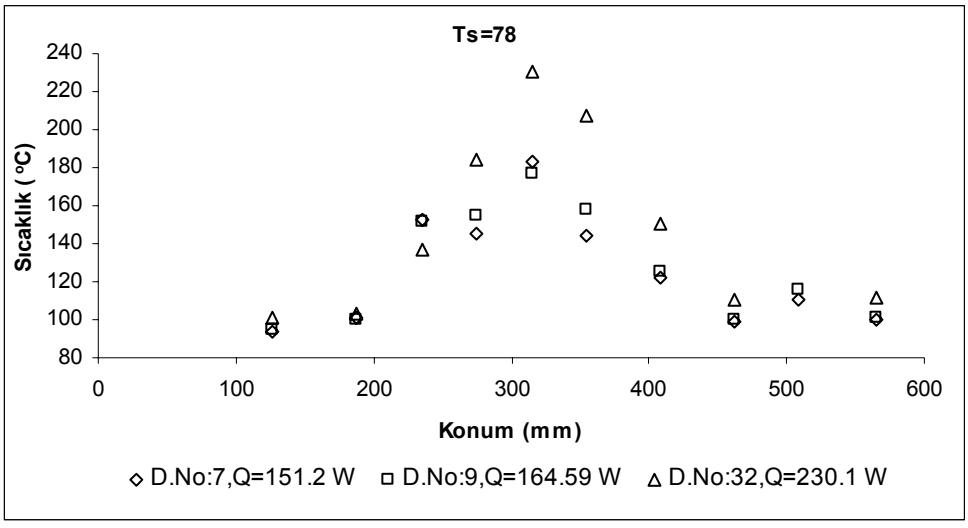
$$U = \frac{\dot{Q}}{A_h\,(\overline{T}_h - \overline{T}_c)} \qquad \textbf{(3.7)}$$

$$U = 508 \pm 15\ \frac{W}{m^2\ K} \qquad \textbf{(3.7a)}$$

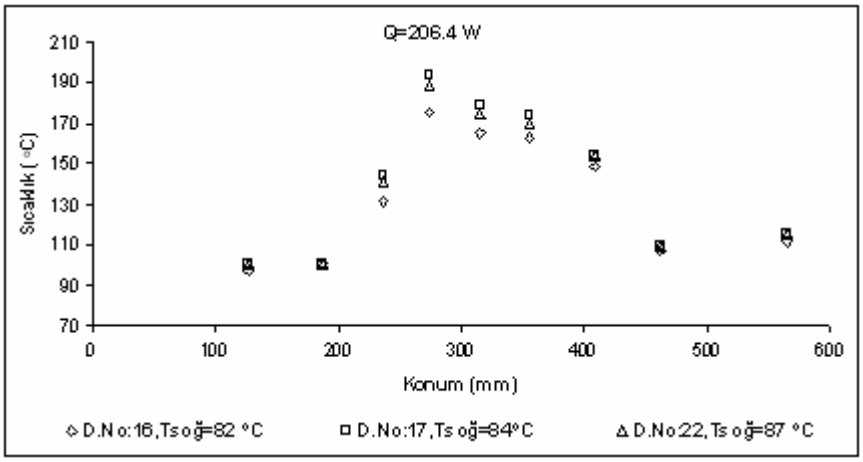
3.3. Deney Sonuçları

a) Ortalama Isıtıcı Sıcaklığı

Isıtıcı üzerindeki sıcaklıklar ortalama ısı geçiş katsayısını bulmak için kullanılmıştır. Ayrıca ısıtıcı üzerinde sıcaklık dağılımını incelemek için soğutucu yüzey ortalama sıcaklıkları birbirine yakın olan deneyler seçilmiş ve değişik ısı yüklerinde ısıtıcı yüzey sıcaklığının nasıl değiştiği tespit edilmiştir. Buna ek olarak aynı ısı yüküne sahip fakat farklı soğutucu sıcaklıklarındaki deneyler bir araya getirilerek ısıtıcı üzerinde sıcaklık dağılımları tespit edilmiştir. Şekil 3.18, 78°C sabit soğutucu sıcaklığına göre değişik ısı yüklerinde ısıtıcı üzerindeki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Şekil 3.19, 206.4 W ısıtıcı yüküne göre değişik soğutucu sıcaklıklarında ısıtıcı üzerinde sıcaklık dağılımını göstermektedir. Bunlara ilave olarak deneylerin değişik soğutucu sıcaklıklarına ve ısı yüklerine göre sınıflandırılması Ek A ve Ek B'de detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.18 : 78 °C Sabit Soğutucu Su Sıcaklığına Göre Değişik Isı Yüklerinde Isıtıcı Üzerinde Sıcaklık Dağılımı

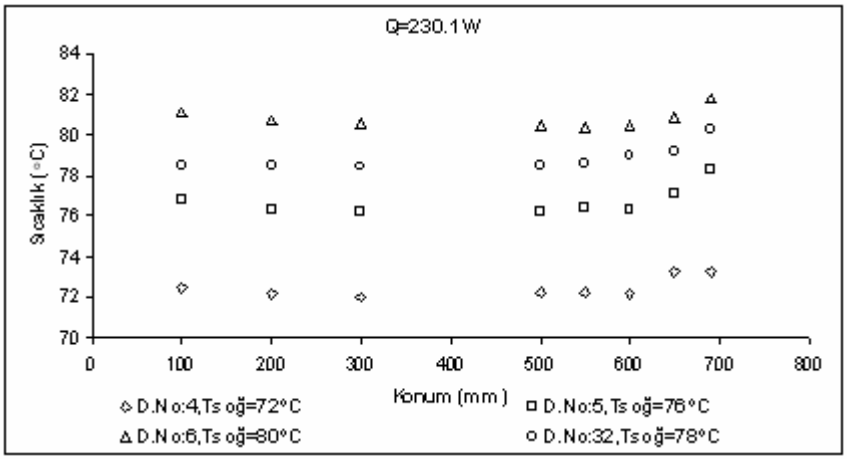


Şekil 3.19 : 206.4 W Sabit Isıtıcı Yüküne Göre Değişik Soğutucu Su Sıcaklıklarında Isıtıcı Üzerinde Sıcaklık Dağılımı

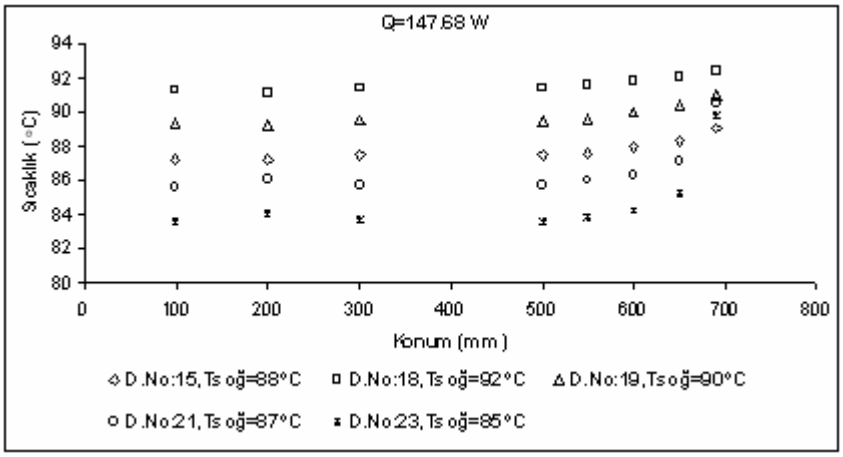
b) Ortalama Soğutucu Sıcaklığı

Soğutucu üzerindeki sıcaklıklar ortalama ısı geçiş katsayısını bulmak için kullanılmıştır. Ayrıca soğutucu üzerinde sıcaklık dağılımını incelemek için soğutucu yüzey ortalama sıcaklıkları birbirine yakın olan deneyler seçilmiş ve değişik ısı yüklerinde soğutucu yüzey sıcaklığının nasıl değiştiği tespit edilmiştir. Buna ek olarak aynı ısı yüküne sahip fakat farklı soğutucu sıcaklıklarındaki deneyler bir araya getirilerek soğutucu üzerinde sıcaklık dağılımları tespit edilmiştir. Şekil 3.20 ve Şekil 3.21'de ısı yükü sırasıyla 230.1 W ve 147.68 W olan deneyler gösterilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı gibi soğutucu yüzey sıcaklığı, ısı yüküne nazaran soğutucu su sıcaklığına daha çok bağlıdır ve soğutucu su sıcaklığına çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Soğutucu yüzey sıcaklığı buhar girişinde biraz artmakta alt kısımlara doğru ise fazla değişmemektedir.

Mevcut şekillere ek olarak ısı yükü 206.4 W, 201.6 W, 184 W, 164.59 W olan deneyler Ek C'de detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.20: 230.1 W Isıtıcı Gücünde Soğutucu Eleman Sıcaklık Dağılımı



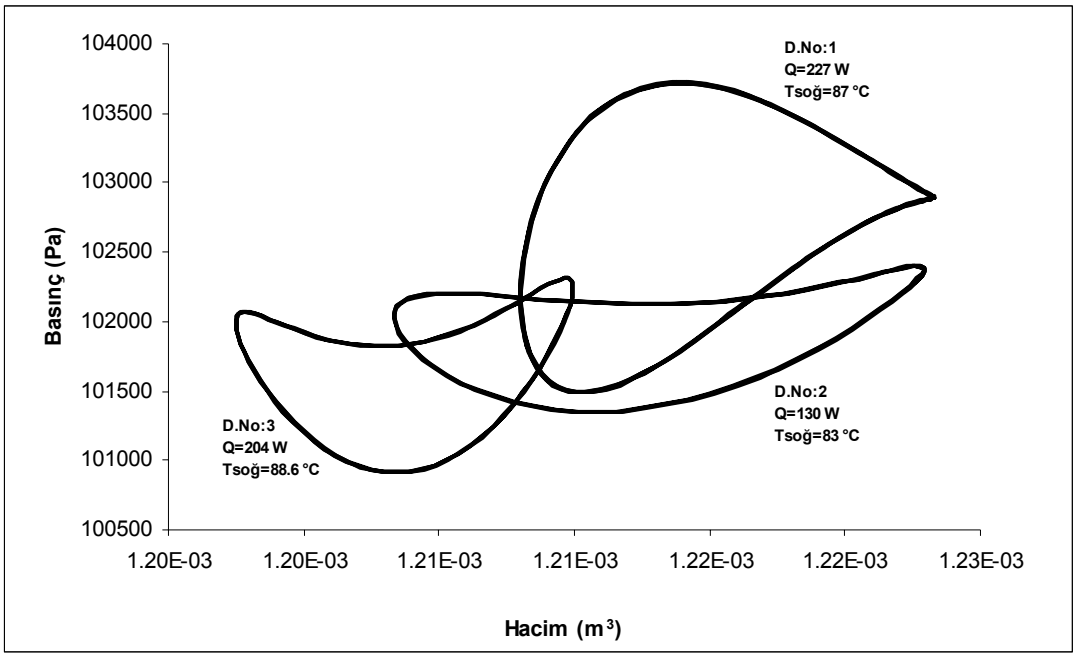
Şekil 3.21: 147.68 W Isıtıcı Gücünde Soğutucu Eleman Sıcaklık Dağılımı

c) Alt Yüzey ve Prob Sıcaklık Dağılımları

Alt yüzeye yerleştirilen termoelemanların konumları daha önce belirtilmişti. Buna göre yapılan deneylerde elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucu da alt yüzey sıcaklık dağılımı tespit edilmiştir. Mevcut veriler ısıtıcı yükü sabit tutularak değişik soğutucu sıcaklıklarında irdelenmiştir. Alt kısıma yerleştirilen prob noktalarından alınan veriler de ısıtıcı yükü sabit tutularak değişik soğutucu sıcaklıklarında irdelenmiştir. Buhar kısmına yerleştirilen probtan alınan veriler ise buhar sıcaklığının yapılan deneylerde 96.6°C ile 100.6°C arasında değiştiğini göstermiştir. Ayrıntılı veriler Ek D ve Ek E'de verilmiştir.

d) Buhar Basıncı – Hacim Değişimi

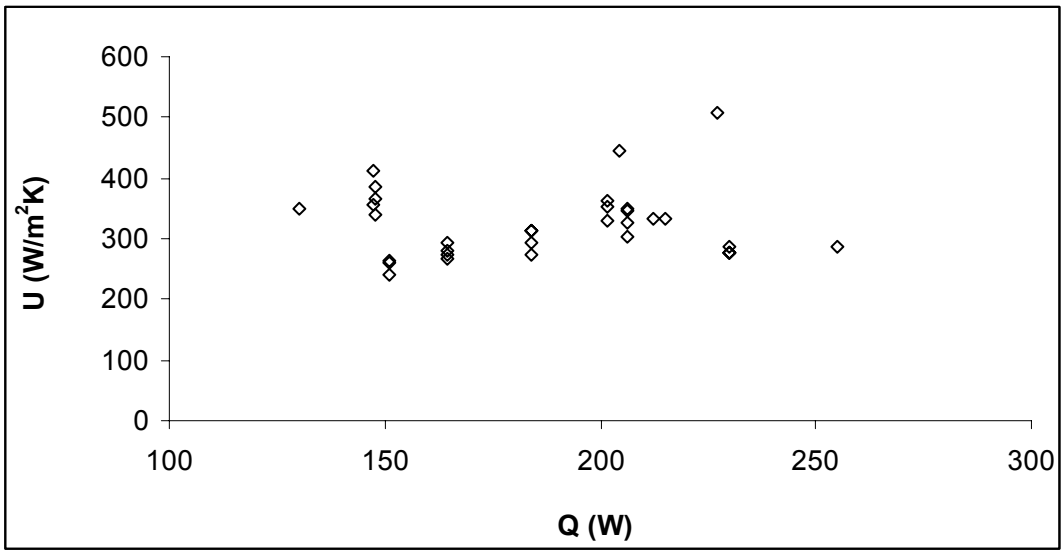
Buhar hacminin değişiminde en önemli etkenin herhangi bir ‘t’ anında buharlaşan ve yoğuşan kütle miktarının aynı olmamasından kaynaklanmaktadır. Bir başka deyişle buharlaşma ve yoğuşma arasında faz farkı vardır. Şekil 3.22’de farklı ısı yüklerinde ve soğutucu sıcaklıklarında buhar basıncının hacim ile değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.22: Buhar Basınının Hacim ile Değişimi

e) Ortalama Isı Geçiş Katsayısı

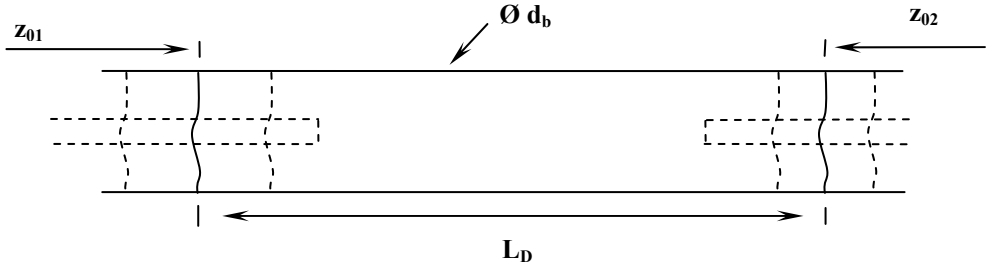
Değişik ısı yüklerinde elde edilen ortalama ısı geçiş katsayıları sadece ısı yüküne bağlı olmadığı Şekil 3.23’den görülmüştür. Bu şekilde sonuçlar irdelenemeyeceğinden ve ortalama ısı geçiş katsayısına etki eden diğer parametrelerin tespiti için boyut analizi yapılmıştır.



Şekil 3.23: Isıtıcı Gücüne Göre Ortalama Isı Geçiş Katsayısının Değişimi

3.4. Boyut Analizi

Boyut analizi ısı geçişinin etkin olduğu ısıtıcı ve soğutucu kolon arasında bulunan buhar hacmi için uygulanmıştır.



Şekil 3.24: Buhar Hacmi için Boyut Analizi

Boyut analizi metodu olarak Buckhingam-Pi teoremi kullanılmıştır. Buharlaşma ve yoğuşma Şekil 3.24'de görüldüğü gibi ısıtıcı ve soğutucu kolonlar arasında gerçekleşmektedir. Buhar hacmi ısıtıcı ve soğutucu kolon seviyelerine bağlı olarak değişmektedir. Belli bir anda kolon seviyelerini birbiri ile ilişkilendiren bir bağıntı olmadığı için buhar hacmi hesabı salınım eksenleri olan z_{01} ile z_{02} kulanılarak hesaplanmıştır. Salınım eksenleri arasındaki mesafe ise L_D olarak belirtilmiştir. Deneylere ait değişken değerleri Ek F'de verilmiştir.

Değişkenler : $L_D, D, \mu, (\rho_l - \rho_v), c_p, k, (\overline{T}_h - \overline{T}_c), h_{fg}, w, U$

Referans Değişkenler : $D, (\rho_l - \rho_v), c_p, w$

Boyutsuz parametreler ;

$$\pi_1 = \frac{L_D}{D} \tag{3.8}$$

$$\pi_2 = \frac{\mu}{D^2\, w\, \Delta\rho} \tag{3.9}$$

$$\pi_3 = \frac{k}{D^2\, w \Delta\rho\, c_p} \tag{3.10}$$

$$\pi_4 = \frac{(\overline{T}_h - \overline{T}_c)\, c_p}{D^2\ w^2} \tag{3.11}$$

$$\pi_5 = \frac{h_{fg}}{D^2\ w^2} \tag{3.12}$$

$$\pi_6 = \frac{U}{D\, w\, \Delta\rho\, c_p} \tag{3.13}$$

Yukarıda belirtilen boyutsuz parametreler kullanılarak mevcut sistem için geçerli olabilecek boyutsuz sayılar elde edilmiştir.

Kinetik Reynolds ; $\mathrm{Re}_w = \frac{1}{\pi_2} = \frac{D^2\, w\, \rho}{\mu}$ **(3.14)**

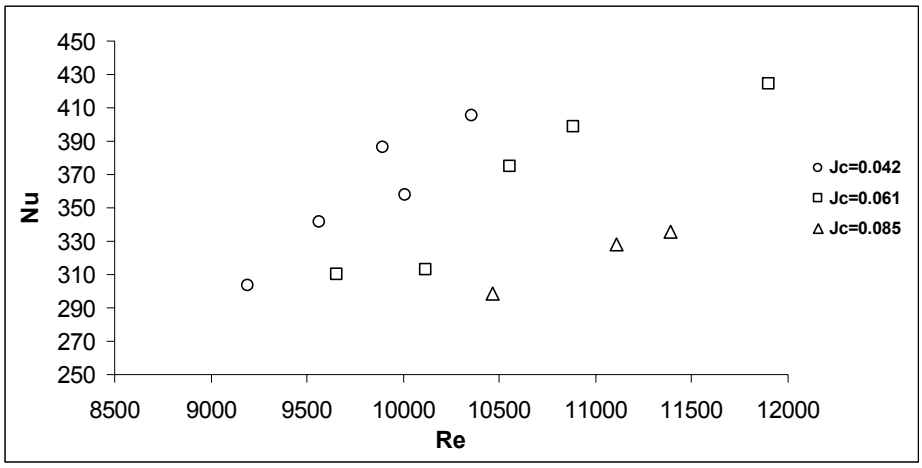
Eşdeğer Jakob sayısı ; $Jc^* = \frac{\pi_4}{\pi_5} = \frac{(\overline{T}_h - \overline{T}_c)\, c_p}{h_{fg}}$ **(3.15)**

Prandtl sayısı; $\mathrm{Pr} = \frac{\pi_2}{\pi_3} = \frac{\mu\, c_p}{k}$ **(3.16)**

Nusselt Sayısı; $Nu = \frac{\pi_6\, \pi_1}{\pi_3} = \frac{U\, L_D}{k}$ **(3.17)**

Boyutsuzlaştırma yapılan kısımda akışkan özelliklerinin değişmediği kabul edildiği için Prandtl sayısı sabit alınmıştır. Şekil 3.25'de Nusselt sayısının, farklı eşdeğer Jakob sayılarında, kinetik Reynolds sayısına göre değişimi verilmiştir.

Şekil 3.25'den de anlaşılacağı üzere Nusselt sayısının kinetik Reynolds sayısına ve eşdeğer Jakob sayısına bağlı olduğu görülmektedir.



Şekil 3.25: Farklı Eşdeğer Jakop Sayıları için Nusselt Sayısının Reynolds Sayısı ile Değişimi

$$Nu = f\left(\mathrm{Re}_w, Jc^*\right) \tag{3.18}$$

Klasik Nusselt bağıntısından yola çıkarak bu fonksiyon Denklem (3.19) şeklinde tariflenmiştir.

$$Nu = A\,\mathrm{Re}_w^{\,b}\,Jc^{*c} \tag{3.19}$$

Boyutsuz sayılar arasında bir ilişki kurabilmek için birden fazla değişkene sahip fonksiyonlarda regresyon analizi ile bağıntı oluşturulmuştur. A,b ve c katsayılarının tespit edilmesi için Denklem (3.19) logaritmik olarak ifade edilmiştir.

$$\ln(Nu) = \ln(A) + b\ln(\mathrm{Re}_w) + c\ln(Jc^*) \tag{3.20}$$

Çok Değişkenli Regresyon Analizi:

$$S = \sum\left[\ln(Nu)_i - \ln A - b\ln(\mathrm{Re}_w)_i - c\ln(Jc^*)_i\right]^2 \tag{3.21}$$

$$\frac{\partial S}{\partial(\ln A)} = -2\sum\left[\ln(Nu)_i - \ln A - b\ln(\mathrm{Re}_w)_i - c\ln(Jc^*)_i\right] = 0 \tag{3.22}$$

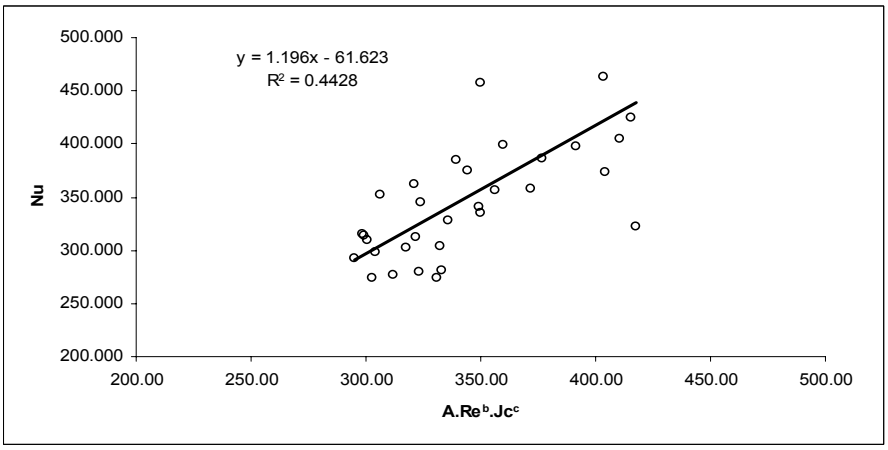
$$\frac{\partial S}{\partial(b)} = -2\sum\ln(\mathrm{Re}_w)_i\left[\ln(Nu)_i - \ln A - b\ln(\mathrm{Re}_w)_i - c\ln(Jc^*)_i\right] = 0 \tag{3.23}$$

$$\frac{\partial S}{\partial(c)} = -2\sum \ln(Jc)_i \left[\ln(Nu)_i - \ln A - b\ln(\mathrm{Re}_w)_i - c\ln(Jc^*)_i \right] = 0 \qquad \textbf{(3.24)}$$

3x3 boyutunda elde edilen matrisin çözümü sonucunda A, b ve c katsayıları bulunmuştur.

$$Nu = 2.391\times10^{-5}\,\mathrm{Re}_w^{\,1.66172}\,Jc^{*-0.398} \qquad \textbf{(3.25)}$$

Deneysel olarak elde edilen Nusselt sayısı ile ampirik ifade ile elde edilen Nusselt sayısı arasındaki korelasyon katsayısı, Şekil 3.26'dan da anlaşılacağı gibi 0.4428 olarak bulunmuştur. Mevcut veri sayısına göre, veriler arasındaki doğrusal korelasyonun %98 oranında güvenilir olması için kritik korelasyon katsayısının r_{kr}=0.423 olması gerekir. Gerçek korelasyon katsayısı kritik korelasyon katsayısından yüksek olduğu için mevcut ampirik ifadenin kabul edilebilinecek güvenilirlik seviyesinde olduğu tespit edilmiştir.

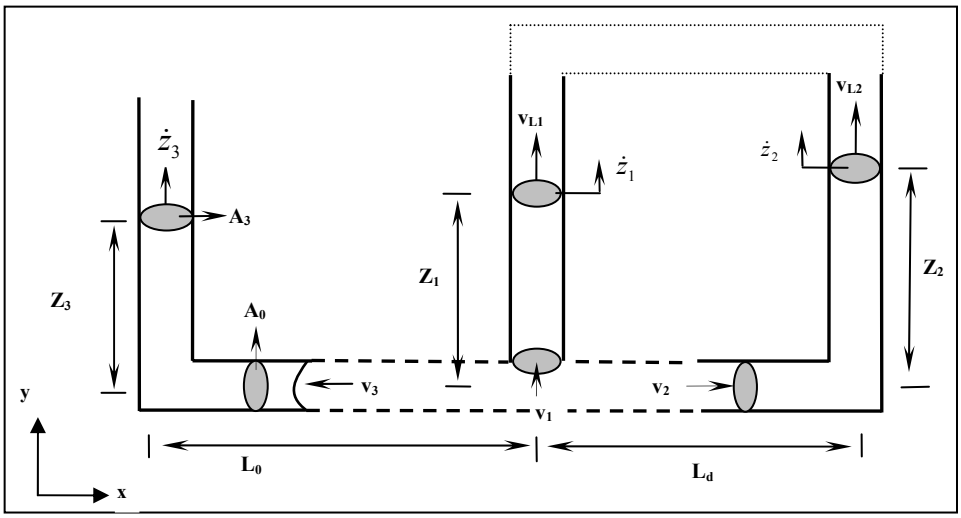


Şekil 3.26: Nusselt Bağıntısının Deneysel Veriler ile Karşılaştırılması

4. MATEMATİK MODEL

Matematik model oluşturulurken kontrol hacim formülasyonu yöntemi uygulanmış ve sistem üç ayrı konrol hacmine ayrılmıştır. Seçilen kontrol hacimleri hareketli sınıra sahiptir. Sıvı ve buhar Newtonian akış olarak kabul edilmiştir. Sıvı yoğunluğu sabit, sıvı hızı ise ortalama olarak alınmıştır.

4.1. Kontrol Hacmi Formulasyonu



Şekil 4.1: Seçilen Kontrol Hacimleri

Üç ayrı kontrol hacmine ayrılan sistem için ilk önce kütlenin korunumu denklemi daha sonra momentum dengesi ve enerjinin korunumu denklemi elde edilmiştir. Isıtıcı ve soğutucu kolonlarda buharlaşma ve yoğuşma neticesinde oluşan arayüzeyler için yapılan kabuller ışığı altında korunum denklemleri yazılmıştır. Isıtıcı elemana verilen ısının bir kısmı sıvı bir kısmı ise buhar fazına geçmektedir. Buharlaşma için gerekli olan ısının miktarı tespit edilmiştir.

Yoğuşma ile atılan ısının miktarını tespit etmek amacıyla soğutucu kolon için ısı taşınım katsayısı tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak buhar hacmi için korunum denklemleri yazılmıştır. Son olarak üç kontrol hacminin kesişim noktası olan Te bağlantı için korunum denklemleri yazılarak matematik model oluşturulmuştur.

a) Kütlenin Korunumu:

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{V_A} \rho \, dV + \int_{S_A} \rho \, (\mathbf{v} - \mathbf{v_s}) \cdot \mathbf{n} \, dA = 0 \qquad \textbf{(4.1)}$$

Birinci kontrol hacmi, ısıtıcı kolon için;

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{0}^{z_1(t)} \rho \, A_1 \, dz_1 + \int_{s} \rho \, (v_{L1} - \dot{z}_1) \, dA - \int_{s} \rho \, v_1 \, dA = 0 \qquad \textbf{(4.2)}$$

$\rho = \rho_f$: sabit (sıkıştırılamaz akış)

$$v_{L1} = v_1 \qquad \textbf{(4.3)}$$

İkinci kontrol hacmi için ;

$$A_2 \, v_{L2} = A_0 \, v_2 \qquad \textbf{(4.4)}$$

Üçüncü kontrol hacmi için ;

$$A_3 \, \frac{dz_3}{dt} = A_0 \, v_3 \qquad \textbf{(4.5)}$$

Bu kontrol hacminde arayüzey oluşumu olmadığı için, $v_{L3} = \dot{z}_3$ olarak alınmıştır.

b) Enerjinin Korunumu:

$$\rho_f \, \frac{d}{dt}\int_{V} (u + \frac{|v|^2}{2} + g \, z) \, dV + \rho_f \int_{S} (h + \frac{|v|^2}{2} + g \, z) \, (\mathbf{v} - \mathbf{v_s}) \cdot \mathbf{n} \, dA = \dot{Q} - \dot{W} \qquad \textbf{(4.6)}$$

Oluşturulan matematik modelde sisteme verilen ve sistemden çekilen ısı arayüzeyden geçtiği kabul edildiğinden genel enerji denkleminden iç enerji ifadesi düşürülmüştür.

Buna göre, birinci kontrol hacmi için ;

$$\rho_f \frac{d}{dt}\int_0^{z_1}(\frac{v^2}{2}+g\ z)\ A_1\ dz+\rho_f\ A_1\ (v_{L1}-\dot{z}_1)\ (\frac{P_{L1}}{\rho_f}+\frac{{v_{L1}}^2}{2}+g\ z_1)$$

$$-\rho_f\ A_1\ v_1\ (\frac{P_x}{\rho_f}+\frac{{v_1}^2}{2})=-\dot{W}_1-\dot{W}_{f1} \qquad \textbf{(4.7)}$$

$$\dot{W}_1=P_{L1}\ A_1\ \dot{z}_1 \qquad \textbf{(4.8)}$$

$$\dot{W}_{f1}=\tau_w\ A_y\ v_{L1}=\rho_f\ \pi\ r_1\ C_f\ z_1\ {v_{L1}}^3 \qquad \textbf{(4.9)}$$

Boru içindeki akış laminar kabul edilmiştir. Buna göre sürtünme katsayısı ;

$$C_f=\frac{\tau_w}{(\frac{\rho_f\cdot {v_{L1}}^2}{2})}=\frac{16}{\mathrm{Re}} \qquad \textbf{(4.10)}$$

Sistem de salınımlı akış söz konusu olduğu için, sürtünme faktörü hesabında dinamik basınç ($\rho_f v|v|/2$) göz önüne alınmıştır. Bu sayede hız vektörünün işaret değişimi hesaba katılmıştır.

$$F_1=\frac{\dot{W}_{f1}}{v_{L1}} \qquad \textbf{(4.11)}$$

$$F_1=8\ \pi\ \mu\ z_1\ v_{L1} \qquad \textbf{(4.12)}$$

$$\rho_f\ z_1\ \dot{v}_{L1}+\rho_f\ g\ z_1+P_{L1}-P_x+\frac{F_1}{A_1}=0 \qquad \textbf{(4.13)}$$

İkinci kontrol hacmi için ;

$$\rho_f \frac{d}{dt}\int_0^{l_d}\frac{v^2}{2}\ A_0\ dz+\rho_f \frac{d}{dt}\int_0^{z_2}(\frac{v^2}{2}+g\ z)\ A_2\ dz+\rho_f\ A_2\ (v_{L2}-\dot{z}_2)\ (\frac{P_{L2}}{\rho_f}+\frac{{v_{L2}}^2}{2}+g\ z_2)$$

$$-\rho_f\ A_0\ v_2\ (\frac{P_y}{\rho_f}+\frac{{v_2}^2}{2})=-\dot{W}_2-\dot{W}_{f2} \qquad \textbf{(4.14)}$$

$$\dot{W}_2 = P_{L2}\ A_2\ \dot{z}_2 \tag{4.15}$$

$$\dot{W}_{f2} = v_{L2}\ F_2 \tag{4.16}$$

Birinci kontrol hacminden farklı olarak ikinci ve üçüncü kontrol hacminde dirsek bulunmaktadır. Sürtünme kuvveti hesabında burada meydana gelebilecek kayıplarda göz önüne alınmıştır.

$$F_2 = 8\,\pi\,\mu\,(L_d\,\frac{A_2^{\,2}}{A_0^{\,2}} + z_2)\,v_{L2} + A_2\,\frac{1}{2}\,\rho_f\,K_{L2}\,|v_{L2}|\,v_{L2} \tag{4.17}$$

$$\rho_f\,(L_d\,\frac{A_2}{A_0} + z_2)\,\dot{v}_{L2} + \frac{\rho_f}{2}\,\dot{v}_{L2}^{\,2}\,(1 - \frac{A_2^{\,2}}{A_0^{\,2}}) + \rho_f\,g\,z_2 + P_{L2} - P_y + \frac{F_2}{A_2} = 0 \tag{4.18}$$

Üçüncü kontrol hacmi için ;

$$\rho_f\,\frac{d}{dt}\int_0^{l_0}\frac{v^2}{2}\,A_0\,dz + \rho_f\,\frac{d}{dt}\int_0^{z_3}(\frac{v^2}{2} + g\,z)\,A_3\,dz$$

$$+\rho_f\ A_0\ v_3\ (\frac{P_z}{\rho_f} + \frac{v_3^{\,2}}{2}) = -\dot{W}_3 - \dot{W}_{f3} \tag{4.19}$$

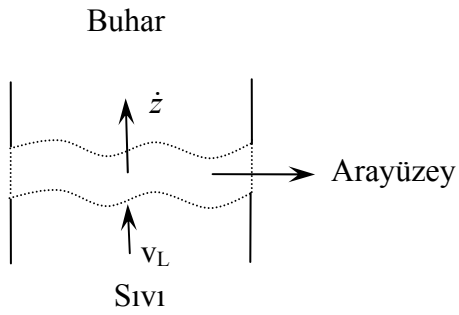
$$\dot{W}_3 = P_0\ A_3\ \dot{z}_3 \tag{4.20}$$

$$\dot{W}_{f3} = \dot{z}_3\ F_3 \tag{4.21}$$

$$F_3 = 8\,\pi\,\mu\,(L_0\,\frac{A_3^{\,2}}{A_0^{\,2}} + z_3)\,\dot{z}_3 + A_3\,\frac{1}{2}\,\rho_f\,K_{L3}\,|\dot{z}_3|\,\dot{z}_3 \tag{4.22}$$

$$\rho_f\,(L_0\,\frac{A_3}{A_0} + z_3)\,\ddot{z}_3 + \frac{\rho_f}{2}\,\dot{z}_3^{\,2}\,(1 - \frac{A_3^{\,2}}{A_0^{\,2}}) + \rho_f\,g\,z_3 + P_0 - P_z + \frac{F_3}{A_3} = 0 \tag{4.23}$$

c) Arayüzey İçin Korunum Denklemleri



Şekil 4.2: Isıtıcı ve Soğutucu Kolonda Oluşan Arayüzey

Sistemde buharlaşma ve yoğuşmanın gerçekleştiği ısıtıcı ve soğutucu kolonlarda arayüzey oluşmaktadır. Arayüzey sıvı ve buhar kısmı birbirinden ayıran sonsuz küçük kalınlıktaki yüzey olarak nitelendirilir. Matematik model buharlaşma ve yoğuşma için gerekli olan ısıların bu yüzeylerden geçtiğini kabul etmektedir.

Ayrıca arayüzeyde viskozite etkileri, buharlaşan kütlenin momentumu ve kinetik enerjisi ihmal edilmiştir.

Buna göre, arayüzeyde buharlaşan ve yoğuşan kütlesel debiler sırasıyla;

$$\dot{m}_b = \rho_f \; A_1 \; (v_{L1} - \dot{z}_1) \qquad \textbf{(4.24)}$$

$$\dot{m}_y = \rho_f \; A_2 \; (v_{L2} - \dot{z}_2) \qquad \textbf{(4.25)}$$

Arayüzey için momentum denklemi yukarıda belirtilen kabuller altında yazıldığında $P_{L1} = P_{L2} = P_b$ elde edilir.

Arayüzey için enerji denklemi;

$$\dot{Q}_g = A_1 \; \rho_f \; (v_{L1} - \dot{z}_1) \; h_{fg} \qquad \textbf{(4.26)}$$

$$\dot{Q}_ç = -A_2 \; \rho_f \; (v_{L2} - \dot{z}_2) \; h_{fg} \qquad \textbf{(4.27)}$$

Burada hesaplanan ısı toplam ısının buharlaşma için harcanan değeridir. Toplam ısının bir kısmıda sıvı akışkan sıcaklığını doyma sıcaklığına çıkarmak için kullanılır.

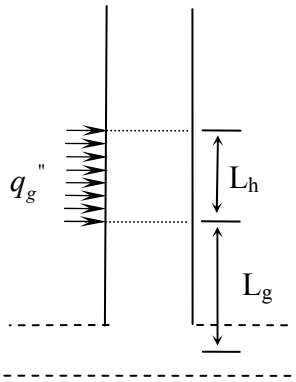
d) Buharlaşma için Birim Zamanda Gerekli olan Isı ;

Isıtıcı kolondaki sıvı suyun sıcaklığı doymuş sıvı haline çok yakın olduğu kabul edilmiştir. Faz değişiminin olduğu arayüzeye, su doymuş sıvı olarak girmekte, doymuş buhar olarak çıkmaktadır. Isıtıcıdan çekilen ısının buharlaşmaya giden miktarının bulunabilmesi için ısı taşınım katsayısının tespit edilmesi gerekmektedir. Isı taşınım katsayısı boru içinde tam gelişmiş akış hali ile salınımlı akış halinin toplamı olarak ifade edilmiştir. Salınımlı akış için bu değer sabit alınmıştır.

$$q_g^{"} = h_t\,(\overline{T}_h - T_d) \qquad \textbf{(4.28)}$$

$$h_t = h_s + h_t \qquad \textbf{(4.29)}$$

$$h_t = a\,\mathrm{Re}^b \qquad \textbf{(4.30)}$$



Şekil 4.3: Isıtıcı Elemandan Çekilen Isı Miktarı

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho\,\dot{z}\,D_h}{\mu} \qquad \textbf{(4.31)}$$

$$\rho = 957.84\,(kg/m^3) \quad , \quad \mu = 279\times10^{-6}\,(Ns/m^2)$$

$$D_h = \frac{4\,A}{P} \qquad \textbf{(4.32)}$$

$$\mathrm{Re} = 59050.5\,\dot{z} = B\,\dot{z} \qquad \textbf{(4.33)}$$

$$h = h_s + a\,B^b\,|\dot{z}|^b \qquad \textbf{(4.34)}$$

Şekil 4.3'de L_g ısıtıcıya kadar olan mesafeyi göstermektedir. Kolon su seviyesi eğer bu değerden büyükse su ısıtıcı kısım ile temas etmektedir. Buna göre buharlaşma için birim zamanda çekilen ısı ;

$$\dot{Q}_g = \pi\, d_h\, l_h\, (\overline{T}_h - T_d)\, (h_s + a\, B^b\, |\dot{z}|^b) \qquad \textbf{(4.35)}$$

$$\dot{Q}_g = \pi\, d_h\, (z_1 - L_g)\, (\overline{T}_h - T_d)\, (h_s + a\, B^b\, |\dot{z}_1|^b) \qquad \textbf{(4.36)}$$

$$h_{fg}\, \rho_f\, A_1\, (v_{L1} - \dot{z}_1) = \pi\, d_h\, (z_1 - L_g)\, (\overline{T}_h - T_d)\, (h_s + a\, B^b\, |\dot{z}_1|^b) \qquad \textbf{(4.37)}$$

Isıtıcıdan çekilen toplam ısı ise ;

$$Q_{imx} = \pi\, d_h\, L_h\, h_s\, (\overline{T}_h - T_d) \qquad \textbf{(4.38)}$$

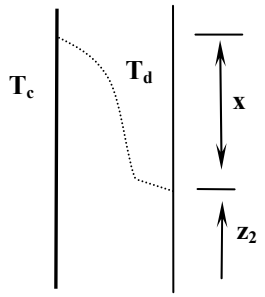
Buna göre birim zamanda buharlaşmaya giden ısı ;

$$\dot{Q}_b = \dot{Q}_{imx}\, \frac{z_1 - L_g}{L_h}\, (1 + \frac{a\, B^b\, |\dot{z}_1|^b}{h_s}) \qquad z_1 \geq L_g \qquad \textbf{(4.39)}$$

$$\dot{Q}_b = 0 \qquad z_1 \leq L_g \qquad \textbf{(4.40)}$$

e) Yoğuşma ile Birim Zamanda Atılan Isı:

Soğutucu eleman üzerinde oluşan yoğuşmanın film yoğuşması şeklinde olduğu, sıvı tarafından akışın laminar olduğu ve sıvı özelliklerinin değişmediği, buhar kısmı için sıcaklığının doyma sıcaklığına eşit ve sabit olduğu kabul edilmiştir [10].



Şekil 4.4: Düşey Yüzey Üzerinde Film Yoğuşması

$$\overline{h}_c = 0.943 \left[\frac{g\ \rho_l\ (\rho_l - \rho_v)\ k^3{}_l\ h_{fg}{}'}{\mu_l\ (T_d - \overline{T}_c)\ x} \right]^{1/4} \quad \textbf{(4.41)}$$

Bu denklemde düzeltilmiş gizli ısı kullanılmıştır.

$$h_{fg}{}' = h_{fg} + 0.68\, c_{p,l}\ (T_d - \overline{T}_c) \quad \textbf{(4.42)}$$

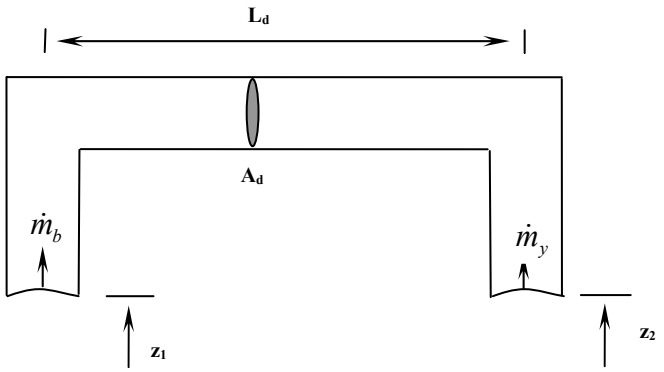
Denklem (4.41)'de düz levha için verilen ifadenin 1/8" den daha büyük çaplı silindirik yüzeyler için kullanılabileceği belirtilmiştir [11].

$$\dot{m}_y = \frac{1}{h_{fg}}\, \overline{h}_x\ \pi\ d_c\ x\ (T_d - \overline{T}_c) \quad \textbf{(4.43)}$$

$$\dot{m}_y = 0.943\, \frac{\pi\ d_c\ (T_d - \overline{T}_h)^{3/4}}{(h_{fg}{}')^{3/4}} \left[\frac{g\ \rho_l\ (\rho_l - \rho_v)\ k_l^{\,3}}{\mu_l} \right] (L_c - z_2)^{3/4} \quad \textbf{(4.44)}$$

$$\dot{Q}_ç = -\dot{m}_y\ h_{fg} \quad \textbf{(4.45)}$$

f) Buhar Kısmı için Korunum Denklemleri



Şekil 4.5: Buhar Kısmı Kontrol Hacmi

Toplam buhar hacmi ;

$$V_b = A_1\ (L_c - z_1) + A_2\ (L_c - z_2) + A_b\ L_d \quad \textbf{(4.46)}$$

Buhar Kısmı için Kütlenin Korunumu;

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_b} \rho_b\ dV + \sum_{çıkan} \dot{m} - \sum_{giren} \dot{m} = 0 \quad \textbf{(4.47)}$$

Buhar yoğunluğunun sadece zamanla değiştiği kabul edilmiştir.

$$\frac{d}{dt}(\rho_b\, V_b) - \dot{m}_b - \dot{m}_y = 0 \qquad \textbf{(4.48)}$$

$$V_b\, \dot{\rho}_b = \rho_b\, (A_1\, v_{L1} + A_2\, v_{L2}) + (1 - \frac{\rho_b}{\rho_f})\, \frac{\dot{Q}_g - \dot{Q}_ç}{h_{fg}} \qquad \textbf{(4.49)}$$

Buhar Hacmi için Enerjinin Korunumu;

Buhar kısmında sıcaklığın ve basıncın sadece zamanın fonksiyonu olduğu kabul edilmiştir. Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ile viskoz disipasyon ihmal edilmiştir. Buhar kısmı tamamen adyabatiktir.

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{V_b} \rho\, u\, dV + \sum_{çıkan} \dot{m}\, h - \sum_{giren} \dot{m}\, h = -(-P_{L1}\, A_1\, \dot{z}_1 - P_{L2}\, A_2\, \dot{z}_2) \qquad \textbf{(4.50)}$$

$$\frac{d}{dt}(\rho\, V_b\, u) + \dot{m}_b\, h_b - \dot{m}_y\, h_b = P_{L1}\, A_1\, \dot{z}_1 + P_{L2}\, A_2\, \dot{z}_2 \qquad \textbf{(4.51)}$$

$$h_b = u_b + \frac{P_b}{\rho_b} \qquad \textbf{(4.52)}$$

Yukarıda gerekli sadeleştirmeler yapıldığında;

$$\rho_b\, \dot{h}_b = \dot{P}_b \qquad \textbf{(4.53)}$$

Bu kısımda buhar mükemmel gaz olarak kabul edilmemiştir. Doymuş su-buhar tablosunda 80°C – 120°C arasında alınan iç enerji ve basınç verilerine eğri uydurularak sıcaklığa bağlı olarak değişen fonksiyonlar elde edilmiştir. Buna göre;

İç enerji;

$$u_b(T) = 2070.8 + 1.1667\, T \qquad \textbf{(4.54)}$$

Doyma basıncı-doyma sıcaklığı;

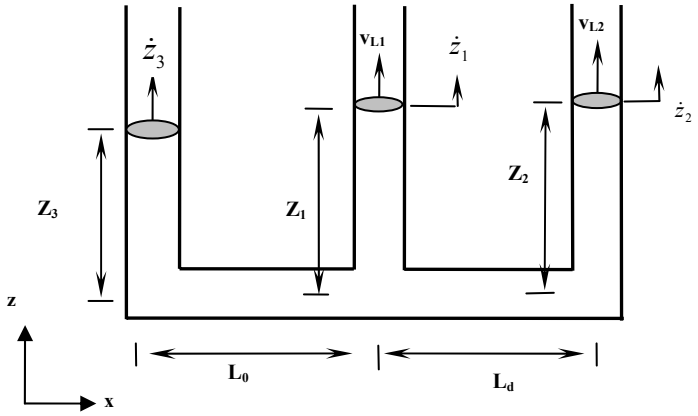
$$\ln P = 17.946 - \frac{4974}{T} \qquad \textbf{(4.55)}$$

Denklem 4.54 ve 4.55 de sıcaklık birimi Kelvin olmalıdır.

Sadeleştirdiğimiz enerji denklemine bu fonksiyonlar yerleştirildiğinde,

$$\dot{T} = e^{(A-\frac{B}{T})}\left[\frac{1}{c_{v0}\,V_b\,\rho_b}(A_1\,v_{L1}+A_2\,v_{L2})+(1-\frac{\rho_b}{\rho_f})\frac{\dot{Q}_{giren}-\dot{Q}_{çıkan}}{c_{v0}\,V_b\,h_{fg}\,\rho_b{}^2}\right] \qquad \textbf{(4.56)}$$

g) Kesişim Noktası için Korunum Denklemleri

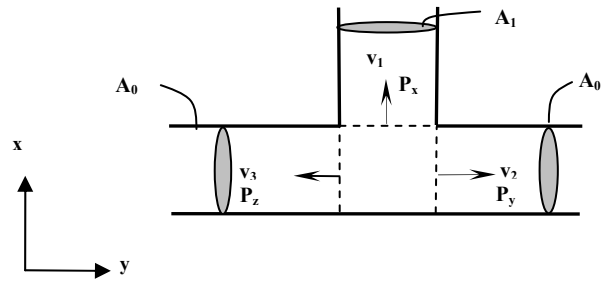


Şekil 4.6: Sistemde Bulunan Sıvı Faz için Kontrol Hacmi

$$\dot{m}_1+\dot{m}_2+\dot{m}_3=0 \qquad \textbf{(4.57)}$$

$$\rho_f\,A_1\,v_{L1}+\rho_f\,A_2\,v_{L2}+\rho_f\,A_3\,\dot{z}_3=0 \qquad \textbf{(4.58)}$$

$$A_1\,v_{L1}+A_2\,v_{L2}+A_3\,\dot{z}_3=0 \qquad \textbf{(4.59)}$$



Şekil 4.7: Te Bağlantı Noktası için Oluşturulan Kontrol Hacmi

Yukarıda gösterilen şekilde y doğrultusunda momentum denklemi yazıldığın da ;

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V \rho_f\,v\,dV+\rho_f\,A_1\,v_1\,(0)+\rho_f\,A_0\,v_2\,v_2+\rho_f\,A_0\,v_3\,(-v_3)=(P_z-P_y)\,A_0 \qquad \textbf{(4.60)}$$

$$P_z - P_y = \frac{\rho_f}{2}(v_2{}^2 - v_3{}^2) \tag{4.61}$$

Kesişim noktası için enerjinin korunumu yazıldığında ;

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V \rho_f \frac{v^2}{2} dV + \rho_f A_1 v_1 \left(\frac{P_x}{\rho_f} + \frac{v_1{}^2}{2}\right) + \rho_f A_0 v_2 \left(\frac{P_y}{\rho_f} + \frac{v_2{}^2}{2}\right)$$

$$+\rho_f A_0 v_3 \left(\frac{P_z}{\rho_f} + \frac{v_3{}^2}{2}\right) = -\dot{W}_{f0} \tag{4.62}$$

$$A_1 v_1 \left(\frac{P_x}{\rho_f} + \frac{v_1{}^2}{2}\right) + A_0 v_2 \left(\frac{P_y}{\rho_f} + \frac{v_2{}^2}{2}\right) + A_0 v_3 \left(\frac{P_z}{\rho_f} + \frac{v_3{}^2}{2}\right) = -\frac{\dot{W}_{f0}}{\rho_f} \tag{4.63}$$

Kesişim noktasında sürtünme kuvvetinin yapmış olduğu iş $\dot{W}_{f0}$ ile gösterilmiştir.

$$\dot{W}_{f0} = A_1 v_{L1} \rho_f \frac{1}{2} K_{L0} |v_{L1}| v_{L1} \tag{4.64}$$

4.2. Matematik Model Sonuçları

Oluşturulan model ve yapılan kabuller sonucu aşağıdaki denklemler elde edilmiştir. Modelde 6 bilinmeyen mevcuttur. Bunlar $z_1, z_2, v_{L1}, v_{L2}, T, \rho_b$ olarak belirlenmiştir.

$$\dot{v}_{L1} A_k = g\left[\frac{A_2}{A_3}\left(L_0 \frac{A_3}{A_0} + z_3\right)(z_2 - z_1) + \left(L_d \frac{A_2}{A_0} + z_2\right)(z_3 - z_1)\right]$$

$$+\frac{A_2}{2A_3}\left(L_0 \frac{A_3}{A_0} + z_3\right)(v_{L2}{}^2 - v_{L1}{}^2) + \frac{1}{2}\left(L_d \frac{A_2}{A_0} + z_2\right)(\dot{z}_3{}^2 - v_{L1}{}^2)$$

$$+\frac{A_2{}^2}{2A_0{}^2}\left[\left(L_d \frac{A_2}{A_0} + z_2\right) v_{L2} - \left(L_0 \frac{A_3}{A_0} + z_3\right) \dot{z}_3\right]\left(\frac{A_3}{A_0} \dot{z}_3 - v_{L2}\right)$$

$$+\frac{A_2}{A_0}\left(L_0 \frac{A_3}{A_0} + z_3\right)\left(\frac{P_{L2} - P_{L1}}{\rho_f}\right) + \left(L_d \frac{A_2}{A_0} + z_2\right)\left(\frac{P_0 - P_{L1}}{\rho_f}\right)$$

$$+\frac{A_2}{A_3}\left(L_0\,\frac{A_3}{A_0}+z_3\right)\left(\frac{F_2}{\rho_f\;A_2}-\frac{F_1}{\rho_f\;A_1}\right)+\left(L_d\,\frac{A_2}{A_0}+z_2\right)\left(\frac{F_3}{\rho_f\;A_3}-\frac{F_1}{\rho_f\;A_1}\right)$$

$$-\frac{a}{A_1\;v_{L1}}\,\frac{\dot{W}_{f0}}{\rho_f} \tag{4.65}$$

$$A_k=\frac{A_1}{A_3}\left(L_0\,\frac{A_3}{A_0}+z_3\right)\left(L_d\,\frac{A_2}{A_0}+z_2\right)+z_1\left[\left(L_d\,\frac{A_2}{A_0}+z_2\right)+\frac{A_2}{A_3}\left(L_0\,\frac{A_3}{A_0}+z_3\right)\right] \tag{4.66}$$

$$a=\frac{A_2}{A_3}\left(L_0\,\frac{A_3}{A_0}+z_3\right)+\left(L_d\,\frac{A_2}{A_0}+z_2\right) \tag{4.67}$$

$$\dot{v}_{L2}\;A_k=g\left[z_1\;(z_3-z_2)+\frac{A_1}{A_3}(L_0\,\frac{A_3}{A_0}+z_0)\;(z_1-z_2)\right]$$

$$+\frac{1}{2}\,z_1\;(\dot{z}_3{}^2-v_{L2}{}^2)+\frac{A_1}{2\;A_3}\,(L_0\,\frac{A_3}{A_0}+z_3)\;(v_{L1}{}^2-v_{L2}{}^2)$$

$$+\frac{A_1\;A_2}{2A_0{}^2}\left[z_1\;v_{L1}-(L_0\,\frac{A_3}{A_0}+z_3)\;\dot{z}_3\right]\left(\frac{A_3}{A_0}\,\dot{z}_3-v_{L2}\right)+z_1\left(\frac{P_0-P_{L1}}{\rho_f}\right)$$

$$-\frac{A_1}{A_3}\left(L_0\,\frac{A_3}{A_0}+z_3\right)\left(\frac{P_{L2}-P_{L1}}{\rho_f}\right)+z_1\left(\frac{F_3}{\rho_f\;A_3}-\frac{F_1}{\rho_f\;A_1}\right)$$

$$+\frac{A_1}{A_3}\left(L_0\,\frac{A_3}{A_0}+z_3\right)\left(\frac{F_1}{\rho_f\;A_1}-\frac{F_2}{\rho_f\;A_2}\right)+\frac{A_1}{A_3}\left(L_0\,\frac{A_2}{A_0}+z_3\right)\frac{\dot{W}_{f0}}{A_1\;v_{L1}\;\rho_f} \tag{4.68}$$

$$\dot{z}_1=v_{L1}-\frac{\dot{Q}_g}{A_1\;\rho_f\;h_{fg}} \tag{4.69}$$

$$\dot{z}_2=v_{L2}+\frac{\dot{Q}_ç}{A_2\;\rho_f\;h_{fg}} \tag{4.70}$$

$$\dot{T}=e^{(A-\frac{B}{T})}\left[\frac{1}{c_{v0}\;V_b\;\rho_b}\,(A_1\;v_{L1}+A_2\;v_{L2})+(1-\frac{\rho_b}{\rho_f})\,\frac{\dot{Q}_g-\dot{Q}_ç}{c_{v0}\;V_b\;h_{fg}\;\rho_b{}^2}\right] \tag{4.71}$$

$$V_b\ \dot{\rho}_b = \rho_b\ (A_1\ v_{L1} + A_2\ v_{L2}) + (1 - \frac{\rho_b}{\rho_f})\ \frac{\dot{Q}_g - \dot{Q}_ç}{h_{fg}} \quad \textbf{(4.72)}$$

Matematik model sonucu elde edilen ve Denklem (4.65), (4.68-4.72)'de gösterilen 6 bilinmeyen Kutta-Simpsons 3/8 methodu kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür.

Kutta-Simpson 3/8 Metodu;

$$\dot{v}_{L1} = f_1(z_1, z_2, v_{L1}, v_{L2}, T, \rho_b, t) \quad \textbf{(4.73)}$$

$$\dot{v}_{L2} = f_2(z_1, z_2, v_{L1}, v_{L2}, T, \rho_b, t) \quad \textbf{(4.74)}$$

$$\dot{z}_1 = f_2(z_1, z_2, v_{L1}, v_{L2}, T, \rho_b, t) \quad \textbf{(4.75)}$$

$$\dot{z}_2 = f_2(z_1, z_2, v_{L1}, v_{L2}, T, \rho_b, t) \quad \textbf{(4.76)}$$

$$\dot{T} = f_2(z_1, z_2, v_{L1}, v_{L2}, T, \rho_b, t) \quad \textbf{(4.77)}$$

$$\dot{\rho}_b = f_2(z_1, z_2, v_{L1}, v_{L2}, T, \rho_b, t) \quad \textbf{(4.78)}$$

Yukarıda belirtilen diferansiyel denklem takımında $v_{L1}, v_{L2}, z_1, z_2, T, \rho_b$ bağımlı değişkenler, t ise bağımsız değişkendir. Herbir zaman adımı, h, için Denklem (4.79-82)'de belirtilen adımlar uygulanır.

$$k_1 = f(x_i, y_i)\ h \quad \textbf{(4.79)}$$

$$k_2 = f(x_i + \frac{h}{3}, y_i + \frac{k_1}{3})\ h \quad \textbf{(4.80)}$$

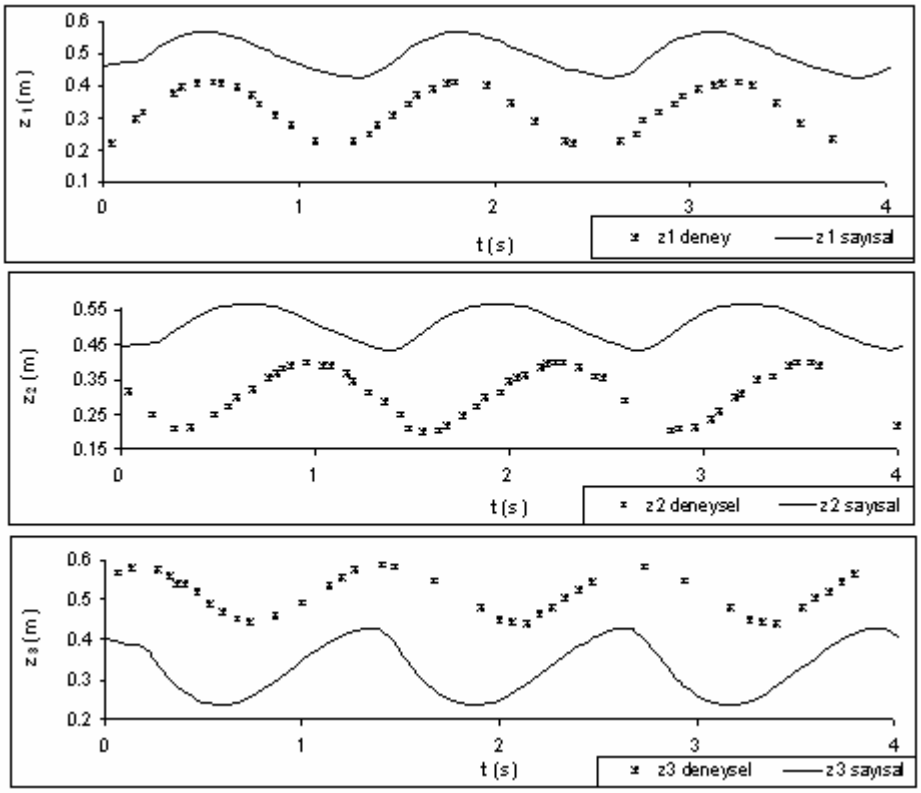
$$k_3 = f(x_i + \frac{2\,h}{3}, y_i + k_2 - \frac{k_1}{3})\ h \quad \textbf{(4.81)}$$

$$k_4 = f(x_i + h, y_i + k_3 - k_2 - k_1)\ h \quad \textbf{(4.82)}$$

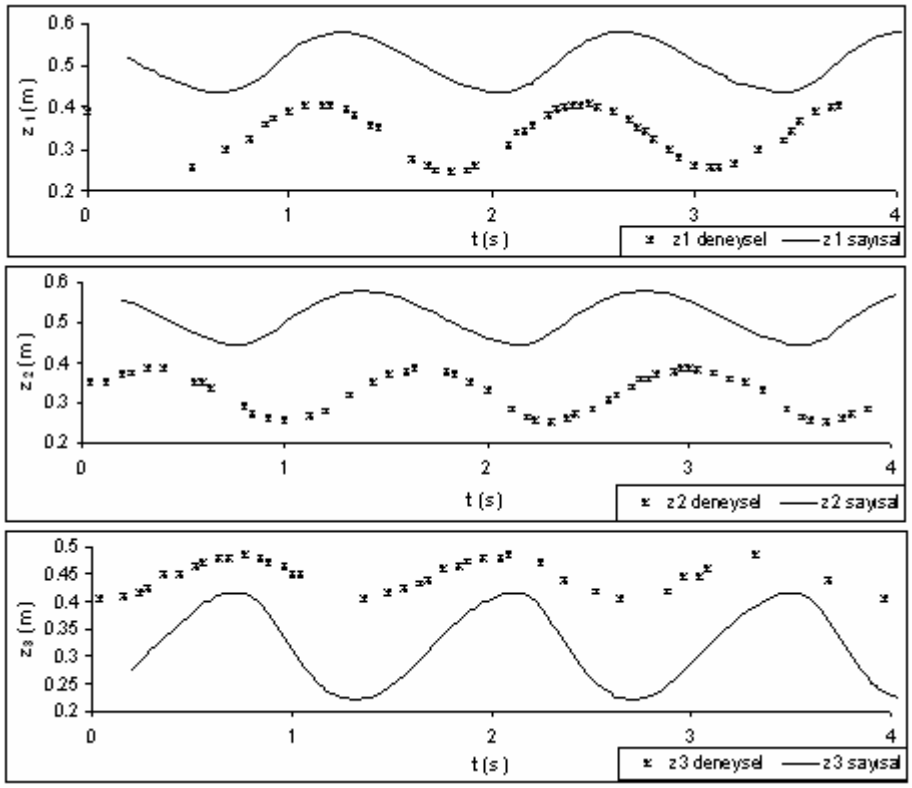
Sonuç olarak bir sonraki zaman diliminde bağımlı değişkenlerin alacağı değer Denklem (4.83) kullanılarak hesaplanır.

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{8}\left(k_1 + 3\,k_2 + 3\,k_3 + k_4\right) \qquad \textbf{(4.83)}$$

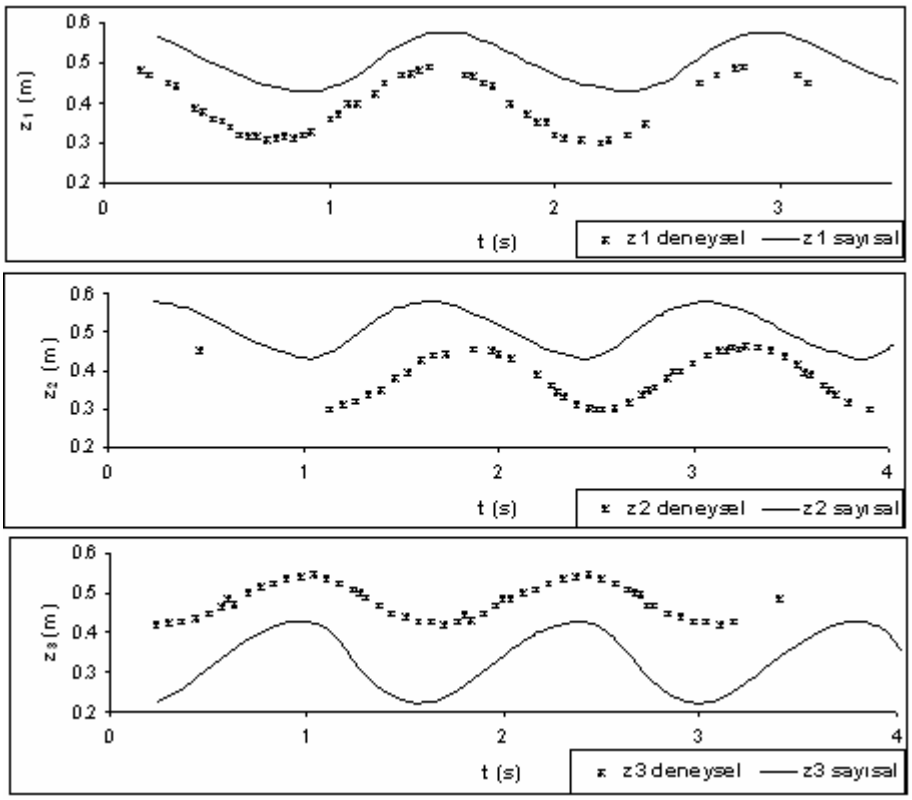
Buna göre elde edilen sonuçlar Şekil 4.8-4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.8: 1 nolu Deney için elde edilen sayısal çözüm verileri



Şekil 4.9: 2 nolu Deney için elde edilen sayısal çözüm verileri



Şekil 4.10: 3 nolu Deney için elde edilen sayısal çözüm verileri

Şekil 4.8 - 4.10'da görüldüğü gibi sayısal çözüm ile elde edilen sonuçlar deney sonuçlarıyla kısmen uyuşmaktadır. Salınım frekansı ve genliği birbirine yakın olmasına karşın salınım eksenleri farklı çıkmaktadır.

Matematiksel model oluşturulurken ısıtıcı kolonda meydana gelen ısı geçişi için yapılan kabullerin çok karmaşık olan olayın fiziğini tam yansıtmadığı düşünülmektedir. Ayrıca salınımlı hareket için yerel ve sürekli kayıplar literatürde net olarak ifade edilemediğinden, bu kayıplar laminer ve tam gelişmiş akış hali için hesaplanmıştır. Sayısal analiz sonucu salınım eksenlerinin deneysel verilere göre farklı çıkmasının sebebi olarak bu eksiklikler düşünülmektedir.

Bu konu üzerinde daha önce yapılan çalışmada [12] buharlaşma ve yoğuşma için birim zamanda gerekli olan ısı Denklem (4.84) ve (4.85) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_g = \rho_f \, A \, h_{fg} \left[1 - K \, w \sin(wt - \varphi_1)\right] \qquad \textbf{(4.84)}$$

$$\dot{Q}_ç = \rho_f \, A \, h_{fg} \left[1 - K \, w \sin(wt - \varphi_2)\right] \qquad \textbf{(4.85)}$$

Bu denklemlerde kullanılan K herhangi bir sabit olup deneysel verilerin incelenmesi sonucu elde edilen açısal hız ve faz farkı kullanılmaktadır. Buharlaşma ve yoğuşmanın olduğu arayüzey için bu denklemler kullanıldığında deney sonuçları ile sayısal sonuçlar örtüşmektedir. Fakat bu kabulde salınımın frekansı bilinerek hareket edilmiştir. Oluşturulan yeni model ile başlangıç şartları dışında herhangi bir deney sonucu girilmeksizin sayısal çözümleme sonucu elde edilen verilerde salınım frekansının ve faz farkının deneysel verilere çok yakın olduğu sadece salınım ekseninin farklı olduğu tespit edilmiştir.

5. DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışması ile mevcut ısı borularından farklı bir yapıya sahip olan "Üç Kolonlu Titreşimli Isı Borusu" deneysel olarak incelenmiş ve matematiksel modeli oluşturulmuştur. Deneysel çalışma kapsamında sistem genelinde sıcaklık dağılımları ısıtıcı gücü sabit tutularak değişen soğutucu sıcaklıklarına ve soğutucu sıcaklığı sabit tutularak değişen ısıtıcı gücüne göre sınıflandırılmış, kolon seviye değişimine bağlı olarak sistemde oluşan buhar basıncının hacimle değişimi tespit edilmiştir.

Hidrodinamik ve ısı tekniği açısından son derece karmaşık problemler içeren sistemin ısıl performansını incelemek için ortalama ısı geçiş katsayısı tariflenmiştir. Elde edilen veriler ısıtıcı gücüne göre sınıflandırılmış ve ısı geçişinde başka unsurların da etkin olduğu anlaşılmıştır. Boyut analizi yapılarak ısı geçişinde etkili olan parametreler incelenmiştir. Sonuç olarak sistem için geçerli olan bir Nusselt korelasyonu elde edilmiştir.

"Üç Kolonlu Titreşimli Isı Borusu" için matematiksel model oluşturulurken kontrol hacim formulasyonu kullanılmıştır. Sistem 3 ayrı kontrol hacmine bölünmüştür. Sonuç olarak elde edilen difransiyel denklem takımı Kutta-Simpsons 3/8 metodu kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Deneysel veriler ile sayısal veriler karşılaştırıldığında kolonlarda salınım yapan suyun salınım frekansı ve kolonlar arası faz farkı birbirine yakın çıkmıştır.

KAYNAKLAR

[1] Çıkın, A., 1988, Isı Boruları, , *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[2] Silverstein, Calvin C.,1992, Design and Technology of Heat Pipes For Cooling and Heat Exchange

[3] Sakulchangsatjatai,P.,2004, Operation Modeling of Closed-End and Closed-Loop Oscillating Heat Pipes at Normal Operating Condition, Applied Thermal Engineering , 24, 995–1008

[4] Murer, S., 2005, Experimental and Numerical Analysis of the Transient Response of a Miniature Heat Pipe, Applied Thermal Engineering, 25, 2566-2577

[5]Vasiliev, Leonard L., 2005, Heat Pipe in Modern Heat Exchangers,Applied Thermal Engineering, 25, 1-19

[6] Maydanik, Yu. F., 2005, Loop Heat Pipes, Applied Thermal Engineering, 25, 635-657

[7] Boukhanouf, R., Haddad A., 2006, Experimental Investigation of a Flat Plate Heat Pipe Performance Using IR Thermal Imaging Camera, Applied Thermal Engineering, 26, 2148–2156

[8] Cai, F., 2005, Manufacturing and Investigation of Copper Heat Pipes, Master of Applied Science Thesis, Carleton University, Ottawa, Canada

[9] Arslantürk, C., 1997, Fluidyne Isı Makinasının Analizi, *Doktara Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[10] DeWitt D. P., Incropera F. P., 2004, Isı ve kütle geçişinin temelleri, s. 556-560 Literatür Yayıncılık,İstanbul

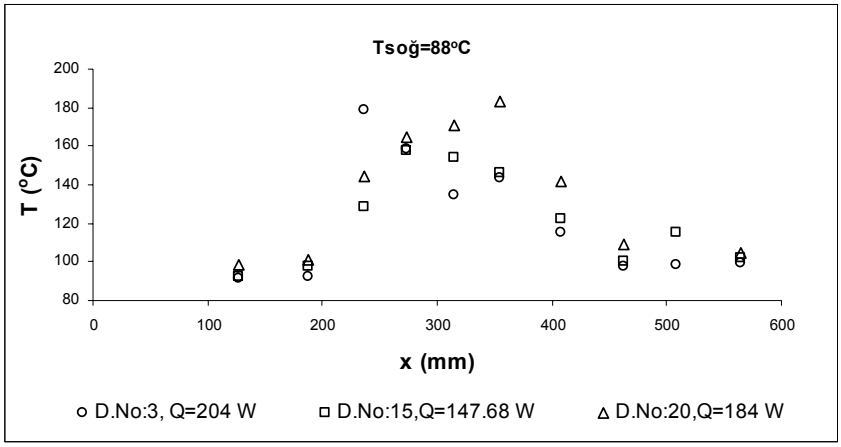
[11] Rohsenow, W.M., 1973, Condensation, Handbook of Heat Transfer, s. 12.1-12.33, Mc Graw Hill Book Company, New York

[12] Özdemir, M., Özgüç, F., 2003, A Simple Mathematical Model to Analyse a Fluidyne Heat Machine, Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 217 Part A, J. Power and Energy

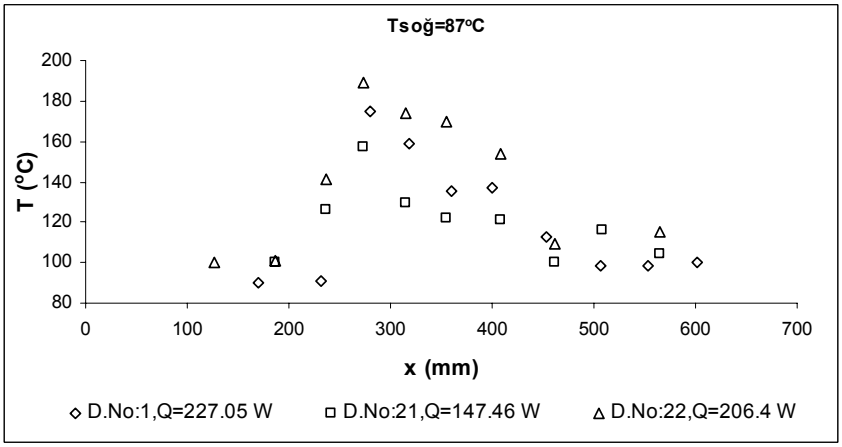
[13] Özdemir, M., 2007, An Experimental Study on an Oscillating Loop Heat Pipe Consisting of Three Interconnected Columns, Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 43 s.527-534, J. Power and Energy

EKLER

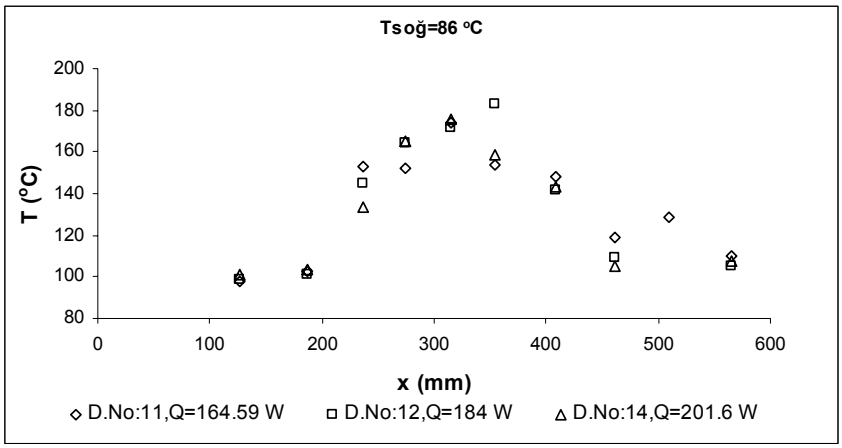
EK A. Sabit Soğutucu Sıcaklığına Göre Isıtıcı Eleman Üzerinde Sıcaklık Dağılımı



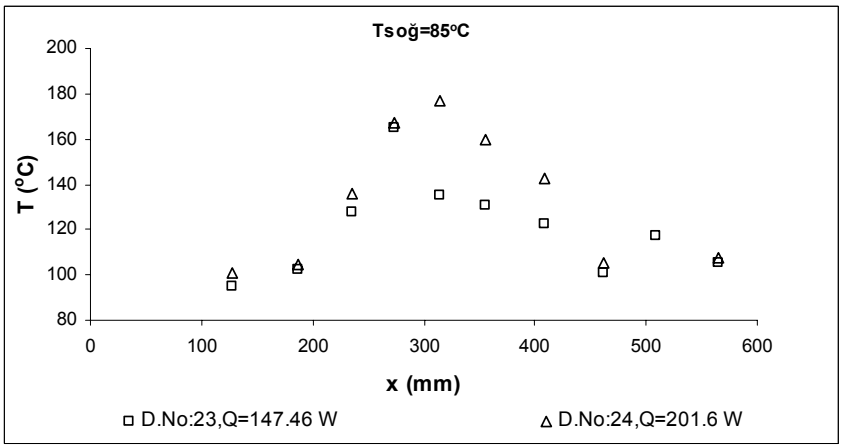
Şekil A.1: 88 °C Soğutucu Sıcaklığına Göre Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı



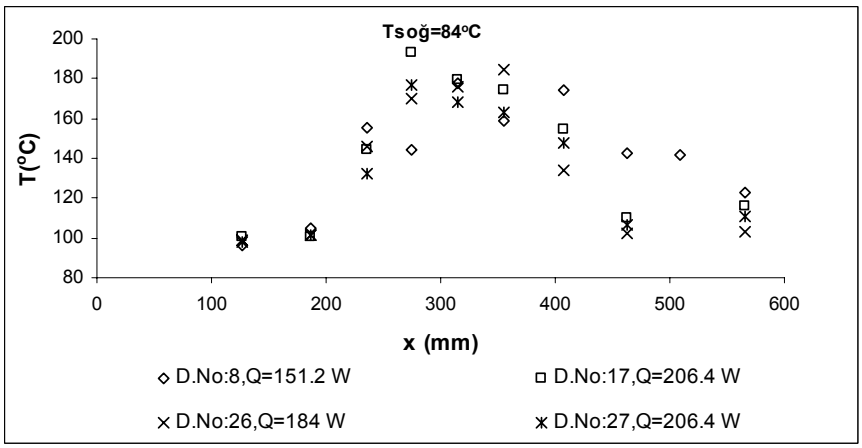
Şekil A.2: 87 °C Soğutucu Sıcaklığına Göre Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı



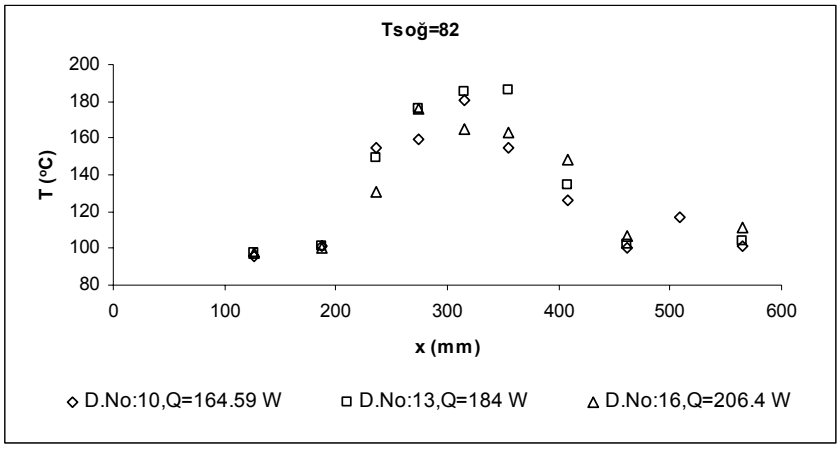
Şekil A.3: 86 °C Soğutucu Sıcaklığına Göre Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı



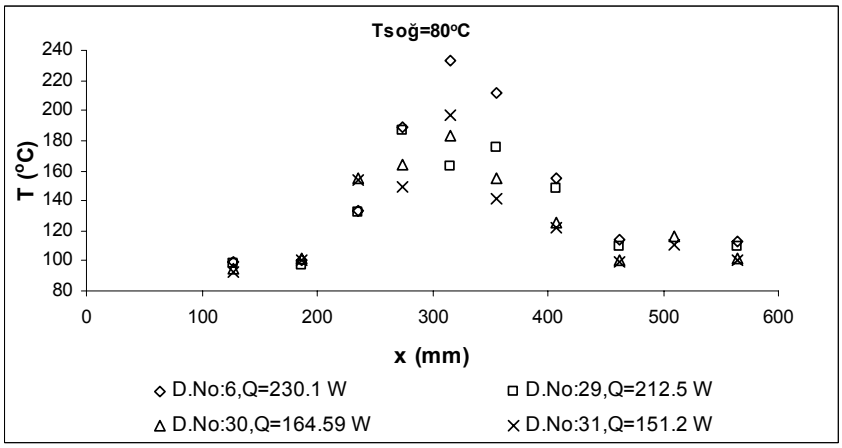
Şekil A.4: 85 °C Soğutucu Sıcaklığına Göre Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı



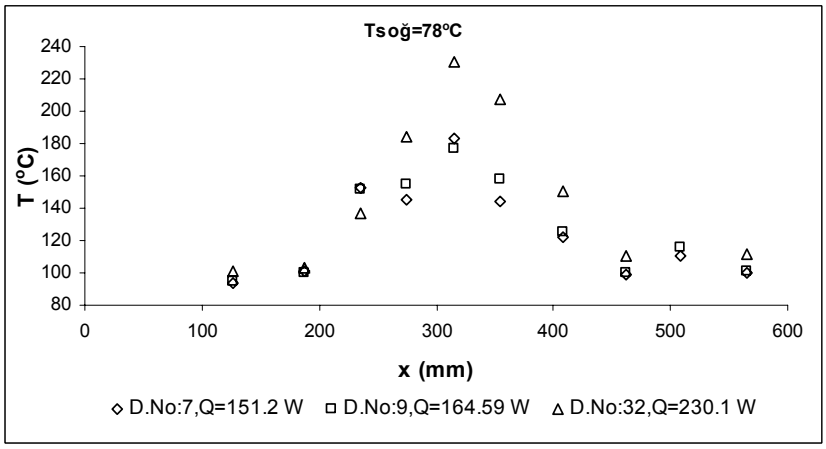
Şekil A.5: 84 °C Soğutucu Sıcaklığına Göre Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı



Şekil A.6: 82 °C Soğutucu Sıcaklığına Göre Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı

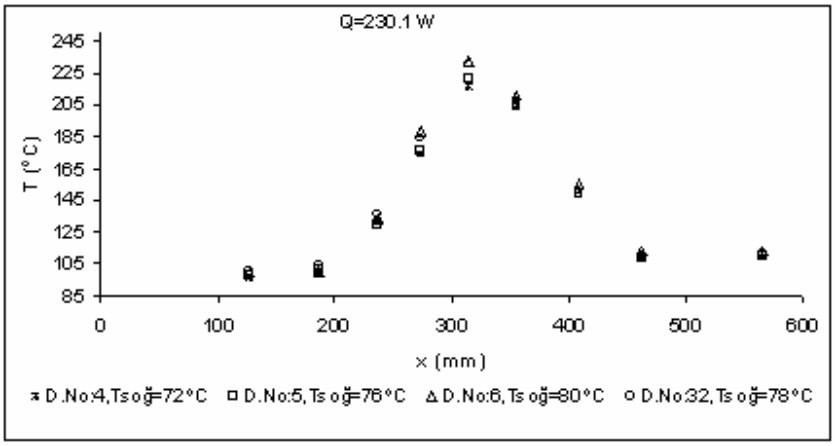


Şekil A.7: 80 °C Soğutucu Sıcaklığına Göre Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı

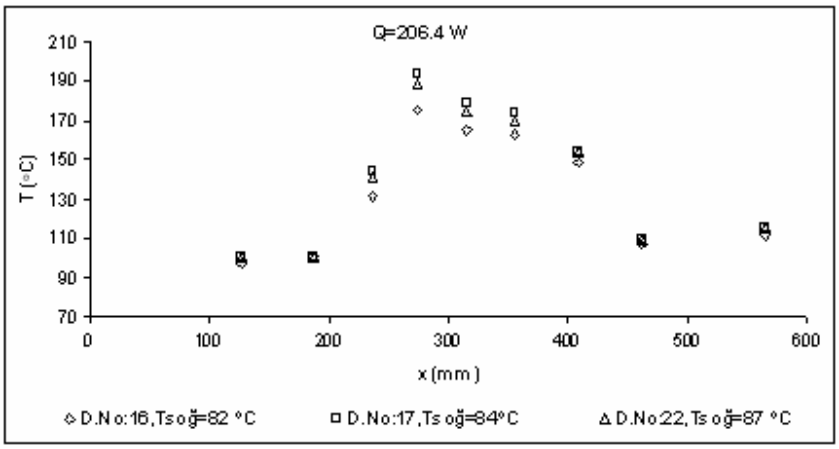


Şekil A.8: 78 °C Soğutucu Sıcaklığına Göre Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı

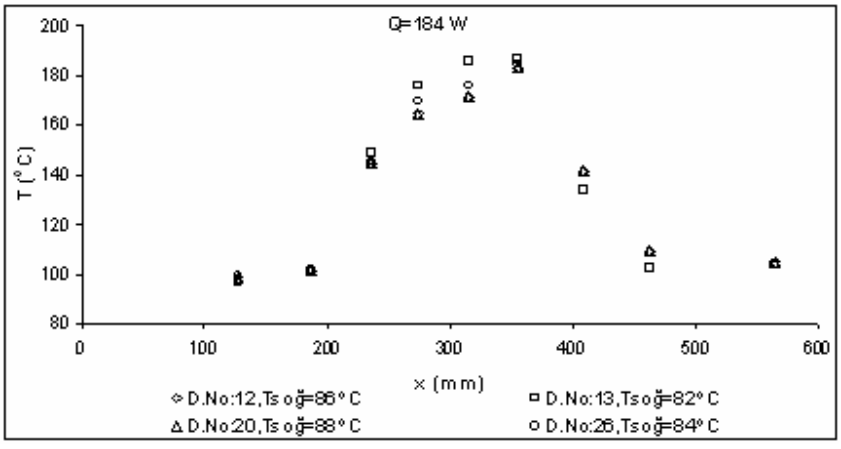
EK B. Sabit Isı Yüküne Göre Isıtıcı Eleman Üzerinde Sıcaklık Dağılımı



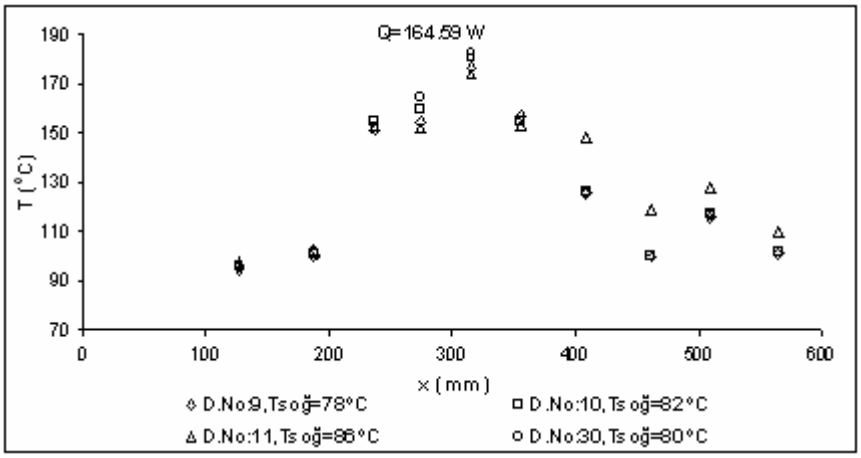
Şekil B.1: 230.1 W Isı Gücünde Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı



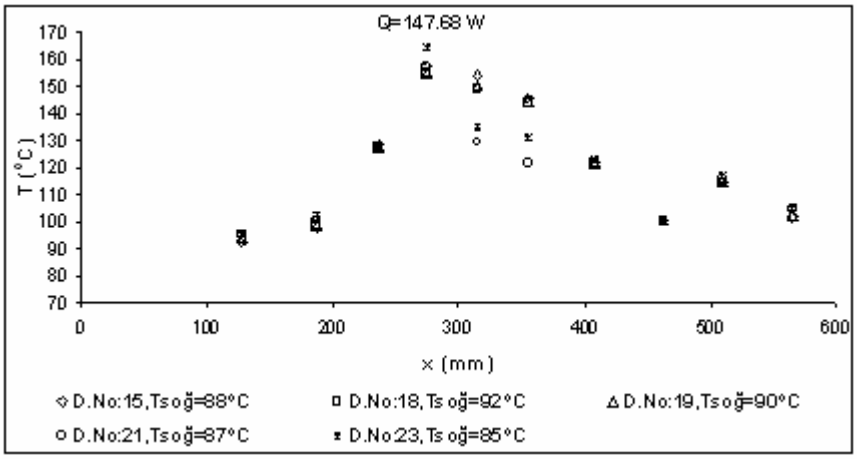
Şekil B.2: 206.4 W Isı Gücünde Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı



Şekil B.3: 184 W Isı Gücünde Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı

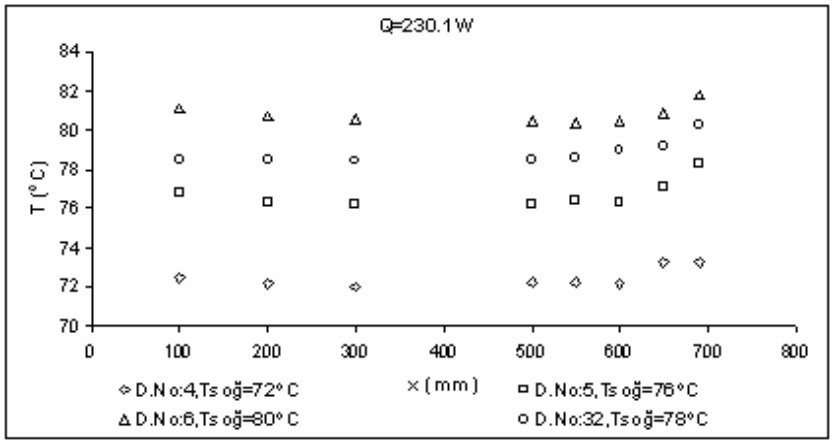


Şekil B.4: 164.59 W Isı Gücünde Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı

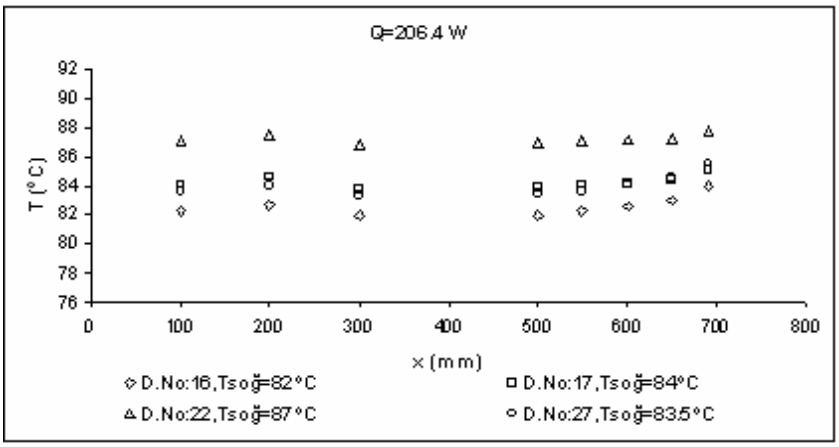


Şekil B.5: 147.68 W Isı Gücünde Isıtıcı Yüzey Sıcaklık Dağılımı

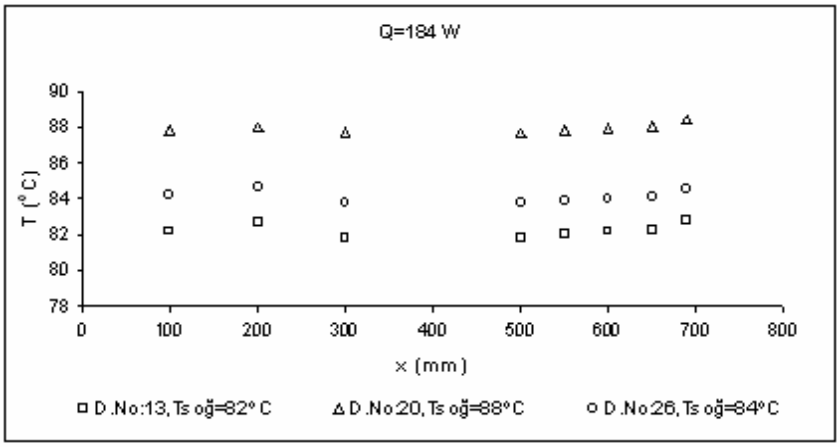
EK C. Sabit Isıtıcı Gücüne Göre Soğutucu Eleman Üzerinde Sıcaklık Dağılımı



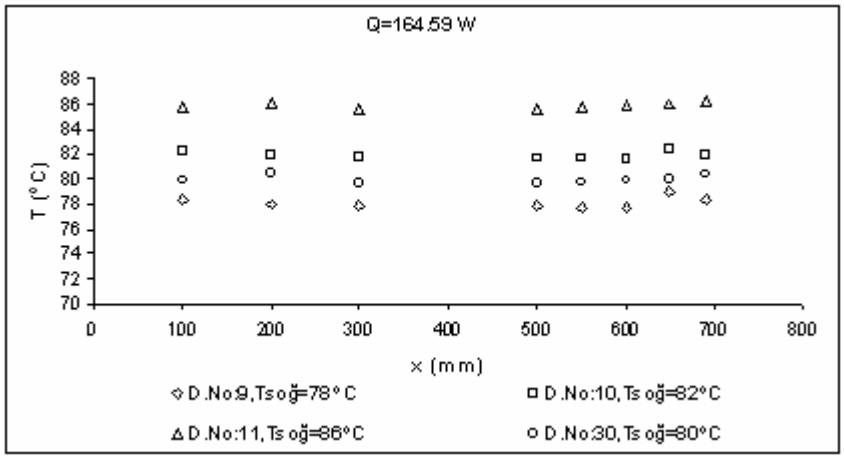
Şekil C.1: 230.1 W Isıtıcı Gücünde Soğutucu Eleman Üzerinde Sıcaklık Dağılımı



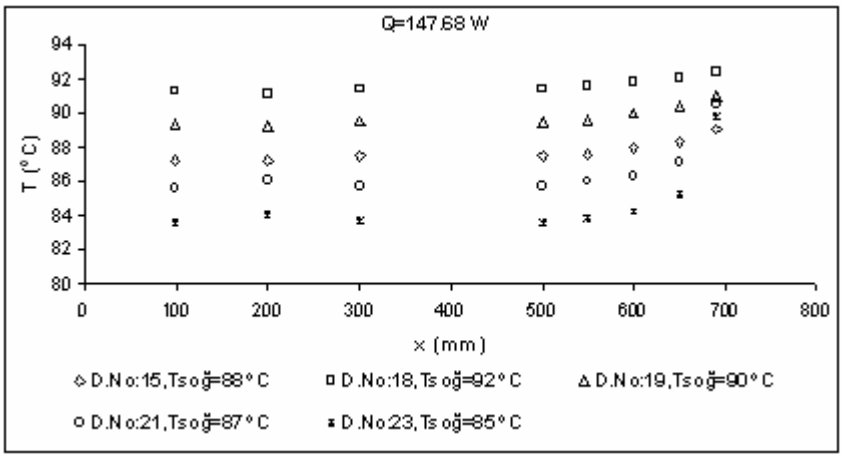
Şekil C.2: 206.4 W Isıtıcı Gücünde Soğutucu Eleman Üzerinde Sıcaklık Dağılımı



Şekil C.3: 184 W Isıtıcı Gücünde Soğutucu Eleman Üzerinde Sıcaklık Dağılımı



Şekil C.4: 164.59 W Isıtıcı Gücünde Soğutucu Eleman Üzerinde Sıcaklık Dağılımı



Şekil C.5: 147.68 W Isıtıcı Gücünde Soğutucu Eleman Üzerinde Sıcaklık Dağılımı

EK D. Alt Yüzey Sıcaklık Dağılımı:

Tablo D.1: Alt Yüzey Sıcaklık Dağılımı

	Konum (mm)				
Deney No:	**0**	**105**	**365**	**517**	**685**
1	86.10	86.45	92.89	92.53	89.18
2	80.17	80.26	85.79	85.76	83.26
3	85.68	85.95	93.40	93.14	90.04
4	80.00	86.53	87.26	81.88	82.09
5	82.24	87.72	88.33	82.80	83.00
6	84.71	89.13	89.70	82.84	82.93
7	81.88	85.79	86.22	80.46	80.67
8	85.45	88.01	87.93	82.29	82.52
9	82.33	86.32	86.80	80.88	81.10
10	84.56	87.90	88.32	81.82	82.02
11	87.03	89.25	89.30	82.85	83.08
12	88.83	90.69	90.81	83.77	84.00
13	85.34	88.71	89.20	82.43	82.55
14	88.64	91.90	92.27	85.44	85.66
15	86.44	86.23	85.91	80.55	80.81
16	83.32	83.00	88.97	88.36	85.15
17	86.98	90.48	91.21	84.15	84.52
18	90.57	90.40	90.13	83.91	84.25
19	88.57	88.43	88.08	82.70	82.99
20	88.83	90.69	90.81	83.77	84.00
21	87.51	90.33	90.80	84.64	83.74
22	88.99	91.93	92.57	85.65	85.99
23	86.11	89.06	89.58	83.26	82.05
24	88.18	91.74	92.21	85.65	85.84
25	86.94	91.55	92.35	85.67	84.71
26	87.05	90.61	91.02	84.65	84.85
27	83.81	83.50	89.50	88.92	86.09
28	86.33	89.83	90.37	83.66	83.86
29	84.98	90.52	91.46	85.66	85.13
30	82.88	86.19	86.62	79.91	80.09
31	82.60	85.51	85.79	79.17	79.26
32	83.59	88.79	89.38	83.56	83.69
33	80.06	86.67	87.41	82.10	81.90

EK E. Prob Sıcaklık Dağılımları:

Tablo E.1: Prob Sıcaklık Dağılımları

	Konum (mm)			
Deney No:	**165**	**320**	**640**	**Buhar**
1	90.65	92.93	86.96	99.98
2	84.33	84.91	80.09	96.88
3	91.44	93.10	86.48	99.89
4	82.17	87.35	82.56	97.00
5	84.14	88.32	83.38	97.93
6	86.38	89.25	83.29	99.05
7	83.53	85.89	81.12	96.82
8	86.63	87.01	82.52	99.41
9	83.90	86.49	81.58	97.45
10	86.01	87.98	82.65	97.91
11	88.08	88.67	83.30	99.35
12	89.71	90.46	84.46	99.56
13	86.57	88.48	82.85	98.92
14	90.28	92.39	86.56	99.36
15	84.17	86.34	80.36	99.55
16	86.52	88.44	83.51	99.31
17	88.59	90.74	85.01	99.45
18	89.14	90.56	84.14	99.82
19	86.63	88.65	82.71	99.71
20	89.71	90.46	84.46	99.56
21	88.87	90.18	85.17	98.78
22	90.57	92.44	86.58	99.53
23	87.34	88.41	83.18	98.76
24	89.54	91.88	86.38	99.13
25	88.68	91.73	86.11	99.43
26	88.51	90.82	85.34	98.74
27	87.33	88.82	84.00	99.34
28	87.82	89.73	84.23	99.43
29	87.16	91.15	86.20	98.28
30	84.33	85.81	80.45	97.96
31	83.84	84.75	79.31	97.26
32	85.53	89.21	84.08	98.51
33	82.59	87.58	83.00	97.93

EK F. Boyutsuz Değişkenlere Ait Değerler

Tablo F.1: Boyutsuz Değişkenlere Ait Değerler

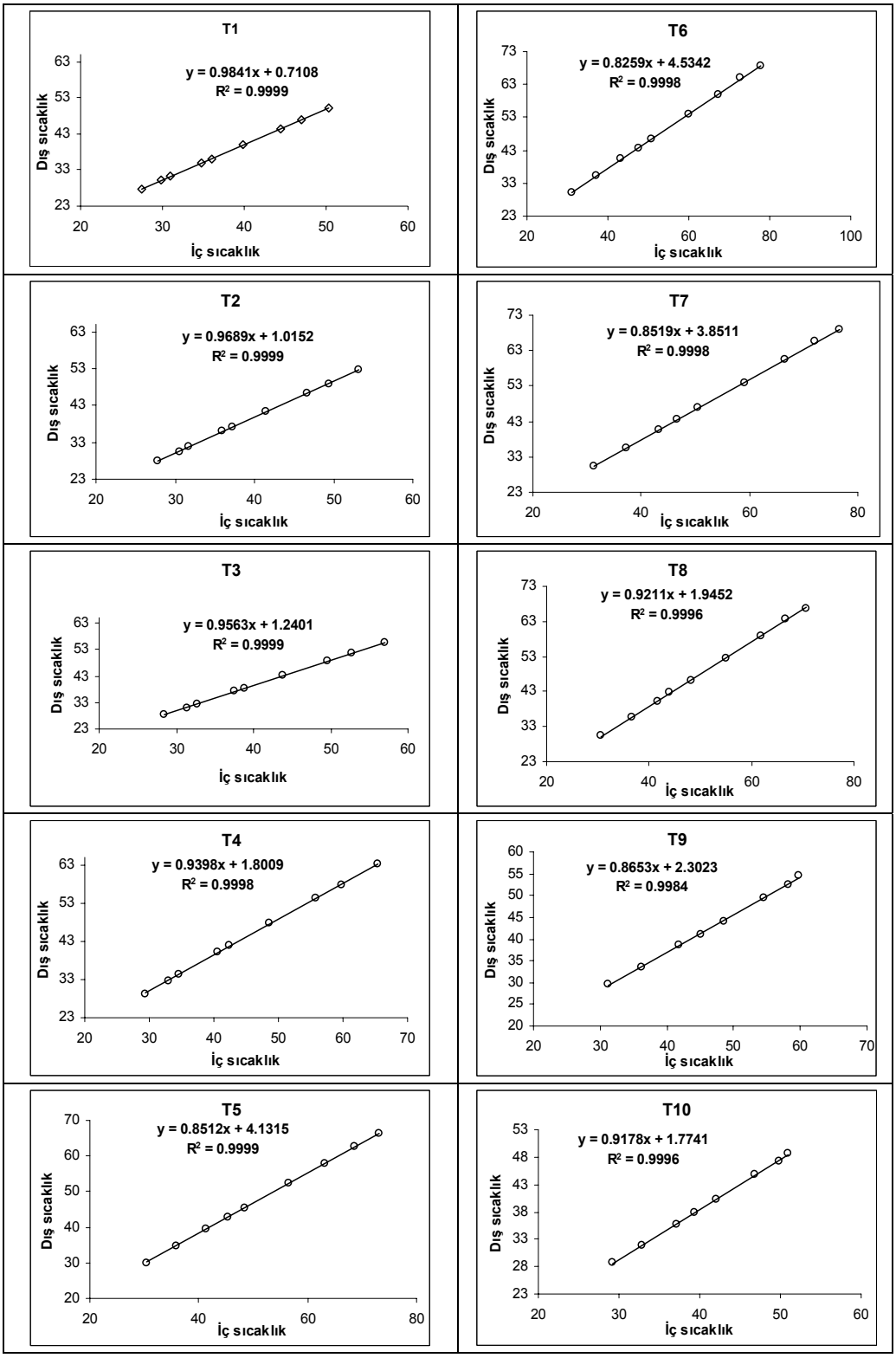
Deney no	Q (W)	T_c (°C)	T_h (^{o}C)	T_c (°C)	U (W/m^{2}C)	w (rad/s)	zo1 (m)	zo2 (m)
1	227.1	87.0	143.7	88.2	508.7	4.87	0.31	0.30
2	130.3	83.0	128.9	82.4	348.6	4.71	0.33	0.32
3	204.2	88.6	146.0	89.1	445.9	4.49	0.39	0.38
4	230.1	72.0	175.8	72.5	277.0	4.76	0.40	0.33
5	230.1	76.0	176.2	76.7	287.7	4.90	0.32	0.30
6	230.1	80.0	184.3	80.8	276.5	5.18	0.31	0.29
7	151.2	78.0	149.2	78.0	264.3	4.60	0.38	0.36
8	151.2	84.0	162.2	83.9	240.3	5.39	0.24	0.23
9	164.6	78.0	153.0	78.1	273.3	4.57	0.41	0.37
10	164.6	82.0	154.9	81.9	280.3	4.62	0.37	0.35
11	164.6	86.0	156.0	85.8	291.9	5.15	0.27	0.26
12	184.0	86.0	161.0	87.9	313.2	4.82	0.34	0.33
13	184.0	82.0	166.2	82.2	272.5	4.52	0.41	0.39
14	201.6	86.0	155.3	86.1	362.4	4.62	0.38	0.36
15	147.7	88.0	141.7	87.8	340.6	4.18	0.46	0.45
16	206.4	82.0	156.7	82.6	346.3	4.35	0.46	0.43
17	206.4	84.0	169.0	84.2	302.9	4.46	0.46	0.38
18	147.7	92.0	139.4	91.6	384.7	4.50	0.41	0.39
19	147.7	90.0	140.1	89.9	366.2	4.35	0.44	0.43
20	184.0	88.0	161.0	87.9	313.2	5.10	0.28	0.27
21	147.5	87.0	131.1	86.7	412.4	4.61	0.33	0.35
22	206.4	87.0	165.6	87.2	327.1	4.80	0.34	0.33
23	147.5	85.0	136.3	84.8	355.8	4.55	0.40	0.39
24	201.6	85.0	156.5	85.3	352.3	4.50	0.40	0.38
25	215.0	84.0	165.1	84.8	332.7	5.41	0.29	0.25
26	184.0	84.0	162.0	84.1	293.6	4.60	0.38	0.36
27	206.4	83.5	157.7	84.0	348.1	4.35	0.46	0.43
28	201.6	83.0	159.3	83.5	330.7	4.39	0.46	0.40
29	212.5	80.0	160.8	81.1	331.7	4.95	0.30	0.31
30	164.6	80.0	156.4	79.9	267.6	4.50	0.39	0.38
31	151.2	80.0	152.6	80.1	259.4	4.60	0.38	0.37
32	230.1	78.0	182.0	78.9	277.6	5.05	0.35	0.28
33	254.8	72.0	182.9	73.0	288.3	4.85	0.31	0.29

EK G. Isıtıcı Eleman Kalibrasyonu

Deney analizinde dış yüzey sıcaklığının bilinmesi gerektiği için ısıtıcı üzerine iç kısımda yer alan termoelemanlara karşılık gelecek şekilde termoelemanlar yerleştirilmiş ve değişik ısı yükleri verilerek iç ve dış kısımdaki termoelemanlardan veriler alınmıştır ve bu verilere eğri uydurularak deney esnasında alınan ölçümlere göre dış yüzey sıcaklığı tahmin edilmiştir. Değişik ısı yüklerinde sistem rejime geldiği an alınan sıcaklık verileri Tablo G.1 de verilmiştir.

Tablo G.1: Isıtıcı Eleman Kalibrasyon Verileri

	T1		**T2**		**T3**		**T4**	
Güç (W)	Tiç	Tdış	Tiç	Tdış	Tiç	Tdış	Tiç	Tdış
1.5	27.45	27.68	27.85	27.91	28.40	28.32	29.38	29.33
1.98	29.90	30.06	30.50	30.46	31.36	31.07	32.96	32.57
2.4	30.95	31.19	31.67	31.73	32.70	32.55	34.67	34.45
3.6	34.78	35.00	35.91	35.89	37.49	37.18	40.64	40.10
4.68	35.97	36.11	37.20	37.06	38.90	38.50	42.40	41.76
6	39.78	39.94	41.42	41.31	43.78	43.26	48.64	47.69
6.9	44.44	44.48	46.62	46.26	49.58	48.74	55.81	54.36
8.75	47.03	46.93	49.47	48.87	52.74	51.55	59.79	57.74
11.02	50.32	50.19	53.24	52.49	57.09	55.74	65.37	63.21
	T5		**T6**		**T7**		**T8**	
Güç (W)	Tiç	Tdış	Tiç	Tdış	Tiç	Tdış	Tiç	Tdış
1.5	30.52	30.05	31.24	30.31	31.26	30.45	30.70	30.31
1.98	35.84	34.68	37.09	35.29	37.22	35.62	36.55	35.51
2.4	41.44	39.49	43.30	40.49	43.29	40.80	41.78	40.22
3.6	48.41	45.28	50.85	46.45	50.54	46.84	48.21	46.26
4.68	45.46	42.75	47.60	43.68	46.69	43.74	44.07	42.82
6	56.44	52.23	59.87	53.76	59.06	53.90	55.16	52.63
6.9	63.28	58.01	67.30	59.99	66.59	60.39	61.77	58.89
7.7	68.50	62.68	72.82	65.11	72.11	65.66	66.63	63.81
8.4	73.15	66.17	77.67	68.57	76.55	68.99	70.79	66.76
	T9		**T10**					
Güç (W)	Tiç	Tdış	Tiç	Tdış				
1.5	31.15	29.76	29.24	28.77				
1.98	36.27	33.54	32.84	31.83				
2.4	41.91	38.50	37.12	35.81				
3.6	45.07	40.91	39.40	37.90				
4.68	48.50	43.94	42.11	40.35				
6	54.61	49.51	46.89	44.77				
6.9	58.17	52.54	49.82	47.33				
7.7	59.71	54.54	50.90	48.78				



Şekil G.1: Isıtıcı Üzerinde İç ve Dış Sıcaklık Dağılımı

Sonuç olarak;

$$T_{1,dış} = 0.9841 \cdot T_{1,iç} + 0.7108 \quad \textbf{(G.1)}$$

$$T_{2,dış} = 0.9689 \cdot T_{2,iç} + 1.0152 \quad \textbf{(G.2)}$$

$$T_{3,dış} = 0.9563 \cdot T_{3,iç} + 1.2401 \quad \textbf{(G.3)}$$

$$T_{4,dış} = 0.9398 \cdot T_{4,iç} + 1.8009 \quad \textbf{(G.4)}$$

$$T_{5,dış} = 0.8512 \cdot T_{5,iç} + 4.1315 \quad \textbf{(G.5)}$$

$$T_{6,dış} = 0.8259 \cdot T_{6,iç} + 4.5342 \quad \textbf{(G.6)}$$

$$T_{7,dış} = 0.8519 \cdot T_{7,iç} + 3.8511 \quad \textbf{(G.7)}$$

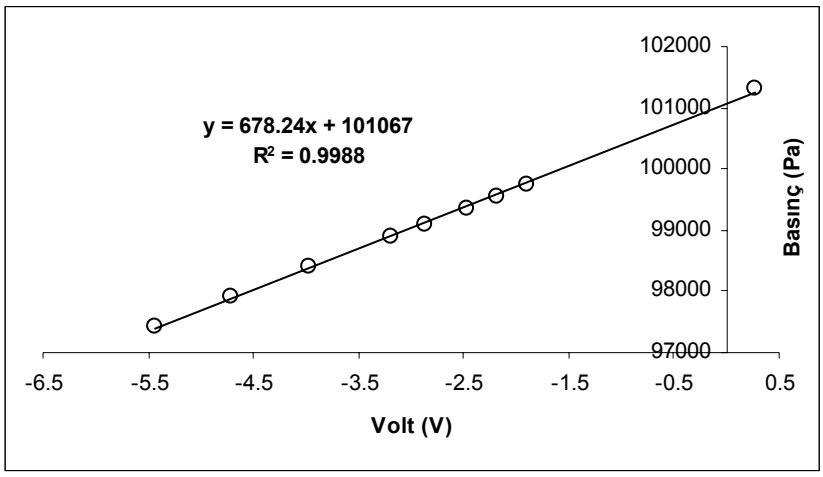
$$T_{8,dış} = 0.9211 \cdot T_{8,iç} + 1.9452 \quad \textbf{(G.8)}$$

$$T_{9,dış} = 0.8653 \cdot T_{9,iç} + 2.3023 \quad \textbf{(G.9)}$$

$$T_{10,dış} = 0.9178 \cdot T_{10,iç} + 1.7741 \quad \textbf{(G.10)}$$

EK H. Basınç Ölçer Kalibrasyonu

Deneyler esnasında basınç ölçümü Validyne basınç ölçer ile yapılmıştır. Basınç ölçerin ürettiği veriler ise Keithley 2700 multimetre ile okunmuştur. Yapısı gereği Validyne basınç ölçer basıncı voltaj değişimi ile gösterir. Kalibrasyon ise bilinen basınç değerlerinde basınç ölçerin verdiği voltaj çıkış değerlerine göre yapılmıştır. Sonuçlara uydurulan eğri Şekil H.1'de gösterilmiştir.



Şekil H.1: Basınç Ölçer Kalibrasyon Eğrisi

EK I. Belirsizlik Analizi

Bu bölümde deney düzeneğinde kullanılan cihazların ve parçaların, yapılan ölçümlerin hassasiyetleri tespit edilerek belirsizlik analizi yapılmıştır.

Belirsizlik Formülü:

$$w_{f(x,y,...)} = \sqrt{(\frac{\partial f(x,y,...)}{\partial x} \cdot w_x)^2 + (\frac{\partial f(x,y,...)}{\partial y} \cdot w_y)^2 .....} \quad \textbf{(I.1)}$$

Deney düzeneğinde kullanılan cihaz ve parçaların belirsizlikleri şunlardır ;

- Bakır boru : ± 0.4 mm
- Pirinç boru : ± 1 mm
- Cam Boru : ± 0.1 mm
- Cr-Ni Termoeleman : ± 0.01 ° C
- Keithley 2700 Multimeter : ±1 ° C , ± 0.01 V
- Mersan DC Güç Kaynağı : ± 0.1 A, ± 0.5 V

Toplam su hacmindeki belirsizlik Denklem (3.1), toplam su kütlesindeki belirsizlik Denklem (3.2), ısıtıcıya verilen güçteki belirsizlik Denklem (3.4) ve ortalama ısı geçiş katsayısındaki belirsizlik Denklem (3.7) kullanılarak hesaplanmıştır.

Buna göre;

$$m_T = \pm 0.18\, kg \quad \textbf{(I.2)}$$

$$V_b = \pm 0.024\, L \quad \textbf{(I.3)}$$

$$\dot{Q} = \pm 7.4\, W \quad \textbf{(I.4)}$$

$$U = \pm 14.7 \frac{W}{m^2 \cdot^o C} \quad \textbf{(I.5)}$$

EK J. Q-Basic Programı

```
DEFDBL A-Z
DEFLNG N

DEF fnWfT (z1, z2, v1, v2)
  aVb = A1 * (Lc - z1) + A2 * (Lc - z2) + Ab * Ld
  az3 = -A1 * z1 - A2 * z2 - a0 * (Lo + Ld) + (Mt0 / aros) - (rob / aros) * aVb
  z3 = az3 / a3
  z3u = -a1a3 * v1 - a2a3 * v2
  ' surtunmeler
       ss = 2.5 * 2
       sf = 2.08 * 2
       vf1 = ss * 8 * api * bmu * z1 * v1 * v1
       vf2 = ss * 8 * api * bmu * (Ld * A2A0 * A2A0 + z2) * v2 * v2
       vf3 = ss * 8 * api * bmu * (Lo * A3A0 * A3A0 + z3) * z3u * z3u
       Lf2 = sf * A2 * 1.3 * aros * v2 * v2 * ABS(v2) / 2
       Lf3 = sf * a3 * 1.3 * aros * z3u * z3u * ABS(z3u) / 2
       Lf0 = sf * A1 * 8 * 1.4 * ABS(v1) * v1 * v1 / 2
  fnWfT = vf1 + vf2 + vf3 + aros * (Lf0 + Lf2 + Lf3) / 2
END DEF
DEF fnf1 (z1, z2, v1, v2, rob, t)
  aVb = A1 * (Lc - z1) + A2 * (Lc - z2) + Ab * Ld
  az3 = -A1 * z1 - A2 * z2 - a0 * (Lo + Ld) + (Mt0 / aros) - (rob / aros) * aVb
  z3 = az3 / a3
       ak1 = a1a3 * (Lo * A3A0 + z3) * (Ld * A2A0 + z2)
       ak2 = z1 * (Ld * A2A0 + z2 + a2a3 * (Lo * A3A0 + z3))
    Ak = ak1 + ak2
       x1 = g * (a2a3 * (Lo * A3A0 + z3) * (z2 - z1) + (Ld * A2A0 + z2) * (z3 - z1))
  ax1 = x1 / Ak
    z3u = -a1a3 * v1 - a2a3 * v2
       x2 = a2a3 * (Lo * A3A0 + z3) * (v2 * v2 - v1 * v1) / 2
  ax2 = x2 / Ak
       x3 = (Ld * A2A0 + z2) * (z3u * z3u - v1 * v1) / 2
  ax3 = x3 / Ak
       x4 = (A2A0 * A2A0 / 2) * ((Ld * A2A0 + z2) * v2 - (Lo * A3A0 + z3) * z3u) * (A3A2 * z3u - v2)
  ax4 = x4 / Ak
    ' surtunmeler ve basin‡ farklari
      abas1 = (Ld * A2A0 + z2) * (Po - PL1) / (aros * Ak)
      abas2 = a2a3 * (Lo * A3A0 + z3) * (PL2 - PL1) / (aros * Ak)
  abas = abas1 + abas2
       ss = 2.5 * 2
       sf = 2.08 * 2
       f1a = ss * 8 * api * bmu * z1 * v1
     F1 = f1a
       f2a = ss * 8 * api * bmu * (Ld * A2A0 * A2A0 + z2) * v2
       F2b = ss * 2 * A2 * 1.3 * aros * v2 * ABS(v2) / 2
     F2 = f2a + F2b
       f3a = ss * 8 * api * bmu * (Lo * A3A0 * A3A0 + z3) * z3u
       F3b = sf * 2 * a3 * 1.3 * aros * z3u * ABS(z3u) / 2
     F3 = f3a + F3b
       gga = ss * 2 * 1.4 * ABS(v1) * v1 / 2
       gg = (a2a3 * (Lo * A3A0 + z3) + (Ld * A2A0 + z2)) * gga
    avis1 = a2a3 * (Lo * A3A0 + z3) * (F2 / A2 - F1 / A1) / (aros * Ak)
    avis2 = (Ld * A2A0 + z2) * (F3 / a3 - F1 / A1) / (aros * Ak)
    avis3 = -gg / Ak
  avis = avis1 + avis2 + avis3
  fnf1 = ax1 + ax2 + ax3 + ax4 + abas + avis
```

```
END DEF
DEF fnf2 (z1, z2, v1, v2, rob, t)
  aVb = A1 * (Lc - z1) + A2 * (Lc - z2) + Ab * Ld
  az3 = -A1 * z1 - A2 * z2 - a0 * (Lo + Ld) + (Mt0 / aros) - (rob / aros) * aVb
  z3 = az3 / a3
      ak1 = a1a3 * (Lo * A3A0 + z3) * (Ld * A2A0 + z2)
      ak2 = z1 * (Ld * A2A0 + z2 + a2a3 * (Lo * A3A0 + z3))
        Ak = ak1 + ak2
      x1 = g * (z1 * (z3 - z2) + a1a3 * (Lo * A3A0 + z3) * (z1 - z2))
  ax1 = x1 / Ak
   z3u = -a1a3 * v1 - a2a3 * v2
      x2 = a1a3 * (Lo * A3A0 + z3) * (v1 * v1 - v2 * v2) / 2
  ax2 = x2 / Ak
      x3 = z1 * (z3u * z3u - v2 * v2) / 2
  ax3 = x3 / Ak
      x4 = (A1A0 * A2A0 / 2) * (z1 * v1 - (Lo * A3A0 + z3) * z3u) * (A3A2 * z3u - v2)
  ax4 = -x4 / Ak
   ' s□rt□nmeler ve basın‡ farklari
      abas1 = z1 * (Po - PL2) / (aros * Ak)
      abas2 = -a1a3 * (Lo * A3A0 + z3) * (PL2 - PL1) / (aros * Ak)
  abas = abas1 + abas2
       ss = 2.5 * 2
       sf = 2.08 * 2
       f1a = ss * 8 * api * bmu * z1 * v1
      F1 = f1a
       f2a = ss * 8 * api * bmu * (Ld * A2A0 * A2A0 + z2) * v2
       F2b = ss * 2 * A2 * 1.3 * aros * v2 * ABS(v2) / 2
      F2 = f2a + F2b
       f3a = ss * 8 * api * bmu * (Lo * A3A0 * A3A0 + z3) * z3u
       F3b = sf * 2 * a3 * 1.3 * aros * z3u * ABS(z3u) / 2
      F3 = f3a + F3b
       gga = ss * 2 * 1.4 * ABS(v1) * v1 / 2
       gg = a1a3 * (Lo * A3A0 + z3) * gga
     avis1 = z1 * (F3 / a3 - F2 / A2) / (aros * Ak)
     avis2 = a1a3 * (Lo * A3A0 + z3) * (F1 / A1 - F2 / A2) / (aros * Ak)
     avis3 = gg / Ak
  avis = avis1 + avis2 + avis3
  fnf2 = ax1 + ax2 + ax3 + ax4 + abas + avis
END DEF
DEF fng1 (z1, z2, v1, v2, rob, t)
      xz1 = qimx * Fqin / (aros * hfg * A1)
      fng1 = v1 - xz1
END DEF
DEF fng2 (z1, z2, v1, v2, rob, t)
      xz2 = qomx * Fqout / (hfg * aros * A2)
      fng2 = v2 + xz2
END DEF
DEF fnrob (z1, z2, v1, v2, rob, t)
      hacb = (Lc - z1) * A1 + (Lc - z2) * A2 + Ld * Ab
      aay1 = rob * (A1 * v1 + A2 * v2) / hacb
      aay2 = (1 - (rob / aros)) * ((qimx * Fqin - qomx * Fqout) / hacb) / hfg
      fnrob = (aay1 + aay2)
END DEF
'DEF fnaPb (z1, z2, v1, v2, rob, t)
'      hacb = (Lc - z1) * A1 + (Lc - z2) * A2 + Ld * Ab
'      aby1 = k * Pb1 * (A1 * v1 + A2 * v2) / hacb
'        hb = (k / (k - 1)) * Pb1 / rob
'        by = ((k * Pb1 / (aros * hfg)) - (k - 1) * hb / hfg)
'      aby2 = by * (qimx * Fqin - qomx * Fqout) / hacb
'      fnaPb = (aby1 - aby2)
'END DEF
DEF fnTb (z1, z2, v1, v2, rob, Tb, t)
      hacb = (Lc - z1) * A1 + (Lc - z2) * A2 + Ld * Ab
      Tbt1 = EXP(17.946 - (4974 / Tb))
      Tbt2 = (A1 * v1 + A2 * v2) / (Cv * hacb * rob)
      Tbt3 = (1 - (rob / aros)) * (qimx * Fqin - qomx * Fqout) / (Cv * hacb * hfg * rob * rob)
```

```
      fnTb = Tbt1 * (Tbt2 + Tbt3)
END DEF
CLS
api = 4 * ATN(1)
'***************v e r i l e r*******************************
'geometri
    Lc = .61#: Ld = .345#: Lo = .445#
    d1 = SQR(.0352# * .0352# - .018# * .018#)
    d2 = d1: d0 = .0358#
    d3 = .0352#
    db = .0358#
   A1 = api * d1 * d1 / 4: A2 = api * d2 * d2 / 4: a3 = api * d3 * d3 / 4
   Ass = api * ds * ds / 4: Ab = api * db * db / 4: a0 = api * d0 * d0 / 4
   a1a3 = A1 / a3: A1A2 = A1 / A2: A1A0 = A1 / a0
   A2As = A2 / Ass: a2a3 = A2 / a3: A2A0 = A2 / a0
   A3A0 = a3 / a0: A3A2 = a3 / A2
   AbA3 = Ab / a3: A0A3 = a0 / a3: AsA3 = Ass / a3
'Akiskan ozelikleri (T=100 C ve P=1 Atm icin)
   hf = 419.06# * 1000: hb0 = 2676.3# * 1000
   hfg = hb0 - hf: '2256.94# * 1000
   aros = 1000 / 1.0437#: rob0 = 1 / 1.6738#
   Cpl = 4217
   Cpg = 1872.3#: Cv = 1410.8#
   Rg = 461.52#: 'su buhari gaz sabiti
   k = 1.327#: 'su buharı cp/cv oranı
   bmu = .000279# * 2:     'dinamik viskozite
   kl = .68#: 'Doymus suyun isi iletim katsay□s□
   g = 9.81#
'Buhar sicakligi-
   Tb0 = 100 + 273.15#: 'K
'Basin‡lar
   Po = 101325
'**********DENEYSEL VERILER*********************
   Tss = 87 + 273.15#: 'Sogutucu yuzey sicakligi
   Tis = 143.7 + 273.15#: 'isitici yuzey sicakligi
'toplam kutleden baslangic z0 hesabi
    Mt0 = 1.759#: '* 1.1
      mh1 = aros * (A1 + A2 + a3) - rob0 * (A1 + A2)
      mh2 = rob0((A1 + A2) * Lc + Ab * Ld) + aros * a0 * (Lo + Ld)
    z0 = (Mt0 - mh2) / mh1
    PRINT z0
'************************************************
'ksg = .2: aa1 = .5: bb1 = .5:   'Sogutucu ve isitici Fq* katsayilari
ksg = 1.6: aa1 = .12: bb1 = .95:          'Sogutucu ve isitici Fq* katsayilari
 'Isitici max isisi
   qimx = 227.05#: 'EXP-1
   hss = qimx / (2 * api * .009 * .16 * (Tis - Tb0))
 'Sogutucu isi
   hfgd = hfg + .68# * Cpl * (Tb0 - Tss)
   rsog = 8.9999999999999999D-03
   qsog1 = (g * aros * (aros - rob0) * (kl ^ 3) * hfgd / (bmu * (Tb0 - Tss))) ^ (1 / 4)
   qsog2 = 2 * api * rsog * (Tb0 - Tss) * hfg / hfgd
   qomx = .9429999999999999# * qsog1 * qsog2 * ksg * ((Lc - z0) ^ (3 / 4))
'END
    qio = qimx
    qoo = qomx
      vf0 = (A1 + A2 + a3) * z0 + a0 * (Lo + Ld)
      vb0 = (A1 + A2) * (Lc - z0) + Ab * Ld
vt0 = vf0 + vb0
      Mtb = rob0 * vb0
      Mts = aros * vf0
Mt0 = Mtb + Mts

z10 = z0: z20 = z0: z30 = z0
Pb0 = 1000 * EXP(17.946 - (4974 / Tb0))
```

```
to0 = 0

v10 = qimx * 1 / (A1 * aros * hfg)
v20 = -qomx * 1 / (A2 * aros * hfg)
v30 = -(a1a3 * v10 + a2a3 * v20)
  Esp0 = (1 / 2) * aros * g * (A1 * z10 * z10 + A2 * z20 * z20 + a3 * z30 * z30)
  Esk0 = (1 / 2) * aros * (A1 * z10 * v10 * v10 + A2 * (Ld * A2A0 + z20) * v20 * v20 + a3 * (Lo * A3A0 +
z30) * v30 * v30)
  Es0 = Esp0 + Esk0
  Eb0 = vb0 * Pb0 / (k - 1)
Et0 = Es0 + Eb0

  bt = to0: brob = rob0: bTb = Tb0: bz1 = z10: bz2 = z20: bv1 = v10: bv2 = v20
  GOSUB 2000
  robb = rob0
PL1 = Pb0: '- (1 / aros) * ((aros / robb) - 1) * ((qimx * Fqin / (hfg * a1)) ^ 2)
PL2 = Pb0: '- (1 / aros) * ((aros / robb) - 1) * ((qomx * Fqout / (hfg * a2)) ^ 2)
      axz1 = qimx * Fqin / (aros * hfg * A1)
  dz10 = v10 - axz1
      axz2 = qomx * Fqout / (hfg * aros * A2)
  dz20 = v20 + xz2
  qin = qimx * Fqin
  qout = qomx * Fqout

  Qnet0 = qin - qout
  WfT0 = fnWfT(z10, z20, v10, v20)

Qtop = 0
Wftop = 0

'Pi0 = Pb0
Tb = Tb0

dt = .001#
n = 1: nn = 40: na1 = 100001
nnn = 1

100
bt = to0: brob = rob0: bTb = Tb0: bz1 = z10: bz2 = z20: bv1 = v10: bv2 = v20
 Pb = 1000 * EXP(17.946 - (4974 / bTb))
 'Pb = Pi0 * ((brob / robi) ^ k)
GOSUB 2000
 PL1 = Pb: '- (1 / aros) * ((aros / brob) - 1) * ((qimx * Fqin / (hfg * a1)) ^ 2)
 PL2 = Pb: '- (1 / aros) * ((aros / brob) - 1) * ((qomx * Fqout / (hfg * a2)) ^ 2)

v1k1 = dt * fnf1(z10, z20, v10, v20, rob0, to0)
v2k1 = dt * fnf2(z10, z20, v10, v20, rob0, to0)
z1k1 = dt * fng1(z10, z20, v10, v20, rob0, to0)
z2k1 = dt * fng2(z10, z20, v10, v20, rob0, to0)
arobk1 = dt * fnrob(z10, z20, v10, v20, rob0, to0)
Tbk1 = dt * fnTb(z10, z20, v10, v20, rob0, Tb0, to0)

t = to0 + dt / 3
v11 = v10 + v1k1 / 3: v21 = v20 + v2k1 / 3
z11 = z10 + z1k1 / 3: z21 = z20 + z2k1 / 3
rob11 = rob0 + arobk1 / 3
Tb11 = Tb0 + Tbk1 / 3
  bt = t: brob = rob11: bTb = Tb11: bz1 = z11: bz2 = z21: bv1 = v11: bv2 = v21

 Pb = 1000 * EXP(17.946 - (4974 / bTb))
'Pb = Pi0 * ((brob / robi) ^ k)
GOSUB 2000
 PL1 = Pb: '- (1 / aros) * ((aros / brob) - 1) * ((qimx * Fqin / (hfg * a1)) ^ 2)
 PL2 = Pb: '- (1 / aros) * ((aros / brob) - 1) * ((qomx * Fqout / (hfg * a2)) ^ 2)

v1k2 = dt * fnf1(z11, z21, v11, v21, rob11, t)
```

```
v2k2 = dt * fnf2(z11, z21, v11, v21, rob11, t)
z1k2 = dt * fng1(z11, z21, v11, v21, rob11, t)
z2k2 = dt * fng2(z11, z21, v11, v21, rob11, t)
arobk2 = dt * fnrob(z11, z21, v11, v21, rob11, t)
Tbk2 = dt * fnTb(z11, z21, v11, v21, rob11, Tb11, t)

'aPbk2 = dt * fnaPb(z11, z21, v11, v21, rob11,  t)
t = to0 + 2 * dt / 3
v11 = v10 + v1k2 - v1k1 / 3: v21 = v20 + v2k2 - v2k1 / 3
z11 = z10 + z1k2 - z1k1 / 3: z21 = z20 + z2k2 - z2k1 / 3
rob11 = rob0 + arobk2 - arobk1 / 3
Tb11 = Tb0 + Tbk2 - Tbk1 / 3

  bt = t: brob = rob11: bTb = Tb11: bz1 = z11: bz2 = z21: bv1 = v11: bv2 = v21
  Pb = 1000 * EXP(17.946 - (4974 / bTb))
 GOSUB 2000
  PL1 = Pb: '- (1 / aros) * ((aros / brob) - 1) * ((qimx * Fqin / (hfg * a1)) ^ 2)
  PL2 = Pb: '- (1 / aros) * ((aros / brob) - 1) * ((qomx * Fqout / (hfg * a2)) ^ 2)

v1k3 = dt * fnf1(z11, z21, v11, v21, rob11, t)
v2k3 = dt * fnf2(z11, z21, v11, v21, rob11, t)
z1k3 = dt * fng1(z11, z21, v11, v21, rob11, t)
z2k3 = dt * fng2(z11, z21, v11, v21, rob11, t)
arobk3 = dt * fnrob(z11, z21, v11, v21, rob11, t)
Tbk3 = dt * fnTb(z11, z21, v11, v21, rob11, Tb11, t)

t = to0 + dt
v11 = v10 + v1k3 - v1k2 + v1k1: v21 = v20 + v2k3 - v2k2 + v2k1
z11 = z10 + z1k3 - z1k2 + z1k1: z21 = z20 + z2k3 - z2k2 + z2k1
rob11 = rob0 + arobk3 - arobk2 + arobk1
Tb11 = Tb0 + Tbk3 - Tbk2 + Tbk1

  bt = t: brob = rob11: bTb = Tb11: bz1 = z11: bz2 = z21: bv1 = v11: bv2 = v21
  Pb = 1000 * EXP(17.946 - (4974 / bTb))

 GOSUB 2000
  PL1 = Pb: '- (1 / aros) * ((aros / brob) - 1) * ((qimx * Fqin / (hfg * a1)) ^ 2)
  PL2 = Pb: ' - (1 / aros) * ((aros / brob) - 1) * ((qomx * Fqout / (hfg * a2)) ^ 2)

v1k4 = dt * fnf1(z11, z21, v11, v21, rob11, t)
v2k4 = dt * fnf2(z11, z21, v11, v21, rob11, t)
z1k4 = dt * fng1(z11, z21, v11, v21, rob11, t)
z2k4 = dt * fng2(z11, z21, v11, v21, rob11, t)
arobk4 = dt * fnrob(z11, z21, v11, v21, rob11, t)
Tbk3 = dt * fnTb(z11, z21, v11, v21, rob11, Tb11, t)

v1 = v10 + (1 / 8) * (v1k1 + 3 * v1k2 + 3 * v1k3 + v1k4)
v2 = v20 + (1 / 8) * (v2k1 + 3 * v2k2 + 3 * v2k3 + v2k4)
z1 = z10 + (1 / 8) * (z1k1 + 3 * z1k2 + 3 * z1k3 + z1k4)
z2 = z20 + (1 / 8) * (z2k1 + 3 * z2k2 + 3 * z2k3 + z2k4)
rob = rob0 + (1 / 8) * (arobk1 + 3 * arobk2 + 3 * arobk3 + arobk4)
Tb = Tb0 + (1 / 8) * (Tbk1 + 3 * Tbk2 + 3 * Tbk3 + Tbk4)
   vb = A1 * (Lc - z1) + A2 * (Lc - z2) + Ab * Ld
   az3 = -A1 * z1 - A2 * z2 - a0 * (Lo + Ld) + (Mt0 / aros) - (rob / aros) * vb
   z3 = az3 / a3
   v3 = -(a1a3 * v1 + a2a3 * v2)
   vf = A1 * z1 + A2 * z2 + a3 * z3 + a0 * (Lo + Ld)
   vt = vb + vf
   Mt = aros * vf + rob * vb
   Mb = rob * vb

Pb = 1000 * EXP(17.946 - (4974 / Tb))

   bt = t: brob = rob: bTb = Tb: bz1 = z1: bz2 = z2: bv1 = v1: bv2 = v2

   GOSUB 2000
```

```
  robb = rob
  PL1 = Pb: '- (1 / aros) * ((aros / robb) - 1) * ((qimx * Fqin / (hfg * a1)) ^ 2)
  PL2 = Pb: '- (1 / aros) * ((aros / robb) - 1) * ((qomx * Fqout / (hfg * a2)) ^ 2)
       axz1 = qimx * Fqin / (aros * hfg * A1)
  dz1 = v1 - axz1
       axz2 = qomx * Fqout / (hfg * aros * A2)
  dz2 = v2 + xz2

  Qnet = qimx * Fqin - qomx * Fqout
  WfT = fnWfT(z1, z2, v1, v2)

       Qtop = Qtop + (dt / 2) * (Qnet0 + Qnet)
       Wftop = Wftop + (dt / 2) * (WfT0 + WfT)

   Esp = (1 / 2) * aros * g * (A1 * z1 * z1 + A2 * z2 * z2 + a3 * z3 * z3)
   Esk = (1 / 2) * aros * (A1 * z1 * v1 * v1 + A2 * (Ld * A2A0 + z2) * v2 * v2 + a3 * (Lo * A3A0 + z3) * v3 *
v3)
   Es = Esp + Esk
   Eb = vb * Pb / (k - 1)
   Et = Es + Eb

   dEsp = Esp - Esp0
   dEsk = (Esk - Esk0) * 1: dEs = (Es - Es0) * 1
   dEb = (Eb - Eb0) * 1

   dEt = (Et - Et0) * 1
   dW = Po * a3 * (z3 - z0) * 1

z10 = z1: z20 = z2
to0 = t: v10 = v1: v20 = v2: rob0 = rob: Tb0 = Tb
       Qnet0 = Qnet
       WfT0 = WfT
n = n + 1
IF n <= na1 THEN
  GOTO 100
  ELSE
       CLOSE #1
       END
END IF
2000

IF bz1 > .23 THEN
    hss = qimx / (2 * api * .009 * .16 * (Tis - bTb))
   Fqin = ((bz1 - .23) / .16) * (1 + (aa1 * (59050.5 ^ bb1) * ((ABS(bv1)) ^ (bb1)) / hss))
ELSE
   Fqin = 0
END IF
    hfgd = hfg + .68# * Cpl * (bTb - Tss)
    rsog = 8.9999999999999999D-03
    qsog1 = (g * aros * (aros - brob) * (kl ^ 3) * hfgd / (bmu * (bTb - Tss))) ^ (1 / 4)
    qsog2 = .943 * 2 * api * rsog * (bTb - Tss) * hfg / hfgd
    qomx = qsog1 * qsog2 * ksg

   Fqout = (Lc - bz2) ^ (3 / 4)
'**********
```

RETURN

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Erzincan'ın Çayırlı ilçesinde dünyaya gelen Gökhan Arslan ilkokul eğitimini Sivas'ın Koyulhisar ilçesi Cumhuriyet İlkokulunda bitirdi. Ortaokul ve lise eğitimine Mersin de devam etti, 1999 yılında İçel Anadolu Lisesinden mezun oldu. Aynı yıl Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği bölümünü kazandı. 2004 yılında lisans eğitimini bölüm üçüncülüğü ile bitirdi. 6 ay Energaz Mühendislik ve Müşavirlik firmasında saha mühendisi olarak çalıştı. 2005 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Isı-Akışkan programında yüksek lisans eğitimine başladı ve aynı yıl içinde bölüm bünyesinde yer alan Termodinamik ve Isı Tekniği Anabilimdalı'nda araştırma görevlisi oldu. Anabilimdalı bünyesinde Isı ve Kütle Geçişi Araştırma Laboratuvarı ikinci sorumlusu olarak görevlendirildi. Halen aynı görevini sürdürmektedir.