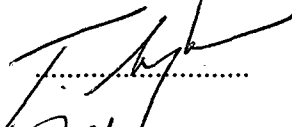


JURİ ÜYELERİ

Prof.Dr.Teoman AYHAN

Prof.Dr.Bedri YÜKSEL

Doç.Dr.Ömer ÇOMAKLI




11.08.2000 tarihinde 14/140 kararla kurulan jürimiz iş bu **Doktora**
tezini 19-09-2000 tarihinde kabul etmiştir.

96442

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

• **MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ZORLANMIŞ KONVEKSİYONLU
KAYNAMALI YATAY BİR BORU SİSTEMİNDE İKİ
FAZLI AKIŞ KARARSIZLIKLARININ DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

Süleyman KARSLI

Erzurum - 2000

ÖZET

Endüstride kullanılan çeşitli ısı eşanjörlerinin işletilmesi ve dizayn edilmesinde iki fazlı akışların dinamik kararsızlıkları önemli bir problemdir. Isı eşanjörlerinde boru donanımının zarar görmesine neden olan dinamik kararsızlıkların oluşturduğu zararları ortadan kaldırmak veya minimize etmek amacıyla, iki fazlı akışların temel mekanizmalarını belirlemeye yönelik yoğun çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmada iş yapan akışkanı R-11, test kısmı yatay bir boru olan zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı deney düzeneği kurularak, iki fazlı akışların dinamik kararsızlıklarından yoğunluk değişim osilasyonları, basınç düşümü osilasyonları ve termal osilasyonlar incelenmiştir. Bu osilasyonlar üzerine, aşırı soğutma miktarının, akışkan giriş debisinin ve test borusu içerisine yerleştirilen farklı ısı transfer iyileştirme elemanlarının yaptıkları etkiler araştırılmıştır. Ayrıca, boru cidarlarında patlama ve benzeri deformasyonlara sebep olan “burn-out” olayının oluşmasında hangi parametrelerin etkili oldukları araştırılmıştır.

Yapılan çalışmaların sonucunda; yüzey artırımı borularda oluşan “burn-out” olayının sıcaklık limitlerinin boş boruya göre azaldığı bulunmuştur. Böylece “burn-out” olayı sonucunda oluşacak zararların azaldığı tespit edilmiştir. Basınç düşümü tipi osilasyonların genellikle yoğunluk değişim tipi osilasyonlarla aynı anda ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Sistemin kararlılık sınırları, artan aşırı soğutma seviyesi ile daha düşük kütleli debi değerlerine doğru kaymıştır. Yoğunluk değişim tipi osilasyonların periyot ve genlikleri, basınç düşümü tipi osilasyonların periyot ve genliklerinden daha düşük olmuştur. Film akışının hidrodinamik davranışları sonucu ortaya çıkan termal osilasyonlar, çok düşük kütleli debi değerlerinde özellikle alt cidarda büyük genliklere sahip osilasyonlar olarak ortaya çıkmaktadır. Boyut analizi sonuçlarına göre, yüzey artırımı borulardaki ısı transfer karakteristiklerinin boş boruya göre daha iyi olduğu, kararlılık sınırlarının hesaplamalarının deneysel sonuçlarla iyi bir uyum gösterdiği bulunmuştur.

SUMMARY

The dynamic instabilities of two-phase flows are an important problem in designing and operating various heat exchangers used in industry . Extensive investigations have been carrying out to determine fundamental mechanisms of two-phases flows in order to prevent or minimize damages created by dynamic instabilities that causes to damage tube bundles of heat exchangers. In this study, a forced convection boiling experimental setup whose working fluid was R-11 and whose test section was an horizontal tube was constructed; and density wave type oscillations, pressure drop type oscillations and thermal oscillations which were dynamic instabilities of two phase flows were investigated. The effect of the rate of subcooling, fluid inlet flow rate and various heat transfer augmentation elements inserted into the test tube on these stabilities are investigated. In addition, it was studied which parameters were affecting "burnout" phenomena which caused explosion and similar deformations in the tube wall.

As a result of the studies, it was found that the temperature limits of burn-out phenomenon formed in augmented surfaces decreased in comparison with smooth tube. Thus, it was determined that damages that would occur as a result of burn-out decreased. Pressure drop type oscillations generally occurred simultaneously with density wave type oscillations. The boundaries of the stability of the system went towards the lower mass flow rates with increasing subcooling rate. The periods and amplitudes of the density wave type oscillations were lower than those of pressure drop type oscillations. Thermal oscillations resulting from the hydrodynamical behaviour of film flow occurred as oscillations having bigger amplitudes especially at the bottom wall in very low mass flow rates. By dimensional analysis, It was found that heat transfer characteristics in augmented surfaces had better in comparison with smooth surfaces and that the predictions of boundaries of stabilities were compatible with experimental results.

TEŞEKKÜR

Doktora deneysel alışmalarım suresince bana her trl ardımı yapan kıymetli hocalarım Doç. Dr. Ömer ÇOMAKLI ve Prof. Dr. Bedri YÜKSEL' e çok teşekkür ederim. Bilgisayar kartının sisteme kalibre edilmesi ve deneysel çalışmaların yapılmasında bana her trl ardımı yapan ğretim elemanlarından Yrd. Doç. Dr. Adnan DERDİYOK , Araş. Gör. Tevhit KARACALI , Araş. Gör. Mustafa YAMAN ve Araş. Gör. Ömer ÖZYURT'a teşekkür etmeyi borç bilirim. Ayrıca deney düzeneğinin kurulmasında çok çaba gösteren amcam teknisyen Selami KARSLI ile beraber söz konusu çalışmama emeğ i geçen diğ er arkadaşlara en samimi duygularımla teşekkür ederim.

Temmuz 2000

ERZURUM

Süleyman KARSLI

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	I
SUMMARY	li
TEŞEKKÜR	lii
İÇİNDEKİLER	lv
KISALTMALAR VE SİMGELER	Vii
1. GİRİŞ	1
2. İKİ FAZLI AKIŞLARIN TEMEL KARAKTERİSTİKLERİ	20
2.1. İki Fazlı Akışta Zorlanmış Konveksiyonlu Kaynama	20
2.2. İki Fazlı Akış Rejimleri	23
2.3. Düşey Borularda İki Fazlı Akış Rejimleri	25
2.4. Yatay Borularda İki Fazlı Akış Rejimleri	27
2.5. Yatay Borularda “ Burn-Out ” Olayı	29
2.6. Kaynamalı Yatay Borularda İki Fazlı Akış Kararsızlıkları	32
2.7. Kaynamalı Yatay Borularda Meydana Gelen İki Fazlı Akış Kararsızlıklarının Sınıflandırılması	33
2.8. Statik Kararsızlıklar	34
2.9. Dinamik Kararsızlıkları	37
3. İKİ FAZLI AKIŞLARIN TERMODİNAMİK ANALİZİ	45
3.1. İki Fazlı Akışlar İçin Temel Denklemler	45
3.1.1. Süreklilik Denklemi	45
3.1.2. Tek Faz Momentum ve Enerji Denklemi	52

3.1.3. İki Faz Momentum ve Enerji Denklemi	52
3.1.4. İki Fazlı Akışlarda Kritik Akışın Formülüzasyonu	53
3.1.5. Momentum Denkleminin İntegrasyonu	53
4. İKİ FAZLI AKIŞ KARARSIZLIKLARININ MATEMATİK	
MODELİ	54
4.1. Homojen Model	55
4.2. Drift-Flux Modeli	58
5. DENEY DÜZENEĞİ VE DENEYSEL YÖNTEM	59
5.1. Deney Düzeneği	59
5.2. Ölçüm Elemanları ve Bu Elemanlardan Alınan Ölçümlerdeki Hata Oranları	74
5.3. Deneysel Yöntem	83
6. DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ	92
6.1. Isıtıcı Test Borularının Sınıflandırılması	92
6.2. Isı Transfer Karakteristikliklerinin belirlenmesi	92
6.3. Orifis Levhasında Oluşan Basınç Düşümünün Belirlenmesi	95
6.4. Boyut Analizi	95
6.5. Osilasyonların Tahmin Edilmesinde Kullanılan Boyutsuz Parametreler	97
6.6. Rotametrein Kalibrasyonun da Kullanılan Matematiksel Dönüşüm Metodu	100
7. BULGULAR VE İRDELEME.....	101
7.1. Cidar Sıcaklık Profilleri	101
7.2. Zorlanmış Konveksiyonlu Kaynamalı Yatay Sistemde Oluşan Kararlı Durum Karakteristikliklerinin İncelenmesi	141
7.2.1. Kararlı Durum Karakteristiklikleri	141
7.2.2. Osilasyon Sınırları	147
7.3. Zorlanmış Konveksiyonlu Kaynamalı Yatay Sistemde Oluşan Osilasyonlar.....	153

7.4. Basınç Düşümü Tipi Osilasyonlar	154
7.5. Geçiş Osilasyonları	176
7.6. Yoğunluk Değişim Tipi Osilasyonlar	177
7.7. Termal Osilasyonlar	196
7.8. Boyut Analizi Sonuçları	204
8. SONUÇLAR	210
8.1. Sıcaklık Profilleri	210
8.2. İki Fazlı Akış Kararsızlıkları	212
8.3. Öneriler.....	214
9. EKLER	218
9.1. Ek A. Hata Analizi	218
9.2. Ek B. Tablolar	224
9.3. Ek C. Data Okuma Programı	258
10. KAYNAKLAR	261

KISALTMALAR VE SİMGELER

A	: Boru Kesit Alanı [m^2]
A_T	: Boru Toplam Yüzey Alanı [m^2]
A_1	: Sabit
A_2	: Sabit
a_1	: Akustik Hız [m/s]
b	: Sabit
B_1	: Sabit
B_2	: Sabit
C	: Boru Yüzey Pürüzlülüğüne Bağlı Katsayı
C_v	: Sabit Hacimdeki Özgül Isı [J/kgK]
C_p	: Sabit Basıncıdaki Özgül Isı [J/kgK]
C_1	: Sabit
C_2	: Sabit
C_3	: Sabit
C_s	: Boyutsuz Yüzey Katsayısı
C_h	: Test Borusu Isı İletim Katsayısı [W/mK]
C_{v0}	: Kararlı ve sabit Hacim Durumunda ki Özgül Isı [J/kgK]
C_{p0}	: Kararlı ve sabit Basıncı Durumunda ki Özgül Isı [J/kgK]
d	: Boru Çapı [m]
d_d	: Boru Dış Çapı [m]
d_i	: Boru İç Çapı [m]
D	: Yay Tel Çapı [m]
D_0	: Orifis Çapı [m]
e	: Doğal Logaritma Tabanı
F	: Sürtünme Enerjisi [J/kg]
F_m	: İki Faz Sürtünme Çarpanı
g	: Yer Çekim İvmesi [m/s^2]
G	: Kütlesel Akı [kg/m^2s]
G_0	: Kararlı Durumdaki Kütlesel Akı [kg/m^2s]

$\bar{g}$	: Boyutsuz Yer Çekim İvmesi
$\bar{G}$	: Boyutsuz Kütlesel Akı
h	: Isı Taşınım Katsayısı [W/m ² K]
h_0	: Kararlı durumda ki Isı Taşınım Katsayısı [W/m ² K]
h_L	: Sıvı Faz Entalpisi [J/kg]
h_G	: Gaz Fazı Entalpisi [J/kg]
h_{LG}	: Buharlaştırma Gizli Isısı [J/kg]
h_{IF}	: İki Faz Entalpisi [J/kg]
$\bar{h}_L$	: Boyutsuz Sıvı Faz Entalpisi
$\bar{h}_G$	: Boyutsuz Gaz Fazı Entalpisi
h_{LGO}	: Kararlı Durumdaki Sıvı-Gaz Entalpisi [J/kg]
h_y	: Yay Adımı [m]
I	: Akım [Amper]
J	: Volümetrik Akı [m/s]
K_{IF}	: Fazlar Arası Kayma Faktörü
K_1	: Daralma Katsayısı
L	: Test Borusu Uzunluğu [m]
L_a	: Ana Besleme Tankı Çıkışı İle Dengeleyici Tank Girişi Arasında ki Uzunluk [m]
L_g	: Dengeleyici Tank Çıkışı İle Test Borusu Girişi Arasında ki Uzunluk [m]
m	: Kütle [kg]
$\dot{m}$	: Kütlesel Debi [kg/s]
m_{IF}	: Toplam Kütle [kg]
m_h	: Isıtıcı Test Borusunun Kütlesi [kg]
$\dot{m}_a$	: Düzeltilen Akışkan Debisi [kg/s]
$\dot{m}_b$	: Rotametreden Okunan Debi Değeri [kg/s]
n	: Ölçüm Elemanından okunan Ondalık Sayı
Nu	: Nusselt sayısı
N_Q	: Boyutsuz Parametre
N_P	: Boyutsuz parametre

N_{TS}	: Boyutsuz Parametre
P	: Basınç [Bar]
ΔP	: Basınç Düşümü [Bar]
ΔP_k	: Kaynamalı Test Borusunda ki Basınç Düşümü [Bar]
ΔP_{kon}	: Konvektif İvmeli Akış Durumunda ki Basınç Düşümü [Bar]
ΔP_y	: Yer Çekim Kuvvetinin Etkili Olduğu Basınç Düşümü [Bar]
P_a	: Ana Besleme Tank Basıncı [Bar]
P_0	: Orifis Çıkış Basıncı [Bar]
ΔP_A	: İvmeli Harekette ki Basınç Düşümü [Bar]
P_{d0}	: Doygun ve Kararlı Haldeki Basınç [Bar]
$\bar{P}$	: Boyutsuz Basınç
ΔP_0	: Orifiste ki basınç Düşümü [Bar]
ΔP_{L0}	: Kararlı Durumda ki Sıvı faz basınç Düşümü [Bar]
q	: Isı Akısı [kW/m ²]
q'	: Elektriksel Isı Akısı [kW/m ²]
q_s	: Test Borusu Yüzeyinden İletilen Isı Akısı [kW/m ²]
q_0	: Kararlı Durumda ki Isı Akısı [kW/m ²]
q'_s	: Test Borusunda Elektriksel Olarak Üretilen Isı Akısı [kW/m ²]
Q	: Isı Gücü [kW]
Q'_0	: Elektriksel Güç [kW]
Q_{L0}^2	: Boyutsuz Parametre
r	: Yarıçap [m]
r_g	: Kuruluk Derecesine bağlı Parametre
r_a	: Kuruluk Derecesine bağlı Parametre
r_f	: Kuruluk Derecesine bağlı Parametre
R	: Ölçüm Elemanının Maksimum Değeri
Re	: Reynolds Sayısı
S	: Test Borusu Çevresi [m]
t	: Zaman [s]

Δt	: Zaman Değişimi [s]
ΔT	: Sıcaklık Farkı [$^{\circ}\text{C}$]
T	: Sıcaklık [$^{\circ}\text{C}$]
T_s	: Cidar Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]
T_d	: Doyma Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]
ΔT_s	: Cidar Sıcaklık Farkı [$^{\circ}\text{C}$]
T_f	: Akışkan Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]
$\bar{T}$	: Boyutsuz Sıcaklık
u	: Elektriksel Gerilim [Volt]
U	: Hız [m/s]
U_{LG}	: Bağıl Hız [m/s]
U_H	: Homojen Akış Durumunda ki Hız [m/s]
U_g	: Homojen Akış Durumunda ki bağıl Hız [m/s]
U_{sG}	: Yüzeysel Gaz Hızı [m/s]
U_{sL}	: Yüzeysel Sıvı Hızı [m/s]
$U_{\max}$	: Maksimum Akışkan Hızı [m/s]
U_{GJ}	: Sürüklenme Hızı [m/s]
$\bar{U}$	: Boyutsuz Hız
v	: Özgül Hacim [m^3/kg]
v_m	: Ortalama Özgül Hacim [m^3/kg]
V	: Hacim [m^3]
V_{AG}	: Dengeleyici Tankta Buharlaştırmadan Dolaylı Sıvı Fazında ki Akışkanın Hacminde Oluşan Azalma [m^3]
V_{G0}	: Kararlı Durumda ki Gaz Hacmi [m^3]
V'	: Boru Net İç Hacmi [m^3]
$\dot{V}$	: Hacimsel debi [m^3/s]
W	: Termodinamiksel İş [kJ/kg]
z	: İki termokupul Arasında ki Uzunluk [m]
Δz	: Her bir Hesap Adımında ki Uzunluk [m]
$\bar{Z}$	: Eşdeğer Uzunluk [m]
α	: Boşluk Oranı (Void Fraction)

α_1	: Belirsizlikle İlgili Katsayı
β	: Kısıtlayıcı Parametresi
β_1	: Belirsizlikle İlgili Katsayı
φ	: Boyutsuz Parametre
θ	: Boru Kanalının Yatayla Yaptığı Açı [Derece]
μ	: Dinamik Viskozite [kg/ms]
μ_{IF}	: İki Faz Dinamik Viskozitesi [kg/ms]
ν	: Kinematik Viskozite [m ² /s]
ρ	: Yoğunluk [kg/m ³]
ρ_a	: Ana Besleme Tankında ki Sıvı Akışkanın Yoğunluğu [kg/m ³]
ρ_m	: Ortalama Yoğunluk [kg/m ³]
ρ_u	: Suyun Yoğunluğu [kg/m ³]
ρ_{R11}	: R 11 'in Yoğunluğu [kg/m ³]
ρ_h	: Rotametre deki Hareketli Elemanın Yoğunluğu [kg/m ³]
$\bar{\rho}$	: Boyutsuz Yoğunluk
σ	: Sıvı-Buhar Ara Yüzeyindeki Gerilim [N/m ²]
σ_{itp}	: Belirsizlikle İlgili Terim
σ_{par}	: Paralaks Açısı İle İlgili Belirsizlik Terimi
σ_s	: Sık Sık yapılan ölçümlerle İlgili Belirsizlik Terimi
σ_s	: Ortalama Değerle İlgili Belirsizlik Terimi
σ_a	: Hassasiyetle İlgili Belirsizlik Terimi
σ_l	: Lineerlikle İlgili Belirsizlik Terimi
σ_h	: Histerezlikle İlgili Belirsizlik Terimi
σ_T	: Tekrarlanma İle İlgili Belirsizlik Terimi
σ_c	: Kalibrasyonla İlgili Belirsizlik Terimi
σ_{all}	: Toplam hata Oranı İle İlgili Terim
σ_{sys}	: Sistemik Hata Analizi İle İlgili Terim

$\sigma_x(\%)$	: Ölçüm Düzenekleri İle İlgili Belirsizlik Terimi
τ	: Geçiş Zamanı [s]
τ_0	: Cidardaki Kesme Gerilmesi [N/m ²]
δ	: Birim Eleman Uzunluğu [m]
δ_z	: Boru Kanalının Birim Uzunluğu [m]
$\delta_x(\%)$	: Ölçüm Düzenekleri İle İlgili Belirsizlik Terimi
γ	: İzentropik Üs
π_1	: Boyutsuz Parametre
π_2	: Boyutsuz Parametre
x	: Kuruluk Derecesi
x_s	: Statik Kuruluk Derecesi
x_D	: Dinamik Kuruluk Derecesi
x_V	: Hacimsel Kuruluk Derecesi
$\bar{x}$	: Ortalama Data Değeri
x'	: Ölçüm Elemanlarından Alınan Gerçek Okuma Değeri

İndisler

c	: Kritik
ζ	: Çıkış
d	: Doymuş
e	: Efektif
F	: Sürtünme
g	: Giriş
G	: Gaz
L	: Sıvı Fazı
o	: Orifis
s	: Cidar
S	: Dengeleyici Tank
sis	: Sistem

1.GİRİŞ

Kaynamalı iki fazlı akışlar ve bunların sebep oldukları kararsız akış olayları; buhar santralleri, soğutma santralleri, termosifon reboyerleri, kimyasal üretim ünite ve rafinerileri gibi çeşitli endüstriyel sistemlerde kullanılan ısı eşanjör ve ekipmanlarının işletilmesi ve dizaynında karşılaşılan önemli problemlerdendir [1,2].

Bir kanal içerisinde sürekli akan bir akışkanın akım şartları sürekli durumdan çok az değiştirildiğinde akım başka bir sürekli duruma asimptotik olarak yaklaşıyorsa bu akıma kararlı akım, akım başka bir sürekli duruma asimptotik olarak yaklaşıyor yada akımın debi, basınç, sıcaklık gibi hidrodinamik ve ısı özelliklerinde periyodik salınımlar yani osilasyonlar meydana geliyorsa bu akıma da kararsız akım adı verilmektedir [3].

İçerisinde sıvı akışkanın ısıtıldığı ve kaynamaya başladığı bütün sistemlerde geri besleme (feed back) mekanizmaları ile oluşan kararsızlıklar sistemin ısı transfer karakterini etkilediğinden sistemde kontrol problemlerine, kaynama krizlerine, mekanik titreşimlere ve özellikle nükleer santrallerde yakıt donanımlarında bulunan boru cidarlarının termal yorulmalardan dolayı deforme olarak bünyelerindeki radyoaktif malzemenin çevreye yayılmasına neden olacağından bu sistemlerin tasarım ve dizaynında dikkatle incelenmesi gereken bir problemdir [5].

İki fazlı akışlarda kararsızlıklar farklı tesirler sonucu farklı karakterlerde ortaya çıkmaktadırlar. Ortaya çıkış nedenleri ve karakterleri farklı olduğundan kontrol veya yok etme metotları da farklıdır. Bu nedenle her tip kararsızlığı oluşturan nedenlerin ve kararsızlığın gelişiminin temel mekanizmalarının bilinmesi gerekir. Halen iki fazlı akış kararsızlıklarının ortaya çıkış mekanizmaları üzerinde genelde kabul edilmiş

teorik bir açıklama olmasa bile iki fazlı akış kararsızlıkları statik ve dinamik kararsızlıklar olmak üzere iki ana grupta incelenebilmektedir [6,7,8].

Statik kararsızlıklar dinamik kararsızlıklardan akımın iki sürekli durum arasında değişmesi ile ayrılmaktadırlar. Bu tip kararsızlıklara örnek olarak Ledinegg kararsızlığı, akış rejiminin değişmesinden oluşan kararsızlık, kaynama krizleri, buhar patlaması (chugging) ve buhar fışkırması (geysering) olayları gösterilebilir. Dinamik kararsızlıklar akış değişkenlerinin bir ortalama değer etrafında osilasyonlar oluşturmaları ile tespit edilebilmektedirler [9, 10].

Sistemin ataleti ve geri besleme tesirleri dinamik kararsızlığın oluşmasında önemli rol oynamaktadır. Sistem bir servo-mekanizmaymış gibi hareket eder. Osilasyonların periyot ve genlikleri zamanla artabilir, azalabilir veya değişmeyebilir. Akustik osilasyonlar, termal osilasyonlar, basınç düşümü tipi osilasyonlar ve yoğunluk değişim tipi osilasyonlar sayabileceğimiz başlıca dinamik kararsızlık olaylarını oluşturmaktadırlar İki fazlı akışlar üzerine ilk ciddi çalışma bir Alman tıp doktoru olan J. G. Leidenfrost tarafından yapılmıştır. Leidenfrost, sıcak bir yüzey üzerinde kaynayan küçük sıvı kütlelerini incelemiştir. Buhar jeneratörlerinin gelişmesiyle beraber endüstride buhar kullanımının artması iki fazlı akışların bilimsel çalışmalarda daha fazla yer almasına neden olmuştur. Alman mühendis H. Lorentz (1909), homojen bir akışkan olarak borulardaki sıvı-gaz karışımından oluşan iki fazlı akış ortamını araştıran ilk araştırmacılardandır. İki fazlı akış kararsızlıkları ile ilgili ilk ciddi çalışmayı M. Ledinegg yapmıştır. M. Ledinegg makalesinde bazı buhar jeneratörlerinin kullanılamaz hale gelmesine neden olan ve daha sonraları literatürde kendi adıyla anılacak olan Ledinegg kararsızlık tipini ortaya çıkartmıştır. Davidov (1956), elektriksel olarak ısıtılan test borularını kullanarak akış osilasyonlarını gözlemlemiştir. Davidov yaptığı çalışma sonucunda osilasyonlar için şu sonuca varmıştır . Birbiriyle bağlantılı olan kanallarda nispeten aşırı soğutma oranının artışı sistemi daha kararlı yapıcı bir etkiye sahip iken çıkış

kısıtlayıcısı ise sistemi daha kararsızlaştırıcı bir etkiye sahiptir. Bergles ve diğerleri (1972), kararsızlığın hangi şartlarda ortaya çıkacağını ve ne gibi özellikler gösterebileceklerini deneysel bir çalışma ile araştırmışlardır. Aynı çalışmalarında farklı karakterdeki akış kararsızlıklarının sistematik olarak sınıflandırılmasına yönelik faydalı önerileri okuyuculara sunmuşlardır. Zahn (1964), iş yapan akışkanı R-12 olan yatay bir boruda buharlaşma sonucunda oluşan iki fazlı akış olayını incelemiştir. Merilo (1979), bir denge deformasyon metodunu kullanarak yatay borularda oluşan iki fazlı akış kritik ısı limitlerinin modelini yapmak için bir parametre elde etmeye çalışmıştır [11,12,13,14,15,16,17].

S. Kakaç ve diğerleri (1981), aşırı soğutmanın iki fazlı akış kararsızlıklarına olan etkilerini araştırmışlardır. İki fazlı akışlar için geliştirdikleri matematiksel model ile teorik ve deneysel sonuçları mukayese etmişlerdir. Geliştirdikleri matematiksel model ile elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlar arasında nicelik yönünden olmazsa bile nitelik yönünden tam bir uygunluğun olduğunu ortaya çıkarmışlardır. V. Çiftçi (1981), dikdörtgen kesitli bir kanalda sıvı-gaz fazlarından oluşan iki fazlı akış çalışmasını yapmıştır. Deneysel çalışma süresince kanal tabanı iç yüzeyi boyunca oluşan film tabakasının davranışlarını araştırarak ampirik bir ifade yardımıyla film tabakasını matematiksel olarak karakterize etmeye çalışmıştır. Lahey (1981) ve Bergles (1981), literatürde iki fazlı akış kararsızlıkları ile ilgili yapmış olduğu yoğun çalışmalarla dikkati çeken Boure'nin elde etmiş olduğu sonuçlara uygun olan ancak daha çok kararsızlık tiplerini içeren ve bu güne kadar yapılmış olan en geniş sınıflandırmayı yapmışlardır. Becker ve diğerleri (1981), 3650 mm uzunluğunda dairesel bir kanalda kaynayan su akışı için dry-out olayını incelemiştir. Eksenel ısı akısı profillerinin üniform ısı akısındaki profiller de olduğu gibi toplam sekiz farklı karakterde ortaya çıktıklarını belirlemişlerdir [18,19,20,21,22].

T. Doğan ve diğerleri (1983), yukarı akışlı tek bir kanal sisteminde zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı akış kararsızlıklarının analizini yapmışlardır. Böyle bir sistemde zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı iki fazlı akış ortamında oluşan geçici iki fazlı akış davranışları ile kararlı durum davranışlarının tahmin edilebildiği nümerik bir model geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu model homojen iki fazlı akış kabulüne ilaveten fazlar arasında termodinamiksel dengenin olduğunu kabul eden bir teorik modeldir. Analizlerini iki fazlı bölgede sıkıştırılabilirlik etkilerini, bulk kaynamasında fazlar arası ara yüzeyde oluşan değişikliklerin etkilerini ve ısıtıcı cidar termal kapasitesinin etkilerini ortaya çıkarmak için genişletmişlerdir. Model sistemin davranışları üzerine debi, aşırı soğutma girişi ve ısı gücünün etkilerini araştırmak için de kullanılmıştır. Mukayese amacıyla deneysel bir çalışmada zorlanmış konveksiyonlu yukarı akışlı ve elektriksel olarak ısıtılan tek bir kanal sisteminde yapılarak yine kütleli debinin, aşırı soğutma girişinin ve ısı akısının birer fonksiyonu olarak kararlı durum çalışma karakteristiklikleri ve kararlı - kararsız bölgelerin belirlenmesine yönelik çalışmalar yürütmüşlerdir [23].

Avram Bar - Choen ve diğerleri (1983), yatay boyler borularındaki çevresel cidar sıcaklık profillerinde karşılaşılan belirsizliğin giderilmesinin bugün için çok önemli bir olay olduğunu ifade etmişlerdir. İzotermal olmayan çok yüksek çevresel sıcaklık yükselmeleri ile termal gerilmelerinde arttığını ve böylece hem buhar üreten ısı değiştiricisindeki boruların çalışma ömrünü hem de çalışma limitlerini kısıtlayarak ekonomik açıdan da birer tehdit unsuru oldukları ısrarla beyan edilmiştir. Bu çalışmada boyler borularında iki fazlı akış rejimlerinin detaylı bir analizi ve elde edilen sonuçların geniş bir kritiği yapılmıştır. Burada karşılaştığımız değerlendirmelerden de anlaşıldığı gibi; çevresel cidar sıcaklık farkındaki azalmanın katmanlı akışın sona ererek süreksiz akıştan dairesel akışa geçişten dolayı ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Burada iki fazlı akış rejimlerinin analizinden başka izotermal olmayan çevresel değişime debi ve eksenel değişimin de önemli oranda rol oynadığı belirlenmiştir [24].

A. Menteş ve diğerleri (1983), farklı ısı transfer konfigürasyonlarına sahip ısıtıcı test borularının iş yapan akışkanı R- 11 olan zorlanmış konveksiyonlu yukarı akışlı tek bir açık kanal çevriminde iki fazlı akış kararsızlıklarına olan etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar beş farklı ısı gücü, altı farklı iç yüzey konfigürasyonlarına sahip ısıtıcı boru elemanları için yürütülerek bu parametrelerde yapılan değişikliklerin kararsızlıklar üzerine ne tarz etkiler yaptıkları tespit edilmiştir. Çalışmaları sonunda elde edilen verilere dayanılarak içerisinde ısı transfer yüzey arttırım elemanları bulunan ısıtıcı test borularında oluşan iki fazlı akışın boş borularda oluşan iki fazlı akışlardan daha kararlı olduğu tespit edilmiştir. Tuncay Yılmaz (1983), iki fazlı akış olayları detaylı bir şekilde incelenerek iki fazlı akış kararsızlık olaylarının temel mekanizmalarını matematiksel bağıntılar yardımıyla açıklanmaya çalışılmıştır [25,26].

P. Y. Lin ve T. J. Hanratty (1987), yatay borularda hava - su akışı için akış rejimlerine boru çapının etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Bu çalışmada önceki çalışmalardan farklı olarak akış yönüne bağlı olarak iki farklı yerde basınç dalgalanmalarının ölçüleri slug akışı keşfetmek için kullanılmıştır. Düşük gaz hızlarında slugların başlaması için ihtiyaç duyulan sıvı akışı boru çapından oldukça etkilenmektedir. Yine slug akışın başlaması lineer kararsızlığa da bir ölçüde bağlı olduğu ifade edilmiştir. Yüksek gaz hızlarında akış rejimlerindeki dönüşümlerin boru çapından hemen hemen bağımsız olduğu ve bununda dalgaların dönerek birleşmesi sonucu oluşan ve lineer olmayan bir mekanizma ile açıklanabileceğini vurgulamışlardır. Dairesel akış rejiminde slugların başlaması daha önceki araştırmalarında ifade ettiklerinden farklı olarak çok daha düşük sıvı faz akışlarında meydana geldiği gözlenmiştir. Yine katmanlı akıştan dairesel akışa geçiş olayları küçük çaplı borularda büyük çaplı borulardakinden oldukça farklılık arz ettiği belirtilmiştir [27].

Wong ve diğerleri (1990), yatay bir boruda katmanlı akışı ortaya çıkaran mekanizmalar üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yatay kanallarda akışa dik yönde hem buhar hem de sıvı fazları üzerine yer çekim kuvvetinin etkisinden dolayı asimetrik bir faz dağılımına ilaveten muhtemelen bir faz ayrışmasının da meydana geldiğini ispat etmişlerdir. Xu ve Chen (1990), dikey bir sistemde yoğunluk değişim tipi kararsızlığın deneysel çalışma yapmışlardır. Test akışkanı olarak suyu kullanmışlardır. Orta basınç seviyelerinde ve üniform ısı güçlerinde deney yapmışlardır. Deneysel sistemleri kapalı çevrim özelliğinde idi. Toplam sistem basınç düşümüne tekabül eden kütsel debi ve osilasyon eğrilerini hazırlayarak kararlılık sınırlarını osilasyonların periyotları üzerine etkili olan parametreleri incelemişlerdir. Wang ve diğerleri (1990), iş yapan akışkanı su olan yüksek basınçlı bir çevrimde deneysel çalışma yapmışlardır. Yoğunluk değişim osilasyonlarının üzerine etkili olan sistem parametrelerini araştırmışlardır. Aynı çalışmada yoğunluk değişim osilasyonları için elde ettikleri deneysel sonuçlarla sayısal sonuçları mukayese etmişlerdir. Gao ve diğerleri (1990), tabii sirkülasyonlu düşük basınç ve düşük kuruluk derecesinde iki fazlı akış kararlılık şartlarını incelemişlerdir. Söz konusu çalışmalarında termal, hidrolik ve nötronik (yani nötr karakterde olan) parametreler arasındaki rotatif yani zıt etkileşimden dolayı tabii sirkülasyonlu iki fazlı akıştaki yoğunluk değişim tipi osilasyonlarının daha şiddetli olduklarını ortaya çıkarmışlardır [28,29,30,31].

Wang ve Chen (1990), basınç düşümü tipi osilasyonlarını orta-yüksek basınçlı bir sistemde incelemişlerdir. Onlar farklı kanat çaplarının çıkış kısıtlayıcısı çaplarına oranlarını göz önüne alarak bu çap oranlarının sadece belirli değerlerinde osilasyonların oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bu çap oranları arttıkça negatif eğim bölgesinin büyüklüğünün artarak sistemin daha kararsız hale geldiğini dikkatimize sunmuşlardır. C.P. Tso -1 ve S. Sugawara (1990), yatay ve dairesel bir kanalda oluşan iki fazlı akış ortamında film kalınlığı ve sıvı film akışının temel karakteristiklerini tespit edebilecek kabiliyette tasarlanmış bir bilgisayar programı

tasarlanarak nümerik bir çalışma yapılmıştır. Sıvı fazındaki film tabakası kalınlığı için tam gelişmiş akıştaki kararlı durum sonuçları, 3.9 m uzunluğuna 32 mm 'lik çapa sahip yatay bir boruda oluşturulan hava - su akışı için yapılan deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslanarak geliştirdikleri modelin geçerliliğini tespit etmişlerdir. S.Kakaç ve diğerleri (1990), çeşitli kaynamalı kanal sistemlerinde karşılaşılan akışlardaki yoğunluk değişimi, basınç düşümü ve termal tipteki osilasyonlar dan oluşan üç farklı iki fazlı akış dinamik kararsızlıklarının tanımlanabilmesi ve araştırılması amacıyla literatürde bu konu ile ilgili son zamanlarda araştırmacılar tarafından yapılmış deneysel ve sayısal çalışmaların bir özetini göstermişlerdir [32,33,34].

Liu ve Kakaç (1991), zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı dikey bir kanalda iki fazlı akış kararsızlıkları üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Test borusuna farklı geometrik konfigürasyonuna sahip ısı transfer yüzey artırım elemanları yerleştirerek deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deneylerini her bir boru elemanı için sabit ısı gücünde dört farklı akışkan giriş sıcaklığına göre yapmışlardır. Padki ve diğerleri (1991), zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı bir sistemde basınç düşümü ve termal kararsızlıkları deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre yoğunluk değişim tipi osilasyonlarla basınç düşümü tipi osilasyonların süperimposed olduklarını gözlemlemişlerdir. Drift-flux modeline dayandırılan nümerik bir modeli iki fazlı akış zorlanmış konveksiyonlu kararlı durum karakteristikliklerinin ve basınç düşümü tipi osilasyonlarla beraber termal osilasyonların tespiti için geliştirmişlerdir. Deneysel ve teorik sonuçları karşılaştırdıklarında iyi bir uyum düzeyinin elde edildiğini tespit etmişlerdir [35,36].

Liu ve Kakaç (1991), konvektif kaynamalı yukarı akışlı bir sistemde termal osilasyonların deneysel bir çalışmasını yapmışlardır. Kütlesel debi, ısı gücü, girişteki akışkan sıcaklığı ve akış üzerinde sıkıştırılabilir hacmin termal osilasyonlar üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Chen ve Zheng (1991), $200 \div 530 \text{ kw / m}^2$ ısı

akıllarında, $480 \div 1200 \text{ kg / m}^2 \cdot \text{s}$ 'lik kütle akıllarında, $9.8 \div 22.6 \text{ Mpa}$ 'lik basınç şartları altında $\phi 25 \times 2 \text{ mm}$ ebatlarında 2 m 'lik boya sahip yatay bir borudaki kaynamalı ısı transferinde oluşabilecek düzensizliklerle ilgili deneysel çalışma yapmışlardır. Deneylerini yüksek basınçta, elektriksel olarak ısıtılan ve iş yapan akışkanı su olan bir sistemde yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda cidar sıcaklıklarının boru boyunca farklı noktalarda değişik karakterlerde ortaya çıktıklarını gözlemlemişlerdir. Boru üst cidar sıcaklığının iş yapan akışkan olan suyun test bölümüne girişte aşırı soğutma miktarındaki artışla kuruluk derecesi maksimum $x= 0.27$ değerine ulaştıktan sonra akış yönünde aşağı doğru buhar miktarında meydana gelen artışla beraber boru içindeki akışkan hızında meydana gelen artıştan dolayı tekrar kademeli bir şekilde azaldığını tespit etmişlerdir. Kaynamalı yatay borularda gerçekleşen ısı transfer olayında oluşan düzensizlik önce test borusu üst cidarı boyunca fark edilmiştir. Aynı olayın boru alt cidarında tedricen gerçekleştiğini belirlemişlerdir [37,38].

M. M. Padki ve diğerleri (1991), Basınç düşümü osilasyonları ile Ledinegg kararsızlığını teorik olarak incelemişlerdir. Bunun için bir integral formülasyonu iki fazlı akışın söz konusu olduğu sistemleri simüle etmek için geliştirmişlerdir. Gerçek manada iki fazlı akış rejiminden bağımsız olan kararsızlık kriterleri hem basınç düşümü osilasyonları için hem de Ledinegg kararsızlığı için geliştirilmiştir. Çalışmada anlaşılmaktadır ki basınç düşümü tipi osilasyonları için limitsel çevrimler bir süper Hopf Bifurcation ' undan sonra oluşmaktadır. Ledinegg kararsızlığının ve basınç düşümü tipi osilasyonlarının temel mekanizmalarını belirleyebilmek amacıyla daha geniş bir analiz yapılmıştır. Gerek Ledinegg kararsızlığı gerekse basınç düşümü tipi osilasyonlarının Bifurcation açısı teorisine dayanan ve grafiksel formda hazırlanan çalışmalar sunulmuştur [39].

M. M. Padki ve diğerleri (1991), iş yapan akışkanı R-11 olan tek ve dikey bir elemanında zorlanmış konveksiyonlu kaynama durumundaki termal ve basınç

düşümü tipi kararsızlıkları deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Deneyler Nikel - krom alaşımından imal edilmiş 9.5 mm 'lik dış çapa ve 7.5 mm 'lik iç çapa sahip iki boru elemanında yapılmıştır. Bu test borularından biri izolesiz halde iken diğer test borusu Linde yüksek akıllı izolasyon ile izoleli kaplı olduğu halde deneysel çalışmalara başlanarak bu şartlar altında basınç düşümü tipi ve termal osilasyonların yanı sıra yoğunluk değişim osilasyonları ile beraber aynı anda ortaya çıkan süperimposed olarak adlandırılan basınç düşümü tipi osilasyonları gözlemlenmiştir. Kaynamalı bir kanalda basınç düşümü tipi ve termal osilasyonları ile beraber zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı iki fazlı akış olayları için kararlı durum karakteristikliklerinin belirlenmesi amacıyla nümerik bir model geliştirilmiştir. Nümerik model çalışmasında drift - flux modeli kullanılarak deneysel ve teorik sonuçlar arasında istenilen seviyede benzerlikler elde edilmiştir [40].

Yine Padki ve diğerleri (1992), dinamik sistem perspektif teorisinden basınç düşümü tipi osilasyonlarla beraber Ledinegg kararsızlığını araştırmışlardır. İki fazlı akış sistemlerini modüle etmek amacı ile bir integral fomülasyonu geliştirmişlerdir. França ve diğerleri (1992), yatay iki fazlı akışların analizi için drift flux tekniklerinin kullanımı adlı çalışmalarında çeşitli akış rejimlerine sahip hava / su iki fazlı akışı için yeni datalar elde etmişlerdir. Çalışmaları sonunda drift flux modellerinin elde ettikleri dataları simüle etmişlerdir. Qian Wang ve diğerleri (1992), yoğunluk değişim osilasyonlarını karakterize etmek amacıyla deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışmalarını yüksek basınçlı zorlanmış konveksiyonlu ve iş yapan akışkanı su olan dikey bir boru sisteminde yürütmüşlerdir. Deneysel çalışmaları sonucunda yoğunluk değişim tipi osilasyonları ile ilgili olarak sistem basıncının, akışkan giriş debisinin ve akışkan aşırı soğutma girişinin bu osilasyonlar üzerine yaptıkları etkileri belirlemeye çalışmışlardır. Basınç ve debi artışıyla sistemin daha kararlı hale geldiğini, aşırı soğutma girişinin ise sistem üzerine oldukça kompleks bir etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir [41,42,43].

Xiao ve diğeri (1993), yüksek basınçlı çalışma şartları altında paralel kaynamalı kanallarda yoğunluk değişim tipi osilasyonlarının deneysel ve analitik bir modelini yapmaya çalışmışlardır. Ayrıca basınç düşümü tipi, termal tipteki osilasyonlarla beraber farklı frekanslara sahip yoğunluk değişim tipi osilasyonlarını inceleyerek farklı özellikler arz eden iki akış kararsızlıklarını gözlemlemişlerdir. You Ding (1993), doktora çalışmasında yatay konvektif kaynamalı bir boru sisteminde iki fazlı akış olaylarını deneysel olarak incelemiştir. Söz konusu çalışmada klasik ΔP -G koordinat sistemi yerine bazı boyutsuz parametreler geliştirerek yeni bir koordinat sisteminde verileri değerlendirmiştir. Dinamik kararsızlık olaylarının incelenmesine ilaveten bu çalışmada ayrıca katmanlı akış incelenmiştir. Z. Fan ve diğeri (1993), yatay bir borudaki gaz - sıvı akışında oluşan slugların kararlı ya da kararsız olarak akış ortamından geçişiyle ilgili ortaya çıkan basınç değişimlerinin karakterleri gösterilmiştir. Slugların arkasındaki sıvı faz hızında meydana gelen ani bir değişim ile beraber slug 'ın önündeki hidrolik atlamadan dolayı oluşan basınç değişimlerini titizlikle ele alan bir model ile deneysel çalışmalar arasında iyi bir uyum düzeyi yakalamışlardır [44,45,46].

K. E. Crowe ve P. Griffith (1993), ısıtılan yatay borularda aralıklı akış durumundaki dry - out limitleri, $146 \text{ kw} / \text{m}^2$ 'lik ısı akıları olan ve önemli endüstriyel alanlarda kullanılan benzer ekipmanlar için atmosferik basınçta yatay olarak dizayn edilmiş 57 mm 'lik bir kanalda belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada slugların geçiş zamanlarına göre değerlendirilen film akışının drenaja olması, buharlaşması ve slug frekansının ölçülebildiği hassas ve birleşik bir model için gerekli bileşenler verilmiştir. Slugların geçiş zamanlarını karakterize eden film akışında kabarcıkların çekirdekleşme etkisi ile ilgili yapılan inceleme sonucu kabarcıklardaki çekirdekleşme etkisinin önemli bir fonksiyon görevi yapmadığını ortaya çıkarılmıştır. Dry - out sınırının tahmininde bu model ile genel bir yaklaşım sağlanarak dataların ısı akısına bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir [47].

P. L. Spedding ve D. R. Spence (1993), iki fazlı gaz - sıvı akışında oluşan akış rejimleri incelenmiştir. Deneysel datalarını 0.0935 m 'lik iç çapa sahip yatay bir boruda müşterek akımlı hava - su akışı için elde etmişlerdir. Akış rejimleri ile alakalı gözlemlerini görsel video çekimleri, basınç dalgalanma karakteristiklikleri ve deneysel çalışma esnasında elde edilen basınç düşümü datalarının birer kombinasyonu ile belirlenmiştir. Akış rejimleri dönüşümlerinin tahmin edilebilmesine yönelik geliştirilen teorik ve ampirik modeller özellikle bu akış rejimlerinin fiziksel özellikleri ile akışın gerçekleştiği ortamların geometrik yapısında yapılması gerekli olabilecek değişiklikleri ifade etmişlerdir [48].

H. T. Liu ve diğerleri (1993), yukarı akışlı konveksiyonlu kaynamalı bir sistemde geçiş ve termal osilasyonların karakteristiklikleri deneysel olarak incelenmiştir. Hem hidrodinamik olarak kararlı hem de kararsız şartlarda geçiş kaynaması bölgesinde boru cidarındaki termal dalgalanmaları ölçmeye çalışılmıştır. Hidrodinamik kararsızlık şartları altında büyük genlik ve periyotlara sahip sürekli termal dalgalanmaları gözlemleyerek bu tip termal dalgalanmaları termal kararsızlık olarak adlandırmışlardır. Termal osilasyonların cidar ısı kapasitesi ve konvektif geçiş kaynaması ile ilgili olarak ortaya çıktıkları ifade edilmiştir. Yine bu çalışmada hidrodinamik olarak kararsız olan bir sistemin daha düşük kritik ısı akısı CHF limitlerine sahip olacağı açıklanmıştır. Baohua Xu ve Xue - Jun Chen (1993), dikey yukarı akışlı bir boruda iki fazlı akış yoğunluk değişim tipi kararsızlığın deneysel bir araştırması yapılmıştır. Söz konusu sistemde üniform olarak ısıtılan test borusu ve yüksek basınçlı su ortamında yoğunluk değişim osilasyonları incelenmiştir. Giriş kütle debisine karşılık gelen kapalı çevrim toplam sistem basınç düşümü ve osilasyon eğrileri hazırlanmıştır. Yoğunluk değişim tipi kararsızlıklar için CHF sınırları ve osilasyon periyotları üzerine test parametrelerinin etkileri geniş parametre alanında incelenmiştir. Yoğunluk değişim tipi osilasyonlar süresince test borusu çıkış cidar sıcaklığının zamanla dalgalandığı ifade edilmiştir. Aynı zamanda sıcaklık osilasyon genliğinin küçük buna karşılık frekansının yüksek olduğu tespit

edilmiştir. Belirli bir zaman geçtikten sonra termal yorgunluktan dolayı bir burn-out olayının meydana geldiği gözlenmiştir [49,50].

Y. Ding ve diğerleri (1993), iş yapan akışkanı R-11 olan yatay kaynamalı bir boru sisteminde iki fazlı akış kararsızlıkları deneysel olarak incelenmiştir. Sistemin iç karakteristiklikleri, sistem basıncı (P_{sis}), giriş sıcaklığı (T_g), ısı gücü (Q) ve çıkış kısıtlayıcısı çapının boru çapına oranı (β) gibi farklı sistem parametreleri altında elde edilmeye çalışılmıştır. Bu parametrelerin sistemin kararlı durum karakteristikliklerine olan etkileri ile dinamik kararsızlıklar ve bağlı oldukları çeşitli sistem parametrelerinin belirlenmesine çalışılmıştır. Her bir deneysel çalışma adımında kütleli debi ($\dot{m}$) değerleri tamamen kaynama bölgesini de kapsayacak şekilde değiştirilmiştir. Grafiksel formda hazırlanan sonuçlar literatürdeki sonuçlarla kıyaslanarak iyi bir uyumun sağlandığı açıklanmıştır [51].

Q. Wang ve diğerleri (1994), iş yapan akışkanı su olan dikey bir dairesel kanalda yoğunluk değişim tipi osilasyonlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Stennings, A. H. (1994), dikey kaynamalı bir kanalda yoğunluk değişimi, basınç düşümü ve termal osilasyonları araştırmışlardır. Mayinger, F. (1994), yaptığı araştırmada termal osilasyonları tespit etmiştir. S. Kakaç ve diğerleri (1994), dinamik kararsızlıkları ortaya çıkaran bir çalışma yapmışlardır. C. D. Pakapoulus ve diğerleri (1994), buhar jeneratörlerinde iki fazlı akış dinamik kararsızlıklarını incelemişler ve yoğunluk değişim tipi kararsızlıklar üzerine ısı akısı ve kütleli debinin etkilerini incelemişlerdir. Aynı çalışmada geçici iki fazlı akış korunum denklemlerinin teorik bir analizini yapmışlardır. Yine Menteş ve diğerleri (1994), iki fazlı akış dinamik kararsızlıkları üzerine aşırı soğutma girişi ve ısı transfer yüzey artırım elemanlarının etkilerini ortaya çıkarmak amacıyla deneysel bir çalışma yapmışlardır. S. Kakaç ve diğerleri (1994), zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı dikey bir boruda termal kararsızlıkları araştırmışlardır. Deneylerini çeşitli ısı güçlerinde, giriş sıcaklıklarında ve farklı çapa sahip ısıtıcı borularda yaparak teorik

bir model geliştirmişlerdir. Elde ettikleri teorik sonuçlarla deneysel sonuçlar arasında oldukça uygun benzerlikler sağlamışlardır. Son zamanlarda M. Xiao ve diğeri (1994), iş yapan akışkan su olan yüksek basınçlı sistemlerde meydana gelen dinamik kararsızlıkları deneysel olarak incelemişlerdir [52, 53, 54, 55].

H. Herm Stapelberg ve D. Meves (1994), yatay borularda sıvı - sıvı - gaz slug akışlarında slug frekansının ve basınç kaybının tespiti amacıyla deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Deneylerini gaz- sıvı slug akışı ile beraber ikinci bir karışmaz sıvı akışının etkilerini belirleyecek şekilde dizayn etmişlerdir. Slug frekansının tespitinde iyi bilinen klasik modeller yardımıyla buradaki özel çok fazlı akış şartlarına uygun olarak yeni akış modellerini gösterebilen haritalar geliştirmişlerdir. Wilmarth ve Ishii (1994), 1 ve 2 mm 'lik kanal genişliğine sahip dar dikdörtgenel kanallarda meydana gelen adyabatik dikey ve yatay iki fazlı hava / su akışını incelemişlerdir. Bu çalışmada akış rejimi gözlemleri için bir kamera kullanılmış ve elde edilen akış rejimi kayıtları bir video setine aktarılmıştır. Dikey akışlar için dört akış rejimi üç geçiş bölgesi, yatay akışlar içinde beş adet akış rejimi ve üç adet geçiş bölgesi gözlemlenmiştir. K. Cornwell ve S. D. Houston (1994), yatay borularda çekirdekli durgun kaynamada yüzeye yakın kabarcıkların kaybolduğı ve borunun en düşük alt kısmı boyunca bir kabarcıklı akış tabakasının söz konusu olduğunu vurgulamışlardır. Kabarcık çevresindeki yüzeyde sıvı faz konveksiyonu ve kabarcıkların kaybolduğı ince bir tabakanın da buharlaşması nedeniyle ısı transferinin arttığı belirlenmiştir [56,57,58].

S. Stephen Papell (1994), yerçekimsiz bir ortamda 15 saniye sürekli olarak ısıtılan ve rezistans olarak kullanılan ısıtıcı test borusundan akan damıtılmış su için aşırı soğutmalı / kaynamalı ısı transferini deneysel olarak incelemiştir. Aynı test şartları altında iki tip akış rejiminin mevcut olduğunu tespit etmişlerdir. Daha büyük oranda aşırı soğutmalı kabarcıklı akıştan bir slug akışa geçişe zorlanan akışın geçici olarak durması ile başlayan bir kararsızlık olayının lokal ısı transfer katsayısında %

16 'lık bir artışa sebep olduğu tespit edilmiştir. Slug akış rejiminde iki faz arasında oldukça yüksek derecede termodinamiksel bir dengesizliğin söz konusu olduğunu ifade etmişlerdir [59].

Rızvan-uddin (1994), iki fazlı akışlarda yoğunluk değişim osilasyonları lineer olmayan ve integral / diferansiyel denklemleri olan iki adet fonksiyonla ifade edilmiş yeni bir model yardımıyla nümerik olarak incelenmiştir. Elde ettiği nümerik simülasyon sonuçlarından bir kısmını yoğunluk değişim osilasyonlarının oluşmasına temel neden olan bazı fiziksel mekanizmaları ortaya çıkarmak için kullanılmıştır. Aynı çalışmada; ilk olarak hareketli ve değişik yoğunluklu dalgaların osilasyonlar süresince önemli bir role sahip olmadıklarını, osilasyonların çok zayıf karakterde hareket eden yoğunluk değişim dalgalarına yeterli direnci gösterdiklerini, ikinci olarak osilasyon periyotları literatürde aynı alanda daha önceki çalışmalarda da kaydedildiği gibi kanal geçiş zamanının iki katından daha yüksek oranlarda ortaya çıktıkları ve böylece yeni elde edilen osilasyon periyotlarının üç veya dört katına çıkabileceğini, üçüncü olarak karışım hızındaki değişimin genellikle kanal basınç düşümü karakteristikliklerinin belirlenmesinde karışım yoğunluğundaki değişimden daha önemli bir rol oynadığı sonuçları elde edilmiştir [60].

S. Kakaç (1994), iki fazlı akış kararsızlıkları üzerine son zamanlarda çeşitli araştırmacılar tarafından teorik ve deneysel olarak yapılmış olan ve farklı kaynamalı kanal sistemlerinde oluşan iki fazlı akış yoğunluk değişimi, basınç düşümü ve termal osilasyonlar dan oluşan dinamik kararsızlık olayları ile ilgili genel bir inceleme yapılmıştır. Çalışmada önce iki fazlı akış kararsızlıklarının bir sınıflandırması yapılmıştır. Daha sonra bu üç adet osilasyon dan ibaret olan dinamik kararsızlık olaylarını ve bunların ortaya çıkmasında etkin rol oynayan temel mekanizmalar belirlenmeye çalışılmıştır. Bilahare bu kararsızlıklara etki eden ısı akısı varyasyonlarının, aşırı soğutma girişinin, akışkan giriş debisinin, ısıtıcı test

borusu iç yüzey konfigürasyonlarının, giriş ve çıkış kısıtlayıcılarının etkilerinin neler olabileceğini değerlendirilmiştir. Çalışmada tek bir kanalda zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı ve yukarı akışlı sistemler için kullanılan ve hem iki fazlı akış olaylarının değerlendirilmesi hem de kararlı durum sınırlarının tahmin edilmesinde uygun sonuçlar veren modeller gözden geçirilerek bu modelleme işlemlerinde yapılan sayısal çalışmalarda kullanılan matematiksel bağıntıların çözüm şartları ile elde edilen sonuçların uygun olup olmadığı titizlikle değerlendirilmiştir [61].

Wu ve diğerleri (1994), düşük basınçlı ve tabii sirkülasyonlu düşük kuruluk derecesine sahip iki fazlı akışlarda oluşan hidrodinamik kararsızlıkları incelemek amacıyla iş yapan akışkanı su olan paralel dikey iki kanalda deneysel çalışmalar yapılmıştır. Osilasyonların periyot ve genliklerini inceleyerek 3 Bar altında bile hidrodinamik kararsızlıkların meydana geldiklerini belirlenmiştir [62].

Akhilesh Gupta ve diğerleri (1995), düşük akış hızlarında yatay küçük boru demetlerinde zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı durum için lokal ısı transfer katsayılarının belirlenmesine yönelik deneysel çalışma yapmışlardır. Isı akısının, çapraz akış hızının ve boru geometrisinin ısı transfer karakteristikleri üzerine ne gibi etkiler yapabilecekleri araştırılmıştır. Tek borularla mukayese edildiğinde alt borunun ısı transfer katsayısına demet geometrisinin önemli bir etkiye sahip olmadığı gözlemlenirken buhar kabarcıklarının en alt borulardan yükseldiğini ve en üst boruların etrafında sıvı fazındaki türbülansın dolayı en üst borular için elde edilen ısı transfer katsayılarının daha yüksek değerlere ulaştıkları belirlenmiştir [63].

A. G. Flores ve diğerleri (1995), yatay dairesel ve katmanlı iki fazlı akışlarda gaz fazı sekonder akışı için yapılan deneysel çalışmalarda elde ettikleri sonuçlara uygun olarak yarı ampirik korelasyonlar geliştirmişlerdir. Hem mevcut gaz fazı

sekonder akışını iyileştirmek hem de izotermal olarak ısıtılan yatay borulardaki iki fazlı dairesel akış akışlardan katmanlı akışa geçiş limitlerini tahmin etmeye çalışmışlardır. Düşük buhar hızlarında katmanlı akış dan bu dönüşümün olduğu yerlerde üst üste binme veya ayrılma yerlerinin önemsiz olduğu vurgulanmıştır. Tam gelişmiş dairesel sıvı akışında buhar fazı bünyesindeki sekonder akışın burada esaslı rolü oynadığını beyan etmişlerdir. Sekonder akışın direk ölçümünü temin eden ve aynı zamanda bu tarz akışın davranışlarını karakterize eden bir model geliştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar hem termal hem de izotermal geçiş dataları ile oldukça iyi birer uyum gösterdiğini ifade etmişlerdir [64].

Şimdiye kadar iki fazlı akış olayları ile ilgili özetlenmeye çalışılan literatür çalışmalarından da anlaşıldığı üzere; gelişen teknoloji ile beraber endüstride önemi gittikçe artan ve çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılan ısı değiştiricilerinde karşılaşılan iki fazlı akış kararsızlık olaylarının söz konusu elemanlara verdikleri zararlardan dolayı kontrol altına alınmaları ve zararlı sonuçlarının minimize edilebilmeleri amacıyla bilim adamları tarafından oldukça yoğun deneysel ve teorik çalışmalar yapılmaktadır. Günümüzde gerek hızlı sanayileşmenin bir sonucu olarak gerekse verimliliği ve temizliği açısından teknik açıdan oldukça rantabil sayılabilecek bir alternatif enerji kaynağı olmasının bir sonucu olarak tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de kullanılması planlanan nükleer santrallerde yakıt donanımlarının soğutulmasını sağlayan sistemlerde oluşan iki fazlı akış kararsızlık olaylarının kontrol altında tutulması veya minimize edilmesi çok büyük öneme sahiptir. Zira nükleer santrallerde soğutma sistemlerinde iki fazlı akış kararsızlıklarının oluşması sonucu temas ettikleri yüzeylerde termal gerilmeler hasıl ederek nükleer santrallerin yakıt donanımlarının zarar görmesine ve bunun sonucunda hayati tehlike arz eden yüksek oranda radyasyon ihtiva eden partiküllerin çevreye yayılmasına neden olacaktır. İki fazlı akış kararsızlık olaylarının günümüzde tamamen kontrol altına alındığını veya endüstriyel sistemlerden tamamen uzaklaştırılabildiğini söylemek

henüz doğru değildir. Termodinamik, ısı transferi ve akışkanlar mekaniği açısından son derece kompleks olaylar zincirinden meydana gelen olan iki fazlı akış kararsızlık olaylarının mikro düzeyde incelenerek sahip oldukları bütün karakteristikliklerin ortaya çıkarılması için hem çok iyi bir ekip çalışması hem de ekonomik açıdan pahalı sayılabilecek deneysel çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada ise; yukarıda bahsedilmeye çalışılan iki fazlı akış kararsızlık olaylarının çeşitli endüstriyel ekipmanlara verdikleri zararların giderilmesine yönelik araştırma yapmak amacıyla her bir osilasyonun oluşmasında önemli rol oynayan iki fazlı akış rejimlerinin ortaya çıkarılması ve bu kararsızlıklar üzerinde etkili olan etkili parametrelerin tespit edilmesi amacıyla deneysel ve teorik bir çalışma yapılmıştır. Bu amaçla zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı ve iş yapan akışkanı R-11 olan yatay bir boru da iki fazlı akış olaylarını incelemek amacıyla bir deney seti kurulmuştur. İki fazlı akış rejimlerini ve dinamik kararsızlıklarını deneysel çalışma ortamında üretebilecek tarzda imal edilen bu deney setinde yaptığımız deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verileri hassas bir şekilde doğru olarak değerlendirebilmek amacıyla sistemde uygun ve yeterli sayıda ölçüm elemanı kullanılmıştır. İki fazlı akış dinamik kararsızlıklarından olan basınç düşümü, yoğunluk değişimi ve termal osilasyonları inceleyerek bu osilasyonların periyot ve genliklerine; akışkan kütleli debisinin, girişte akışkan aşırı soğutma seviyesinin etkilerini tespit etmek amacıyla elde edilen deneysel veriler bilgisayar ortamında grafiksel formda tanzim edilerek değerlendirilmeye çalışılmıştır.

İş yapan akışkan olarak R-11 'in kullanılmasının temel nedeni; su ile yakın özellikler göstermesi, normal atmosferik şartlar altında sıvı fazda bulunması ve nispeten düşük kaynama noktasına sahip olması nedeniyle daha düşük kapasiteli ısı güç kaynağı ile deneysel çalışmaların yapılmasını sağlamaktadır. İş yapan akışkanın deneysel sistemde sirkülasyonu ana besleme tankına bağlanan yüksek

basıncılı azot gazı tankıyla sağlanmaktadır. İki fazlı akış olaylarına kütleli debinin etkilerini tespit etmek amacıyla deneysel çalışmalara en yüksek debi değeri 75g/s 'den başlayarak on iki kademede en düşük debi değeri 9.18g/s 'ye azaltılmaktadır. Deneysel çalışmaların tamamında test borusuna verilen ısı güç değeri 16kW 'da, sistem basıncıda 7.5Bar 'da sabit tutulmuştur. İki fazlı akış olaylarına test borusu girişinde aşırı soğutma seviyesinin etkilerini ortaya çıkarmak amacıyla şehir şebeke suyu ile soğutulan bakır serpantinli bir eşanjör yardımıyla $T_{g1}=28^{\circ}\text{C}$, $T_{g2}=24^{\circ}\text{C}$, $T_{g3}=22^{\circ}\text{C}$, $T_{g4}=19^{\circ}\text{C}$, $T_{g5}=16^{\circ}\text{C}$ olmak üzere beş farklı giriş sıcaklık değeri kullanılmıştır. Basınç düşümü tipi osilasyonların oluşması için gerekli olan sıkıştırılabilir hacim dengeleyici tankta azot gazı yardımıyla iş yapan akışkan üzerinde temin edilmektedir. Dinamik kararsızlıklarla ilgili deneysel çalışmalar boyunca sabit sıkıştırılabilir hacim miktarı dengeleyici tankta bulunan seviye göstergesi yardımıyla ayarlanmaktadır. Gerek sistem basıncının gerekse sıkıştırılabilir hacmin ayarlanmasında azot tankında bulunan basınç regülatörü kullanılmaktadır.

Test borusu olarak 3195mm boyunda, 18mm dış çap, 13mm iç çapa sahip paslanmaz çelik boru kullanılmıştır. İki fazlı akış ortamında meydana gelen akış rejimlerini tespit etmek amacıyla test borusuna 14 adet üst cidara, 14 adet alt cidara, akışkan giriş ve çıkış sıcaklıklarını ölçmek amacıyla iki adet olmak üzere toplam otuz adet T-tipi Bakır-Constantan termokupulu kullanılmıştır. Test bölümü girişinde kütleli debi ve giriş basıncında meydana gelebilecek osilasyonları tespit etmek amacıyla sırasıyla diferansiyel basınç transdüseriyle basınç transdüseri kullanılmıştır. Deneysel sistemin diğer kısımlarında ihtiyaç duyulan basınç ölçümleri Bourdon tipi manometreler ile debi ölçümleri de bir rotametre yardımıyla yapılmıştır. Test borusunda üniform bir ısı akısının elde edilmesi amacıyla yüksek sıcaklığa mukavemetli iki kat folyeli taş yünü izolasyon malzemesi kullanılmıştır. Termokupul tellerinin test borusu cidarındaki elektrikten etkilenmemesi içinde elektriksel olarak yalıtkan fakat termal iletkenliği iyi olan bir macun kullanılmıştır.

Ayrıca iki fazlı akış ısı transfer olaylarına ve dinamik kararsızlıklar üzerine test borusu ısı transfer iç yüzey konfigürasyonlarının yaptıkları etkileri de ortaya çıkarmak amacı ile test borusunun içerisine beş farklı geometrik konstrüksiyonlara sahip yay ve benzeri ısı transfer yüzey artırım elemanları yerleştirilmiştir. Yine iki fazlı kararlı ve kararsız akış durumları için optimum çalışma limitlerinin belirlenmesi amacıyla etkili olan parametrelerin ortaya çıkarılmasını temin edebilecek deneysel çalışmalara ilaveten sistemimize uygun bazı termodinamiksel ve ısı transfer bağıntıları yardımıyla boyutlu-boyutsuz formda nümerik çalışma yapılarak sistemin temel karakteristiklikleri belirlenmiştir.



2. İKİ FAZLI AKIŞLARIN TEMEL KARAKTERİSTİKLERİ

İki fazlı kararlı - karasız akış davranışlarının anlaşılması için bu olayların oluşmasında önemli rol oynayan bazı termodinamik, ısı transferi ve akışkanlar mekaniği ile ilgili kavramların açıklanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için çalışmalarımızda bize yardımcı olacak ve iki fazlı akışların anlaşılmasına katkı sağlayacağına inandığımız iki fazlı akışların sınıflandırılması, iki fazlı akış rejimlerinin tanımlanması, iki fazlı akışlarda burn-out olayı ve iki fazlı akış dinamik kararsızlıkları ile bunların temel mekanizmaları detaylı bir şekilde verilecektir.

2.1. İki Fazlı Akışta Zorlanmış Konveksiyonlu Kaynama

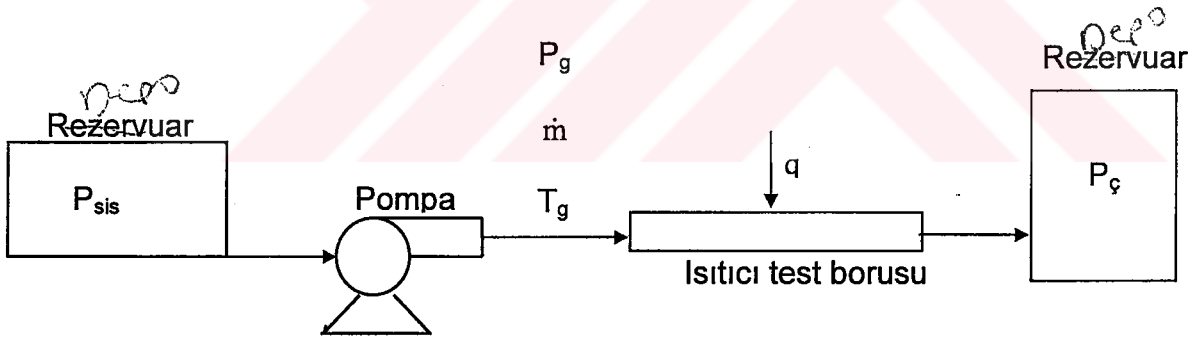
Kaynama denildiği zaman bir akışkanın faz değişimi akla gelmektedir. Sıvı-katı yoğunlaşma prosesinde olduğu gibi kaynama prosesinde de fazlar arası yüzeyde meydana gelen gizli ısı etkileşimleri faz değişiminde önemli rol oynamaktadırlar. Kaynama olayında sıvı fazdan buhar faza geçişten dolayı sürekli bir ısı transfer olayı söz konusu olmaktadır. Faz değişimi esnasında sürekli olarak meydana gelen bu ısı transfer olayı akışkan sıcaklığına bağlı olmaksızın devam etmektedir. Zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı iki fazlı akış sisteminde gizli ısı h_{lv} ve diğer iki parametre olan iki faz arasındaki yoğunluk farkı ile sıvı - buhar fazlar arası ara yüzeydeki yüzey gerilimi σ değerleri sistemi karakterize etmek de büyük öneme sahiptirler. Yoğunluk farkının sebep olduğu kaldırma kuvveti $g (\rho_L - \rho_G)$ ile orantılı olarak ortaya çıkmaktadır. Gizli ısı transfer katsayıları ve zorlanmış konveksiyon şartlarının müşterek etkilerinden dolayı kaynama ve yoğunlaşma ısı transfer katsayıları genellikle faz değişiminin olmadığı konveksiyonlu ısı transfer karakteristiklerinden daha büyük olmaktadır.

Sıvı - katı ara yüzeyinde buharlaşma meydana geldiği zaman kaynamanın başladığı bilinmektedir. Şöyle ki T_s yüzey sıcaklığı uygun bir sıvı basıncına tekabül

eden doyma sıcaklığı T_d' ı geçtiği zaman kaynama başlamaktadır. Katı yüzeyden sıvı yüzeye transfer edilen ısı aşağıdaki denklem yardımıyla ifade edilebilir;

$$q_s = h(T_s - T_d) = h \Delta T \quad (2.1)$$

Burada; $\Delta T = T_s - T_d$ sıcaklık farkını göstermektedir. Kaynama prosesi oluşan kabarcık formasyonu ile karakterize edilmektedir. Bu kabarcıklar yüzeyden uzaklaştıkça büyüyen bir oluşum göstermektedirler. Bu sıcaklık artışında yüzey gerilimi gibi akışkanın termo-fiziksel özelliklerine, yüzeyin tabiatına, ΔT sıcaklık farkına bağlı olmaktadır. Diğer taraftan buhar kabarcıklarının dinamik formasyonu yüzeye yakın akış hareketlerini etkilediğinden ısı transfer katsayısını da doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada prensip olarak aynı yatay bir borudaki konvektif kaynamalı buhar - sıvı fazlarından oluşan iki fazlı akış sisteminin basit bir blok diyagramı Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Konvektif kaynamalı ve yatay bir boru sisteminin basit bir blok diyagramı

Yukarıdaki şekilde blok diyagramı gösterilen ısıtıcı boruya karşılık gelen basınç düşümü şöyle ifade edilebilir;

$$\Delta P = P_g - P_{\phi} \quad (2.2)$$

Şekil 2.1'de gösterildiği gibi basınç düşümü ΔP ile kütleli debi $\dot{m}$ arasındaki bağıntıya göre sistemin kararlı durum karakteristik özelliği ifade edilmektedir. Bazı araştırmacılar tarafından bu bağıntı sistemin iç karakteristik özelliği olarak da adlandırılmaktadır.

Aynı şekilde gösterilen pompaya karşılık gelen;

$$\Delta P = P_{\text{sis}} - P_{\text{ç}} \quad (2.3)$$

denklemi ile kütleli debi $\dot{m}$ arasında geçerli olan bağıntı pompa karakteristik özelliği olarak adlandırılmaktadır. Bu bağıntı yine bazı araştırmacılar tarafından sistemin dış karakteristik özelliği olarak da adlandırılmaktadır. Şekil 2.2 'de gösterildiği gibi pompa karakteristik özellikleri daima kullanılan pompa özelliklerine bağlı olarak daha büyük veya daha küçük negatif eğimlere sahip olabilirler. Yine Şekil 2.2 'de görüleceği gibi iki pompa eğrisinden biri daha büyük eğime diğeri ise bu eğrilerin kesiştiği noktada iç karakteristik eğrilerinden daha küçük eğime sahiptir.

Padki (1991) 'de yaptığı çalışma sonucunda, pompa eğrisinin iç karakteristik eğriden daha düz bir şekle sahip olduğu zaman sistemin statik kararsızlık halinde olduğuna ve aynı zamanda bunun bir Ledinegg kararsızlığı olarak adlandırıldığına dikkatimizi çekmektedir. Pompa eğrisi iç karakteristik eğriden daha dik bir şekil gösterdiği durumda iki fazlı akış dinamik kararsızlığının söz konusu olduğu anlaşılmaktadır [12 , 45].

Bu tez çalışmasının temel konularından biri olan iki fazlı akış dinamik kararsızlıkları ile ilgili çalışmaların yürütülebilmesi için kararlı durum iç karakteristik eğrilerinin öncelikle bilinmesi gerekmektedir. Şekil 2.2 'de bu eğrilerden sadece bir tanesi verilmiştir. Gerçekte böyle bir sisteme karşılık bu eğrilerden sonsuz sayıda

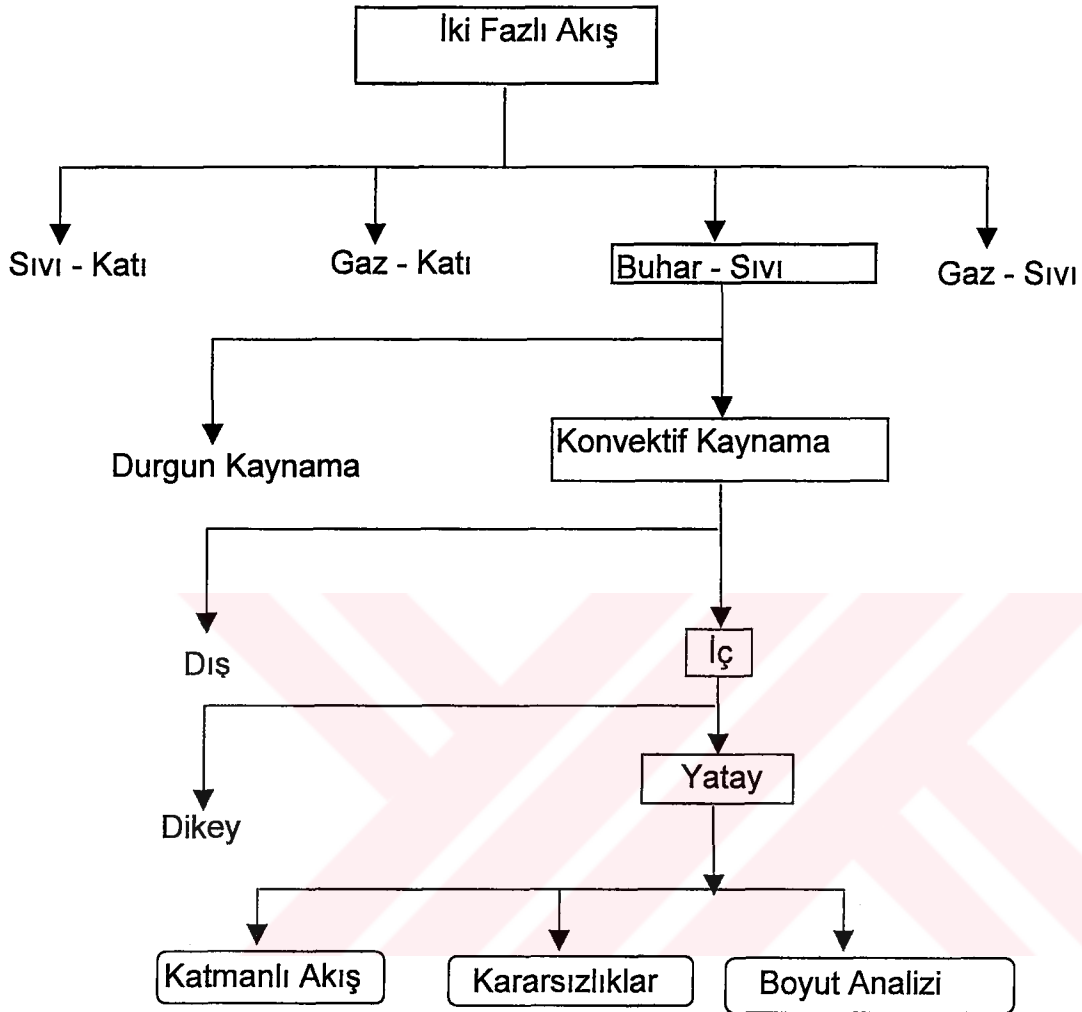


Şekil 2.2. Tipik bir iki fazlı akış sisteminin karakteristik özellikleri

mevcuttur. Klasik teknikler kullanılarak sonlu sayıda yapılabilen deneysel çalışmalar yardımıyla bu eğrilerin tamamını elde etmek mümkün olmadığına göre son zamanlarda bazı araştırmacılar klasik $\Delta P - \dot{m}$ koordinat sistemi yerine bazı boyutsal parametreler geliştirmişlerdir. Bu amaçlarla iki fazlı akış çalışmalarında yeni birtakım tekniklerin kullanılması ile ilgili fikirler bu alandaki çalışmalara dahil olmuştur [12 , 23].

2.2. İki Fazlı Akış Rejimleri

Literatürde bu konu ile ilgili olarak geliştirilen çeşitli deneysel sistemlerde meydana gelen iki fazlı akış rejimlerinin sınıflandırılmasına yönelik çalışmaların bir özeti Şekil 2.3 'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3. İki fazlı akışların genel olarak bir sınıflandırmasını gösteren akış diyagramı

İki fazlı akış rejimleri ile ilgili bilgiler genellikle akışın çıplak gözle gözlemlenmesi ile elde edilmiştir. İki fazlı akış rejimleri iki faz arasındaki ara yüzeyin göstermiş olduğu geometrik şeklin karakterine göre tanımlanmakta ve fazlar arası yüzey bilhassa gaz - sıvı iki fazlı akış durumlarında çok sayıda farklı karakterde geometrik şekil göstermektedirler. Bu çeşitlilik hemen hemen sonsuz sayıda olmasına rağmen

genellikle fazlar arası yüzeysel gerilim etkileri fazlar arası yüzeyde tıpkı damlacık ve kabarcıklara benzeyen karakterde geometrik şekiller ortaya çıkarmaktadırlar.

Sıvı fazın buhar fazına dönüşümü genel olarak buharlaşma prosesi ile izah edilmektedir. Bu da iki farklı şekilde meydana gelmektedir. İlk olarak; ısıtılan bir yüzeyde kabarcıkların meydana gelmesi kaynamanın başladığını göstermekte iken ikinci olarak da; sıvı ve buharı arasında ki ara yüzeyde bir buharlaşma meydana geldiği zaman buharlaşmanın başladığını göstermektedir. Bu iki açıklamaya ilaveten bazı durumlarda her iki durum eş zamanlı olarak da meydana gelebilmektedir [12, 26,67].

2 .3. Düşey Borularda iki fazlı Akış Rejimleri

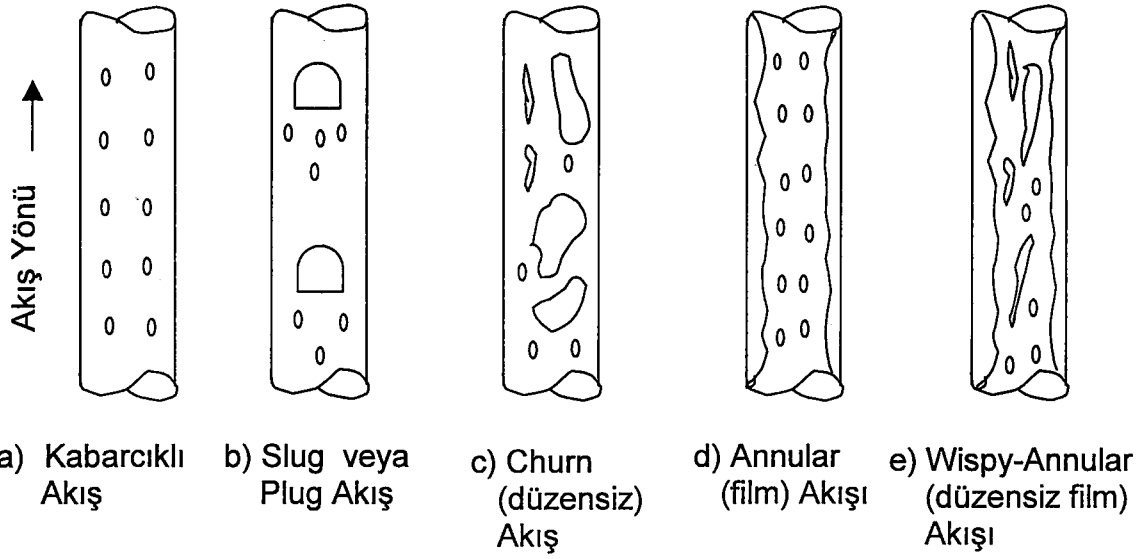
Düşey ve yatay olarak tanzim edilen borularda oluşan akış rejimlerini ve bunlar arasındaki farkları görebilmek için araştırmacılar tarafından genel anlamda bir kabul görmüş aynı zamanda bizim deneysel çalışmamızla da ilgili olması bakımından gaz - sıvı fazlarından meydana gelen iki fazlı akış rejimlerinden önemli olanlarını önce yukarı akışlı dikey bir boru için aşağıda Şekil 2.4 'de verilmiştir.

a) Kabarcıklı Akış

Bu akış rejiminde sürekli olarak kabarcıklı bir sıvı faz akışı söz konusudur.

b) Slug veya Plug Akış

Kabarcıklı akışta kabarcık konsantrasyonu arttıkça oluşan kabarcık birleşme olayı sonucunda farklı geometrik ebatlara sahip yeni kabarcık formasyonları ortaya çıkmaktadır. Bu yeni kabarcık formasyonu da değişerek boru çapı büyüklüğünde



Şekil 2.4. Dikey borularda meydana gelen başlıca iki fazlı akış rejimleri.

tıpkı şemsiye yada mermi şeklinde karakter gösteren ve literatürde genellikle slug veya plug akış rejimi olarak tanımlanmaktadır.

c) Düzensiz veya Churn Akış

Gaz fazı akış oranı arttığı zaman slug yada plug formasyonlu kabarcık akış hızlarının artması sonucunda bu kabarcık formasyonları da bozularak düzensiz akış rejiminin oluşmasına neden olmaktadır. Oluşan bu yeni akış rejimi büyük çaplı borularda sıvı fazının aşağı ve yukarı doğru titreşimli akışına sebep olduğundan İngilizce tabiriyle churn akışı veya oluşan yeni kabarcık formasyonlarının herhangi bir geometrik şekle benzemediğinden düzensiz akış adı verilmektedir.

d) Film veya Annular Akış

Bu akış rejiminde sıvı faz akışı boru cidarında gerçekleşirken gaz fazı akışı da boru

merkezinden akmaktadır. Genellikle sıvı faz akışının bir kısmı gaz fazı akış ortamının içerisinde damlacıklar şeklinde bulunmaktadır.

e) İnce Film veya Wispy - Annular Akış

Sıvı faz debisinin artması sonucu annular akışta ki gaz fazı ortamında bulunan kabarcık konsantrasyonu artmaktadır. Bu artışı müteakiben gaz fazı akış ortamında oluşan kabarcık birleşmesi sonucunda demet şeklinde çok ince sıvı fazı film akışı söz konusu olmaktadır. Bu akış rejimi daha yüksek kütleli hızlarda ortaya çıkmaktadır.

2.4. Yatay Borularda İki Fazlı Akış Rejimleri

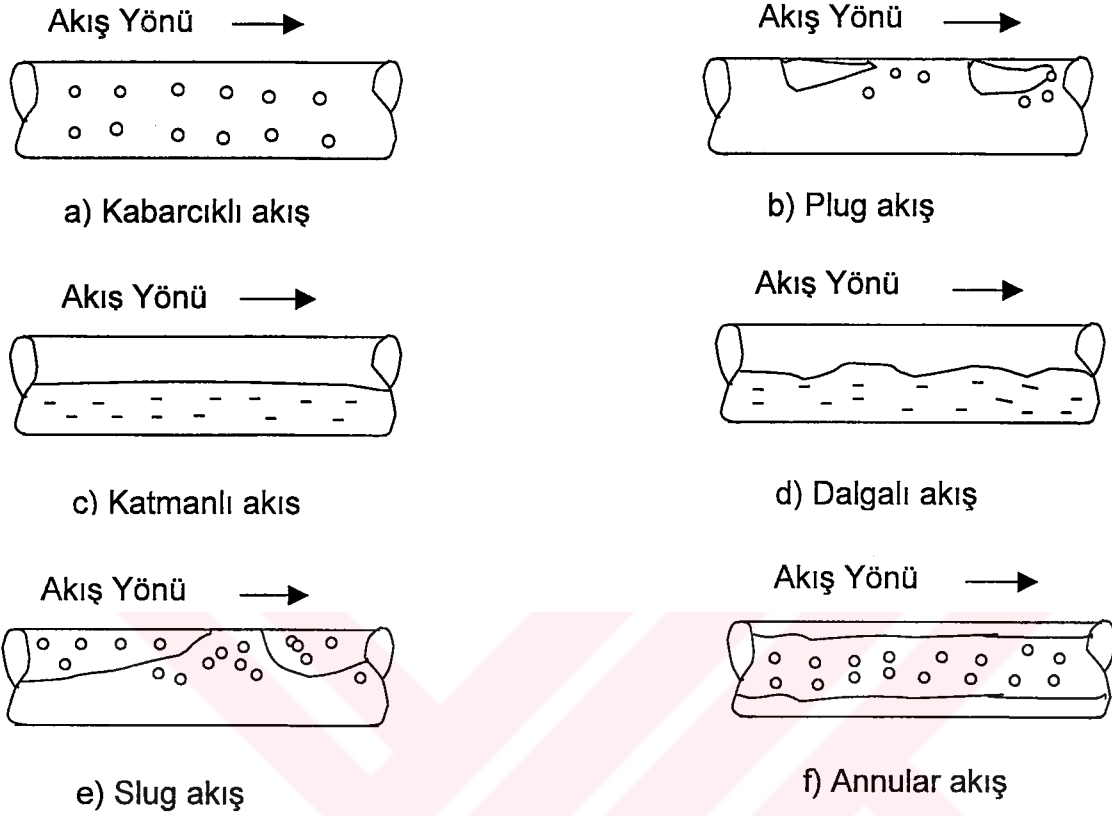
Yatay olarak düzenlenmiş boru kanallarında oluşan iki fazlı akış rejimlerinin temel özellikleri sıvı faz akışının yer çekim kuvvetinin etkisi ile boru kanalı alt cidarı boyunca akması buna karşılık gaz fazı akışının boru kanalı üst cidarı boyunca akmasıdır. Yatay borularda oluşan temel iki fazlı akış rejimlerini aşağıdaki Şekil 2.5 'de gösterilmiştir.

a) Kabarcıklı Akış

Bu akış rejiminde kabarcıklar boru üst cidarı boyunca akmaya meyillidirler.

b) Plug Akış

Kabarcık formasyonu tıpkı birer şemsiye yada mermi şeklinde ortaya çıkmaktadır. Kabarcıkların bu tarz karakteristiğinden dolayı literatürde plug akış olarak adlandırılan bu akış rejiminde kabarcıklar boru üst cidarı boyunca akmaktadırlar.



Şekil 2.5. Yatay borularda oluşan temel iki fazlı akış rejimleri

c) Katmanlı Akış

Bu akış rejiminde ise fazlar üzerine etkiyen yer çekim kuvveti mükemmel seviyededir. Zira boru üst cidarı boyunca tamamen gaz fazı akışı olurken boru alt cidarı boyunca ise tamamen sıvı faz akışı söz konusu olmaktadır.

d) Dalgalı Akış

Katmanlı akışta gaz fazı akış hızının artması sonucu sıvı - gaz fazları arasındaki ara yüzeyde dalgalı geometrik şekiller meydana gelerek dalgalı akış rejimini ortaya çıkarmaktadırlar.

e) Slug Akış

Dalgalı akış rejiminde fazlar arası yüzeyde oluşan dalgalı geometrik şekillerin büyüklüğü artarak bu dalgalı şekillerin boru kanalı üst cidar yüzeyi ile temas etmesi sonucu literatürde slug akış rejimi olarak adlandırılan iki fazlı akış rejimi ortaya çıkmaktadır. Boru kanalı alt cidarında dalgalı bir katmanlaşma tabakasının olduğu yerlerde içerisine sıvı faz akışının kısmen karıştığı köpüklü bir slug akışı da meydana gelmektedir.

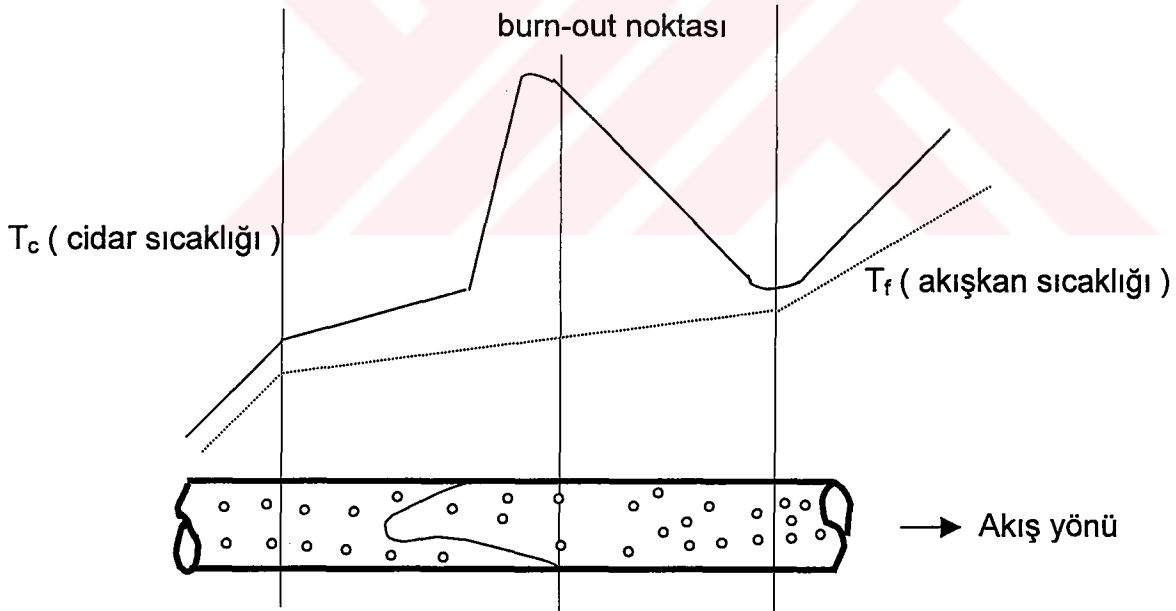
f) Film yada Annular Akış

Bu akış rejimi yatay borularda sadece gaz fazının yüksek debilerde aktığı durumlarda meydana gelmektedir. Düşey akışlarda olduğu gibi genellikle gaz fazı akış ortamında belirli bir miktarda sıvı faz damlacıkları mevcuttur. Yatay borularda daha komplike olan iki fazlı film akış rejiminde boru kanalı alt cidarında oluşan film tabakasının kalınlığı yerçekimsel kuvvetlerin etkisi nedeniyle genellikle üst cidarda oluşan film tabakasının kalınlığından daha kalın olmaktadır [4,12, 26,67].

2.5. Yatay Borularda " Burn - out " Olayı

Kaynamakta olan bir sıvı fazda bulunan bir akışkan ile temas eden bir yüzeye uygulanan ısı akısı tedricen arttırıldığı zaman sıvı fazındaki akışkan ile yüzey arasında sürekli temasın kesildiği bir noktaya ulaşılmaktadır. Literatürde "kaynama krizi " olarak da adlandırılan bu olay meydana geldiği zaman sıvı fazındaki akışkan ile yüzey arasına nispeten daha düşük termal kondüktiviteye sahip buhar fazındaki akışkanın girmesi sonucunda akışkana iletilen ısı transferi oldukça azalmaktadır. Bundan dolayı şayet kanal yüzeyine uygulanan ısı akısı azaltılmazsa kanal yüzey sıcaklığı hızlı bir trend ile ani bir şekilde oldukça yüksek sıcaklık limitlerine ulaşacaktır. Bu olay kaynamalı ısı transfer alanında " burn - out " olarak

adlandırılmaktadır. Aynı şekilde " burn - out " olayının gözlemlendiği anda ısıtıcı kanal yüzeyine uygulanan ısı akısı değerine "kritik ısı akısı (CHF)" adı verilmektedir. Zorlanmış konveksiyonlu kaynama şartlarında da bu olay iki fazlı akış ortamında meydana gelmektedir. Bilhassa yatay pozisyonda işletilen buhar kazanları ile boylerlerde bulunan boru demetlerinin uzun ömürlü olarak kullanılmaları, bu boru cidarları ile buhar - sıvı fazlarından oluşan iki fazlı karışımın sıvı fazı arasında uygun ısı transfer şartlarının korunmasına büyük oranda bağlı olmaktadır. Zira uygun olan bu ısı transfer şartlarının korunamaması sonucunda oluşacak olan termal gerilmeler boru kanal cidarlarında çatlama, yırtılma ve patlama gibi deformasyonlara sebep olacaktır. Yatay bir boyler borusunda oluşan " burn - out " olayı şematik olarak Şekil 2.6 'da verilmiştir. " burn - out " olayı genellikle annular akış olarak adlandırılan film akış rejiminde meydana gelmektedir. Yukarıda ki açıklamalardan da anlaşılacağı üzere "burn - out " olayı şayet kanal



Şekil 2.6. Yatay bir ısı değiştirici borusunda oluşan " burn - out " olayı

uzunluğu kısa ve ısı akısı yeterli miktarda ise kabarcıklı akış rejiminde de meydana gelebilmektedir. Yine aynı şekilde bu olay boru uzunluğu ve ısı akısı limitlerinin yanı sıra diğer etkili parametre değerlerine bağlı olarak plug akış rejiminde de ortaya çıktığı araştırmacılar tarafından ifade edilmektedir. Yukarıda genel hatları ile açıklamaya çalıştığımız tüm "burn-out" olaylarının ortaya çıkmasında esaslı rolü oynayan bazı temel mekanizmaları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

(1) Film Kaynaması

Film akış rejiminde oluşan buhar fazındaki film akış tabakası sahip olduğu düşük termal kodüktivite nedeniyle ısıtıcı boru kanal cidarının aşırı derecede ısınmasına neden olarak "burn - out" olayının ortaya çıkmasına sebep olmaktadır.

(2) Sıvı Fazındaki Damlacıkların Sınırlı Sayıda Olması

Isıtıcı kanal yüzeyinde buharlaşan damlacık oranına göre meydana gelen buhar fazındaki akıştan film akış tabakası yüzeyine damlacıkların düşmesiyle " burn - out " olayı meydana gelmektedir.

(3) Sıvı Film Tabakasında Meydana Gelen Ani Bozulma

Yapılan araştırmalar sonucunda sıvı film akış rejiminin fazlar arası yüzeyin dalgalı bir geometrik şekil gösterdiği dalgalı akış rejimine dönüştüğü zaman ısıtıcı boru kanalının belirli bir bölgesinde " burn - out " olayı meydana gelmektedir.

(4) " Dry - out " Olarak Bilinen Sıvı Fazındaki Film Tabakasının Buharlaşması

Kanal boyunca aynı anda akmakta olan sıvı - buhar fazları ısıtıcı boru kanalının belli bir bölgesinde tamamen buharlaşmaları sonucunda iki fazlı akış ortamından tamamen buhar fazından oluşan tek fazlı akış ortamına geçiş noktasında " burn - out " olayı meydana gelmektedir.

(5) " Dry - out " Bölgesinin Formasyonu

Sıvı film tabakası aşırı kızgın olan lokal bir bölgeye ulaştığı zaman tamamen buhar fazından oluşan bir tek buhar fazı bölgesi oluşmaktadır ki bu noktada " burn - out " olayı meydana gelmektedir [67].

2.6. Kaynamalı Yatay Borularda İki Fazlı Akış Kararsızlıkları

Son zamanlarda iki fazlı akış olaylarının meydana geldiği sistemlerde karşılaşılan kararsızlık olaylarına giderek yoğunlaşan bir ilgi söz konusudur. Literatürde bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar sonucunda çok sayıda iki fazlı akış kararsızlık türü belirlenmiştir. Tespit edilen tüm iki fazlı akış kararsızlık türleri genel olarak; akışın bir durumdan başka bir akış durumuna ani bir değişim göstermesi ile açıklanan ve literatürde orijinal adıyla "flow excursion " olarak bilinen bir akış gezintisi ile beraber yine akışın sürekli bir değişim gösterdiği akış osilasyonları ile karakterize edilmektedirler.

Şayet ısıtılan bir boyler borusunda yukarıda söylenen akış gezintisi olayı meydana gelirse böyle şartlarda işleme tabi tutulacak olan böyle bir borunun dizayn aşamasında bu olayın oluşabileceği durumlar hesaplamalara dahil edilmelidir. Zira boru boyunca belirli bir noktada " burn - out " olayı meydana gelebilmektedir. Çalışma şartlarına bağlı olarak cidar sıcaklığında meydana gelebilecek bu ani

artışlar yüzünden boru konstrüksiyonunda yırtılma ve çatlama ile sonuçlanabilecek deformasyonlar ortaya çıkacaktır. Aynı şekilde böyle bir akış gezintisi olayı periyodik olarak meydana gelirse artan korozyondan dolayı yine ısıtıcı boru kanal konstrüksiyonunun da yukarıda açıklananlara benzer karakterde deformasyonlar ortaya çıkacaktır.

İki Fazlı akış ortamında oluşan akış osilasyonlarında da benzer problemlerle karşı karşıya kalınmaktadır. Akış osilasyonlarının yoğun olduğu şartlarda boru cidar sıcaklığında oluşan büyük artışlar sonucunda yine ısıtıcı boru kanal konstrüksiyonunda önemli düzeyde termal yorulmalar ve korozyon ortaya çıkarak boru kanallarının kırılıp yırtılmaları söz konusu olmaktadır [4, 12,40].

2.7. Kaynamalı Yatay Borularda Meydana Gelen İki Fazlı Akış Kararsızlıklarının Sınıflandırılması

Günümüz endüstrisinde iki fazlı akış kararsızlıklarının meydana geldiği çeşitli ısı santrallerinde bulunan ekipmanların emniyetli bir işletme şartlarında çalıştırılabilmeleri temin edecek optimum işletme şartlarının belirlenmesi mühendislik açısından önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bilindiği gibi herhangi bir boylerdeki iki fazlı akış şartları işletim esnasında zamana bağlı olarak değişebilmektedir. Örneğin belirli bir zamanda boyler borusunun belirli bir noktasında sadece sıvı fazı vardır. Bu sıvı faz akışı daha sonra buhar fazına dönüşerek çeşitli parametrelere bağlı olarak kabarcıklı, dalgalı, slug, plug vb. akış rejimlerinde ortaya çıkmaktadır. İki fazlı akış rejimlerinin meydana gelmesi sonucunda mikroskobik seviyede çeşitli kararsızlıklar akış ortamında oluşmaktadır. Oluşan bu kararsızlıklar genel olarak sıvı - buhar ara yüzeyinde lokal olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu mikroskobik seviyede ortaya çıkan kararsızlıklar akış ortamında çeşitli osilasyonların meydana gelmesine öncülük etmektedirler.

Bir akışın kararlılığı bozulduğu zaman akışın yeni akış şartları başlangıç noktalarından birine asimptotik olarak meyleder. Bunu matematiksel olarak akışın başlangıçtaki konumuna ulaşmasını hafif düzeydeki tedirginliklerle sağlayabilen bir durum ile izah edebiliriz. Şayet akışın kararsız olduğu bir durumda akışın yeni teşekkül eden çalışma şartları başlangıçtakinden başka bir duruma asimptotik olarak meylederse ortaya çıkan bu kararsızlık olaylarına " statik kararsızlık " adı verilmektedir. Yine böyle bir proseste oluşan iki fazlı kararsız akış ortamında atalet ve literatürde orijinal adıyla " feed back " denen geri besleme etkilerinden dolayı oluşan kararsızlık türlerine de " dinamik kararsızlıklar " adı verilmektedir.

Literatürden tespit edildiği kadarıyla söz konusu araştırmalar sonucunda karşılaşılan başlıca iki fazlı akış statik ve dinamik kararsızlık çeşitleri ile bunların oluşmasında etkin rol oynayan temel mekanizmaları karakteristiklikleri ile özet olarak gösteren bir tablo aşağıdaki Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1.a. ve Tablo 2.1.b 'de iki fazlı akış kararsızlıklarını genel hatlarıyla özetledikten sonra bizim doktora çalışmamızda üzerinde çalıştığımız zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı bir yatay boru elemanından ibaret olan deneysel çalışma düzeneğinin incelediğimiz iki fazlı akış dinamik kararsızlıklarından yoğunluk değişim osilasyonların, basınç düşümü osilasyonlar ile termal osilasyonları ve bu kararsızlıklarla mukayese yapmak amacıyla bir statik kararsızlık türü olan Ledinegg Kararsızlığının temel mekanizmalarını detaylı olarak aşağıda verilecektir.

2.8. Statik Kararsızlıklar

Akış ortamında meydana gelen küçük ölçekli lokal kararsızlıklar herhangi bir sürekli osilasyona sahip olmazsa bu akışın kararlı olduğu kabul edilmektedir. Yani bir akışta geçici tedirginlikler yada osilasyonlar oluşuyorsa böyle bir akışın kararlı

Tablo 2.1. a. Kaynamalı İki Fazlı Akış Kararsızlıklarının Sınıflandırılması

Kararsızlıklar	Kararsızlık Tipi	Mekanizmaları	Karakteristiklikleri
Statik Kararsızlıklar	Ledinegg Kararsızlığı	Negatif bir eğim bölgesinde iç karakteristikliklerin dış karakteristikliklerden daha dik bir eğime sahip olmaları	Kararlı çalışma şartı, ani bir akışın geçişi, büyük genlikli yeni bir akış gezintisi
	Kaynama Krizi	Isıtılan yüzeyden ısıtma etkisinin kaldırılması	Cidar sıcaklık titreşimi ve akış osilasyonları
	Akış Rejimi Geçiş kararsızlığı	Kabarcıkların annular akış olarak adlandırılan halkalı akış rejiminde sahip oldukları düzeyden daha yüksek bir basınç düşümüne ve daha az boşluk oranına sahip olmaları	Çevrimsel akış rejimi dönüşümleri ve debi varyasyonları
	Literatürde "bum bing" olarak bilinen darbeli akış "geysering" olarak bilinen püskürtmeli akış ve "Chugging" olarak bilinen gürültülü akış rejimleri	Periyodik bir karaktere sahip meta stabil şartlar (stabil şartların değişimi), genellikle çekirdekleşme olayının oluşmamasıdır	Aşırı kızgın periyodik proses, "refilling" olarak adlandırılan yeniden doldurma ve "expulsion" olarak adlandırılan boşaltma olaylarının yanı sıra şiddetli buharlaşma

Tablo 2.1. b. Kaynamalı İki Fazlı Akış Kararsızlıklarının Sınıflandırılması

Kararsızlıklar	Kararsızlık Tipi	Mekanizmaları	Karakteristiklikleri
Dinamik Kararsızlıklar	Akustik Osilasyonlar	Basınç dalgalarının rezonansı yani sesi aksettirmesi	Sistemde oluşan basınç dalgalarının yayılması için gerekli zamanla ilgili olarak ortaya çıkan yüksek frekanslı ses dalgaları(10-100 Hz)
	Yoğunluk Değişim Osilasyonları	Debi, yoğunluk, basınç düşümü arasında geçerli olan ilişkilerin delay" olarak adlandırılan gecikme ve " feed back " olarak bilinen geri besleme problemlerinden etkilenmesi	Sürekli bir dalga geçiş zamanıyla ilgili olarak ortaya çıkan frekanslar
	Basınç düşümü Osilasyonları	Kanal ve sıkıştırılabilir hacim arasında söz konusu olan etkileşim	Çok düşük frekanslı periyodik proses
	Termal Osilasyonlar	Akış dinamikleri ile ısı transfer katsayıları arasında meydana gelen değişimlerin etkisi	Farklı kaynama rejimleri arasındaki geçişlerden dolayı katı yüzeyde yüksek genlikli sıcaklık osilasyonları
	Kaynamalı Su Reaktör Kararsızlığı	Akış dinamikleri ile ısı transfer özelliklerinin aynı anda "void fraction" olarak bilinen boşluk oranı etkisi ile etkilenmeleri	Düşük basınç etkisi altında sadece küçük yakıt zamanının sabit olduğu an için ortaya çıkmaktadır
	Paralel Kanal Kararsızlığı	Paralel kanallar arasındaki etkileşim	"U" borulu manometre osilasyonları türleri

olduğu söylenebilir. Kararlı bir akış durumunda ulaşılan yeni çalışma şartları başlangıç çalışma noktasına asimptotik olarak yaklaşır. Akışta zamanla oluşabilecek tedirginlik nedeniyle yeni bir kararlı çalışma noktasından farklı bir çalışma noktası ortaya çıkabilir ki bu tarz kararsızlıklar literatürde "statik kararsızlıklar" olarak adlandırılmaktadır. Bu kararsızlık sınırları sadece kararlı çalışma şartlarından tahmin edilebilmektedir.

2.8. Dinamik Kararsızlıklar

İki fazlı akış; iki fazlı karışımın sıkışabilirliği ile akışın ataleti arasında yeterli etkileşim ve " feed - back " denen geri besleme olayının gecikmesi söz konusu olduğundan yada kaynamalı bir kanalda üretilen buhar üretim oranına göre oluşan yoğunluk değişimi ile basınç düşümü ve debi arasında muhtelif " feed - back " olayları söz konusu olduğunda dinamik kararsızlıklar ortaya çıkmaktadır.

Dinamik kararsızlık mekanizmaları herhangi iki fazlı akışlı sistemlerde ortaya çıkan " feed - back " olayı ile ilgili ortaya çıkan gecikme zamanlarındaki artışla açıklanabilir. Akışta bazen dalga hızı ile orantılı olarak artan geçici türbülans olayı sistemde diğer noktalara da ulaşır. Akışkanın giriş hızındaki türbülans ancak belirli bir zaman geçtikten sonra sistem çıkışında hissedilebilir. Sistem boyunca ortaya çıkan bu gecikmeli türbülanslardan sonra oluşan yeni türbülanslı akış başlangıçtaki türbülans noktasına geri dönmeye başlar. Belirli şartlar temin edildiğinde bu proses kendiliğinden beslenerek süresiz devam edeceğinden sürekli akış osilasyonları ortaya çıkacaktır. Bu osilasyonların periyotları sistem boyunca tedirgin bir harekete sahip dalgaların geçiş zamanları ile karakterize edilirler.

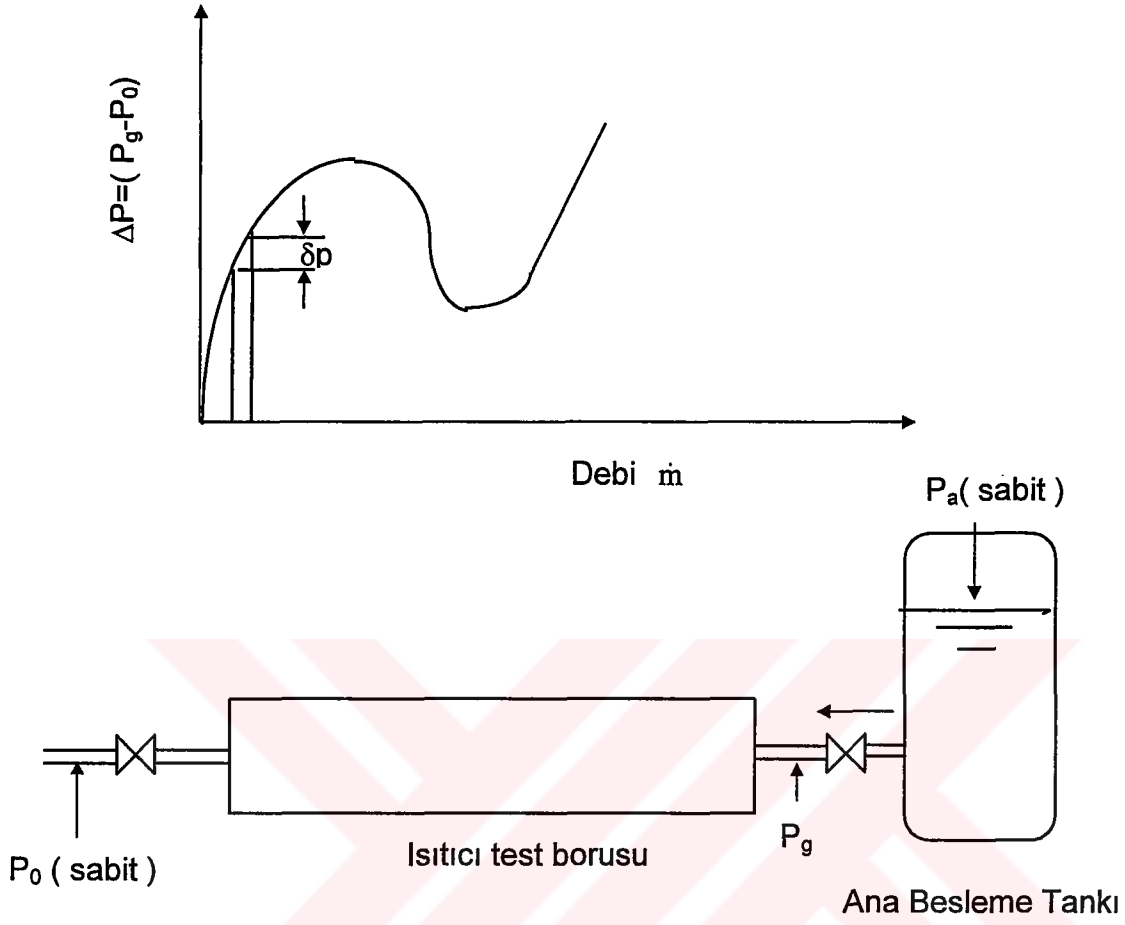
Bütün dinamik kararsızlıklar; sistem basıncı, ısı gücü değişimi ve kütleli debi değişimlerinin birer fonksiyonu olarak karakterize edilirler. Bizim deneysel çalışmamızda yoğunluk değişim tipi, basınç düşümü tipi ve termal tipteki üç önemli

dinamik osilasyonlar gözlemlenmiştir. Bu osilasyonların temel karakteristiklikleri aşağıda açıklanmıştır.

2.8.1. Yoğunluk Değişim Osilasyonları

Yoğunluk değişim osilasyonları kinematik dalga yayılım olayları ile ilgili olarak ortaya çıkmaktadır. İki fazlı akışlı sistemlerinde akış ortamındaki karışım hızında sıcaklık yada entalpi değerlerinin salınımlı hareketleri sonucunda yine karışımın kinematik dalga hızı ile beraber yoğunluk yada " void fraction " olarak bilinen boşluk oranındaki titreşimli hareketi ortaya çıkarmaktadır. Bu yüzden sistem içerisinde sürekli olarak daha yüksek yada daha düşük yoğunluklara sahip karışım dalgaları akmaktadır. Buharın sıkıştırılabilirliği yoğunluk değişim osilasyonlarının ortaya çıkmasında önemli bir faktör değildir. Yoğunluk değişim osilasyonlarının ortaya çıkmasında önemli rol oynayan iki temel faktörden birincisi; farklı yoğunluklara sahip iki bileşenden meydana gelmiş bir akışın söz konusu olması, ikinci önemli faktörde bu iki faz bileşeninin farklı oranlarda karışımında bulunduğu halde akışın devam etmesidir. Yoğunluk değişim osilasyonlarının meydana gelmesinde önemli rol oynayan bu faktörlerin iyi anlaşılması için Şekil 2.7 'de şematik olarak gösterilen bir ısıtıcı boru incelenmiştir.

Şekil 2.7 'den de görüldüğü gibi ısıtıcı boru kanalının sonunda bir çıkış kısıtlayıcısı bulunmaktadır. Ana besleme tankındaki P_a basıncı ile çıkıştaki kısıtlayıcıya karşılık gelen P_0 basıncının sabit olması nedeniyle sisteme tekabül eden toplam basınç düşümü tüm çalışma zamanında sabittir. Aynı zamanda ısıtıcı test borusundaki buhar üretim oranının da sabit olduğu kabul edilmektedir. Yine $t = 0$ da yani başlangıç anında çıkış kısıtlayıcısında geçerli olan basınç düşümü değeri kararlı durum değerinden ani bir düşüşle oldukça küçük bir değere inmesinden doğan mikroskobik seviyedeki kararsızlıkların etkisi nedeniyle iki fazlı akışta geçici bir



Şekil 2.7. Yoğunluk Değişim Osilasyonlarının Şematik Olarak Gösterilişi

türbülans oluşur ki bu kararsızlıklar yoğunluk değişim osilasyonları olarak bilinmektedir. Daha düşük yoğunluklu iki fazlı karışımın çıkış kısıtlayıcısından geçmesi sonucunda çıkış kısıtlayıcısındaki basınç düşümü azalacaktır. Çıkış kısıtlayıcısı için yazılan $\Delta P = P_g - P_0$ basınç düşümündeki ani bir azalma hemen hemen ses hızına yakın bir değerle giriş kısmına doğru yayılacaktır. P_g 'ın azalması ile de P_0 'nin sabit olması nedeniyle $P_a - P_g$ basınç farkı artacaktır. Bunun sonucunda akışkan giriş hızı oldukça küçük seviyede artacaktır. Bu yüzden $t = 0$ anında yani girişte başlayan daha yüksek yoğunluklu akışkandaki entalpi dalgaları t_1 zamanında kaynama sınırına ulaşır ve ısıtıcı kanal boyunca daha yüksek yoğunluklu bir karışım dalgası hareket etmektedir. $t = t_2$ anında yoğunluk dalgaları

kaynama sınırından ısıtıcı boru kanal çıkışına ulaşır. Yine $t = t_3$ zamanında bu dalgalar ısıtıcı boru kanal çıkışından çıkışta bulunan kısıtlayıcıya ulaşır. Bu üç zaman aralığının toplamı olan $\Delta t = t_1 + t_2 + t_3$ değeri sistemden bir akışkan partikülünün geçiş zamanı olarak adlandırılmaktadır. Δt zamanı geçtikten sonra daha yüksek yoğunluklu yoğunluk dalgaları çıkış kısıtlayıcı elemanına ulaşacaktır.

Burada meydana gelen basınç düşümü Şekil 2.7 'de açıkça anlaşıldığı gibi oldukça küçük seviyede artacaktır. Buda ($P_a - P_g$) farkını azaltacaktır. Bundan dolayı giriş hızı da oldukça küçük oranda azalarak daha düşük yoğunluklu akışkan ısıtıcı boru kanalı boyunca hareket edecektir. İkinci Δt zamanı geçtikten sonra daha düşük yoğunluklu yeni yoğunluk dalgaları çıkış kısıtlayıcı elemanına ulaşır.

Isıtıcı kanaldaki akışkan debisine karşılık gelen basınç düşümü eğrisindeki pozitif eğimli kısımlar için çıkış kısıtlayıcısındaki basınç düşümü debideki değişimlerle aynı oranda değişmektedir. Şayet daha yüksek yoğunluklu bir karışımın slug akış rejimi çıkış kısıtlayıcısına ulaşırsa bu çıkış kısıtlayıcı elemana karşılık gelen basınç düşümü de artacaktır. Çıkış basıncının sabit olması nedeniyle sistemin giriş debisi de azalacaktır.

Daha düşük debi değerlerinde buhar üretim oranının sabit olması yani ısı gücünün sabit olması nedeniyle daha düşük yoğunluğa sahip bir karışım meydana gelecektir. Çıkış kısıtlayıcısından daha yüksek yoğunluklu bir slug geçtikten sonra daha düşük yoğunluklu slug çıkış kısıtlayıcısından geçecektir. Bu daha düşük yoğunluklu karışım çıkış kısıtlayıcısına karşılık gelen basınç düşümünü azaltacaktır. Bunun sonunda sistem giriş debisi daha da artacaktır. Daha yüksek debide sistemde daha yüksek yoğunluklu karışıma neden olacaktır. Bu daha yüksek yoğunluklu karışım çıkış kısıtlayıcı elemanına ulaştığında tüm anlatılan bu çevrimsel olaylar tekrar cereyan etmeye başlayacaktır.

2.9.2. Basınç Düşümü Tipi Osilasyonlar

Şimdiye kadar yapılan çalışmalar neticesinde basınç düşümü tipi osilasyonların meydana gelmesinde etkili olan temel faktör akış ortamında bir sıkıştırılabilir hacmin olmasıdır. Bu tip osilasyonlar sadece test bölümüne karşılık gelen basınç düşümü debideki artışla azalmaya başladığı sırada meydana gelmekte ve bu osilasyonların periyotları sistemde mevcut olan sıkıştırılabilir hacim ile şekillenmektedirler. Şekil 2.8 'de basınç düşümü tipi osilasyonların temel mekanizmaları şematik olarak gösterilmiştir.

Basınç düşümü tipi osilasyonların mekanizmalarının şematik olarak gösterildiği Şekil 2.8 'de ki sisteme uygun olan kararlı durum için basınç düşümünü ifade eden bağıntılar şöyle yazılabilir;

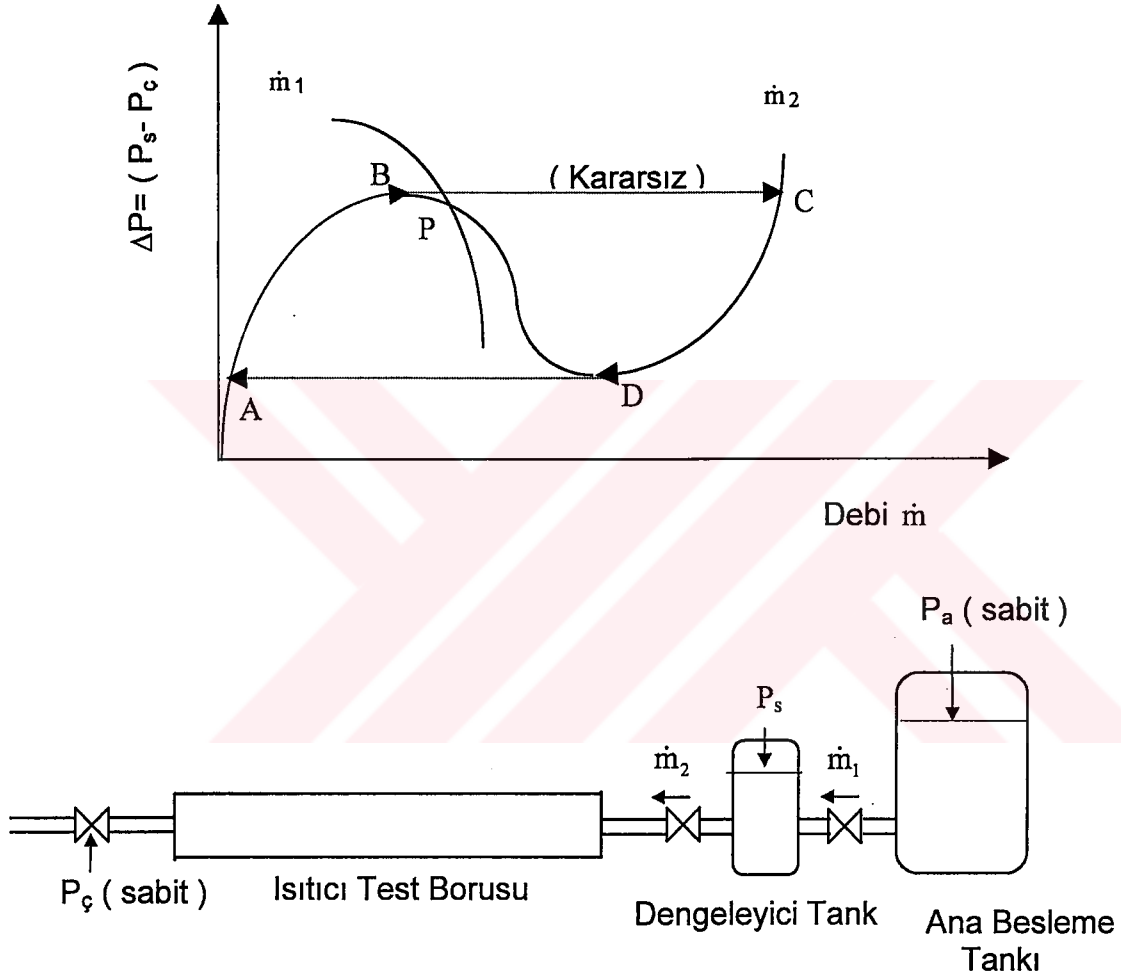
$$(P_a - P_s)_s = K_1 \dot{m}_1^2 \quad (2.4)$$

$$(P_s - P_c)_s = f(\dot{m}_2) \quad (2.5)$$

Burada P_a ve P_c sırasıyla ana besleme tankı basıncı ile ısıtıcı boru çıkış basıncını, P_s dengeleyici tank basıncını, $\dot{m}_1$ ve $\dot{m}_2$ dengeleyici tank giriş ve çıkış debilerini, K_1 ana besleme tankı ile dengeleyici tank arasındaki sürtünmeli basınç düşümü sabitini, f ise ısıtıcı test borusu giriş debisi $\dot{m}_2$ 'ye bağlı olan sistem basınç düşümünün bir fonksiyonunu göstermektedir.

Yukarıda yazılan her iki bağıntıda kararlı durum çalışma noktası P için $\dot{m} = \dot{m}_1 = \dot{m}_2$ olması gerekmektedir.

Şekil 2.8 'den de açıkça görülebileceği gibi sabit P_a ve P_s değerleri ile beraber debi $\dot{m}$ 'ye karşılık dengeleyici tank basıncı P_s için iki eğri çizilebilir. Bu eğrilerden biri $\dot{m}_1$ 'in fonksiyonu olan P_s 'yi göstermektedir. Bu iki faktör arasındaki matematiksel



Şekil 2.8. Basınç Düşümü Tipi Osilasyonların Şematik Olarak Gösterilişi

bağıntıyı gösteren (2.4) bağıntısına dış karakteristik adı verilmektedir. Diğer eğri ise $\dot{m}_2$ 'nin bir fonksiyonu olan P_s 'yi göstermektedir. Bu da iç karakteristik olarak adlandırılmaktadır. Şayet bu iki eğri bir bölgede kesişirlerse ki bu konumun matematiksel ifadesi $d(P_s - P_ç)_s / d\dot{m}_2 < 0$ (bu ara kesit Şekil 2.8 'de P ile

gösterilmiştir) P_s 'deki küçük bir artış $\dot{m}_2$ 'yi $\dot{m}_1$ 'den daha fazla miktarda azaltacaktır. Bu da dengeleyici tankta sıvı birikimine neden olarak P_s basıncını daha da arttırmaktadır. Bu yüzden çalışma noktası P, B noktasına ulaşınca kadar $\dot{m}_2$ eğrisi boyunca hareke eder. Bu proses dengeleyici tank giriş ve çıkış debileri arasındaki dengesizlik yüzünden B noktasında durmayarak çalışma noktasının C 'ye ulaştığı bir akış gezintisine sebep olacaktır. C noktasında $\dot{m}_2$ debisi $\dot{m}_1$ 'den daha büyüktür ve dengeleyici tanktaki azot - buhar karışımının dekompozisyonun dan yani ayrışmasından dolayı P_2 basıncı azalarak çalışma noktasının eğri boyunca C 'den D 'ye ulaştığı görülmektedir. D noktasında başka bir akış gezintisinden dolayı çalışma noktası A 'ya doğru hareket ederek prosesin bir ABCDA limit çevrimi tarzında tekrarlanan şekilde ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Bu limit çevrimi genel basınç düşümü osilasyon olayını açıklamakla birlikte bu osilasyonların periyotlarının tahmininde iyi sonuçlar sağlamaktadır. Aynı zamanda basınç düşümü osilasyonlarının basınç düşümü oranlarının yüksek olduğu kısımlarda yoğunluk değişim osilasyonlarının da meydana gelebileceğini bu limitse çevrim göstermektedir. Bu nedenle bu limitse çevrimde basınç düşümünün yükseldiği AB hattı boyunca yoğunluk değişim osilasyonlarının oluşmasında temel faktör olan sıkıştırılabilir hacim ya da ısıtıcı test borusundan önce dengeleyici tank içerisinde temin edilebilir ya da uzun test bölümlerinde mevcut olan yeterli büyüklükteki iç sıkıştırılabilir hacimlerden de temin edilebilir. Basınç düşümü tipi osilasyonların periyotları genellikle yoğunluk değişim tipi osilasyonların periyotlarından daha büyüktür. Basınç düşümü osilasyonlarının periyotları sıkıştırılabilir hacmin miktarıyla ilgili sabit bir zaman aralığı ile belirlenir. Sıkıştırılabilir hacmin miktarı azaldığında basınç düşümü tipi osilasyonların frekansları yoğunluk değişim tipi osilasyonların frekansları ile kıyaslandığı zaman aralarındaki farklılığın anlaşılması kolay olmayacaktır.

2.9.3. Termal Osilasyonlar

Bu tip osilasyonların sıvı filmindeki kararsızlıkla ilgili olarak ortaya çıktığı belirlenmiştir. Sabit ısı akılı sistemlerde ısıtıcı test borusunun cidar sıcaklıklarında büyük dalgalanmalar söz konusu olmaktadır. Isıtıcı test borusu boyunca verilen bir nokta için film kaynaması arasında akışın titremesi sonucu büyük genlikli sıcaklık osilasyonları meydana gelmektedir.

Yoğunluk değişim osilasyonları termal osilasyonların ortaya çıkması için gereklidir. Bu tip osilasyonlar çok nadir olarak görülebilen bir akış kombinasyonuna ve termal karakteristikliklere sahiptirler. Termal osilasyonlar çok zararlı olabilmektedirler ve basınç varyasyonları ile beraber oluşan sıcaklık varyasyonlarının da $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'yi aştığı tespit edilmiştir. Yukarıda temel oluşum mekanizmaları detaylı olarak verilen iki fazlı akış dinamik kararsızlıklarına etki eden temel parametreler aşağıdaki gibi genel hatları ile verilmiştir.

1. Kanal geometrisi

Kanalın hacmi, yüzey şartları, sistemdeki kanal sayısı, giriş ve çıkış kısıtlayıcıları ve kanalın yatay yada dikey olması

2. Çalışma şartları

Sistem basıncı, kütleli debi, ısı gücü ve aşırı soğutma girişi

3. Sınır şartları

Termal sınır şartları ile giriş ve çıkış basınç limitleri

3. İKİ FAZLI AKIŞLARIN TERMODİNAMİK ANALİZİ

İki fazlı akışların davranışlarının belirlenmesinde literatürde bir çok denklem sistemi kullanılmıştır. Aynı zamanda süreklilik, enerji ve momentum denklemleri kullanılarak iki fazlı akışlar için kararlı - kararsız akış durumlarını matematiksel olarak karakterize eden çeşitli nümerik çalışmalar yapılmıştır. İki fazlı akışlar için değişik hipotezlere dayanan matematiksel modeller geliştirilerek dinamik kararsızlıklar sonucunda ortaya çıkan osilasyonların periyotları, frekansları ve genlikleri yine nümerik analizle incelenmiştir. Tespit edilen ampirik yada yarı ampirik denklemler yardımıyla bu kararsızlıkların temel karakteristiklikleri ifade edilmiştir. Nümerik modelleme çalışmaları yapılırken iki fazlı akış denklemlerinin kolayca çözümlerini kolaylaştırmak amacıyla bazı kabuller yapılmıştır. Aynı şekilde iki fazlı akış kararsızlıkları üzerine etkili olan parametrelerin belirlenebilmesi amacıyla boyutsal yada boyutsuz formda çalışmalar yapılarak bu kararsızlıkların sistem üzerindeki olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılmasını temin edebilecek optimum çalışma şartlarının belirlenmesine çalışılmıştır.

3.1. İki Fazlı Akışlar İçin Temel Denklemler

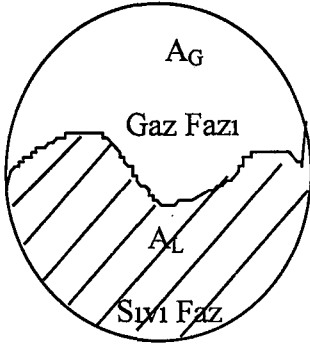
İki veya daha çok fazlı akışlar aynı ve farklı bileşenlere sahip olup olmadığına göre incelemeye tabi tutulmaktadır. Akışın bir boyutlu veya çok boyutlu olup olmaması da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu çalışma da bir boyutlu akış söz konusu olduğundan daha ziyade bir boyutlu akışlar incelenecektir.

3.1.1. Süreklilik Denklemi

a) Boşluk Oranı (Void Fraction)

İki fazlı akışlarda süreklilik denkleminin yazılmasında çok sık kullanılan boşluk

oranı; iki fazlı akış ortamında gaz fazı tarafından doldurulan akış kanalı kesit alanının toplam kanal kesit alanına oranı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3.1'de gaz ve sıvı kesit alanları verilmiştir.



A_L : Sıvı faz akışı kanal kesit alanı [m²]

A_G : Gaz fazı akışı kanal kesit alanı [m²]

Buna göre boşluk oranı:

$$\alpha = A_G / A = A_G / (A_L + A_G) \quad (3.1a)$$

$$1 - \alpha = A_L / A \quad (3.1b)$$

Şekil 3.1. Gaz ve sıvı faz kesit oranları

b) Dinamik Kuruluk Derecesi

Belli bir akış kanal kesitinde akan gaz fazı debisinin toplam debiye olan oranıdır. Yani;

$$x_D = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_g + \dot{m}_L} = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}} \quad (3.2)$$

Bu denklemde gösterilen x_D değerine genellikle kuruluk derecesi veya dinamik kütle kuruluk derecesi adı verilmektedir. Kuruluk derecesi akış kanalı boyunca değişmektedir. $\dot{m}_G$ ve $\dot{m}_L$ değerleri sırasıyla gaz ve sıvı faz debilerini gösterirken $\dot{m}$ değeri de toplam akış debisini göstermektedir.

c) İki fazlı akış entalpisi

İki fazlı akış entalpisi, akışkanın birim kütesine ilave edilen ısı miktarıyla girişteki akışkanın gaz ve sıvı fazları entalpileri toplamına eşittir. Fazlar arasında termodinamiksel dengenin olduğunu kabul edersek;

$$(\dot{m}_G + \dot{m}_L)h_{IF} = \dot{m}_G h_G + \dot{m}_L h_L \quad (3.3)$$

yazılabilir. Burada h_L doymuş sıvı faz entalpisini, h_G 'de doymuş buharın entalpisini göstermektedir.

Bu duruma göre dinamik kuruluk derecesi yeniden şöyle yazılabilir;

$$x_D = \frac{(h_{IF} - h_L)}{(h_G - h_L)} \quad (3.4)$$

d) Statik kütle kuruluk derecesi

Verilen gaz kütesinin iki fazlı karışımın toplam kütesine olan oranıdır.

$$x_s = \frac{m_G}{m_G + m_L} \quad (3.5)$$

Şayet fazlar arasında kayma söz konusu değilse x_s 'in x_D 'ye eşit olduğu anlaşılmaktadır.

e) Hacimsel kurulum derecesi

Verilen bir zamanda bir kesitten geçen gazın hacimsel debisinin iki fazlı karışımın toplam hacimsel debisine oranıdır.

$$x_v = \frac{\dot{V}_G}{\dot{V}_G + \dot{V}_L} = \frac{\dot{V}_G}{\dot{V}} \quad (3.6)$$

Dikkat edilirse fazlar arasında kayma söz konusu değilse α 'nın x_v 'ye eşit olduğu anlaşılmaktadır.

f) Kayma (slip) faktörü

Bir gaz veya buhar fazı hızının sıvı fazı hızına olan oranına denir.

$$K_{IF} = \frac{U_G}{U_L} \quad (3.7)$$

g) Bağlı hız

Gaz veya buhar fazı ile sıvı fazı hızı arasındaki farktır.

$$U_{GL} = U_G - U_L \text{ [m/ s]} \quad (3.8)$$

Şayet akış homojen olursa ve sırasıyla U_R ve U_H homojen akıştaki bağlı hız ile homojen akış hızı olmak üzere;

$$U_H = U_G - U_H \text{ [m/ s]} \quad (3.9)$$

bağıntısı geçerlidir.

h) Yüzeysel (superficial) hız

Fazlardan yalnız birinin kanalda aktığı durumdaki hızdır.

$$U_{sg} = \frac{\dot{V}_G}{A} = \frac{\dot{V}_G}{A_G + A_L} \quad [\text{m / s}] \quad (3.10a)$$

$$U_{sl} = \frac{\dot{V}_L}{A} = \frac{\dot{V}_L}{A_G + A_L} \quad [\text{m / s}] \quad (3.10b)$$

i) Kütlesel akı

Kütlesel debinin boru kesit alanına oranına denmektedir.

$$G = \frac{\dot{m}}{A} = \rho U \quad [\text{kg / m}^2 \text{ s}] \quad (3.11)$$

Burada; $\rho = 1 / v$ [kg / m³] biriminde yoğunluğu gösterirken U ise [m / s] biriminde akış hızını göstermektedir.

j) Ortalama yoğunluk

İki fazlı akışlar için kullanılan ortalama yoğunluk terimi boşluk oranına bağlı olarak şöyle yazılmaktadır:

$$\rho_m = \alpha \rho_G + (1 - \alpha) \rho_L = \frac{1}{v_m} \quad [\text{kg} / \text{m}^3] \quad (3.12)$$

k) Gaz veya buhar fazı debisi

İki fazlı akış ortamındaki gaz veya buhar fazının debisi şu ifade ile gösterilmektedir:

$$\dot{m}_G = \dot{m}x = \int_{A_G} \rho_G U_G dA \quad [\text{kg} / \text{s}] \quad (3.13)$$

l) Sıvı fazı debisi

İki fazlı akış ortamındaki sıvı fazı debisi şöyle yazılabilir:

$$\dot{m}_L = \dot{m}(1 - x) = \rho_L U_L (1 - \alpha) A \quad [\text{kg} / \text{s}] \quad (3.14)$$

Şimdi yukarıda yazdığımız denklemler yardımıyla bir boyutlu akış için ρ_G ve U_G 'nin A_G akış kanalı kesit alanında değişmediğini kabul ederek (3.13) denklemini yeniden yazarsak;

$$\dot{m}_G = \dot{m}x = \rho_G U_G \int_{A_G} dA = \rho_G U_G \alpha A \quad [\text{kg/s}] \quad (3.15)$$

(3.15) denklemini (3.14) denklemine bölünürse;

$$K_{IF} = \frac{U_G}{U_L} = \left[\frac{x}{(1-x)} \right] \left[\frac{(1-\alpha)}{\alpha} \right] \frac{\rho_L}{\rho_G} \quad (3.16)$$

elde edilir. Dikkat edilirse kayma faktörü K_{IF} için yeni bir bağıntı elde edilmiştir. Bu bağıntıdan aşağıdaki denklem elde edilebilir.

$$\alpha = \frac{1}{\left\{ 1 + K_{IF} \left[\frac{(1-x)}{x} \right] \frac{\rho_G}{\rho_L} \right\}} \quad (3.17)$$

Şayet fazlar arasında hiçbir kayma söz konusu değilse o zaman $K_{IF}=1$ şartı sağlanır ki (3.17) denklemi şu hale indirgenebilir;

$$\alpha = \frac{1}{\left\{ 1 + \left[\frac{(1-x)}{x} \right] \frac{\rho_G}{\rho_L} \right\}} \quad (3.18)$$

Benzer şekilde (3.6) denklemini de şu hale indirgeyebiliriz:

$$x_v = \frac{1}{\left\{ 1 + \frac{(1-x)}{x} \frac{\rho_G}{\rho_L} \right\}} \quad (3.19)$$

Şayet kayma söz konusu değilse yani $K_{IF}=1$ şartı sağlanıyorsa iki faz akışı bir homojen karışımdır. Bu tarz akışa genel olarak "homojen akış" adı verilmektedir. Bu durumda;

$$\alpha = x_v \quad (3.20)$$

şartı geçerli olmaktadır.

3.1.2. İki faz enerji ve momentum denklemleri

Bir boyutlu iki fazlı akışlar için şu denklem yazılabilir;

$$-\frac{dP}{dz} = \frac{S}{A}\tau_0 + \frac{d}{dz}\{\alpha G_G U_G + (1-\alpha)G_L U_L\} + g\sin\theta[\alpha\rho_G + (1-\alpha)\rho_L] \quad (3.21)$$

Daha önce yazılan G_L , G_G , U_L ve U_G değerlerinin yardımıyla (3.21) denklemini şu hale indirgenebilir;

$$-\frac{dP}{dz} = \frac{S}{A}\tau_0 + G^2 \frac{d}{dz} \left\{ \frac{x^2}{\alpha\rho_G} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_L} \right\} + g\sin\theta\{\alpha\rho_G + (1-\alpha)\rho_L\} \quad (3.22)$$

Şayet parantez içerisindeki terimleri sırasıyla V_{IF} ve ρ_{IF} ile gösterilirse;

$$-\frac{dP}{dz} = \frac{S}{A}\tau_0 + G^2 \frac{dv_{IF}}{dz} + \rho_{IF}g\sin\theta \quad (3.23)$$

elde edilebilir. İki fazlı akış için enerji denklemi şöyle ifade edilebilir;

$$\begin{aligned} dq - dw = d\{xPU_{SG} + (1-x)PU_{SL}\} + dq + dF - Pd\{xU_{SG} + (1-x)U_{SL}\} + \\ d\left\{\frac{1}{2}xU_G^2 + \frac{1}{2}(1-x)U_L^2\right\} + g\sin\theta dz \end{aligned} \quad (3.24)$$

Bu denklem önce yazılan değerler dikkate alınır;

$$-\frac{dp}{dz} = \rho_H \frac{dF}{dz} + \frac{1}{2}\rho_H G^2 \frac{d}{dz} \left\{ \frac{x^3}{\alpha^2\rho_G^2} + \frac{(1-x)^3}{(1-\alpha)^2\rho_L^2} \right\} + \rho_H g\sin\theta \quad (3.25)$$

Burada ρ_H homojen akış durumundaki akışkan yoğunluğu olup şu ifade ile tanımlanmaktadır;

$$\frac{1}{\rho_H} = \frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L} \quad (3.26)$$

Aynı şekilde fazlar arasında hiç bir kaymanın olmadığı homojen akış durumundaki akışkan özgül hacmi şöyle ifade edilebilir;

$$v_H = \frac{\dot{V}_G + \dot{V}_L}{\dot{m}} = \frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L} \quad (3.27)$$

Bu değerleri (3.24) denkleminde yerine konursa homojen akış durumundaki denklem şu hale indirgenmiş olur;

$$-\frac{dP}{dz} = -\frac{dP_F}{dz} + G^2 \frac{dv_H}{dz} + \rho_H g \sin \theta \quad (3.28)$$

İki fazlı akışlar için momentum ve enerji denklemleri arasında şöyle bir bağıntı da tanımlanmıştır;

$$G^2 \frac{d}{dz} \left\{ \frac{x^2}{\alpha \rho_G} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha) \rho_L} \right\} + g \sin \theta \{ \alpha \rho_G + (1-\alpha) \rho_L \} \quad (3.29)$$

$$= \frac{1}{2} \rho_H G^2 \frac{d}{dz} \left\{ \frac{x^3}{\alpha^2 \rho_G} + \frac{(1-x)^3}{(1-\alpha)^2 \rho_L^2} \right\} + \rho_H g \sin \theta$$

4. İKİ FAZLI AKIŞ KARARSIZLIKLARININ MATEMATİK MODELİ

İki fazlı akışların matematik modeli genellikle korunum denklemleri yardımıyla elde edilir. Uygun bağıntıları ifade etmek için bu denklemlere bazı ilaveler gerekmektedir. Sınır şartları da düşünülen özel problem durumuna bağlı olarak tespit edilir. Her bir formülün teşkilinde ve çözüm kademesinde fiziksel kabuller ve yaklaşımlar esastır. Tabiatıyla yapılan bu kabul ve yaklaşımların doğruluğu deneysel çalışmalarla test edilmelidir.

İki fazlı akış davranışlarını tanımlamak amacıyla farklı modeller kullanılmıştır. Literatürde daha çok kullanılan iki fazlı akış modelleri aşağıda verilmiştir. Bölüm 3 'de korunum denklemlerinin çeşitli formasyonları ifade edilmişti. Uygulamada da bu denklemlerin çoğunda zamana bağlı bir boyutlu formasyonlar daha çok tercih edilmektedir. Her bir faz için yazılan denklemlerin çözümü için test borusu cidarındaki sürtünme ve ısı transferi olayları için dört adet, fazlar arası yüzey için üç adet olmak üzere toplam yedi adet denklem teşkil edilerek faz hızları, faz entalpileri, fazlar arası kayma hızı ve termodinamiksel dengesizlik gibi önemli akış parametrelerinin hesaplanması mümkün olmaktadır.

Bu bağıntıların komplekslik derecelerini azaltmak için bir çok araştırmacı "drift flux " olarak adlandırılan fazlar arası kayma hızını, " void fraction " olarak adlandırılan boşluk oranını yada fazlar arası kayma oranını değerlendiren korelasyonları önermişlerdir. İki fazlı akış problemlerinin çözümünde bu korelasyonlardan birini kullanarak daha önce ifade edilen altı adet faz denklemi ayrı ayrı yazılarak iki faz karışımı için yeniden düzenlenir.

İki fazlı akışlarla ilgili kararsızlık çalışmalarında daha çok homojen akış denge modeli ile drift flux modeli kullanılmaktadır. Bu iki modelde iki fazlı akış ortamının

sıkıştırılabilir tek faz akışı gibi olduğunu, sıcaklığın doyma sıcaklığına eşdeğer olduğu, faz hızlarının eşit olduğu kabul edilmektedir. Bu kabuller fazlar arası ısı ve momentum transferi içinde geçerli olmaktadır.

4.1. Homojen model

Homojen model iki fazlı akış kararsızlık problemini fiziksel bir boyuta taşıyan en basit modellerden biridir. Bu modelin uygulanabilirliği genellikle belirli akış rejimleri için çok elverişli sonuçlar vermektedir. Kabarcıklı, sisli yada düzensiz akış gibi iki fazın çok iyi karışmış olduğu akış rejimleri için homojen model son derece iyi sonuçlar sağlamaktadır. Buna mukabil "annular" akış rejimi denen ince dairesel yada halkalı akış rejimi ile slug akış rejimi için bu model kullanılarak elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalarla elde edilen sonuçlarla mukayese edildiğinde tatminkar düzeyde sonuçların elde edilemediği literatürde yapılan araştırmalar sonucunda ortaya çıkartılmıştır.

Buna göre homojen akış modeli esas alınarak kararsız vizkos akışlar için korunum denklemleri şöyle yazılmıştır [66,67];

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -U \frac{\partial p}{\partial z} - \rho \frac{\partial U}{\partial z} \quad (4.1)$$

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} = -\rho U \frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{2F}{d} \rho U^2 - \rho g \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial z}(Gh) = \frac{4}{d}h(T_s - T_f) \quad (4.3)$$

İki fazlı akış osilasyonları saniyeler mertebesinde olan periyotlara sahiptirler ve akış özelliklerindeki değişimler termodinamiksel denge şartlarına kolayca

ulaşılmamasından dolayı nispeten yavaş bir hızda meydana gelmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarla kaynama noktasından çok kısa bir süre sonunda void fraction değerlendirilmeye tabi tutulabilecek düzeyde meydana geldiği tespit edilmiştir.

Boru cidarı ve sıvı - buhar iki faz karışımı arasındaki sürtünme faktörü iki fazlı akışlar için şöyle yazılabilir;

$$F = C \left(\frac{\rho U d}{\mu_{IF}} \right)^{-0.25} \quad (4.4)$$

Denklem (4.4)'deki C terimi boru pürüzlülüğüne bağlı bir sabittir, μ_{tp} ise iki faz için efektif vizkosite olup Dukler 'in tanımı ile deneysel sonuçlarla çok iyi uyum arz eden bağıntı aşağıdaki gibi verilmiştir [66,67];

$$\mu_{IF} = (1-x) \frac{\rho}{\rho_L} \mu_L + x \frac{\rho}{\rho_G} \mu_G \quad (4.5)$$

Akışkana verilen ısı gücü için şöyle bir ifade yazılabilmektedir;

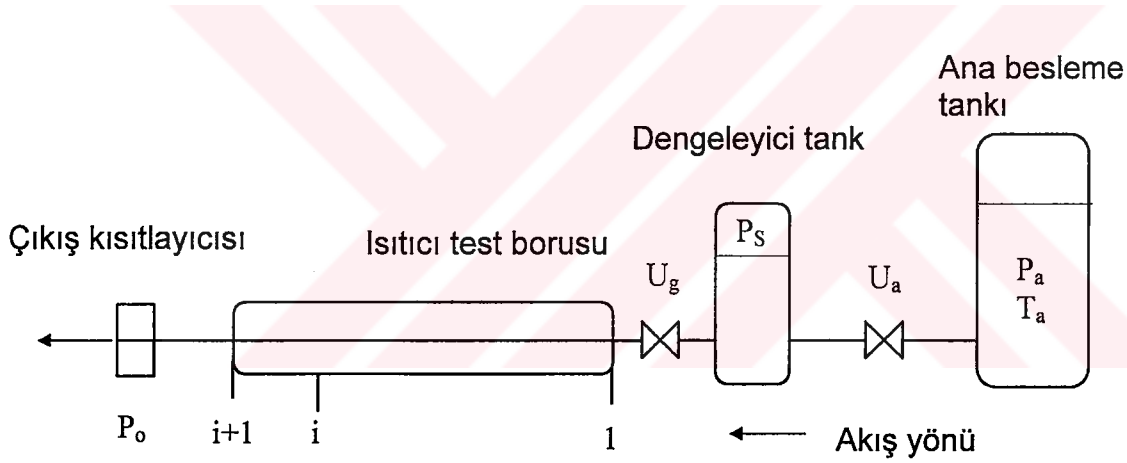
$$q = h A_T (T_s - T_r) \quad (4.6)$$

Bu modelde ki ısı transfer katsayısı h ile iki fazlı karışımın kütle debisi arasında lineer bir bağıntının olduğu kabul edilmiştir. Bu bağıntı aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [66,67];

$$h = h_0 \left[b + (1-b) \frac{G}{G_0} \right] \quad (4.7)$$

h_0 kararlı durum ısı transfer katsayısıdır, G_0 kararlı durumdaki kütle akısını ve b terimi de debiden bağımsız ısı transfer kesri olup sıfırdan bire kadar değişebilmektedir. Bu b kesri deneysel olarak bulunabilir ya da kaynamalı ısı transferinde kullanılan korelasyonlardan tahmin edilebilir.

Bu deneysel çalışmaya da esas teşkil edebilecek sistem aşağıda Şekil 4.1 'de gösterilmiştir. Dengeleyici tanktan ısıtıcı borunun girişine kadar olan kısım Bölge-1 olarak adlandırılmıştır. Sistemin geriye kalan diğer kısımları ise akış rejimlerine ve sınır şartlarına uygun olarak bölgelere ayrılmıştır.



Şekil 4.1. Kaynamalı yatay bir akış sisteminin şematik gösterimi

Şekil 4.1 'de gösterilen sistemdeki çıkış kısıtlayıcısına tekabül eden basınç düşümünün tahmin edildiği ampirik bir bağıntı şöyle yazılmıştır [66,67];

$$\Delta P_o = 142 \left(1 + \frac{V_{LG}}{V_L} \right) \frac{G^2 V_{LG}}{2} \quad (4.8)$$

Esas denklemlerle beraber (4.1), (4.2) ve (4.3) denklemleri sabit çıkış basıncı için iki fazlı kararlı akış durumuna göre sonlu fark tekniği kullanılarak çözümlenmiştir. Burada özelliklerin basıncın fonksiyonu olduğu kabul edilmiştir.



5.DENEY DÜZENEGİ VE DENEYSEL YÖNTEM

5.1. Deney Düzenegi

Deney düzenegi Şekil 5.1'de şematik olarak gösterilen zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı yatay bir boru kanal sisteminden meydana gelmiştir. Deney düzenegi iki fazlı akış dinamik kararsızlıklarından basınç düşümü, yoğunluk değişimi ve termal osilasyonları üretebilecek özellikte dizayn edilmiştir.

Bu çalışmada sistemin kararlılığı üzerine; girişte akışkan aşırı soğutma düzeyinin, ısı akısının, akışkan debisinin, sıkıştırılabilir hacmin, akışkan giriş sıcaklığının ve boru kanalı içerisine yerleştirilen farklı ısı transfer iç yüzey konfigürasyonuna sahip ısı transfer yüzey artırım elemanlarının ne gibi bir etkiye sahip olduklarını ortaya çıkarmak tadır.

İş yapan akışkan olarak su ile benzer özelliklere sahip olan ve düşük kaynama noktası ile buharlaşma gizli ısısına sahip olması nedeniyle R-11 kullanılmıştır.

Şekil 5.1'den de açıkça görülebileceği üzere tüm deney seti üç temel bölümden oluşmuştur.

- a) Akışkan besleme bölümü
- b) Test bölümü
- c) Akışkan depolama bölümü

Aşağıdaki şekilde şeması verilen deney düzeneginin ön cepheden çekilmiş iki adet fotoğrafı Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te verilmiştir.





Şekil 5.2. İki Fazlı Akış Deney Düzenekinin Önden Görünüşü



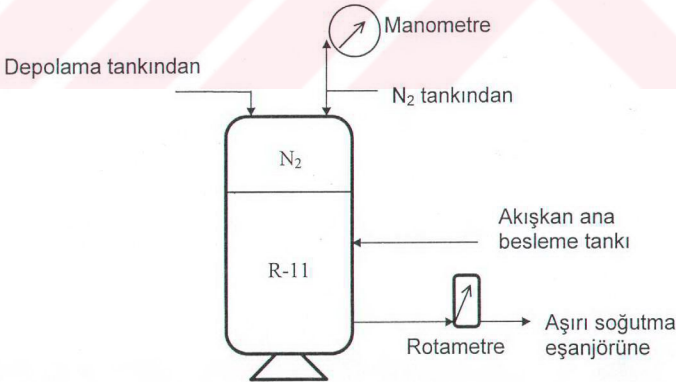
Şekil 5.3. İki Fazlı Akış Deney Düzenekinin Önden Görünüşü

5.1.1. Akışkan Besleme Bölümü

Bu bölüm Şekil 5.1'de gösterildiği gibi ana besleme tankı, debi ölçer, kontrol vanası ve akışkan aşırı soğutma eşanjörü gibi elemanlardan oluşmuştur.

a) Ana Besleme Tankı

Şekil 5.4 'den görüleceği gibi ana besleme tankı deneyler süresince kullanılabilecek yeterli hacimdeki akışkanı depolamaktadır. 0.5m çapında, 1.5m yüksekliğinde ve 0.3 m^3 hacminde dikey pozisyonda sisteme montelenmiş silindirik bir tanktan meydana gelmektedir. Tank paslanmaz çelikten yapılmış olup 30 Bar (420Psi) işletme basıncına mukavemet edecek şekilde imal edilmiştir. Ana besleme tankı üzerine iş yapan akışkan ile azot gazının giriş ve çıkışlarını temin edecek bağlantılarla tank basınç seviyesini gösteren manometre montelenmiştir. Ayrıca ana besleme tankının fotoğrafları Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 'da verilmiştir.



Şekil 5.4. Akışkan ana besleme tankının şematik olarak gösterilişi



Şekil 5.5. Ana besleme tankının görünüşü



Şekil 5.6. Ana besleme tankı ile Azot gazı tankı

b) Rotametre

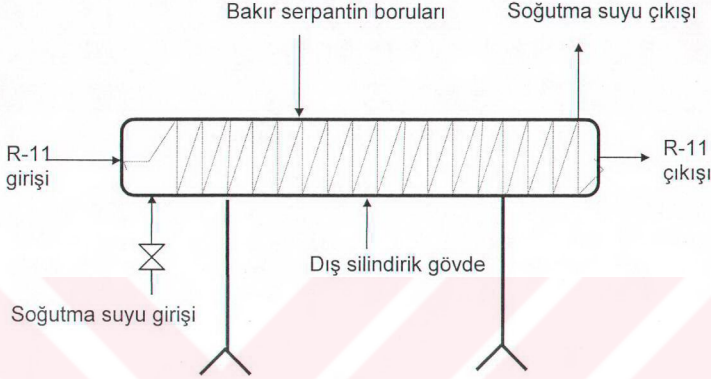
Ana besleme tankından gönderilen akışkanın debisini ayarlayabilmek amacıyla sisteme bir rotametre montelenmiştir. İstenen debi ayarı rotametrein üzerinde bulunan kontrol vanası yardımıyla yapılmaktadır. Rotametre şeffaf bir PVC malzemesinden yapılmış olup maksimum çalışma basıncı 200 Psig ve maksimum çalışma sıcaklığı 180 °F 'dir. Su için dizayn edilmiş olan debi ölçer uygun kalibrasyonla R-11 için g/s biriminde okuma imkanı verebilecek şekilde yeniden kalibre edilmiştir. Debi ölçme aralığı 0-200 g/s değerleri arasındadır.

c) Isı Eşanjörü

Akışkan besleme bölümünün son elemanı olan ısı eşanjörü test bölümüne akışkanın istenen sıcaklıkta girmesini temin etmek amacıyla kullanılmıştır. İki fazlı akış çalışmalarında akışkan giriş sıcaklığının büyük önemi vardır. Aşırı soğutucu eşanjörün dış gövdesi 0.16m 'lik çapta ve 1.45m uzunluğunda dikişli siyah boru malzemesinden yatay olarak imal edilmiştir. İş yapan akışkanın dolaştırıldığı kanalın ısı transfer yüzeyini arttırmak amacıyla 0.02m çapa sahip bakır borudan kıvrımlı olarak dizayn edilmiştir. Test bölümü girişinde istenen sıcaklığı sağlamak amacıyla eşanjör içerisindeki bakır boruların dışından soğutma suyu geçirilmektedir. Soğutma suyunun debisi bir küresel vana yardımıyla ayarlanarak istenen giriş sıcaklık değeri elde edilmektedir. Bu ısı eşanjörünün şematik bir gösterimi Şekil 5.7 'de gösterilmektedir.

5.1.2. Test Bölümü

Bu bölüm kontrollü kaynama ve iki fazlı akış osilasyonlarının meydana geldiği kısımdır. İki fazlı akış osilasyonlarının gözlemlenmesinde ihtiyaç duyulan ölçümlerin büyük bir çoğunluğu deney düzeneğinin bu bölümünden yapılmaktadır. Test bölümü; bir dengeleyici tank, ısıtıcı test borusunun yerleştirildiği test odası,

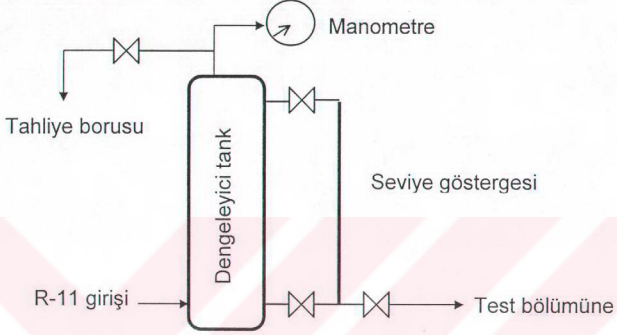


Şekil 5.7. Isı eşanjörü

ısıtıcı test borusuna gerekli olan ısı gücünü temin eden bir DC güç kaynağı, gözetleme camı ve test bölümü çıkışında kısıtlama görevi yapan bir orifis levhası test bölümümüzün temel ekipmanlarını meydana getirmektedir.

Şekil 5.8 , Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 'dan da görüleceği gibi dengeleyici tank 0.05 m^3 hacminde imal edilmiş olup test borusu boyunca oluşacak iki fazlı akış olaylarını incelemek için gerekli olan sıkıştırılabilir hacmi sağlayan bir elemandır. Dengeleyici tanka içindeki iş yapan akışkan ve sıkıştırılabilir hacim seviyelerinde oluşacak varyasyonları gözle gözlemleyebilmek amacıyla bir şeffaf cam seviye göstergesinin yanı sıra dengeleyici tank basıncını gösteren bir manometre montelenmiştir.

Test odasından önce test bölümü girişinde Şekil 5.10 'da gösterildiği gibi ısıtıcı test borusuna giren akışkanın giriş debisindeki mikro seviyelerdeki varyasyonları ölçmek amacıyla bir diferansiyel basınç transdüseri, akışkan giriş basıncını



Şekil 5.8. Dengeleyici tankın şematik gösterimi

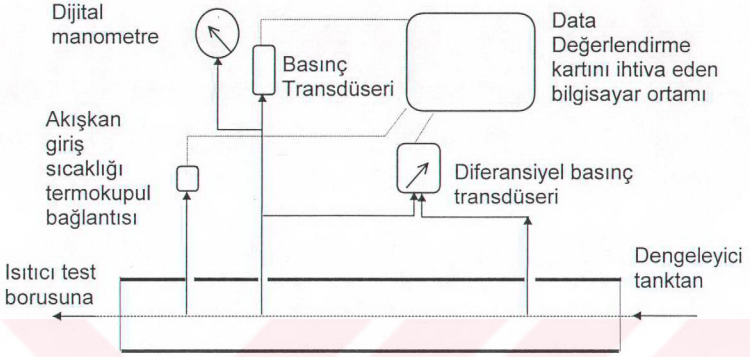


Şekil 5.9. Isı eşanjörü ile dengeleyici tankın görünüşü



Şekil 5.10. Dengeleyici tank

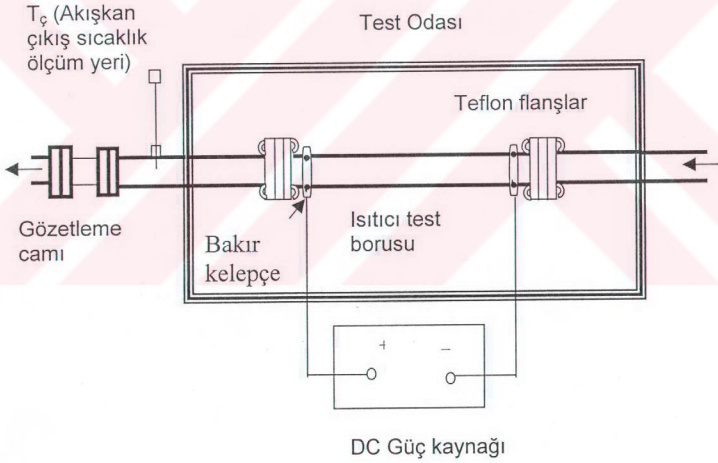
ölçmek amacıyla Bourdon tipi bir dijital manometre, girişte akışkan basınç seviyelerinde oluşabilecek mikro seviyedeki dalgalanmaları ölçebilecek bir basınç transdüseri ile yine test bölümü girişinde iş yapan akışkanın giriş sıcaklığını tespit etmek amacıyla da bir termokupul ölçüm elemanı sisteme monte edilmiştir. Her iki basınç transdüserin den alınan mili volt seviyelerindeki sinyaller laboratuvar da ki imkanlar kullanılarak imal edilen ve uygun kalibrasyon yeteneğine sahip elektronik devresinden geçirilerek hızlı data okuma yeteneği olan ilave bir kartı da içeren bilgisayar ortamında değerlendirilmektedir. Aynı şekilde akışkan giriş sıcaklıklarını ölçmek için kullanılan termokupul elemanından alınan akışkan giriş sıcaklık dataları aynı bilgisayar ortamına kaydedilmektedir.



Şekil 5.11. Test odasından önce giriş basınç ve sıcaklık ölçüm elemanlarının şematik gösterilişi

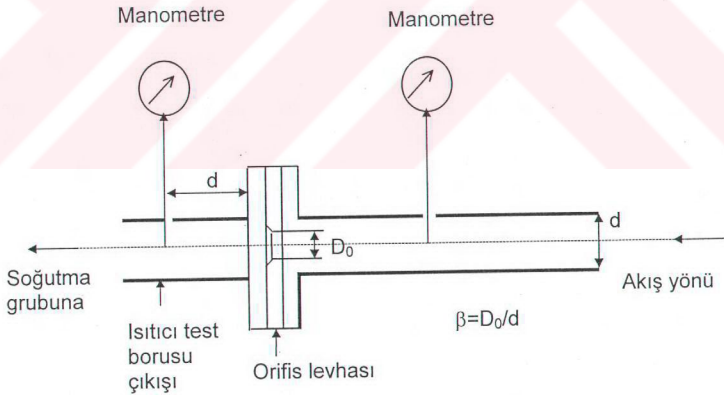
Test odası Şekil 5.12 'den de görüleceği gibi $0.4 \times 0.5 \times 4 \text{ m}^3$ ölçülerinde normal siyah sac ve profil demirinden yapılmıştır. Test odasının ön tarafı ısıtıcı test borusunda gerekli işlemleri kolayca yapabilmek amacıyla cam çerçeveli ve sürgülü olarak imal edilmiştir. Isıtıcı borunun her iki ucu DC güç kaynağının pozitif (+) ve negatif (-) uçları ile bağlanarak gerekli ısı gücü temin edilmeye çalışılmıştır. Rezistans olarak kullanılan test borusunda sürekli enerji girişini temin etmek ve her iki elektriksel bağlantı uçları ile test borusu cidarı arasında gevşek bağlantıdan dolayı oluşabilecek elektriksel ark olayını önlemek amacıyla bakır ve piring malzemelerinden yaptığımız özel vidalı kelepçeler oldukça sıkı bir şekilde test borusu dış yüzeyine monte edilmiştir. Isıtıcı borunun her iki ucuna sistemin diğer kısımlarını elektriksel olarak izole etmek amacıyla yine vidalı olarak özel teflon flanşlar imal edilerek montelenmiştir. Isıtıcı boruda üniform bir ısı dağılımını sağlamak ve ısı kaybını önlemek amacıyla ısıtıcı test borusunun dış yüzeyi 1000°C

'ye dayanıklı taş yününden yapılmış yalıtım malzemesi ile iki kat oldukça düzgün bir şekilde izole edilmiştir. Isıtıcı test borusuna tekabül eden ısı gücü değerleri DC güç kaynağından önce bulunan elektriksel panodaki ilgili şalter çıkışındaki elektriksel kablolardan bir pens ampermetre yardımıyla ölçtüğümüz akım amper değerleri uygun trifaze güç bağıntısı vasıtasıyla hesaplanmaya çalışılmıştır. DC güç kaynağımız ise yaklaşık 22 kW güç kapasitesine sahip olan bir rektifiyerli doğru akım kaynak makinesidir. Deneysel çalışma adımlarından önce belirlenen ısı gücü değerleri bu transformatördeki bir reosta yardımıyla yapılmaktadır. Test borusu ise 0.018m dış çapına ve 3.5 m boyunda paslanmaz çelik borudan meydana gelmiştir.



Şekil 5.12. Test odası ve test bölümünün şematik gösterimi

Şekil 5.12 'de görüldüğü gibi test odası çıkışında akışkan ortalama çıkış sıcaklığı T_c 'l ölçmek amacıyla bir termokupul ölçüm elemanı ile yine çıkışta test ortamında oluşabilecek muhtemel iki fazlı akış rejimlerini çıplak gözle gözlemleyebilmek amacıyla bir gözetleme camı ilave edilmiştir. Gerek dengeleyici tank seviye göstergesinde kullanılan cam malzemesi olsun gerekse test bölümü çıkışında kullanılan gözetleme camı cam malzemesi olsun her iki gösterge gözetleme elemanında kullanılan cam malzemesi yüksek seviyedeki ani basınç ve sıcaklık değişimlerine mukavemet edebilecek kapasiteye sahip Bore-Silikattan imal edilmiş ve malzeme bilim dalında pyrex denen malzemeden yapılmıştır. Bu cam malzemeleri belirlenen ölçülerde sisteme pirinçten yaptığımız ve O-ringlerle istenen sızdırmazlığı temin edebilen özel rekorlarla montelenmiştir. Şekil 5.13 'den de görüldüğü gibi gözetleme camından sonra sistemde istenen basınç düşümlerini temin eden bir çıkış kısıtlayıcısı olarak dizayn edilen orifis levhası kullanılmıştır.



Şekil 5.13 'den de görüldüğü gibi çıkış kısıtlayıcısından önce ve sonraki basınç değerlerini belirleyebilmek amacıyla Bourdon-tipi manometreler kullanılmıştır. Akış osilasyonları üzerine kısıtlayıcının etkilerini tespit etmek ve istenen basınç düşümünü temin etmek amacıyla test borusu çıkışına bir orifis levhası monte edilmiştir. Hesaplamalarda etkili bir parametre olarak göz önüne alınan ve bu sistemde kullanılan orifis levhası için $\beta=0.448$ 'dir.

Aşağıda Şekil 5.14 'de test bölümü girişinde kullanılan ölçüm elemanları, Şekil 5.15 'de test bölümü ve Şekil 5.16 'de test bölümü çıkışında bulunan gözetleme camı ile orifis levhası ve Şekil 5.17 'de ise DC güç kaynağını gösteren fotoğraflar eklenmiştir.



Şekil 5.14. Test bölümü girişinde kullanılan ölçüm elemanları



Şekil 5.15. İki fazlı akış test bölümünün yandan görünüşü



Şekil 5.16. Orifis levhası ve gözetleme camı

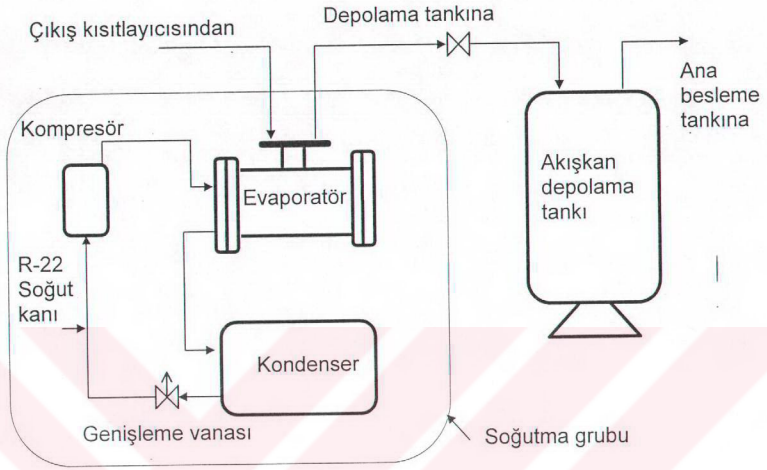


Şekil 5.17. DC güç kaynağı

5.1.3. Akışkan Depolama Bölümü

Akışkan depolama bölümü Şekil 5.18 'den de görüldüğü gibi bir kondenser ve akışkan depolama tankından meydana gelmiştir. Test bölümü çıkışında hemen hemen tamamı buhar fazında olan iş yapan akışkan R-11 kondenserdenden geçerek yoğuşturulur. Yoğuşturulan akışkan sıvı fazda depolama tankına sevk edilir.

Depolama tankı 0.75m çapında, 1.75m boyunda ve 1cm cidar kalınlığına sahip normal düz siyah saç malzemesinden silindirik olarak dikey pozisyonda çalışacak şekilde imal edilmiştir. Bu tanktan ana besleme tankına iş yapan akışkan olan sıvı fazdaki R-11 'in sevk edilmesi yine yüksek basınç seviyesine sahip azot gazı vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.18. Kondenser ile depolama tankının şematik gösterimi

Şekil 5.19 'da akışkan yoğuşurma grubu, Şekil 5.20 'de akışkan depolama tankı, Şekil 5.21 'de R-11 varili ve kompresör, Şekil 5.22 'de elektrik ana kumanda tablosu, Şekil 5.23 'de ise bilgisayar sistemimizin fotoğrafları gösterilmektedir.

5.2. Ölçüm Elemanları ve Hata Oranları

5.2.1. Sıcaklık Ölçümleri

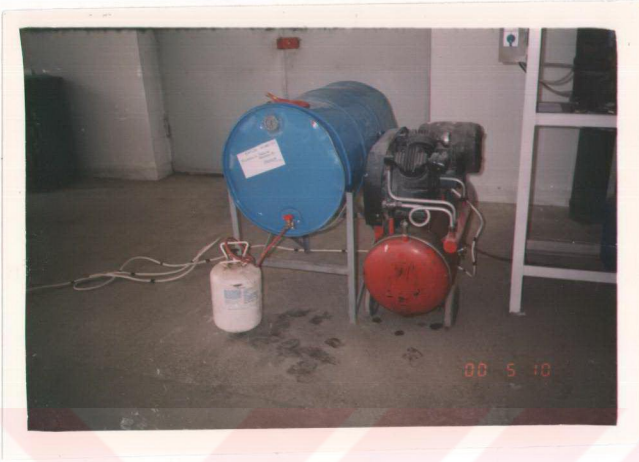
Deney setimizde uygun yerlerden sıcaklık ölçümleri için 30 adet sıcaklık ölçüm yeri tespit edilmiş olup bu amaçla oldukça hassas ölçüm yeteneğine sahip 0.25 mm' lik çaplara sahip T tipi Bakır-Constantan termokupulları kullanılmıştır. Bu



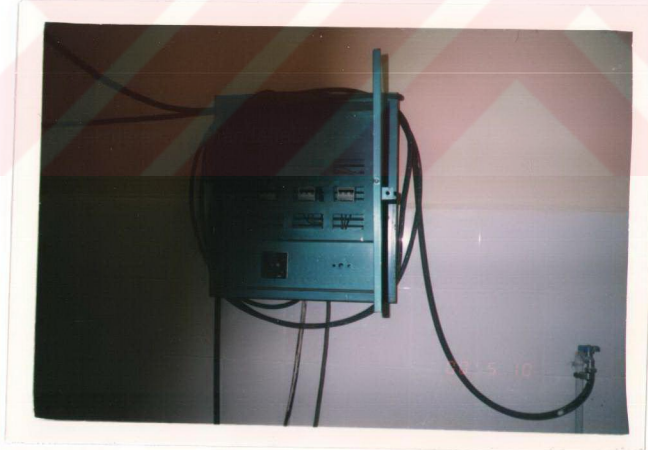
Şekil 5.19. Akışkan yoğuşturma grubu



Şekil 5.20. Akışkan depolama tankı



Şekil 5.21. R-11 varili ve kompresör

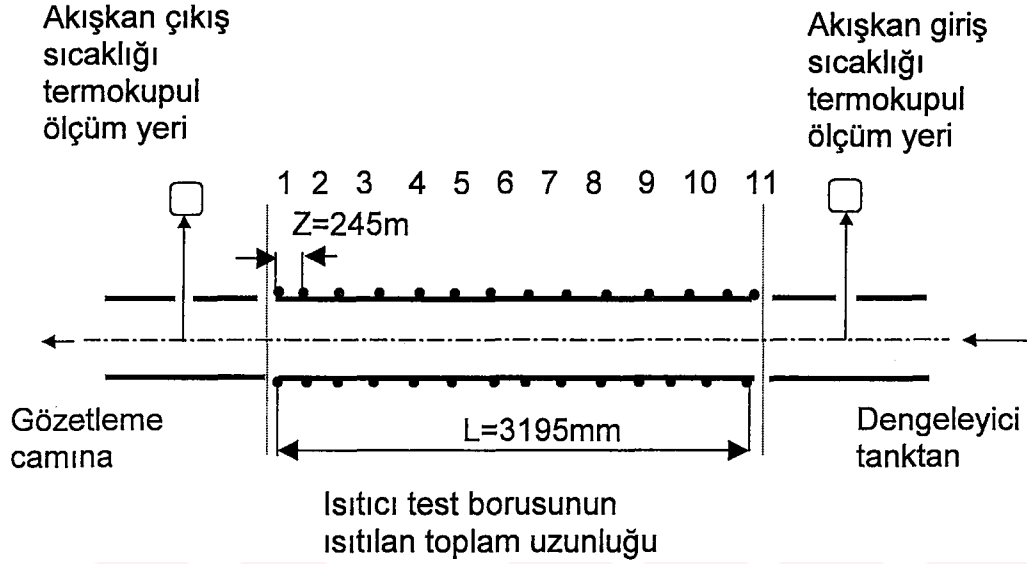


Şekil 5.22.Elektrik ana kumanda tablosu



Şekil 5.23. Bilgisayar sistemi

termokupullar vasıtasıyla alınan sıcaklık okuma hatası $\pm \% 0.5$ $^{\circ}\text{C}$ civarındadır. Test borusu giriş ve çıkış sıcaklıklarının ölçümü için kullanılan termokupul uçları akış ortamına daldırılırken diğer termokupul bağlantıları test ortamında oluşacak iki fazlı akış rejimlerini ve akış osilasyonlarını karakterize etmek amacıyla kullanılan termokupullar da test borusu cidarının dış yüzeyine tespit edilmiştir. Şekil 5.24 'den de görüldüğü gibi bu termokupul bağlantılarından test borusu cidarına tespit edilenleri eşit aralıklarla 14 tanesi üst cidar boyunca diğer 14 tanesi de alt cidar boyunca olmak üzere toplam 28 termokupul çifti test borusu dış yüzeyine montelenmiştir. Test borusuna ihtiyaç duyulan ısı gücünü temin etmek amacıyla elektrik enerjisi verilmesinden dolayı dış cidara tespit edilen termokupul uçlarının elektriksel gürültü gibi olumsuz etkilerden izole edilmesi amacıyla yüksek sıcaklığa dayanıklı, atmosferik şartlarda sertleşebilen, elektriksel olarak bir izolatör görevi yapabilen ve aynı zamanda termal iletkenliği yüksek olan bir termal pasta kullanılmıştır.

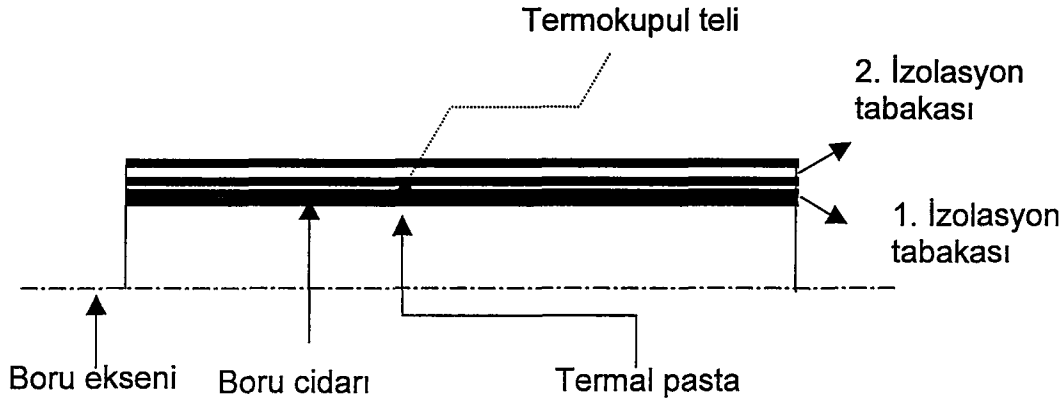


$$\bar{Z} = \frac{Z}{L} = \frac{245 \text{ mm}}{3195 \text{ mm}} = 0.077$$

Şekil 5.24. Test bölümündeki termokupulların yerleştirilmesinin şematik gösterimi

Şekil 5.24 'de görüldüğü gibi ısıtıcı test borusunun alt ve üst cidarı boyunca eşit aralıklarla tespit edilen sıcaklık ölçüm noktalarının üzerine elektriksel olarak yalıtkan fakat termal iletkenliği iyi olan termal pastadan eşit hacimlerde kullanılmaktadır.

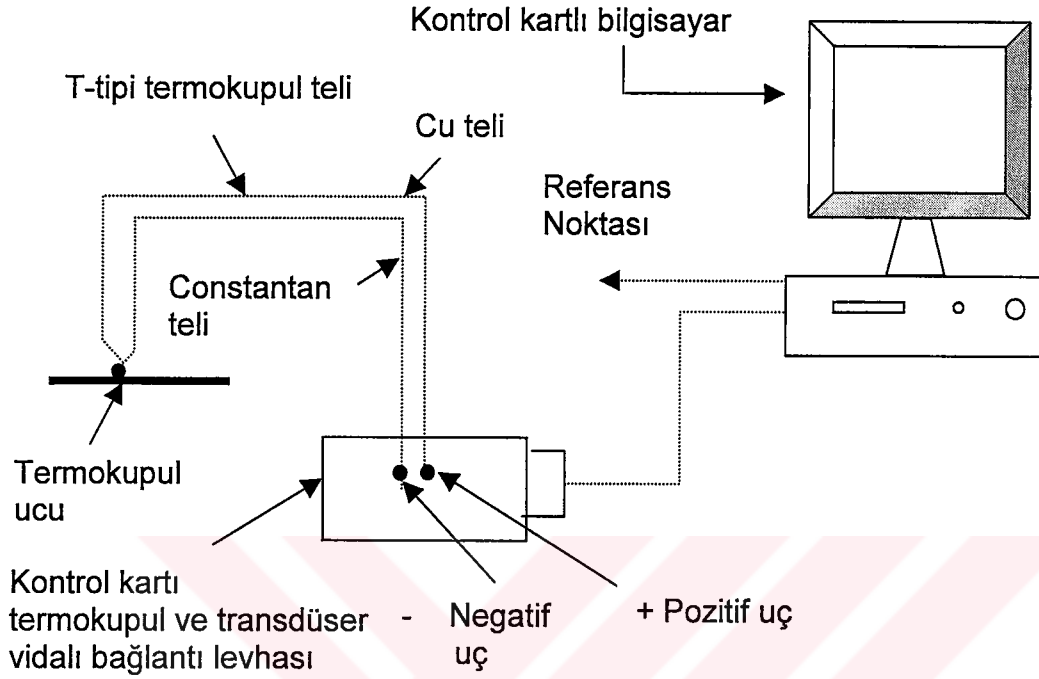
Termokupul uçları termal pastaların bulunduğu bu noktalara sağlam bir şekilde tespit edilmiştir. Aynı şekilde test borusuna verilen elektriksel enerjinin kaybını önleyerek test bölümü boyunca üniform bir ısı dağılımını elde etmek amacıyla Şekil 5.25 'de görüldüğü gibi yüksek sıcaklığa dayanıklı iki kat taş yünü yalıtım malzemesi kullanılarak izole edilmiştir.



Şekil 5.25. Test borusu izolasyon tabakalarının ve termokupul uçlarının termal pastaya izolasyon tabakalarının altından tespitinin şematik gösterimi

Termokupullar yardımıyla alınan sinyallerin okunabilmesi ve değerlendirilmesi amacıyla bilgisayar ortamında hem analog hem de dijital sinyalleri algılayabilen 32 kanallı bir sıcaklık ve transdüser kontrol kartına bağlanmıştır. Saniyede 100 adet örnekleme yapabilme yeteneğine sahip bu kontrol kartından alınan okumalardaki toplam hata oranı kontrol kartının seçilen kazanç değeri seviyesine bağlı olarak $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ ile $\pm 1^{\circ}\text{C}$ arasında değişmektedir. Deneyler süresince alınan bütün datalar daha sonra değerlendirmek amacıyla bilgisayar ortamında depolanmaktadır. Şekil 5.26 'da termokupulların sıcaklık ölçümünü yapan kontrol kartına bağlantı şekli şematik olarak gösterilmiştir.

Şekil 5.25 'den de kolayca görülebileceği üzere ölçme düzeneğinde termokupulun elektronikte "single" bağlantı denen şekilde Cu teli kartta bulunan herhangi bir kanalın pozitif ucuna, Constantan teli negatif uca, negatif uç ise topraklama amacıyla şasiye bağlanarak ölçümler yapılmıştır. Ayrıca kontrol kartının üzerinde imalatçı firma tarafından montelenmiş bir prop daha vardır ki bu da karttan alınan sıcaklık okumalarını ortam sıcaklığına göre referans alarak data okumalarını yapmaktadır.



Şekil 5.26. Termokupul sinyallerinin kontrol kartını ihtiva eden bilgisayar ortamına "single" bağlantı şeklinin şematik gösterimi

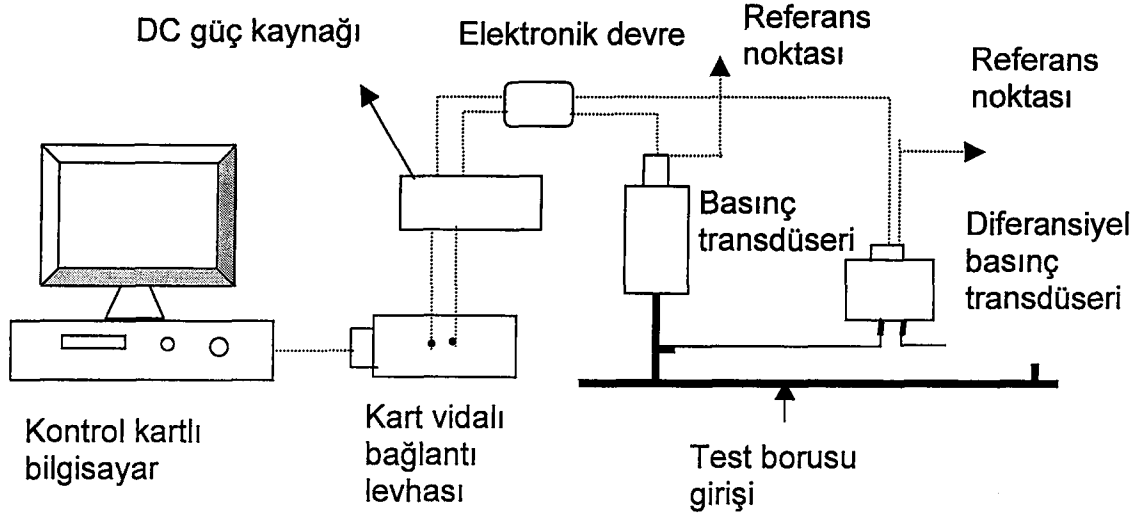
5.2.2. Basınç Ölçümleri

Deney düzeneğinde birkaç yerde test esnasında oluşacak iki fazlı akış rejimleri ve osilasyonlarını değerlendirmek için gerekli olan basınç değerlerini tespit etmek amacıyla Bourdon tipi manometrelerle basınç transdüserleri kullanılmıştır. Bu manometrelerle okunan basınç değerlerindeki toplam hata oranı $\pm \% 0.1$ Bar düzeyindedir. Test borusu girişindeki basınç osilasyonlarının tespiti için bir basınç transdüseri kullanılmıştır. Bu basınç transdüserin den alınan 4-20 mA seviyesindeki analog sinyallerin; kontrol kartına bağlanabilmesi için elektronik açıdan uygun kalibrasyon dönüşümlerini sağlayan bir DC güç kaynağı ile bir elektronik sinyal dönüşüm devresinden geçirilmeleri gerekmektedir. Bu amaçla bir güç kaynağı ile uygun sinyal dönüşüm limitine sahip elektronik devre transdüser

çıkış kablolarına bağlanarak sisteme ilave edilmiştir. Buradan istenen karakterde elde edilen sinyaller kontrol kartını ihtiva eden bilgisayar ortamına uygun özelliğe sahip kablolar yardımıyla bağlanarak gerekli incelemelere tabi tutulmuştur. Aynı şekilde ısıtıcı test borusundan önce yani dengeleyici tanktan sonra oluşabilecek kütle debisi osilasyonlarını tespit etme imkanını sağlayacak bir diferansiyel basınç transdüseri kullanılmıştır. Basınç transdüserin de olduğu gibi diferansiyel basınç transdüseri de referans olarak atmosferik basıncı alarak gerekli ölçümleri yapmaktadır. Diferansiyel basınç transdüserin den alınan analog sinyaller 1-5 V seviyesinde olup bu sinyallerin kontrol kartına uygun olarak kalibrasyonunu sağlayan ve yukarıda anlatılan DC güç kaynağı ile elektronik devreden oluşan sinyal dönüşüm sistemlerinden geçirilerek kontrol kartlı bilgisayar ortamına gerekli değerlendirmeler yapılmak üzere yine uygun özelliğe sahip kablolarla bağlanmıştır. Basınç transdüserin den alınan datalardaki toplam hata oranı $\pm \% 0.1$ düzeyinde iken diferansiyel basınç transdüserin den alınan data okumalarındaki toplam hata oranı $\pm \% 0.05$ 'dir. Her iki transdüser den deneysel sisteme ve kontrol kartlı bilgisayar ortamına bağlantı detayları Şekil 5.27 'de şematik olarak gösterilmiştir.

5.2.3. Debi Ölçümleri

İki fazlı akış olaylarının gözlemlenmesinde kütleli debi çok önemli bir parametredir. Zira kütleli debi akış rejimlerinin, kararlılık sınırlarının ve osilasyon tiplerinin belirlenmesinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenlerden dolayı bu parametre değerinin uygun şekilde ölçülmesi için deneysel çalışma sistemimize uygun özelliklere sahip bir debi ölçere ihtiyaç vardır. Bunun için deney setinde ana tanktan sonra dengeleyici tanktan önceki akışkan debisinin belirlenebilmesi için şeffaf bir plastik malzemedan yapılmış ve üzerinde debi ayar vanası ile içerisinde debi ayar vanası yardımıyla istenen debi değerini hareketli bir eleman yardımıyla gösteren bir rotametre kullanılmıştır. Rotametre maksimum 150 Psig seviyesindeki



Şekil 5.27. Basınç transdüserlerinin sisteme bağlanması

çalışma basıncına ve 180 °F maksimum çalışma sıcaklığına dayanabilecek şekilde dizayn edilmiştir. Debi ölçümleri su için dizayn edilen rotametreyi deneysel akışkan olan R-11 için yeniden kalibre etmek amacıyla uygun dönüşüm denklemleri kullanılarak deneysel çalışmalarda istenen debi dönüşümleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar boyunca kullanılan maksimum ve minimum debi değerleri 9 – 75 g/s arasında değişmektedir. Bu rotametre yardımıyla elde edilen debi okumalarındaki toplam hata oranı $\pm \% 0.4$ civarındadır.

5.2.4. Isı gücü ölçümleri

Isıtıcı test borusunda ihtiyaç duyulan ısı gücünün temin edilmesi için kullanılan DC güç kaynağından alınan elektriksel gücün belirlenebilmesi için ısıtıcı test borusuna karşılık gelen voltaj değeri ile akım değerinin ölçülmesi lazımdır. Bunun için bir pens amper metre kullanılarak her bir deneysel adımda ihtiyaç duyulacak uygun güç değerinin ayarı DC güç kaynağının üzerinde bulunan reosta yardımıyla yapılmaktadır. Buradaki elektriksel güç değerlerinin ölçülmesinde ortaya çıkan toplam hata oranı $\pm \% 0.2$ düzeyindedir.

5.3 Deneysel Yöntem

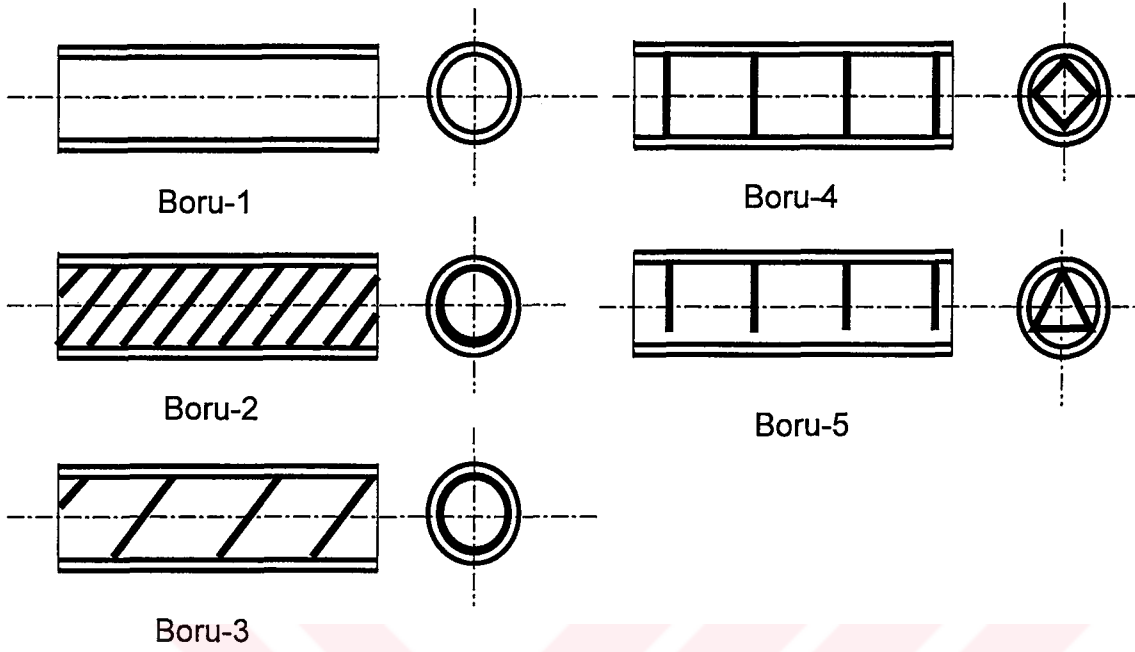
İki fazlı akış olaylarını incelemek için yapılan deneysel çalışmalar iki ana gruba ayrılmaktadır. Deneysel çalışmanın birinci bölümünde kararlı durum karakteristiklikleri ve iki fazlı akış rejimleri araştırılmıştır. İkinci bölümde ise iki fazlı akış dinamik kararsızlıkları incelenmiştir. İki fazlı kararlı ve kararsız akış olayları üzerine girişte akışkan aşırı soğutma düzeyinin etkilerini belirlemek amacıyla beş farklı akışkan giriş sıcaklığı kullanılmıştır. Giriş debisinin etkilerini belirlemek amacıyla on iki farklı akışkan giriş debisi ve ısıtıcı test borusu ısı transfer iç yüzey konfigürasyonlarının etkilerini ortaya çıkarmak amacıyla da beş farklı ısı transfer iç yüzey konfigürasyonlarına sahip ısıtıcı test borusu kullanılmıştır.

Şekil 5.28 'de beş farklı ısı transfer iç yüzey konfigürasyonuna sahip ısıtıcı test borularının kesitleri gösterilmiştir. Birinci boru boş boru, 2. ve 3. boru farklı adımlara sahip yay elemanları ile 4. boruda karesel bir geometriye sahip eleman ile 5. boruda ise üçgensel bir geometriye sahip eleman kullanılmıştır.

Şekil 5.28 'de gösterilen ısıtıcı test boruları aşağıda yazılan bağıntı yardımıyla hesaplanabilen ve efektif çap olarak adlandırılan parametre değerine uygun olarak sınıflandırılmaktadır.

$$d_e = \sqrt{\frac{4V'}{\pi L}} \quad (5.1)$$

burada V' boru net iç hacmini, L boru uzunluğunu göstermektedir. Bu deneysel çalışmada kullanılan ısıtıcı test borularının sınıflandırılması Tablo 5.1 'de verilmiştir.



Şekil 5.28. Beş farklı ısı transfer iç yüzey konfigürasyonlu ısıtıcı test boruları kesitlerinin gösterimi

Tablo 5.1. Beş farklı ısıtıcı test boru elemanının efektif çap değerlerine göre sınıflandırılması

Boru ismi	Borunun Karakteristiği	D_e [mm]
Boru-1	Boş boru	13
Boru-2	İçerisinde 1.8 mm tel çaplı ve 3.6 mm adımlı yay elemanı bulunan boru	9.56
Boru-3	İçerisinde 1.8 mm tel çaplı ve 11 mm adımlı yay elemanı bulunan boru	12.53
Boru-4	İçerisinde 1.8 mm tel çaplı ve 11 mm adımlı eşkenar dörtgen halkalı elemanı bulunduran boru	12.56
Boru-5	İçerisinde 1.8 mm tel çaplı ve 11 mm adımlı eşkenar üçgen halkalı elemanı bulunduran boru	12.66

Deneysel sistemin çalışma prensibi kısaca açıklanırsa: İlk olarak sistemde ki iş yapan akışkanın sirkülasyonu yüksek basınç ortamında depolanabilen nitrojen gazı N_2 yardımıyla sağlanmaktadır. Bu amaçla iş yapan akışkan ana besleme tankında istenen sistem basınç seviyesine kadar basınçlandırılır. İş yapan akışkan buradan istenen giriş debisini ayarlayan debi ölçer ve giriş ana kontrol vanasından geçerek aşırı soğutma eşanjörüne gelir. Buradan dengeleyici tanka giren akışkan bu ekipmandan sonra test bölümüne girer. Dengeleyici tank basınç düşümü osilasyonlarının meydana gelmesi için gerekli olan sıkıştırılabilir hacmi sağlamaktadır. Bunun için bu tip osilasyon çalışması esnasında bu tankın üst kısımlarında N_2 gazından oluşan sıkıştırılabilir bir hacim temin edilmiştir.

Test borusunda gerekli ısı gücünü sağlamak amacıyla bir DC güç kaynağı kullanılmıştır. Aynı zamanda test borusu test ortamında üniform bir ısı gücünü temin etmek amacıyla iyi bir şekilde izole edilmiştir. Test bölümünden sonra iş yapan akışkan deney esnasında oluşacak çeşitli iki fazlı rejimlerini çıplak gözle gözlemleyebilmek amacıyla test bölümü çıkışına montelenen bir gözetleme camından geçerek sistemde istenen farklı basınç düşümlerini sağlayan ve bir orifis levhasında yapılmış çıkış kısıtlayıcı elemanına gelir.

Akışkan test bölümünden sonra depolama bölümüne gelir. Bu depolama bölümüne ekseriyetle buhar fazında gelen iş yapan akışkanın yeniden deneysel çalışma başlangıç şartlarına getirilmesi amacıyla bir soğutma grubundan geçirilerek yoğunlaştırılır. Soğutma grubunda yoğunlaşan iş yapan akışkan depolama tankında depolanır. Bu tankta depolanan iş yapan akışkan N_2 gazıyla basınçlandırılarak tekrar ana besleme tankına sevk edilir. Bundan sonra iş yapan akışkanın sistemdeki çevrimsel sirkülasyonu aynı şekilde tekrarlanarak devam edilir.

5.3.1. Zorlanmış Konveksiyonlu Kaynamalı Yatay Boru Sisteminde İki Fazlı Akış Kararlı Durum Karakteristikliklerinin ve Akış Rejimlerinin Belirlendiği Deneysel Çalışma Yöntemi

Bu bölümdeki deneysel çalışmanın temel amacı farklı türdeki akış rejimlerinin sıcaklık profilleri ile beraber kararlı durum akış karakteristikliklerinin belirlenmesidir. Kararlı durum karakteristiklikleri kütle debisine karşılık gelen basınç düşümü eğrileriyle karakterize edilmektedirler. Basınç düşümü iki manometre ile ölçülmüştür. Birinci manometre test bölümü girişinden önce akışkan giriş basıncını ölçen manometredir. İkinci manometre ise çıkış kısıtlayıcısı olan orifis levhasından sonra akışkan basıncını ölçen manometredir. Deneylerimizde aynı tip manometreler kullanılmıştır.

Isı güç değeri $Q=16\text{kW}$, sistem basıncı $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ 'dır. Bu değerler her bir deneysel adımda sabit olarak tutulmuştur. Yine akışkanın girişte sahip olduğu aşırı soğutma seviyelerinin etkilerini belirlemek amacıyla akışkan giriş sıcaklıkları sırasıyla $T_{g1}=28^{\circ}\text{C}$, $T_{g2}=24^{\circ}\text{C}$, $T_{g3}=22^{\circ}\text{C}$, $T_{g4}=19^{\circ}\text{C}$ ve $T_{g5}=16^{\circ}\text{C}$ olmak üzere beş değişik değerde kullanılmıştır.

Ölçümlere giriş debisinin seçilen en yüksek değeri $\dot{m}=75\text{gr/s}$ değeri ile başlanmıştır. Daha yüksek giriş debi değerlerinde tek fazlı akış rejiminden dolayı akış rejimlerinde herhangi bir değişim gözlemlenemez. Basınç düşümüne karşılık çizilen kütleli debi kararlı durum karakteristik eğrisinde bu tek fazlı akış bölgesi pozitif eğime sahip bölge ile temsil edilmektedir. Bu eğrinin iki fazlı bölgeyi gösteren kısımlarını belirleyebilmek amacıyla giriş debi değerleri on adımda yavaş yavaş azaltılarak en yüksek debi değerinden en düşük debi değerine ulaşıncaya kadar debi değerlerindeki değişmeye devam edilmiştir. Deneysel çalışma esnasında kullanılan en düşük debi değeri $\dot{m} = 9.18\text{gr/s}$ dir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus boru cidarı için tehlike gösteren “ burn-out “ olayının

meydana geldiği anda bu debi azalmasını ve dolayısıyla deneysel çalışmayı durdurmaktır. Bu anın belirlenebilmesi ise boru cidarı alt ve üst cidar sıcaklıkları ile akışkan çıkış sıcaklığının dikkatli bir şekilde gözlemlenmesi gerekir. Isıtıcı test borusu alt ve üst cidar sıcaklıklarının kontrol kartlı bilgisayar sistemimize aktarılan değerlerinin ortalaması alınarak elde edilen bu ortalama sıcaklık değerlerine dayanarak grafiksel çalışmalarda kullanılmıştır. Deneysel çalışma yöntemi aşağıda maddeler halinde yazılmıştır.

5.3.2. Deneysel Çalışma Adımları

- (1) İş yapan akışkan depolama tankından yüksek basınçlı nitrojen gazı kullanılarak ana tanka gönderilir.
- (2) İstenen akışkan giriş sıcaklığının temini için akışkan aşırı soğutma ekipmanı olan eşanjörün soğutma suyu açılır. İstenen giriş sıcaklık değeri soğutma suyu debisi bir küresel vana yardımıyla değiştirilerek elde edilmektedir. Burada deneysel çalışmaya akışkan giriş sıcaklığı beş kademede azaltılarak devam edilir.
- (3) Ana tank N_2 gazı tankı üzerinde bulunan bir basınç regülatörü yardımıyla istenen sistem basıncı seviyesine basınçlandırılır. Bu regülatör vanası her bir deneysel çalışma adımı ana tank basıncının sabit olduğundan emin olmak için aynı ayar da açık tutulmalıdır.
- (4) Ana kontrol vanası deneysel çalışmada tespit edilen en yüksek debi değeri oranı $\dot{m}=75$ gr/s değerini debi ölçer de ayarlayacak şekilde açılarak iş yapan akışkan test bölümüne gönderilir.
- (5) Test borusunda gerekli ısı gücünü temin eden DC güç makinesi istenen güç değerine ayarlanarak çalıştırılır. Deneysel çalışma adımlarında ısı güç değerleri sabit tutulur.

- (6) Kararlı durum çalışmalarında istenmeyen dengeleyici tank sıkıştırılabilir hacminin olmaması için dengeleyici tanktaki seviye göstergesini izleyerek bu tank içerisinde bulunan N_2 gazı tahliye edilir.
- (7) İş yapan akışkanın yoğunlaştırıldığı soğutma grubu çalıştırılır.
- (8) Kontrol kartlı bilgisayar sistemi çalıştırılır.
- (9) Sistemin kararlı duruma ulaşarak kararlı hale gelmesi beklenir. Bu da ısıtıcı test borusundaki herhangi bir noktanın cidar sıcaklığı gözlemlenerek belirlenebilir. Yani dikkate alınan bu noktaya ait cidar sıcaklığı zamanla hemen hemen değişmeyerek sabit kalmaya başladığı anda sistemin kararlı olduğu anlaşılmaktadır.
- (10) İş yapan akışkan giriş debisi on iki kademe de çok küçük miktarlarla azaltılır. Her bir debi değerinden sonra bir sonraki deneysel adıma geçilir.
- (11) “ Burn-out “ noktasından hemen sonra debi tekrar başlangıç değerine ayarlanır.
- (12) Giriş sıcaklığı eşanjör soğutma suyu vanası yardımıyla istenen değere azaltılarak 9. adıma tekrar dönülür.
- (13) İlk olarak DC güç kaynak makinesi kapatıldıktan sonra bu bölümle ilgili deneysel çalışma tamamlanır.

Yukarıda anlatılan tüm deneysel çalışma adımları beş farklı ısı transfer iç yüzey konfigürasyonuna sahip her bir ısıtıcı test borusu için aynı şekilde tekrarlanmıştır.

5.3.3. Zorlanmış Konveksiyonlu Kaynamalı Yatay Boru Sisteminde İki Fazlı Akış Dinamik Kararsızlıklarının İncelendiği Deneysel Çalışma Yöntemi

Deneysel çalışmanın bu bölümünde iki fazlı akış basınç düşümü, yoğunluk değişimi ve termal osilasyonların araştırılmıştır. Belirli çalışma şartlarına ve sistem parametrelerine bağlı olarak oluşan kararsız akış rejimleri de farklı giriş sıcaklıkları,

farklı giriş debileri ve farklı boru iç yüzey konfigürasyonlarına sahip ısıtıcı test boruları için ayrı ayrı incelenmiştir.

Sistemin kararsızlık ortamına ulaşması için en önemli şart sistemde bir sıkıştırılabilir hacmin mevcut olmasıdır. Deney düzeneğinde bu sıkıştırılabilir hacim daha önceki bölümlerde de açıklandığı gibi test bölümünden önce sisteme monte edilen ve N_2 gazı tankı ile basınçlandırılan dengeleyici tankta temin edilmektedir. N_2 gazı da hem bu tankta hem de ana tankta istenen deneysel çalışma basıncını ve deneysel akışkanımız olan R-11 ' in sistemde istenen debi değerlerinde sirkülasyonunu temin etmek amacıyla kullanılmıştır. Dengeleyici tankta sağlanan sıkıştırılabilir hacim her bir deneysel çalışma adımıda sabit tutulmaya çalışılmıştır. Aksi taktirde osilasyonların sınırları ile genlik ve periyotlarının mukayesesi yapılamaz. Aynı zamanda osilasyonlar süresince kütle debisi ve basınçtaki değişimlerden dolayı sıkıştırılabilir hacim büyüklüğünde de değişiklikler oluşmaktadır ki bunu da dengeleyici tank üzerinde bulunan cam seviye göstergesinden gözle gözlenmektedir.

Basınç osilasyonları test bölümünden önce montelenen basınç transdüseri yardımıyla kaydedilmektedir. Akışkan kütledebisinde oluşan osilasyonlar ise bir diferansiyel basınç transdüseri yardımıyla test bölümünden önce yani dengeleyici tanktan hemen sonra kaydedilmektedir. Boru cidar sıcaklık osilasyonları da test bölümü sonuna doğru uygun noktalarda ki termokupul elemanlarından elde edilmektedir. Test bölümü sonuna doğru test borusu üst ve alt cidarına tespit edilmiş bulunan iki adet termokupul elemanı yardımıyla alt ve üst cidar sıcaklık ta oluşan termal osilasyonlar kaydedilmeye çalışılmıştır. Kontrol kartlı bilgisayar sistemimize transfer edilen tüm deneysel datalar burada oluşturulan dosyalarda depolanarak daha sonra grafiksel ve diğer teorik amaçlı değerlendirme işlemlerinde kullanılmaktadır. Osilasyonların bu data değerleri aynı zamanda

zamana karşılık gelen diyagramlarda uygun şekillerde çizilerek osilasyonların genlik ve periyotları karakterize edilmeye çalışılmıştır.

Deneysel çalışmanın bu bölümünde uygulanan deneysel çalışma yöntemleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

5.3.4. Deneysel Çalışma Adımları

- (1) Akışkan giriş sıcaklık değerlerinde istenen değişimi sağlayan eşanjörün soğutma suyu deneysel çalışma adımına uygun değeri temin edecek şekilde küresel vana yardımıyla açılır.
- (2) N₂ gazı ile depolama tankından ana tanka transfer edilen iş yapan akışkan burada yine istenen sistem basıncına N₂ gazı tankına montelenmiş bulunan regülatörlü vana yardımıyla ayarlanarak basınçlandırılmaktadır.
- (3) Ana kontrol vanası yardımıyla debi, başlangıç değeri olan $m=75\text{gr/s'}$ ye rotametreden ayarlanır.
- (4) Dengeleyici tankta osilasyonlar için gerekli olan sıkıştırılabilir hacim cam seviye göstergesinden deneysel akışkanımız olan R-11 seviyesi kontrol edilerek ayarlanmaya çalışılır. Dengeleyici tank N₂ gazı ile basınçlandırılır. Her bir deneysel çalışma adımıda kullanılacak sıkıştırılabilir hacim seviyesinin sabit olması gerekmektedir.
- (5) DC güç kaynağı üzerindeki reosta kullanılarak istenen güç ayarı yapılır. DC kaynak makinesinin deneysel çalışma esnasında işletilirken sarf ettiği elektriksel enerji seviyesi elektrik panosunda bulunan faz kablolarından bir pens ampermetre yardımıyla ölçülerek tespit edilmektedir.
- (6) Test bölümü sonunda buhar fazındaki akışkanın yoğunlaştırılması amacıyla soğutma grubu çalıştırılır.
- (7) Kütleli debi azaltılmaya başlamadan önce sistemin kararlı duruma gelmesi beklenir. Bunu da sistemin giriş basıncını kontrol ederek belirleyebiliriz. Giriş

basıncı sabit olduğu zaman akışkanın girişteki kütleli debi değeri on iki kademede çok küçük miktarla da azaltılarak deneysel çalışmalara devam edilir.

- (8) Osilasyon sınırına ulaşıncaya kadar kütleli debi değeri azaltılmaya devam edilir. Bu osilasyon sınırına ulaşıp ulaşılmadığını ise dengeleyici tankın basınç ve deneysel akışkan seviyesinde oluşan hızlı varyasyonların başlaması ile karakterize edilmektedir.
- (9) Osilasyonlar süresince kütle debisinde yapılan azaltmalara farklı ısı transfer iç yüzey konfigürasyonuna sahip her bir ısıtıcı test borusu için beş farklı giriş sıcaklık değeri için devam edilir. Zira elde edilen deneysel sonuçları doğru bir şekilde mukayese etmek için deneysel parametrelerde yapılan değişimlerin aynı düzeyde olması gerekmektedir.
- (10) Basınç düşümü tipi osilasyonların sona erdiği noktayı bulabilmek için kütleli debi yine çok küçük miktarlarda azaltılarak osilasyonların periyotları incelenir.
- (11) Yine kütleli debi değeriindeki azalimlarla basınç düşümü tipi osilasyonlara nispeten çok daha düşük periyotlara sahip yoğunluk değişim tipi osilasyonlar gözlemlenmeye başlanır.
- (12) Kütleli debide ki azaltma kademeleri devam ederken cidar sıcaklık osilasyonlarının oluşup oluşmadığı dikkatlice gözlemlenir. Bu osilasyonlar çok küçük kütleli debilerde ortaya çıkmaktadır. “ burn-out” olayının başladığı noktalara ulaşıldığı anlaşılır anlaşılmaz deneysel çalışmalar durdurulur.

Yukarıda anlatmaya çalışılan ikinci deneysel çalışmaların ikinci bölümünde tüm parametre değeri aynen değiştirilmeden kullanılmıştır.

6. DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde deneysel verileri değerlendirmek için kullanılacak çeşitli denklemler ile bu konuda literatürde daha önce yapılmış olan çalışmalardan elde edilmiş bazı korelasyonlar birlikte verilecektir. Ayrıca iki fazlı akışlarla ilgili çalışmalarda büyük öneme sahip olan boyut analizi verilmiştir.

6.1. Isıtıcı Test Borularının Sınıflandırılması

Isıtıcı test borusu ısı transfer iç yüzey konfigürasyonlarına bağlı olarak kullanılan her bir boruyu sınıflandırmak için literatürde kullanılan efektif çap denklemi yardımıyla deneysel çalışmada kullanılan beş farklı ısıtıcı test borusunun efektif çap değerleri hesaplanmıştır.

$$d_e = \sqrt{\frac{4V'}{\pi L}} \quad (6.1)$$

Burada;

d_e : efektif çap [m], V' : Isıtıcı test borusunun net iç hacmi [m^3], L : Isıtıcı test borusunun uzunluğu [m]

6.2. Isı Transfer Karakteristikliklerinin Belirlenmesi

Deneysel sonuçları değerlendirirken ihtiyaç duyulan bir diğer ifade de akışkan kütleli akı değeridir. Bunun için aşağıdaki denklem yazılmıştır;

$$G = \frac{\dot{m}}{A} = \rho U \quad (6.2)$$

(6.2) denklemindeki ρ ifadesi burada iki fazlı akışkanın yoğunluğunu, U ise hızını ifade etmektedir. Burada;

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1-x}{\rho_L} + \frac{x}{\rho_G} \quad (6.3)$$

Aynı şekilde (6.3) denkleminde x ile gösterilen kuruluk derecesi değeri için de yeni bir denkleme ihtiyaç vardır. Bu da;

$$x = \frac{m_G}{m_G + m_L} \quad (6.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Yine iki fazlı akışlarda bu kuruluk derecesi için başka bir denklemde kullanılmaktadır. Bu denklem de;

$$x = \frac{(h_{lF} - h_{doy})}{h_{LG}} \quad (6.5)$$

şeklinde yazılabilir. İki fazlı akışkanın entalpi değerinin ifade edildiği denklem ise aşağıda gösterilmiştir;

$$h_{lF} = (1-x)h_L + xh_G \quad (6.6)$$

Isıtıcı test borusuna verilen trifaze elektriksel ısı gücünün hesabı için aşağıdaki denklem kullanılmıştır;

$$Q'_0 = Iu\sqrt{3} \cos \varphi \quad [kW] \quad (6.7)$$

Akışkana ısıtıcı test borusundan transfer edilen ısı gücü ise Newton' un soğuma prensibinden aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$Q = hA_T(T_s - T_f) \quad (6.8)$$

Burada; $A_T = \pi dL$ [m²] ısıtıcı boru toplam yüzey alanıdır.

(6.8) denkleminde bulunan ve kaynamalı ısı transfer katsayısını ifade eden α teriminin hesabı için S. Kakaç ve diğer araştırmacılar tarafından geliştirilen aşağıdaki ifadeler kullanılmıştır;

$$N_u = 190C_s \left(\frac{P}{P_c} \right)^{0.25} \left(\frac{qd_e}{h_{LG}\mu_L} \right)^{0.7} e^{-0.125x} \quad (6.9)$$

Burada C_s boyutsuz yüzey katsayısı olup boş boru için $C_s=1$ olarak alınmaktadır. Yukarıda elde edilen son eşitlik yardımıyla ϕ terimi tanımlanarak bu terimle kuruluk derecesi x' in grafiksel değişimini farklı ısı güçlerinde gösteren çalışmalar yapılacaktır. O halde;

$$\phi = \frac{N_u}{\left[\left(\frac{qd_e}{h_{LG}\mu_L} \right)^{0.7} \left(\frac{P}{P_c} \right)^{0.25} \right]} \quad (6.10)$$

Isıtıcı test borusu cidar sıcaklığının deneysel veriler kullanılarak teorik hesabı için aşağıdaki diferansiyel denklem kullanılabilir;

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{(Q_0 - Q)}{m_h C_h} \quad (6.11)$$

Yukarıdaki denklemde yazılan C_h terimi ısıtıcı test borusunun ısı iletim katsayısını göstermektedir.

Akış ortamının türbülanslı olup olmadığını kontrol etmek için R_e sayısının deneysel çalışma kademelerinde ulaştığı limitlerin hesap edilmesi gerekmektedir. Bunun için aşağıdaki denklem kullanılmaktadır;

$$R_e = \frac{Ud}{\gamma} = \frac{Gd}{\mu} \quad (6.12)$$

6.3. Çıkış Kısıtlayıcısı Orifis Levhasında Meydana Gelen Basınç Düşümünün Tespit Edilmesi

Çıkış kısıtlayıcısı orifis levhasında meydana gelen basınç düşümü aşağıda ifade edilen denklemler yardımıyla hesaplanmıştır [129,130];

$$\Delta P_0 = 635 \left(\frac{G^2}{\rho_L} \right) \quad (6.13)$$

$$F_m = 1 + 46.73x_\varphi + 203.49x_\varphi^2 + 195.32x_\varphi^3 + 97.72x_\varphi^4 \quad (6.14)$$

Burada;

F_m : İki fazlı akış sürtünme çarpanı, x_φ : Isıtıcı test borusu çıkışındaki kuruluk derecesi dir.

$$\Delta p_o = F_m \left(635 \frac{G^2}{\rho_L} \right) \quad (6.15)$$

6.4 Boyut Analizi

Bilindiği gibi boyutsuz parametreler akış olaylarının anlaşılmasında önemli rol oynamaktadırlar. Deneysel ve teorik çalışma sonucunda elde edilen verilerin

genelleştirilmesi ve sahip olunan problem için uygun çözüm yöntemlerinin basit şekillerde ortaya çıkarılması amacıyla her zaman boyut çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle iki fazlı akışlarda kararlı ve kararsız durum çalışma şartlarının çok sayıda parametrenin etkisi altında kalması nedeniyle etkili olan bu parametreleri daha genel ve basit şekilde görebilmek amacıyla boyut analizi çalışmaları burada son derece büyük bir öneme sahiptir.

Bu deneysel çalışma sisteminde uygun olan boyutsuz parametrelerin türetilmesini sağlayacak olan ve literatürde Π -teoremi olarak da bilinen Buckingham tarafından (1914) 'de geliştirilmiş bulunan teorem yardımıyla iki fazlı akış kararlı durum karakteristikliklerinden olan ısıtıcı boru test bölümüne karşılık gelen basınç düşümü değeri ΔP ' nin, yine test bölümüne verilen ısı gücü Q 'nün, akışkan giriş hızı U 'nun, girişteki akışkan yoğunluğu ρ ile ısıtıcı test borusu uzunluğu L 'nin birer fonksiyonu olduğu söylenebilir [66,67]. Şöyle ki;

$$\Delta P = f(Q, U, \rho, L) \quad (6.16)$$

(6.16) denklemi için oluşturulabilecek boyutsal matris yardımıyla bu problem için boyutsuz parametre sayısının iki adet olduğu görülebilir. Buna göre;

$$\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho U^2} \quad (6.17)$$

$$\pi_2 = \frac{Q}{\rho U^3 L^2} \quad (6.18)$$

boyutsuz parametreleri elde edilebilir. Burada L uzunluğu, ρL^3 kütleyi ve $1/U$ da zamanı göstermektedir. Yukarıda elde edilen π_1 ve π_2 boyutsuz parametreleri yardımıyla (6.16) denkleminin yeni durumu şu şekilde olur;

$$\frac{\Delta P}{\rho U^2} = f_1 \left(\frac{Q_1}{\rho U^3 L^2} \right) \quad (6.19)$$

elde edilir. Yukarıda türetilen π_1 parametresi akışkanlar mekaniğinde yaygın olarak kullanılan standart boyutsuz bir sayıdır ve basınç katsayısı olarak adlandırılmaktadır. π_1 parametresini akışkanın statik basıncının akışkanın dinamik basıncına oranı olarak ifade edilebilir. Bununla beraber π_2 parametresinin fiziksel anlamı kolay bir şekilde anlaşılmamaktadır. Özellikle $\rho U^3 L^2$ paydası belirsiz kalmakla beraber boyutlar aşağıdaki gibi açıklanabilir;

$$\rho U^3 L^2 = \frac{M}{L^3} \frac{L^3}{T^3} L^2 = M \left(\frac{L}{T} \right)^2 \frac{1}{T}$$

Buradan da anlaşıldığı gibi payda gerçekte test bölümüne giren akışkanın kinematik enerjisinde ki değişim oranını göstermektedir. Yani bu ifade akışkanın çevresine birim zamanda yaptığı işi ifade etmektedir. Aynı şekilde π_2 parametresinde payda bulunan Q 'nün akışkana birim zamanda yapılan işi gösterdiğini söyleyebiliriz.

Deneysel olarak elde edilen çeşitli $Q, G, \Delta P, U$ dataları yardımıyla elde ettiğimiz π_1 ve π_2 boyutsuz gruplarını π_1 y koordinatını, π_2 de x koordinatını göstermek üzere grafiksel olarak çizilerek sistemin kararlı durum karakteristiklikleri incelenmeye çalışılmıştır.

6.5. Osilasyon Sınırlarının Tahmininde Kullanılan Bazı Boyutsuz Parametre Değerleri

Deneysel çalışma sonucunda elde edilen özellikle yoğunluk değişim tipi osilasyonları verilerinin boyutsuz formda homojen iki fazlı akış modelinde kabul edilen şartlara göre enerji korunum denklemi yardımıyla değerlendirilmesi önemlidir. Bu amaçla homojen iki fazlı akış şartlarına göre enerji korunum

denklemini değerlendirilerek bir N_Q boyutsuz sayısı elde edilebilir [66,67]. O halde;

$$N_Q = \frac{4Q_0L}{h_L Gd} \quad (6.20)$$

Burada Q_0 kararlı akış ısı akısı olup kritik ısı akısı Q_c ' nin de yerine geçmektedir. Yine denklemde gösterilen h_L için de şu ifade yazılabilir;

$$h_L = h_d - h_0 \quad (6.21)$$

O halde;

$$N_Q = \frac{4Q_cL}{(h_d - h_0)Gd} \quad (6.22)$$

elde edilebilir.

Yukarıdaki denklemlerden de anlaşıldığı gibi N_Q değerini aynı zamanda toplam ısıtma uzunluğu L 'nin yine test bölümü tek sıvı fazı tarafından işgal edilen uzunluğa olan oranının bir fonksiyonu olduğunu düşünülebilir. Aynı şekilde N_Q değerinin akışkan aşırı soğutma giriş seviyesiyle limit ısı akısı Q_c arasındaki bir bağıntıyı göstermektedir.

(6.22) denkleminin her iki tarafını kritik kurulum derecesi x_c ile çarparsak yoğunluk değişim osilasyon sınırlarını kritize edebilen değer elde edilebilir. Şöyle ki;

$$x_c N_Q = x_c \frac{4Q_cL}{(h_d - h_0)Gd} \quad (6.23)$$

Bundan başka faydalanabilecek boyutsuz bir sayı da yine homojen iki fazlı akış için momentum denkleminde türetilir;

$$N_p = \frac{P_0 \rho_L}{G^2 L} \quad (6.24)$$

Yeni yazılan bu parametrede yoğunluk değişim tipi osilasyonlarına basınç ve kütle akısının etkilerini göstermek için kullanılmaktadır.

Yukarıda yazılan son iki boyutsuz parametreye ilaveten akışkan aşırı soğutma girişinin etkilerini tespit edebilen ve akışkanın termodinamiksel bir özelliği olan aynı zamanda literatürde entalpi oran sayısı olarak adlandırılan bir N_{TS} parametresinin de dikkate alınması gerekir. Buna göre;

$$N_{TS} = \frac{h_d - h_0}{\Delta h_{LG}} \quad (6.25)$$

(6.23), (6.24) ve (6.25) denklemleri yardımıyla basit bir korelasyon aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$x_c N_Q = A_2 + B_2 \frac{N_p}{N_{TS}} \quad (6.26)$$

Yukarıdaki korelasyona göre $x N_Q \rangle x_c N_Q = A_2 + B_2 \frac{N_p}{N_{TS}}$ şartının sistemde geçerli olduğu bölgelerde yoğunluk değişim osilasyonları oluşabilmektedir. Aynı şekilde $x N_Q \langle x_c N_Q = A_2 + B_2 \frac{N_p}{N_{TS}}$ şartının geçerli olduğu bir sistemde ise hiçbir osilasyon olayı meydana gelmemektedir.

Yukarıda teşkil edilmeye çalışılan korelasyonda bulunan A_2 ve B_2 sabit değerleri için uygun değerler literatürdeki bu konu ile ilgili tablolar yardımıyla çıkış

kısıtlayıcısının bir fonksiyonu olan β değerine göre enterpolasyonla elde edilebilmektedir.

Deneysel sistemde çıkış kısıtlayıcısı olarak kullanılan orifis levhası için bu parametre değeri $\beta=0.448$ olarak dizayn edildiğinden yukarıda ki korelasyonda bulunan sabit katsayı değerleri sırasıyla $A_2=0.2112$, $B_2=0.1828$ olarak hesaplanmıştır.

Teşkil edilmiş bulunan korelasyon yardımıyla y koordinatını x_c N_Q değeri ile X koordinatını da N_p / N_{TS} ifadesi ile göstererek sonuçları grafiksel olarak hazırlanmıştır.

6.6. Deneysel Sistemde Kullanılan Rotametrein Kalibrasyonu İçin Matematiksel Dönüşüm Yöntemi

Deneysel sistemde akışkan giriş debisinin her bir deneysel çalışma adımına uygun değerlere ayarlanmasını temin etmek ve bu debi değerlerini ölçmek için kullanılan rotametre imal edildiği fabrikada su için kalibre edildiğinden bu deneysel çalışma da iş yapan akışkan olan R-11 için yeniden uygun şekilde kalibre edilmesi amacıyla aşağıdaki matematiksel dönüşüm denklemi kullanılmıştır;

$$\dot{m}_a = \dot{m}_b \sqrt{\frac{\rho_{R11}(\rho_h - \rho_{R11})}{\rho_{su}(\rho_h - \rho_{su})}} \quad (6.27)$$

(6.27) denklemindeki ρ_h terimi rotametrein hareketli elemanının yoğunluğu olup bu sistemde bulunan rotametre için $\rho_h=8.470$ [kg/cm³] olarak imalatçı firmanın kataloğun dan alınmıştır. Aynı şekilde denklemde görülen bir diğer terim ρ_{R11} ise deneysel çalışma esnasında rotametre den geçen R-11 akışkanının yoğunluğudur. İş yapan akışkan olan R-11'in yoğunluğu uygun soğutma tablolarından alınarak buradaki hesaplamalara dahil edilmiştir.

7. BULGULAR VE İRDELEME

Bu bölümde deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar her bir test borusu için ayrı ayrı verilerek gerekli irdelemeler yapılacaktır.

7.1. Cidar Sıcaklık Profilleri

Yatay bir boru kanalında dikey bir boru kanalında meydana gelen iki fazlı akış rejimlerinden daha fazla akış rejimi meydana gelmektedir. Bu da yer çekim kuvvetinin yatay akışlarda akış yönüne paralel değil dik olarak etkimesinden kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı her iki faz dağılımı asimetrik bir karakter gösterirken akış kuvvetleri simetrik karakterde ortaya çıkmaktadırlar.

Kaldırma kuvvetleri yardımıyla alt cidarda meydana gelen kabarcıklar üst cidara doğru hareket ederler. Bunun sonucunda alt cidar genellikle sıvı fazı ile kaplı iken üst cidarda bir kabarcık birikimi söz konusudur. Üst cidarda toplanan kabarcıkların sahip olduğu ısı transfer katsayısının alt cidar boyunca akmakta olan sıvı fazın ısı transfer katsayısından daha küçük olması nedeniyle alt ve üst cidar sıcaklıkları arasında farklılıklar ortaya çıkmaktadır.

Bu deneysel çalışmada 14 adet termokupul çifti üst cidara 14 adet termokupul çifti de alt cidara tespit edilerek ısıtıcı test borusu boyunca alt ve üst cidar sıcaklık değerleri ölçülerek akış rejimleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Sistem kararlı halde iken alınan bu sıcaklık dataları yardımıyla her bir akış rejimi için sıcaklık profilleri çıkarılmıştır.

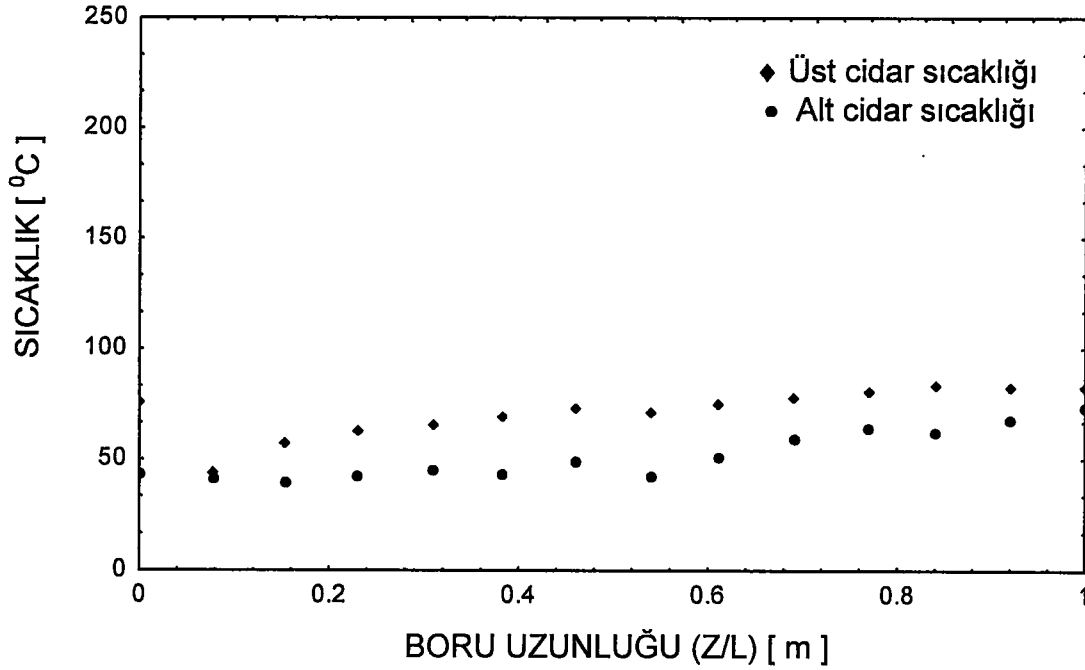
Test ortamında meydana gelen akış rejiminin tahmin edilmesinde faydalı olan bu sıcaklık profilleri; her bir deneysel adımda kademe kademe azaltılan kütsel debi değerlerine karşılık sabit ısı gücü, sabit sistem basıncı, sabit bir kısıtlama değeri ile farklı giriş sıcaklık değerleri için ayrı ayrı grafiksel olarak hazırlanarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan bu parametre değerleri sırasıyla; ısı gücü $Q=16$ kW, sistem basıncı $P_{sis}=7.5$ Bar, kısıtlayıcı katsayısı $\beta=0.48$ ve

beş farklı giriş sıcaklıkları $T_1= 28^{\circ}\text{C}$, $T_2=24^{\circ}\text{C}$, $T_3=22^{\circ}\text{C}$, $T_4=19^{\circ}\text{C}$ ve $T_5=16^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bütün sıcaklık profilleri boru uzunluğu boyunca elde edilen alt ve üst cidar sıcaklık değerleri için çizilmiştir. Ayrıca deneysel çalışma esnasında meydana gelen iki fazlı akış rejimlerinin çıplak gözle görülebilmesi amacıyla test borusu çıkışına bir adet gözetleme camı montelenmiştir.

7.1.2. Boru-1 İçin Sıcaklık Profilleri

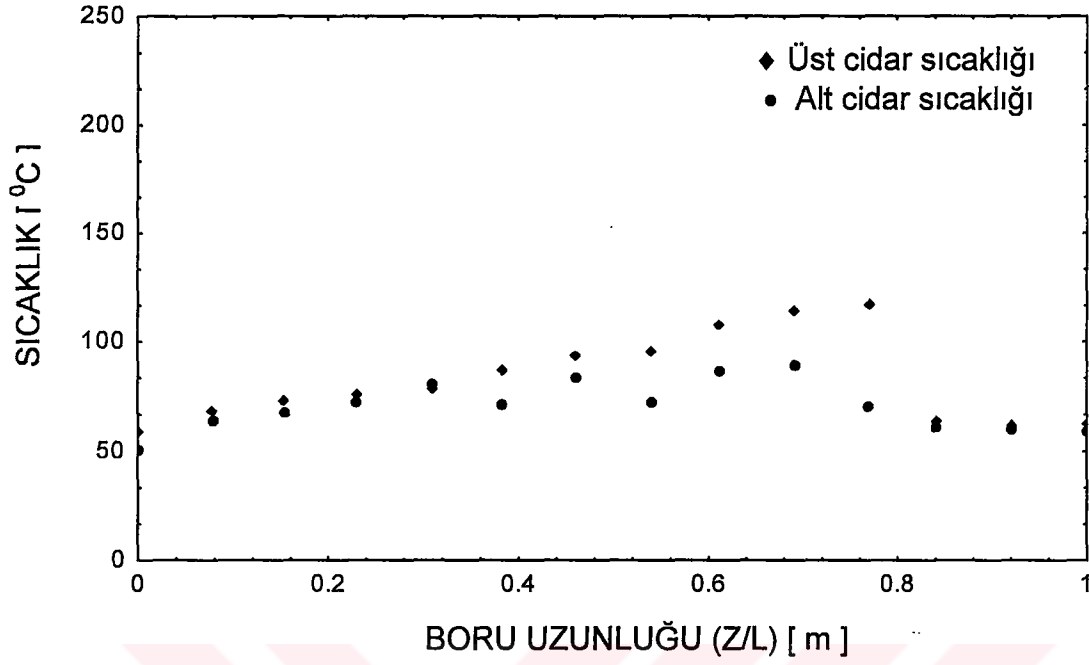
Şekil 7.1 'de boş boru için tek fazlı konveksiyon halindeki sıcaklık profili gösterilmiştir. Burada giriş sıcaklığı $T_g=16^{\circ}\text{C}$, akışkan giriş debisi $\dot{m}=45\text{g/s}$, ısı gücü $Q=16\text{kW}$ ve çıkış kısıtlayıcı katsayısı $\beta=0.48$ olarak ele alınmıştır. Şekil 7.1 'den de görüldüğü gibi test bölümünde ki akış tek sıvı fazındadır. Isıtıcı test borusunun cidarında üretilen ısıнын tamamına yakını sıvı fazına transfer edilmektedir. Ancak bu akış durumunda üretilen ısı sıvı fazını kaynama noktasına taşıyacak düzeyde değildir. Alt ve üst cidar sıcaklıkları test borusu girişinden itibaren hemen hemen lineer olarak değişmektedir. Üst cidar sıcaklığı alt cidar sıcaklığından daha yüksek değerlerde seyretmektedir. Zira kaldırma kuvvetlerinden dolayı daha düşük yoğunluğa sahip sıvı tabakası akış yönünde üst cidara doğru hareket etmektedir. Alt cidarda ise daha yoğun olan sıvı tabakası ile işgal edilmektedir. Üst cidar boyunca akan daha düşük yoğunluklu sıvı tabakasının sahip olduğu ısı transfer katsayısı alt cidar boyunca akmakta olan daha yoğun sıvı tabakasının sahip olduğu ısı transfer katsayısından daha küçük olması nedeniyle üst cidarda ki akışkan tarafından transfer edilen ısı miktarı alt cidardakine nispeten daha az olmaktadır. Bunun sonucunda da test borusunda akış yönünde elde edilen üst cidar sıcaklığı daima alt cidar sıcaklığından yüksek olmaktadır.

Şekil 7.2 , Şekil 7.3, Şekil 7.4 ve Şekil 7.5 'de boş boru için kısmi kaynama durumunda elde edilen sıcaklık profilleri gösterilmiştir. Bu sıcaklık profilleri deneysel çalışmalarda kullanılan en yüksek debi değerlerinde ortaya çıkmaktadır. Kısmi kaynama durumu için çizilen bu dört şekle dikkat edilirse tek

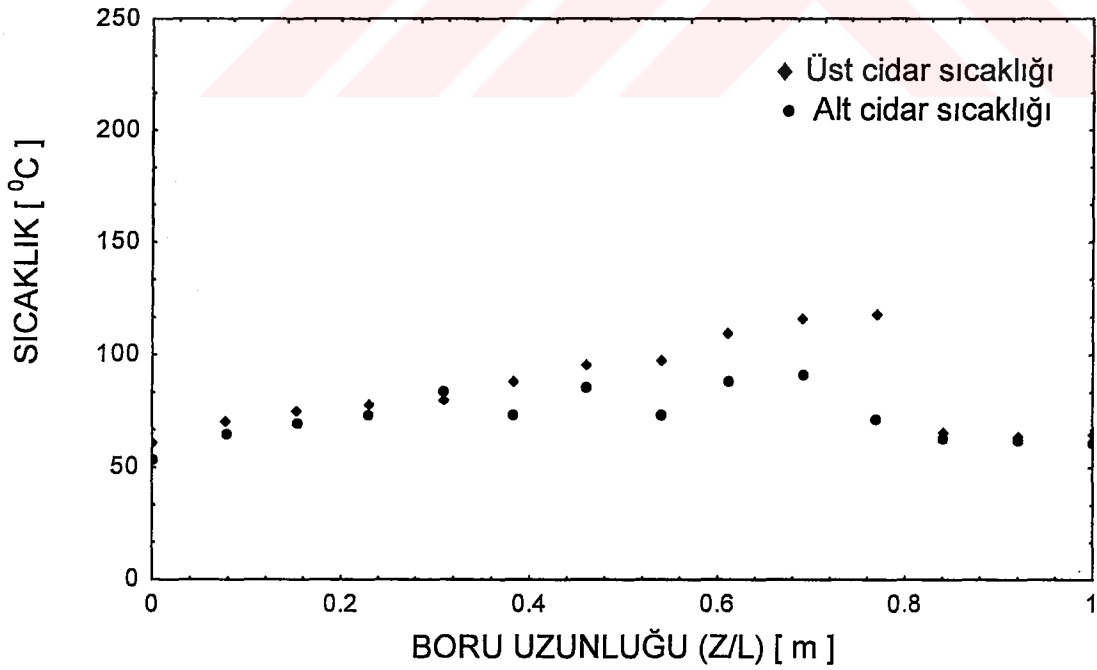


Şekil 7.1. Boru-1 için “ Tek fazlı konveksiyon “ akış durumundaki cidar sıcaklık profilleri $T_g=16^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=45\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$

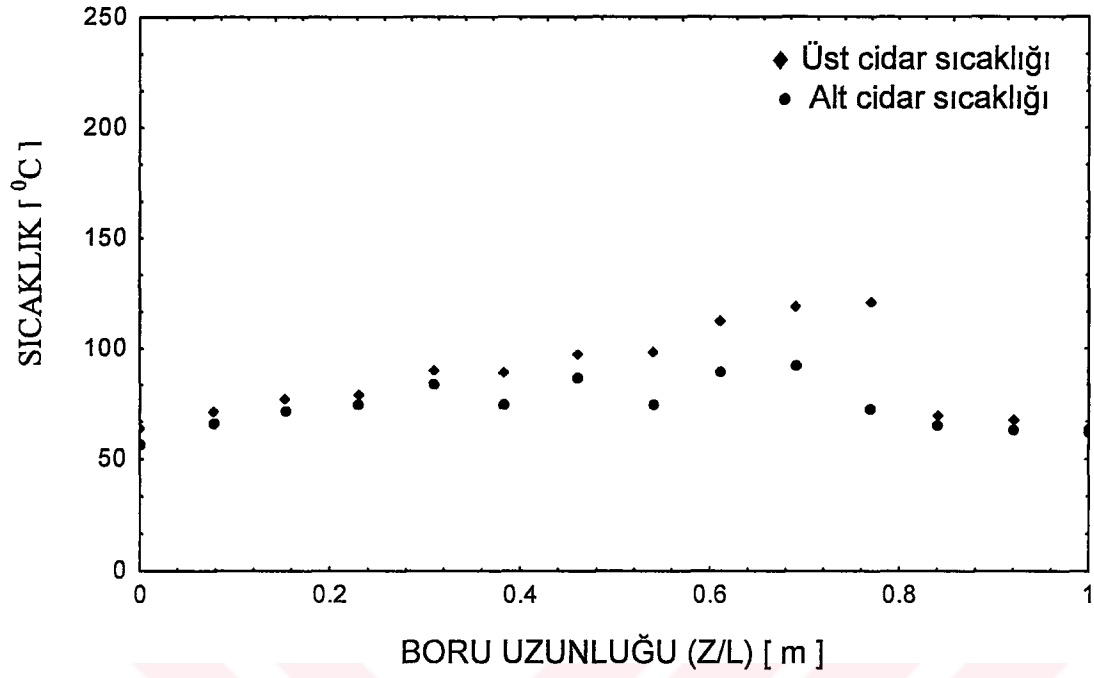
fazlı konveksiyonlu akışın sonu ile çekirdekli kaynama durumunun başlangıcı görülebilir. Akış yönünde test borusunun alt ve üst cidar sıcaklıklarında bir artış söz konusudur. Akışkan giriş sıcaklıklarındaki azalmalarla beraber çekirdekli kaynamanın başlangıç noktası ön taraflardan test borusunun sonuna doğru hareket etmektedir. Bunu akışkan giriş sıcaklığındaki azalmayla yani girişte daha yüksek ısı transfer katsayısına sahip olan akışkan aşırı soğutma düzeyinin artması ile açıklayabiliriz. Aşırı soğutma oranı artan akışkan ise test borusu cidarından daha fazla ısı absorbe edecektir. Çekirdekli kaynamanın başladığı noktadan itibaren tek fazlı konveksiyon durumuna göre daha yüksek ısı transfer katsayılarına ulaşıldığı söylenilebilir. Böylece hem alt cidar sıcaklığı hem de üst cidar sıcaklığı düşmektedir. Burada şunu hatırlarsak; çekirdekli kaynamanın başlamasıyla ısı transfer katsayısında sağlanan artışın temel nedeninin akış ortamında ortaya çıkmakta olan buhar kabarcıklarının büyüyerek test borusu yüzeyinden ayrılmaları ve sıvı faz tabakasında türbülans düzeyinin artmasındandır.



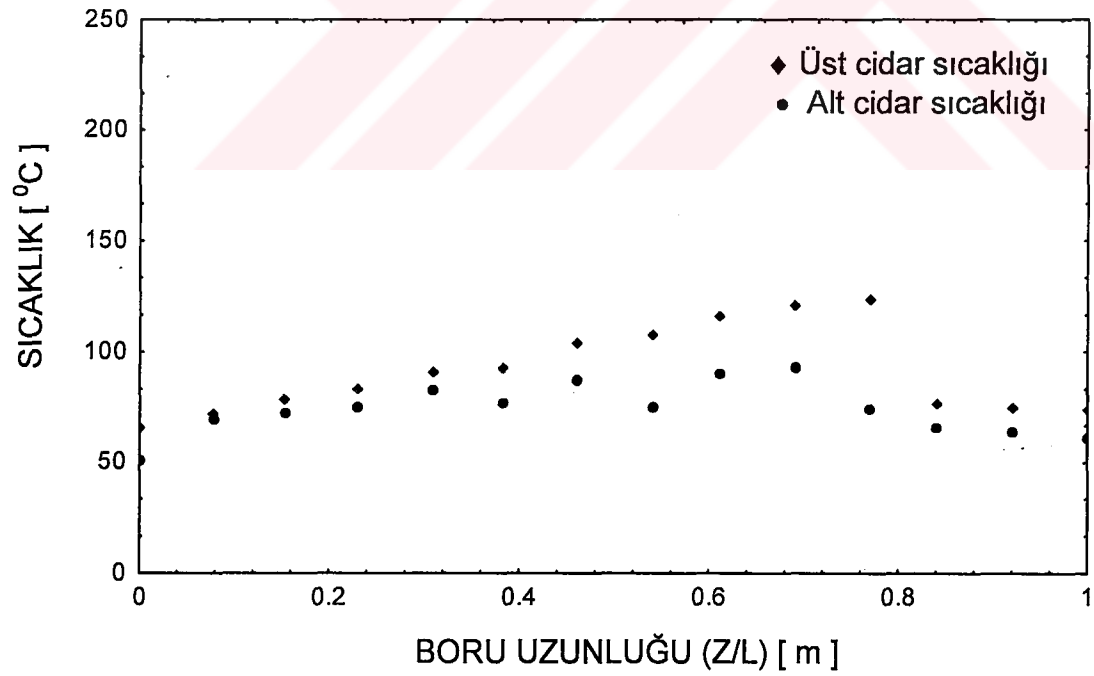
Şekil 7.2. Boru-1 için " Kısmi kaynama " akış durumundaki cidar sıcaklık profilleri. $T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=67.5\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.3. Boru-1 için " Kısmi kaynama " akış durumundaki cidar sıcaklık profilleri. $T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=75\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{kw}$, $\beta=0.448$

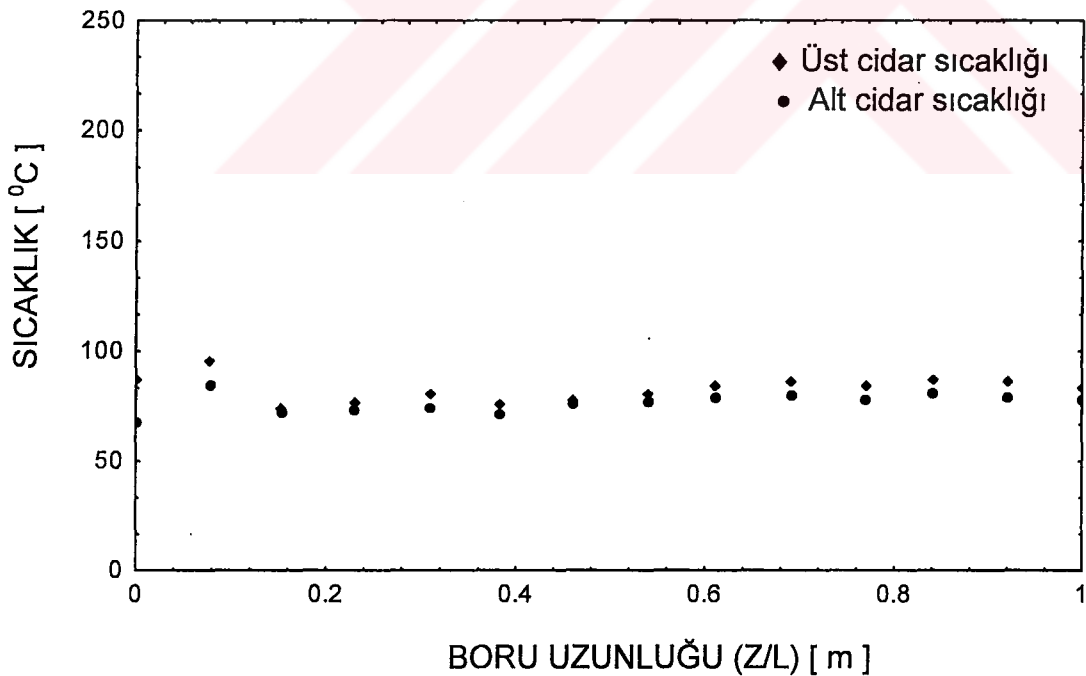


Şekil 7.4. Boru-1 için “ Kısmi kaynama “ akış durumundaki cidar sıcaklık profilleri. $T_g=24^\circ\text{C}$, $\dot{m}=75\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{kw}$, $\beta=0.448$

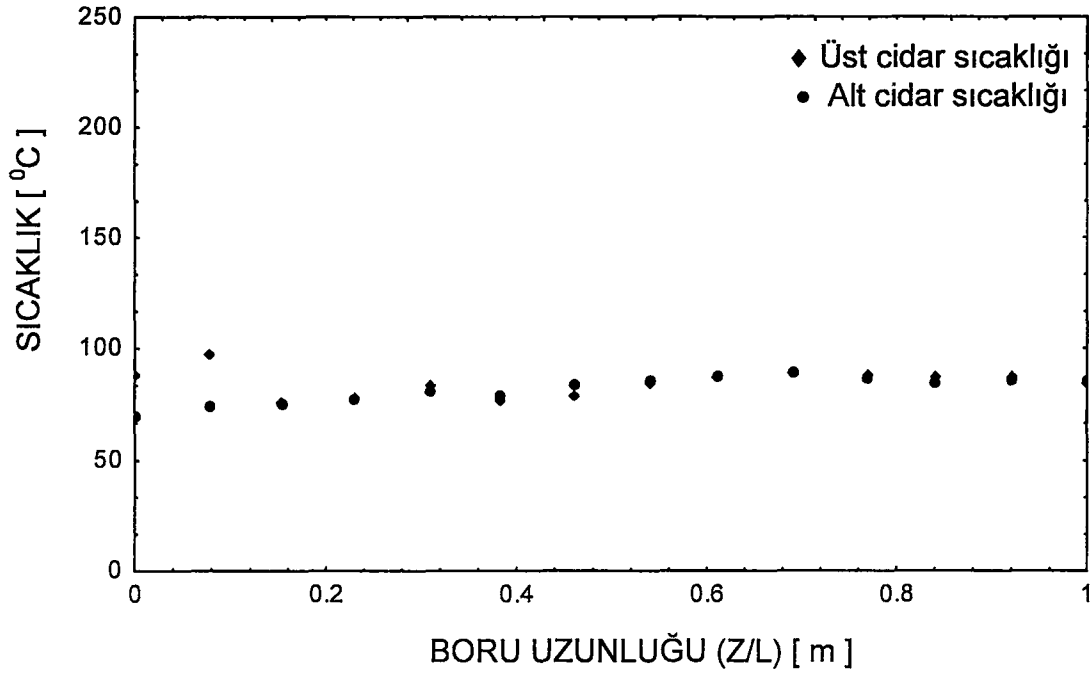


Şekil 7.5. Boru-1 için “ Kısmi kaynama “ akış durumundaki cidar sıcaklık profilleri. $T_g=19^\circ\text{C}$, $\dot{m}=75\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$

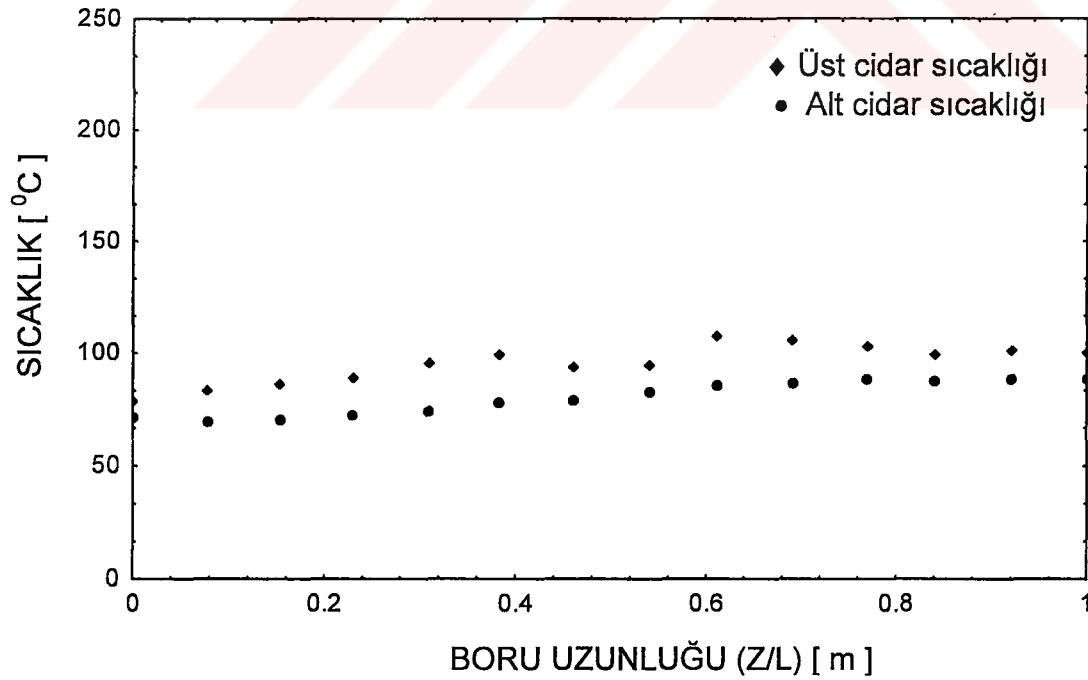
Şekil 7.6, Şekil 7.7 ve Şekil 7.8 'de çekirdekli kaynama sıcaklık profilleri gösterilmektedir. Gerek alt cidar sıcaklıklarında gerekse üst cidar sıcaklıklarında test borusu boyunca lineer birer değişim elde edilmiştir. Bu sıcaklık profilinde alt ve üst cidar sıcaklıkları test borusu boyunca fazla bir artış göstermemektedirler. Alt ve üst cidar sıcaklıkları arasındaki fark tüm boru boyunca hemen hemen aynı olmaktadır. Bu durum akışkanın farklı giriş sıcaklıklarından fazla etkilenmediğini göstermektedir. Çekirdekli kaynama ile ilgili sıcaklık profillerine dikkat edilirse akışkan giriş sıcaklığı azaldıkça alt ve üst cidar sıcaklıkları arasındaki fark da artmaktadır. Zira alt cidar daha yoğun akışkan tabakası ile kaplı iken üst cidarda ise daha düşük yoğunluklu akışkan tabakası akmaktadır. Çekirdekli kaynama rejiminde test borusu cidarından akışkana transfer edilen ısıнын büyük bir kısmı üst cidar boyunca hareket etmekte olan kabarcıklar vasıtası ile olmayıp yine üst cidar boyunca akmakta olan düşük yoğunluklu sıvı fazının doğrudan cidar ile temas etmesi sonucunda gerçekleşmektedir.



Şekil 7. 6. Boru-1 için “ Çekirdekli kaynama ” akış durumundaki cidar sıcaklık profilleri. $T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=60\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.7. Boru-1 için " Çekirdekli kaynama " akış durumundaki cidar sıcaklık profilleri. $T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=36\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$

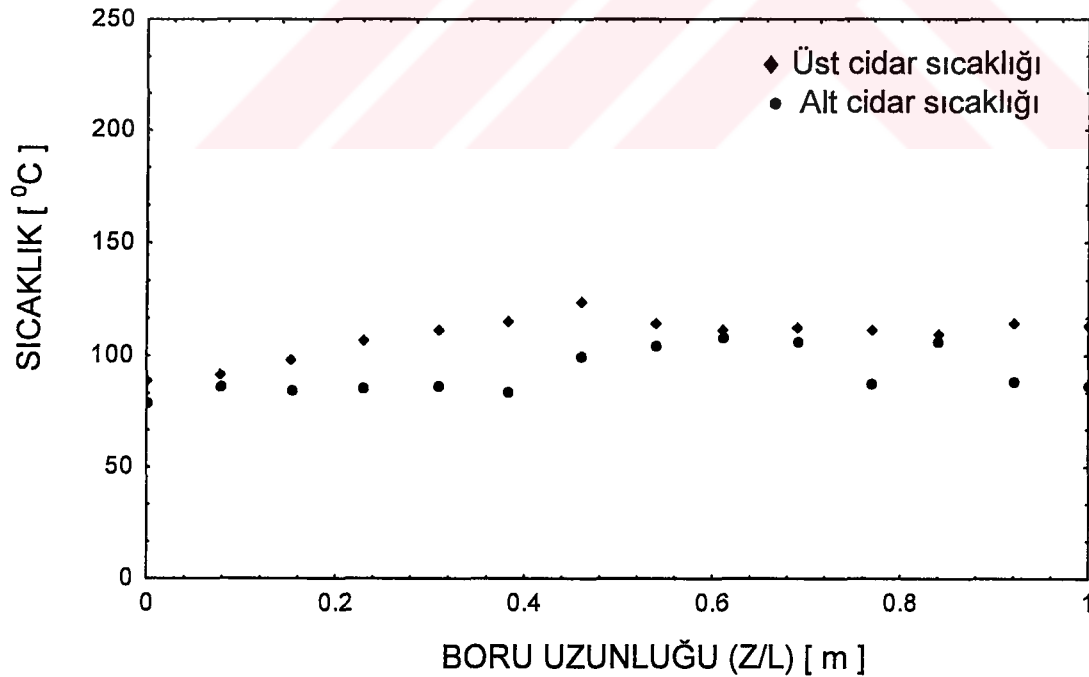


Şekil 7.8. Boru-1 için " Çekirdekli kaynama " akış durumundaki cidar sıcaklık profilleri. $T_g=24^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=36\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$

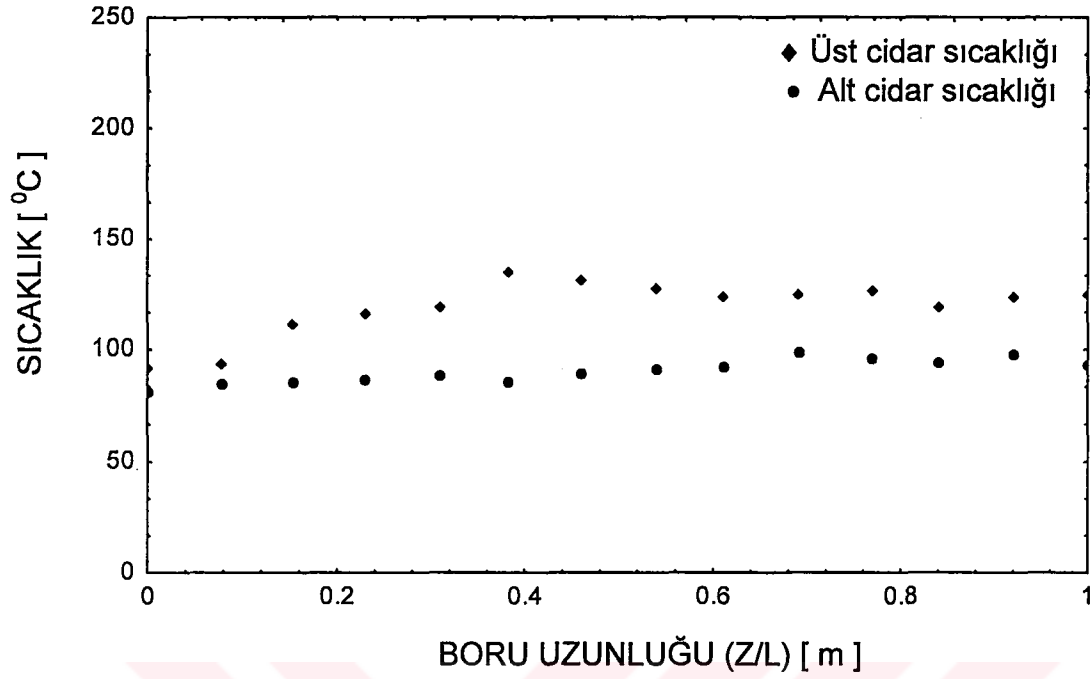
Çekirdekli kaynama rejiminde sıvı fazının çok iyi türbülans düzeyine sahip olması ve kaldırma kuvvetlerinin etkisiyle kabarcıkların yüzeyden uzaklaşması sonucunda yüksek ısı transfer oranları sağlanmaktadır. Aynı şekilde aşırı soğutulmuş sıvı fazı kaynama ortamında kabarcıkların büyüyerek test borusu yüzeyinden uzaklaşmalarına sebep olmaktadır. Çünkü bu kabarcıklar kendilerinden daha soğuk ve yoğun olan sıvı fazı tarafından kuşatılarak deforme olmaktadır.

Şekil 7.9, Şekil 7.10, Şekil 7.11 'de boş boru için merkezi katmanlaşma durumundaki sıcaklık profilleri gösterilmektedir. Bu şekillere dikkat edilirse üst cidar sıcaklık değerleri borunun orta kısmına doğru oldukça artmaktadır. Şöyle ki; bu akış rejiminde borunun orta kısımlarına doğru üst cidarla alt cidar arasındaki sıcaklık farkı 40°C 'ye kadar çıkmaktadır. Alt cidar sıcaklıkları ise boru boyunca hemen hemen sabit kalmaktadır. Sadece Şekil 7.9 'da alt cidar sıcaklığında bir artış söz konusu olmaktadır. Test borusunun sonuna doğru azalan katmanlaşmadan dolayı alt ve üst cidar sıcaklık değerleri birbirlerine oldukça yaklaşmaktadır. Bu kısımda akış adeta tek fazlı konveksiyonlu akış rejimindekine benzer bir karakter arz etmektedir. Boru alt cidarında lokal olarak henüz kaynama noktasına ulaşılmamıştır. Alt cidar boyunca ısıtmaya başlanan sıvı fazındaki akışkan tabakası daha düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle test borusunun içerisindeki akış ortamının tam orta kısmından akmaya başlayacaktır. Bu da alt cidar sıcaklığında bir miktarda olsa artışa neden olacaktır. Üst cidarda burn-out olayının borunun orta kısımlarına doğru meydana geldiği şekillerden de rahatça anlaşılmaktadır. Burada test borusunda akmakta olan akışın üst cidara yakın kısmı boyunca tamamıyla buhar fazında olan akışkan kütlesiyle üst cidarın temas ettiği ve burn-out olayının meydana geldiği noktaya literatürde dry-out noktası denmektedir. Çünkü üst cidara yakın kısımlarda biriken kabarcıkların belirli bir süre sonunda birleşerek üst cidarla sürekli temas halinde olan bir buhar yastığının oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı yatay bir boru kanalında meydana gelen iki fazlı akış rejiminde borunun orta kısımlarına yakın yerlerde üst cidarda meydana gelen

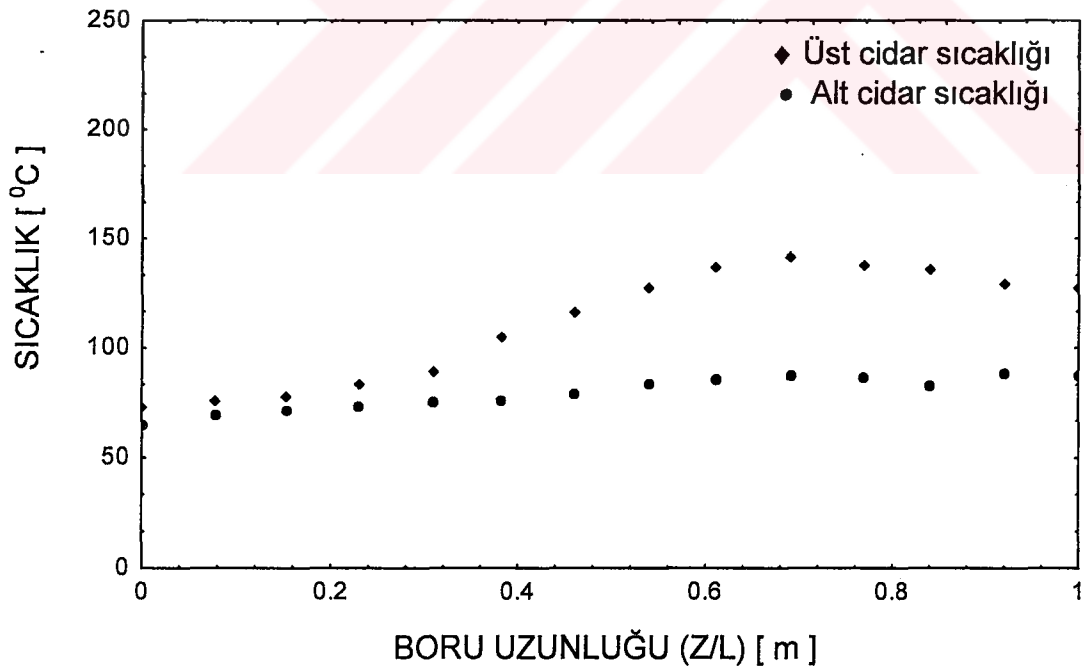
böyle bir burn-out olayının dikkatlice izlenmesi gerekir. Bu inceleme aslında sadece test borusunun orta kısımları ile sınırlı kalmamalı aynı zamanda test borusunda burn-out olayının oluşabileceği muhtemel noktaları da içermelidir. Yine aynı şekillere dikkat edilirse bu burn-out olayının olduğu bölgeden sonra üst cidar sıcaklığının tekrar azalmaya başladığı görülmektedir. Akış yönünde buharlaşma devam etmekte olan buharlaşmadan dolayı akışın buhar fazı artmaktadır. Buhar fazının daha hızlı akış oranına sahip olması nedeniyle sıvı-buhar ara yüzeyinde daha yüksek genliklere ve dalgalı bir formasyona sahip bir iki fazlı akış rejiminin oluşmasına neden olmaktadır. Bu tarz akış rejiminde çok hızlı olan buhar fazında ki akış ara yüzeydeki dalgalara çarparak sıvı fazındaki akışkan partiküllerinin buhar fazındaki akışkan kısmına püskürtülmesine neden olmaktadır. Püskürtülen sıvı fazındaki bu partiküllerin bir kısmı test borusu cidarının en üst kısmı boyunca birikerek tüm boru cidarını kaplayarak annular akış olarak adlandırılan dairesel akış rejimi meydana gelir.



Şekil 7. 9. Boru-1 için “ Merkezi katmanlaşma “ akış durumundaki cidar sıcaklık profilleri. $T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=22.5\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$

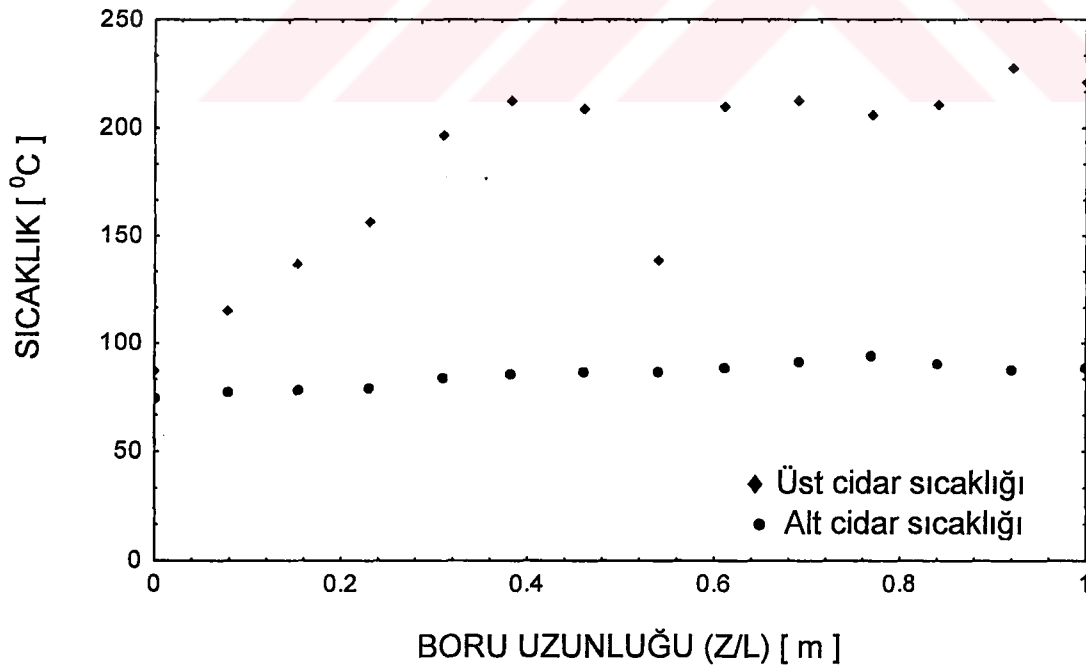


Şekil 7.10. Boru-1 için "Merkezi katmanlaşma" akış durumundaki cidar sıcaklık profilleri. $T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=25\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$

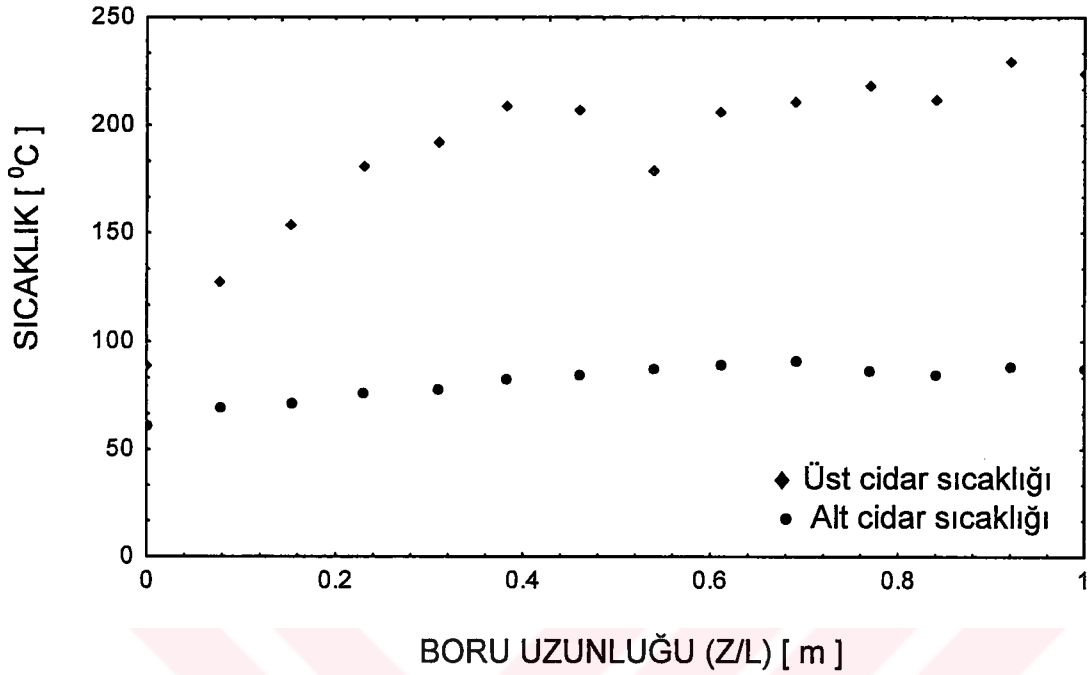


Şekil 7.11. Boru-1 için "Merkezi katmanlaşma" akış durumundaki cidar sıcaklık profilleri. $T_g=16^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=22.5\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$

Şekil 7.12 ve Şekil 7.13 yine boş boru için lokal katmanlı akış rejimine tekabül eden sıcaklık profilleri verilmiştir. Bu sıcaklık profilleri oldukça küçük kütleli debilerde elde edilmektedir. Alt cidar sıcaklıkları hemen hemen sabittir. Çünkü bu akış rejiminde alt cidarda üretilen kabarcıklar kaldırma kuvvetlerinin etkisi ile üst cidara doğru sürüklenmektedirler. Bundan dolayı alt cidar tekrar sıvı fazındaki akışkanla kaplanarak alt cidar sıcaklığının sabit olmasını sağlamaktadır. Üst cidar sıcaklıklarına dikkat edilirse burn-out olayının meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bu olay boruda sadece bir bölgede meydana gelmektedir. Ancak bu bölgede üst cidar sıcaklığında ani bir azalma söz konusu olmaktadır. Buna akış ortamında meydana gelen literatürde mist flow olarak adlandırılan sisli akış rejiminin sebep olduğu söylenebilir. Sisli akış rejimi de boru boyunca çok kısa bir bölgeyi etkileyebilecek şekilde üst cidara yakın yerlerde meydana gelmektedir. Damlacıkların sahip oldukları yüksek ısı transfer kabiliyetlerinden dolayı üst cidar sıcaklığında bir azalmaya sebep olmaktadır. Bu noktadan sonra üst cidar sıcaklığı artarak yine burn-out olayı meydana gelmektedir. Alt cidar boyunca ise yine sıvı fazındaki akışkan akışı devam etmektedir.

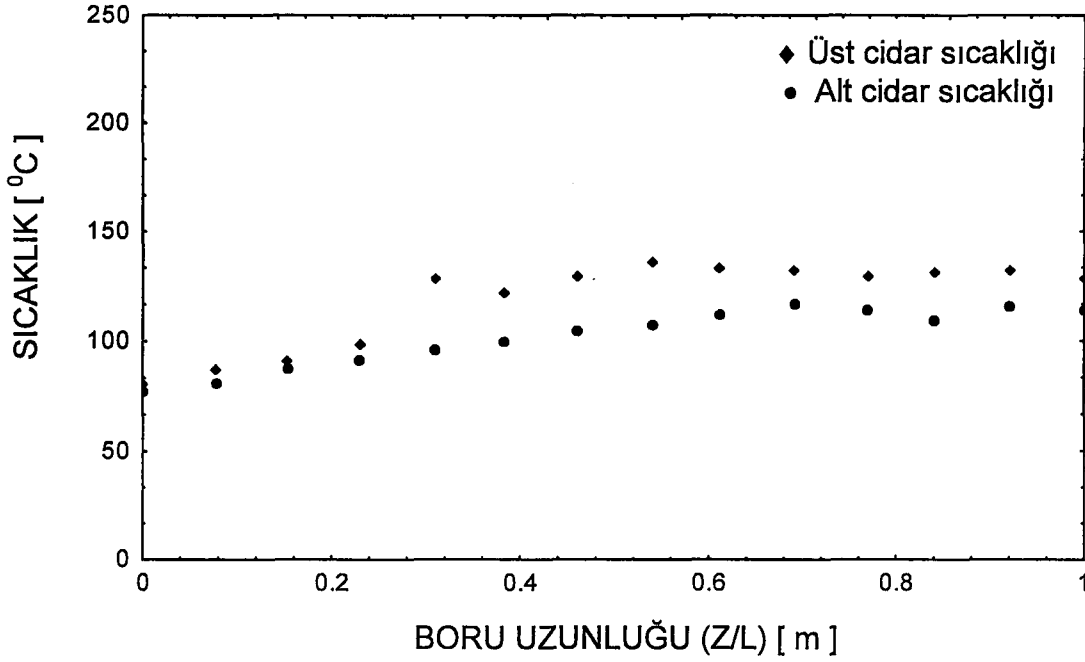


Şekil 7.12. Boru-1 için “ Lokal katmanlaşma ” akış durumundaki cidar sıcaklık profilleri. $T_g=22^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=12.5\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.13. Boru-1 için “ Lokal katmanlaşma ” akış durumundaki cidar sıcaklık profilleri. $T_g=16^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=12.5\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$

Şekil 7.14 'de boş boru için tam katmanlı akış durumunda elde edilen sıcaklık profilleri gösterilmiştir. Şekil 7.14 'de gösterilen sıcaklık diyagramında alt ve üst cidar sıcaklıkları arasındaki fark maksimum 40°C dir. Dikkat edilirse üst cidar sıcaklıkları girişe yakın yerlerde artmaya başlamaktadır. Bu artış devam ederken akış yönünde burn-out olayının başladığı anlaşılmaktadır. Yine şekilde alt ve üst cidar sıcaklıklarında girişe yakın kısımlarda göze çarpan düzensizliğe girişteki elektriksel enerjinin temin edildiği bağlantı kutbunun neden olduğu söylenebilir. Bu nedenle test borusunun girişe yakın kısımlarında bir termal karışıklık meydana gelmektedir. Üst cidar tamamen buhar fazında akmakta olan akışkanla temas halinde iken alt cidar ise ince bir sıvı fazında olan akışkan ile temas etmektedir.



Şekil 7.14. Boru-1 için “ Tam katmanlı ” akış durumundaki cidar sıcaklık profilleri. $T_g=19^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=22.5\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$

7.1.3. Boru 2 İçin Sıcaklık Profilleri

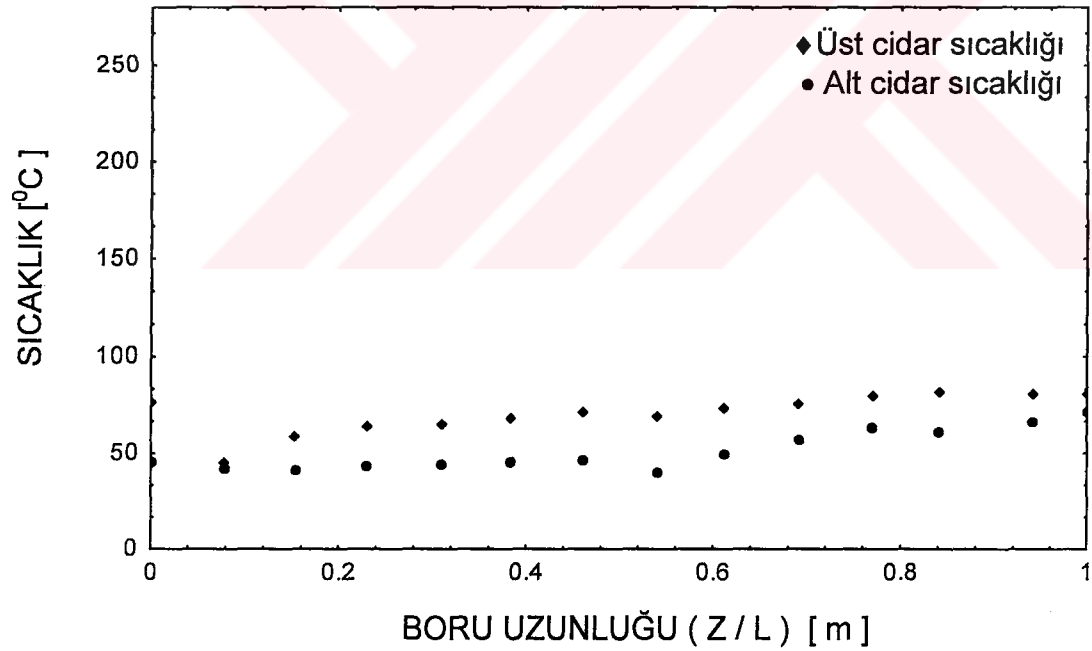
Boru 2 olarak adlandırdığımız test borumuz içerisinde ; tel çapı 1.8mm, adımı 3.6mm olan bir yay elmanı bulunmaktadır ve efektif çapı 9.56mm'dir.

Boru 2 için aşağıda gösterilecek şekillerden de kolayca anlaşılacağı gibi boş boruya nispeten daha az katmanlaşma söz konusudur. Çünkü Boru-2'nin içerisine yerleştirilmiş bulunan yay elemanı boru boyunca akıştaki türbülans düzeyini artırarak sıvı ve buhar fazlarının karışık bir şekilde akmalarına neden olmaktadır.

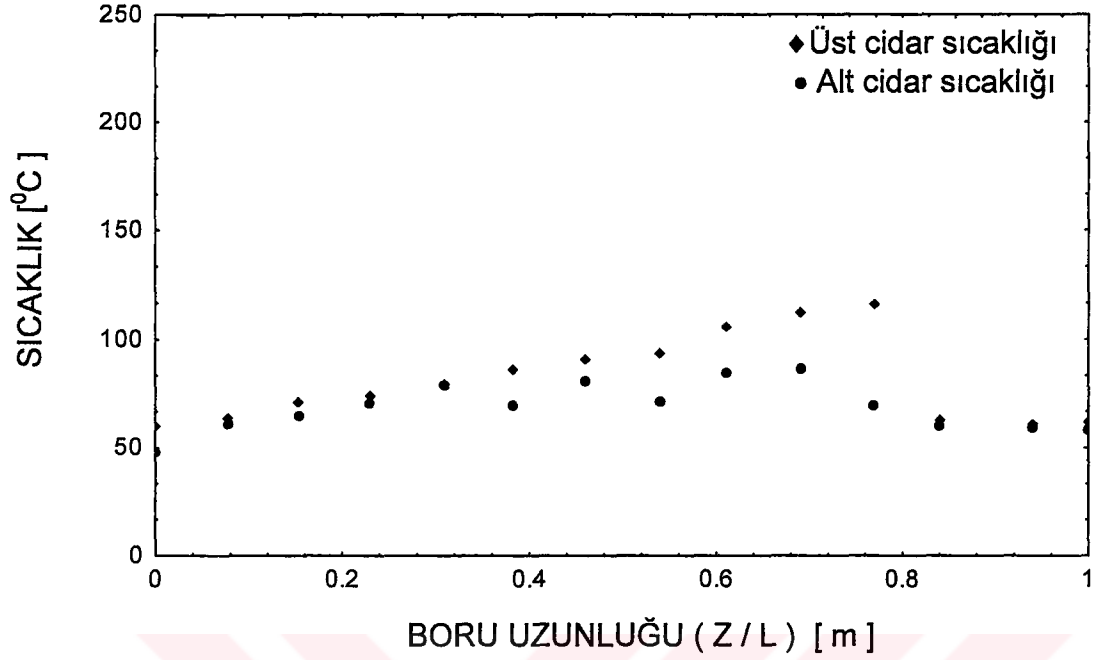
Şekil 7.15 'de Boru 2 için tek fazlı konveksiyonlu akış rejimi durumunda elde edilen sıcaklık profili gösterilmektedir. Bu akış rejiminde alt ve üst cidar sıcaklıkları boru boyunca hemen hemen sabit kalmaktadırlar.

Alt ve üst cidar sıcaklıkları arasındaki fark sadece 20°C civarında gerçekleşmektedir. Aynı zamanda bu akış rejiminde Boru-2 için elde edilen alt ve üst cidar sıcaklıkları boş boruya nazaran oluşan türbülansın dolayısı daha düşük değerlerde seyretmektedir.

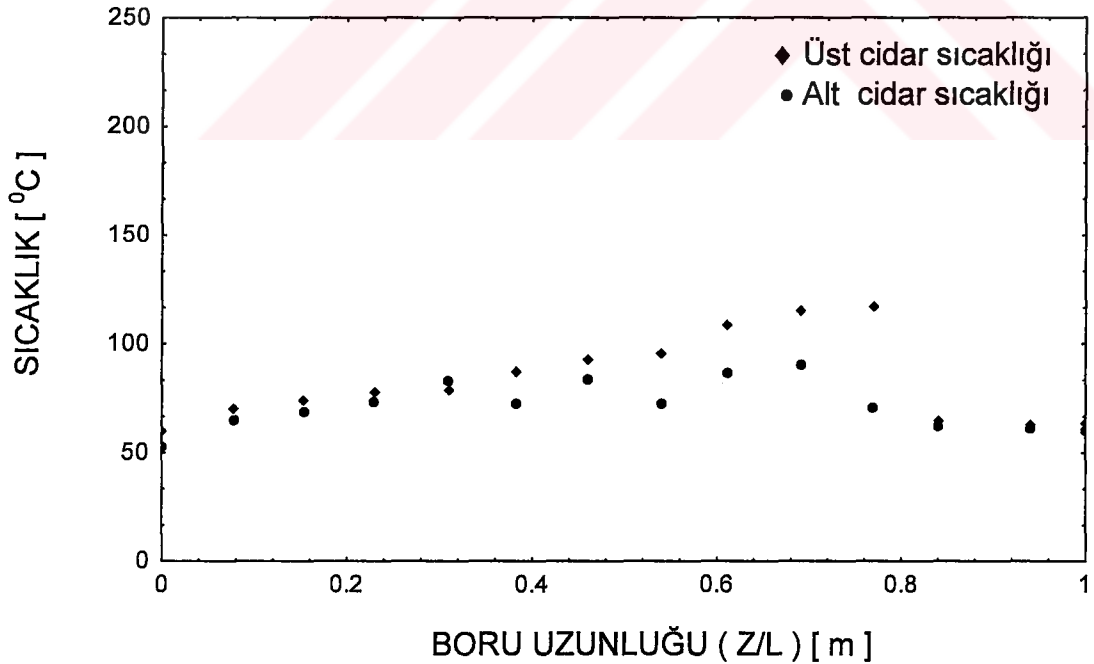
Şekil 7.16, Şekil 7.17 'de ise yine Boru-2 için kısmi kaynama rejiminde elde edilen sıcaklık profili gösterilmektedir. Şekil 7.16 ile Şekil 7.17 'ye dikkat edilirse sıvı ve buhar fazlarının karışık bir şekilde akması nedeniyle gerek alt cidar sıcaklık değerleri gerekse üst cidar sıcaklık değerleri birbirlerine oldukça yaklaşmaktadır. Buda bize daha az bir katmanlaşmanın meydana geldiğini göstermektedir. Hatta bazen alt cidar sıcaklığı üst cidar sıcaklığından daha yüksek olmaktadır.



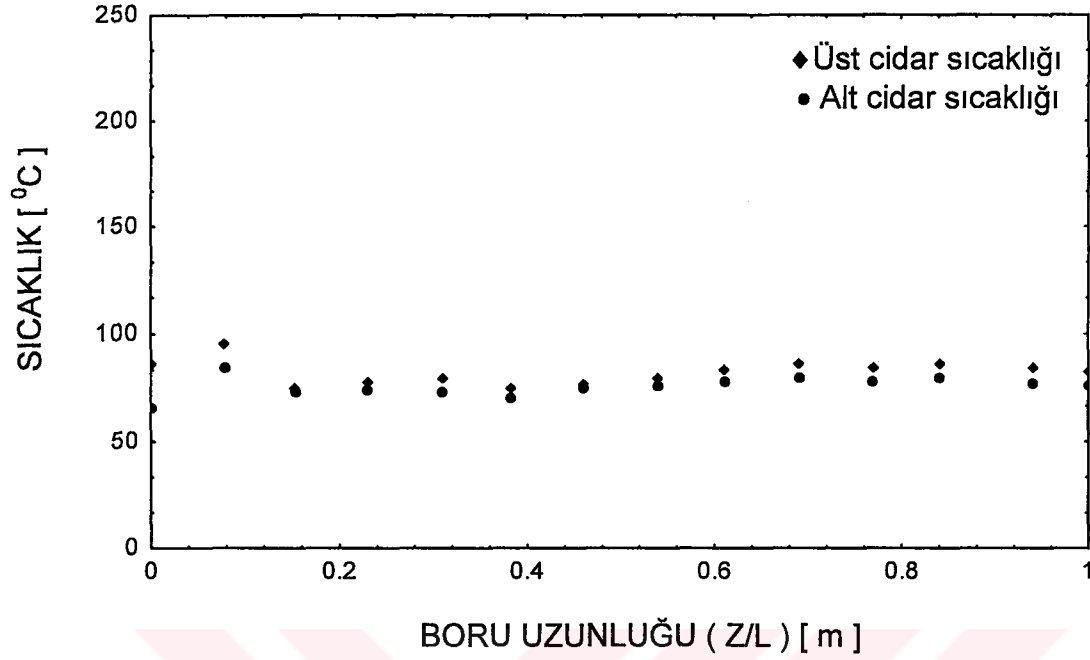
Şekil 7.15. Boru-2 için " Tek fazlı konveksiyon " sıcaklık profilleri. $T_g=16^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=45\text{ g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{ kW}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.16. Boru-2 için “ Kısmi kaynama ” sıcaklık profilleri. $T_g=28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=75\text{ g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{ kW}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.17. Boru-2 için “ Kısmi kaynama ” sıcaklık profilleri. $T_g=24\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=75\text{ g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{ kW}$, $\beta=0.448$



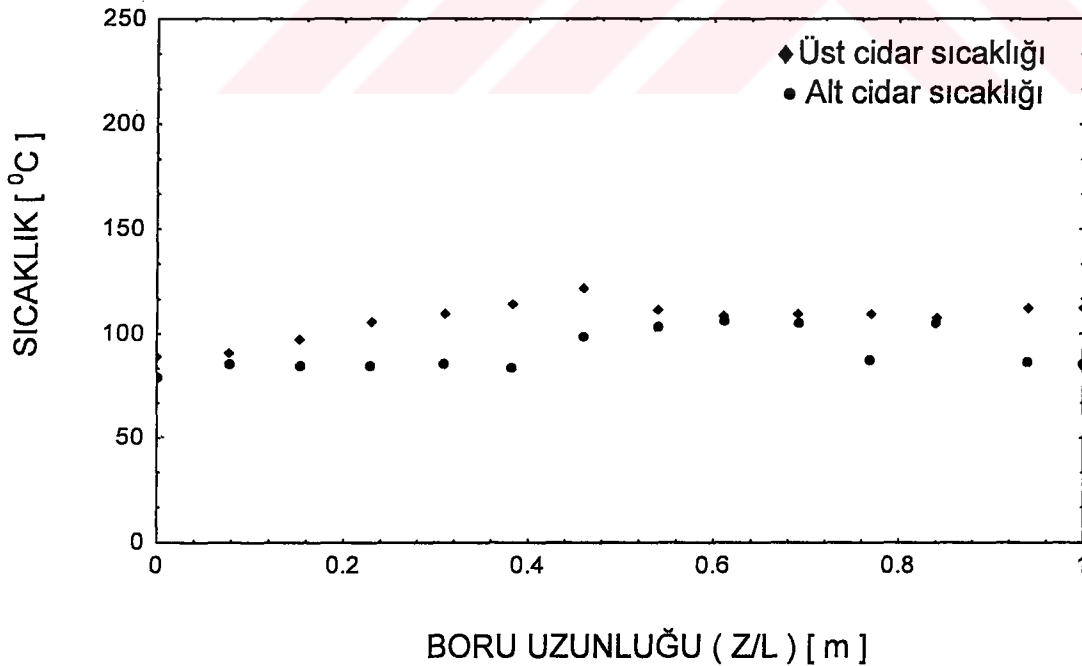
Şekil 7.18. Boru-2 için “ Çekirdekli kaynama ” sıcaklık profilleri. $T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=60\text{ g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{ kW}$, $\beta=0.448$

Şekil 7.18 'de Boru-2 için çekirdekli kaynama rejiminde elde edilen sıcaklık profilleri gösterilmektedir. Bu şekle dikkat edilirse alt ve üst cidar sıcaklıkları boru boyunca hemen hemen aynı değerlerde sabit olmaktadır. Bunun nedeni boru içerisine yerleştirilmiş bulunan yay elemanının akışa sağlamış olduğu türbülanstandır. Böylece sıvı ve buhar fazları akış ortamında karışık bir şekilde akarak alt ve üst cidardan akışkana yapılan ısı transfer oranını arttırmaktadır.

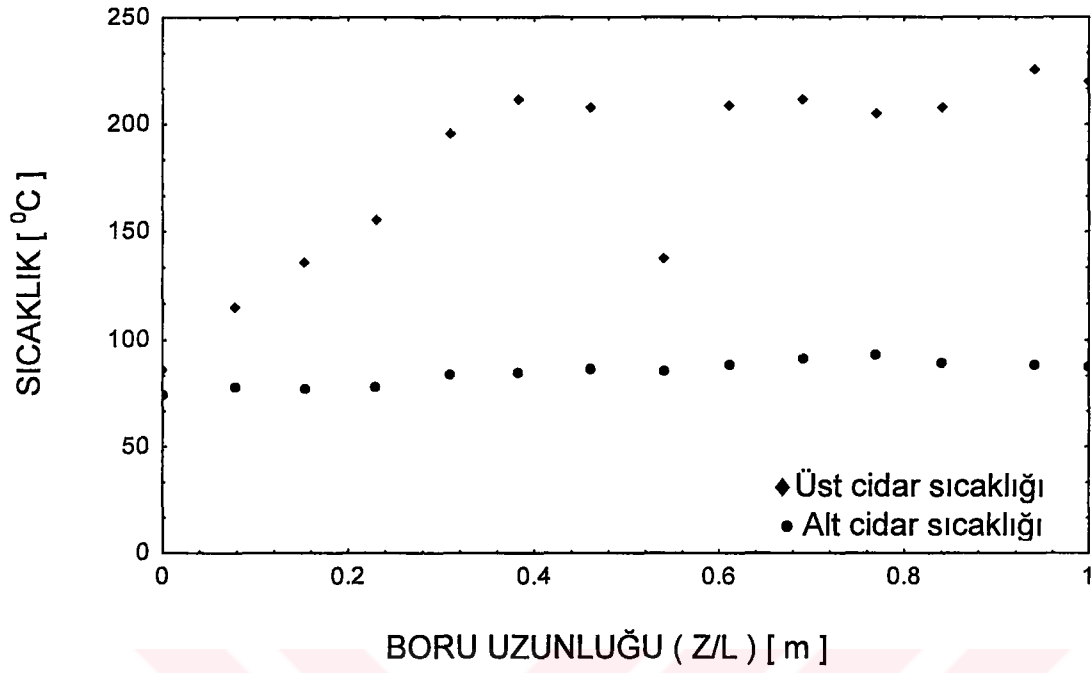
Şekil 7.19 'da Boru-2 için merkezi katmanlı akış rejiminde elde edilen sıcaklık profili gösterilmektedir. Alt ve üst cidar sıcaklık profillerine dikkat edilirse fazlar birbirinden ayrılmaya başlamaktadır. Hem alt cidarda hem de üst cidarda oluşan kabarcık sayısı artmaktadır. Kaldırma kuvvetlerinden dolayı yoğunluğu daha fazla olan kabarcıklar üst cidara doğru hareket etmektedirler. Bunun sonucunda ısı transfer oranı alt cidara nispeten azalan üst cidar için elde edilen sıcaklık değerleri alt cidardan daha yüksek olmaktadır. Aynı zamanda bu boru için elde edilen gerek alt ve üst cidar sıcaklık değerlerinde gerekse her iki cidar

sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkında boş boruya nazaran bir azalma söz konusudur. Bunu da yine boru içerisine yerleştirilmiş bulunan yay elemanının sebep olduğu türbülanslı akış ile açıklayabiliriz. Yine aynı şekle dikkatlice bakılırsa burada oluşan burn-out olayı borunun girişine daha yakın yerlerde ortaya çıkarken boş boruda ise bu olay borunun orta kısımlarına doğru meydana gelmektedir.

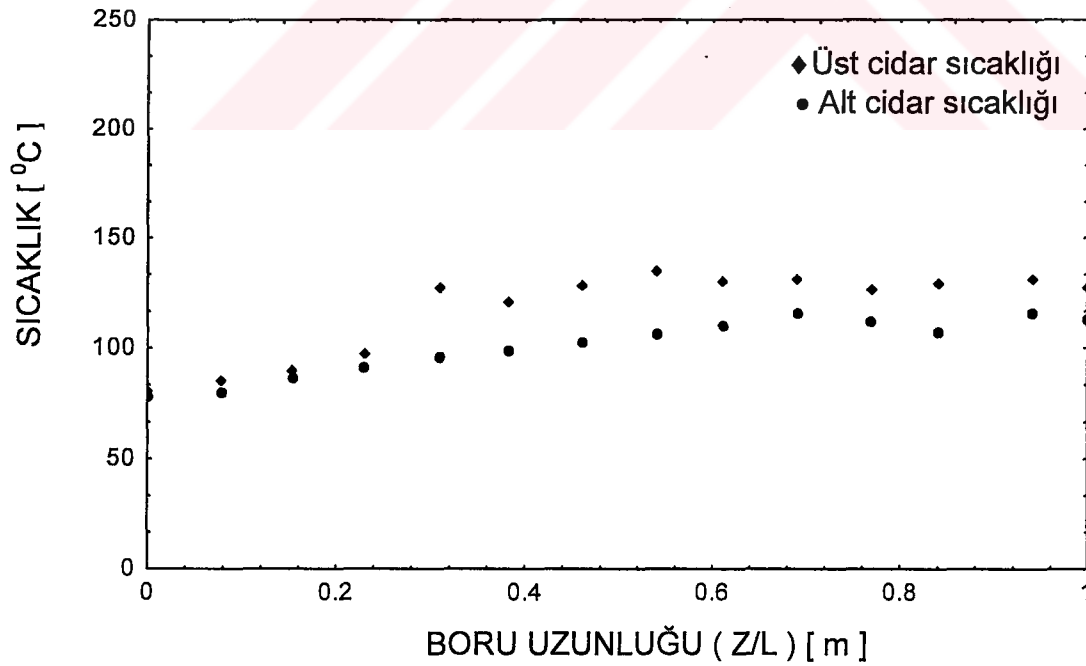
Şekil 7.20 'de ise Boru-2 için lokal katmanlaşma rejimi durumunda elde edilen sıcaklık profili gösterilmektedir. Burada da yine dikkati çeken ilk önemli nokta burn-out olayının boş boruya nazaran daha düşük sıcaklık limitlerinde ortaya çıkmasıdır. Bu önemli bir sonuçtur. Çünkü burn-out olayı ile alt ve üst cidar sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkının boş boruya nazaran azalması sonucunda test borusu cidarında meydana gelen termal gerilmelerde de bir azalma söz konusudur. Test borusu cidarında oluşan termal gerilmelerde elde edilen azalma ile beraber bu olayın boru cidarlarına vermiş olduğu zararlarda azaltılmış olmaktadır.



Şekil 7.19. Boru-2 için “ Merkezi katmanlaşma ” sıcaklık profilleri. $T_g=28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=22.5\text{ g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{ kW}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.20. Boru-2 için “ Lokal katmanlaşma ” sıcaklık profilleri. $T_g=22\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=12.5\text{ g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{ kW}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.21. Boru-2 için “ Tam katmanlı ” sıcaklık profilleri. $T_g=19\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=22.5\text{ g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{ kW}$, $\beta=0.448$

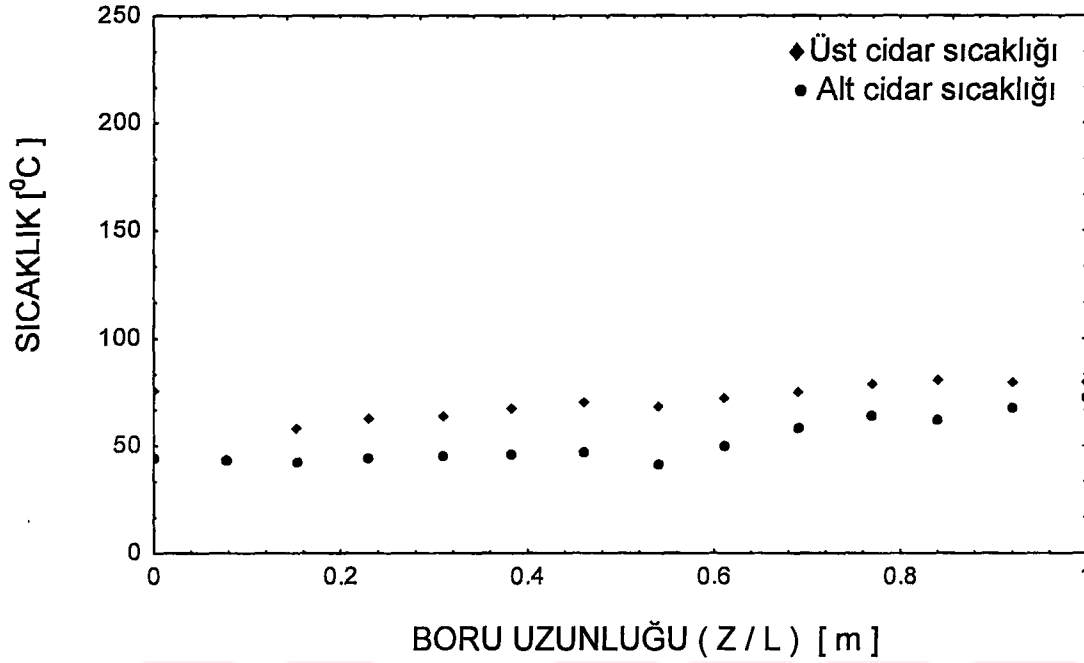
Şekil 7.21 'de Boru-2 için tam katmanlı akış rejiminde elde edilen sıcaklık profili gösterilmektedir. Burada katmanlaşma borunun girişine yakın yerlerden başlayarak borunun sonuna kadar devam etmektedir.

Boru-2 için elde edilen katmanlaşma düzeyi boş boruya nazaran yine daha az olmaktadır. Alt ve üst cidar sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı azalmakta, bu fark boru boyunca orta kısımlara doğru en fazla 35°C dolaylarında gerçekleşmektedir.

7.1.4. Boru-3 İçin Sıcaklık Profilleri

Şekil 7.22 'de Boru-3 için tek fazlı konveksiyonlu akış durumu için elde edilen sıcaklık profili gösterilmektedir. Boru-3 olarak adlandırılan test elemanının boş boru elemanının içerisine yerleştirilmiş ve yay adımı $h_y=11\text{mm}$, tel çapı $D=1.8\text{mm}$ olan bir yay elemanından meydana gelmektedir. Bu durum için hesaplanan efektif çap değeri 12.53mm'dir.

Boru-3 için takip edilen deneysel yöntem diğer test boruları için yapılanlarla benzerdir. Şekil 7.22 'ye dikkat edilirse tek fazlı konveksiyonlu akış rejiminde bu boru elemanı için de alt ve üst cidar sıcaklıkları boru boyunca lineer bir şekilde artmaktadırlar. Alt ve üst cidar sıcaklıkları arasındaki fark maksimum 27°C civarındadır. Bu değer Boru-1 ve Boru-2 için elde edilen değerlere göre biraz daha düşüktür. Boru-3 için alt ve üst cidar sıcaklık profilleri aşağıda sırasıyla; kısmi kaynama akış rejiminde Şekil 7.23 ve Şekil 7.24 'de, çekirdekli kaynama rejiminde Şekil 7.25 'de, merkezi katmanlaşma rejiminde Şekil 7.26 'da, lokal katmanlı akış rejiminde Şekil 7.27 'de ve tam katmanlı akış rejiminde ise Şekil 7.28 'de gösterilmiştir. Aşağıdaki şekillere dikkat edilirse boru içerisine yerleştirilmiş bulunan yay elemanı nedeniyle alt ve üst cidar sıcaklık değerlerinde boş boruya nazaran belirli bir miktarda düşüş sağlanmıştır.

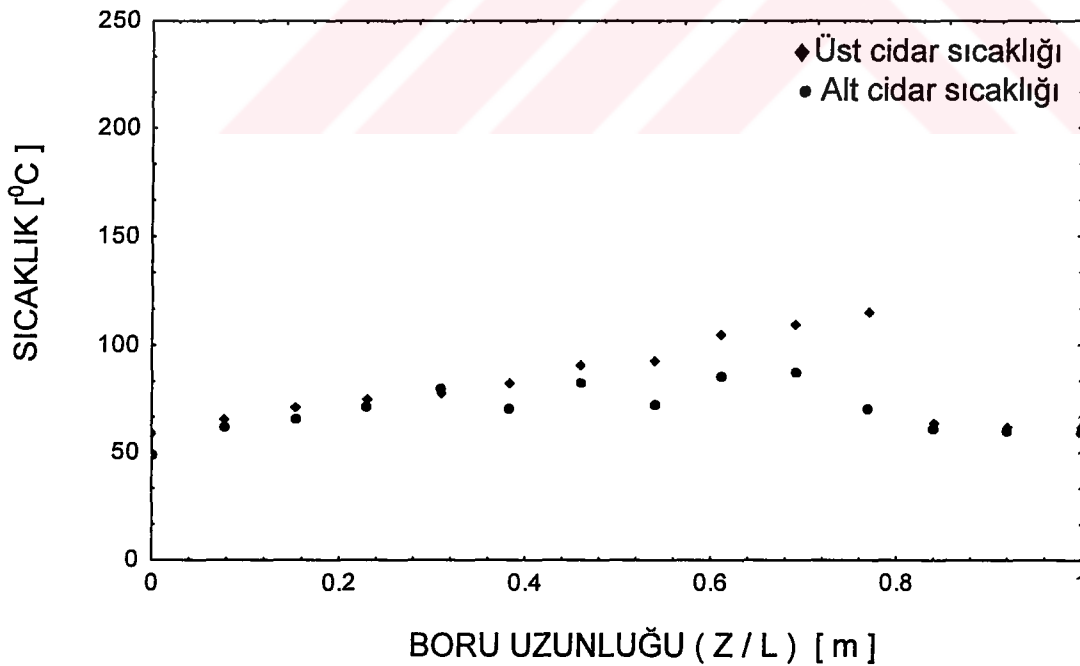


Şekil 7.22. Boru-3 için “ Tek fazlı konveksiyon ” sıcaklık profilleri. $T_g=16^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=45\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$

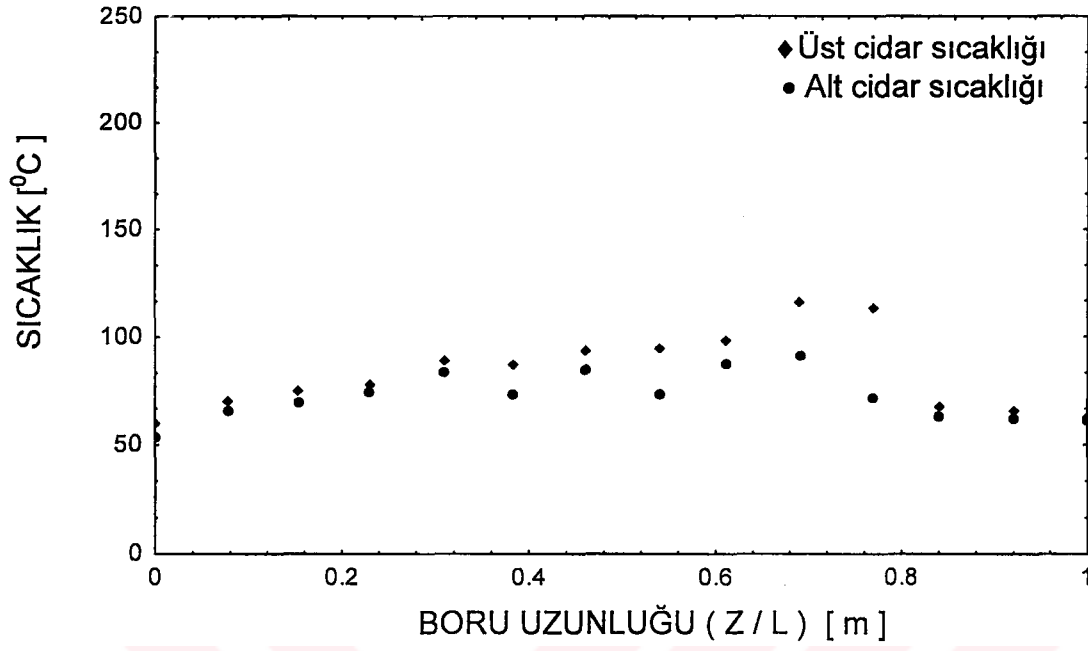
Çünkü yay elemanı akışın türbülans düzeyini artırarak sıvı ve buhar fazlarının boru boyunca karışık bir şekilde akmasını temin etmektedir. Kısmi kaynama rejiminde borunun orta kısımlarına kadar alt ve üst cidar sıcaklıklarında birbirine yakın değerlerde birer artış göze çarpmaktadır. Buna girişte sıvı fazın aşırı soğutulmuş olması neticesinde başlangıçta cidardan daha çok enerji absorbe etmesinin neden olduğu söylenebilir.

Boru cidarında oluşan kabarcıklar kendilerinden daha soğuk olan akışkan tarafından kuşatılmaları sonucunda cidardan akışkana yapılan ısı transfer oranı artmaktadır. Boru boyunca akış yönünde kabarcık sayısı arttığından ısı transfer katsayısında bir azalma söz konusu olmaktadır. Ekseriyetle kaldırma kuvvetleri nedeniyle kabarcıkların üst cidarda birikmeleri ve daha yoğun olan sıvı fazındaki akışkanın alt cidar boyunca akması sonucu üst cidar sıcaklıkları daha yüksek olmaktadır. Yine yay elemanının temin etmiş olduğu türbülans nedeniyle sıvı fazı ile buhar fazının karışık akmakta ve boru cidarıyla temas eden sıvı fazındaki partiküller daha fazla enerji absorbe ederek cidar sıcaklıklarını nispeten düşürmektedir.

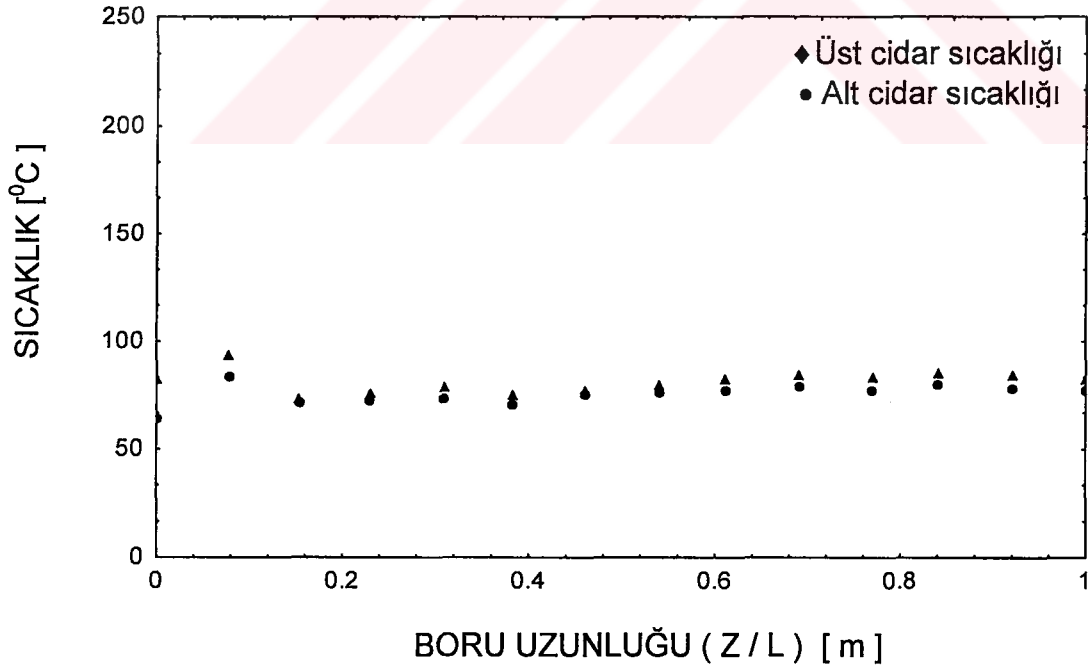
Çekirdekli kaynama rejiminde alt ve üst cidar sıcaklıkları Boru-3 içinde boru boyunca hemen hemen sabit kalmaktadır. Burada da yine sıcaklık limitlerinde nispeten bir azalma söz konusudur. Merkezi katmanlı akış, lokal katmanlı akış ve tam katmanlı akış rejimlerinde Boru-3 için elde edilen sıcaklık profillerine de dikkat edersek boş boruya nazaran daha düşük sıcaklık limitleri elde edilmektedir. Çünkü boş boruya göre bu boruda oluşan katmanlaşma daha az düzeyde olmaktadır. Boru-3 için elde edilen burn-out olayları söz konusu grafiklerden incelenirse bu olay Boru-3'te daha düşük sıcaklık limitlerinde ortaya çıktığı için termal gerilmelerden dolayı boru cidarlarında meydana getirebileceği muhtemel deformasyonlar, patlama ve çatlamlar yine boş boruya nazaran azalacaktır. Bu aslında deneysel çalışmamız neticesinde elde ettiğimiz önemli bir sonuçtur. Burn-out olayı burada genellikle katmanlaşmanın başlangıcında meydana gelmektedir. Kütlesel debide meydana gelen azalmayla beraber fazlarda ayrışma olayı yani katmanlaşma boru boyunca genişlemektedir. Bu faz ayrışması genellikle düzensizdir. Boru içerisinde bulunan yay elemanı akışa kazandırdığı türbülans nedeniyle tam bir faz ayrışmasına engel olmaktadır.



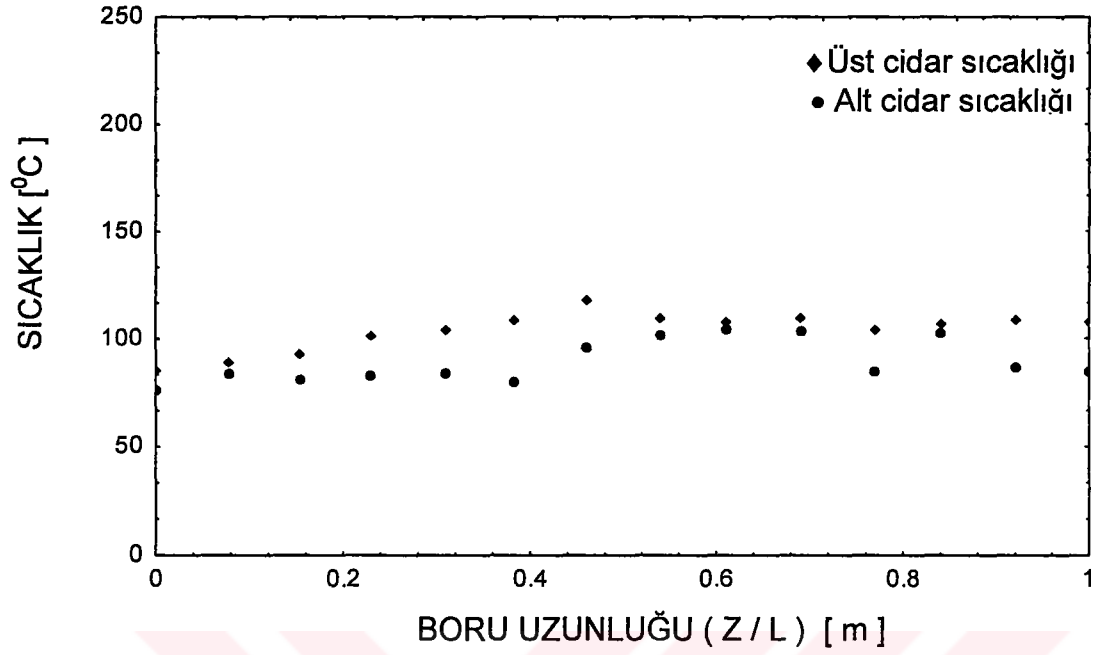
Şekil 7.23. Boru-3 için “ Kısmi kaynama ” sıcaklık profilleri. $T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=75\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$



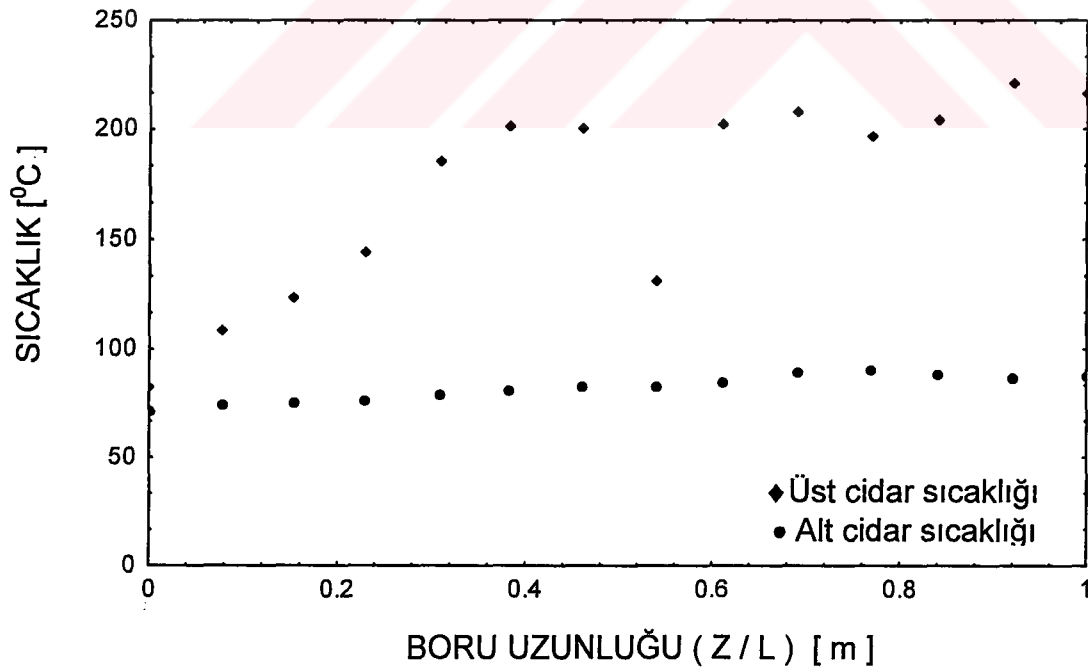
Şekil 7.24. Boru-3 için " Kısmi kaynama " sıcaklık profilleri. $T_g=24^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=75\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$



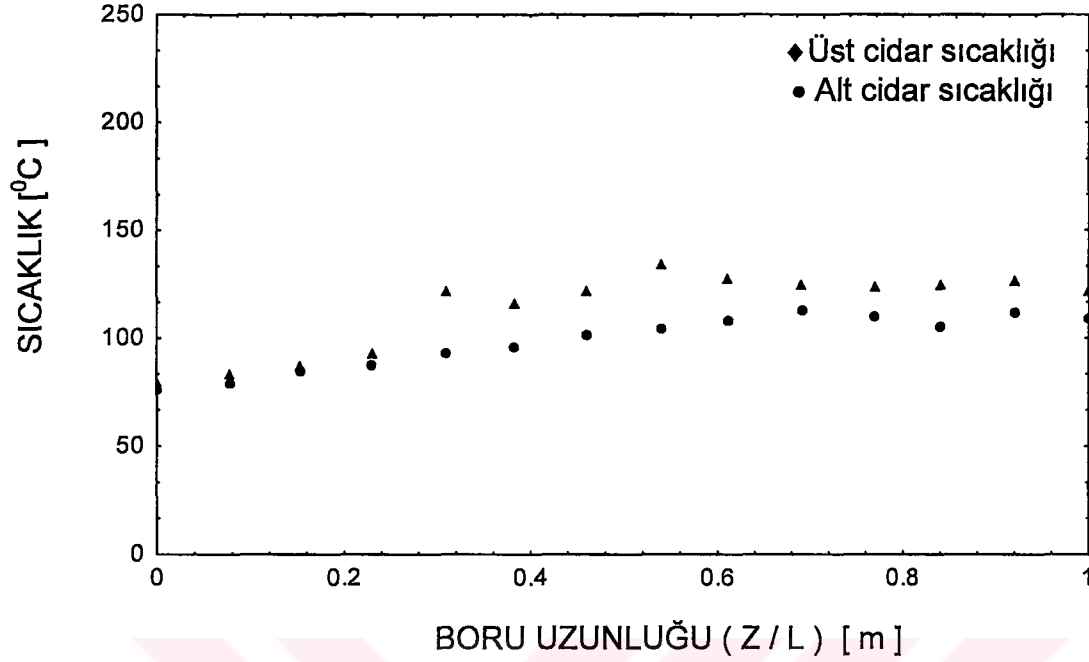
Şekil 7.25. Boru-3 için " Çekirdekli kaynama " sıcaklık profilleri. $T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=60\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.26. Boru-3 için " Merkezi katmanlaşma " sıcaklık profilleri. $T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=22.5\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.27. Boru-3 için " Lokal katmanlaşma " sıcaklık profilleri. $T_g=22^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=12.5\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.28. Boru-3 için “ Tam katmanlaşma ” sıcaklık profilleri. $T_g=19^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=22.5\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$

7.1.5. Boru-4 İçin Sıcaklık Profilleri

Deneysel çalışmanın bu bölümünde aynı test borusuna adımı $h_y=11\text{mm}$, tel çapı $D=1.8\text{mm}$ ve karesel bir geometriye sahip yay elemanı kullanılmıştır. Boru-4 için hesaplanan efektif çap değeri ise 12.56mm 'dir. Boru-4 için aynı deneysel yöntem takip edilerek elde edilen sıcaklık profilleri aşağıdaki Şekil 7.29, Şekil 7.30, Şekil 7.31, Şekil 7.32, Şekil 7.33, Şekil 7.34 ve Şekil 7.35 'de verilmiştir.

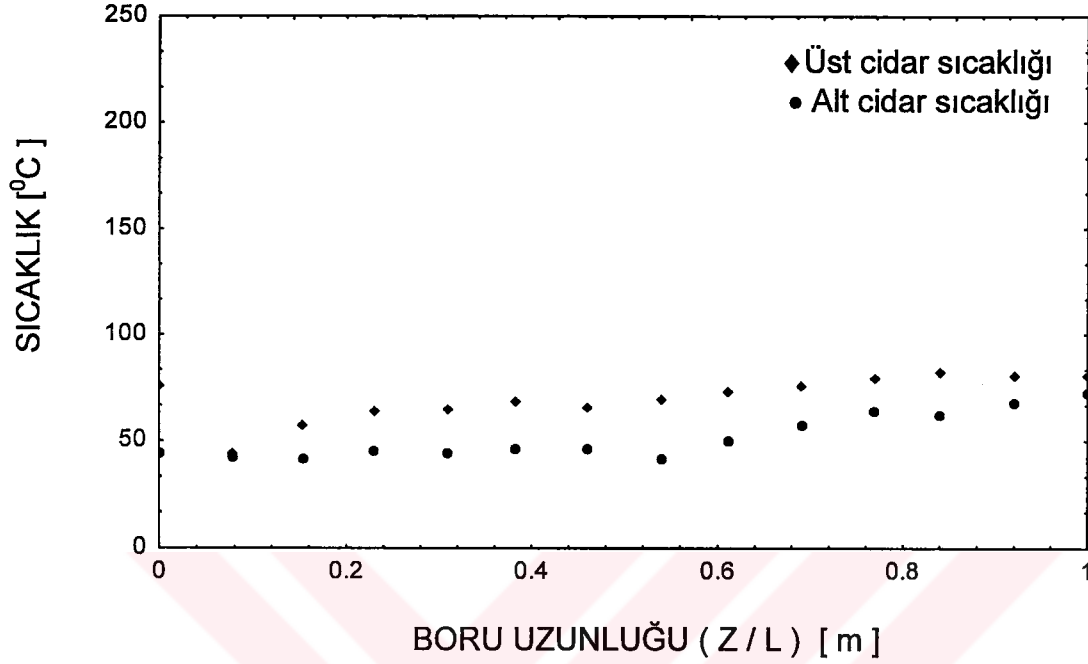
Alt ve üst cidar sıcaklıklarına dikkat edilirse; Boru-2 ve Boru-3 için aynı deneysel parametrelerde ve aynı akış rejimlerinde elde edilen sonuçlara göre sıcaklık limitlerinde biraz artış söz konusudur. Ancak boş boruya nazaran bu sıcaklık limitlerinde belirli bir düşüş sağlanmıştır. Bunu da Boru-4 'de akışa sağlanan türbülans düzeyinin Boru-2 ve Boru-3 'e nazaran daha az olduğunu söylenerek açıklanabilir.

Tek fazlı konveksiyon rejiminde alt ve üst cidar sıcaklıkları arasındaki maksimum sıcaklık farkı 28°C civarındadır. Aşırı soğutmanın etkisini kısmi kaynama rejiminde elde edilen Şekil 7.30 ve Şekil 7.31 mukayese edilerek anlaşılabilir. Aşırı soğutma oranı arttıkça alt ve üst cidar sıcaklık limitlerinde bir azalma söz konusu olmaktadır.

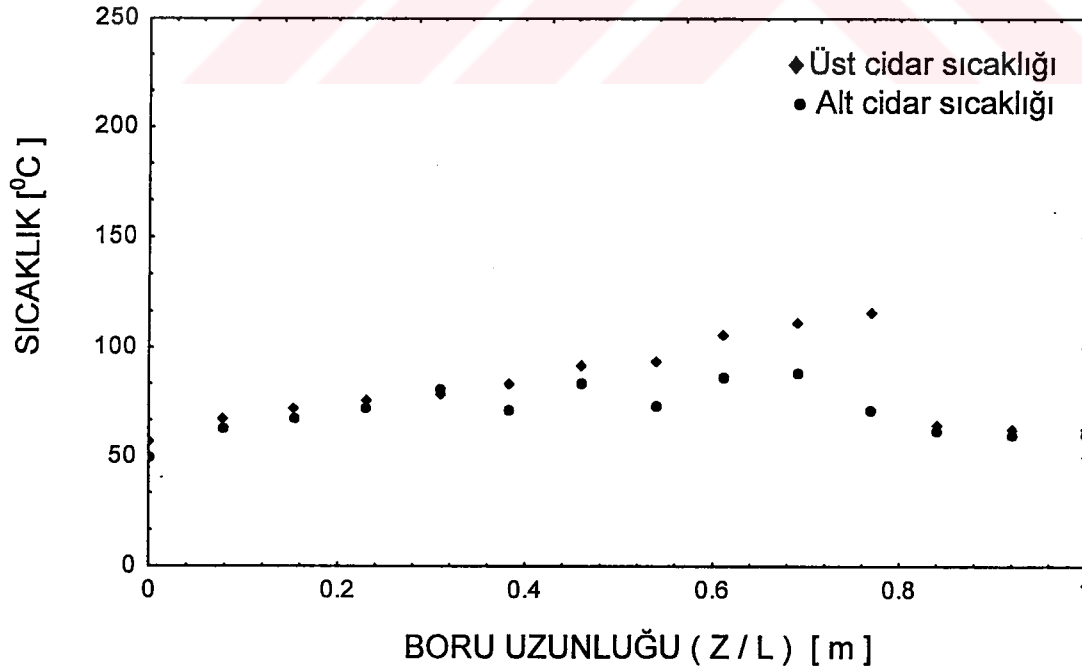
Daha yoğun olan sıvı fazındaki akışkanın boru alt cidarı boyunca akması ve kaldırma kuvvetlerinin etkisiyle üst cidarda biriken kabarcıkların daha düşük ısı transfer katsayısına sahip olmaları nedeniyle Boru-4 'te de yine üst cidar sıcaklıkları alt cidar sıcaklıklarından daha yüksek olmaktadır. Boru içerisine yerleştirilmiş bulunan elemanın akışa kazandırdığı türbülansın dolayı akışta boş boruya nazaran daha az bir katmanlaşma meydana gelmektedir.

Burn-out limitlerinde boş boruya göre bir azalma sağlanırken Boru-2 ve Boru-3 'e göre bir artış söz konusudur. Kütlesel debide ki azalmalarla beraber katmanlaşma boru boyunca genişlemekte ve alt ve üst cidar sıcaklıkları arasındaki fark boru boyunca artmaktadır. Lokal katmanlı akış için borunun sonuna doğru elde edilen ikinci burn-out olayını incelenirse yine Boru-2 ve Boru-3 'e nazaran biraz daha yüksek limitlerde meydana geldiği anlaşılmaktadır. Ancak boş boruya nazaran daha düşük limitlerde burn-out olayının meydana geldiği anlaşılmaktadır. Boru-4 içerisine yerleştirilmiş bulunan karesel geometriye sahip yay elemanının akışa sağlamış olduğu türbülansın dolayı belirli akış parametrelerinde sıvı ve buhar fazlarının ayrışması sonucu meydana gelen katmanlı akış rejimlerinde elde edilen sıcaklık profilleri dikkatle incelenirse bu boru elemanı içinde düzensiz bir faz ayrışması söz konusudur. Merkezi katmanlı akış rejiminde alt cidar sıcaklığı borunun ortalarına yakın yerlerde maksimum değere çıkarken lokal katmanlı akış rejiminde alt cidar sıcaklığı hemen hemen sabit kalmaktadır. Tam katmanlı akış rejiminde ise diğer test borularında elde ettiğimiz gibi gerek alt cidar sıcaklığında gerekse üst cidar sıcaklığında boru boyunca bir artış sağlanmaktadır. Test borusuna elektriksel enerjinin temin edildiği bağlantı yerlerine yakın yerlerde elde ettiğimiz sıcaklık

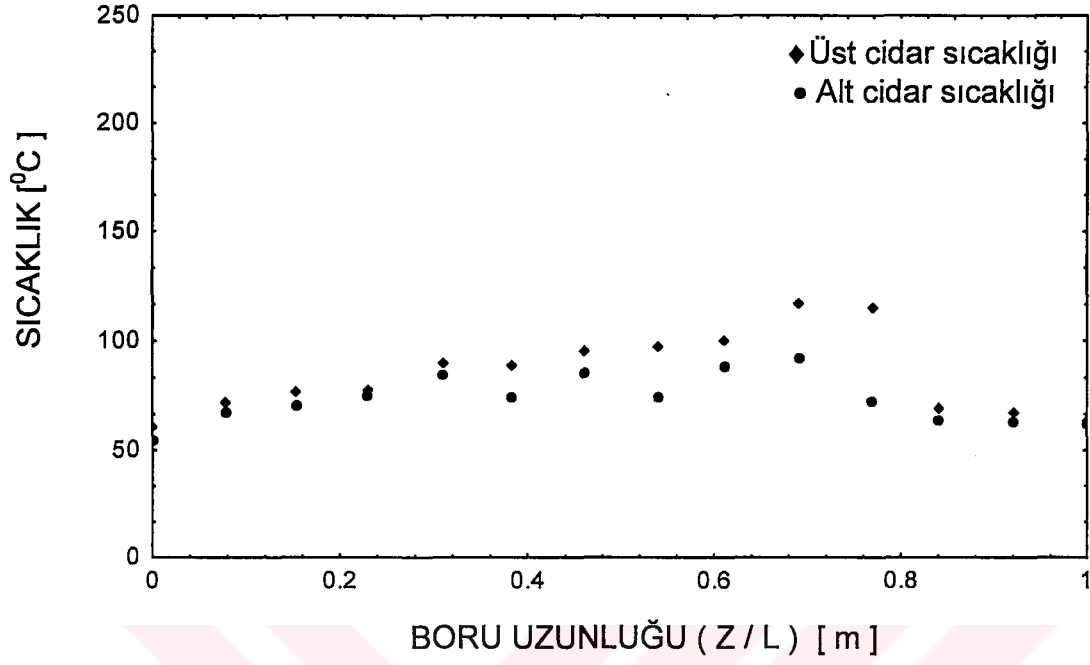
değerlerinde bu kutupların olumsuz etkileri nedeniyle diğer borularda olduğu gibi bir düzensizlik söz konusudur.



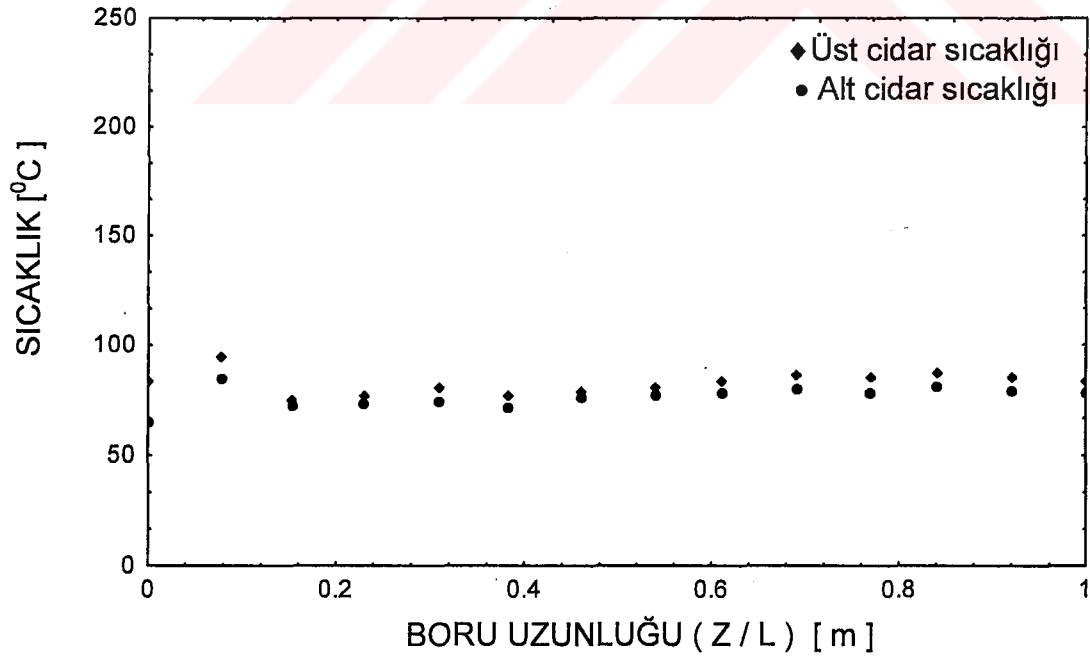
Şekil 7.29. Boru-4 için " Tek fazlı konveksiyon " sıcaklık profilleri. $T_g=16^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=45\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$



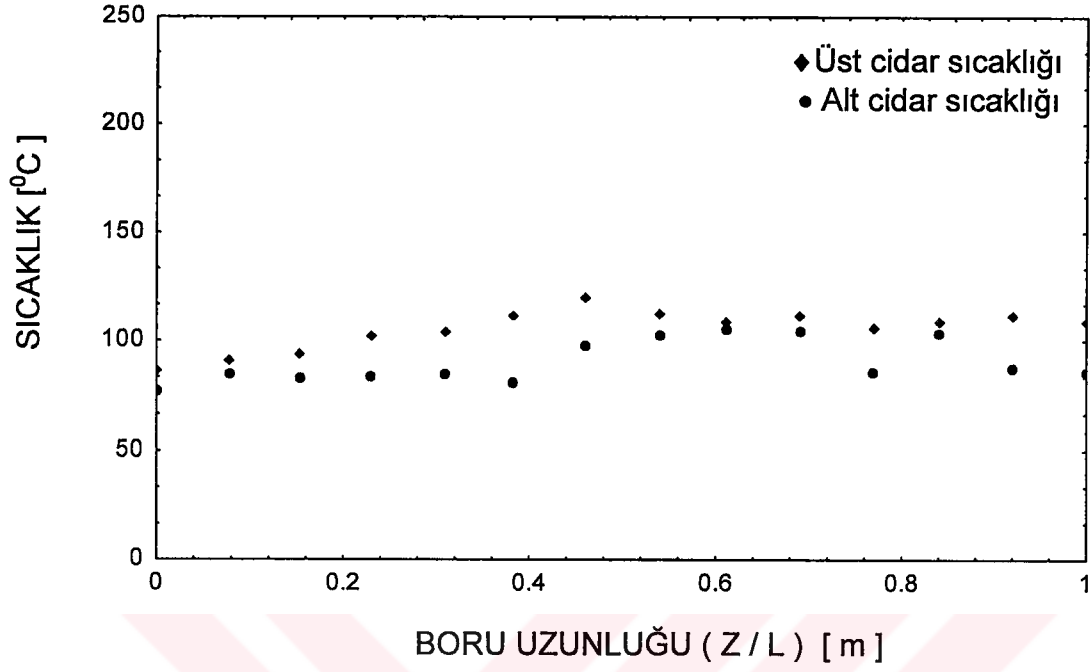
Şekil 7.30. Boru-4 için " Kısmi kaynama " sıcaklık profilleri. $T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=75\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$



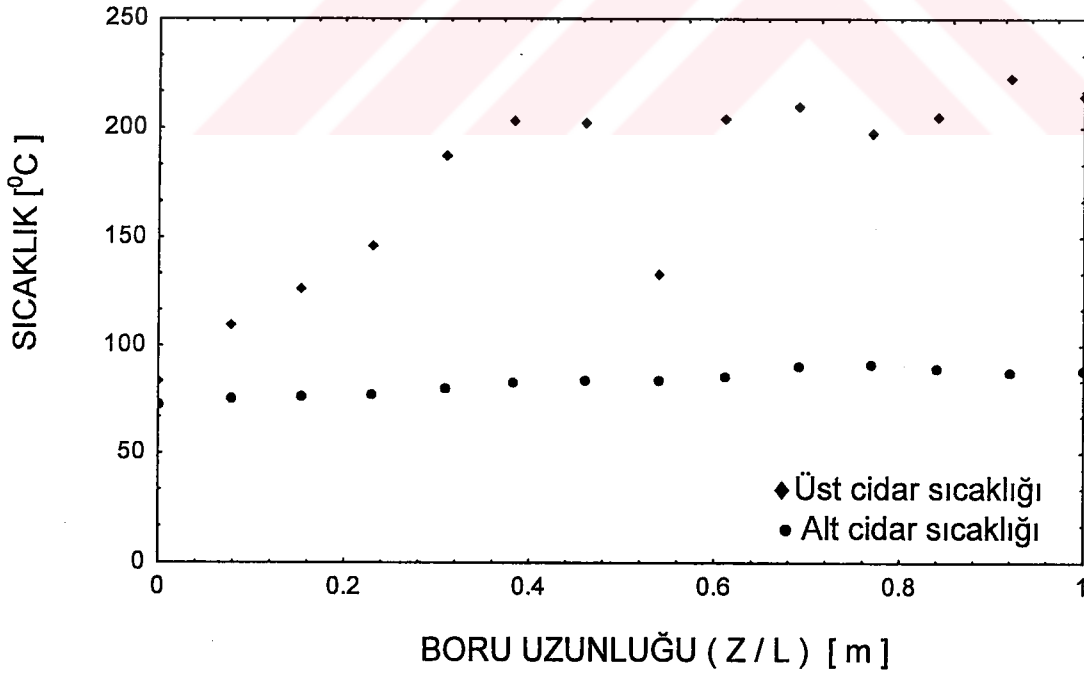
Şekil 7.31. Boru-4 için " Kısmi kaynama " sıcaklık profilleri. $T_g=24^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=75\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$



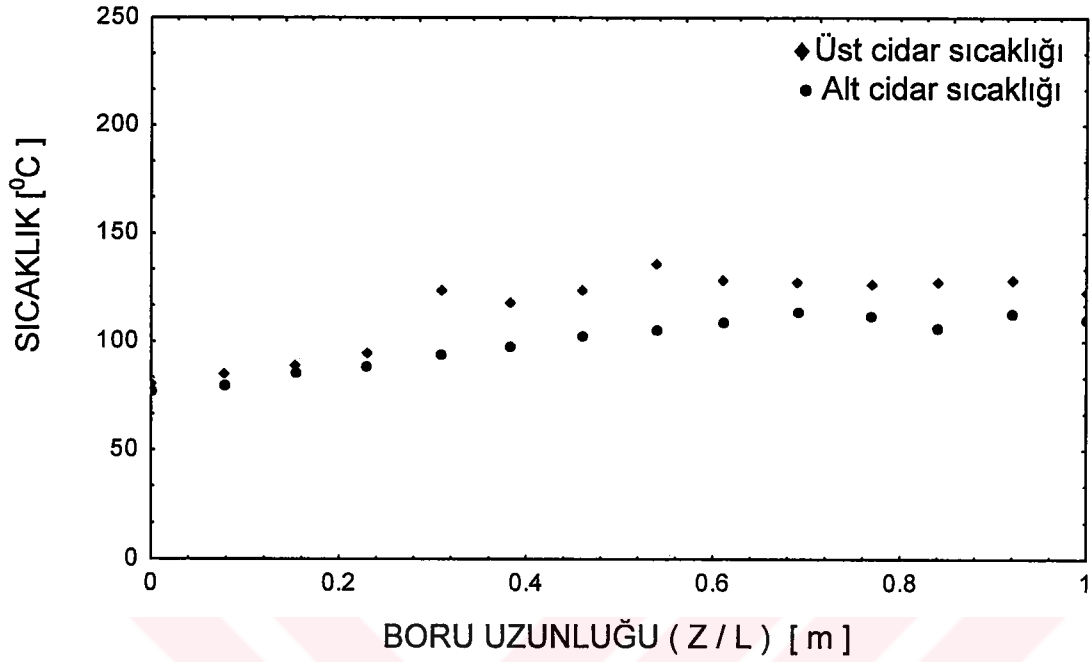
Şekil 7.32. Boru-4 için " Çekirdekli kaynama " sıcaklık profilleri. $T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=60\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.33. Boru-4 için " Merkezi katmanlaşma " sıcaklık profilleri. $T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=22.5\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.34. Boru-4 için " Lokal katmanlaşma " sıcaklık profilleri. $T_g=22^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=12.5\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.35. Boru-4 için “ Tam katmanlı akış ” sıcaklık profilleri. $T_g=19^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=22.5\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$

7.1.6. Boru-5 İçin Sıcaklık Profilleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan ve son test borusu olan Boru-5; aynı test borusu içerisinde üçgensel geometriye sahip, adımı $h_y=11\text{mm}$ ve tel çapı $D=1.8\text{mm}$ olan bir yay elemanı bulundurmaktadır. Bu boru elemanı için hesaplanan efektif çap 12.66mm 'dir.

Aşağıdaki Şekil 7.36, Şekil 7.37, Şekil 7.38, Şekil 7.39, Şekil 7.40, Şekil 7.41 ve Şekil 7.42 'de Boru-5 için deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sıcaklık profilleri gösterilmektedir. Şekillere dikkat edilirse üçgensel geometriye sahip yay elemanının akışa kazandırmış olduğu türbülans nedeniyle boş boruya nispeten alt ve üst cidar sıcaklıklarında belirli bir düşme söz konusu olmaktadır.

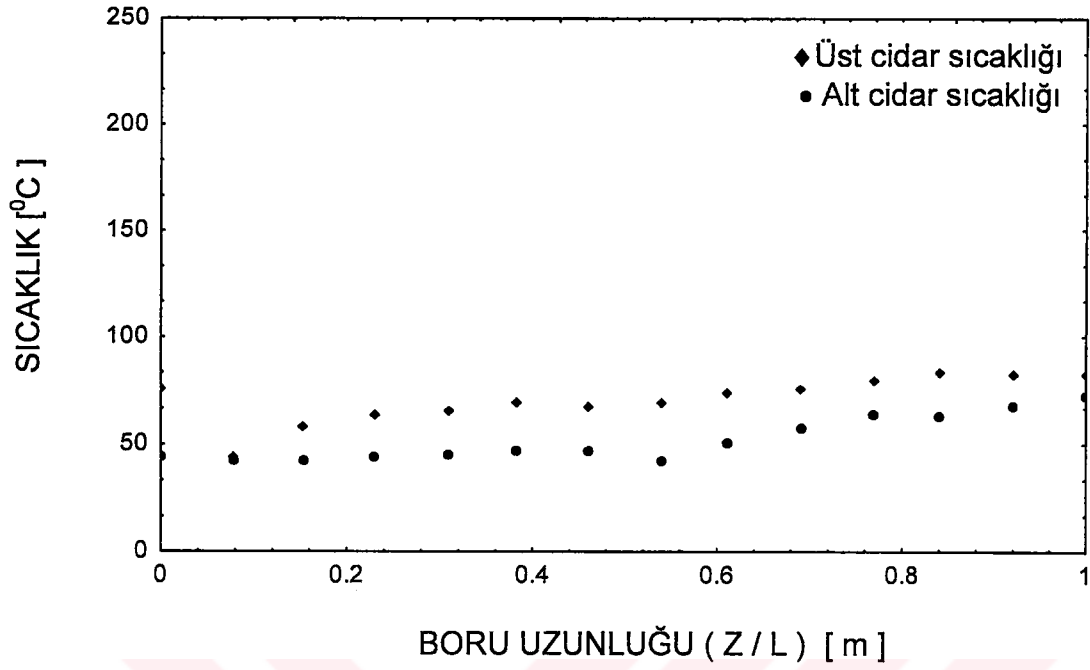
Boru-2, Boru-3 ve Boru-4 için elde edilen alt ve üst cidar sıcaklıklarına göre bu test borusu için elde edilen alt ve üst cidar sıcaklık değerleri azda olsa artmıştır. Bu test borusu için tek fazlı konveksiyonlu akış durumunda alt ve üst cidar sıcaklıkları boru uzunluğu ile beraber lineer olarak artmaktadır.

Boru-5 için elde edilen kısmi kaynama sıcaklık profillerine dikkat edilirse akışkan aşırı soğutma oranı arttıkça yani giriş sıcaklığı azaldıkça alt ve üst cidar sıcaklık limitlerinde bir azalma söz konusu olmaktadır. Borunun orta kısımlarına kadar alt ve üst cidar sıcaklıkları birbirine yakın değerlerde artmaktadır. Çünkü başlangıçta sıvı fazında aşırı soğutulmuş akışkan sahip olduğu yüksek ısı transfer katsayısı nedeniyle cidardan daha fazla enerji absorbe edecektir. Boru boyunca artmaya devam eden kabarcıklar kaldırma kuvvetlerinin etkisi ile üst cidarda toplanacaklardır.

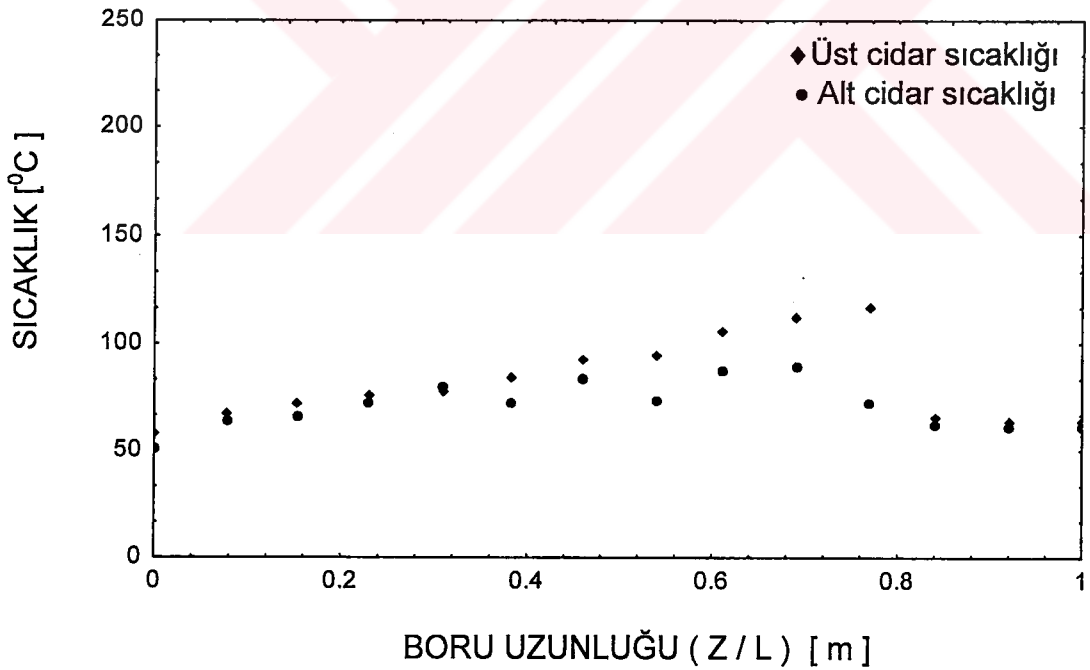
Boru içerisine yerleştirilmiş bulunan bu yay elemanının akışa kazandırmış olduğu türbülans nedeniyle sıvı ve buhar fazları karışık halde akmakta ve kabarcıklar daha soğuk olan akışkan ile kuşatılmaktadırlar. Buda üst cidardan yapılan ısı transferini arttırmaktadır. Ancak boru boyunca akış yönünde artan kabarcık sayısı nedeniyle ısı transfer katsayısında bir azalma söz konusu olmaktadır.

Çekirdekli kaynama rejiminde alt ve üst cidar sıcaklıkları boru uzunluğu ile hemen hemen sabit kalmaktadır. Başlangıçta her iki cidar sıcaklıklarında dikkat çeken azalma ise daha önce söylediğimiz gibi elektriksel bağlantı kutuplarına yakın yerlerde ölçülen sıcaklık değerlerinde termokupullar da artan gürültü seviyesinden kaynaklanmaktadır. Yine Boru-5 için katmanlı akış rejimlerindeki sıcaklık profillerine dikkat edersek boş boruya nazaran daha az bir katmanlaşmanın sağlandığı söylenebilir.

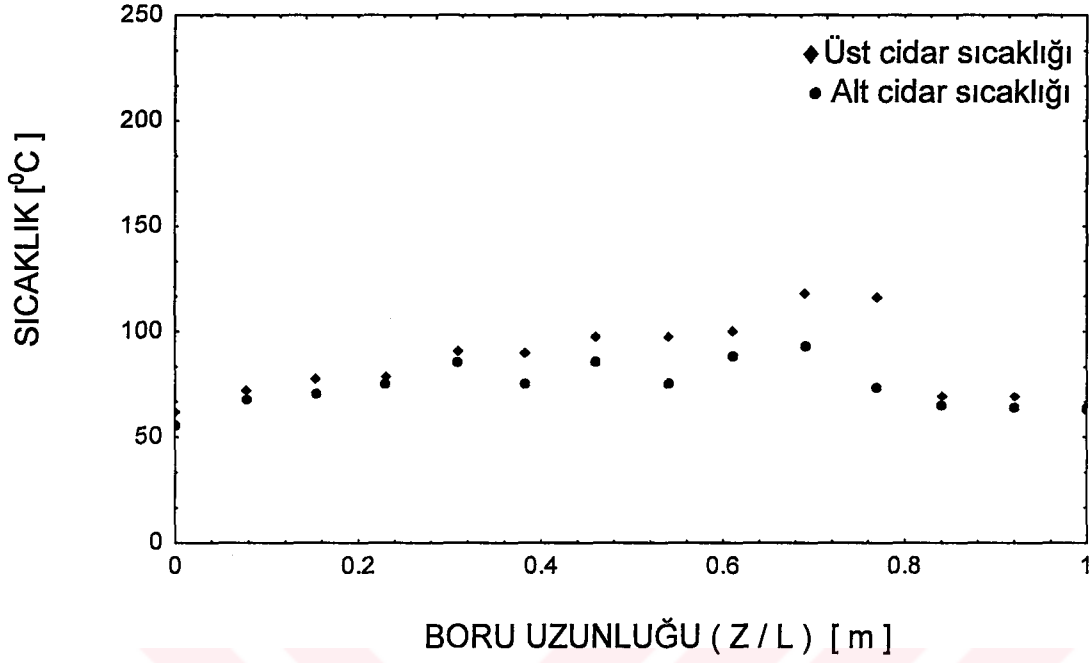
Boru-2, Boru-3 ve Boru-4 ile mukayese edilirse burn-out limitlerinde çok az bir artış söz konusu olmaktadır. Ancak boş boruya nispeten bir azalma sağlanmıştır. Alt cidar boyunca daha yoğun olan sıvı fazının akması ve üst cidar



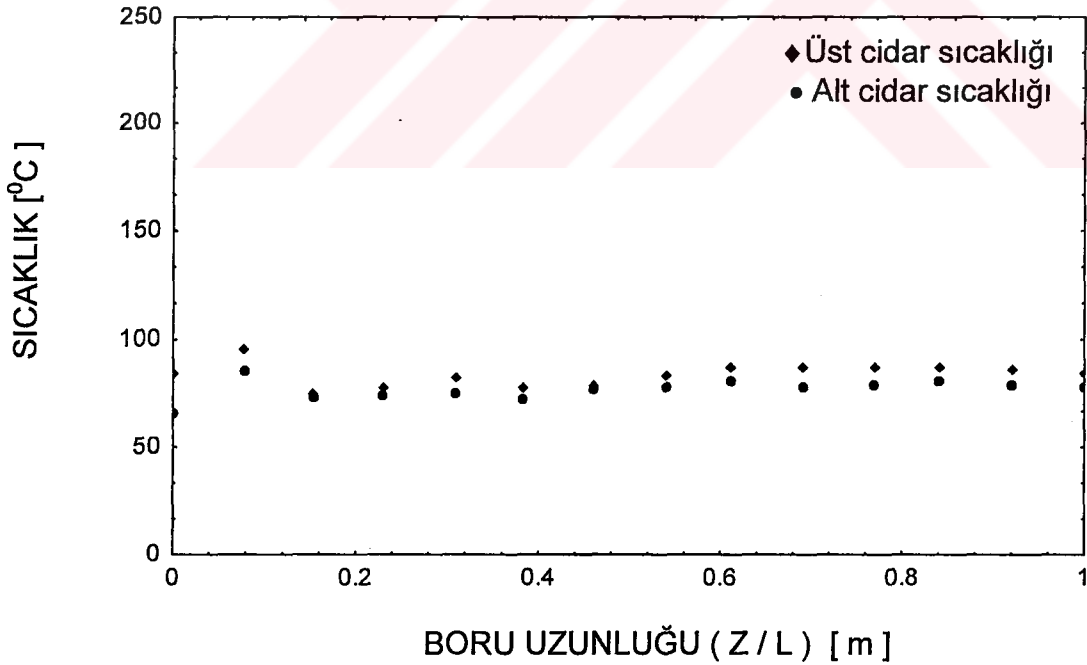
Şekil 7.36. Boru-5 için " Tek fazlı konveksiyon " sıcaklık profilleri. $T_g=16^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=45\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$



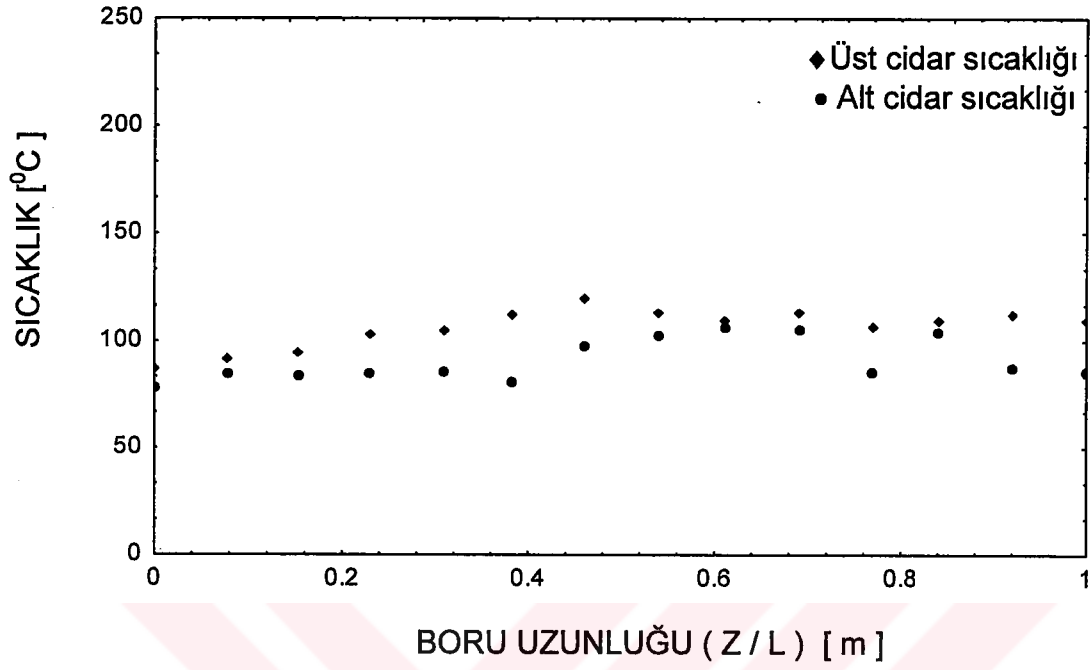
Şekil 7.37. Boru-5 için " Kısmi kaynama " sıcaklık profilleri. $T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=75\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$



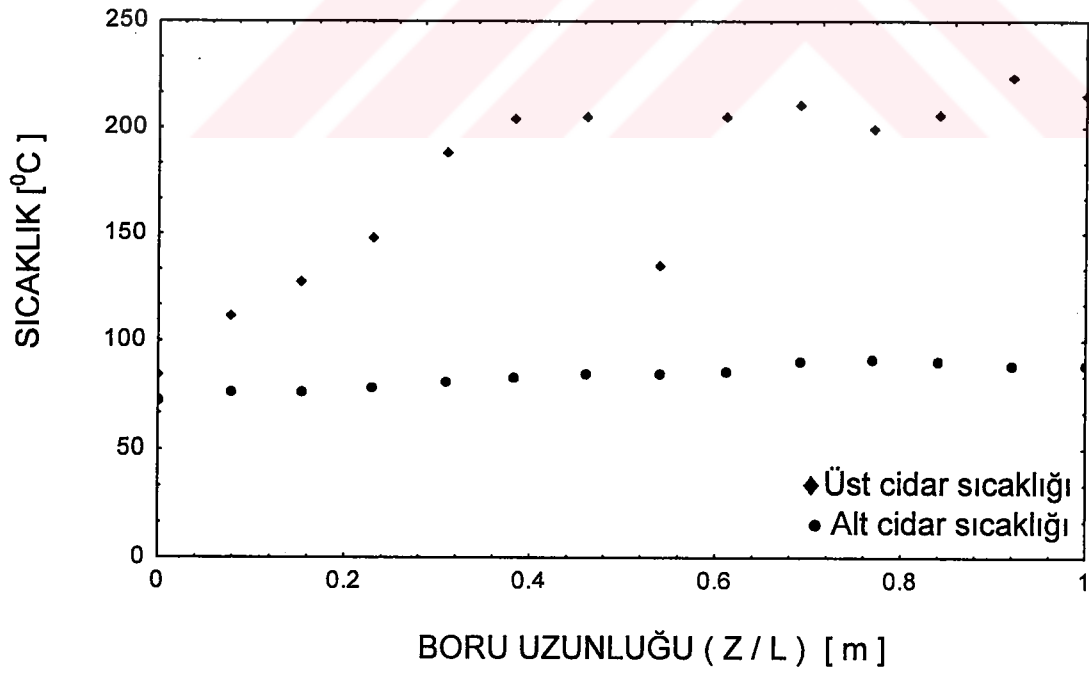
Şekil 7.38. Boru-5 için " Kısmi kaynama " sıcaklık profilleri. $T_g=24^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=75\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$



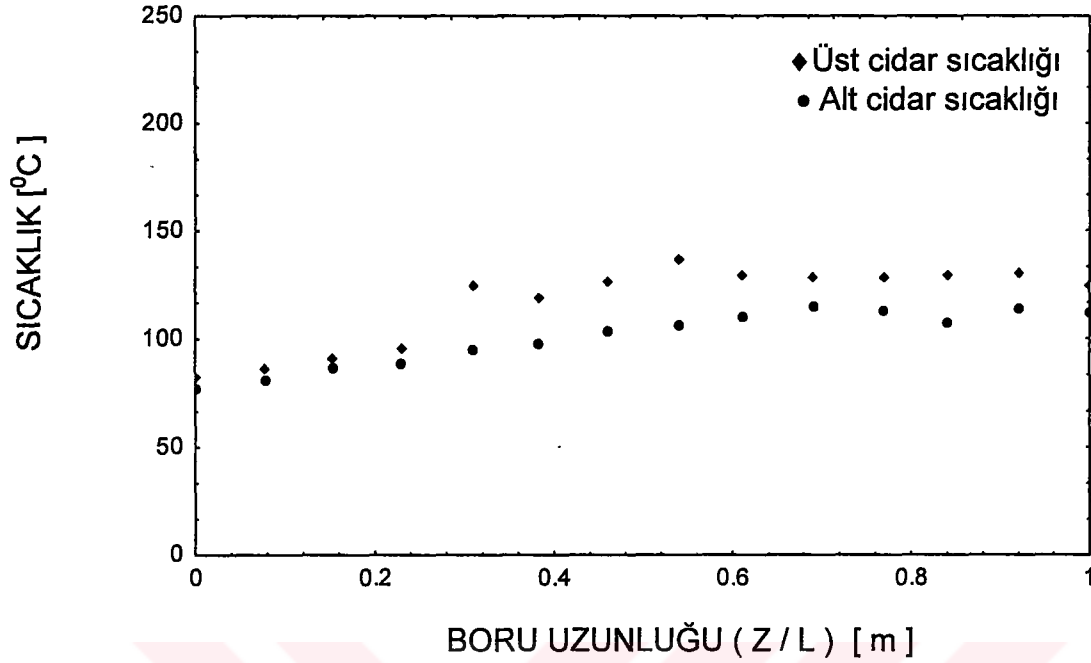
Şekil 7.39. Boru-5 için " Çekirdekli kaynama " sıcaklık profilleri. $T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=60\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.40. Boru-5 için " Merkezi katmanlaşma " sıcaklık profilleri. $T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=22.5\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.41. Boru-5 için " Lokal katmanlaşma " sıcaklık profilleri. $T_g=22^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=12.5\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.42. Boru-5 için “ Tam katmanlı akış ” sıcaklık profilleri. $T_g=19^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=22.5\text{g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$, $\beta=0.448$

boyunca daha az yoğun olan akışkan tabakasının akması neticesinde daima üst cidar sıcaklık değerleri alt cidar dan yüksek olmaktadır.

Lokal katmanlı akış durumunda alt cidar sıcaklığı boru boyunca sabit bir düzeyde seyrederken üst cidarda hem borunun orta kısımlarına doğru hem de sonuna doğru iki kez burn-out olayı meydana gelmektedir.

Azalan akışkan kütlesiyle fazlarda bir ayrışma başlamakta ve bunun sonucunda üst cidarda ani sıcaklık yükselmeleri ile ortaya çıkan burn-out olayı boru donanımları için tehlikeler arz etmektedir.

Burada Boru-5 için elde edilen burn-out limitlerinde boş boruya nazaran azda olsa bir azalmanın sağlanması bu bakımdan önemli olmaktadır.

7.1.7. Farklı Test Boruları İçin Elde Edilen Sıcaklık Profillerinin Karşılaştırılması

Deneysel çalışmalar boyunca kullanılan farklı ısı transfer iç yüzey konfigürasyonuna sahip beş adet test borusu için elde edilen alt ve üst cidar sıcaklık profillerinden hareket ederek bir önceki bölümde de söylendiği gibi katmanlaşma seviyelerinin farklı oranlarda ortaya çıktığı bilinmektedir. Boş boruda yüksek debilerde bile elde edilen katmanlaşma seviyesi, içerisinde farklı ısı transfer iç yüzey konfigürasyonlarına sahip diğer dört borularda meydana gelen katmanlaşmaya göre daha fazladır. Bu sonuç özellikle daha sonraki bölümlerde incelenecek basınç düşümü tipi osilasyonların periyot ve genliklerinin irdelenmesinde oldukça faydalı olacaktır.

Yüksek kütleli debilerde ısı transfer yüzey artırım elemanları akışta türbülans seviyesinin artmasına neden olmaktadır. Akışkan giriş sıcaklığındaki artışla bir başka ifade ile aşırı soğutma seviyesinin azalmasıyla beraber katmanlaşma daha yüksek kütleli debilerde başlamaktadır. Sıvı ve buhar fazlarındaki ayrışma ile ortaya çıkan katmanlı akış, içerisinde ısı transfer iç yüzey artırım elemanı bulunduran borularda daha az seviyelerde ortaya çıkması ile beraber bu elemanların akışa kazandırdıkları türbülans nedeniyle sıvı ve buhar fazları karışık halde akmakta ve bunun sonucunda faz ayrışması daha az olmaktadır.

Boru-2, Boru-3, Boru-4 ve Boru-5 için elde edilen sıcaklık limitlerinde boş boruya nispeten bir azalma söz konusudur. Aynı zamanda bu borularda elde edilen alt ve üst cidar sıcaklıkları arasındaki maksimum fark boş boruya göre azalmaktadır. Tablo 7.1, Tablo 7.2, Tablo 7.3, Tablo 7.4 ve Tablo 7.5 'te her bir test borusu için belirli kütle debilerinde elde edilen alt ve üst cidar sıcaklıkları ile beraber bu iki sıcaklık değerleri arasındaki farklar verilmiştir.

Tablo 7.1. $T_g=22\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=12.5\text{ g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{ kW}$ ve $\beta=0.48$ için cidar sıcaklıkları

Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Boru-1	Boru-2	Boru-3	Boru-4	Boru-5
Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	228	188	221	223	224
Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	87	82	86	87	88
Sıcaklık Farkı ($^{\circ}\text{C}$)	141	106	135	136	136

Tablo 7.2. $T_g=19\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=17.5\text{ g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{ kW}$ ve $\beta=0.48$ için cidar sıcaklıkları

Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Boru-1	Boru-2	Boru-3	Boru-4	Boru-5
Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	132	116	126	128	130
Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	115	106	111	112	113
Sıcaklık Farkı ($^{\circ}\text{C}$)	17	10	15	16	17

Tablo 7.3. $T_g=28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=22.5\text{ g/s}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{ kW}$ ve $\beta=0.48$ için cidar sıcaklıkları

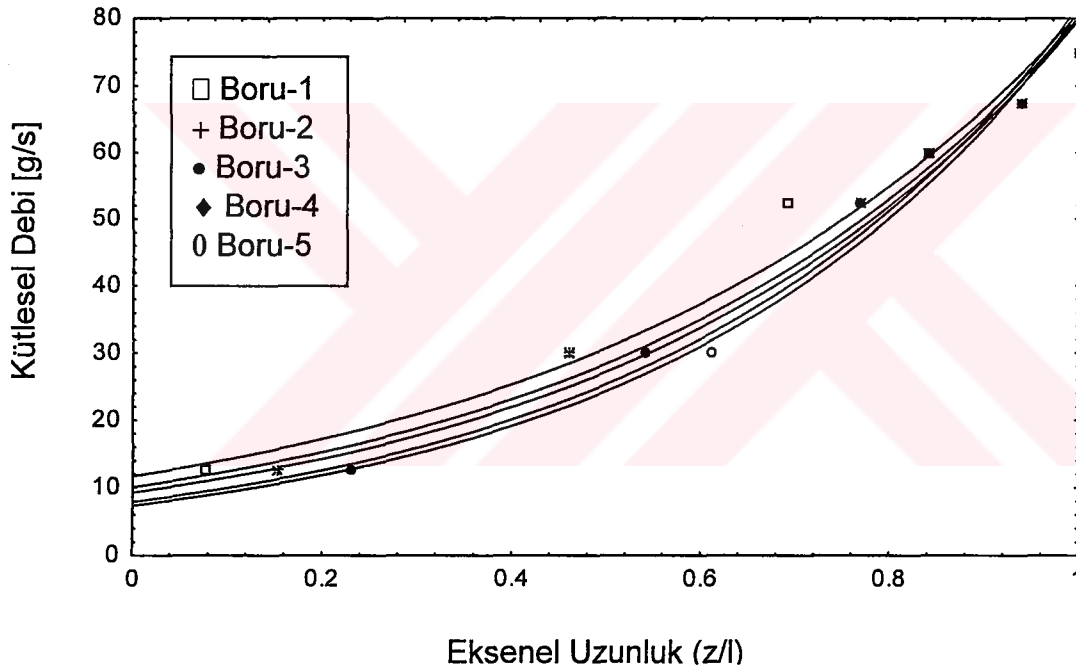
Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Boru-1	Boru-2	Boru-3	Boru-4	Boru-5
Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	114	97	109	111	112
Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	88	80	86	87	87
Sıcaklık Farkı ($^{\circ}\text{C}$)	26	17	23	24	25

Tablo 7.4. $T_g=28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=60\text{ g/s}$, $P_{sis}=7.5\text{ Bar}$, $Q=16\text{ kW}$ ve $\beta=0.48$ için cidar sıcaklıkları

Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Boru-1	Boru-2	Boru-3	Boru-4	Boru-5
Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	86	77	84	85	86
Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	79	74	78	79	79
Sıcaklık Farkı ($^{\circ}\text{C}$)	7	3	6	6	7

Yukarıdaki tablolardan da anlaşıldığı gibi içerisinde ısı transfer yüzey artırımı elemanı bulunan Boru-2, Boru-3, Boru-4 ve Boru-5 için elde edilen cidar sıcaklıkları boş boru için elde edilen değerlerle mukayese edilirse, bu borularda türbülans seviyesinin yüksek oluşu nedeniyle daha az katmanlaşma olayı söz konusu olmakta ve alt ve üst cidar sıcaklıkları arasındaki fark azalmaktadır. Burn-out olayına tekabül eden sıcaklık limitleri azalmakta ve boru donanımlarına bu olayın muhtemelen verebileceği zararlarda azda olsa azaltılmış olacaktır. Yukarıdaki dört adet tablo iyi bir şekilde incelenirse en düşük sıcaklık limitleri Boru-2 için elde edildiği anlaşılmaktadır. Boru-2 de sağlanan türbülans seviyesi diğer borulara göre daha yüksek olduğundan katmanlaşma seviyesi de nispeten az olmaktadır. Her üç boru için düşük kütleli debilerde üst cidar sıcaklıklarında elde edilen yüksek sıcaklık değerleri burn-out olayının meydana geldiğini göstermektedir. Ancak burn-out limitleri incelenirse boş boruda en yüksek seviyede olduğu dikkat çekmektedir. Aynı geometriye sahip yay elemanı bulunduran Boru-2 ve Boru-3 mukayese edilirse, yay adımı büyüdükçe akışa kazandırılan türbülans seviyesi düşmekte bunun sonucunda akışta daha katmanlaşma meydana gelmektedir. Aynı aşırı soğutma seviyesinde fakat farklı kütleli debilerde elde edilen sıcaklık limitleri karşılaştırılırsa artan kütleli debi ile beraber sıcaklık limitleri, alt ve üst cidar sıcaklıkları arasındaki farkın da azaldığı tespit edilmektedir.

Şekil 7.43 'de her bir test borusu için boru boyunca kütleli debilere bağlı olarak meydana gelen kaynama olaylarının sınırları grafiksel olarak verilmiştir. Her bir test borusu için kütleli debiye karşılık tek fazlı bölge ile iki fazlı bölge arasında ayırt edilebilecek tek bir kaynama sınırı vardır. Bu kaynama sınırı boş boruda yüzey artırımı borulara nispeten daha geç başlamaktadır. En erken kaynama Boru-1 'de başlamaktadır. Yüzey artırımı borularda akışın sahip olduğu türbülans nedeniyle sıvı ve buhar fazları karışık halde akmakta ve bunun sonucunda akışkanın cidardan yaptığı transfer oranı boş boruya nazaran artmaktadır.



Şekil 7.43. Isıtıcı test borularında kaynama sınırlarının tespiti ve karşılaştırılması. $T_g=16^{\circ}\text{C}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$ ve $\beta=0.48$

7.1.8. Literatürde Elde Edilen Sıcaklık Profilleri İle Bu Çalışmada Elde Edilen Sıcaklık Profillerinin Karşılaştırılması

S.Kakaç ve diğerleri [12], Ding [45] tarafından yapılan çalışmalarda kullanılan test borularının uzunluğu genellikle 1m civarında, test borusu iç çapları da 10mm ve daha küçük değerlere sahiptir. Bu çalışmada ise test borusunun

uzunluğu 3.195m ve iç çapı 13mm dir. İlgili literatürde boş boru için aynı deneysel şartlarda elde edilmiş sıcaklık profilleri ile bu çalışmada elde edilen sonuçlarla karşılaştırılırsa; tek fazlı konveksiyonlu kaynama rejiminde bu çalışmada elde edilen alt ve üst cidar sıcaklık limitleri daha düşük değerlere sahiptir. Aynı şekilde alt ve üst cidar sıcaklık limitleri arasındaki farkta azalmıştır.

Tablo 7.5. Bu Çalışmada Elde Edilen Sıcaklık Değerleri

Boş Boru	Akış Reji-mi	Debi [g/s]	Giriş Sıcaklığı [°C]	Minimum Sıcaklık [°C]		Fark [°C]	Maksimum Sıcaklık [°C]		Fark [°C]
				Alt [°C]	Üst [°C]		Alt [°C]	Üst [°C]	
d _i =13mm L=3.195 Mm	Tek Faz. Kon.	45	16	43	47	4	66	73	7
	Kıs. Kay.	75	24	56	63	7	68	116	48
	Çek. Kay.	36	24	63	77	14	86	114	28
	Mer. Kat.	22.5	16	74	89	15	91	135	44
	Lok. Kat.	12.5	16	62	87	25	90	238	148
	Tam Kat.	12.5	24	64	72	8	108	144	36

Kısmi kaynama ve çekirdekli kaynama rejimlerinde ise bu çalışmada elde edilen alt ve üst cidar sıcaklıkları arasındaki farkın arttığı gözlenmiştir. Katmanlı akış

rejimlerinde elde edilen sıcaklık profilleri de karşılaştırılırsa bu çalışmada yine daha yüksek alt ve üst cidar sıcaklık farkının elde edildiği anlaşılabacaktır. Tablo 7.5 ve Tablo 7.6 'dan da görüldüğü gibi yüksek kütleli debilerde meydana gelen akış rejimlerinin boru çapı ve boru boyundan çok fazla etkilenmediği söylenilebilir. Buna karşılık azalan kütleli debi değerlerinde akış rejimlerinin meydana gelmesinde önemli derecede rol oynayan kabarcık formasyonu ve fazlar arası yüzeyin gösterdiği dalgalanmaların boru çapı ile boru uzunluğundan etkilendiği tespit edilmiştir.

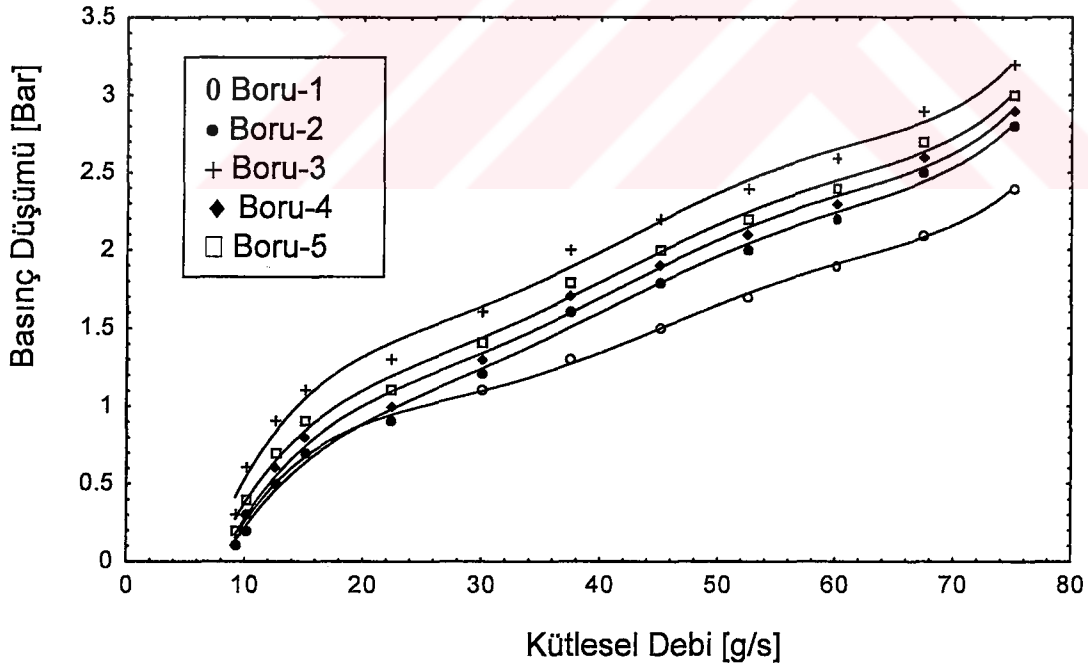
Tablo 7.6. [12] ve [45] Çalışmalarda Elde Edilen Sıcaklık Değerleri

Boş Boru	Akış Reji- mi	Debi [g/s]	Giriş Sıcaklığı [°C]	Minimum Sıcaklık [°C]		Fark [°C]	Maksimum Sıcaklık [°C]		Fark [°C]
				Alt [°C]	Üst [°C]		Alt [°C]	Üst [°C]	
d _i =10.9 mm L=1.060 mm	Tek Faz. Kon.	45	16	55	60	5	69	77	8
	Kıs. Kay.	75	24	65	71	6	74	83	9
	Çek. Kay.	36	24	70	78	8	76	86	10
	Mer. Kat.	22.5	16	72	81	9	79	120	41
	Lok. Kat.	12.5	16	77	95	22	91	222	131
	Tam Kat.	12.5	24	71	78	7	86	118	32

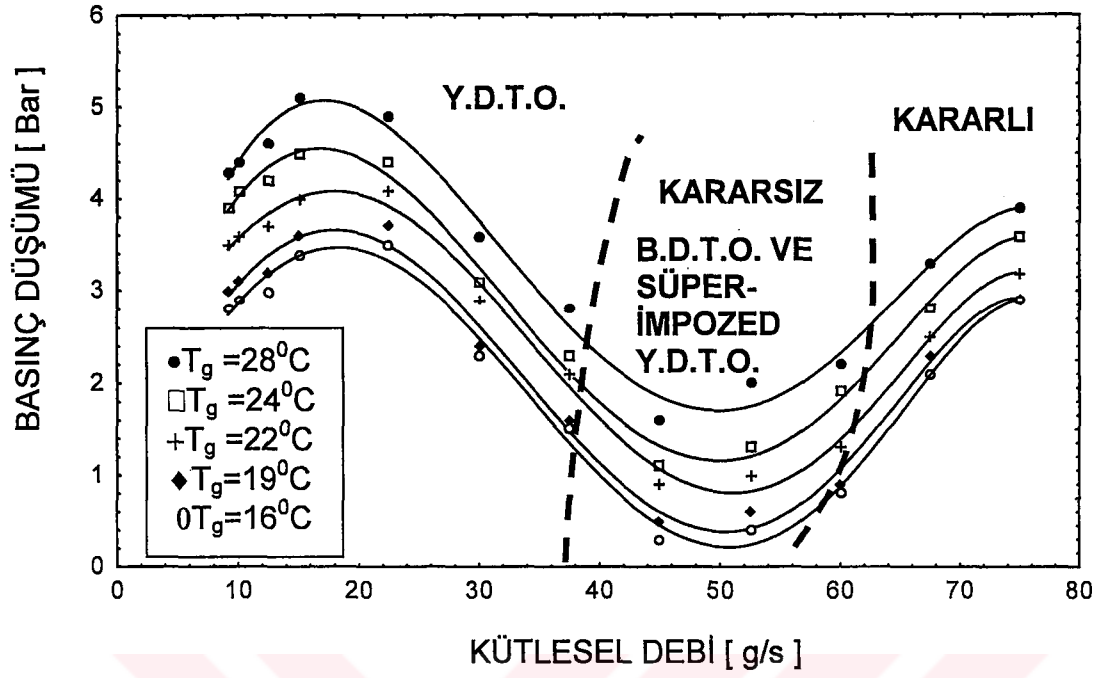
7.2. Zorlanmış Konveksiyonlu Kaynamalı Yatay Sistemde Meydana Gelen İki Fazlı Akış Kararsızlıklarının İncelenmesi

7.2.1. Kararlı Durum Karakteristiklikleri

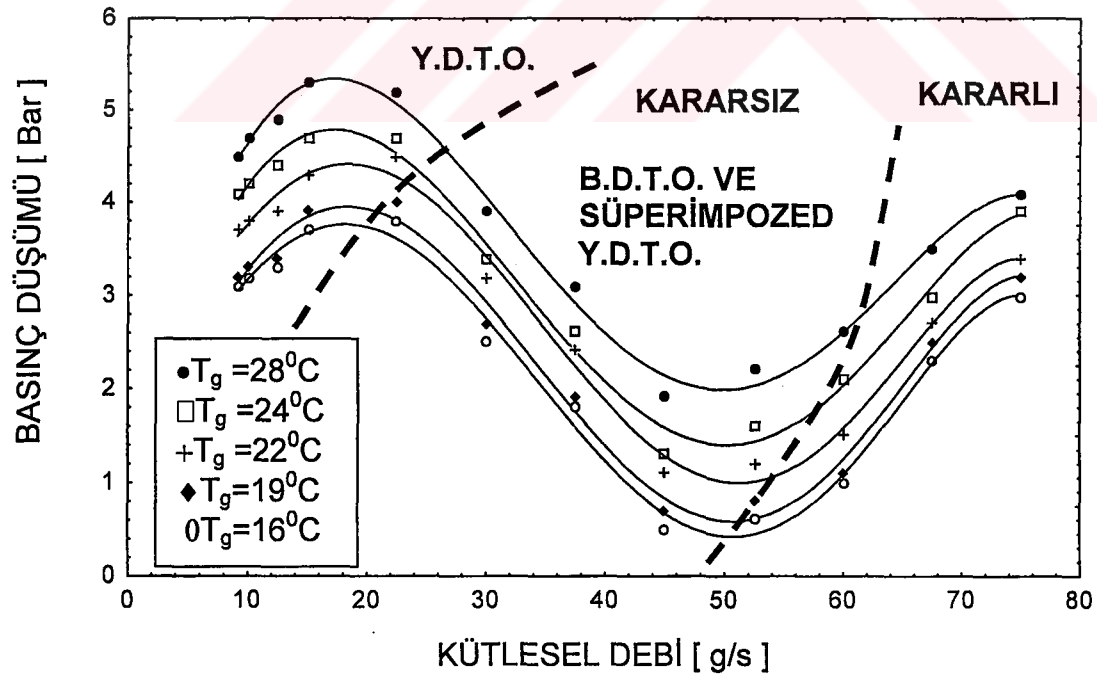
DeneySEL çalışmanın yapıldığı sistemin kararlı durum karakteristikliklerini ortaya çıkarmak amacıyla her bir test borusunda kütleSEL debiye karşılık meydana gelen basınç düşümlerini gösteren grafikler çizilmiştir. Basınç düşümü test borusu çıkış basıncı ile dengeleyici tank basıncı arasındaki farkla hesaplanmıştır. KütleSEL debi değerleri rotametre den okunarak ayarlanmıştır. Şekil 7.44 'te beş farklı test borusu için tek fazlı konveksiyonlu akış durumunda kütleSEL debiye karşılık basınç düşümü grafiği çizilerek incelenmiştir. Şekil 7.44 'e dikkat edilirse yüzey artırımı borularda boş boruya göre ilave basınç düşümünün meydana geldiği görülmüştür.



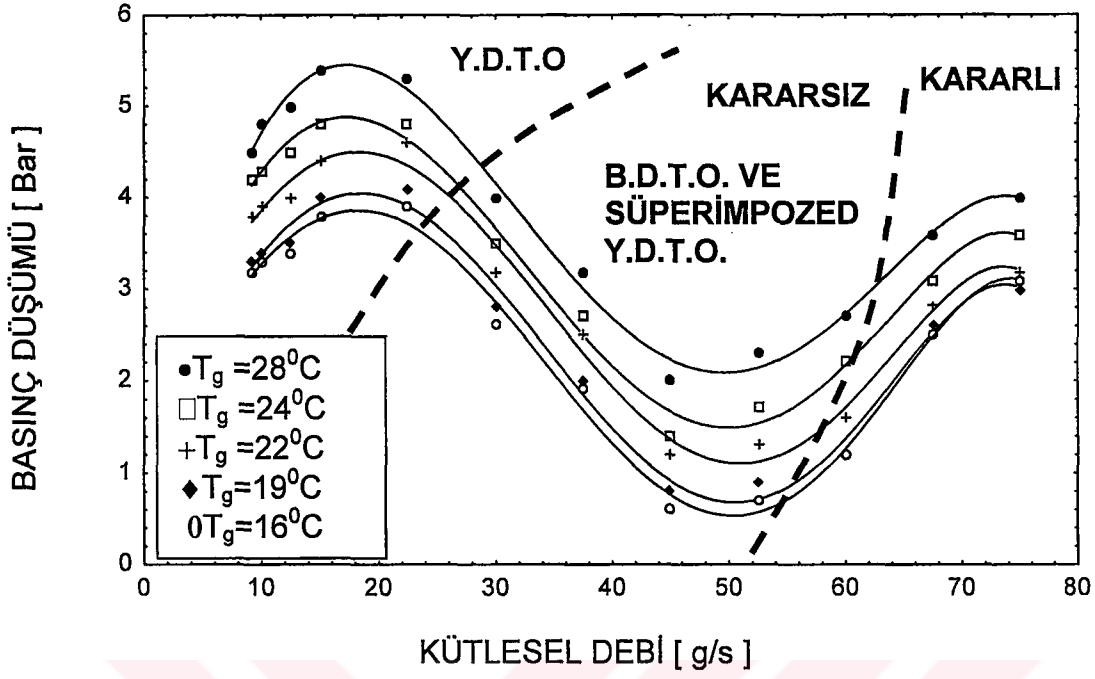
Şekil 7.44. Tek fazlı konveksiyonlu akış rejiminde beş farklı test borusu için kararlı durum karakteristiklikleri. $T_g=16^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{sis}}=7.5 \text{ Bar}$, $Q=16\text{kW}$ ve $\beta=0.448$



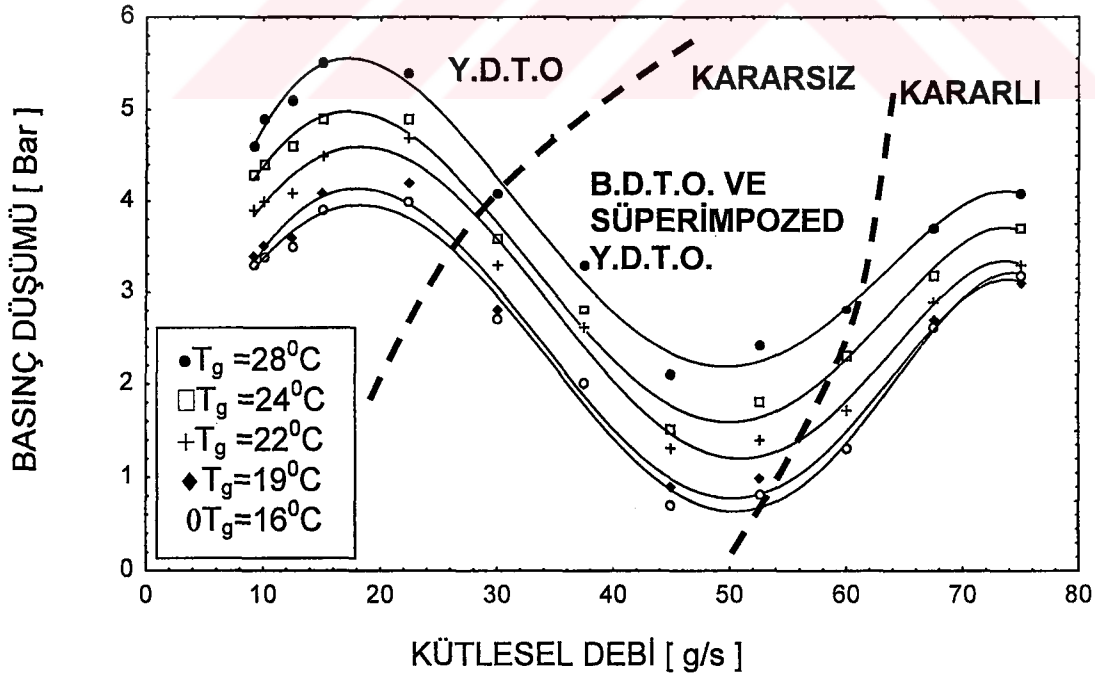
Şekil 7.45. Boru-1 için kararlı durum karakteristiklikleri.



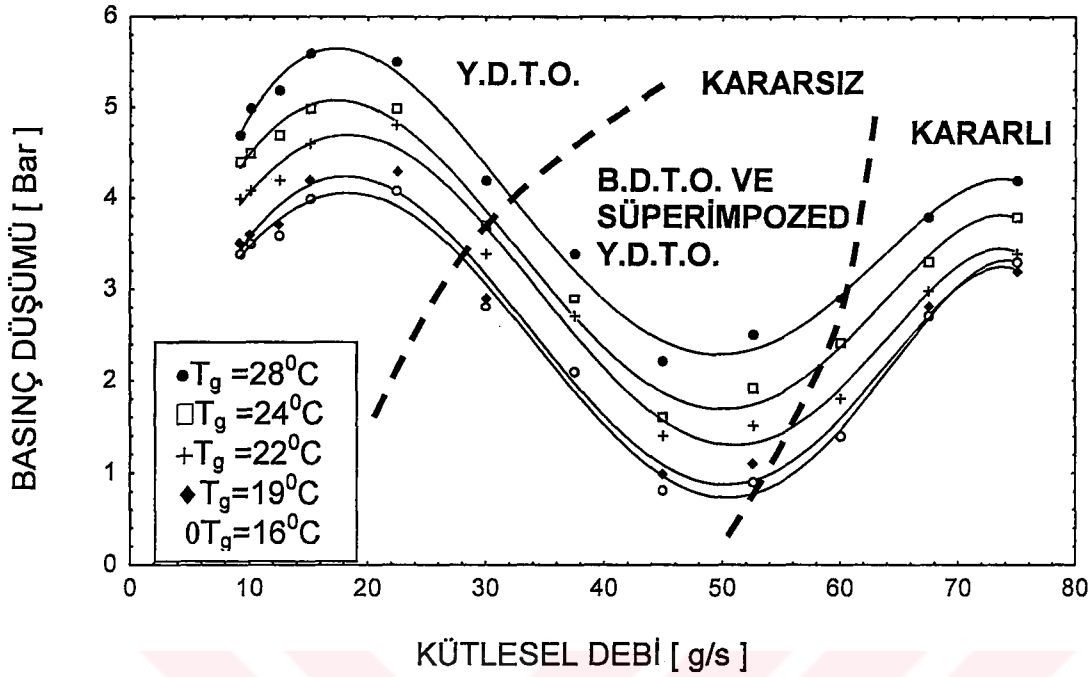
Şekil 7.46. Boru-2 için kararlı durum karakteristiklikleri.



Şekil 7.47. Boru-3 için kararlı durum karakteristiklikleri.



Şekil 7.48. Boru-4 için kararlı durum karakteristiklikleri.



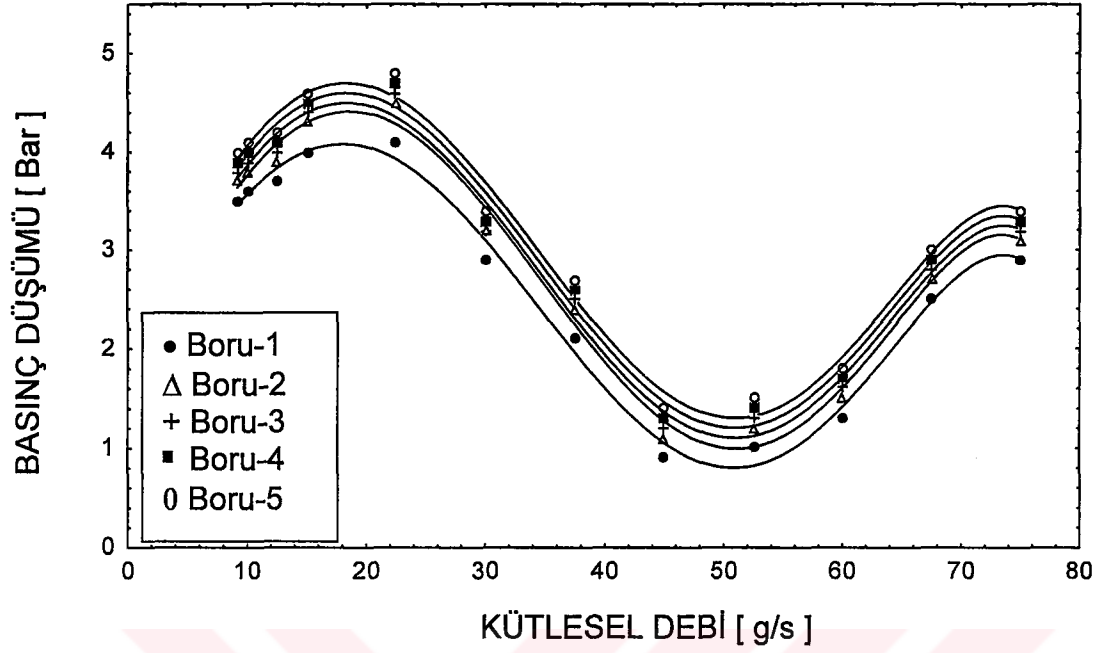
Şekil 7.49. Boru-5 için kararlı durum karakteristiklikleri

İki fazlı akışlarda herhangi bir sistemin kararlı durum karakteristikliklerini ortaya çıkarmak amacıyla aşırı soğutma seviyesine bağlı olarak çizilen basınç düşümü-kütlesel debi grafiklerinden faydaniılmaktadır. Literatürde yaygın bir şekilde kullanılan bu eğrileri bu sistemde kullanılan beş farklı test borusu ve beş farklı giriş sıcaklığı için hazırlanmıştır. Şekil 7.45, Şekil 7.46, Şekil 7.47, Şekil 7.48 ve Şekil 7.49 'da gösterilen bu grafiklere dikkat edilirse her birinin yatık bir " S " şeklinde ortaya çıktıkları görülmektedir. Bu kararlı durum eğrilerinin yüksek kütlesel debi değerlerine karşılık gelen sağ tarafları tek fazlı sıvı bölgesini göstermektedirler.

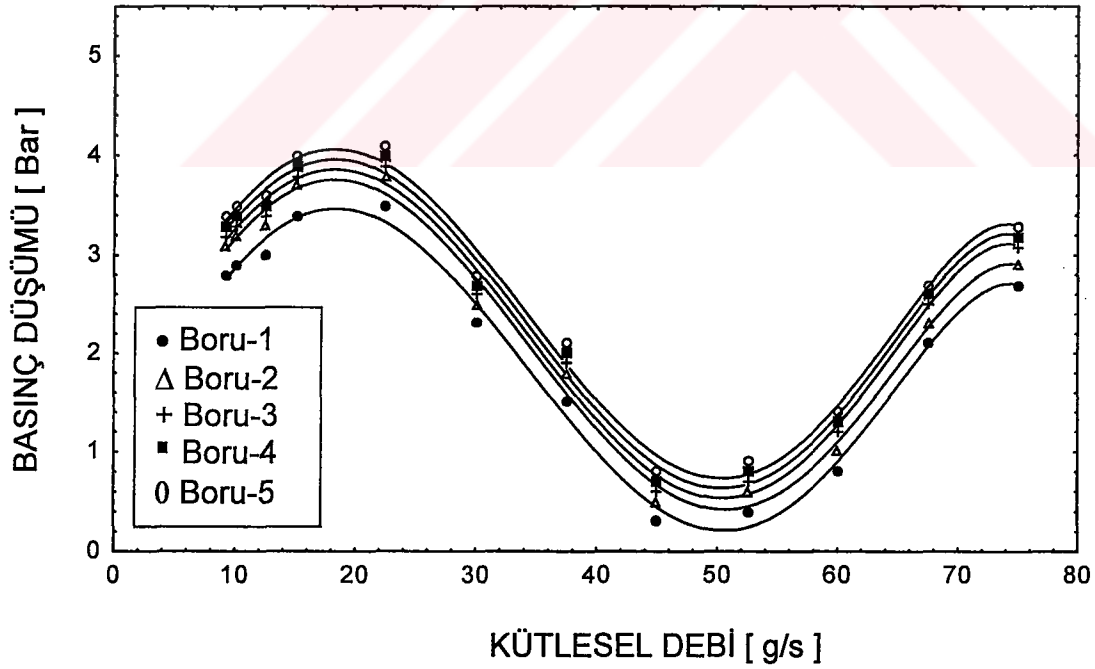
Eğrilerin eğimleri bu bölgede pozitifdir. Buradan sola doğru yani düşük kütlesel debi değerlerine gidildikçe basınç düşümünde de bir azalma meydana gelmektedir. Eğrilerin minimum noktalarında yani en düşük basınç düşümü değerlerinde akış ortamında ilk kabarcıklar gözlemlenmiştir. Bu noktadan itibaren iki fazlı bölge başlamaktadır. Bu bölgede eğrilerin eğimleri negatifdir. Sıvı fazına göre buhar fazının daha düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle basınç düşümü artmakta ve bunun sonucunda da kabarcık sayısı artmaktadır.

Diyagramda gösterilen iki fazlı bölge de doygun buhar sınırında kütle debisindeki azalma ile basınç düşümü de azalmaktadır. Akışkan giriş sıcaklığındaki azalmayla yani aşırı soğutma seviyesinin artmasıyla kaynamanın başladığı nokta daha düşük kütledebilere doğru kaymaktadır. İki fazlı bölgenin kararlı durum karakteristik eğrileri artan aşırı soğutma oranıyla daha dik eğimlere sahip olmaktadır. İki fazlı bölgede eğrilerin eğimlerinin negatif olduğu yerlerde artan aşırı soğutma oranıyla basınç düşümleri de azalmaktadır. Yukarıdaki şekillere dikkat edilirse; yüzey artırım elemanlarını içeren borularda elde edilen basınç düşümleri boş boruya göre daha yüksek olmaktadır. Girişte akışkan aşırı soğutma oranının kararlı durum bu kararlı durum karakteristik eğrisine nasıl bir etki yaptıklarını ortaya çıkarmak amacıyla beş farklı giriş sıcaklığına karşılık her bir test borusu için kararlı durum eğrileri çizilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi her bir test borusu için akışkan aşırı soğutma oranı arttıkça yani giriş sıcaklığı azaldıkça eğrilerin maksimum ve minimum noktaları arasındaki basınç farkı da artmaktadır.

Yüzey artırım elemanları içeren Boru-2, Boru-3, Boru-4 ve Boru-5’de elde edilen basınç düşümleri bilhassa düşük kütledebilerde artmaktadır. Çünkü azalan kütledebisi ile beraber akışta katmanlaşma meydana gelmekte ve neticede bu borularda sürtünmeli basınç düşümüne ilaveten buhar fazının sebep olduğu ilave bir basınç düşümü meydana gelmektedir. Karakteristik kararlı durum eğrilerinin negatif eğime sahip kısımları yüzey artırımlı borularda boş boruya nazaran daha dik bir eğime sahip olmaktadır. Buda yüzey artırımlı elemanlar içeren borularda sistemin kararlılığının azaldığını göstermektedir. Yine her bir boru için çizilen eğrilerin maksimum ve minimum noktaları arasındaki ΔP basınç farklarının farklılıklar göstermesi dikkatimizi çekmektedir. En büyük ΔP değeri Boru-2 için elde edilmiştir. Adımı daha büyük elemanları içeren diğer borularda bu ΔP değeri Boru-2 ’ye göre biraz daha azalmaktadır. Yüzey artırımlı borular içerisinde en düşük ΔP değeri Boru-3 için elde edilmiştir. Boş boru için farklı giriş sıcaklıklarında elde edilen ΔP değerleri arasında önemli bir fark olmamasına rağmen yüzey artırımlı borularda farklı giriş



Şekil 7.50. $T_g = 22^\circ\text{C}$ 'de beş farklı test borusu için kararlı durum karakteristik eğrileri

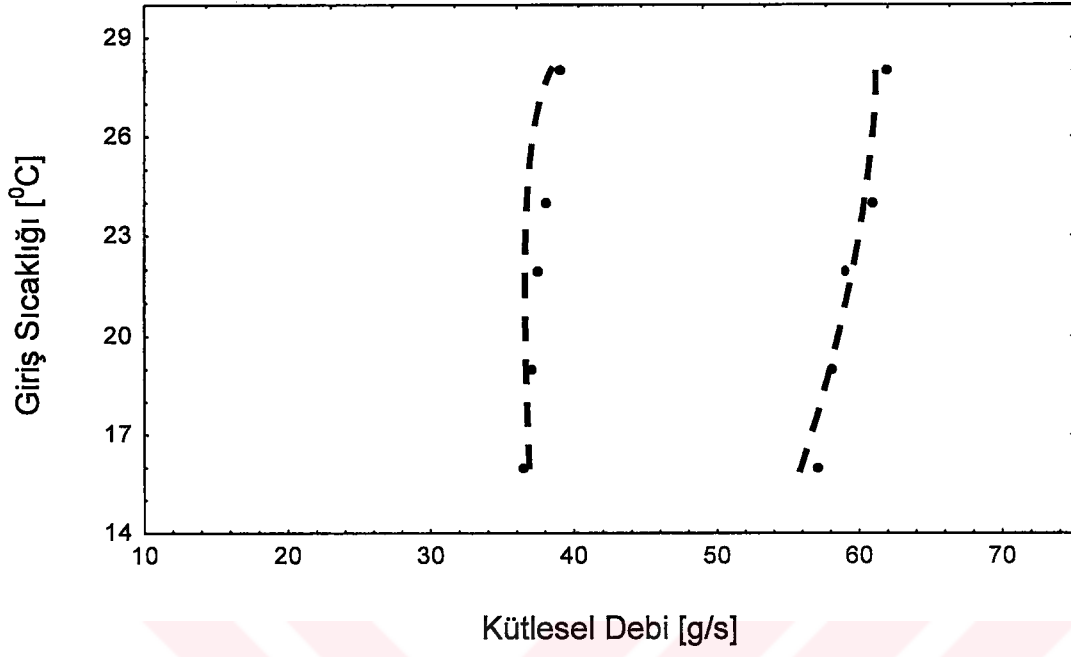


Şekil 7.51. $T_g = 16^\circ\text{C}$ 'de beş farklı test borusu için kararlı durum karakteristik eğrileri

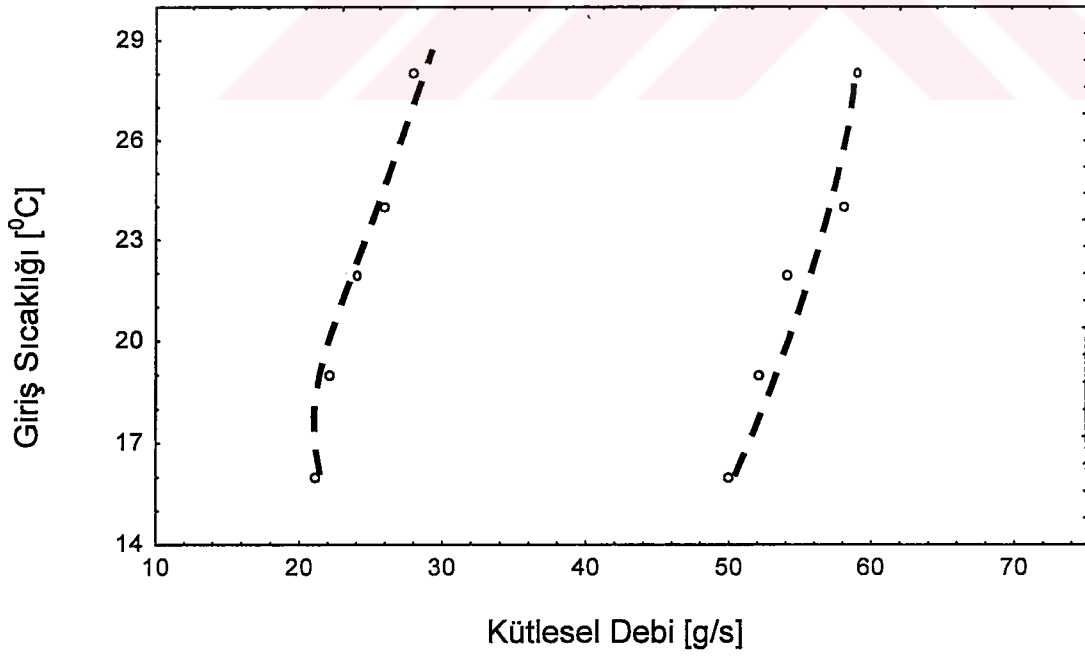
sıcaklıkları için elde edilen ΔP değerleri azalan giriş sıcaklığı ile beraber artmaktadır. Elde edilen bu önemli sonuç daha önce literatürde elde edilen sonuçlarla iyi bir uygunluk göstermektedir. Yatay borular için elde ettiğimiz bu sonuçlar aynı zamanda literatürde daha önce dikey borularda elde edilen sonuçlarla yine iyi bir benzerlik sağlanmıştır. Beş farklı test elemanı için iki farklı giriş sıcaklığında elde edilen kararlı durum karakteristik eğrileri Şekil 7.50 ve Şekil 7.51 'de verilmiştir.

7.2.2. Osilasyonların Sınırları

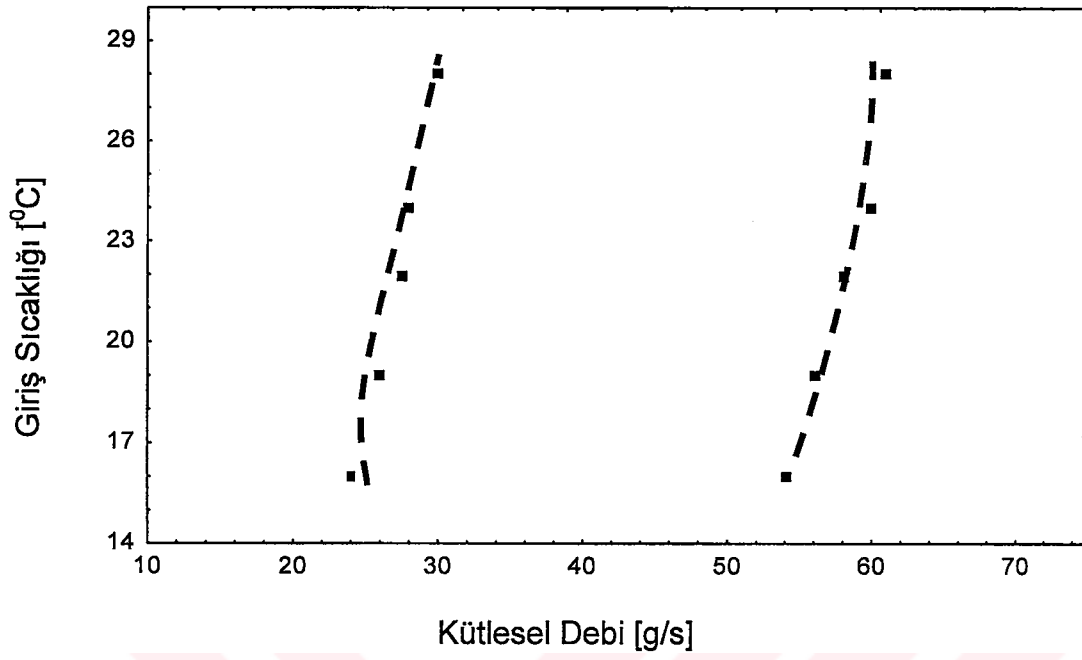
Deneysel çalışmalar süresince değişen akışkan kütlesiyle beraber kararsız akış durumunda üç farklı osilasyon modeli tespit edilmiştir. Her bir deneysel çalışma adımında sabit tutulan ısı gücü, sistem basıncı, çıkış kısıtlayıcısı ve sıkıştırılabilir hacim gibi akış parametrelerine karşılık değişen kütleli debi ile beş farklı giriş sıcaklığı için beş farklı test borusunda meydana gelen osilasyonlar incelenmeye çalışılmıştır. Kararsız akış şartlarında tespit ettiğimiz bu osilasyonlar; basınç düşümü tipi, yoğunluk değişim tipi ve termal osilasyonlardır. Bir çok endüstriyel sistemde kullanılan eşanjörler de meydana gelen bu tip osilasyonlar söz konusu ekipmanlara vermiş oldukları zararlardan dolayı hem akış ortamında kontrol altına alınmaları hem de zararlarının asgariye indirilmesi bu çalışmanın temel amaçlarından birini teşkil etmektedir. Bunun içinde bu tip osilasyonların meydana gelmesinde önemli rol oynayan temel mekanizmaların ortaya çıkarılarak optimum çalışma şartlarını temin edecek akış parametrelerinin tayin edilmesi gerekmektedir. Bu osilasyonların sınırları, periyot ve genlikleri incelenerek ne tür birer karaktere sahip oldukları bilmek büyük bir önem arz etmektedir. Şekil 7.52, Şekil 7.53, Şekil 7.54, Şekil 7.55 ve Şekil 7.56 'da beş farklı test borusu için beş farklı giriş sıcaklığı ve değişen kütleli debi değerlerine bağlı olarak basınç düşümü tipi osilasyonların sınırlarını gösteren grafikler çizilmiştir.



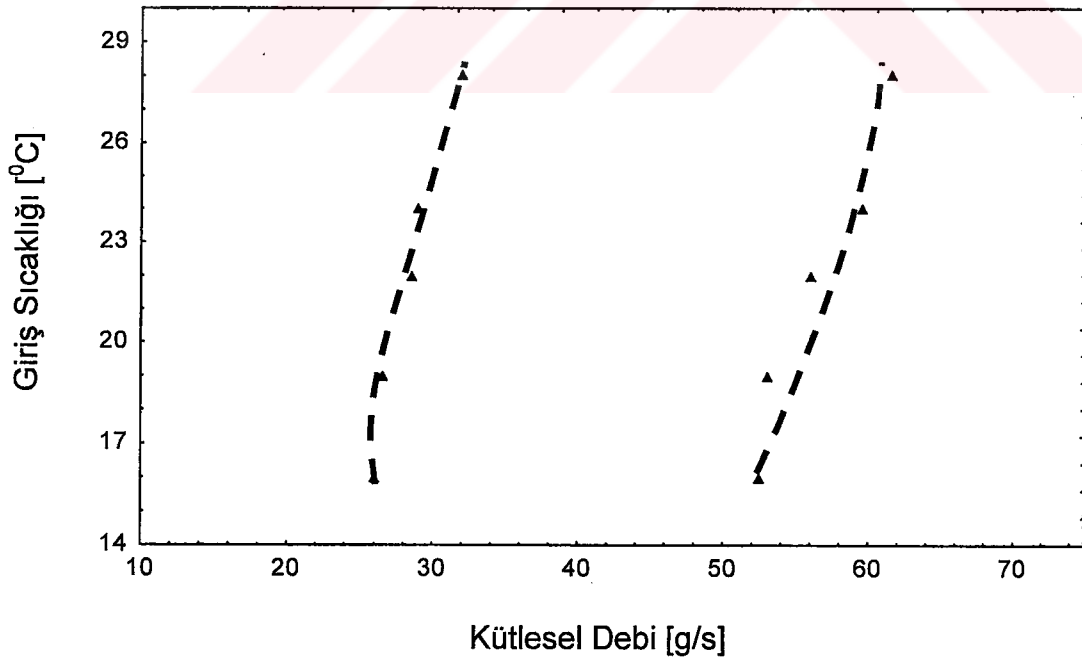
Şekil 7.52. Boru-1 için basınç düşümü tipi osilasyonların sınırları



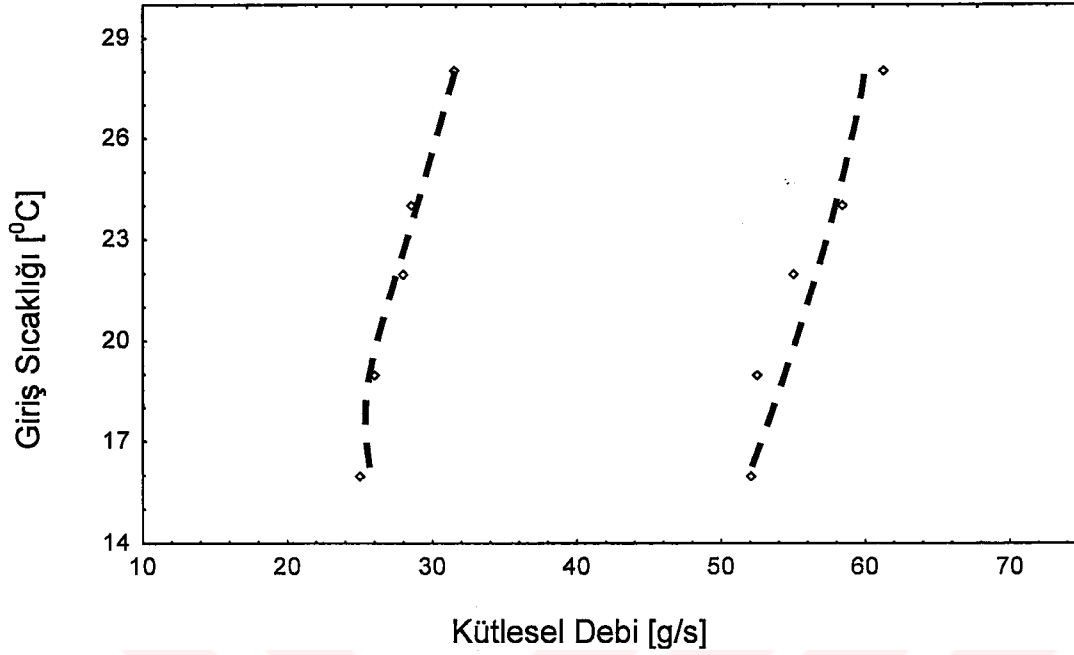
Şekil 7.53. Boru-2 için basınç düşümü tipi osilasyonların sınırları



Şekil 7.54. Boru-3 için basınç düşümü tipi osilasyonların sınırları



Şekil 7.55. Boru-4 için basınç düşümü tipi osilasyonların sınırları



Şekil 7.56. Boru-5 için basınç düşümü tipi osilasyonların sınırları

Osilasyonların sınırları daha önce çizilen Şekil 7.45, Şekil 7.46, Şekil 7.47, Şekil 7.48 ve Şekil 7.49 'da da gösterilmiştir. Hatırlanacağı gibi bu şekiller kararlı durum karakteristik eğrileri olarak adlandırılmaktadır.

Aynı şekillere dikkat edilirse basınç düşümü ve yoğunluk değişim tipi osilasyonlar süperimpozed olarak adlandırılan tarzda aynı bölgede birlikte ortaya çıkmaktadırlar. Bu bölge şekillerde p.d.o. + süperimpozed d.w.o. simgeleriyle gösterilmektedir. Bu bölgeden sola doğru daha düşük kütlesel debilerde ortaya çıkan ~~sade~~ sadece yoğunluk değişim tipi osilasyonların meydana geldiği bölge ise d.w.o. ile gösterilmektedir.

Yüksek kütlesel debilere karşılık gelen ve kararlı durum karakteristik eğrilerinin en sağ tarafına karşılık gelen tek faz bölgesinde herhangi bir osilasyon türü gözlemlenmemiştir. Osilasyonlar ilk olarak kararlı durum karakteristik eğrilerinin en düşük noktalarında kaynama başladıktan hemen sonra ortaya çıkmaktadırlar. İlk olarak gözlemlenen bu osilasyonlar süperimpozed basınç

düşümü ve yoğunluk değişim tipi osilasyonlardır. Termal osilasyonlar da basınç düşümü tipi osilasyonlarla beraber aynı anda ortaya çıkmaktadırlar. Basınç düşümü tipi osilasyonların başlangıç noktaları yüzey artırım elemanları içeren borularda daha düşük giriş sıcaklıklarında daha düşük kütleli debi değerlerine doğru kaymaktadır. Aynı şekilde basınç düşümü tipi osilasyonların sona erdiği noktalarda yüzey artırımı borularda düşük giriş sıcaklıklarında yine düşük kütleli debi değerlerine doğru kaymaktadır. Osilasyon sınırlarındaki bu değişimlerin temel nedeni girişte sıvı fazdaki akışkanın aşırı soğutulmuş olması nedeniyle kaynama noktasındaki değişimden kaynaklanmaktadır.

Daha düşük giriş sıcaklığına sahip yani aşırı soğutma seviyesi daha yüksek olan akışkan daha düşük kütleli debi değerlerine ulaşıncaya kadar aynı ısı gücünün etkisiyle doygunluğa ulaşamayacaktır.

Şekillere dikkat edilirse; yüzey artırımı borularda meydana gelen basınç düşümü tipi osilasyonlar boş boruya göre daha geniş kütleli debi değerlerinde ortaya çıkmaktadırlar.

Yüzey artırımı borularda basınç düşümü tipi osilasyonlar karakteristik eğrinin negatif eğime sahip bölgesinde meydana gelmektedir. Bu da akışta meydana gelen katmanlı akışın genişlemesiyle açıklanabilir. Yine yüzey artırımı borularda oluşan katmanlaşma boş boruya göre daha düşük kütleli debi değerlerinde başlamaktadır. Bu borularda akış ortamında bulunan farklı adım ve konfigürasyonlara sahip yayların neden olduğu türbülansın dolayısı ile sıvı ve buhar fazları karışık halde akmakta bunun sonucunda da boru cidarları sıvı fazı ile daha çok temas etmektedir. Yüksek türbülans nedeniyle buhar fazında sıvı fazındaki partiküllerin oranı artacaktır.

Yatay borular için elde edilen sonuçları daha önce literatürde dikey borular için elde edilmiş sonuçlarla mukayese edersek; yüzey artırımı yatay borular yine yüzey artırımı dikey borulara nazaran daha çok kararsız akış ortamına sahip oldukları tespit edilmiştir.

1993 'te Liu tarafından dikey borularda elde edilen sonuçlara göre yoğunluk değişim tipi osilasyonlar kararlı durum karakteristik eğrilerinin tam negatif eğimli kısımlarında basınç düşümü tipi osilasyonlarla beraber ortaya çıkmaktadırlar. Halbuki burada elde edilen sonuçlar karakteristik eğrilerin biraz daha düşük negatif eğimli bölgelerinde ortaya çıkmaktadırlar. Bu sonuçların benzerini Ding 1993 'te yatay borularda elde etmiştir.

Sadece yoğunluk değişim tipi osilasyonları ~~bölge~~ karakteristik eğrinin sol tarafına doğru daha düşük kütleli debi değerlerinde ortaya çıkmaktadır. Her bir test borusu için bu osilasyonlar aynı bölgede ortaya çıkmakta ve azalan kütleli debi değerleri ile beraber yavaş yavaş sona ermektedirler.

Çok düşük kütleli debi değerlerinde yani tek buhar fazında meydana gelen bölgede bile yoğunluk değişim tipi osilasyonlara rastlanılmaktadır.

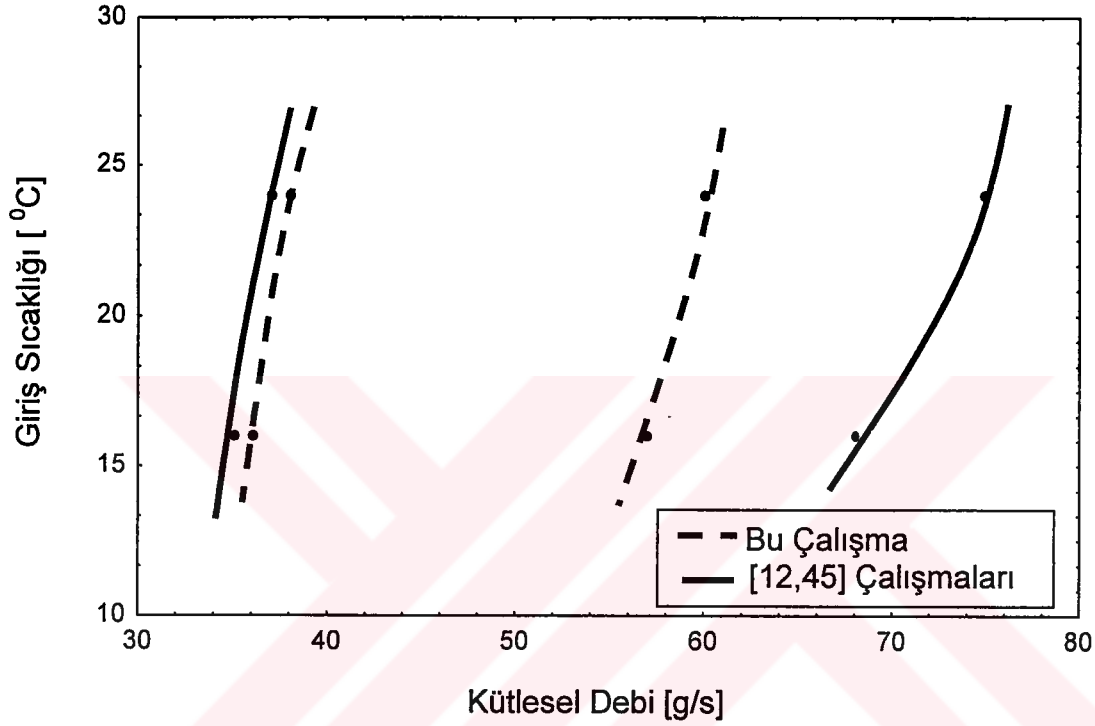
Karakteristik eğrinin en sol tarafına doğru yani en düşük kütleli debi değerlerinde her bir test borusunun alt cidarında termal osilasyonlarla karşılaşmıştır. Bu bölgede test borularında burn-out olayı meydana geldiği için bu bölgenin dikkatlice izlenmesi gerekmektedir.

7.2.3. Osilasyon Sınırlarının Literatürdeki Sonuçlarla Karşılaştırılması

Bu çalışmada 24°C ve 16°C giriş sıcaklıklarında boş boru için elde edilen ve Şekil 7.52 'deki grafikte gösterilen osilasyon sınırları S. Kakaç ve diğerleri [12], Ding [45] tarafından aynı deneysel şartlarda elde edilen osilasyon sınırları karşılaştırılmıştır.

Şekil 7.57 'den de görüldüğü gibi 60 ile 75 g/s debi aralığında bu deneysel sistemdeki şartlar kararlı halde iken [12] ve [45] çalışmalarında ise aynı debi değerlerinde basınç düşümü ve yoğunluk değişim tipi osilasyonların aynı anda

meydana geldiği kararsız bölge söz konusudur. Yani osilasyon sınırları bu sistemde daha düşük debi değerlerine doğru kayarak kararsız bölge daralmıştır. Sadece yoğunluk değişim osilasyonlarının meydana geldiği en büyük debi bu çalışmada 38g/s iken [12] ve [45] çalışmalarında bu değer 35g/s 'dir.



Şekil 7.57. Osilasyon sınırlarının karşılaştırılması

7.3. Zorlanmış Konveksiyonlu Kaynamalı Yatay Sistemlerde Oluşan Osilasyonlar

Zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı yatay boru sisteminden meydana gelen deney düzeneğinde yapılan deneysel çalışmalar süresince üç farklı osilasyon tipi gözlenmiştir. Bunlar; basınç düşümü, yoğunluk değişimi ve termal osilasyonlardır. Basınç düşümü tipi osilasyonlar yoğunluk değişim tipi osilasyonlarla süperimpozed olarak karakteristik eğrinin aynı bölgesinde ortaya çıkmaktadırlar. Termal osilasyonlar da yine aynı bölgede ortaya çıkmaktadır.

Karakteristik eğrinin daha düşük kütleli debi değerlerinde tek buhar fazından oluşan bölgede sadece yoğunluk değişim tipi osilasyonlar tespit edilmiştir. Bu noktadan daha düşük kütleli debi değerlerinde ise alt cıvarda termal osilasyonlar meydana gelmektedir.

Kararsız akış ortamında meydana gelen bu osilasyonlara; aşırı soğutma seviyesinin, kütleli debinin ve yüzey artırım elemanlarının nasıl birer etki yaptıklarını ortaya çıkarmak amacıyla bir seri deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Osilasyonların periyot ve genlikleri incelenerek yukarıda bahsedilen deneysel parametrelerin osilasyonların periyot ve genliklerinde yaptıkları değişiklikler tespit edilmeye çalışılmıştır.

7.4. Basınç Düşümü Tipi Osilasyonlar

Bu bölümde kararsız akış ortamında oluşan basınç düşümü tipi osilasyonlar incelenerek bu tip osilasyonlara kütleli debinin, aşırı soğutma seviyesinin ve farklı ısı transfer iç yüzey konfigürasyonlarına sahip test borularının yaptıkları etkiler araştırılmıştır. Bu tip osilasyonlar Şekil 2.2 'de de gösterildiği gibi karakteristik eğride tanımlanan limit çevriminin çalışma noktasından önceki sıvı faz hattı boyunca pozitif eğimli bölgede başlamaktadır.

Şekil 2.9 'da gösterildiği gibi bu tip osilasyonların meydana gelebilmesi için akış ortamında bir sıkıştırılabilir hacmin mevcut olması gerekmektedir. Bu amaçla dengeleyici tankta N_2 gazı tankı yardımıyla bir sıkıştırılabilir hacim akış üzerinde temin edilmiştir. Bu sıkıştırılabilir hacim seviyesi her bir test elemanı için gözetleme camı yardımıyla sabit tutulmaya çalışılmıştır.

Karakteristik eğrinin negatif eğimli bölgesinde bu osilasyonlar daha önce bahsettiğimiz gibi yoğunluk değişim tipi osilasyonlarla süperimpozed tarzda ortaya çıkmaktadırlar. Giriş basıncında gözlemlenen osilasyonlarla beraber kütleli debide de osilasyonlar göze çarpmaktadır.

Şekil 7.58, Şekil 7.59 ve Şekil 7.60 'da boş boru için farklı giriş sıcaklık ve kütleli debilerde elde edilen basınç düşümü tipi osilasyonlar gösterilmektedir.

Zamana karşılık akışkanın kütleli debi değerlerinde, giriş basıncında ve test borusunun alt/üst cidar sıcaklıklarında meydana gelen değişimler kaydedilerek boş boru için elde edilen basınç düşümü tipi osilasyonların özellikleri araştırılmıştır.

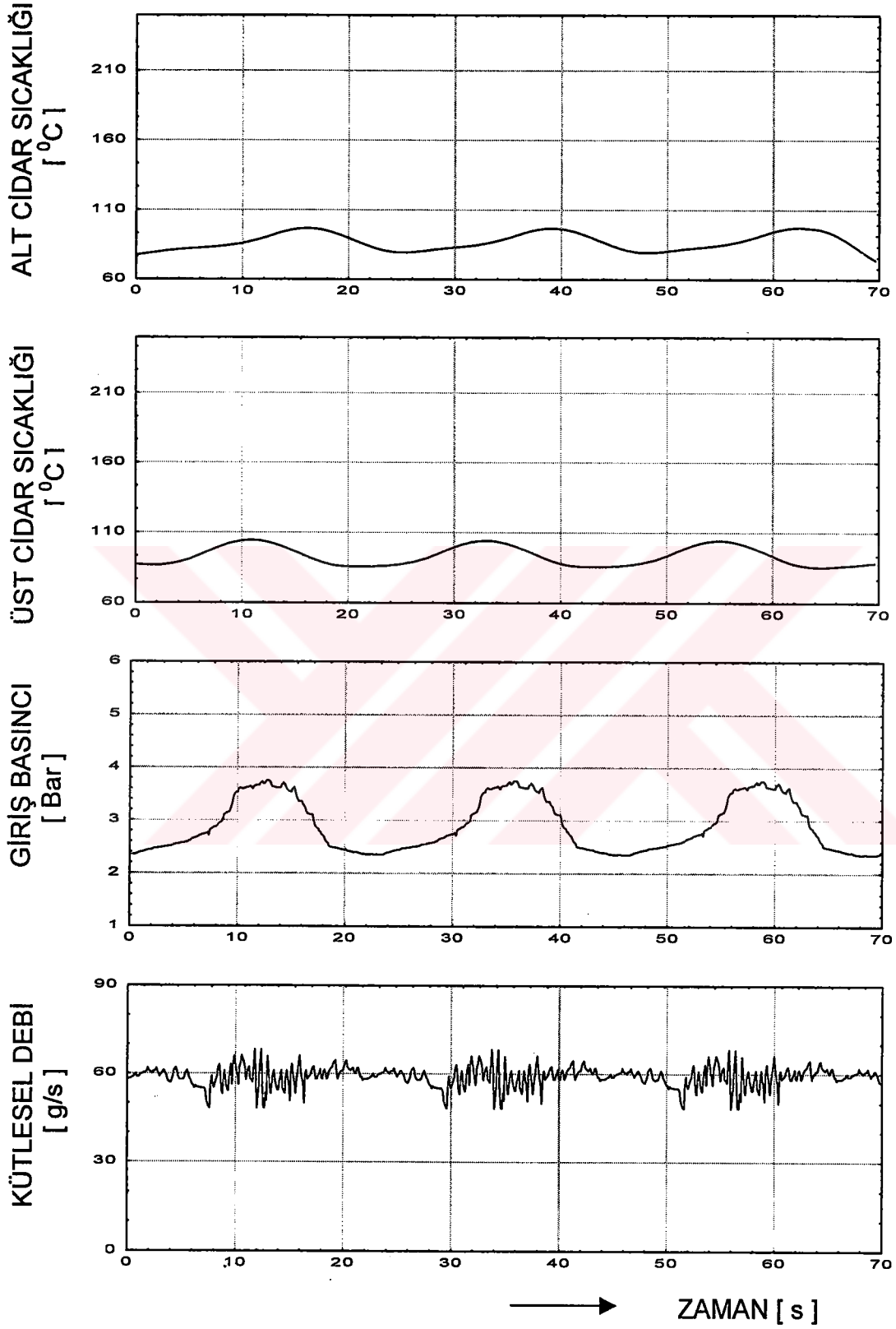
Kütleli debi azaldıkça cidar sıcaklıkları artmaktadır. Osilasyonların periyotları 23 saniye civarındadır. Üst cidar sıcaklıklarının genlikleri alt cidar sıcaklık genliklerinden daha büyüktür.

Giriş basınç genliklerinin maksimum olduğu anlarda kütleli debi genlikleri de maksimum değere ulaşmaktadırlar. Giriş basıncının genlikleri azalan kütleli debi ile azalmaktadır.

Aynı kütleli debi değerlerinde giriş sıcaklığında ki azalma ile basınç düşümü tipi osilasyonların periyot ve genlikleri artmaktadır. Boru-1 olarak adlandırılan boş boru için elde edilen basınç düşümü tipi osilasyonlar aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

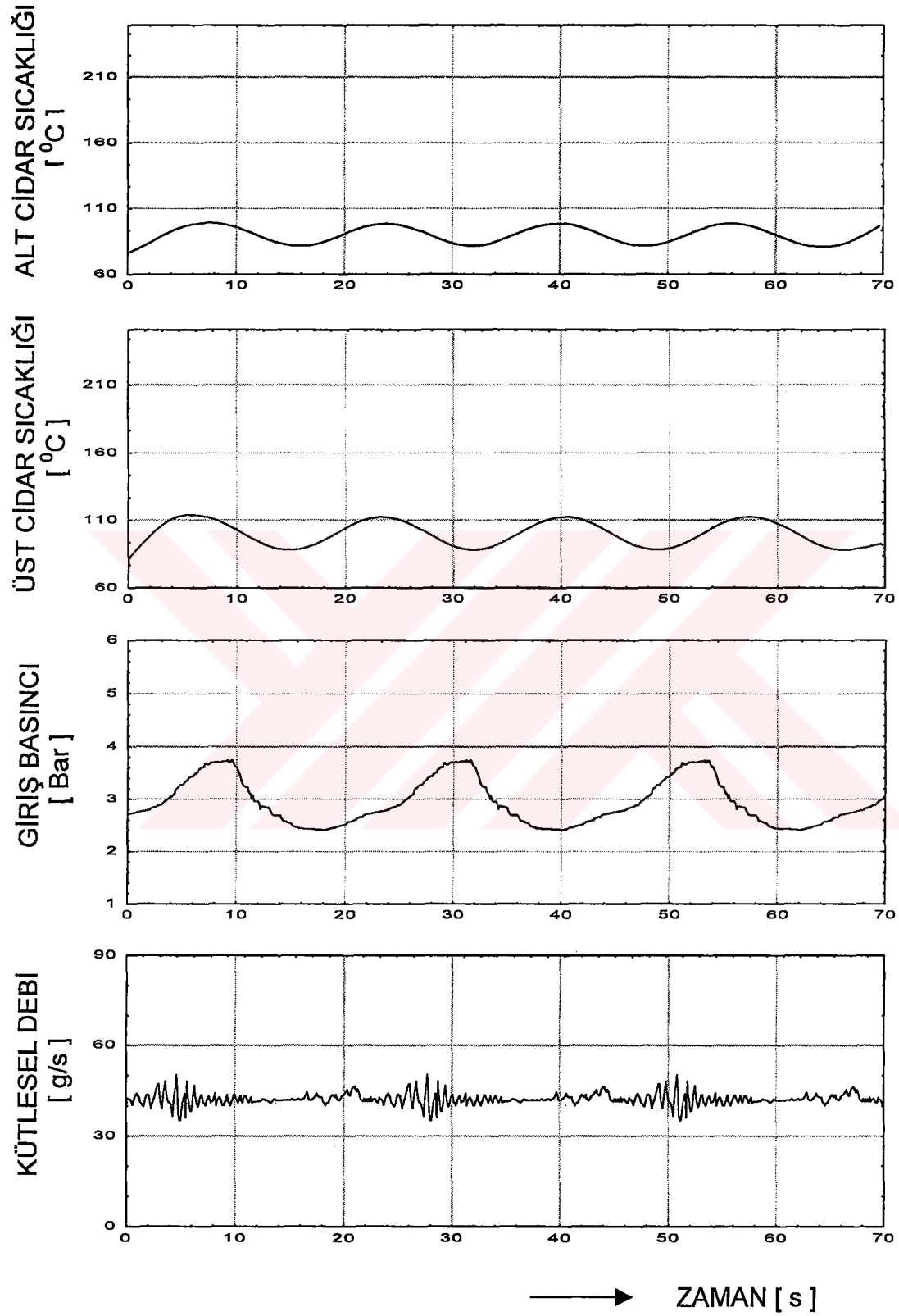
Şekil 7.61 ve Şekil 7.62 'de Boru-2 için elde edilen basınç düşümü tipi osilasyonlar gösterilmiştir. Boru içerisine yerleştirilen yüzey artırıcı elemanı yayın osilasyonun periyot ve genliklerini etkilediği şekillere dikkat edilirse anlaşılacaktır.

Aynı deneysel parametrelerde Boru-2 için elde edilen basınç düşümü tipi osilasyonların periyot ve genlikleri boş boruya göre artmaktadır. Burada elde edilen osilasyonların periyot ve genlikleri 25 saniye civarında seyretmektedir.



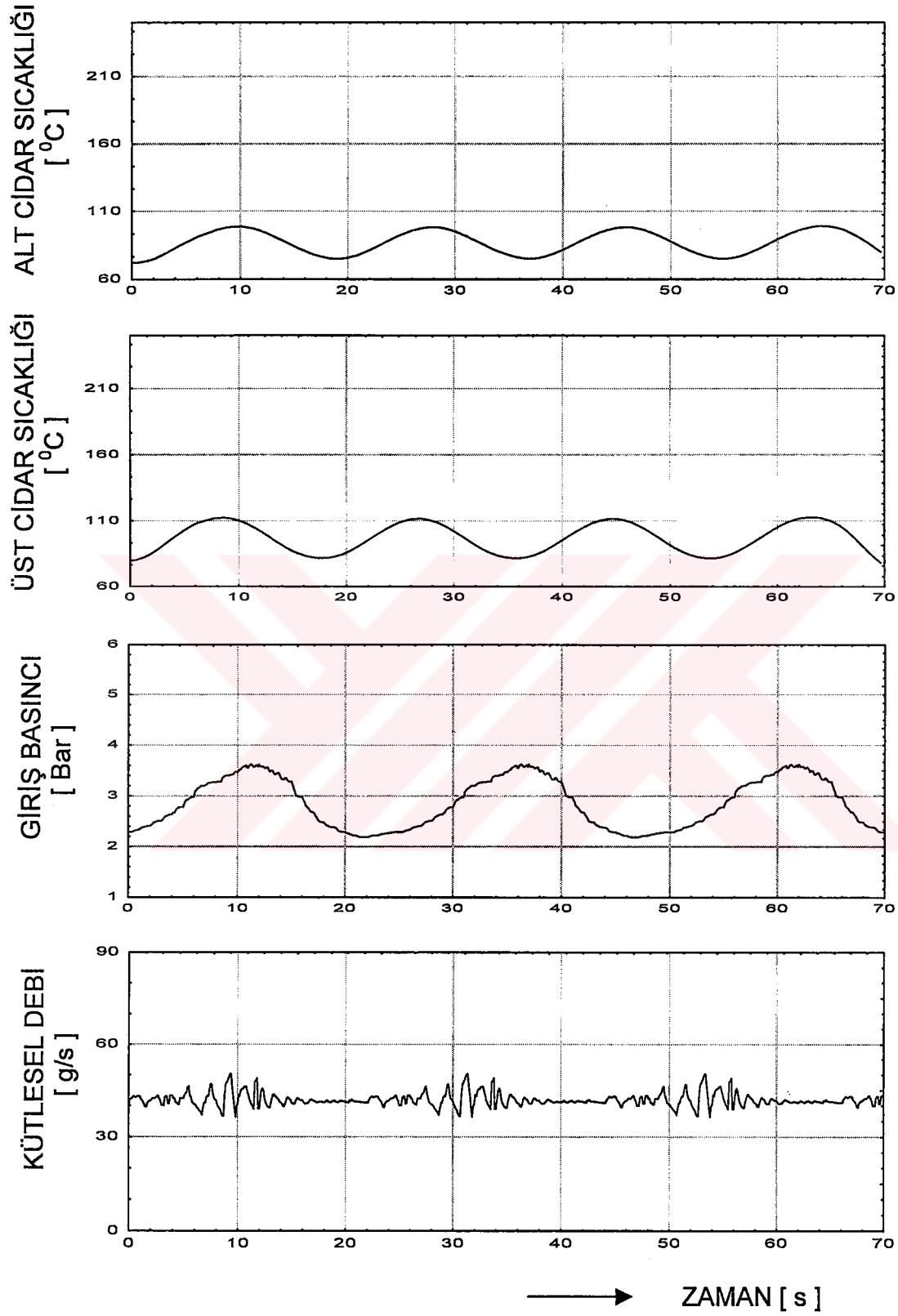
Şekil 7.58. Boru-1 için “ Basınç düşümü tipi osilasyonların” grafiksel gösterimi.

$T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=58.19\text{g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.59. Boru-1 için “ Basınç düşümü tipi osilasyonların” grafiksel gösterimi.

$T_g=22^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=41\text{g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.60. Boru-1 için “ Basınç düşümü tipi osilasyonların” grafiksel gösterimi.

$T_g=16^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=41\text{g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$

Şekil 7.63 ve Şekil 7.64 'te Boru-3 için elde edilen basınç düşümü tipi osilasyonlar gösterilmiştir. Boru-3; içerisinde Boru-2 'ye göre daha büyük adıma sahip aynı tel çaplı yay elemanı bulunan test elemanıdır. Yay adımının artmasıyla osilasyonların periyot ve genlikleri de artmaktadır. Bu boru için elde edilen basınç düşümü osilasyonlarının periyotları 30 saniye civarındadır. Gerek Boru-2 için gerekse Boru-3 için elde edilen basınç düşümü osilasyonların periyot ve genlikleri Boru-1'de olduğu gibi azalan kütle debisi ile beraber artmaktadır.

Aynı şekillere dikkat edilirse giriş basıncının ve alt/üst cidar sıcaklıklarının genlikleri azalan kütleli debi ile artmaktadır. Cidar sıcaklık genlikleri daha düşük kütleli debi değerlerinde daha büyük değerlere artmaktadır. Boru boyunca akış yönünde ilerledikçe cidar sıcaklıklarında dikkati çeken bu artışın dry-out olayından kaynaklandığını hatırlamaktayız. Boru-3 içinde aşırı soğutma seviyesindeki artışla basınç düşümü tipi osilasyonlarının periyot ve genliklerinin de arttığı tespit edilmiştir.

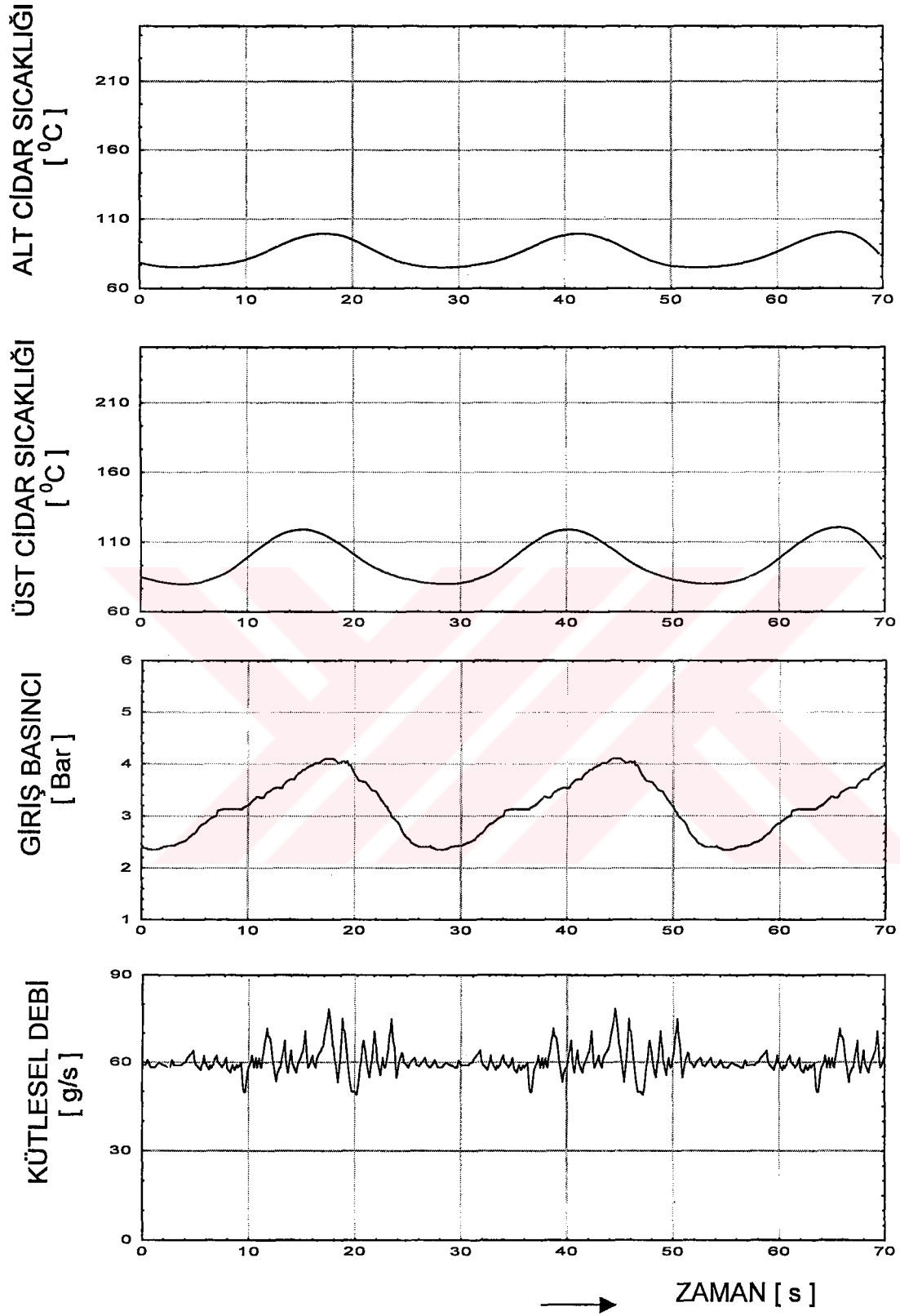
Şekil 7.65 ve Şekil 7.66 'da Boru-4 için elde edilen basınç düşümü tipi osilasyonlar gösterilmektedir. Boru-4; içerisinde karesel geometriye sahip Boru-2 ile aynı adım ve tel çapı olan bir yüzey artırım elemanı bulunan bir test borusudur. Boru-4 için elde edilen basınç düşümü tipi osilasyonların periyot ve genlikleri Boru-3'e göre daha küçük Boru-2'ye göre biraz daha büyük değerlerde elde edilmiştir. Bu boru için elde edilen osilasyonların periyotları 27 saniye civarındadır. Akışkan giriş sıcaklık ve debi değerlerindeki değişim ile bu boru için de osilasyonların periyot ve genliklerinde diğer borulardaki gibi benzer değişiklikler tespit edilmiştir.

Şekil 7.67 Şekil 7.68 'de son test borusu Boru-5 için elde edilen basınç düşümü tipi osilasyonlar gösterilmektedir. Boru-5; içerisinde Boru-3 ve Boru-4 ile aynı adım ve tel çaplı üçgensel geometriye sahip bir yüzey artırım elemanı bulunduran test borusudur. Bu boru için elde edilen basınç düşümü osilasyonlarının periyot ve genlikleri yüzey artırımı diğer borularla mukayese

edilirse; Boru-3 ve Boru-4 'de göre daha düşük Boru-2 'ye göre ise biraz daha büyük değerlere sahip periyot ve genlikleri olan basınç düşümü tipi osilasyonlar elde edilmiştir.

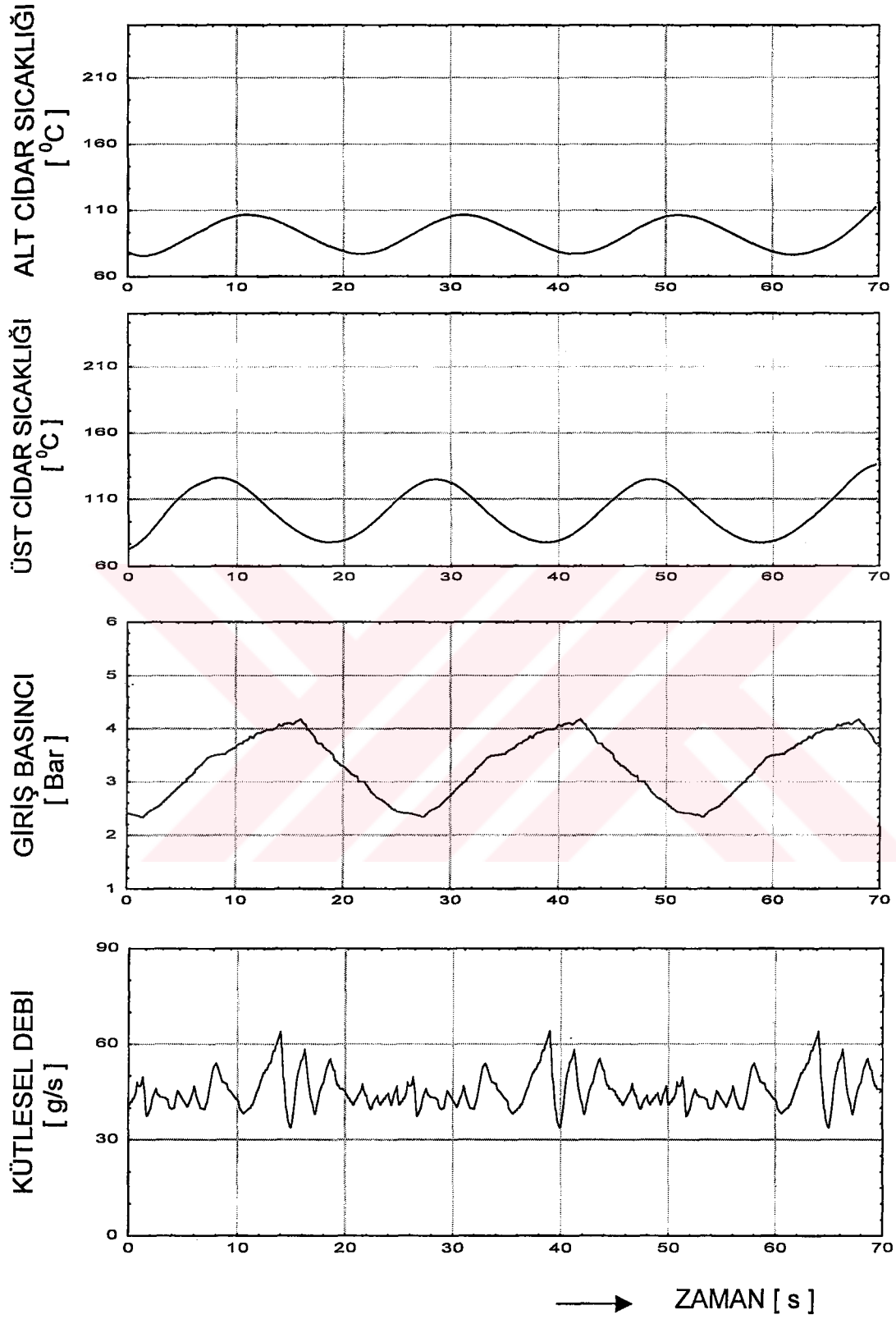
Yüzey artırımı dört adet test borusunda elde edilen basınç düşümü tipi osilasyonların periyot ve genlikleri boş boruya göre daha büyük olmaktadır. Boru içerisine yerleştirilmiş bulunan elemanlar akış ortamında ki sürtünme kayıplarını artırmaktadır. Yine yüzey artırımı borularda bulunan elemanlar akışa sağladıkları türbülans nedeniyle sıvı ve buhar fazlarının karışık şekilde akmalarına neden olmakta ve bunun sonucunda cidar sıcaklık limitlerinde boş boruya göre düşmektedir. Aynı zamanda bu borularda akışta daha az katmanlaşma seviyesinin oluşması ile düşük kütleli debi değerlerinde ortaya çıkan burn-out olayının daha düşük sıcaklıklarda cereyan etmesini sağlamaktadır. Buda burn-out olayı ile cidarda oluşan termal gerilmelerin boru donanımlarına verebileceği muhtemel zararları azaltmış olacaktır. Bu deneysel çalışmanın en önemli sonuçlarından birde budur.

Beş farklı iç yüzey konfigürasyonuna sahip test borusu için yukarıda gösterilen basınç düşümü tipi osilasyonlarına aşırı soğutma seviyesinin etkilerini görmek amacıyla akışkan kütleli debi değerlerine bağlı olarak giriş basıncının genliklerinde meydana gelen değişimler sırasıyla; Şekil 7.69, Şekil 7.70, Şekil 7.71, Şekil 7.72 ve Şekil 7.73 'te grafiksel olarak gösterilmiştir. Her bir test borusu için azalan giriş sıcaklığı ile giriş basıncının genlikleri de artmaktadır. Yüzey artırımı borularda bu artış boş boruya nazaran daha büyük olmaktadır. Çünkü kararlı durum karakteristik eğrisine dikkat edersek yüzey artırımı borular için elde edilen eğrilerin maksimum ve minimum noktaları arasındaki basınç farkı boş boruya göre daha fazla olmaktadır. Bunun sonucunda akış ortamında oluşan osilasyonların genlikleri de artmaktadır. Aynı şekillere dikkat edilirse; azalan kütleli debi ile tüm test borularında giriş basınç genliklerinin azaldığı görülecektir. Bu azalmayı yine karakteristik eğri yardımıyla açıklayabiliriz. Yüzey artırımı borularda kütleli debideki azalma ile giriş basınç genliklerinde tespit edilen azalma boş boruya nazaran daha az olmaktadır.



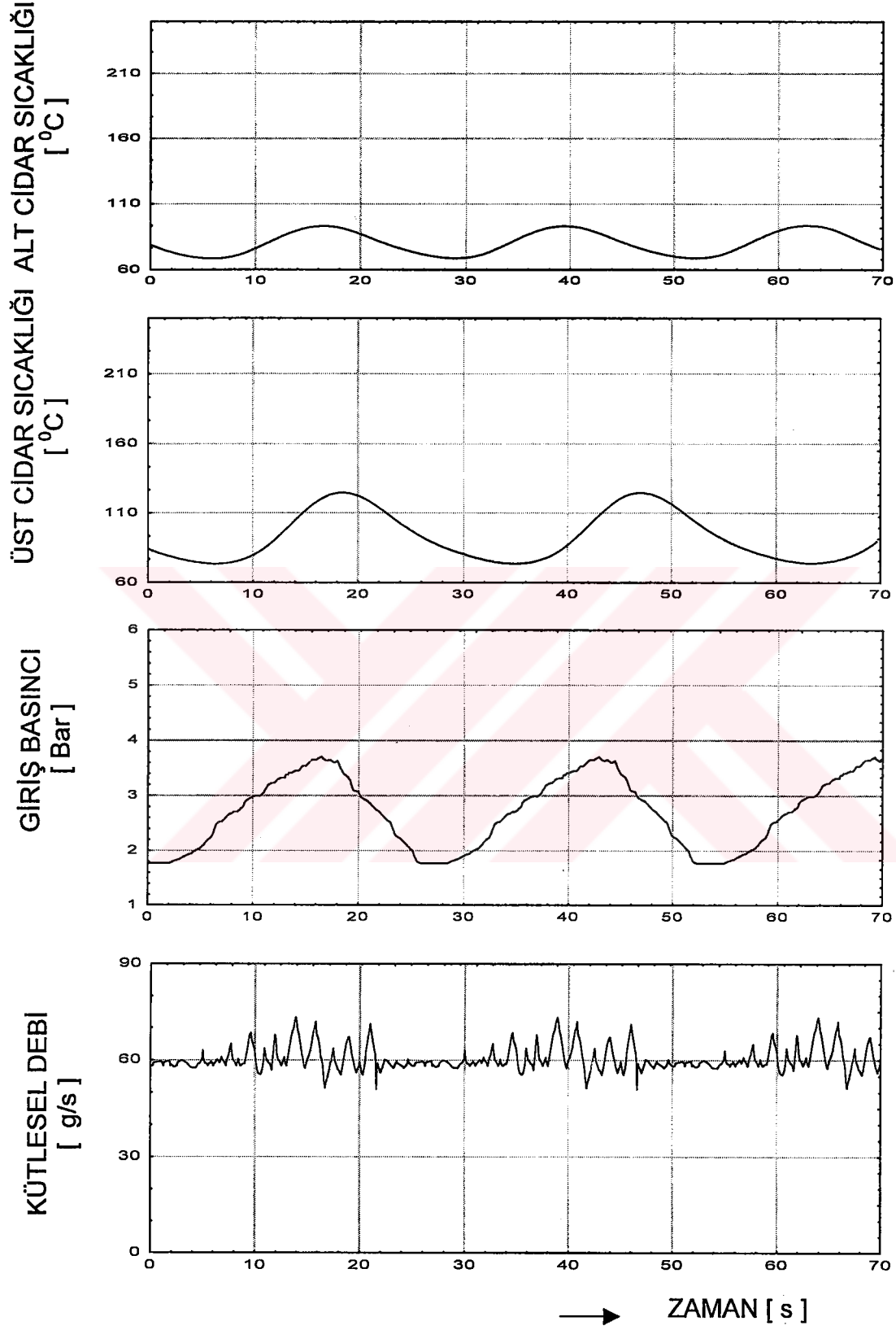
Şekil 7.61. Boru-2 için " Basınç düşümü tipi osilasyonların " grafiksel gösterimi.

$T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=58.19 \text{ g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$



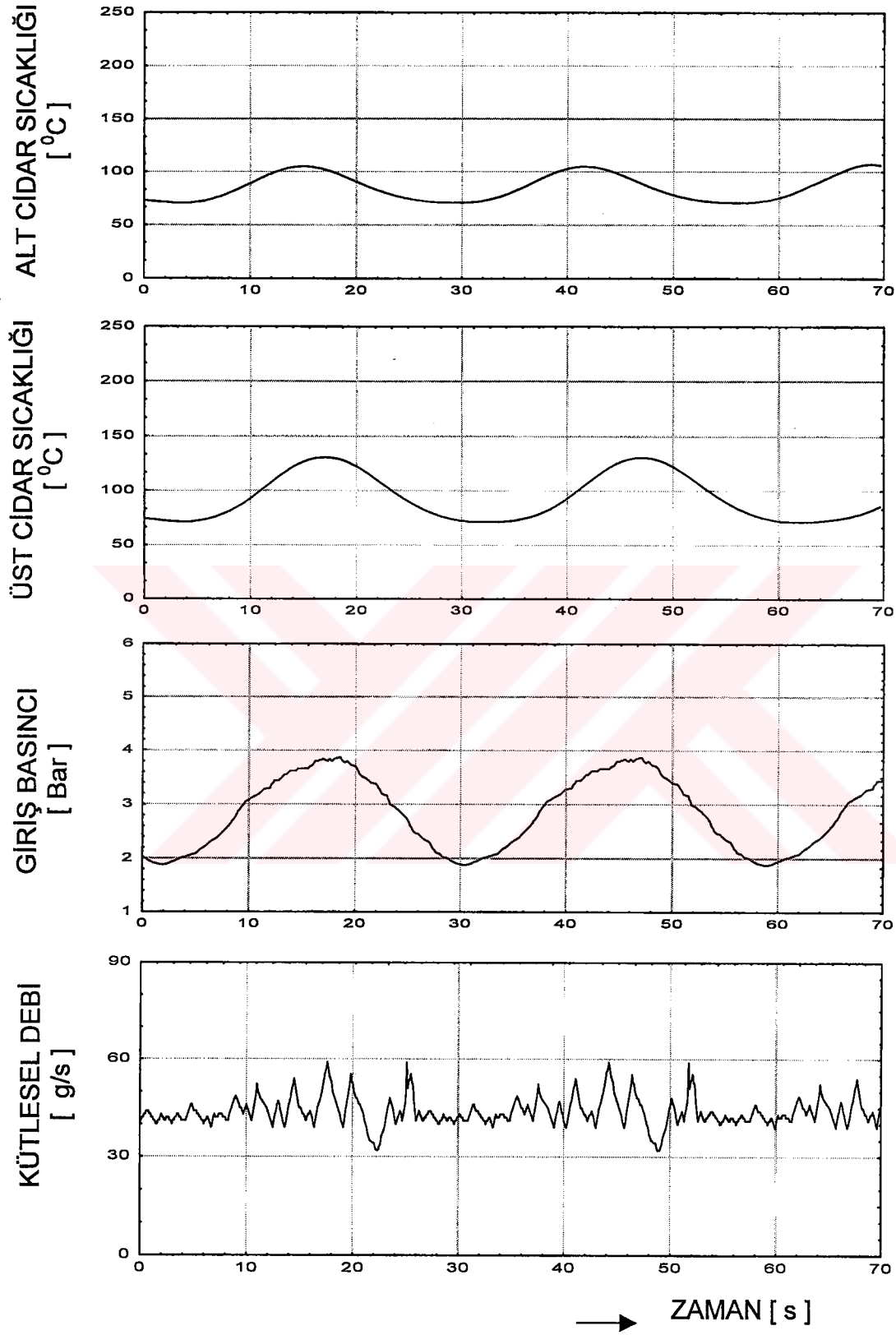
Şekil 7.62. Boru-2 için “ Basınç düşümü tipi osilasyonların ” grafiksel gösterimi.

$T_g=16^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=41 \text{ g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$



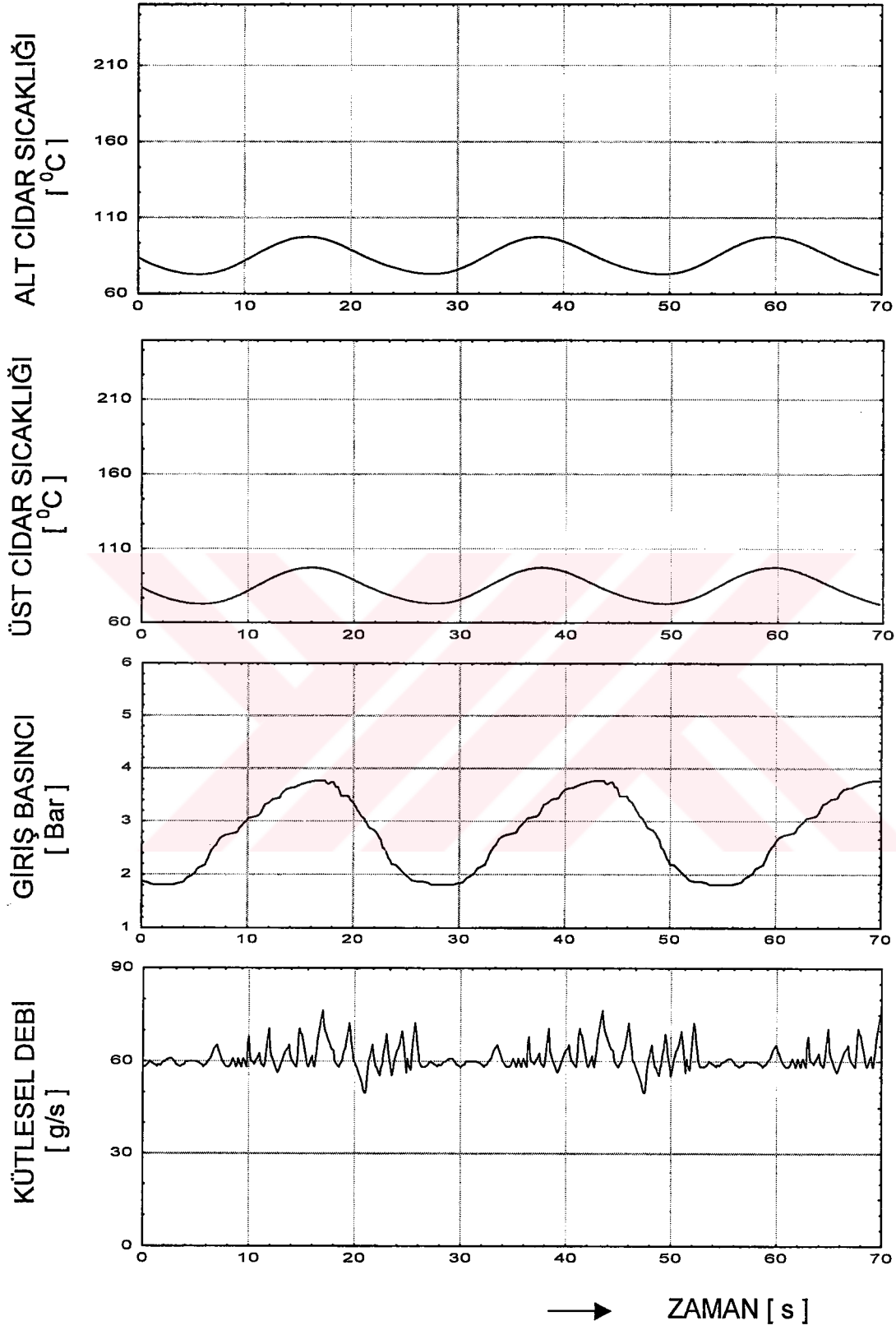
Şekil 7.63. Boru-3 için “ Basınç düşümü tipi osilasyonların ” grafiksel gösterimi.

$T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=58.19\text{g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$

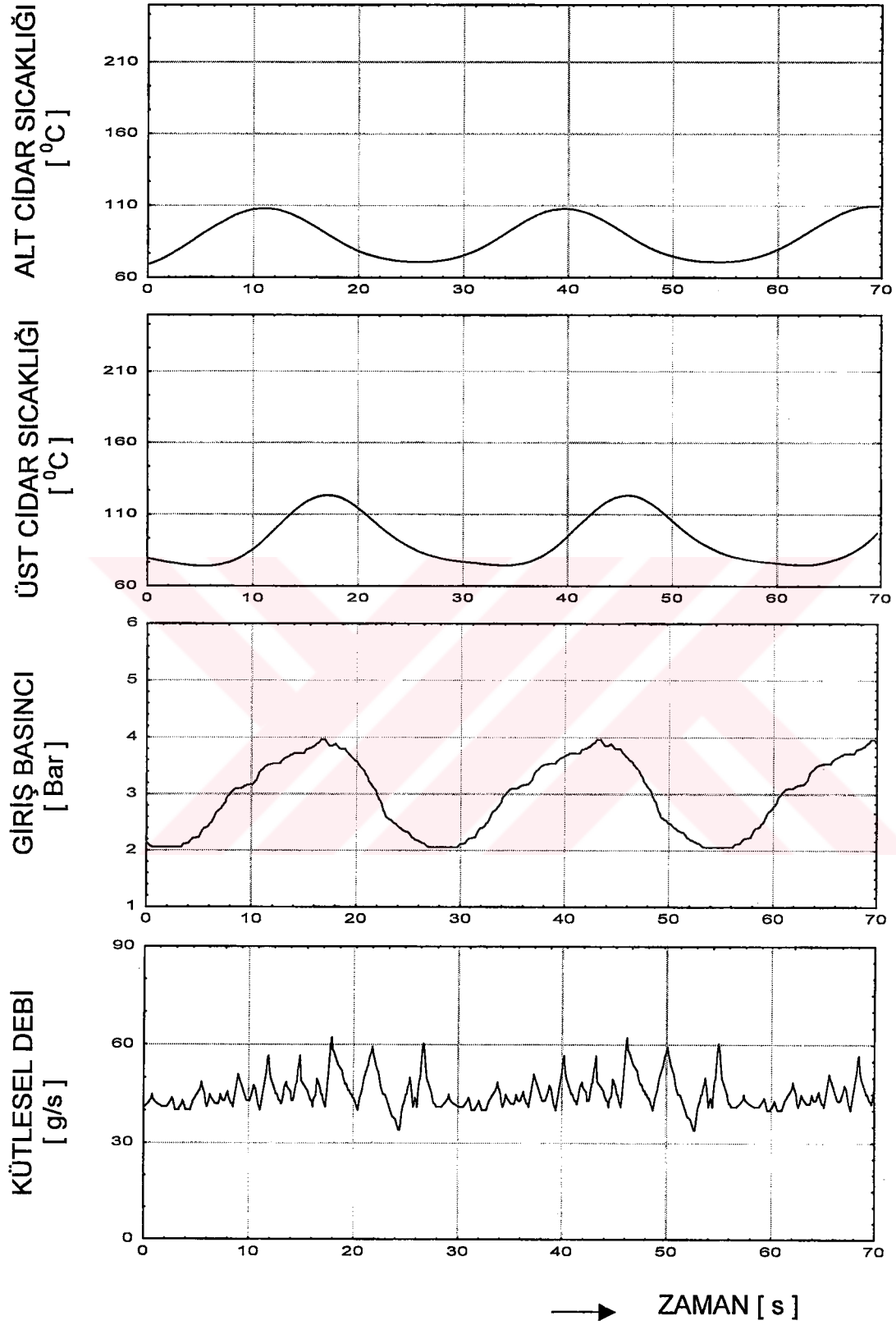


Şekil 7.64. Boru-3 için “ Basınç düşümü tipi osilasyonların ” grafiksel gösterimi.

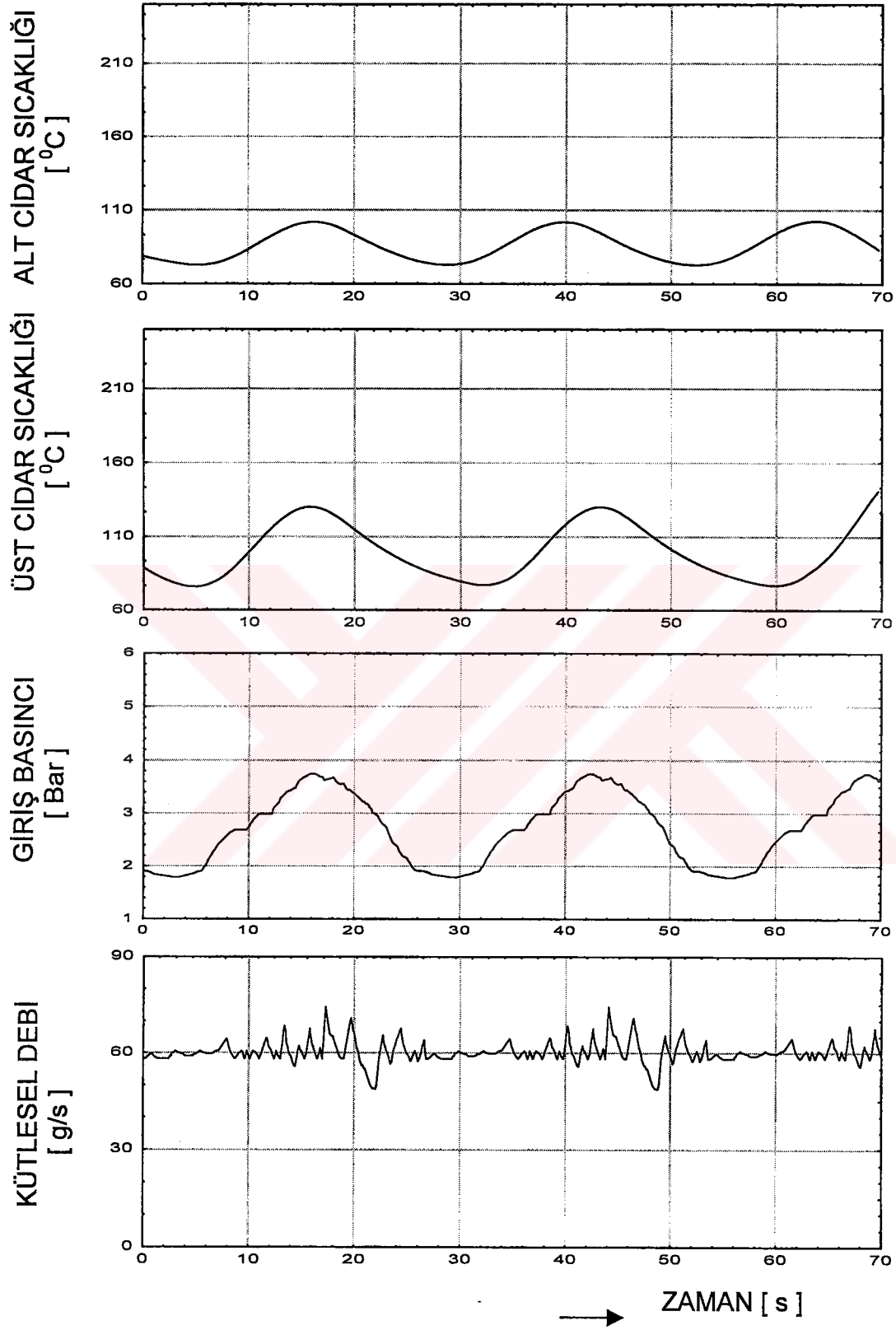
$T_g=16^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=41\text{g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$



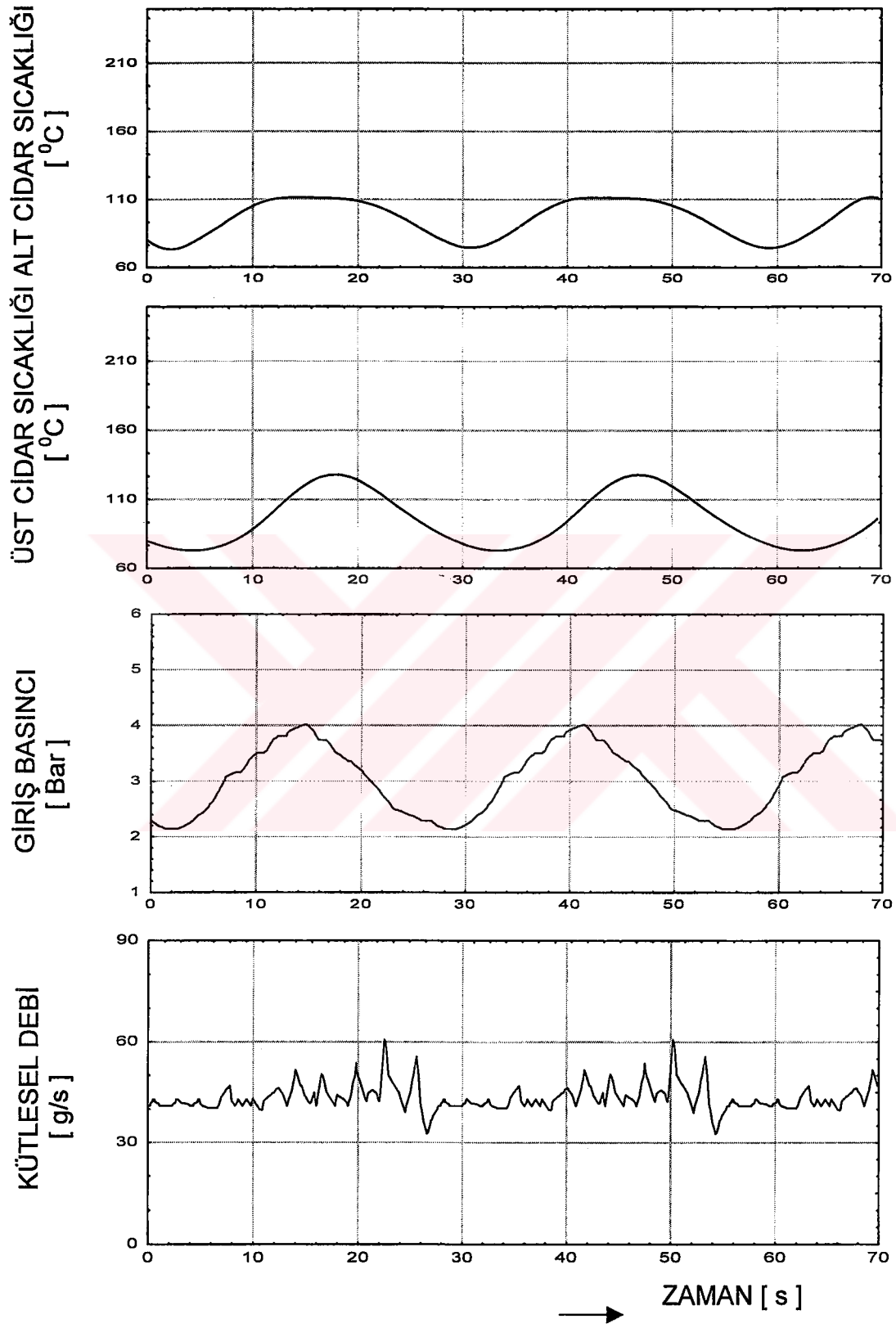
Şekil 7.65. Boru-4 için “ Basınç düşümü tipi osilasyonların” grafiksel olarak gösterimi. $T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=58.19\text{g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$



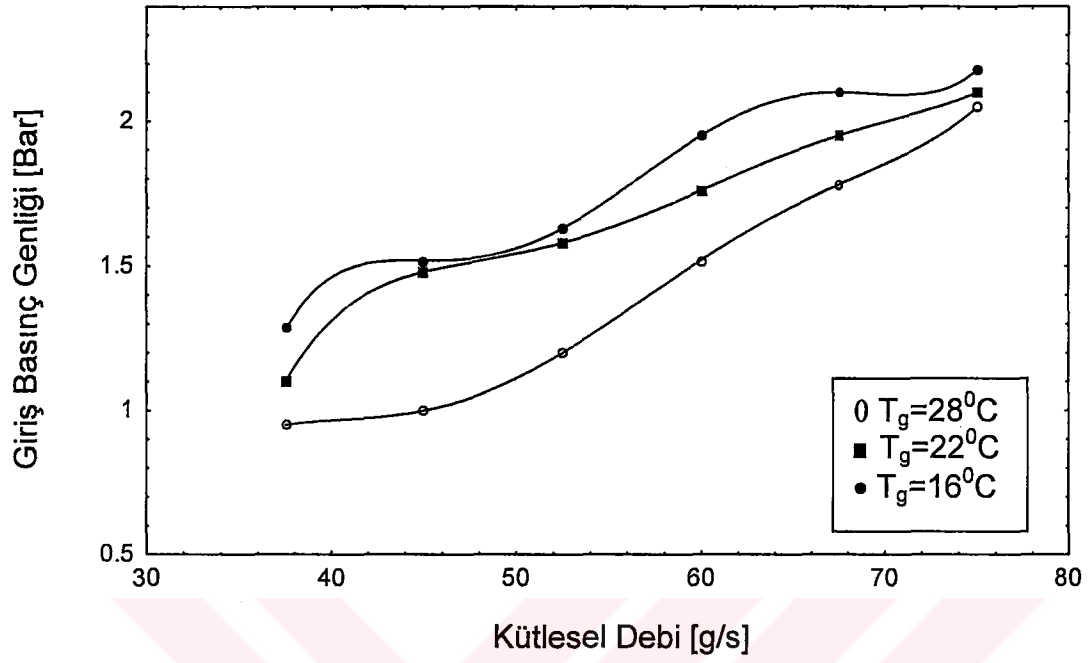
Şekil 7.66. Boru-4 için “ Basınç düşümü tipi osilasyonların” grafiksel olarak gösterimi. $T_g=16^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=41\text{g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$



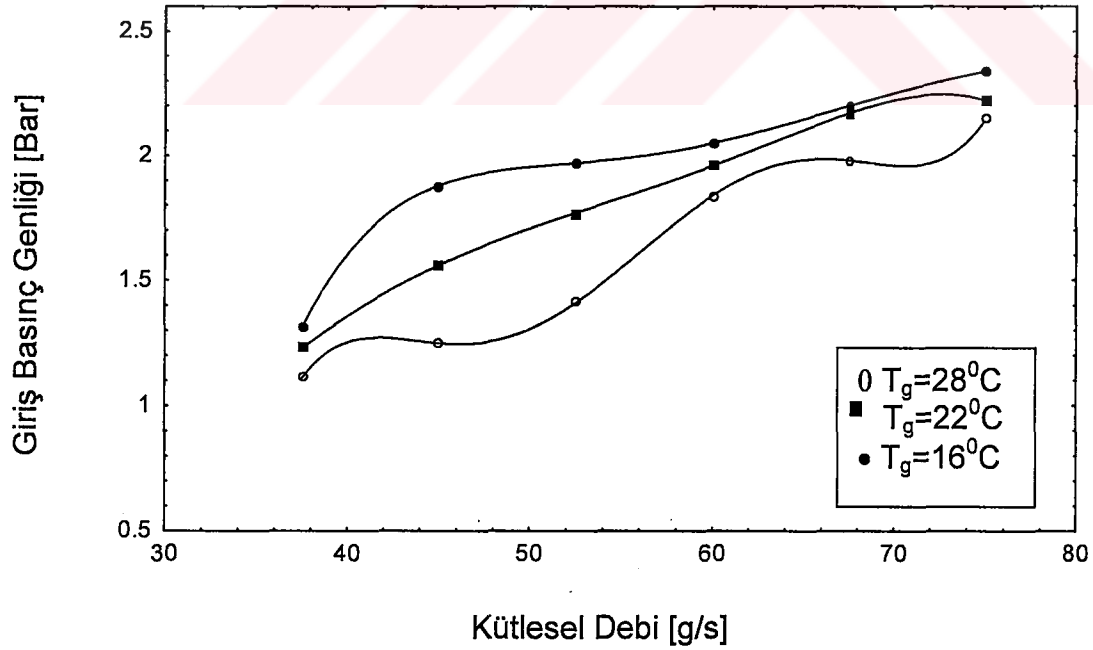
Şekil 7.67. Boru-5 için “ Basınç düşümü tipi osilasyonların” grafiksel olarak gösterimi. $T_g=28^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=58.19\text{g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$



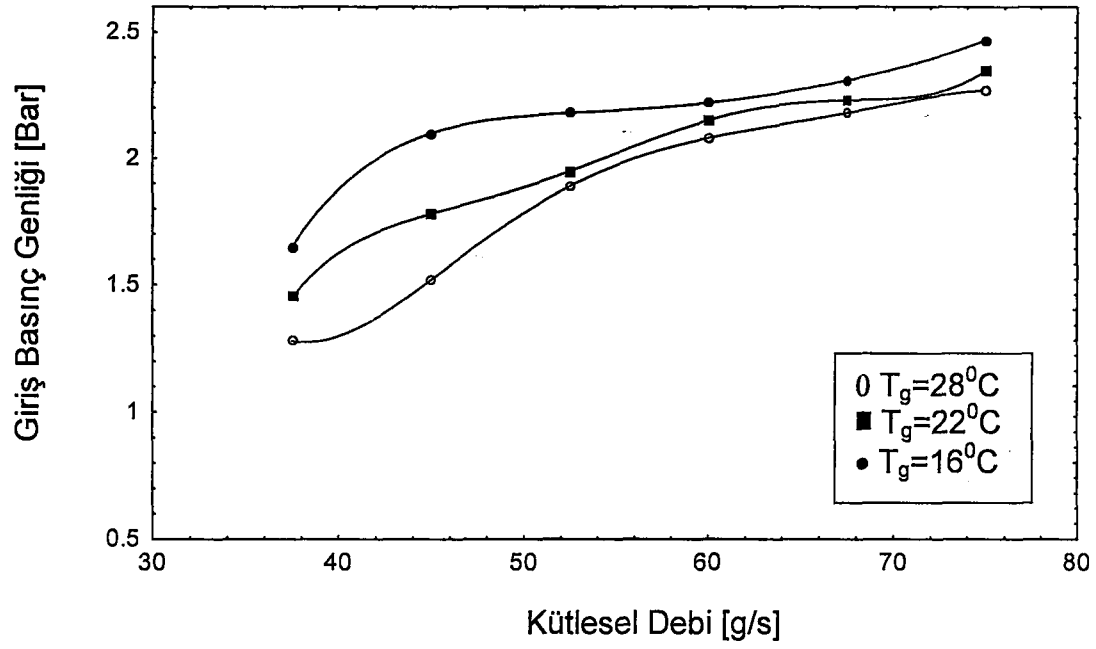
Şekil 7.68. Boru-5 için " Basınç düşümü tipi osilasyonların" grafiksel olarak gösterimi. $T_g=16^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=41\text{g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$



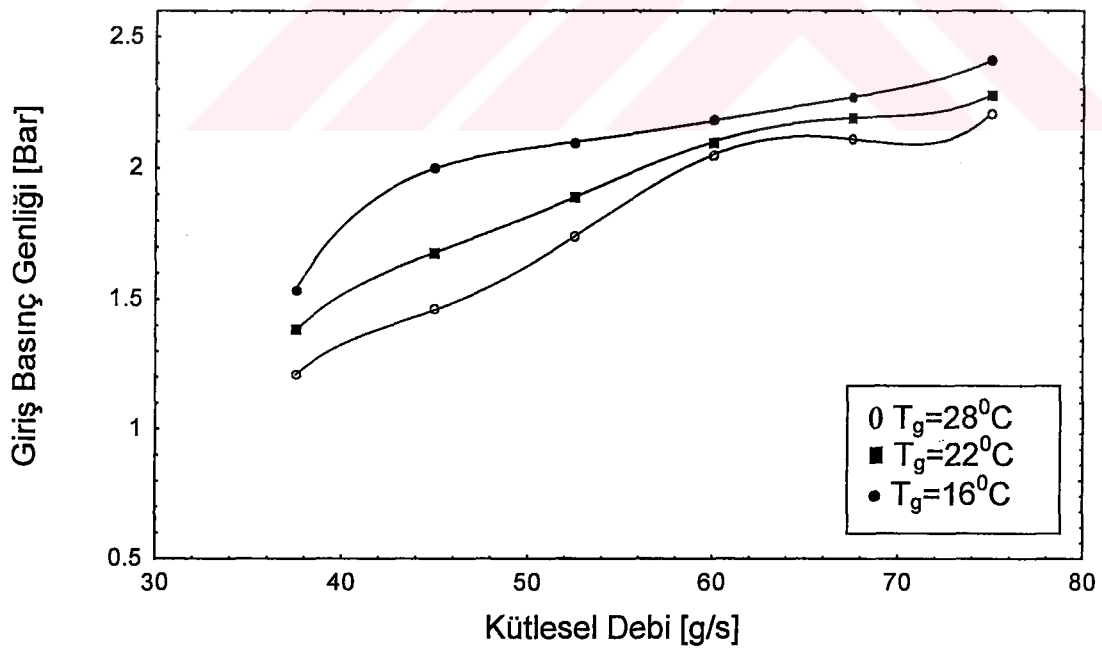
Şekil 7.69. Boru-1 için giriş basınç genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri



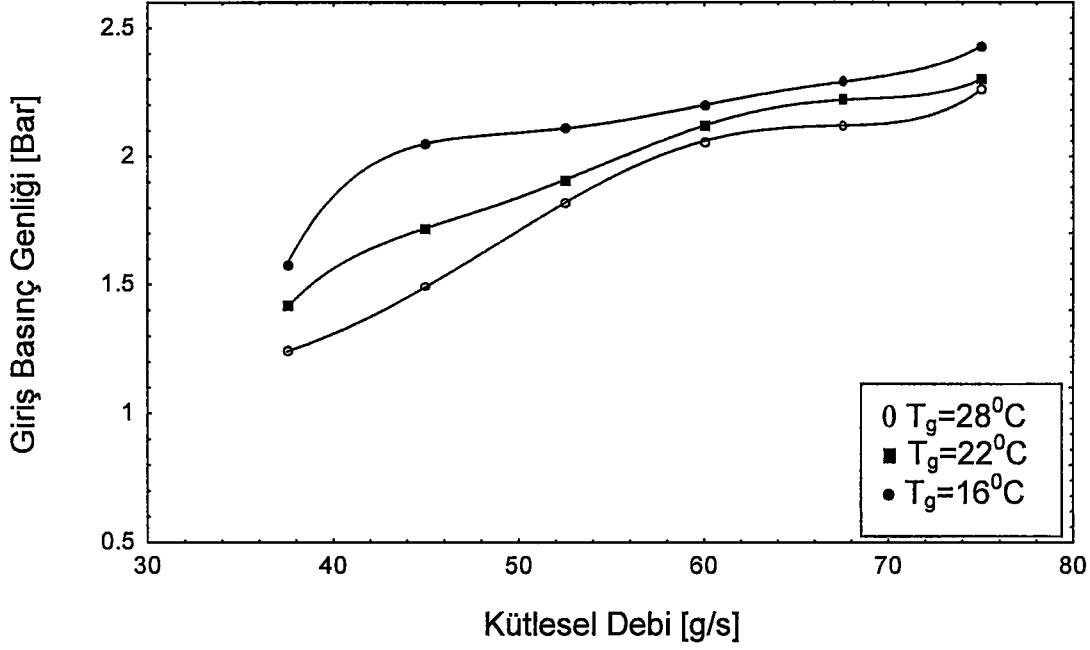
Şekil 7.70. Boru-2 için giriş basınç genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri



Şekil 7.71. Boru-3 için giriş basınç genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri



Şekil 7.72. Boru-4 için giriş basınç genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri

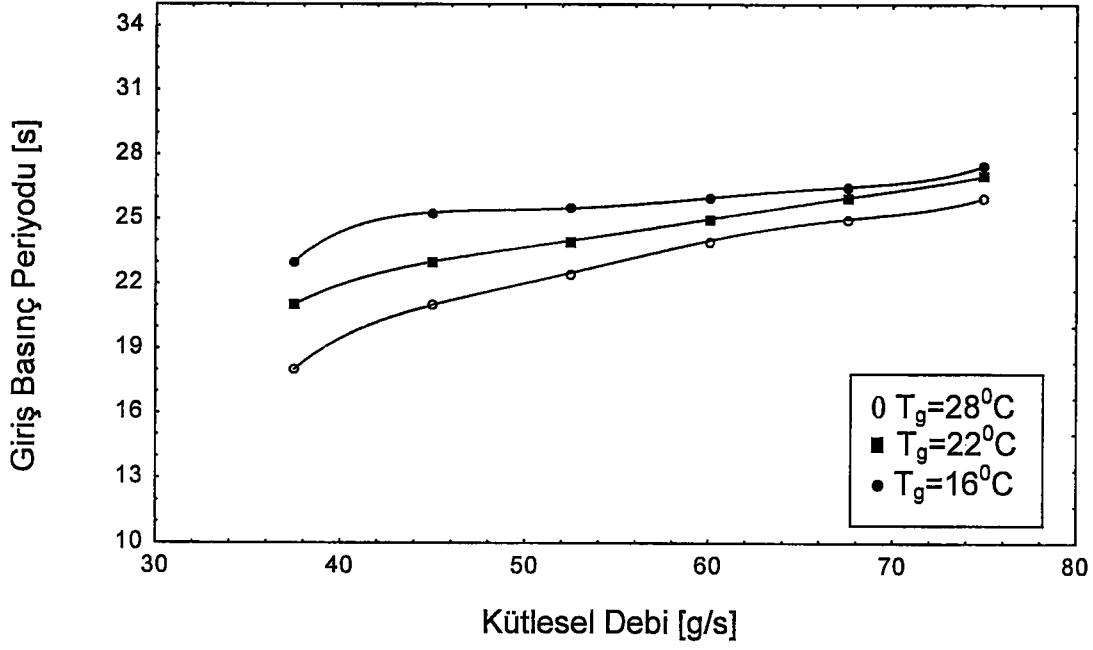


Şekil 7.73. Boru-5 için giriş basınç genliklerine kütlesel debi ve aşırı soğutmanın etkileri

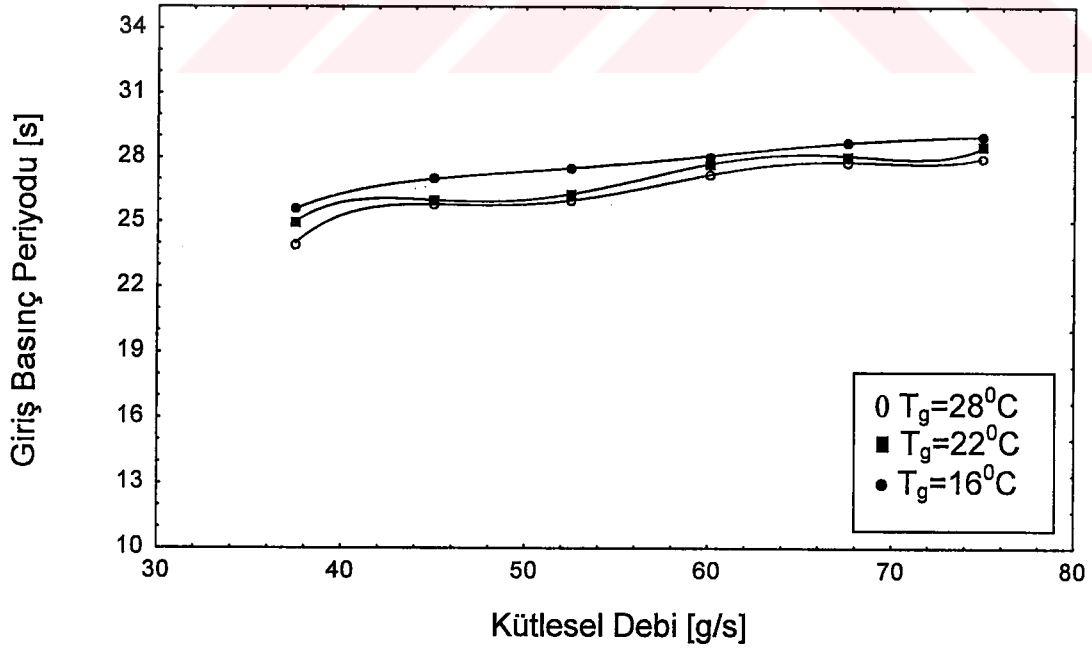
Basınç düşümü tipi osilasyonların periyotlarının her bir test borusu için kütlesel debi ve aşırı soğutma seviyesi ile nasıl bir değişime uğradıklarını tespit etmek amacıyla aşağıda Şekil 7.74, Şekil 7.75, Şekil 7.76, Şekil 7.77 ve Şekil 7.78 'de grafikler çizilmiştir.

Giriş basıncının periyotları tüm test borularında azalan giriş sıcaklığı ve kütlesel debi ile azalmaktadır. Boş boru ile yüzey artırım elemanları içeren diğer borular için elde edilen bu grafikler mukayese edilirse eğrilerin şekilleri ile periyotların limitleri arasında farklılıklar göze çarpmaktadır. Kararlı durum karakteristik eğrileri göz önünde bulundurulursa; boş boru için elde edilen eğrilerin maksimum ve minimum noktaları arasındaki basınç farkı diğer borulara göre daha az olması osilasyonların periyot ve genliklerini de yukarıdaki grafiklerde olduğu gibi etkilemektedir.

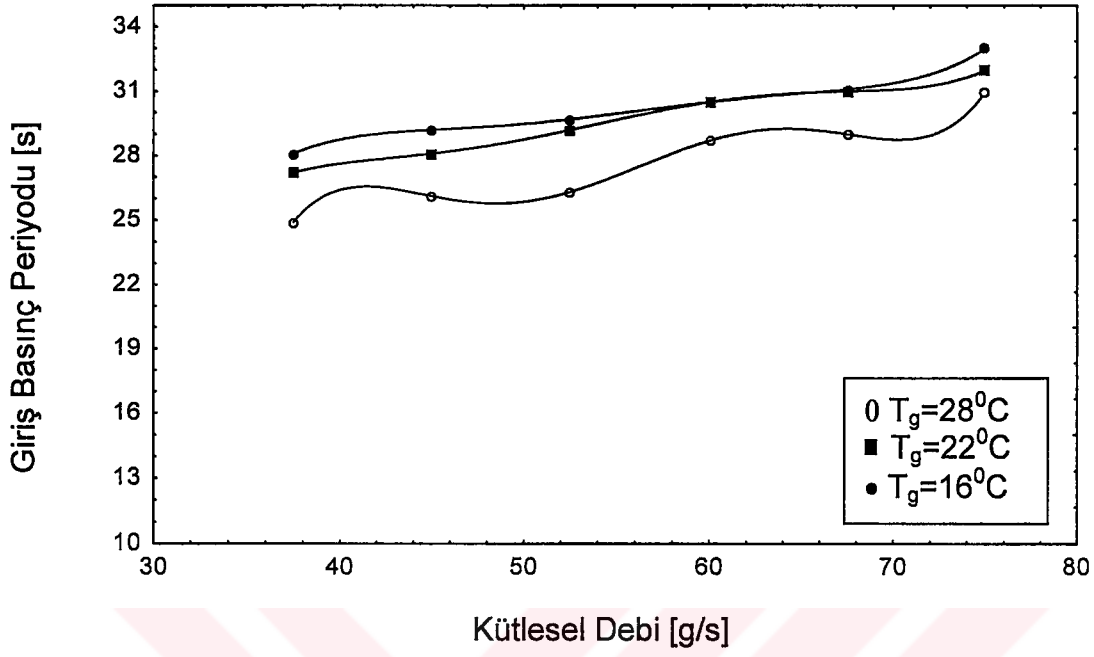
Şekil 7.79 ve Şekil 7.80 'de ise yukarıda gösterilen grafiklerden beş farklı test borusunda elde edilen giriş basıncının periyot ve genliklerini aynı giriş sıcaklığında mukayese etmek amacıyla birer grafik çizilmiştir. Yüzey artırım



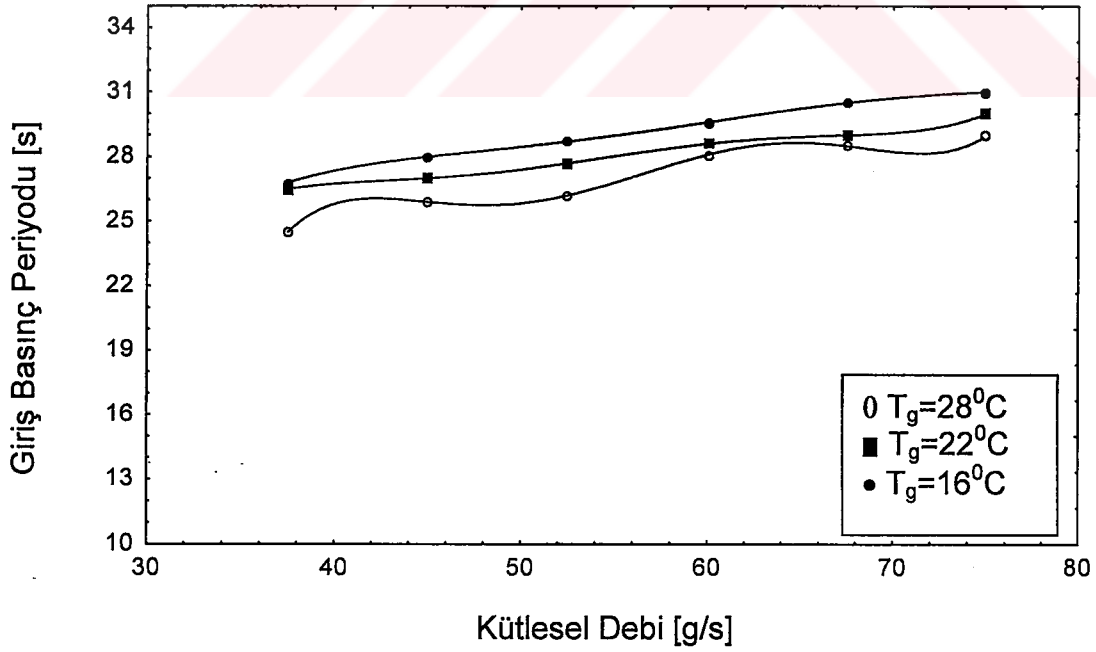
Şekil 7.74. Boru-1 için giriş basınç periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri



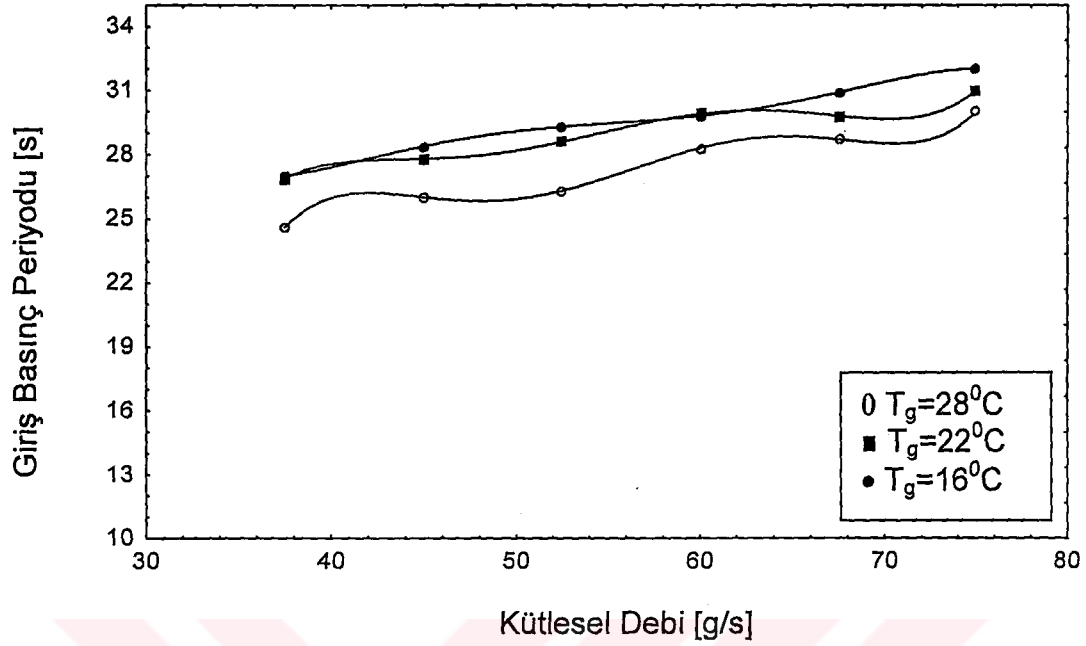
Şekil 7.75. Boru-2 için giriş basınç periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri



Şekil 7.76. Boru-3 için giriş basınç periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri



Şekil 7.77. Boru-4 için giriş basınç periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri

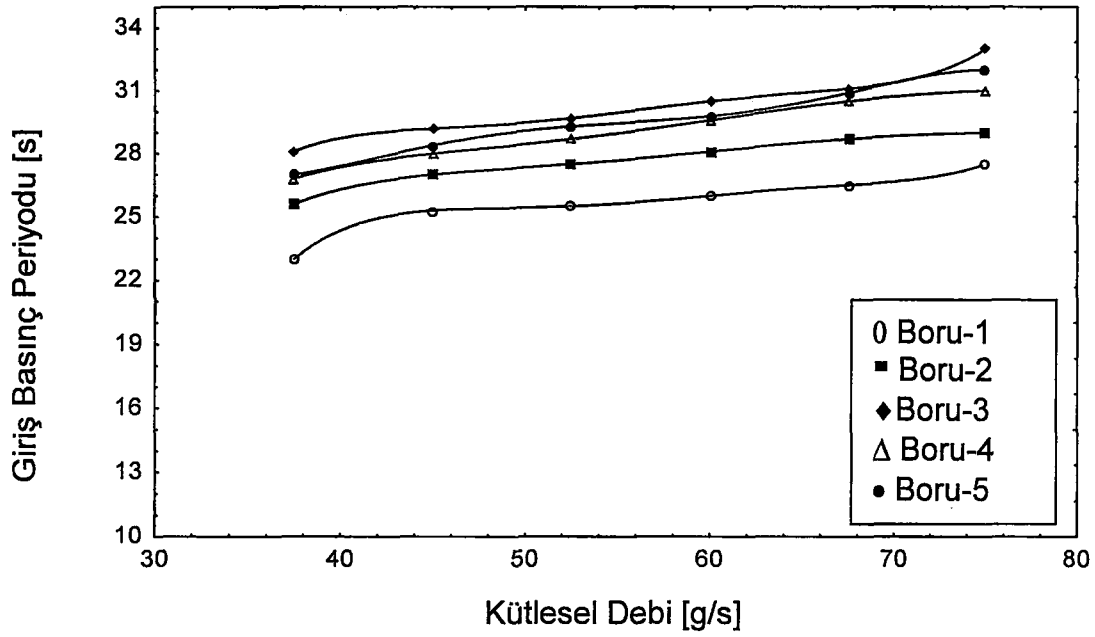


Şekil 7.78. Boru-5 için giriş basınç periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri

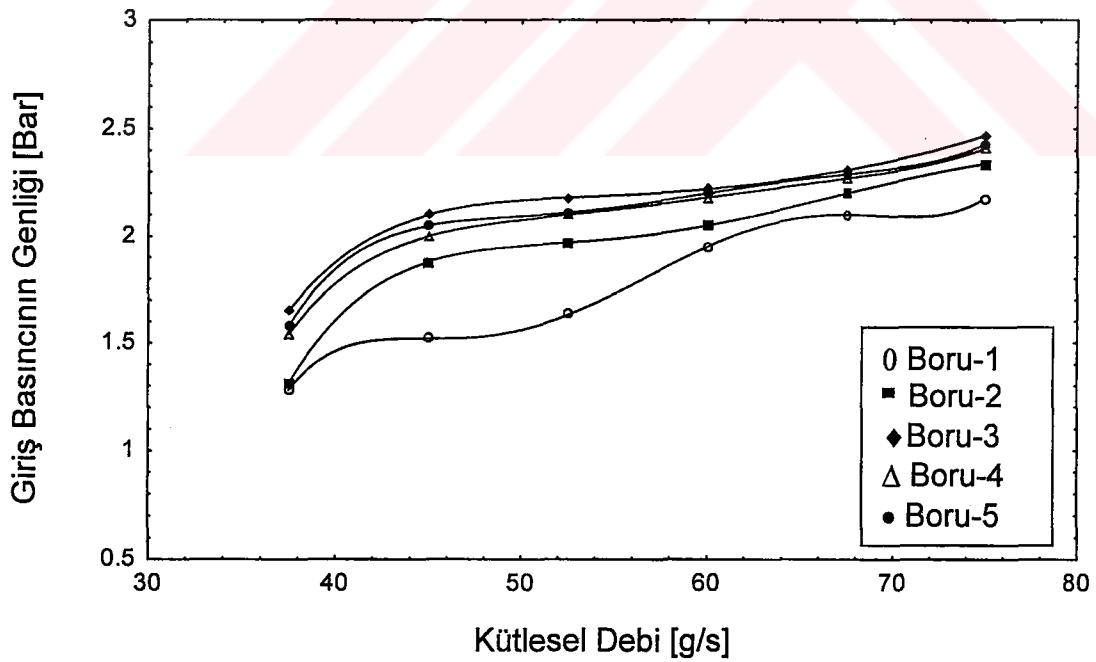
boruların genlikleri ve periyotları boş borudan daha yüksek değerlerdedir. En büyük genlik ve periyot değerleri Boru-3 için elde edilmiştir.

Kütleli debi değerlerindeki azalma ile beş farklı boru içinde genlikler azalmaktadır. Bunu da yine kararlı durum karakteristik eğrileri yardımıyla açıklanabilir. Bu eğrilerde çalışma noktasına yaklaşıldığı zaman basınç genliklerinde bir düşüş gözlenmektedir. Bilindiği gibi basınç düşümü tipi osilasyonlar limit çevriminin bu bölgesinde tam gelişmiş durumdadırlar. Bu nedenle bu noktada oluşan basınç osilasyonlarının genlikleri daha düşük olmaktadır.

Kararlı durum karakteristik eğrisinde gösterilen farklı basınç düşümleri katmanlı akışın her bir boru için farklı seviyelerde ortaya çıkmış olmasıdır. Yüzey artırılmış borularda daha az katmanlaşma meydana gelmektedir.



Şekil 7.79. Beş adet test borusu için giriş basınç periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutma seviyelerinin yaptıkları etkilerin karşılaştırılması. $T_g=16^{\circ}\text{C}$



Şekil 7.80. Beş adet test borusu için giriş basınç genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutma seviyelerinin yaptıkları etkilerin karşılaştırılması. $T_g=16^{\circ}\text{C}$

7.5. Basınç Düşümü ve Yoğunluk Değişim Tipi Osilasyonlar Arasında Meydana Gelen Osilasyonlar

Basınç düşümü tipi osilasyonlardan sonra yüzey artırımı borular için bir geçiş bölgesi bulundu. Bu geçiş osilasyonları süresince hem alt cidar hem de üst cidar sıcaklıkları hemen hemen sabit bir eğilim gösterirlerken aşağıda Şekil 7.81 'den de kolayca anlaşılacağı gibi kütleli debi ile giriş basınç değerleri zamanla değişmektedirler.

Kütleli debi ile giriş basıncında meydana gelen bu osilasyonlar süperimpozed denilen şekilde aynı anda sinüzoidal karakterde ortaya çıkmaktadırlar. Bu tip osilasyonlar giriş basınç osilasyon eğrisinin yükselen kısmı üzerinde daha büyük genliklere sahip olacak şekilde meydana gelmektedirler.

Kararsız akış ortamında meydana gelen süperimpozed osilasyonlara göre daha düşük kurulum derecesinde bu tip osilasyonlar yüzey artırımı borular için daha belirgin şekilde kendini göstermektedir.

Bu tip osilasyonları ilk defa 1978 'de Fukuda adlı araştırmacı paralel bir kanal çiftinde bulmuştur. 1991'de ise Xiao adlı başka bir araştırmacı başka bir kanal sisteminde geçiş osilasyonlarını tespit etmiştir [66,67].

Yüzde 1 ile 2 gibi çok düşük kurulum derecesinde kütleli debi ve giriş basınç değerlerindeki titreşimlerle ortaya çıkan bu tip süperimpozed osilasyonları çalışma esnasında gözlemleyebilmek her zaman mümkün olamamaktadır.

Şekil 7.81 'de Boru-2 için çizilen osilasyon grafiğine dikkat edilirse alt ve üst cidar sıcaklığı hemen hemen sabittir. Giriş basıncı osilasyon eğrisinde zamanla sinüzoidal tarzda periyodik titreşimler göze çarpmaktadır. Kütleli debi için çizilen osilasyon eğrisine de dikkat edilirse giriş basıncı osilasyon eğrisinin yükselen kısmına karşılık gelen noktalarda genlikler maksimum değerlere ulaşmaktadır. Basınç genliklerinin minimum değerlere sahip olduğu kısımlara

karşılık gelen kütleli debi osilasyonlarının genlikleri de minimum değerlere düşmektedir.

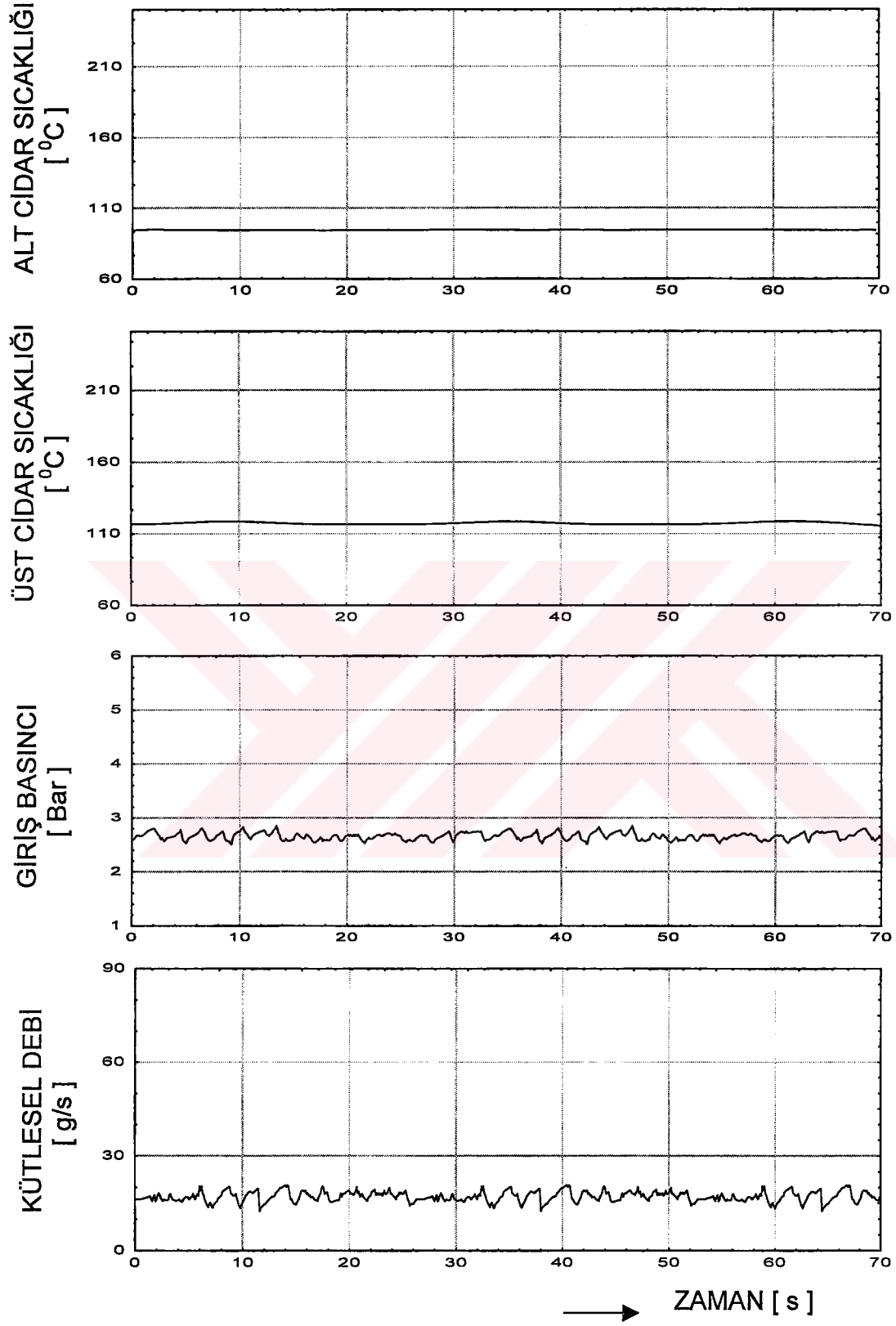
7.6. Yoğunluk Değişim Tipi Osilasyonlar

Bundan önceki bölümlerde irdelenen kararlı durum karakteristik eğrileri göz önünde bulundurulursa yoğunluk değişim tipi osilasyonlar pozitif eğimli bölgede ortaya çıktıkları tespit edilmiştir. Boş boruda bu tip osilasyonlar negatif eğimli bölgede de meydana gelmektedirler.

Basınç düşümü tipi osilasyonlarla süperimpozed tarzda ortaya çıkan yoğunluk değişim osilasyonları giriş basınç osilasyon eğrilerinin yükselen kısmı üzerinde ortaya çıkmaktadırlar. Bu bölgede tam kaynama söz konusu olduğu için akış ortamında tespit edilen osilasyonlar yoğunluk değişim tipi osilasyonlardır.

Kütleli debi ve giriş basınç değerlerinde titreşimlerle ortaya çıkan yoğunluk değişim tipi osilasyonlarının periyot ve genlikleri basınç düşümü tipi osilasyonların periyot ve genliklerine göre daha düşük değerlere sahiptirler. Yoğunluk değişim tipi osilasyonları; tam katmanlı akış rejiminin hidrodinamik davranışları sonucu meydana gelmektedirler. Bu nedenle bu tip osilasyonlar boş boruda yüzey artırımı borulara nazaran daha erken yani daha büyük kütleli debi değerlerinde tespit edilmektedirler. Herhangi bir iki fazlı kararsız akış ortamında yoğunluk değişim tipi osilasyonların oluşması için akışta void fraction denilen uygun bir boşluk oranının olması gerekmektedir. Yoğunluk değişim tipi osilasyonlarını aynı zamanda sistem içerisinde yüksek ve düşük yoğunluklara sahip entalpi dalgalarının geçmesi şeklinde de izah edilebilir. Genlikler bu nedenle düşük ve yüksek yoğunluklu dalgalar arasındaki yoğunluk farkından meydana gelmektedir.

Yüzey artırımı borularda bulunan yay ve benzeri elemanlar akışa kazandırdıkları türbülans nedeniyle boru boyunca sıvı ve buhar fazlarının



Şekil. 7.81. Boru-2 için “Düşük kalitede oluşan geçiş osilasyonlarının” grafiksel gösterimi. $T_g=19^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=16.2 \text{ g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$

karışık şekilde akmalarını sağlamaktadır. Bu da yüzey artırımı borularda boş boruya nispeten daha az katmanlaşmanın oluşmasına neden olmaktadır. Ancak yüzey artırımı borularda tüm çapraz kesit alanına yayılan buhar fazı void fraction dediğimiz uygun miktarda boşluk oranını temin etmektedir. Boş borularda ise daha yüksek düzeyde katmanlaşma meydana gelmekte ve bunun sonucunda daha yoğun olan sıvı faz tabakası alt cidar boyunca, daha az yoğun olan buhar fazı da üst cidar boyunca akmaktadır. Böylece alt cidarı işgal eden sıvı faz tabakası akış ortamında uygun void fraction oranının azalmasına sebep olmaktadır. Bununla beraber bütün test borularında belirli bir seviyede elde edilen void fraction nedeniyle yoğunluk değişim tipi osilasyonlarına rastlanılmaktadır.

Literatürde dikey borular için elde edilen yoğunluk değişim tipi osilasyonlarla bu yatay sistemde elde edilen yoğunluk değişim osilasyonları mukayese edilirse; bu tip osilasyonlar yatay borularda dikey borulara göre daha fazla gelmektedir. Çünkü yukarıda açıklandığı gibi uygun void fraction oranları yatay borularda daha çok elde edilmektedir. Aynı şekilde dikey borularda tıpkı yüzey artırımı borularda olduğu gibi buhar fazı tüm kesit alanını kaplamıştır. Bu nedenle yoğunluk değişim tipi osilasyonların oluşmasını sağlayan uygun void fraction oranları dikey borularda daha az temin edilmektedir.

Aşağıda Şekil 7.82, Şekil 7.83, Şekil 7.84, Şekil 7.85, Şekil 7.86, Şekil 7.87 ve Şekil 7.88 'de her bir test borusu için elde edilen yoğunluk değişim tipi osilasyonlar gösterilmektedir. Şekillere dikkat edilirse bütün test boruları için alt ve üst cidar sıcaklıkları hemen hemen sabittir. Giriş basınç osilasyonları ile kütleli debide oluşan osilasyonlar süperimpozed karakterde aynı anda ortaya çıkmaktadırlar. Aynı borular için daha önceki şekillerde gösterilen basınç düşümü tipi osilasyonların periyot ve genlikleri ile bu tip osilasyonların periyot ve genlikleri mukayese edilirse yoğunluk değişim tipi osilasyonlarının periyot ve genlikleri oldukça düşük limitlerde ortaya çıktıkları anlaşılabacaktır. Yüzey artırımı borularla boş boruda oluşan yoğunluk değişim tipi osilasyonlar arasında çok önemli bir fark yoktur. Ancak katmanlı akışın hidrodinamik davranışları sonucu

ortaya çıkan yoğunluk değişim tipi osilasyonlar azda olsa her bir test borusu için bazı değişiklikler sergilemektedirler.

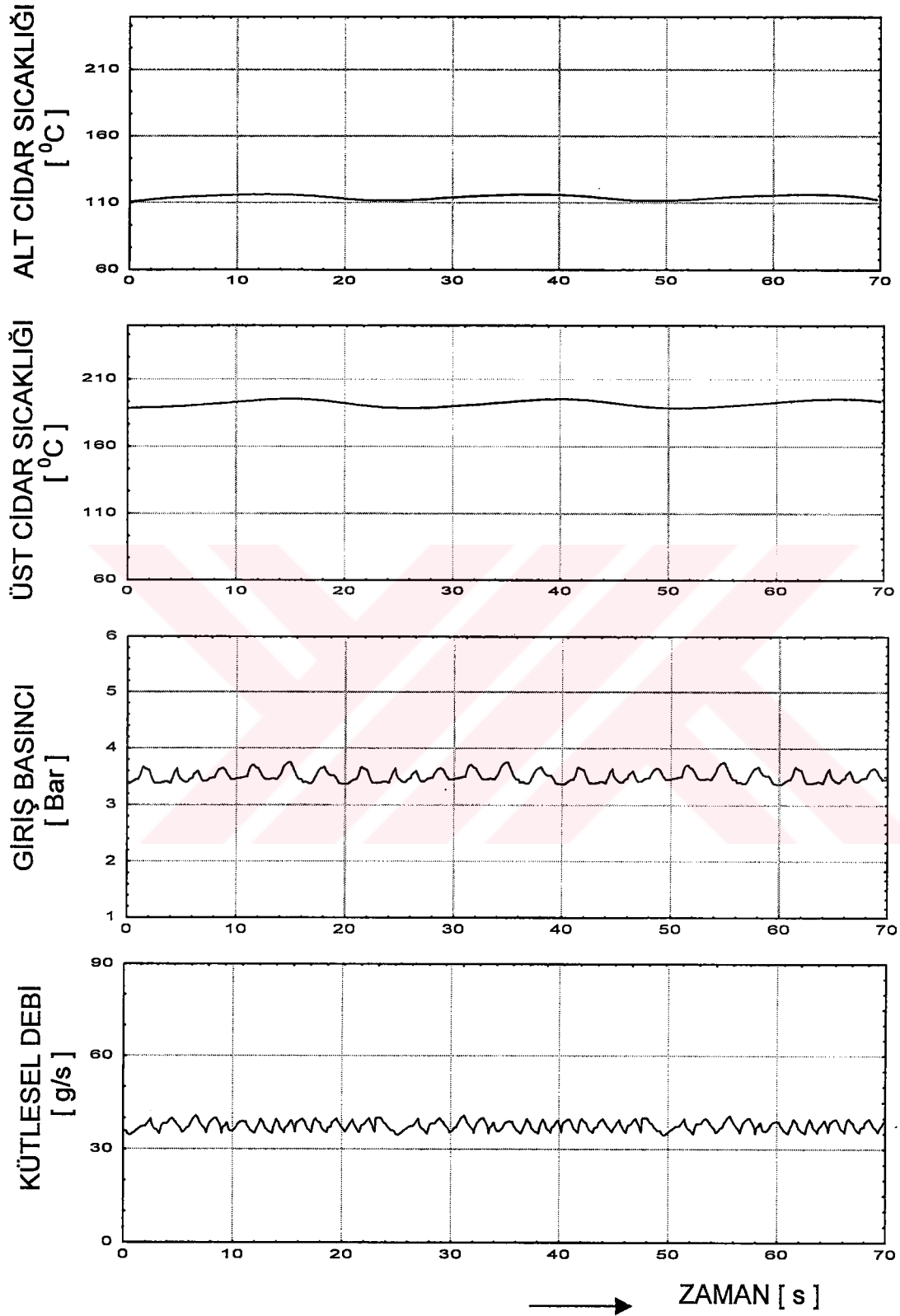
Boru-1 için çizilen yoğunluk değişim tipi osilasyon grafiklerine dikkat edilirse; azalan kütleli debi değerleri ile osilasyonların genlikleri de azalmaktadır. Kütleli debi artınca farklı yoğunluğa ve entalpi değerlerine sahip dalgalar arasındaki yoğunluk farkı da artacağından genliklerde artacaktır. Kütleli debinin bu tip osilasyonların periyotları üzerine etkisi pek net değildir. Ancak azalan kütleli debi ile yoğunluk değişim osilasyonların periyotlarında genellikle bir artışın olduğunu söylenebilir. Çünkü akış ortamında buhar fazı partikülleri sıvı fazındaki partiküllerden daha hızlı hareket etmektedir. İki fazlı bölgede bu akışkan partikülleri daha ivmeli bir harekete sahiptir. Bu yüzden kaldırma kuvvetlerinin etkisiyle üst cidar boyunca biriken buhar fazının sıvı fazına göre sahip olduğu düşük ısı transfer katsayısı nedeniyle yoğunluk değişim tipi osilasyonlarının periyotları sıvı fazındaki partiküllerin daha hızlı olduğu debi ve ivmeli akışkan arasındaki ısı dengesiyle düzenlenmektedir.

Yine Boru-1 için çizilen yoğunluk değişim osilasyon eğrilerine dikkat edilirse; azalan giriş sıcaklığı ile yani aşırı soğutma seviyesinin artışıyla osilasyon genlikleri azalmaktadır. Çünkü hem akışkan partiküllerinin sahip olduğu hız limitleri artmakta hem de farklı yoğunluğa ve entalpi seviyelerine sahip fazlar arasındaki yoğunluk farkları da azalmaktadır. Boş boru için elde edilen yoğunluk değişim osilasyonlarının periyotları ortalama 25 saniye, maksimum giriş basınç genliği 0.38 Bar, maksimum kütleli debi genliği 8 g/s civarında olmaktadır. Alt cidar genliği maksimum 6 °C, üst cidarda ise maksimum genlik 11 °C olmaktadır. Alt cidar boyunca daha ziyade sıvı fazı aktığından maksimum sıcaklık 119 °C civarında iken üst cidar daha ziyade buhar fazı ile kaplıdır ve üst cidarda burn-out olayına sebep olan dry-out şartı söz konusu olduğundan sıcaklık limitleri daha yüksek değerlerde seyretmektedir. Boru-1 için elde edilen maksimum sıcaklık 207 °C civarındadır. Boru-2 , Boru-3, Boru-4 ve Boru-5 için çizilen yoğunluk değişim tipi osilasyon grafiklerine dikkat edilirse; aynı deneysel şartlarda osilasyon periyot ve genliklerinde çok az bir oranda artış söz konusu

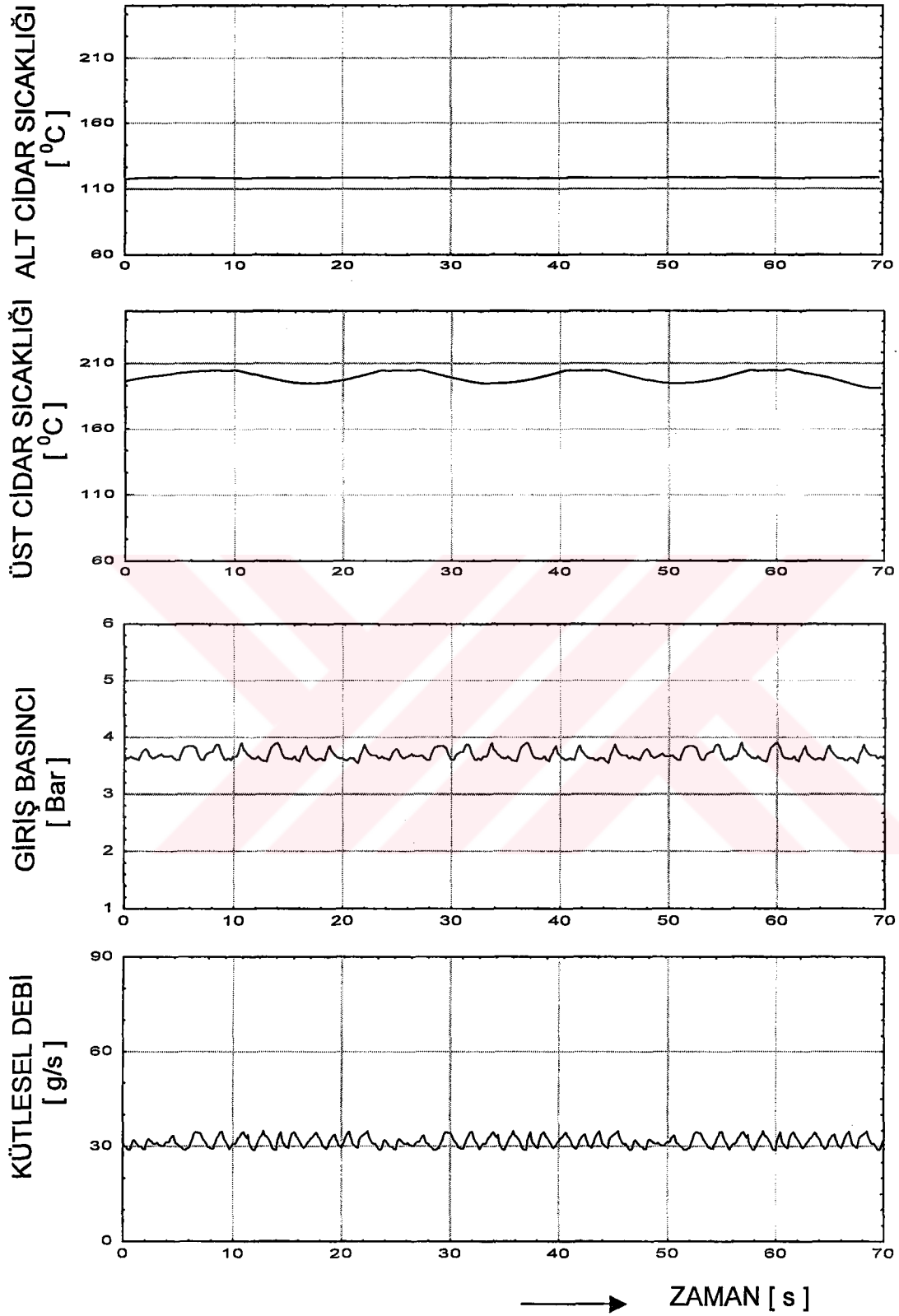
olmaktadır. Yüzey artırımı borular arasında bu tip osilasyonların periyot ve genlikleri açısından hemen hemen hiçbir fark yoktur. Bu borularda elde edilen maksimum genlik değerleri, alt cidarda 7°C , üst cidarda 12°C , giriş basıncında 0.40 bar, Kütlesel debide ise 8.5 g/s civarında olmaktadır. Ancak bu borularda elde edilen alt ve üst cidar sıcaklık limitleri boş boruya nazaran düşmektedir. Bu borularda maksimum cidar sıcaklık değerleri alt cidarda 115°C , üst cidarda 200°C civarında olmaktadır. Yoğunluk değişim tipi osilasyonlarının periyotları bu borularda da boş borularda olduğu gibi ortalama 25 saniye civarında seyretmektedir. Yine bu borularda elde edilen maksimum giriş basınç limitleri boş boruya göre daha yüksek olmaktadır. Maksimum basınç genliği bu borularda 4.2 bar olurken boş boruda bu değer 3.9 bar olarak elde edilmektedir.

Deneyisel çalışmalar sonucunda her bir test borusu için elde edilen ve yukarıda detaylı olarak irdelenen yoğunluk değişim tipi osilasyonların grafikleri aşağıdadır.

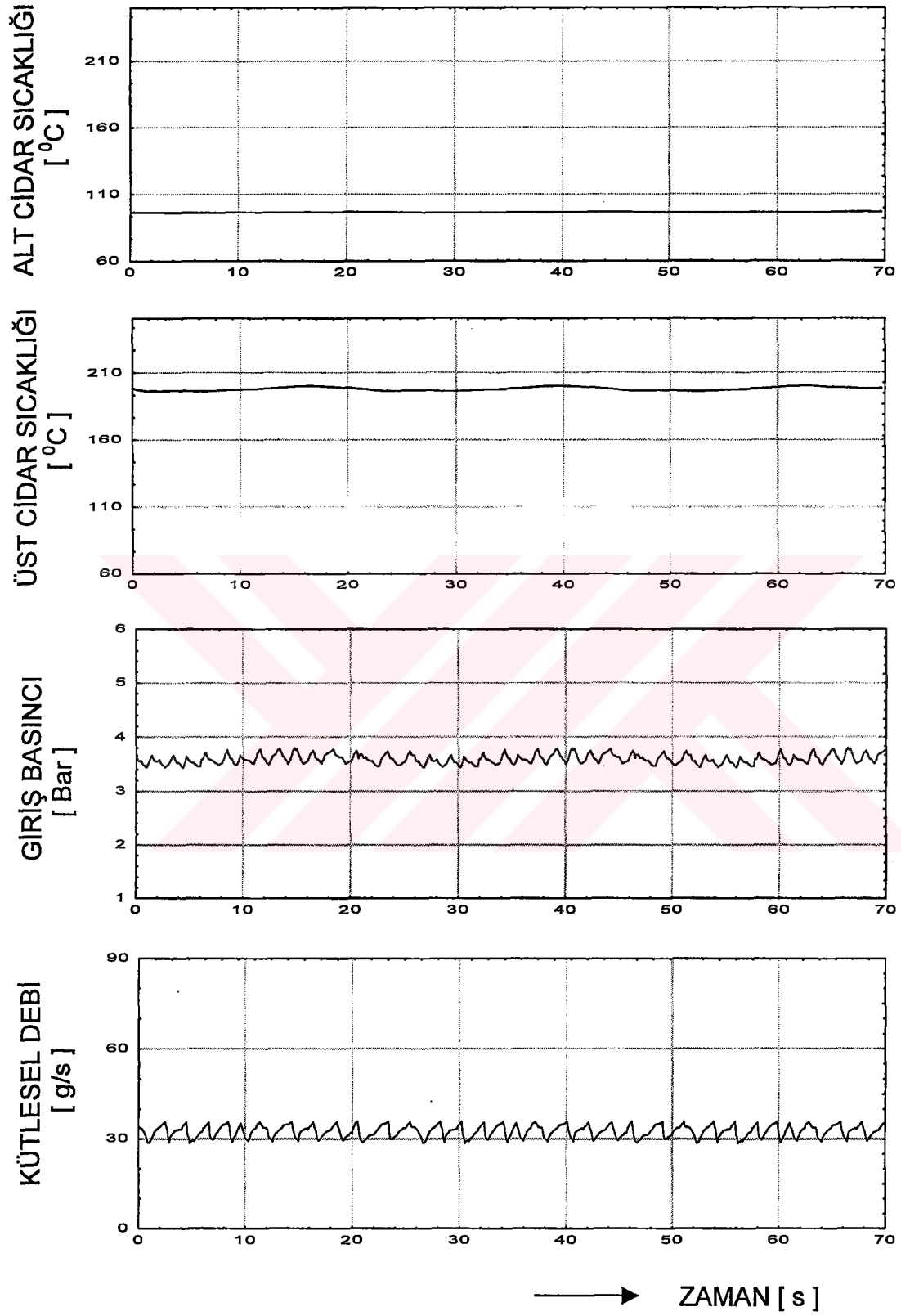
Aşağıdaki şekillerde beş farklı test borusu için elde ettiğimiz yoğunluk değişim tipi osilasyonların genlik ve periyotlarına kütlesel debinin ve aşırı soğutma seviyesinin yaptığı etkileri daha net olarak görmek amacıyla aşağıdaki şekiller çizilmiştir. Şekil 7.89 ve Şekil 7.90 'da her bir test borusu için elde edilen yoğunluk değişim tipi osilasyonlarına kütlesel debinin etkileri gösterilmiştir. Daha önceki bölümde söylendiği gibi azalan kütlesel debi ile beraber osilasyon genlikleri de azalmaktadır. Akışkan giriş basınç genliklerinde her bir test borusu için kütlesel debide meydana gelen azalma ile elde edilen değişiklikler mukayese edilirse; yüzey artırımı borularda daha fazla azalma meydana gelmektedir. Ancak bu borularda akışa kazandırılan türbülans nedeniyle daha az katmanlaşma oluşmakta ve farklı yoğunluğa sahip akışkan dalgaları karışık akarak bu osilasyonların oluşmasında önemli rol oynayan uygun void fraction oranını etkilemektedir. Dikey borularda olduğu gibi yüzey artırımı borularda da yoğunluk değişim tipi osilasyonlar yatay boş borulara göre daha geç yani daha küçük kütlesel debi değerlerine doğru kaymakta ve osilasyonların periyot ve genlikleri de azalmaktadır.



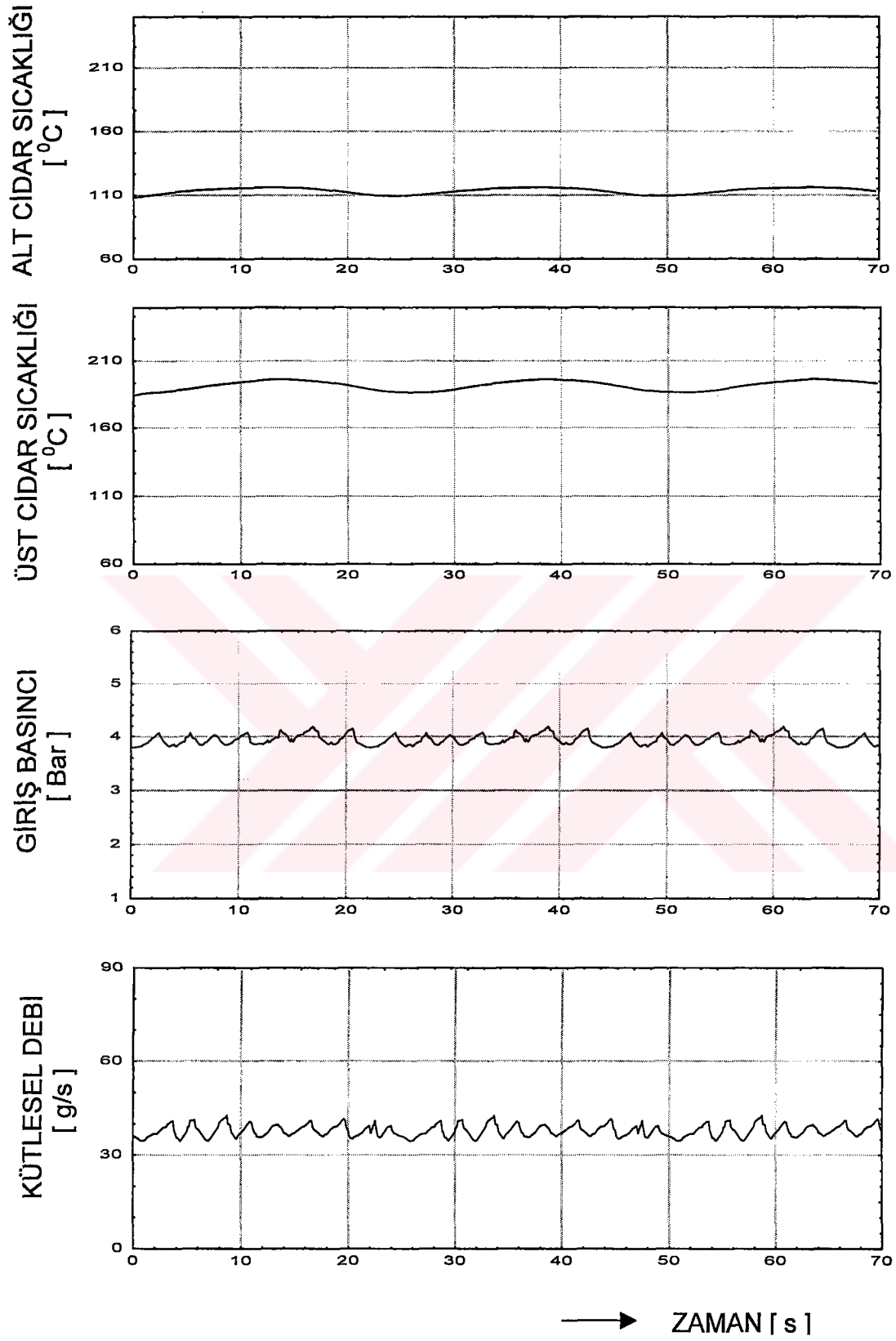
Şekil 7.82. Boru-1 için “ Yoğunluk değişim tipi osilasyonların” grafiksel gösterimi. $T_g=19^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=36\text{g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$



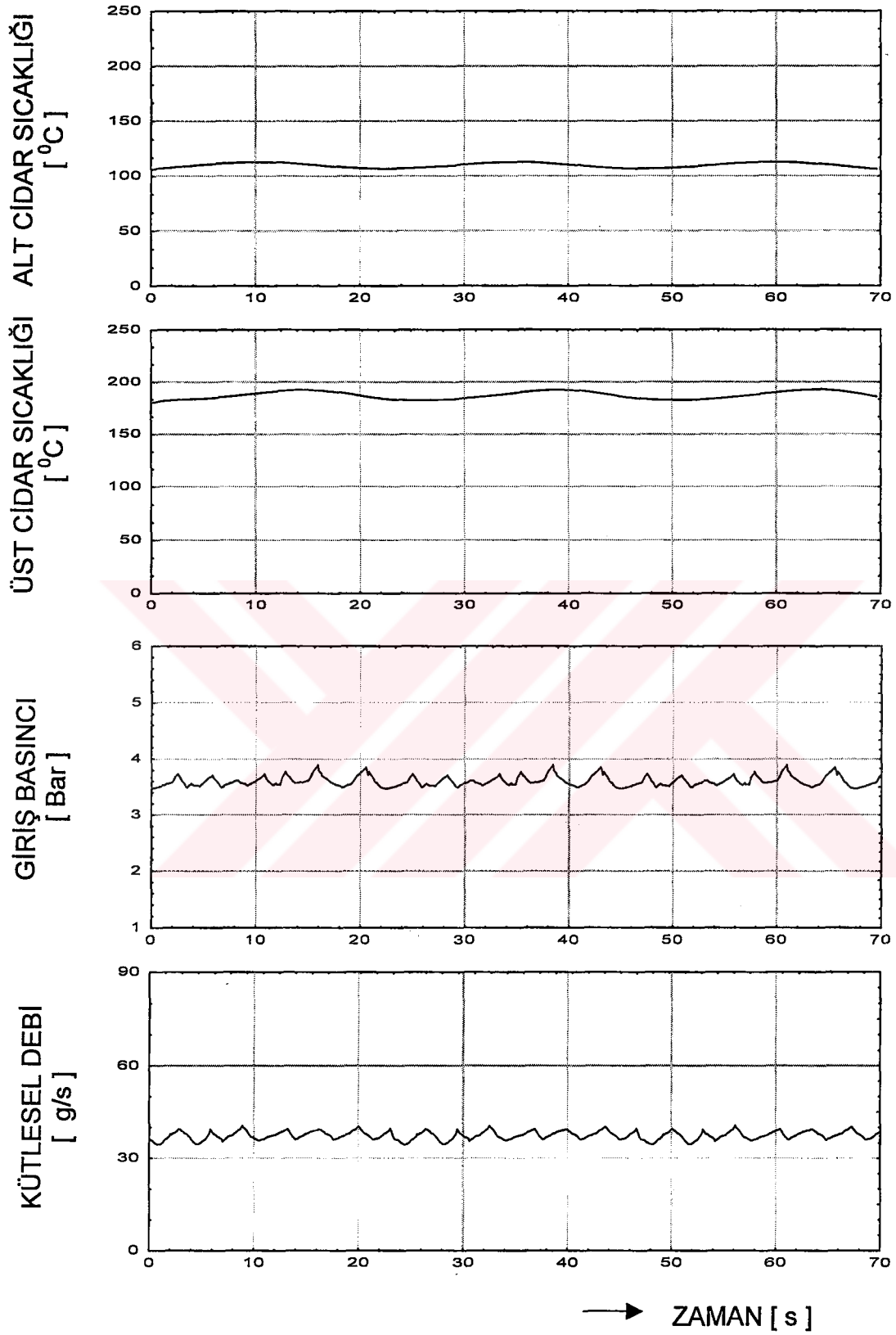
Şekil 7.83. Boru-1 için " Yoğunluk değişim tipi osilasyonların" grafiksel gösterimi. $T_g=19^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=29.79\text{g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$



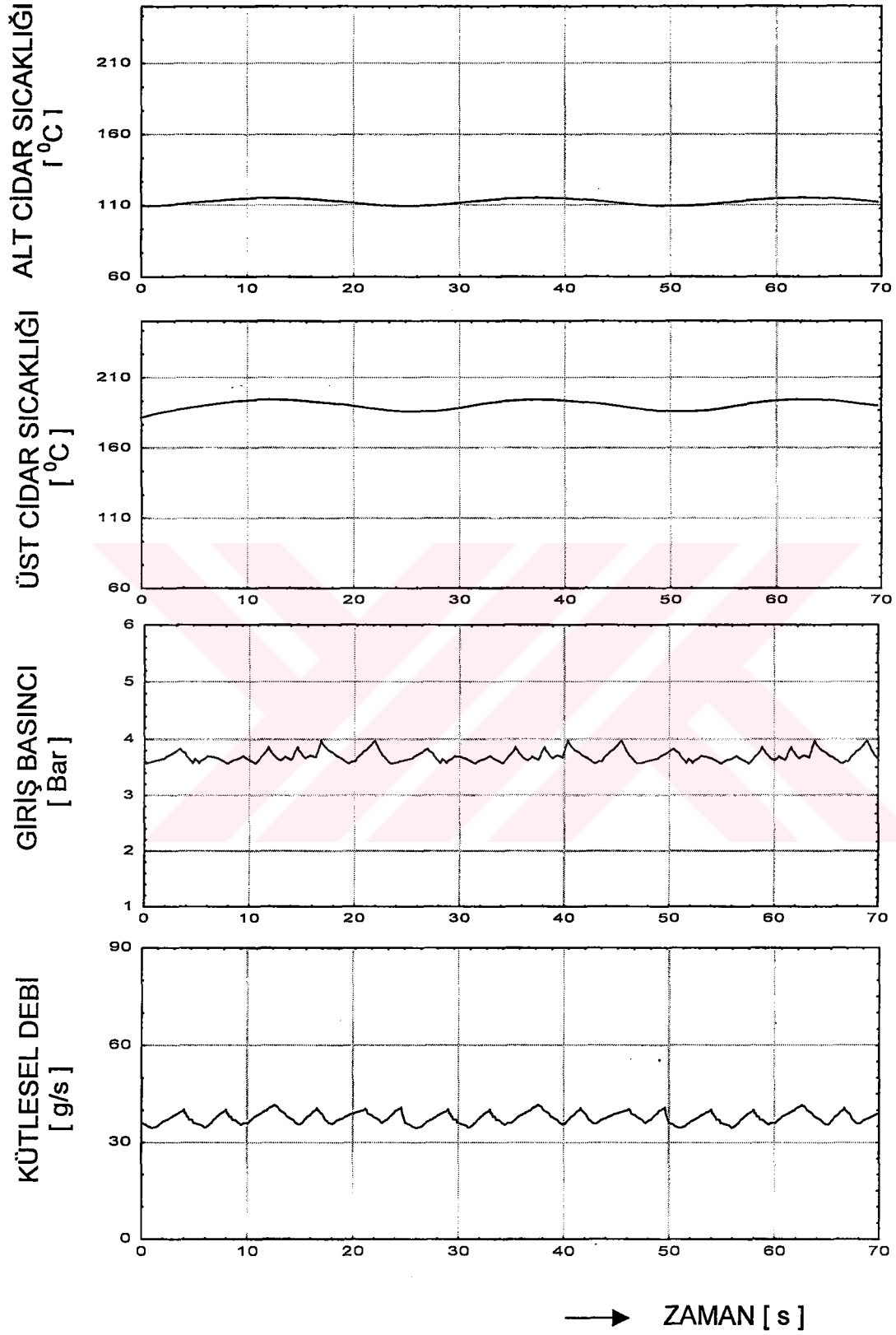
Şekil 7.84. Boru-1 için “ Yoğunluk değişim tipi osilasyonların” grafiksel gösterimi. $T_g=16^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=30.79\text{g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$



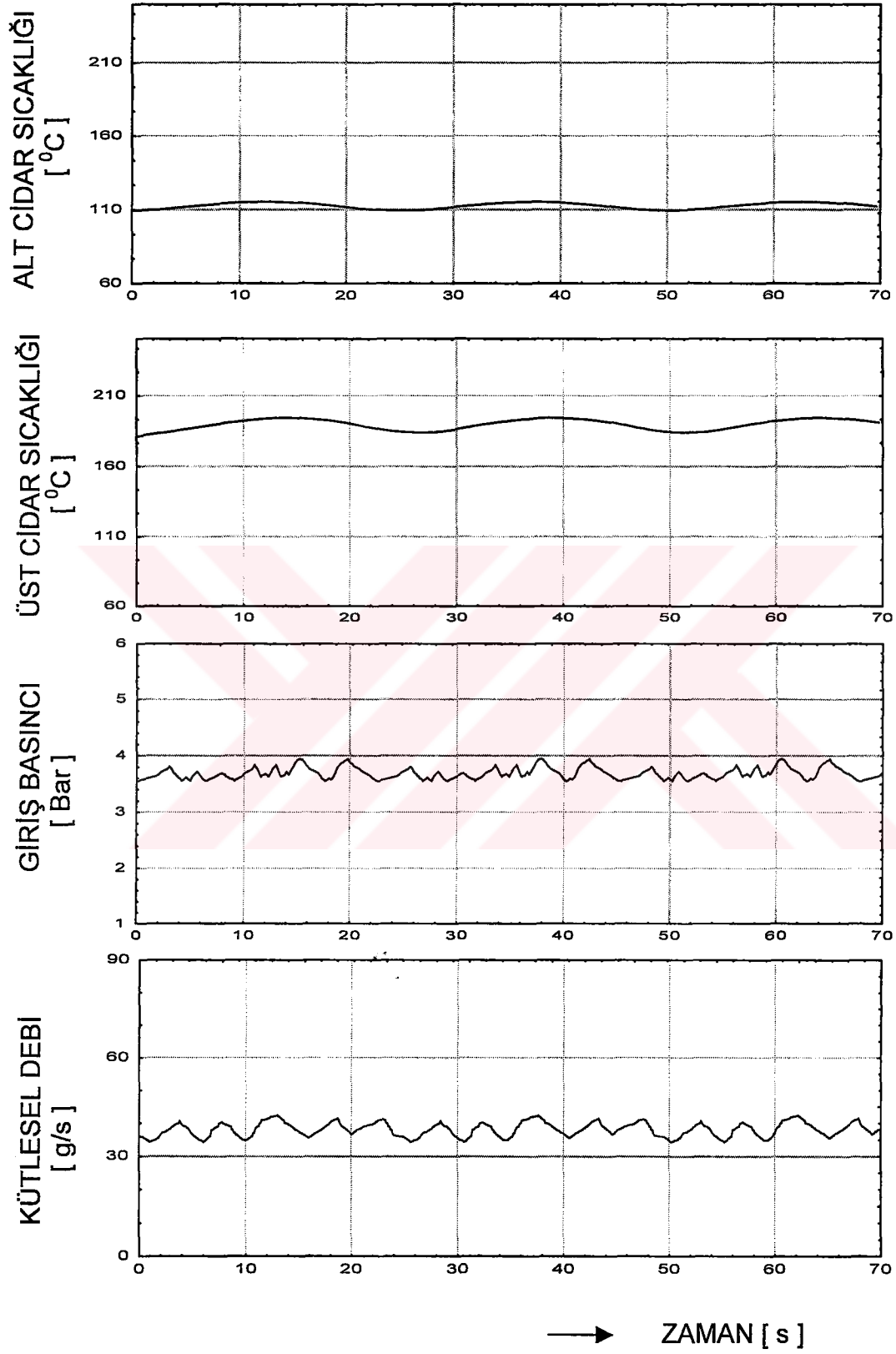
Şekil 7.85. Boru-2 için “ Yoğunluk değişim tipi osilasyonların ” grafiksel gösterimi. $T_g=19^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=36\text{ g/s}$, $Q=16\text{ kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.86. Boru-3 için " Yoğunluk değişim tipi osilasyonların " grafiksel gösterimi. $T_g=19^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=36\text{g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$



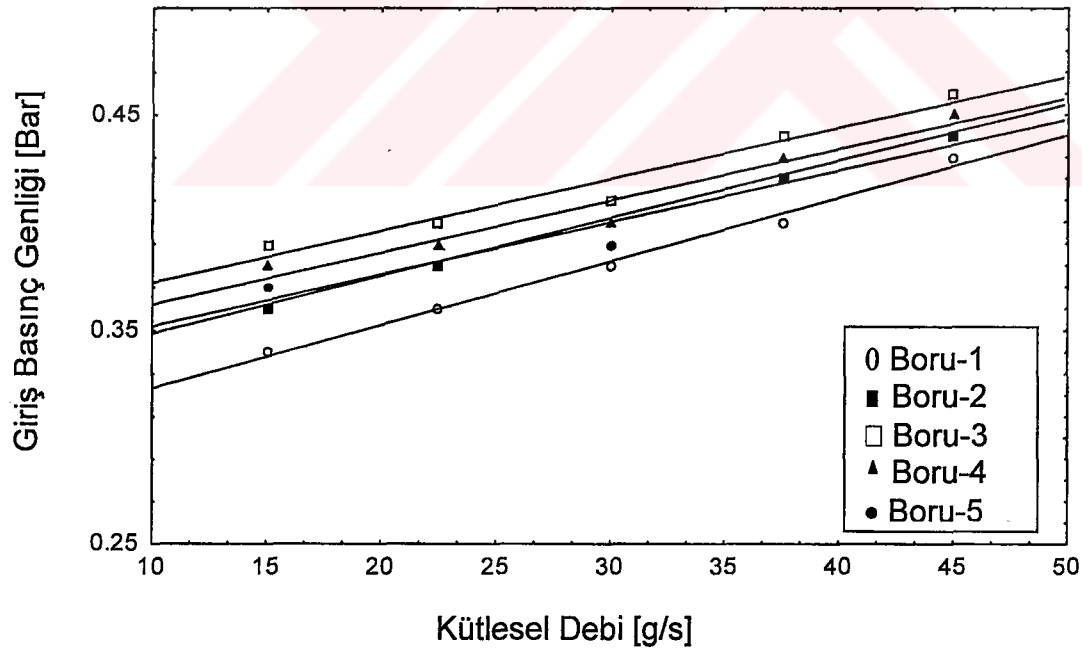
Şekil 7.87. Boru-4 için “ Yoğunluk değişim tipi osilasyonların” grafiksel olarak gösterimi. $T_g=19^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=36\text{g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$



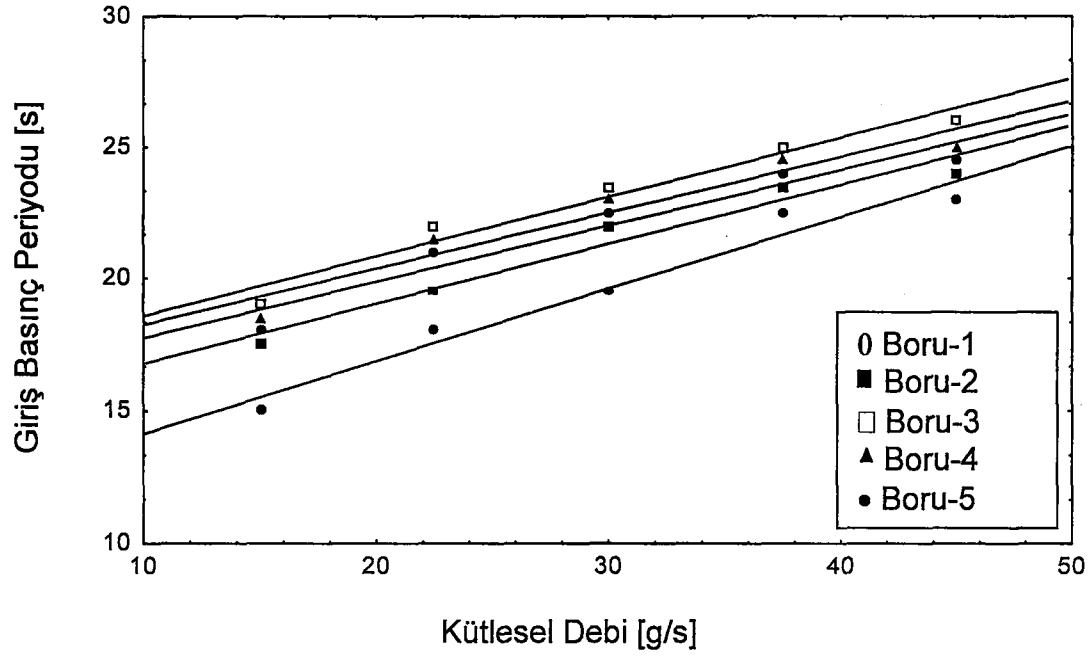
Şekil 7.88. Boru-5 için “ Yoğunluk değişim tipi osilasyonların” grafiksel olarak gösterimi. $T_g=19\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=36\text{ g/s}$, $Q=16\text{ kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{ Bar}$, $\beta=0.448$

Şekil 7.89 'dan da görüldüğü gibi giriş basıncının genlikleri azalan kütleli debi değerleri ile azalmaktadır. Bütün borularda kütleli debideki azalma ile giriş basıncında elde edilen azalma lineer karakterde gerçekleşmektedir. Genliklerin limitleri mukayese edilirse; yüzey artırımı borularda boş boruya göre önemli bir farklılık olmasa bile daha yüksek değerler elde edilmiştir. En yüksek genlik değeri Boru-3 için 0.46 Bar olarak elde edilirken en küçük genlik değeri boş boru için 0.34 Bar elde edilmiştir.

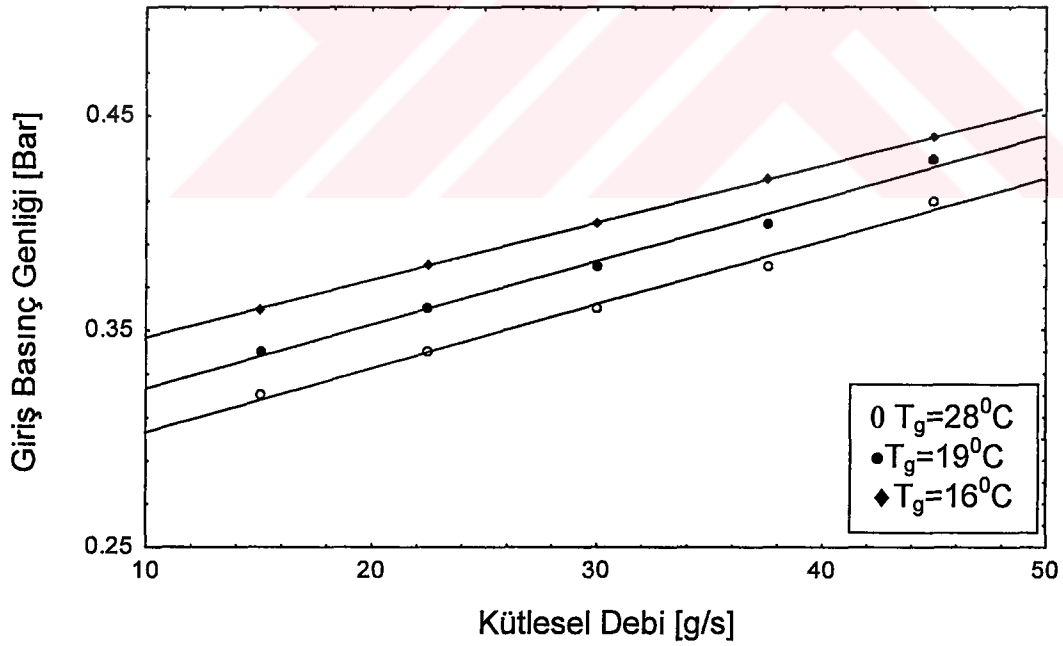
Şekil 7.90 'a dikkat edilirse azalan kütleli debi ile osilasyonların periyotları da lineer bir karakterde azalmaktadır. Yine periyotların limitleri yüzey artırımı borularda boş boruya göre biraz daha yüksek olmaktadır. Maksimum periyot Boru-3 için 26 saniye, minimum periyot ise Boru-1 için 15 saniye civarında elde edilmektedir.



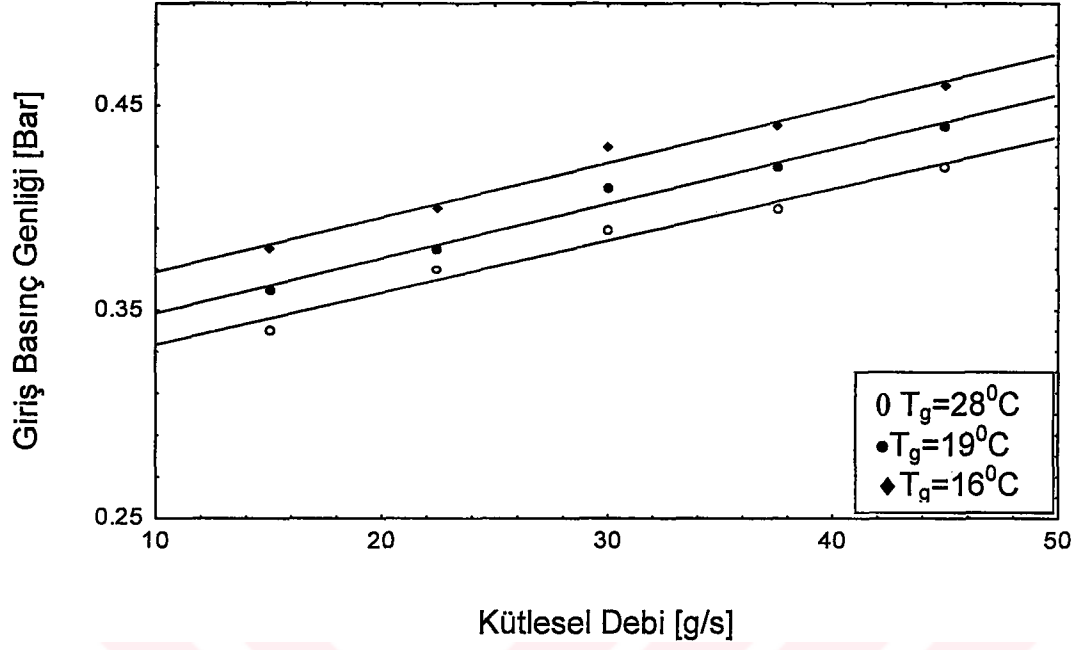
Şekil 7.89. Yoğunluk değişim tipi osilasyonların genliklerine kütleli debinin etkileri. $T_g=19^{\circ}\text{C}$, $\beta=0.448$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$



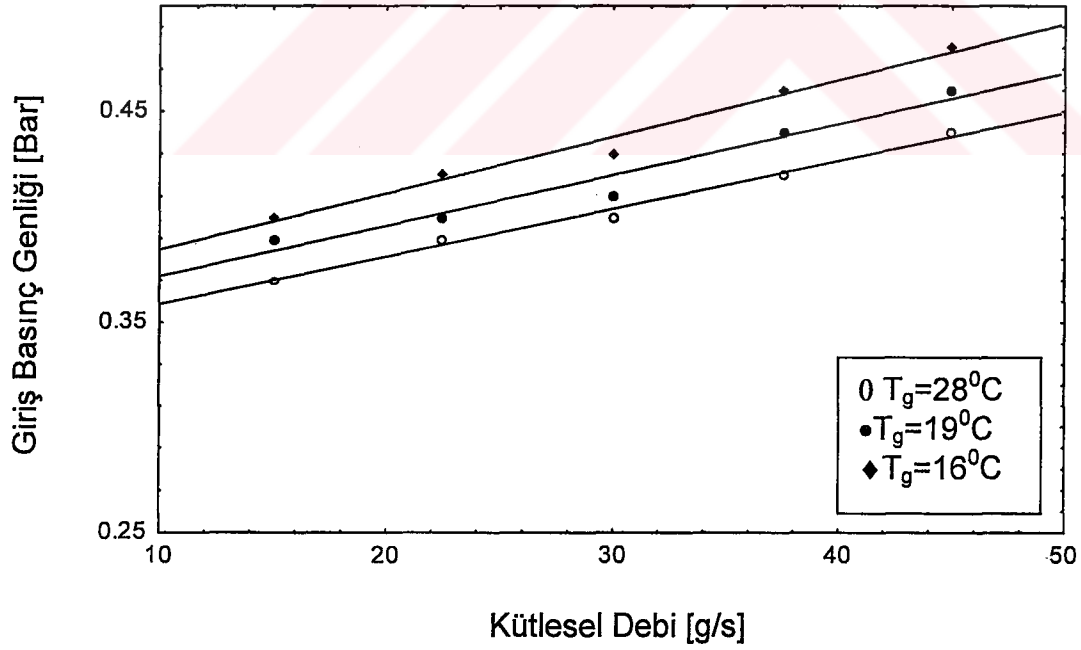
Şekil 7.90. Yoğunluk değişim tipi osilasyonların periyotlarına kütleli debinin etkileri. $T_g=19^\circ\text{C}$, $\beta=0.448$, $P_{\text{sis}}= 7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$



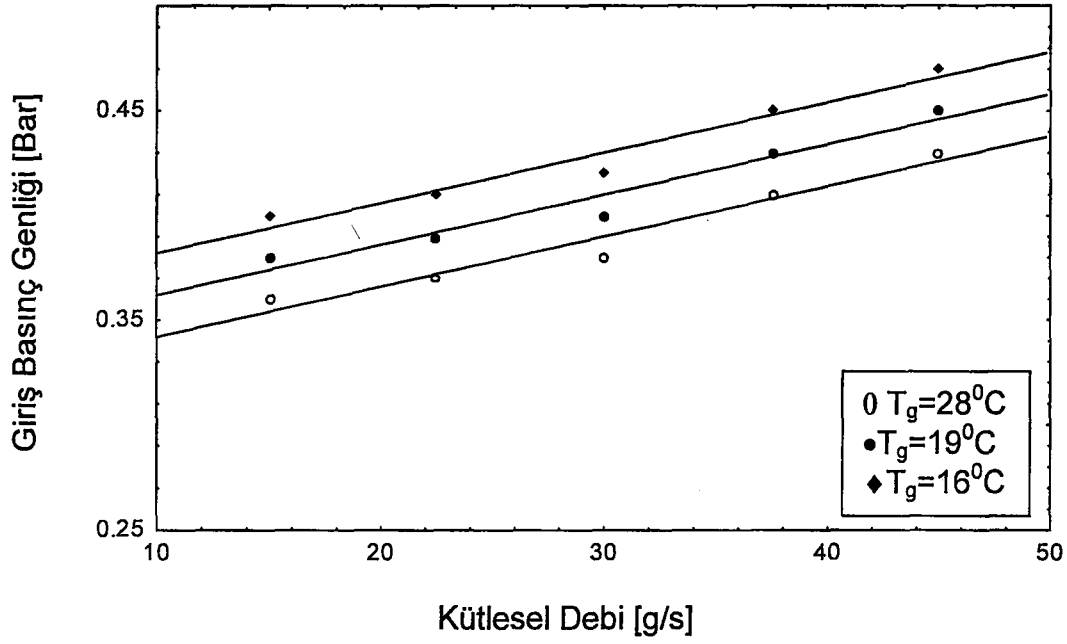
Şekil 7.91. Boru-1 için yoğunluk değişim tipi osilasyonların genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutma seviyesinin etkileri. $\beta=0.448$, $P_{\text{sis}}= 7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$



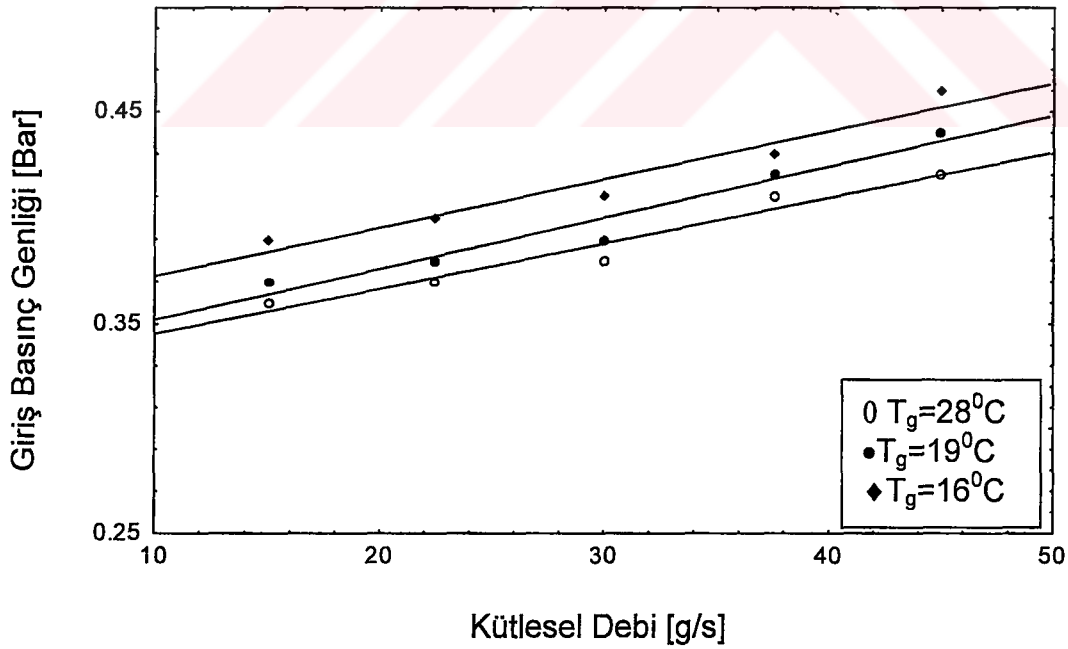
Şekil 7.92. Boru-2 için yoğunluk değişim tipi osilasyonların genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutma seviyesinin etkileri. $\beta=0.448$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$



Şekil 7.93. Boru-3 için yoğunluk değişim tipi osilasyonların genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutma seviyesinin etkileri. $\beta=0.448$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$



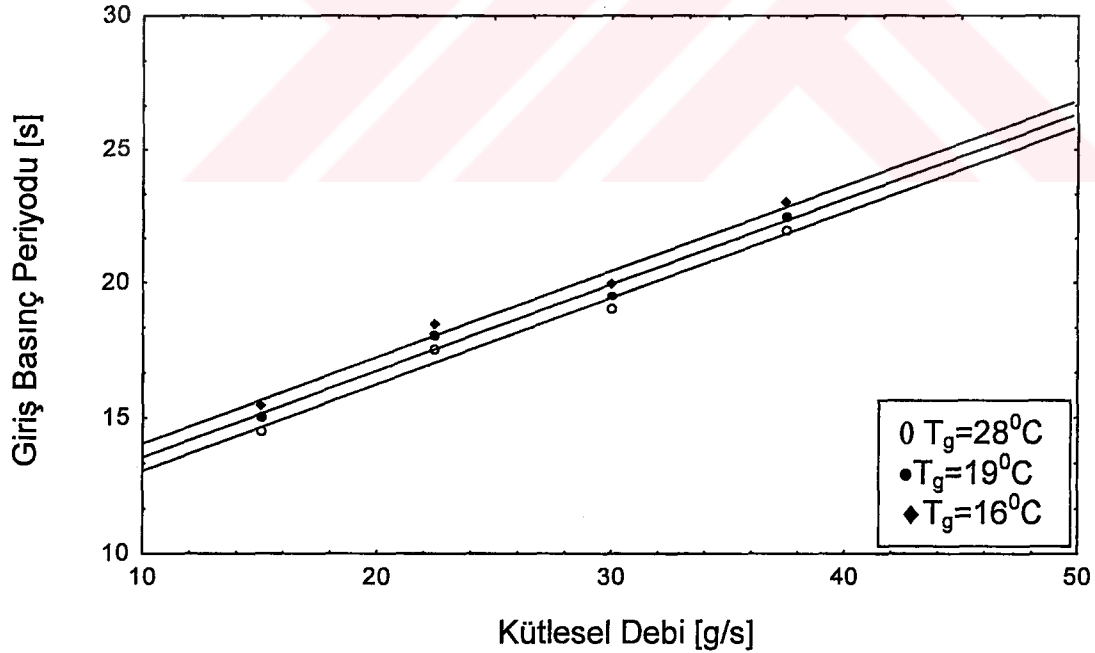
Şekil 7.94. Boru-4 için yoğunluk değişim tipi osilasyonların genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutma seviyesinin etkileri. $\beta=0.448$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$



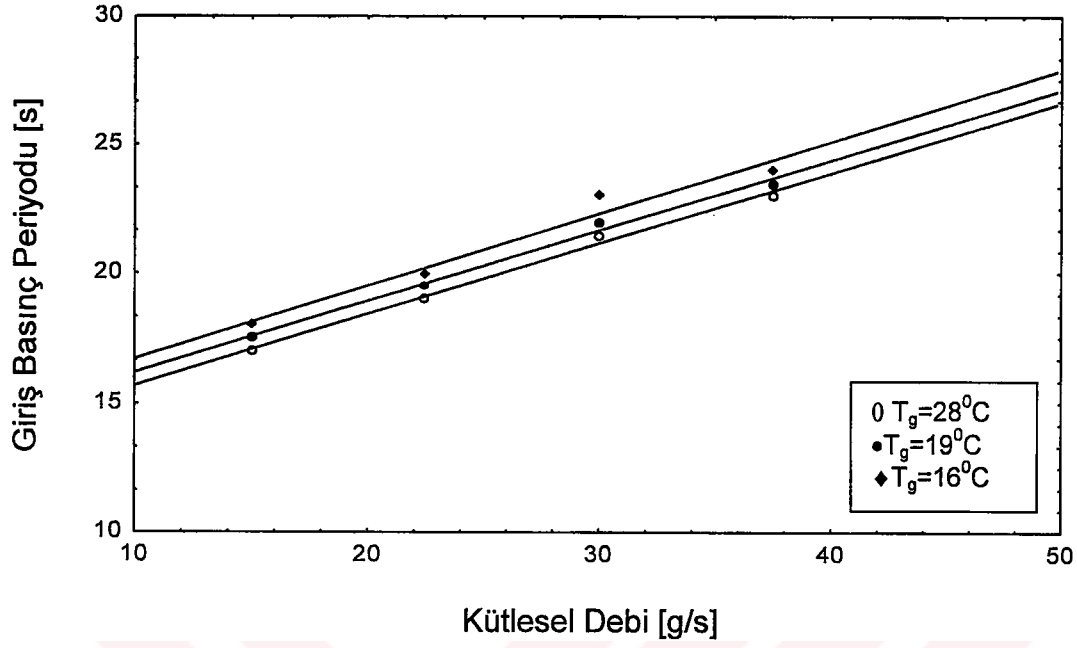
Şekil 7.95. Boru-5 için yoğunluk değişim tipi osilasyonların genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutma seviyesinin etkileri. $\beta=0.448$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$

Şekil 7.91, Şekil 7.92, Şekil 7.93, Şekil 7.94 ve Şekil 7.95 'e dikkat edilirse; beş adet test borusu için azalan kütleli debi ile giriş basınç genlikleri azalırken azalan giriş sıcaklık değerleri için artmaktadır. Yüzey artırımı borularla boş boru arasında önemli bir fark tespit edilemezken genliklerin limitleri açısından yüzey artırımı borularda boş boruya göre daha büyük olmaktadır. Maksimum genlik değeri Boru-3 için 0.46Bar, minimum genlik değeri Boru-1 için 0.32Bar olarak elde edilmiştir.

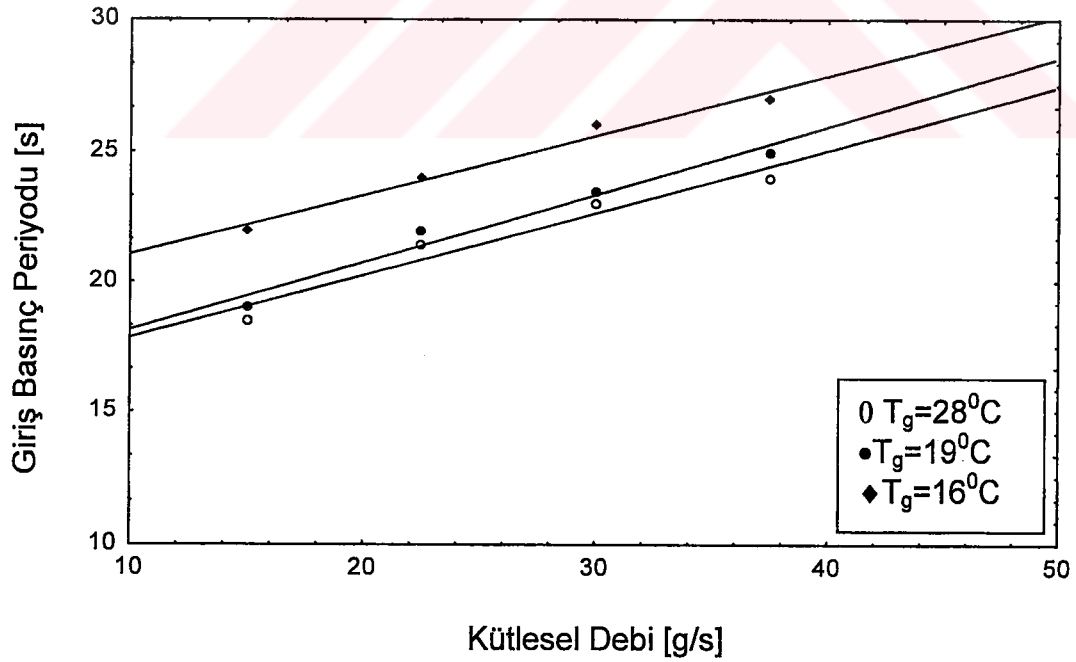
Şekil 7.96, Şekil 7.97, Şekil 7.98, Şekil 7.99 ve Şekil 7.100 'de yoğunluk değişim tipi osilasyonların periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutma seviyelerinin etkileri gösterilmiştir. Giriş basınç genliklerinde olduğu gibi periyotlarında da her bir test borusu için azalan kütleli debi ile periyotlar azalırken azalan giriş sıcaklık değerleri ile lineer karakterde artmaktadır. Yine yüzey artırımı borularda periyotların limitleri boş boruya göre daha yüksek olmaktadır.



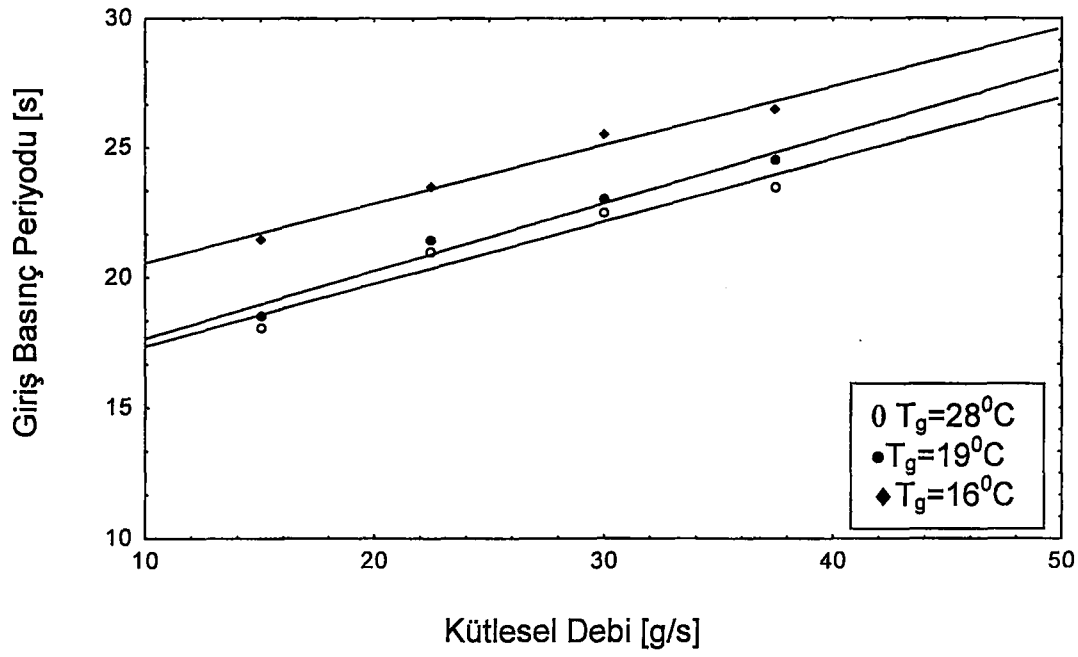
Şekil 7.96. Boru-1 için yoğunluk değişim tipi osilasyonların periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutma seviyesinin etkileri. $\beta=0.448$, $P_{sis}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$



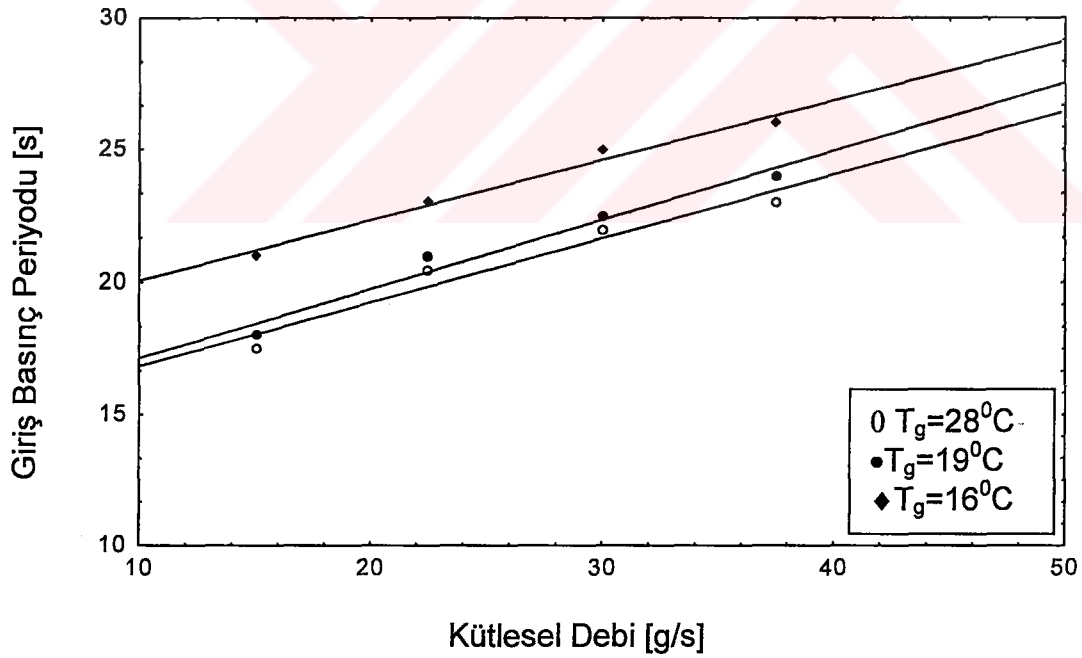
Şekil 7.97. Boru-2 için yoğunluk değişim tipi osilasyonların periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutma seviyesinin etkileri. $\beta=0.448$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$



Şekil 7.98. Boru-3 için yoğunluk değişim tipi osilasyonların periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutma seviyesinin etkileri. $\beta=0.448$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$



Şekil 7.99. Boru-4 için yoğunluk değişim tipi osilasyonların periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutma seviyesinin etkileri. $\beta=0.448$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$



Şekil 7.100. Boru-5 için yoğunluk değişim tipi osilasyonların periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutma seviyesinin etkileri. $\beta=0.448$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $Q=16\text{kW}$

7.7. Termal Osilasyonlar

Yapılan araştırmalar sonucunda bu tip osilasyonlar; iki fazlı akış ortamında belirli şartlarda sıvı film tabakasının kararsız bir davranış sergilemesi ile ortaya çıkmaktadırlar. 1991 'de Padki adlı araştırmacı tarafından bu osilasyonlarla ilgili olarak tespit edilen bilgilere dayanılarak test borusu boyunca tam buharlaşmanın henüz başlamadığı noktalarda alt cidar bir sıvı film tabakası tarafından işgal edilmektedir. Kaynamalı sistemlerde genellikle ortaya çıkan bu film akışında meydana gelen kararsız davranışlar özellikle boru alt cidar sıcaklıklarında büyük genlikli dalgalanmalara sebep olmaktadır [66,67].

Bu film akışının sona erdiği ve tam buharlaşma olayının başladığı bir geçici nokta kaynamalı sistemlerde her zaman söz konusu olmaktadır. Bu geçici nokta akış ortamında etkili olan parametrelerde meydana gelen değişikliklerle beraber boru boyunca ileri geri düzensiz bir şekilde hareket etmektedir. Geçici noktanın bu düzensiz hareketi termal osilasyonların oluşmasında temel rolü oynamaktadır. Özellikle alt cidarda büyük genlikli titreşimlerle kendini gösteren bu tip osilasyonlar burn-out dediğimiz olaya sebep olarak boru cidarlarında termal gerilmelerin oluşmasına ve sonuğa boru cidarlarında deformasyonlara sebep olmaktadır.

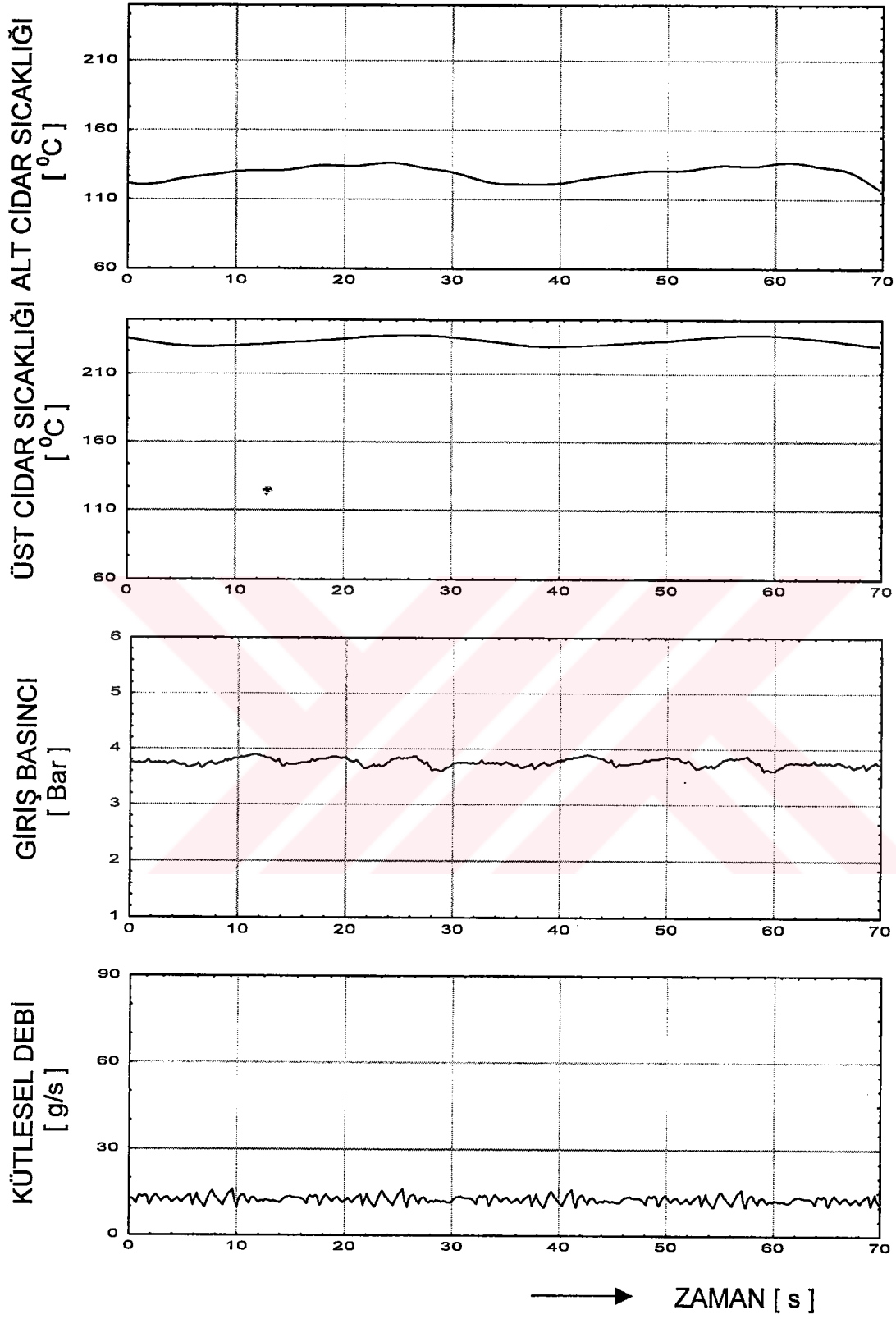
Daha önceki bölümde bahsedildiği gibi aynı zamanda kararsız akış ortamında oluşan basınç düşümü ve yoğunluk değişim tipi osilasyonlarla beraber aynı anda gerek üst cidar gerekse alt cidar sıcaklıklarındaki dalgalanmalarla ortaya çıkan bu tip osilasyonlarla ilgili ilk grafiklere dikkat edilirse; katmanlı akıştan dolayı üst cidar boyunca ısı iletim katsayısı daha düşük olan akışkan tabakasının akması ve alt cidar boyunca ısı iletim katsayısı daha yüksek olan akışkan tabakasının akmış olması nedeniyle üst cidar sıcaklık limitleri her zaman alt cidardan büyük çıkmaktadır. Alt cidarda oluşan termal osilasyonların genlikleri üst cidarda oluşan osilasyonların genliklerinden daima büyük çıkmaktadır.

Şekil 7.101, Şekil 7.102, Şekil 7.103, Şekil 7.104 ve Şekil 7.105 'te her bir test borusu için elde edilen ve çok küçük kütleli debi değerlerinde özellikle alt cidarda büyük genliklerle ortaya çıkan termal osilasyonlar gösterilmektedir. Şekillere dikkat edilirse üst cidar sıcaklıkları boru boyunca hemen hemen sabit değerlerde seyrederken alt cidar sıcaklıklarında büyük genlikli osilasyonlar meydana gelmektedir. Alt cidar sıcaklık osilasyon genlikleri her bir boru için mukayese edilirse maksimum genlik değeri Boru-2 için 33°C civarında elde edilirken minimum genlik değeri Boru-1 için 28°C olarak elde edilmiştir. Alt cidarda oluşan termal osilasyonların periyotları da her bir boru için mukayese edilirse; maksimum periyot değeri yine Boru-2 için 42 saniye, minimum periyot ise Boru-1 için 36 saniye olarak elde edilmiştir.

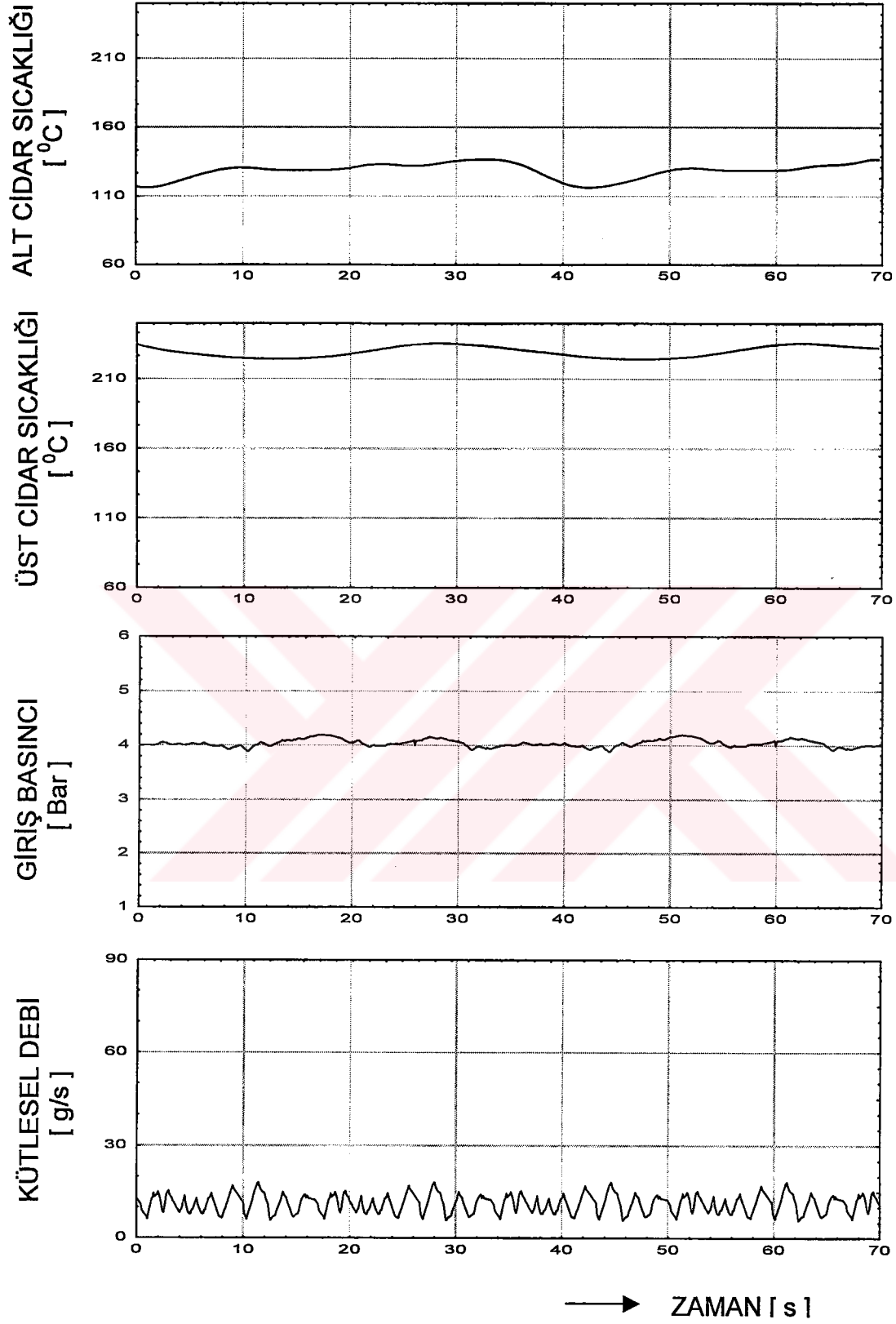
Aynı şekillere dikkat edilirse; alt cidar sıcaklık limitleri maksimum 150°C olurken maksimum üst cidar sıcaklık limiti 250°C değerine kadar ulaşmaktadır. Alt ve üst cidar sıcaklıkları arasında meydana gelen bu büyük sıcaklık farkı boru cidarları için oldukça tehlikeli sonuçlar ortaya çıkarabilir. Çünkü alt ve üst cidar sıcaklık limitleri arasındaki fark büyüdükçe cidarda daha büyük değerlere sahip termal gerilmeler meydana gelecek ve sonuçta boru donanımları hasara uğrayarak büyük zararlar ortaya çıkacaktır.

Katmanlı akıştan dolayı üst cidar boyunca daha düşük ısı iletim katsayısına sahip akışkan tabakasının akmış olması nedeniyle üst cidarda burn-out 'a sebep olan dry-out şartının geçerli olduğu aynı şekillerden de anlaşılmaktadır.

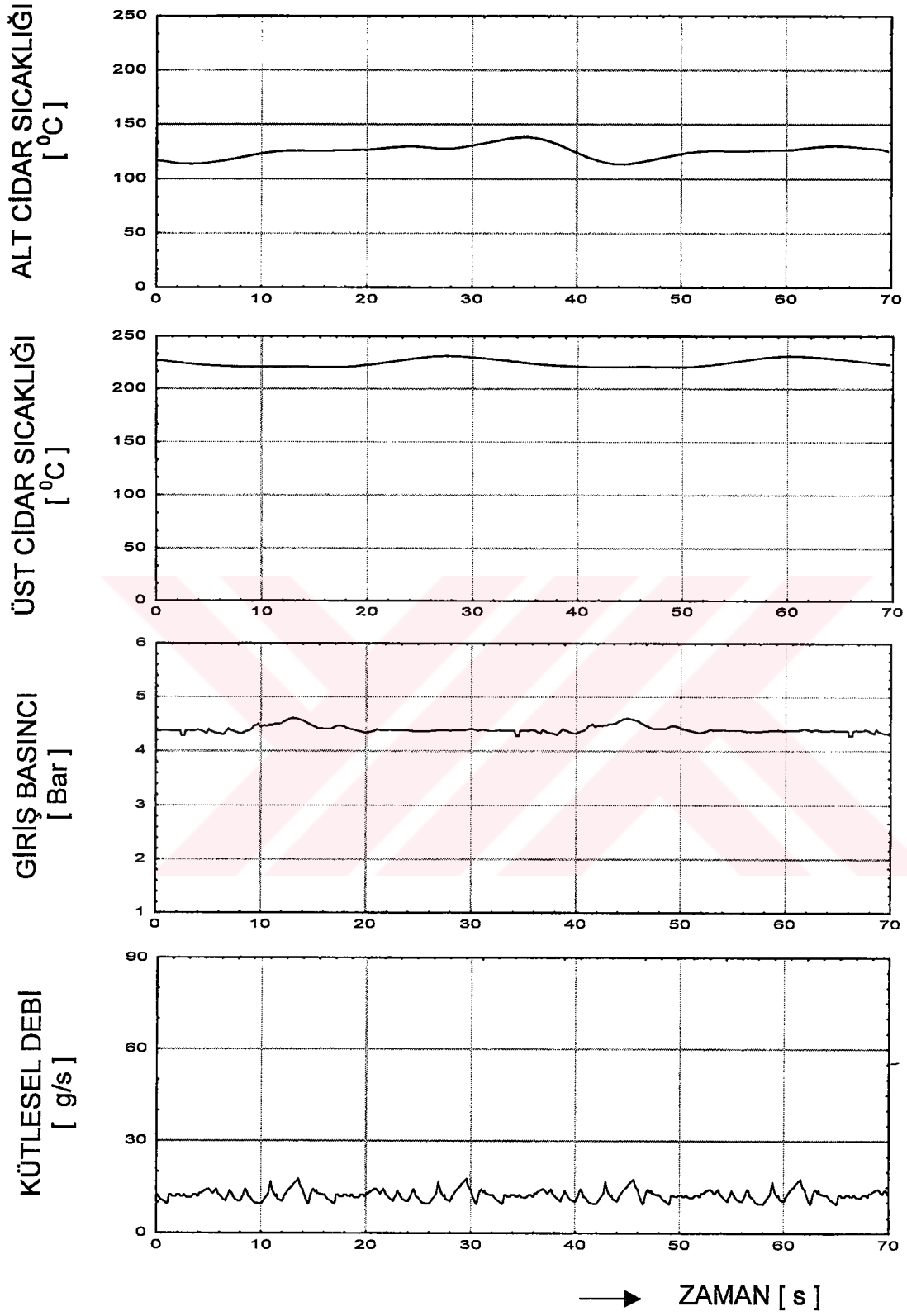
Kararlı durum karakteristik eğrisinin çok düşük kütleli debi değerlerine karşılık gelen bu tip osilasyonlar için çizmiş olduğumuz şekillere bakılırsa giriş basınç değerleri de oldukça büyük genliklerle titremektedir. Maksimum giriş basınç genliği yine Boru-2 için 0.31 Bar, minimum giriş basınç genliği de Boru-1 için 0.29 Bar olarak elde edilmiştir. Kütleli debi için elde edilen osilasyon eğrilerine aynı şekillerden bakılırsa genlik değerleri oldukça düşük seviyelerdedir.



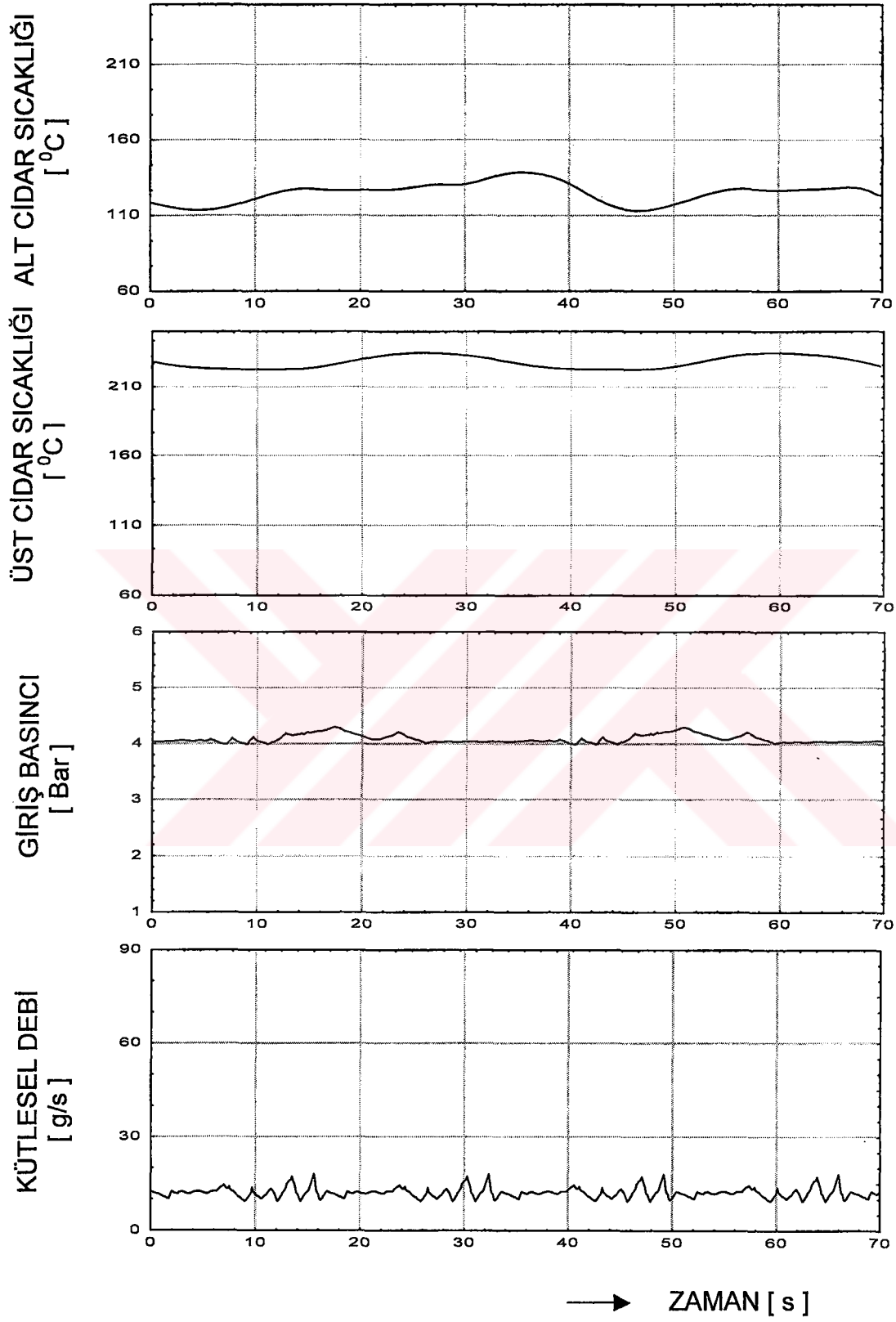
Şekil 7.101. Boru-1 için " Alt cidarda oluşan termal osilasyonların" grafiksel gösterimi. $T_g=16^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=13\text{g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$



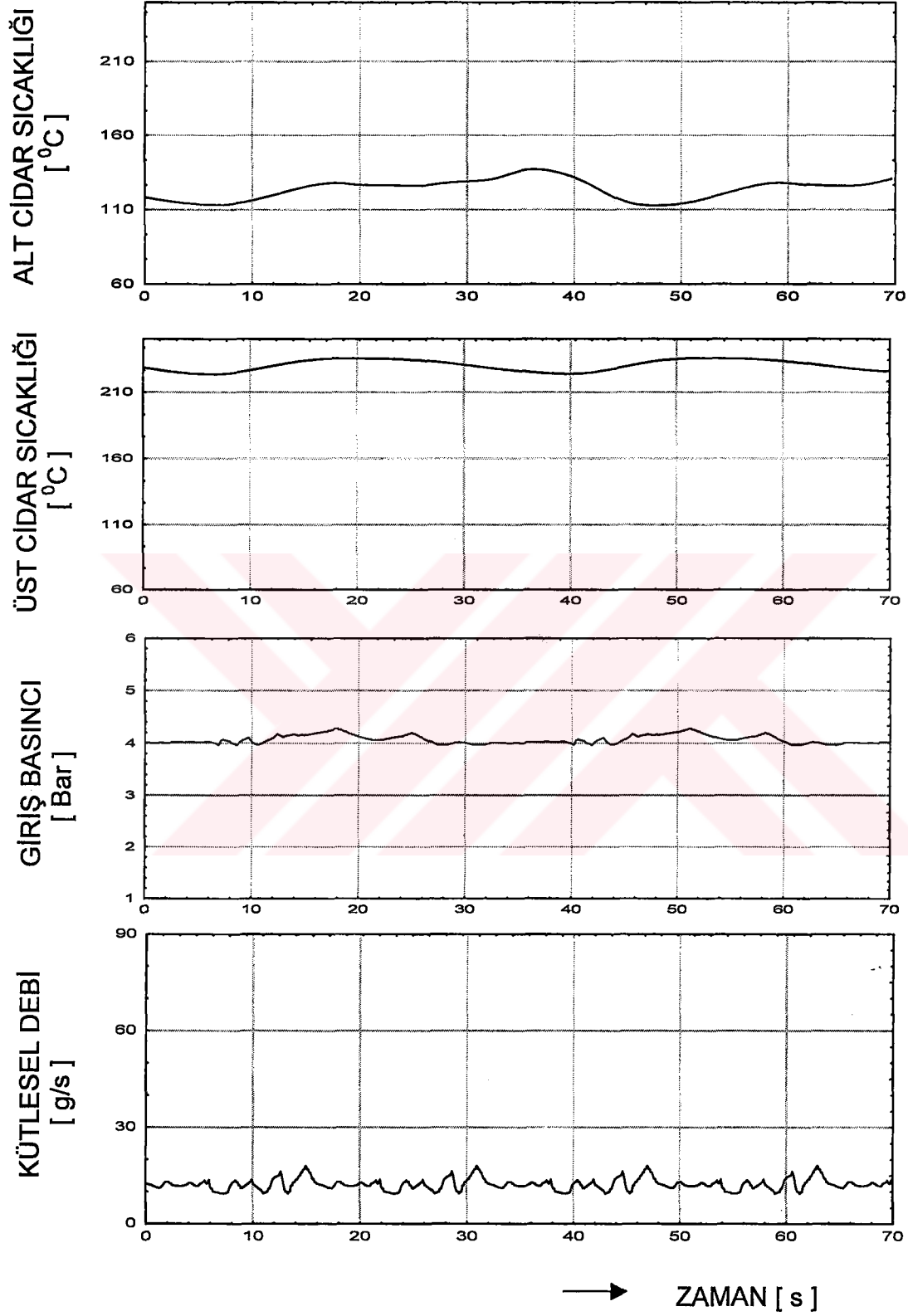
Şekil 7.102. Boru-2 için “ Alt cidarda oluşan termal osilasyonların ” grafiksel gösterimi. $T_g=16^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=12.5 \text{ g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.103. Boru-3 için “ Alt cidarda oluşan termal osilasyonların ” grafiksel gösterimi. $T_g=16^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=12.5\text{g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.104. Boru-4 için “ Alt cidarda oluşan termal osilasyonların” grafiksel olarak gösterimi. $T_g=16^{\circ}\text{C}$, $\dot{m}=12.5\text{g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$



Şekil 7.105. Boru-5 için “ Alt cidarda oluşan termal osilasyonların” grafiksel olarak gösterimi. $T_g=16^\circ\text{C}$, $\dot{m}=12.5\text{g/s}$, $Q=16\text{kW}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$

7.8. Osilasyonların Literatürdeki Osilasyonlarla Karşılaştırılması

Bu çalışmada test borusu olarak kullanılan boş borunun uzunluğunun artırılmasıyla beraber akış ortamında meydana gelen sürtünmeli basınç düşümü de artmıştır. Dolayısıyla osilasyonların periyot ve genlikleri de [12,45] çalışmalarında aynı deneysel çalışma şartlarında boş boru için elde edilen osilasyonların periyot ve genliklerine göre arttığı tespit edilmiştir.

Tablo 7.7. Osilasyonların Karşılaştırılması

Çalışmalar	Basınç Düşümü Tipi Osilasyonlar		Yoğunluk Değişim Tipi Osilasyonlar		AltCidarda Olu- şan Termal Osilasyonlar	
	Periyot [s]	Genlik [Bar]	Periyot [s]	Genlik [Bar]	Periyot [s]	Genlik [°C]
Bu sistem için Elde Edilen Sonuçlar	20	1.5	30	0.4	35	30
[12,45] Çalışmaların- da Elde Edilen Sonuçlar	15	1.3	20	0.3	30	25

Tablo 7.7 'den de görüldüğü gibi bu sistemde elde edilen basınç düşümü tipi osilasyonların periyotları 20 saniye civarında iken söz konusu çalışmalarda ise 15 saniye civarlarındadır. Giriş basıncında meydana gelen osilasyonların maksimum genliği bu çalışmada 1.5 bar iken aynı çalışmalarda 1.3 bar 'dır.

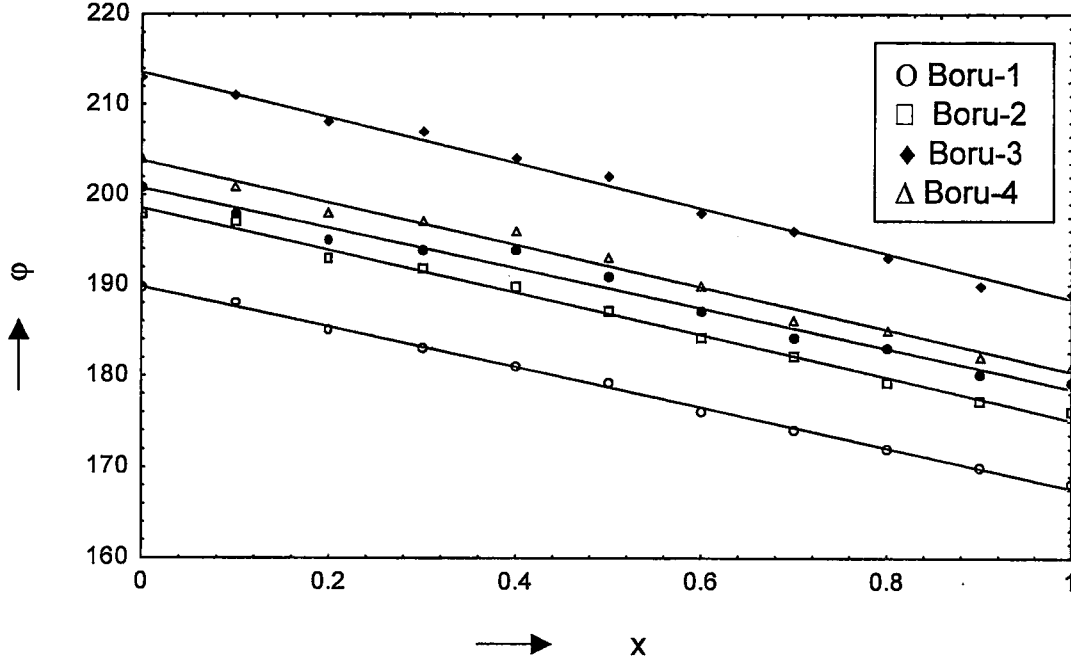
Yine bu sistemde elde edilen yoğunluk değişim osilasyonlarının periyotları 30 saniye değerlerinde seyrederken diğer çalışmalarda yaklaşık 20 saniyedir. Yoğunluk değişim osilasyonlarında giriş basıncının maksimum genliği bu sistemde 0.4 bar iken diğer çalışmalarda 0.3 bar 'dır. Alt cidarda oldukça düşük debilerde tespit edilen termal osilasyonların periyotları bu sistemdeki boş boru için 35 saniye civarında iken diğer çalışmalarda yaklaşık 30 saniyedir. Alt cidarda tespit edilen termal osilasyonların maksimum genlikleri bu sistemde yaklaşık 30°C iken diğer çalışmalarda 25°C 'dir.

7.8. Boyut Analizi Sonuçları

Bilindiği gibi akışkanların davranışlarının belirlenmesinde boyut analizi büyük bir önem göstermektedir. Özellikle iki fazlı akışlarda kararlı durum karakteristikliklerine etkiyen parametre sayısının çok olması nedeniyle boyut analiz yardımıyla etkili olan parametreler için elde edilen deneysel ve teorik sonuçları daha genel ve basit formda görebilmek mümkün olmaktadır.

Şekil 7.106 'da her bir test borusu için ϕ boyutsuz parametresi ile x kuruluk derecesi arasında meydana gelen değişimler grafiksel olarak gösterilmektedir. Yüzey artırımı borular için elde edilen sonuçlar boş boru için elde edilen değerlerle karşılaştırılırsa yüzey artırımı borularda ısı transfer katsayılarının boş boruya nazaran daha yüksek değerlere ulaştığı anlaşılmaktadır. En iyi lokal ısı transfer özellikleri Boru-3 için elde edilmiştir.

Yüzey artırımı borular arasında lokal ısı transfer özellikleri arasında % 1 ile % 8 arasında değişen farklılıklar elde edilirken boş boruya göre ortalama % 12 'lik bir iyileşme sağlanmıştır. İki fazlı akış rejimi boru boyunca üniform olmadığından lokal ısı transfer katsayıları da her bir boru için yaklaşık lineer bir şekilde değişmektedirler. Artan kuruluk derecesi ile beraber her bir test borusu için elde edilen ϕ değerleri azalmaktadır.



Şekil 7.106. Kuruluk derecesi x ile $\phi = \frac{Nu}{\left[\left(\frac{qd_e}{\Delta h_{LG}\mu_l} \right)^{0.7} \left(\frac{P}{P_c} \right)^{0.25} \right]}$ boyutsuz

parametresinin değişimi. $Q=16\text{kW}$, $T_g=28^\circ\text{C}$, $P_{sis}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$, $\dot{m}=75\text{g/s}$, $A_T=0.183\text{m}^2$, $q=87.43\text{kW/m}^2$, $L=3.195\text{m}$

Yukarıdaki şekilde gösterilen grafikte elde edilen sonuçları daha iyi görebilmek amacıyla Tablo 7.5 çizilmiştir.

Bölüm 7 'de (7.19) , (7.20) denklemleri ile gösterilen aynı zamanda akışkanlar mekaniğinde basınç katsayısı olarak bilinen ve akışkanın statik basıncının dinamik basınca oranıyla elde edilen $\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho U^2}$ boyutsuz parametresi ile

akışkana birim zamanda yapılan işin akışkanın kinematik enerjisindeki değişime oranıyla elde edilen $\pi_2 = \frac{Q}{\rho U^3 L^2}$ boyutsuz parametresinin boş boru için elde

edilen sonuçları Şekil 7.107 'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Grafiğe dikkat edilirse kararlı durum karakteristik eğrisinde gerçekte parabolik bir karakter sergileyen buhar ve sıvı hatları bu boyutsuz parametreler yardımıyla yaklaşık

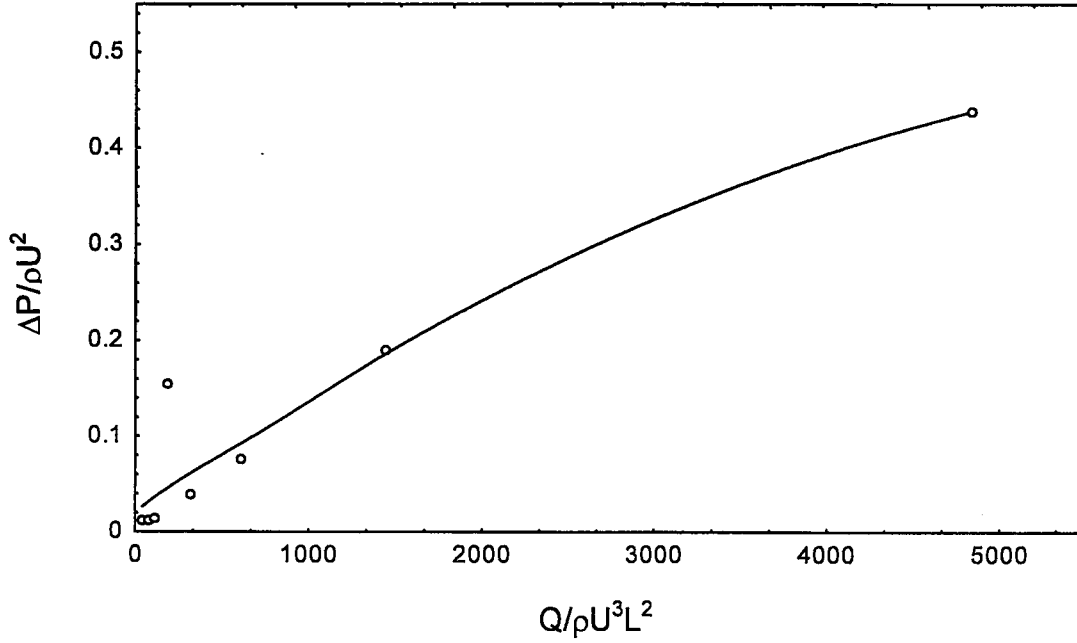
Tablo 7.5. Beş farklı test borusu için ϕ boyutsuz parametre sonuçları.
 **$Q=16kW$, $T_g=28^0C$, $P_{sis}=7.5Bar$, $\beta=0.448$, $\dot{m}=75g/s$, $A_T=0.183m^2$,
 $q=87.43kW/m^2$, $L=3.195m$**

Boru	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4	ϕ_5	ϕ_6	ϕ_7	ϕ_8	ϕ_9	ϕ_{10}	ϕ_{11}
Boru-1	190	188	185	183	181	179	176	174	172	170	168
Boru-2	198	197	193	192	190	187	184	182	179	177	176
Boru-3	213	211	208	207	204	202	198	196	193	190	189
Boru-4	204	201	198	197	196	193	190	186	185	182	181
Boru-5	201	198	195	194	194	191	187	184	183	180	179

düz çizgilere dönüştürülmüştür. Yani iki fazlı bölgede sıkıştırılmış bulunan tüm karakteristik eğriler bu boyutsuz parametreler yardımıyla tek bir eğriye dönüştürülmüştür. Bu sonuç boyutsuz parametre kullanmanın önemli bir avantaj sağladığını göstermektedir. Aynı zamanda sadece sabit ısı gücü ile yapılan deneylerle bile tüm kararlı durum karakteristik eğri ailelerinin tespit edilmesi bu boyutsuz parametreler kullanılarak mümkün olmaktadır. Bazı sonuçlarda kısmen görülen bazı düzensizlikler hesaplamalarda kabul edilen belirli hata oranlarından kaynaklandığı söylenebilir. Benzer boyutsuz parametre sonuçları 1985 'te S. Kakaç tarafından dikey borular için elde edilmiştir [129,130].

Aşağıda $\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho U^2}$ ve $\pi_2 = \frac{Q}{\rho U^3 L^2}$ boyutsuz parametre sonuçlarını daha iyi

görebilmek amacıyla bir tablo verilmiştir. İki fazlı akışlarda yaygın bir şekilde kullanılan homojen akış modeli yardımıyla oluşturulan ve 7. Bölümde detaylı olarak anlatılan xN_Q , N_p , $x_c N_Q$ ve N_{TS} boyutsuz parametreleri yoğunluk değişim tipi osilasyonlarının tahmininde kullanıldığı zaman olumlu sonuçlar vermektedir. Homojen akış modeli yardımıyla enerji, momentum gibi korunum denklemleri kullanılarak boyutsuz hale getirilen bu parametreler için elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 7.108 'de gösterilen grafik yardımıyla değerlendirilmiştir.



Şekil 7.107. Boş boru için $\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho U^2}$, $\pi_2 = \frac{Q}{\rho U^3 L^2}$ boyutsuz parametre sonuçları.

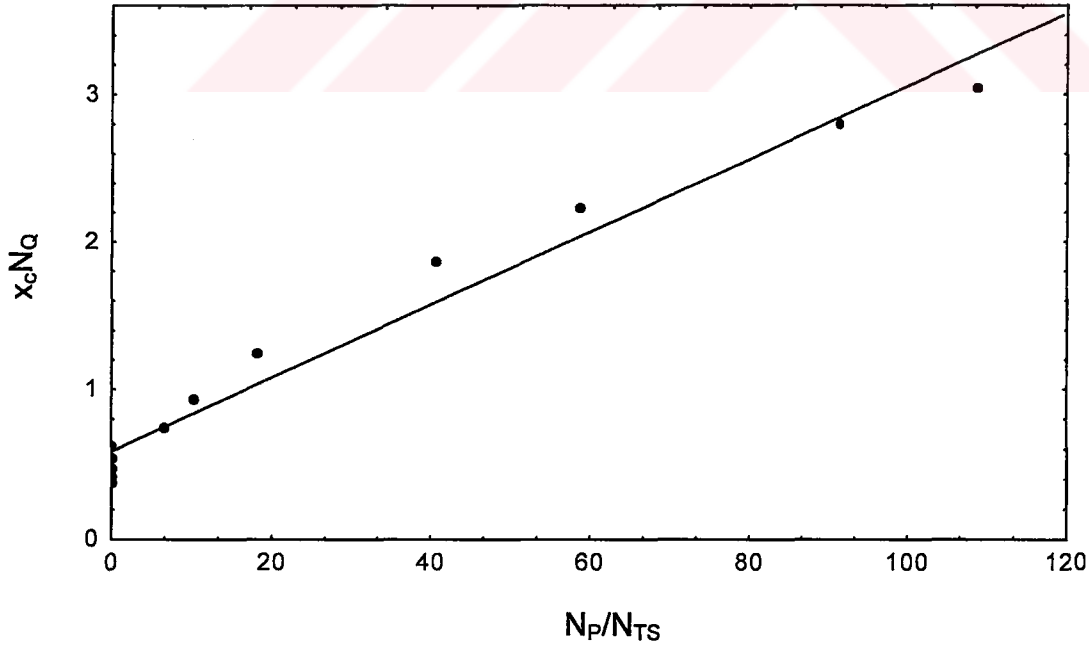
$Q=16\text{kW}$, $T_g=28^\circ\text{C}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$, $A=1.15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, $L=3.195\text{m}$

$x_c N_Q - N_p / N_{TS}$ koordinat sisteminde boş boru için elde edilen bu grafiğe dikkat edilirse her iki parametre arasında lineer bir bağıntı söz konusu olmaktadır. Artan N_p / N_{TS} değerleri ile $x N_Q$ değerleri de lineer bir şekilde artmaktadır.

7. Bölüm de anlatıldığı gibi şayet $x N_Q > x_c N_Q = A_1 + B_1 N_p / N_{TS}$ şartı sağlanıyorsa sistemde yoğunluk değişim tipi osilasyonlar meydana gelmektedir. Aksi halde $x N_Q < x_c N_Q = A_1 + B_1 N_p / N_{TS}$ denklemi sistemde geçerli ise yoğunluk değişim tipi osilasyonlar meydana gelmemektedir. Tablo 7.7 'de deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bu sonuçlar irdelenirse deneysel çalışma şartlarında oldukça geniş bir parametre alanında yoğunluk değişim tipi osilasyonların meydana geldiği anlaşılmaktadır. Böylece yoğunluk değişim tipi osilasyonların tahmininde kullanılan bu boyutsuz formdaki teorik çalışmanın olumlu sonuçlar temin ettiği söylenebilir.

Tablo 7.6. Boru-1 için $\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho U^2}$ ve $\pi_2 = \frac{Q}{\rho U^3 L^2}$ boyutsuz parametre sonuçları. $Q=16\text{kW}$, $T_g=28^\circ\text{C}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$, $A=1.15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, $L=3.195\text{m}$

$\dot{m}$ (g/s)	G (kg/m ² s)	ΔP (Bar)	U (m/s)	π_1	π_2
75	652.17	3.7	0.444	0.012	39
67.5	586.96	3.3	0.4	0.014	53
60	521.74	2.2	0.355	0.012	76
52.5	456.52	2	0.311	0.014	113
45	391.3	1.6	0.266	0.154	181
37.5	326.09	2.8	0.222	0.0387	311
30	260.87	3.6	0.178	0.077	604
22.5	195.65	4.9	0.133	0.189	1448
15	130.43	5.1	0.089	0.438	4833



Şekil 7.109. Boru-1 için yoğunluk değişim tipi osilasyonların tahmininde kullanılan $x_c N_Q$ ve N_P / N_{TS} boyutsuz parametrelerin değişimi. $Q=16\text{kW}$, $T_g=28^\circ\text{C}$, $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$, $A=1.15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, $L=3.195\text{m}$, $d_i=13\text{mm}$, $A_T=0.183\text{m}^2$, $q=87.43\text{kW/m}^2$

Tablo 7.7. Boru-1 için yoğunluk değişim tipi osilasyonların tahmininde kullanılan $x_c N_Q$ ve N_p / N_{TS} boyutsuz parametre sonuçları. $Q=16\text{kW}$, $T_g=28^\circ\text{C}$, $P_{sis}=7.5\text{Bar}$, $\beta=0.448$, $A=1.15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, $L=3.195\text{m}$, $d_i=13\text{mm}$, $A_T=0.183\text{m}^2$, $q=87.43\text{kW/m}^2$

$G(\text{kg/m}^2\text{s})$	$x_c N_Q$	N_p / N_{TS}	$x N_Q$	Sonuç
652.17	0.374	0.00163	0.044	Yoğunluk değişim tipi osilasyon var
586.96	0.415	0.002	0.073	" " " " "
521.74	0.467	0.00254	0.11	" " " " "
456.52	0.534	0.00332	0.16	" " " " "
391.3	0.623	0.00453	0.22	" " " " "
326.09	0.747	6.51	0.35	" " " " "
260.87	0.934	10.18	0.44	" " " " "
195.65	1.245	18.1	0.73	" " " " "
130.43	1.868	40.71	1.21	" " " " "
108.7	2.241	58.62	1.53	" " " " "
87.04	2.8	91.42	2.14	" " " " "
79.83	3.052	108.68	2.66	" " " " "

8. SONUÇLAR

Zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı yatay borularda meydana gelen iki fazlı kararlı ve kararsız akış olayları ile ilgili olarak yapılan deneysel ve boyutsal analiz çalışmaları sonucunda elde edilen bulgular ve bundan sonra benzer konuda araştırma yapacak olan araştırmacılar için faydalı olacak bazı önemli öneriler aşağıda sırasıyla maddeler halinde yazılmıştır.

8.1. Sıcaklık Profilleri

Zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı yatay borular için altı farklı sıcaklık profili bulunmuştur. Bunlarla ilgili bulgular aşağıda maddeler halinde yazılmıştır.

1. Yüksek kütleli debilerde her bir test borusu için tek fazlı konveksiyonlu akış rejimi meydana gelmektedir. Bu tip rejimde boru boyunca gerek alt cidar sıcaklık değişimleri gerekse üst cidar sıcaklık değişimleri lineer olarak artmaktadır. Her iki cidar sıcaklıkları arasında önemli bir farklılık oluşmamaktadır. Tüm borular için bu akış rejiminde üst cidar sıcaklıkları alt cidardan daha yüksek olmaktadır.
2. Yüzey artırımı borularda boş boruya göre akış ortamında daha az katmanlaşma meydana gelmektedir. Çünkü yüzey artırım elemanları akışın türbülans seviyesini artırarak sıvı ve buhar fazlarının karışık halde akmasını sağlamaktadır.
3. Cidar sıcaklıkları yüzey artırımı test borularında boş boruya göre azalmıştır. Bir başka ifade ile yüzey artırımı borularda ısı transfer katsayısı artmıştır. Sıvı ve buhar fazlarının karışık olarak akması sonucu ısı transfer katsayısı daha yüksek olan akışkan kütlesi cidarla daha fazla temas ederek cidardan daha fazla enerji absorbe edecektir. Bu da yüzey artırımı borularda cidar sıcaklıklarını boş boruya göre düşürecektir.
4. Aşırı soğutma oranının artması ile çekirdekli kaynamanın başlangıç noktası boru boyunca akış yönünde ileri doğru hareket etmektedir. Çekirdekli

kaynama rejimi kaynama rejimleri içerisinde en yüksek ısı transfer oranına sahip bir rejimdir.

5. Yüzey artırımı borularda elde edilen cidar sıcaklık limitlerinin boş boruya göre daha düşük olması yüzey artırımı borularda burn-out olayının daha düşük sıcaklık limitlerinde oluşmasını sağlamaktadır. Deneysel çalışmanın en önemli sonuçlarından biride budur. Çünkü alt ve üst cidar sıcaklıkları arasındaki farkın büyümesiyle ortaya çıkan burn-out olayı ile boruda termal gerilmeler oluşmakta ve bunun sonucunda boru cidarları patlayarak bozulmaktadır. Böylece yüzey artırımı borularda burn-out olayının daha düşük sıcaklık limitlerinde meydana gelmiş olması bu olayın boru cidarlarına verebileceği muhtemel zararlarda boş boruya göre azaltılmış olacaktır.
6. Kütlesel debinin sürekli azalması ile beraber ortaya çıkan lokal katmanlı akış rejiminde alt cidar sıcaklıkları boru boyunca hemen hemen sabit kalırken üst cidar sıcaklıkları ani bir yükseliş göstermekte ve akış ortamında buhar fazına göre daha küçük ısı transfer katsayısına sahip slugların üst cidarla temas etmesi sonucunda bir sıcaklık artışı söz konusu olmaktadır.
7. Beş farklı test borusu için elde edilen sıcaklık profilinden merkezi katmanlaşma, lokal katmanlaşma ve tam katmanlı akış rejimleri boru cidarına verebilecekleri muhtemel zararlar bakımından tehlikeli potansiyele sahip olduklarından dikkatlice izlenmeleri gerekmektedir.
8. Her bir test borusu için elde edilen tüm akış rejimlerinde genellikle üst cidar sıcaklıkları daima alt cidar sıcaklıklarından daha yüksek değerlere sahip olmaktadır. Çünkü kaldırma kuvvetlerinin etkisi ile daha az yoğunluğa sahip akışkan kütleleri üst cidara doğru sürüklenmektedir. Böylece boru alt cidarı boyunca ısı transfer katsayısı daha yüksek olan sıvı fazı akarken üst cidar boyunca ise ısı transfer katsayısı daha düşük olan buhar fazı akmaktadır.
9. Kütlesel debinin çok düşük değerlerinde test borularının sonuna doğru tam buharlaşma sonucunda akış ortamında tek buhar faz bölgesi oluşmaktadır.
10. Tablo 7.5 ve Tablo 7.6 'da görüldüğü gibi yüksek kütlesel debilerde meydana gelen akış rejimlerinin boru çapı ve boru boyundan çok fazla etkilenmediği söylenilebilir. Buna karşılık azalan kütlesel debi değerlerinde akış rejimlerinin meydana gelmesinde önemli derecede rol oynayan kabarcık

formasyonu ve fazlar arası yüzeyin gösterdiği dalgalanmaların boru çapı ve boru boyundan etkilendiği söylenilebilir.

8.2.İki Fazlı Akış Kararsızlıkları

1. Deneysel çalışmalarda kullanılan beş farklı test borusu için akış parametrelerine bağlı olarak üç farklı osilasyon tipi tespit edilmiştir. Bunlar; basınç düşümü, yoğunluk değişimi ve termal osilasyonlarıdır.
2. Aşırı soğutma seviyesi ne olursa olsun bu üç tip osilasyon meydana gelmektedir.
3. Basınç düşümü tipi osilasyonlar genellikle yoğunluk değişim tipi osilasyonlarla süperimpozed denen tarzda aynı anda ortaya çıkmaktadırlar.
4. Kararlılık sınırları azalan giriş sıcaklığı ile beraber daha düşük kütleli debi değerlerine doğru hareket etmektedir.
5. Giriş basıncı ve cidar sıcaklık osilasyonlarının periyot ve genlikleri azalan giriş sıcaklığı ile artmaktadırlar.
6. Yüzey artırımı borularda oluşan süperimpozed basınç düşümü ve yoğunluk değişim tipi osilasyonlar giriş basınç osilasyon eğrisinin yükselen kısımlarında ortaya çıkmaktadırlar. Halbuki boş boruda bu tip osilasyonlar genellikle giriş basınç osilasyon eğrisinin ya maksimum değerlerinde ya da alçalan kısımlarında ortaya çıkmaktadırlar.
7. Kararlı durum karakteristik eğrisinin kararsız bölgesi yüzey artırımı borularda boş boruya göre artmaktadır. Yüzey artırımı borularda kararlılık sınırları daha düşük kütleli debi değerlerine doğru hareket etmektedir. Bu kararsız bölgede en büyük artış Boru-3 için elde edilmiştir.
8. Kütleli debinin çok küçük değerlerinde bile yoğunluk değişim tipi osilasyonlar ortaya çıkmaktadır.
9. Kararlı durum karakteristik eğrisinin tek buhar faz bölgesine yakın yerlerde yoğunluk değişim tipi osilasyonlar tespit edilmektedir.
10. Akışkan aşırı soğutma seviyesi sabit tutulduğunda azalan debi ile yoğunluk değişimi ve basınç düşümü tipi osilasyonları açısından sistemin kararsızlığı artmaktadır.

11. Basınç düşümü ve yoğunluk değişim osilasyonları arasında bir geçiş bölgesi tespit edilmiştir. Bu geçiş bölgesinde alt ve üst cidar sıcaklıkları hemen hemen sabit değerlerde seyrederken giriş basıncı sinüs eğrisine benzer tarzda titrelemektedir. Aynı zamanda bu geçiş bölgesinde basınç düşümü tipi osilasyonlarla süperimpozed tarzda ortaya çıkan yoğunluk değişim tipi osilasyonları ile beraber kütle debisi osilasyonları da meydana gelmektedir.
12. Yüzey artırımı borular için elde edilen osilasyonların özellikleri dikey borular için elde edilmiş osilasyonların özelliklerine çok benzemektedir. Çünkü dikey borularda olduğu gibi yüzey artırımı borularda da akışta daha az katmanlaşma elde edilmektedir.
13. Yoğunluk değişim tipi osilasyonların periyot ve genlikleri tüm test boruları için basınç düşümü tipi osilasyonların periyot ve genliklerinden daha düşük olmaktadır.
14. Isıtılan test ortamının dışında sıkıştırılabilir bir hacim temin edilmedikçe basınç düşümü tipi osilasyonlara rastlanılmamaktadır. Bu tip osilasyonların oluşması için mutlaka sıkıştırılabilir hacim olması gerekmektedir. Yani herhangi bir iki fazlı akış ortamında basınç düşümü tipi osilasyonların meydana gelmesi için test borusu girişi ile akışkan besleme bölümü girişi arasındaki basınç düşümünün, akışkan kütle debisindeki azalma ile azalması ve test bölümü dışında bir sıkıştırılabilir hacmin bulunması gerekmektedir.
15. Termal osilasyonlar iki fazlı akış ortamında film akışının hidrodinamik davranışları sonucunda alt ve üst cidar sıcaklıklarında meydana gelen osilasyonlarla ortaya çıkmaktadır. Bu tip osilasyonlar da giriş basınç osilasyonları ile aynı anda tespit edilmektedirler.
16. Kararlı durum karakteristik eğrisinin çok düşük kütleli debi değerlerinde film akışının bittiği ve tam buharlaşmanın olduğu bölgede geçiş noktasında özellikle alt cidarda periyot ve genlikleri yüksek olan termal osilasyonlar ortaya çıkmaktadır. Bu noktada üst cidar sıcaklıkları hemen hemen sabit olmaktadır. Bu tip osilasyonların sıcaklık limitleri yüzey artırımı borular için boş boruya göre biraz daha azalmaktadır.

17. Boyut analizi çalışması ile sağlanan olumlu sonuçlar iki fazlı akışlı sistemlerde boyut analizinin önemini ortaya çıkartmıştır. Sistemin kararlı – kararsız çalışma şartlarının tayininde boyutsal analiz deneysel sonuçlarla iyi bir uygunluk göstermektedir.
18. Boyut analizi sonuçlarına göre yüzey artırımı borularda ısı transfer karakteristiklikleri boş boruya göre daha iyi özelliklere sahiptir. Lokal ısı transfer katsayıları boru boyunca akış ortamında oluşan değişik akış rejimlerinden dolayı zamanla değişmektedir.
19. Boyut analizi yardımıyla kararlı durum karakteristik eğrileri daha basit formda tek bir eğri ile gösterilebilmektedir. Boyut analizinde yapılan bazı kabullerden dolayı sonuçlarda belli bir hata payı söz konusudur.
20. Yoğunluk değişim tipi osilasyonların tahmininde kullanılan boyut analizi çalışması oldukça iyi sonuçlar sağlamıştır.
21. Şekil 7.57 'den görüldüğü gibi süperimpozed osilasyonların meydana geldiği kararsız bölge; artan boru çapı ve uzunluğu ile daha düşük kütleli debi değerlerine doğru kaymaktadır.
22. Tablo 7.7 'de görüldüğü gibi artan boru çapı ve uzunluğu ile osilasyonların periyot ve genlikleri de artmaktadır.

8.3.Öneriler

Günümüz endüstrisinde kullanılan çeşitli santral ve sistemlerde bulunan eşanjörler de karşılaşılan iki fazlı akışlarla ilgili çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmesine rağmen hala bu konuda bir çok problem çözüm beklemektedir. Bu çalışma sonucunda bundan sonraki çalışmalara yardımcı olacak birkaç öneri araştırmacıların dikkatine sunulacaktır.

1. İki fazlı akış rejimlerinin tahmin edilmesinde yararlanılan sıcaklık profilleri bu konuda yeterli olmamaktadır. İki fazlı akış rejimlerinin doğrudan gözlemlenmesi daha doğru sonuçlar sağlayacaktır. Bunun için gelişmiş teknoloji yardımıyla test akış ortamı saydam hale getirilerek oldukça hızlı ve

hassas bir kaydetme, görüntüleme, ışıklandırma ve data okuma sistemleri kullanılarak iki fazlı akış rejimleri tespit edilmelidir.

2. Test akış ortamında istenen akış rejimlerinin meydana gelmesi için tam buharlaşmanın sağlanması amacıyla test borusunun yeterli uzunlukta olması gerekmektedir. Çünkü sabit bir ısı akısında artan boru uzunluğu ile akışkan daha fazla ısı enerjisi cıdardan absorbe edecektir.
3. Test borusu cidarına en büyük zararları veren burn-out olayının oluşmasında etkili olan parametreler iyi tespit edilerek bu zararları en aza indirgeyecek optimum şartların gerek teorik gerekse deneysel olarak belirlenmesi çok büyük bir öneme sahiptir.
4. Kaynamalı akış ortamında kaldırma kuvvetlerinin etkisi ile meydana gelen katmanlı akışın iyi bir şekilde takip edilmesi amacıyla kabarcık formasyonunun ve kabarcıkların akış ortamındaki dinamik davranışlarının bilinmesinin büyük önemi vardır. Bunun için teorik ve deneysel çalışmalar yapılmalıdır.
5. Test borusu iç yüzey kofigürasyonlarının kararlı – kararsız akış ortamına yaptıkları olumlu ve olumsuz etkiler ortaya çıkarılarak en ideal iç yüzey şartlarının tespit edilmesi için bu konudaki çalışmaların artarak devam etmesi gerekmektedir.
6. Kararsız akış ortamının meydana gelmesinde etkili olan parametrelerin tespit edilmesi amacıyla yeni teorik ve deneysel çalışmalara ihtiyaç vardır. Çünkü bu konuda günümüze kadar yapılan çalışmalarla oldukça kompleks bir durum gösteren iki fazlı akış kararlı – kararsız akış limitlerinin belirlenmesi için genel olarak kabul edilmiş bir hipotez yoktur. Bütün iki fazlı akışlı sistemlere rahatlıkla uygulanabilecek yeni simülasyon çalışmalarına ihtiyaç vardır.
7. Basınç düşümü tipi osilasyonların meydana gelmesi için sistemde sıkıştırılabilir bir hacmin bulunması gerekmektedir. Bu deneysel çalışmada basınç düşümü tipi osilasyonların ortaya çıkması amacıyla ihtiyaç duyulan sıkıştırılabilir hacim dengeleyici tankta azot gazı yardımıyla sağlanmıştır. Ancak basınç düşümü tipi osilasyonların daha düzgün bir şekilde ortaya çıkması için test ortamında bir iç sıkıştırılabilirlik hacmin sağlanması uygun

olacaktır. Bundan sonra basınç düşümü tipi osilasyonlar test borusunda bir iç sıkıştırılabilir hacim temin edilerek araştırılmalıdır.

8. İç sıkıştırılabilir hacimle oluşturulacak basınç düşümü tipi osilasyonlar için yeni simülasyon çalışmaları başlatılmalıdır.
9. Basınç düşümü tipi osilasyonlarla beraber süperimpozed denen tarzda ortaya çıkan yoğunluk değişim tipi osilasyonların modellenmesinde rahatlıkla kullanılabilecek bir metot henüz geliştirilememiştir. Her iki tip osilasyonu birlikte analiz edebilecek yeteneğe sahip yeni metotlar geliştirilmelidir.
10. İki fazlı akış dinamik kararsızlıkları üzerine; ısı gücünün, sistem basıncının, akışkan debisinin, aşırı soğutma seviyelerinin, test ortamı çıkışında kullanılan kısıtlayıcının ve sıkıştırılabilir hacim seviyelerinin etkileri tam olarak tespit edilmesi amacıyla yeni teorik ve deneysel çalışmalar yapılmalıdır.
11. Çok düşük debilerde basınç osilasyonlarına göre daha düşük periyot ve genliklerle ortaya çıkan sade yoğunluk değişim tipi osilasyonlar esnasında test borusu cidar sıcaklıkları oldukça yüksek değerlere ulaştığından burn-out olayları ile bu tip osilasyonlar arasında ne tarz bir ilişkinin olduğu bütün yönleri ile ortaya çıkarılmalıdır.
12. Akışkan film akışının hidrodinamik davranışları sonucu ortaya çıkan termal osilasyonları daha iyi anlamak amacıyla konvektif kaynamalı sistemler üzerine sistematik çalışmalar yapılmalıdır.
13. Termal osilasyonların oluşmasında önemli bir rolü olan test borusu cidar ısı iletim katsayısının etkileri farklı konstrüksiyonlara sahip test elemanları için araştırılmalıdır.
14. Sıcaklık ölçümlerinde kullanılan termokupul çiftlerinin gürültü seviyelerini en aza indirecek şekilde seçilmesi gerekmektedir. Ortamın olumsuz etkilerini önleyecek tarzda dış yüzeyleri izoleli ve artan tel uzunluğuna rağmen ölçüm hatası yine en az olan termokupul telleri kullanılmalıdır.
15. Deneysel dataları değerlendirmek amacıyla kullanılan bilgisayar kartının kapasitesi en az saniyede 1000 adet örnekleme yapabilecek seviyede olmalıdır. Bilgisayar kartına termokupul tellerinin bağlantısı; gürültü seviyesi

yüksek olan ve single bağlantı olarak bilinen metot yerine gürültü seviyesi en az olan diferansiyel bağlantı metodu ile yapılmalıdır.

16. Test bölümü girişinde akışkan kütleli debi değerlerinde oluşan osilasyonları tespit etmek amacıyla kullanılan diferansiyel basınç transdüseri yerine responsu ve hassasiyeti daha yüksek olan manyetik rezonanslı debi transdüserleri kullanılmalıdır.
17. Petrol istasyonları gibi işletmelerde akışkanın sirkülasyonunda problemlere neden olan slug ve plug akış rejimlerinde ortaya çıkan slug ve plug parçacıklarının dinamik davranışları teorik ve deneysel olarak araştırılmalıdır. Bu amaçla akış ortamında meydana gelen slug ve plug parçacıklarının dağıtılarak yok edilmesi amacıyla akış ortamına cidarla temas halinde olan veya olmayan farklı geometrik yapıya sahip yüzey artırım elemanları yerleştirilmelidir.
18. İki fazlı akış olaylarının incelenmesinde oldukça iyi sonuçlar sağlayan ve bütün osilasyon tiplerine uygulanabilecek yeni boyutsuz parametreler geliştirilmelidir.
19. Deneysel çalışmalar boyunca ihtiyaç duyulan ısı enerjisini temin etmek amacıyla kullandığımız güç kaynağının elektrik bağlantı kablolarının test borusuna tespit edildiği kutuplara yakın yerlerden alınan cidar sıcaklık ölçümlerinde dikkati çeken düzensizlikleri en aza indirmek amacıyla yeni bağlantı tekniklerinin geliştirilmesi uygun olacaktır.
20. İki fazlı akış olayları ile ilgili bir çok formülasyon da karşılaşılan ve void fraction olarak bilinen boşluk oranının deneysel olarak tespit edilmesi amacıyla void metre kullanılmalıdır. Araştırmacılar tarafından geliştirilen korelasyonlar yardımıyla hesaplamalarda kullanılan boşluk oranı değerlerindeki hata oranı boşluk ölçer (void metre) kullanılarak nispeten azaltılmış olacaktır.
21. Osilasyonların periyot ve genliklerinin mikro seviyelerde araştırılması temin edecek harmonik analizler genişletilerek yapılmalıdır.
22. Boru çapı ve uzunluğu ile beraber farklı boru iç yüzey konfigürasyonlarının iki fazlı akış rejimlerine, osilasyonların periyot ve genliklerine yaptıkları etkileri daha kapsamlı olarak anlamak için yeni çalışmalara ihtiyaç vardır.

EK A

HATA ANALİZİ

Çeşitli ölçüm elemanları ile yapılan ölçümlere hatalar yada belirsizlikler eklenmektedir. Bu hatalar kaçınılmaz olup tamamen önlenemezler. Bu nedenle bu hataları bu hataları belirli bir doğruluk seviyesine indirmek gerekir.

Deneyisel çalışma esnasında elde edilen datalar da belirli bir hata oranını içermektedirler. Ölçüm elemanları ile yapılan ölçümlerde söz konusu olan bu hatalar genel olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar; ölçüm prosesleri ile ilgili olan hatalar ve ölçüm düzenekleri ile ilgili olarak ortaya çıkan hatalardır.

1. Ölçüm Prosesleri İle İlgili Olan Hatalar

1.1. Belirsizliklerin İnterpolasyonu, σ_{itp}

Deneyisel verilerin okunması esnasında ölçüm düzeneklerinden herhangi birinin ölçeğinde en küçük değer bulmaya çalışırken bu tarz belirsizlikler ortaya çıkmaktadır. Böyle bir interpolasyon belirsizliği aşağıdaki ifade ile gösterilebilir:

$$\sigma_{itp} = \pm \frac{\text{en küçük bölme}}{2} \quad (A.1)$$

Dijital ölçümlerde ise bu tip belirsizlikler:

$$\sigma_{itp} = \begin{matrix} + & \alpha_1 \\ - & \beta_1 \end{matrix} \quad (A.2)$$

Yukarıdaki denklem için:

$$\alpha_1 = \frac{4}{10^{n+1}}, \quad \beta_1 = \frac{5}{10^{n+1}} \quad (A.3)$$

Yukarıdaki denklemlerde gösterilen n terimi ölçüm elemanlarının göstergelerinden okunan ondalık sayıdır. Bu tip belirsizlikler iyi bir ölçüm okuma teknikleri öğrenilerek azaltılabilir.

1.2. Paralaks (Iraklık Açısı), σ_{par}

Bu tip belirsizlikler ise sadece ölçekli düzeneklerde ortaya çıkmaktadır. Bunlara genellikle zayıf ışık, okuyucu ile düzenek arasında doğru olmayan bağlı pozisyonlar sebep olmaktadır. Ölçekli düzeneklerde ideal bir ölçek çizgileri, ibre ve okuyucunun göz pozisyonlarının mükemmel olmasıyla elde edilebilir. Bu da deneysel çalışmalar esnasında mükemmel manada sağlanamadığından paralaks açısının dikkate alınması gerekir. Bu tip belirsizlik okuyucunun göz ve baş pozisyonu değiştirilerek ve ölçek çizgilerinin net olarak okunmasını temin edecek aynaların kullanılarak azaltılabilir.

1.3. Personel Hataları

Personel hatalarına dikkatsiz okuma ve ayar sebep olmaktadır. Okuyucunun son derece küçük oranda olsa bile gözlem esnasında herhangi bir yanlış data okuması sonuçları doğrudan etkileyebilir. Bu tip hatalar dikkatlice ve tekrar tekrar yapılan okumalarla azaltılabilir.

1.4. Sık Sık Yapılan Ölçümlerdeki Belirsizlikler, σ_s

Deneysel ölçüm düzenekleri en iyi imkanlarla donatılmış olsa bile gerçek bir ölçüm değerinin elde edilmesi bugün bile imkansızdır. Bu tip belirsizliklerde ilk önce okuyucunun fikir ve reaksiyonunun doğru anda ölçüm almasına engel olması, ikinci olarak ölçücünün daima belirli bir dalgalanma altında bulunması önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle aynı ölçümler birkaç kez alınmalı ve

alınan bu dataların ortalaması alınarak ölçme aletinden tek bir ölçüm alınmış gibi bu ortalama değere hesaplara katılır. Yani:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{A.4})$$

Bu ortalama değere katılan belirsizlik standart sapmadır ki buda aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} \quad (\text{A.5})$$

1.5.Ölçüm Düzenekleri İle Datalara Eklenen Hatalar

Deneysel dataların okunduğu ölçüm elemanlarının imalatçı firmalar tarafından yapılmış olan kalibrasyon işlemlerinin ne kadar doğru olduğuna dair halen şüpheler vardır. Genelde imalatçı firmalar bu yüzden ölçüm elemanları ile beraber ölçüm elemanının optimum deneysel çalışma şartlarında kullanılmasını sağlayacak prospektüsler vermektedirler. Bu prospektüslerdeki kalibrasyon özelliklerine dikkat etmemiz gerekmektedir. Bu tip belirsizlikler için aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır:

$$\delta x(\%) = \sigma_d(\%) \frac{R}{x'} \quad (\text{A.6})$$

Burada; $\sigma_d(\%)$ ölçüm elemanlarının tüm ölçek uzunluğuna dayandırılmış bir özelliktir. R ise ölçüm elemanının ölçüm limitini ve x' ölçüm elemanlarından alınan gerçek okuma değerini göstermektedir.

1.6. Hassasiyet, σ_a

Hassasiyet; ölçülen gerçek değer ile okunan değer arasındaki sapmadır. Genellikle bu değer % ile ifade edilir.

1.7. Lineerlik, σ_l

Lineerlik; ölçüm düzeneğinin optimum çalışma referansını belirlemek amacıyla çizilen düz bir çizgiye kalibrasyon eğrisinin yakınlığı ile tanımlanır. Kalibrasyon eğrisinin bu çizgiden sapma derecesi tüm ölçeğin % değeri ile ifade edilir.

1.8. Histerezlik, σ_h

Histerezlik; ölçek üstünden ve altından aynı ölçümlere başlanıldığı zaman elde edilen datalar arasındaki farkla açıklanmaktadır. Bu değerde genellikle tüm ölçeğin % değeri ile ifade edilmektedir. Histerezliğe sürtünmeden dolayı ölçüm elemanlarının içinde meydana gelen enerji kayıpları sebep olmaktadır. Aynı şekilde ölçüm elemanının mekanik kısımlarında oluşan çeşitli darbelerde histerezliğe neden olmaktadır.

1.9. Tekrarlanma, σ_r

Tekrarlanma; ardışık olarak aynı yönde ve aynı büyüklükte ölçümler alınırken elde edilen datalar arasındaki farklarla açıklanabilmektedir. Buda tüm ölçeğin % değeri ile ifade edilmektedir.

1.10. Kalibrasyon Belirsizliği, σ_c

Bu özellik hiçbir imalatçı firma tarafından belirlenemeyen bir özelliktir. Kalibrasyon belirsizliği ölçüm elemanlarının imalatından ve kalibrasyon esnasında ortaya çıkan bir belirsizliktir. Bu tip belirsizliklerin karakterlerinin

belirlenmesinde yapılabilecek sistematik bir yol yoktur. Çok kademeli ölçümlerde azaltılamaz ancak daha iyi ölçüm elemanları imal edilerek azaltılabilirler. Kalibrasyon belirsizliği genellikle tecrübeye dayanan tahminlerle ölçüm elemanı üzerinde tespit edilmektedir.

1.11. Toplam Hata Oranı, σ_{all}

Ölçüm proseslerinin belirsizlikleri ile ilgili genel tahmini değerleri gösteren hatalardır ki bunlar σ_{ran} ile gösterilirken yine ölçüm elemanları ile ilgili sistematik hatalar σ_{sys} ile aşağıdaki gibi gösterilmektedir:

$$\sigma_{ran} = \sqrt{\sigma_{itp}^2 + \sigma_{par}^2 + \sigma_s^2} \quad (A.7)$$

$$\sigma_{sys} = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_1^2 + \sigma_h^2 + \sigma_r^2 + \sigma_2^2} \quad (A.8)$$

Tek bir ölçüm elemanı kullanıldığı zaman;

$$\sigma_{all} = \sqrt{\sigma_{ran}^2 + \sigma_{sys}^2} \quad (A.9)$$

Birden fazla ölçüm elemanı kullanıldığı zaman;

$$\sigma_{all} = \sqrt{\sigma_{ran}^2 + \sum_1^n \sigma_{sys,i}^2} \quad (A.10)$$

Burada n ölçüm elemanı sayısını göstermektedir. Şayet σ_{all} birden fazla bağımsız ölçümleri olan $x_1, x_2, \dots, x_m$ ile ilgili toplam hata değeri ise;

$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$, $\sigma_{all,1}, \sigma_{all,2}, \dots, \sigma_{all,m}$ için y ile ilgili toplam hata;

$$\sigma_{all,y} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \sigma_{all,1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \sigma_{all,2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_m} \sigma_{all,m}\right)^2} \quad (A.11)$$

1.12. Özellikler

Deneyisel çalışmalar süresince kullanılan ölçüm prosesleri ve düzenekleri ile ilgili özellikler aşağıdaki Tablo A.1 'de verilmiştir.

Tablo A.1. Ölçüm Elemanlarının Özellikleri

Özellikler Ölçüm Elemanları	% Doğruluk	% Tekrarlanma	% Histerezislik	% Lineerlik	% Hassasiyet
Manometre, Ölçekli	± 0.1	± 0.02	± 0.1	-	± 0.01
Manometre, Dijital	± 0.25	-	-	-	-
Basınç Transdüseri	± 0.25	± 0.25	± 0.25	± 0.25	-
Diferansiyel Basınç Transdüseri	± 1	-	± 0.5	± 0.5	-
Rotametre	± 2.5	± 0.5	-	-	-
Bilgisayar Kartı	± 10mV/°C	-	-	-	± 0.5
T-tipi Termokupul	± 0.4	-	-	-	-
Pens Ampermetre	± 1	-	-	-	-
DC Güç Kaynağı	± 0.5	-	-	-	-

EK B

DENEYSEL SONUÇLAR

Tablo B.1. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-1 $T_g=16^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=23.36 \text{ g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Tek Fazlı Konveksiyon			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	43	76
1	0.077	41	44
2	0.153	39	57
3	0.23	42	63
4	0.31	45	66
5	0.383	43	69
6	0.46	49	73
7	0.54	42	71
8	0.61	51	75
9	0.69	59	78
10	0.77	64	81
11	0.84	62	83
12	0.92	67	82
13	1	73	82

Tablo B.2. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-1 $T_g=28^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=67.5\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Kısmi Kaynama			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	51	59
1	0.077	64	68
2	0.153	67	73
3	0.23	72	76
4	0.31	81	79
5	0.383	71	87
6	0.46	83	94
7	0.54	72	96
8	0.61	86	108
9	0.69	89	114
10	0.77	70	117
11	0.84	61	64
12	0.92	60	62
13	1	59	63

Tablo B.3. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-1 $T_g=24^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=75\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Kısmi Kaynama			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	53	61
1	0.077	65	70
2	0.153	69	75
3	0.23	73	78
4	0.31	83	80
5	0.383	73	88
6	0.46	85	96
7	0.54	73	97
8	0.61	88	110
9	0.69	91	116
10	0.77	71	118
11	0.84	63	66
12	0.92	62	64
13	1	61	65

Tablo B.4. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-1 $T_g=24^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=75\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Kısmi Kaynama			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	56	64
1	0.077	66	71
2	0.153	71	77
3	0.23	74	79
4	0.31	83	90
5	0.383	74	89
6	0.46	86	97
7	0.54	74	98
8	0.61	89	112
9	0.69	92	119
10	0.77	72	121
11	0.84	65	69
12	0.92	63	67
13	1	62	64

Tablo B.5. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-1 $T_g=19^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=75\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Kısmi Kaynama			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	51	66
1	0.077	69	72
2	0.153	72	79
3	0.23	75	83
4	0.31	82	91
5	0.383	77	93
6	0.46	87	104
7	0.54	75	108
8	0.61	90	116
9	0.69	93	121
10	0.77	74	124
11	0.84	66	77
12	0.92	64	75
13	1	61	74

Tablo B.6. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-1 $T_g=28^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=60\text{ g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi:			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	67	87
1	0.077	84	96
2	0.153	72	74
3	0.23	73	77
4	0.31	74	81
5	0.383	71	76
6	0.46	76	78
7	0.54	77	81
8	0.61	79	84
9	0.69	80	86
10	0.77	78	84
11	0.84	81	87
12	0.92	79	86
13	1	78	83

Tablo B.7. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-1 $T_g=28^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=36\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Çekirdekli Kaynama			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	69	88
1	0.077	74	97
2	0.153	75	76
3	0.23	77	78
4	0.31	81	83
5	0.383	79	77
6	0.46	83	79
7	0.54	85	84
8	0.61	87	87
9	0.69	89	89
10	0.77	86	88
11	0.84	84	87
12	0.92	85	87
13	1	85	84

Tablo B.8. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-1 $T_g=24^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=36\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Çekirdekli Kaynama			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	71	79
1	0.077	69	83
2	0.153	70	86
3	0.23	72	89
4	0.31	74	96
5	0.383	78	99
6	0.46	79	94
7	0.54	82	95
8	0.61	85	108
9	0.69	86	106
10	0.77	88	103
11	0.84	87	99
12	0.92	88	101
13	1	88	100

Tablo B.9. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-1 $T_g=28^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=22.5\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Merkezi Katmanlaşma			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	79	89
1	0.077	86	92
2	0.153	84	98
3	0.23	85	107
4	0.31	86	111
5	0.383	83	115
6	0.46	99	124
7	0.54	104	114
8	0.61	108	111
9	0.69	106	112
10	0.77	87	111
11	0.84	106	110
12	0.92	88	114
13	1	86	113

Tablo B.10. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-1 $T_g=28^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=25\text{ g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Merkezi Katmanlaşma			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	81	92
1	0.077	84	94
2	0.153	85	111
3	0.23	86	116
4	0.31	88	119
5	0.383	85	135
6	0.46	89	131
7	0.54	91	127
8	0.61	92	124
9	0.69	98	125
10	0.77	96	126
11	0.84	94	119
12	0.92	97	124
13	1	93	125

Tablo B.11. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-1 $T_g=16^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=22.5\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Merkezi Katmanlaşma			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	65	73
1	0.077	69	76
2	0.153	71	78
3	0.23	73	83
4	0.31	75	89
5	0.383	76	105
6	0.46	79	116
7	0.54	83	127
8	0.61	85	137
9	0.69	87	141
10	0.77	86	138
11	0.84	82	136
12	0.92	88	129
13	1	87	127

Tablo B.12. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-1 $T_g=22^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=12.5\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Lokal Katmanlaşma			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	74	87
1	0.077	77	115
2	0.153	78	137
3	0.23	79	156
4	0.31	83	197
5	0.383	85	213
6	0.46	86	209
7	0.54	86	139
8	0.61	88	210
9	0.69	91	213
10	0.77	94	206
11	0.84	90	211
12	0.92	87	228
13	1	88	221

Tablo B.13. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-1 $T_g=16^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=12.5\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Lokal Katmanlaşma			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	61	89
1	0.077	69	127
2	0.153	71	154
3	0.23	76	181
4	0.31	78	192
5	0.383	82	209
6	0.46	84	207
7	0.54	87	179
8	0.61	89	206
9	0.69	91	211
10	0.77	86	218
11	0.84	84	212
12	0.92	88	229
13	1	87	224

Tablo B.14. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-1 $T_g=19^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=22.5\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Tam Katmanlı Akış			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	77	81
1	0.077	81	87
2	0.153	87	91
3	0.23	91	98
4	0.31	96	128
5	0.383	99	122
6	0.46	104	129
7	0.54	107	136
8	0.61	111	133
9	0.69	116	132
10	0.77	113	129
11	0.84	109	131
12	0.92	115	132
13	1	113	128

Tablo B.15. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-1 $T_g=16^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=12.5\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Tam Katmanlı Akış			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	68	79
1	0.077	74	103
2	0.153	75	121
3	0.23	77	149
4	0.31	81	174
5	0.383	86	187
6	0.46	89	221
7	0.54	93	185
8	0.61	96	188
9	0.69	99	227
10	0.77	94	211
11	0.84	91	228
12	0.92	96	231
13	1	97	230

Tablo B.16. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-2 $T_g=16^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=45\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Tek Fazlı Konveksiyon			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	45	77
1	0.077	42	45
2	0.153	41	59
3	0.23	43	64
4	0.31	44	65
5	0.383	45	68
6	0.46	46	71
7	0.54	40	69
8	0.61	49	73
9	0.69	57	76
10	0.77	63	80
11	0.84	61	82
12	0.92	66	81
13	1	71	81

Tablo B.17. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-2 $T_g=28^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=75\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Kısmi Kaynama			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	47	53
1	0.077	60	63
2	0.153	64	67
3	0.23	69	71
4	0.31	78	77
5	0.383	68	77
6	0.46	80	86
7	0.54	70	87
8	0.61	83	99
9	0.69	85	104
10	0.77	68	106
11	0.84	59	61
12	0.92	58	59
13	1	58	60

Tablo B.18. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-2 $T_g=24^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=75\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Kısmi Kaynama			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	51	56
1	0.077	64	66
2	0.153	67	71
3	0.23	71	73
4	0.31	80	84
5	0.383	69	78
6	0.46	80	87
7	0.54	70	88
8	0.61	84	91
9	0.69	88	106
10	0.77	67	103
11	0.84	60	63
12	0.92	58	60
13	1	57	58

Tablo B.19. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-2 $T_g=28^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=60\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Çekirdekli Kaynama			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	61	75
1	0.077	80	86
2	0.153	68	69
3	0.23	70	72
4	0.31	71	75
5	0.383	66	69
6	0.46	71	72
7	0.54	72	74
8	0.61	73	76
9	0.69	74	77
10	0.77	73	76
11	0.84	76	81
12	0.92	74	77
13	1	73	76

Tablo B.20. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-2 $T_g=28^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=22.5\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Merkezi Katmanlaşma			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	73	78
1	0.077	80	84
2	0.153	76	85
3	0.23	78	93
4	0.31	79	95
5	0.383	75	99
6	0.46	90	106
7	0.54	97	103
8	0.61	99	101
9	0.69	98	102
10	0.77	80	94
11	0.84	98	101
12	0.92	80	97
13	1	78	97

Tablo B.21. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-2 $T_g=22^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=12.5\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Lokal Katmanlaşma			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	68	75
1	0.077	70	96
2	0.153	71	111
3	0.23	72	126
4	0.31	74	164
5	0.383	76	174
6	0.46	78	172
7	0.54	78	121
8	0.61	80	175
9	0.69	84	179
10	0.77	87	176
11	0.84	84	177
12	0.92	82	188
13	1	83	186

Tablo B.22. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-2 $T_g=19^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=22.5\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Tam Katmanlı Akış			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	73	75
1	0.077	76	77
2	0.153	80	81
3	0.23	82	85
4	0.31	87	97
5	0.383	91	107
6	0.46	97	113
7	0.54	98	118
8	0.61	93	116
9	0.69	107	114
10	0.77	105	113
11	0.84	102	115
12	0.92	106	116
13	1	104	113

Tablo B.23. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-3 $T_g=16^\circ\text{C}$ $\dot{m}=45\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Tek Fazlı Konveksiyon			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)
0	0	44	76
1	0.077	43	44
2	0.153	42	58
3	0.23	44	63
4	0.31	45	64
5	0.383	46	67
6	0.46	47	70
7	0.54	41	68
8	0.61	50	72
9	0.69	58	75
10	0.77	64	79
11	0.84	62	81
12	0.92	67	80
13	1	72	80

Tablo B.24. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-3 $T_g=28^\circ\text{C}$ $\dot{m}=75\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Kısmi Kaynama			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)
0	0	49	59
1	0.077	62	66
2	0.153	66	71
3	0.23	71	75
4	0.31	80	78
5	0.383	70	82
6	0.46	82	91
7	0.54	72	93
8	0.61	85	105
9	0.69	87	110
10	0.77	70	115
11	0.84	61	64
12	0.92	60	62
13	1	59	62

Tablo B.25. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-3 $T_g=24^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=75\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Kısmi Kaynama			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	53	60
1	0.077	66	70
2	0.153	69	75
3	0.23	74	78
4	0.31	83	89
5	0.383	73	87
6	0.46	84	94
7	0.54	73	95
8	0.61	87	98
9	0.69	91	116
10	0.77	71	113
11	0.84	63	67
12	0.92	62	66
13	1	61	63

Tablo B.26. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-3 $T_g=28^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=60\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Çekirdekli Kaynama			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	64	82
1	0.077	83	94
2	0.153	71	73
3	0.23	72	76
4	0.31	73	79
5	0.383	70	75
6	0.46	75	77
7	0.54	76	80
8	0.61	77	82
9	0.69	79	84
10	0.77	77	83
11	0.84	80	85
12	0.92	78	84
13	1	77	82

Tablo B.27. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-3 $T_g=28^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=22.5\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Merkezi Katmanlaşma			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	76	85
1	0.077	83	89
2	0.153	81	93
3	0.23	82	101
4	0.31	83	104
5	0.383	80	109
6	0.46	96	118
7	0.54	101	110
8	0.61	104	108
9	0.69	103	110
10	0.77	84	104
11	0.84	102	107
12	0.92	86	109
13	1	84	108

Tablo B.28. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-3 $T_g=22^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=12.5\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Lokal Katmanlaşma			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	71	82
1	0.077	74	109
2	0.153	75	124
3	0.23	76	144
4	0.31	79	185
5	0.383	81	201
6	0.46	82	200
7	0.54	82	131
8	0.61	84	202
9	0.69	89	208
10	0.77	90	197
11	0.84	88	204
12	0.92	86	221
13	1	87	216

Tablo B.29. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-3 $T_g=19^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=22.5\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Tam Katmanlı Akış			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	76	80
1	0.077	79	83
2	0.153	84	87
3	0.23	87	93
4	0.31	93	122
5	0.383	96	116
6	0.46	101	122
7	0.54	104	134
8	0.61	108	127
9	0.69	112	125
10	0.77	110	124
11	0.84	105	125
12	0.92	111	126
13	1	109	122

Tablo B.30. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-4 $T_g=16^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=45\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Tek Fazlı Konveksiyon			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	44	76
1	0.077	42	44
2	0.153	41	57
3	0.23	45	64
4	0.31	44	65
5	0.383	46	68
6	0.46	46	66
7	0.54	41	69
8	0.61	50	73
9	0.69	57	76
10	0.77	64	80
11	0.84	62	82
12	0.92	67	81
13	1	72	81

Tablo B.31. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-4 $T_g=28^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=75\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Kısmi Kaynama			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	50	57
1	0.077	63	67
2	0.153	67	72
3	0.23	72	76
4	0.31	81	79
5	0.383	71	83
6	0.46	83	92
7	0.54	73	94
8	0.61	86	106
9	0.69	88	111
10	0.77	71	116
11	0.84	62	65
12	0.92	60	63
13	1	60	63

Tablo B.32. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-4 $T_g=24^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=75\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Kısmi Kaynama			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	54	61
1	0.077	67	72
2	0.153	70	77
3	0.23	75	78
4	0.31	84	90
5	0.383	74	89
6	0.46	85	96
7	0.54	74	97
8	0.61	88	100
9	0.69	92	117
10	0.77	72	115
11	0.84	64	69
12	0.92	63	67
13	1	62	64

Tablo B.33. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-4 $T_g=28^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=60\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Çekirdekli Kaynama			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	65	83
1	0.077	84	95
2	0.153	72	75
3	0.23	73	77
4	0.31	74	81
5	0.383	71	77
6	0.46	76	79
7	0.54	77	81
8	0.61	78	83
9	0.69	80	86
10	0.77	78	85
11	0.84	81	87
12	0.92	79	85
13	1	78	83

Tablo B.34. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-4 $T_g=28^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=22.5\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Merkezi Katmanlaşma			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	77	86
1	0.077	84	91
2	0.153	82	94
3	0.23	83	102
4	0.31	84	104
5	0.383	81	111
6	0.46	97	120
7	0.54	102	112
8	0.61	104	109
9	0.69	85	111
10	0.77	103	106
11	0.84	87	109
12	0.92	85	111
13	1	83	109

Tablo B.35. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-4 $T_g=22^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=12.5\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Lokal Katmanlaşma			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	72	83
1	0.077	75	110
2	0.153	76	126
3	0.23	77	146
4	0.31	80	187
5	0.383	82	203
6	0.46	83	202
7	0.54	83	133
8	0.61	85	204
9	0.69	90	210
10	0.77	91	198
11	0.84	89	205
12	0.92	87	223
13	1	88	214

Tablo B.36. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-4 $T_g=19^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=22.5\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Tam Katmanlı Akış			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	77	81
1	0.077	80	85
2	0.153	85	89
3	0.23	88	95
4	0.31	94	124
5	0.383	97	118
6	0.46	102	124
7	0.54	105	136
8	0.61	109	128
9	0.69	113	127
10	0.77	111	126
11	0.84	106	127
12	0.92	112	128
13	1	110	123

Tablo B.37. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-5 $T_g=16^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=45\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Tek Fazlı Konveksiyon			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	44	76
1	0.077	42	44
2	0.153	42	58
3	0.23	44	64
4	0.31	45	66
5	0.383	47	69
6	0.46	47	67
7	0.54	42	69
8	0.61	51	74
9	0.69	57	76
10	0.77	64	80
11	0.84	63	83
12	0.92	67	82
13	1	72	82

Tablo B.38. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-5 $T_g=28^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=75\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Kısmi Kaynama			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	51	58
1	0.077	64	67
2	0.153	66	72
3	0.23	72	76
4	0.31	80	78
5	0.383	72	84
6	0.46	83	93
7	0.54	73	95
8	0.61	87	106
9	0.69	89	112
10	0.77	72	117
11	0.84	62	66
12	0.92	61	64
13	1	61	64

Tablo B.39. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-5 $T_g=24^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=75\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Kısmi Kaynama			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	55	62
1	0.077	67	72
2	0.153	70	78
3	0.23	75	79
4	0.31	85	91
5	0.383	75	90
6	0.46	85	97
7	0.54	75	97
8	0.61	88	100
9	0.69	93	118
10	0.77	73	116
11	0.84	65	69
12	0.92	64	69
13	1	63	65

Tablo B.40. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-5 $T_g=28^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=60\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Çekirdekli Kaynama			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	66	84
1	0.077	85	96
2	0.153	73	75
3	0.23	74	78
4	0.31	75	82
5	0.383	72	78
6	0.46	77	79
7	0.54	78	83
8	0.61	81	87
9	0.69	78	87
10	0.77	79	87
11	0.84	81	87
12	0.92	79	86
13	1	78	84

Tablo B.41. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-5 $T_g=28^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=22.5\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Merkezi Katmanlaşma			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	78	87
1	0.077	84	92
2	0.153	83	95
3	0.23	84	103
4	0.31	85	105
5	0.383	81	112
6	0.46	97	110
7	0.54	102	113
8	0.61	106	110
9	0.69	105	113
10	0.77	85	107
11	0.84	104	110
12	0.92	87	112
13	1	85	110

Tablo B.42. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-5 $T_g=22^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=12.5\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Lokal Katmanlaşma			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	72	84
1	0.077	76	111
2	0.153	76	127
3	0.23	78	148
4	0.31	81	188
5	0.383	82	204
6	0.46	84	205
7	0.54	84	135
8	0.61	85	205
9	0.69	90	211
10	0.77	91	199
11	0.84	90	206
12	0.92	88	224
13	1	88	215-

Tablo B.43. Ortalama Cidar Sıcaklıkları

Boru: Boru-5 $T_g=19^{\circ}\text{C}$ $\dot{m}=22.5\text{g/s}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$ Kaynama Rejimi: Tam Katmanlı Akış			
Sıra No	Boru Uzunluğu: $\bar{Z}=z/L$	Alt Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Üst Cidar Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	77	82
1	0.077	81	86
2	0.153	86	91
3	0.23	88	96
4	0.31	95	125
5	0.383	97	119
6	0.46	103	126
7	0.54	106	137
8	0.61	110	129
9	0.69	114	128
10	0.77	112	128
11	0.84	107	129
12	0.92	113	130
13	1	111	125

Tablo B.44. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-1 $T_g=28^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}(\text{g/s})$	Dengeleyici Tank Basıncı P_S (Bar)	Çıkış Basıncı P_C (Bar)	ΔP (P_D-P_C) (Bar)
1	75	6.5	2.8	3.7
2	67.5	6.1	2.8	3.3
3	60	5.3	3.1	2.2
4	52.5	4.9	2.9	2
5	45	4.7	3.1	1.6
6	37.5	6	3.2	2.8
7	30	6.8	3.2	3.6
8	22.5	9.2	4.3	4.9
9	15	8.3	3.2	5.1
10	12.5	7.9	3.3	4.6
11	10.01	6.1	1.7	4.4
12	9.18	5.9	1.6	4.3

Tablo B.45. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-1 $T_g=24^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı P_c (Bar)	ΔP (P_D-P_c) (Bar)
1	75	6.5	3.2	3.3
2	67.5	6	3.2	2.8
3	60	5.3	3.4	1.9
4	52.5	4.8	3.5	1.3
5	45	4.7	3.6	1.1
6	37.5	6.1	3.8	2.3
7	30	6.8	3.7	3.1
8	22.5	8.2	3.8	4.4
9	15	7.9	3.4	4.5
10	12.5	7.5	3.3	4.2
11	10.01	7.3	3.2	4.1
12	9.18	7.1	3.2	3.9

Tablo B.46. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-1 $T_g=22^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı P_c (Bar)	ΔP (P_D-P_c) (Bar)
1	75	5.9	3	2.9
2	67.5	5.6	3.1	2.5
3	60	4.4	3.1	1.3
4	52.5	4	3	1
5	45	4.1	3.2	0.9
6	37.5	5	2.9	2.1
7	30	5.8	2.9	2.9
8	22.5	6.9	2.8	4.1
9	15	6.3	2.3	4
10	12.5	5.9	2.2	3.7
11	10.01	5.8	2.2	3.6
12	9.18	5.5	2	3.5

Tablo B.47. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-1 $T_g=19^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı P_c (Bar)	ΔP (P_D-P_c) (Bar)
1	75	5.7	3	2.7
2	67.5	5.5	3.2	2.3
3	60	4.2	3.3	0.9
4	52.5	3.9	3.3	0.6
5	45	3.6	3.1	0.5
6	37.5	4.7	3.1	1.6
7	30	5	2.6	2.4
8	22.5	6.4	2.7	3.7
9	15	6	2.4	3.6
10	12.5	5.6	2.4	3.2
11	10.01	5.4	2.3	3.1
12	9.18	5.2	2.2	3

Tablo B.48. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-1 $T_g=16^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı P_c (Bar)	ΔP (P_D-P_c) (Bar)
1	75	5.5	2.8	2.7
2	67.5	5.7	3.6	2.1
3	60	4.6	3.8	0.8
4	52.5	4.3	3.9	0.4
5	45	4.3	4	0.3
6	37.5	5.6	4.1	1.5
7	30	6.2	3.9	2.3
8	22.5	7.8	4.3	3.5
9	15	7.2	3.8	3.4
10	12.5	6.6	3.6	3
11	10.01	5.5	2.6	2.9
12	9.18	5.2	2.4	2.8

Tablo B.49. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-2 $T_g=24^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı P_c (Bar)	ΔP (P_D-P_c) (Bar)
1	75	7.2	3.3	3.9
2	67.5	7.1	3.6	3.5
3	60	7.2	4.6	2.6
4	52.5	6.7	4.5	2.2
5	45	6.5	4.6	1.9
6	37.5	7.3	4.2	3.1
7	30	7.1	3.2	3.9
8	22.5	7.2	2	5.2
9	15	7.2	1.9	5.3
10	12.5	7.3	2.4	4.9
11	10.01	7	2.3	4.7
12	9.18	6.8	2.3	4.5

Tablo B.50. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-2 $T_g=24^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı P_c (Bar)	ΔP (P_D-P_c) (Bar)
1	75	7.3	3.8	3.5
2	67.5	7.2	4.2	3
3	60	6.7	4.6	2.1
4	52.5	6.2	4.6	1.6
5	45	6.1	4.8	1.3
6	37.5	7.3	4.7	2.6
7	30	7.3	3.9	3.4
8	22.5	7.3	2.6	4.7
9	15	7.2	2.5	4.7
10	12.5	7.2	2.8	4.4
11	10.01	7.1	2.9	4.2
12	9.18	6.9	3	3.9

Tablo B.51. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-2 $T_g=22^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_S (Bar)	Çıkış Basıncı P_C (Bar)	ΔP (P_D-P_C) (Bar)
1	75	7.3	4.2	3.1
2	67.5	7	4.3	2.7
3	60	5.6	4.1	1.5
4	52.5	5.3	4.1	1.2
5	45	5	3.9	1.1
6	37.5	6.3	3.9	2.4
7	30	7.3	4.1	3.2
8	22.5	7.3	2.8	4.5
9	15	7.2	2.9	4.3
10	12.5	7.3	3.4	3.9
11	10.01	7.2	3.4	3.8
12	9.18	7	3.4	3.6

Tablo B.52. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-2 $T_g=19^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_S (Bar)	Çıkış Basıncı P_C (Bar)	ΔP (P_D-P_C) (Bar)
1	75	7.1	4.2	2.9
2	67.5	6.7	4.2	2.5
3	60	5.1	4	1.1
4	52.5	4.7	3.9	0.8
5	45	4.6	3.9	0.7
6	37.5	5.7	3.8	1.9
7	30	6.4	3.7	2.7
8	22.5	7.2	3.2	4
9	15	7.2	3.3	3.9
10	12.5	7	3.6	3.4
11	10.01	6.9	3.6	3.3
12	9.18	6.6	3.5	3.1

Tablo B.53. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-2 $T_g=16^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı P_c (Bar)	ΔP (P_D-P_c) (Bar)
1	75	7	4.1	2.9
2	67.5	6.7	4.4	2.3
3	60	5.5	4.5	1
4	52.5	5.1	4.5	0.6
5	45	5.1	4.6	0.5
6	37.5	5	3.2	1.8
7	30	5.9	3.4	2.5
8	22.5	7.2	3.4	3.8
9	15	6.9	3.2	3.7
10	12.5	6.8	3.5	3.3
11	10.01	6.7	3.5	3.2
12	9.18	6.5	2.6	2.9

Tablo B.54. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-3 $T_g=28^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı P_c (Bar)	ΔP (P_D-P_c) (Bar)
1	75	7.3	3.3	4
2	67.5	7.3	3.7	3.6
3	60	7.3	4.6	2.7
4	52.5	6.8	4.5	2.3
5	45	6.7	4.7	2
6	37.5	7.4	4.2	3.2
7	30	7.2	3.2	4
8	22.5	7.3	2	5.3
9	15	7.3	1.9	5.4
10	12.5	7.4	2.4	5
11	10.01	7.4	2.6	4.8
12	9.18	7.1	2.6	4.5

Tablo B.55. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-3 $T_g=24^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı P_c (Bar)	ΔP (P_D-P_c) (Bar)
1	75	7.2	3.6	3.6
2	67.5	7.2	4.1	3.1
3	60	7.2	5	2.2
4	52.5	6.7	5	1.7
5	45	6.6	5.2	1.4
6	37.5	7.2	4.5	2.7
7	30	7.1	3.6	3.5
8	22.5	7.1	2.3	4.8
9	15	7.2	2.4	4.8
10	12.5	7.3	2.8	4.5
11	10.01	7.3	3	4.3
12	9.18	7	2.8	4.2

Tablo B.56. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-13 $T_g=22^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı P_c (Bar)	ΔP (P_D-P_c) (Bar)
1	75	7.3	4.1	3.2
2	67.5	7.1	4.3	2.8
3	60	7.1	5.5	1.6
4	52.5	6.6	5.3	1.3
5	45	6.5	5.3	1.2
6	37.5	7.1	4.6	2.5
7	30	7	3.8	3.2
8	22.5	7	2.4	4.6
9	15	7.1	2.7	4.4
10	12.5	7.2	3.2	4
11	10.01	7.2	3.3	3.9
12	9.18	7.1	3.3	3.8

Tablo B.57. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-3 $T_g=19^0C$ $P_{sis}=7.5Bar$ $Q=16kW$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı P_c (Bar)	ΔP (P_D-P_c) (Bar)
1	75	7.2	4.2	3
2	67.5	7	4.4	2.6
3	60	7	5.8	1.2
4	52.5	6.5	5.6	0.9
5	45	6.4	5.6	0.8
6	37.5	7	5	2
7	30	6.9	4.1	2.8
8	22.5	6.9	2.8	4.1
9	15	7	3	4
10	12.5	7.1	3.6	3.5
11	10.01	7.1	3.7	3.4
12	9.18	7	3.7	3.3

Tablo B.58. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-3 $T_g=16^0C$ $P_{sis}=7.5Bar$ $Q=16kW$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı P_c (Bar)	ΔP (P_D-P_c) (Bar)
1	75	7.2	4.1	3.1
2	67.5	6.9	4.4	2.5
3	60	6.9	5.7	1.2
4	52.5	6.4	5.7	0.7
5	45	6.3	5.7	0.6
6	37.5	6.9	5	1.9
7	30	6.8	4.2	2.6
8	22.5	6.8	2.9	3.9
9	15	6.9	3.1	3.8
10	12.5	7	3.6	3.4
11	10.01	7	3.7	3.3
12	9.18	6.9	3.7	3.2

Tablo B.59. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-4 $T_g=28^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı $P_{\text{ç}}$ (Bar)	ΔP ($P_D-P_{\text{ç}}$) (Bar)
1	75	7.4	3.3	4.1
2	67.5	7.4	3.7	3.7
3	60	7.4	4.6	2.8
4	52.5	6.9	4.5	2.4
5	45	6.9	4.8	2.1
6	37.5	7.5	4.2	3.3
7	30	7.3	3.2	4.1
8	22.5	7.4	2	5.4
9	15	7.4	1.9	5.5
10	12.5	7.5	2.4	5.1
11	10.01	7.5	2.6	4.9
12	9.18	7.2	2.6	4.6

Tablo B.60. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-4 $T_g=24^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı $P_{\text{ç}}$ (Bar)	ΔP ($P_D-P_{\text{ç}}$) (Bar)
1	75	7.3	3.6	3.7
2	67.5	7.3	4.1	3.2
3	60	7.3	5	2.3
4	52.5	6.8	5	1.8
5	45	6.8	5.3	1.5
6	37.5	7.4	4.6	2.8
7	30	7.2	3.6	3.6
8	22.5	7.3	2.4	4.9
9	15	7.3	2.4	4.9
10	12.5	7.4	2.8	4.6
11	10.01	7.4	3	4.4
12	9.18	7.1	2.8	4.3

Tablo B.62. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-4 $T_g=22^0C$ $P_{sis}=7.5Bar$ $Q=16kW$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütlesel Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı P_c (Bar)	ΔP (P_D-P_c) (Bar)
1	75	7.2	3.9	3.3
2	67.5	7.2	4.3	2.9
3	60	7.2	5.6	1.7
4	52.5	6.7	5.3	1.4
5	45	6.7	5.4	1.3
6	37.5	7.3	4.7	2.6
7	30	7.1	3.8	3.3
8	22.5	7.2	2.5	4.7
9	15	7.2	2.7	4.5
10	12.5	7.3	3.2	4.1
11	10.01	7.3	3.3	4
12	9.18	7	3.1	3.9

Tablo B.63. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-4 $T_g=19^0C$ $P_{sis}=7.5Bar$ $Q=16kW$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütlesel Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı P_c (Bar)	ΔP (P_D-P_c) (Bar)
1	75	7.1	4	3.1
2	67.5	7.1	4.4	2.7
3	60	7.1	5.8	1.3
4	52.5	6.6	5.6	1
5	45	6.6	5.7	0.9
6	37.5	7.2	5.2	2
7	30	7	4.2	2.8
8	22.5	7.1	2.9	4.2
9	15	7.1	3	4.1
10	12.5	7.2	3.6	3.6
11	10.01	7.2	3.7	3.5
12	9.18	6.9	3.5	3.4

Tablo B.64. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-4 $T_g=16^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı P_c (Bar)	ΔP (P_D-P_c) (Bar)
1	75	7.1	3.9	3.2
2	67.5	7	4.4	2.6
3	60	6.9	5.6	1.3
4	52.5	6.4	5.6	0.8
5	45	6.4	5.7	0.7
6	37.5	7	5	2
7	30	6.8	4.1	2.7
8	22.5	7	3	4
9	15	7	3.1	3.9
10	12.5	7.1	3.6	3.5
11	10.01	7.1	3.7	3.4
12	9.18	6.7	3.4	3.3

Tablo B.65. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-5 $T_g=28^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı P_c (Bar)	ΔP (P_D-P_c) (Bar)
1	75	7.5	3.3	4.2
2	67.5	7.5	3.7	3.8
3	60	7.5	4.6	2.9
4	52.5	7	4.5	2.5
5	45	7	4.8	2.2
6	37.5	7.5	4.1	3.4
7	30	7.4	3.2	4.2
8	22.5	7.4	1.9	5.5
9	15	7.4	1.8	5.6
10	12.5	7.5	2.3	5.2
11	10.01	7.5	2.5	5
12	9.18	7.3	2.6	4.7

Tablo B.66. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-5 $T_g=24^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı P_c (Bar)	ΔP (P_D-P_c) (Bar)
1	75	7.4	3.6	3.8
2	67.5	7.3	4	3.3
3	60	7.3	4.9	2.4
4	52.5	6.8	5.9	1.9
5	45	6.8	5.8	1.6
6	37.5	7.3	4.4	2.9
7	30	7.2	3.5	3.7
8	22.5	7.2	2.2	5
9	15	7.3	2.3	5
10	12.5	7.3	2.6	4.7
11	10.01	7.2	2.7	4.5
12	9.18	7.1	2.7	4.4

Tablo B.67. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-5 $T_g=22^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı P_c (Bar)	ΔP (P_D-P_c) (Bar)
1	75	7.3	3.9	3.4
2	67.5	7.2	4.2	3
3	60	7.1	5.3	1.8
4	52.5	6.6	5.9	1.5
5	45	6.7	5.3	1.4
6	37.5	7.2	4.5	2.7
7	30	7.1	3.7	3.4
8	22.5	7	2.2	4.8
9	15	7.1	2.5	4.6
10	12.5	7.2	3	4.2
11	10.01	7.1	3	4.1
12	9.18	7	3	4

Tablo B.68. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru-5 $T_g=19^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı P_c (Bar)	ΔP (P_D-P_c) (Bar)
1	75	7.2	4	3.2
2	67.5	7.1	4.3	2.8
3	60	7	5.6	1.4
4	52.5	6.5	5.4	1.1
5	45	6.6	5.6	1
6	37.5	7.1	5	2.1
7	30	7	4.1	2.9
8	22.5	6.8	2.5	4.3
9	15	6.9	2.7	4.2
10	12.5	7	3.3	3.7
11	10.01	6.9	3.3	3.6
12	9.18	6.8	3.3	3.5

Tablo B.69. Kararlı Durum Sonuçları

Boru: Boru- 5 $T_g=16^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sis}}=7.5\text{Bar}$ $Q=16\text{kW}$ $\beta=0.448$				
Sıra No	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/s)	Dengeleyici Tank Basıncı P_s (Bar)	Çıkış Basıncı P_c (Bar)	ΔP (P_D-P_c) (Bar)
1	75	7.1	3.8	3.3
2	67.5	7	4.3	2.7
3	60	6.8	5.4	1.4
4	52.5	6.3	5.4	0.9
5	45	6.4	5.6	0.8
6	37.5	7	4.9	2.1
7	30	6.9	4.1	2.8
8	22.5	6.7	2.6	4.1
9	15	6.8	2.8	4
10	12.5	6.9	3.3	3.6
11	10.01	6.8	3.3	3.5
12	9.18	6.7	3.3	3.4

EK - C

DATA OKUMA PROGRAMI

```

REM $INCLUDE: 'AX5232.BI'
CONST BUFFERSIZE = 32
SCREEN 12
DOSYA$ = MID$(DATE$, 4, 2) + LEFT$(TIME$, 2) + MID$(TIME$, 4, 2) +
        RIGHT$(TIME$, 2)
OPEN dosya$ FOR OUTPUT AS #1
DIM c AS INTEGER, FLAG AS INTEGER, FUN AS INTEGER
DIM DIO%(0 TO 15)
DIM VERI(0 TO BUFFERSIZE) AS DOUBLE
DIM DAT(0 TO BUFFERSIZE) AS DOUBLE
WIDTH 80, 60

" INITIALIZE AX5232 : FUNCTION 0"

FUN% = 0
DIO%(0) = &H300 ' AX5232 BASE ADDRESS
DIO%(1) = 2     ' IRQ NO.
DIO%(2) = 200   ' GAIN
DIO%(3) = 3     ' THERMOCOUPLE TYPE
FLAG% = AX5232%(FUN%, DIO%(0))

IF FLAG% <> 0 THEN
    PRINT "FUNCTION 0 FAILED FLAG="; FLAG
    END
END IF

"SET START & STOP CHANNEL : FUNCTION 1"

RECH:
INPUT "ENTER START CHANNEL NUMBER <DIFF--0...31>", STR%
INPUT "ENTER STOP CHANNEL NUMBER <DIFF--0...31>", STP%

FUN% = 1
DIO%(0) = STR%
DIO%(1) = STP%
FLAG% = AX5232%(FUN%, DIO%(0))

IF FLAG% <> 0 THEN
    PRINT "FUNCTION 1 FAILED ! PLEASE RESUME..."
    GOTO RECH
END IF

```

CLS

PRINT "Dosya Adı:", dosya\$

LOCATE 5, 7

PRINT "T-Tipi Termokupulla 30 Kanal Sıcaklık ve 2 Transdüserle Basınç"

LOCATE 6, 7

PRINT "_____"

FOR i = 0 TO STP% - 2

PRINT #1, USING "## "; STR% + i;

NEXT i

PRINT #1, USING "### "; STP% - 1;

PRINT #1, USING "### "; STP%;

PRINT #1,

FOR i = 0 TO STP%

PRINT #1, " ";

NEXT i

start! = TIMER

!!:

PRINT #1,

'PRINT #1, TIMER - start!

'PRINT #1,

"N A/D CONVERSION DIRECT TO ARRAY : FUNCTION 7"

FUN% = 7

DIO%(0) = 32 ' NO. OF CONVERSION

DIO%(1) = VARPTR(DAT(0)) ' OFFSET OF DATA

DIO%(2) = VARSEG(DAT(0)) ' SEGMENT OF DATA

FLAG% = AX5232%(FUN%, DIO%(0))

IF FLAG% <> 0 THEN

PRINT "FUNCTION 7 FAILED FLAG="; FLAG%

END

END IF

"PRINT VALUE TO CRT"

i% = 0

c% = 0

FOR i% = 0 TO 29

IF c% < 16 THEN LOCATE 14 + 2 * c%, 5

IF c% > 15 THEN LOCATE -18 + 2 * c%, 45

VERI(i%) = (DAT(i%))

```

PRINT USING "NO## CHN## DATA = ###.## °C"; i%; STR% + c%;
VERI(i%)
PRINT
PRINT #1, USING "##.## "; VERI(i%);

FOR J% = 1 TO 10000
NEXT J%

c% = c% + 1
IF i% = BUFFERSIZE THEN GOTO mm
NEXT i%

mm:
FUN% = 4
DIO%(0) = 32 ' NO. OF CONVERSION
DIO%(1) = VARPTR(DAT(0)) ' OFFSET OF DATA
DIO%(2) = VARSEG(DAT(0)) ' SEGMENT OF DATA
FLAG% = AX5232%(FUN%, DIO%(0))

IF FLAG% <> 0 THEN
PRINT "FUNCTION 7 FAILED FLAG="; FLAG%
END
END IF

"PRINT VALUE TO CRT"

i% = 0
FOR i% = 30 TO 31
IF c% < 16 THEN LOCATE 14 + 2 * c%, 5
IF c% > 15 THEN LOCATE -18 + 2 * c%, 45
VERI(i%) = 10 * (DAT(i%))
PRINT USING "NO## CHN## DATA = ###.### v"; i%; STR% + c%;
VERI(i%)
PRINT
PRINT #1, USING "##.###"; VERI(i%);

FOR J% = 1 TO 10000
NEXT J%
c% = c% + 1
NEXT i%

GOTO II
CLOSE #1
END

```

KAYNAKLAR

- 1.Kakaç, S., Veziroğlu, T.N., Padki, M.M., Fu, L.Q. and Chen, X. J., 1990, Investigation of thermal instabilities in a forced convection upward boiling system. Experimental Thermal and Fluid Science. Published by Elsevier Science Publishing Co., New York, 3, 191-201.
- 2.Kakaç, S., Gavrilescu, C. O. and Çomaklı, Ö., 1995, Two phase flow instabilities with augmented surfaces in a horizontal in boiling system. 10. Turkish national conference on thermal sciences and technologies. Ankara, 1-26.
- 3.Yüncü, H., 1981, İki fazlı akımların dinamik kararsızlığı. Doçentlik tezi, O. D. T. Ü. Mühendislik Fakültesi, Ankara, 5-44, (yayınlanmamış).
- 4.Liu, H., 1993, Pressure drop type and thermal oscillations in convective boiling systems. PhD Thesis, University of Miami, Florida, 3-45,(unpublished).
- 5.Yüncü, H. and Haqqi, S. O., 1991, Yatay bir boruda iki fazlı akımların kararsızlığı. 10. Isı Bilimi Kongresi, Ankara, 41-51.
- 6.Kakaç, S. and Yüncü, H., 1986, Two phase flow instabilities in a horizontal single channel boiling systems. 4 th international symposium on multiphase transport and particulate phenomena, USA, 286-293.
- 7.Bergles, A. E., 1977, Review of instabilities in two phase systems. Two Phase Flows and Heat Transfer. Kakaç, S. and Mayinger, F. (ed.), 1, 383-385.
- 8.Yüncü, H. and Kakaç, S., 1988, Fundamentals of two phase flow instabilities. Thermal Hydraulic Fundamentals and Design of Two phase Flow Heat

Exchangers. Kakaç, S., and Bergles, A. E. (Ed.), Martinus Nijhoff Publishers, 31-46.

9. Boure, J. A., Bergles, A. E. and Tong, S., 1973, Review of two phase flow instability. Nucl. Eng. Des., 25, 165.
10. Yadigaroglu, G., 1978, Two phase flow instabilities and propagation phenomena. Von Karman Institute for fluid dynamics lecture series on two phase flows in nuclear reactors, 45, 32-76.
11. Chilton, H., 1957, a theoretical study of stability in water flow through heated passages. J. Nuclear Energy. 5, 271.
12. Widmann, F., Kakaç, S., 1994, Experimental investigation of two phase flow instabilities in a horizontal convective in tube boiling system. DIPLOMARBEIT SS 93-WS. Universitat Stuttgart, Germany, 1-116.
13. Boure, J. A., Bergles, A. E. and Tong, L. S., 1971, Review of two phase flow instability. Asme paper no: 71 HT-42. Oklahoma, ABD, 34-36.
14. Milashenko, V. I., Nigmatulin, B. I., Petukhov, V. V. and Trubkin, N. I., 1989, Burn out and distribution of liquid in evaporative channels of various lengths. Int. J. Multiphase Flow. 15, 313-325.
15. Jensen, M. K. and Pourdasthi, M., 1986, Critical heat flux on a horizontal cylinder in a upward subcooled and low quality two phase cross flow. J. Heat and Mass Transfer. 32, 131-145.
16. Davidov, A. A., 1956, elimination of pulsation in once through boilers. Elektricheskije Stantzu, USSR, 3, 36-43.

17. Merilo, Zahn, Bergles, Wallis, G. B. and Heasley, J. H., 1979, Oscillations in two phase systems. J. Heat Transfer, Trans. ASME, series C, 83, 363-369.
18. Kakaç, S., Ergür, H. S. and Uçar, İ., 1981, Aşırı soğutmanın iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi. 3. Ulusal ısı kongresi, İstanbul, 93-104.
19. Çiftçi, V., 1981, İki fazlı (gaz/ sıvı) akışlardaki kayıp katsayısının eldesi ve tek fazlı akışlardaki ile karşılaştırılması. 3. Ulusal ısı kongresi, İstanbul, 139-148.
20. Lahey, R. T., 1980, An assessment of the literature related to LWR instability mode. NUREG/CR1414, 32-36.
21. Bergles, A. E., 1981, Instabilities in two phase flow systems. Two Phase and Heat Transfer in The Power and Process Industries, Bergles, A. E., Collier, J. G., Delhaye, J. M., Hewitt, G. F. And Mayinger, F. (Ed.), hemisphere Publishing Corp., 231-246.
22. Becker, K. M., Letzter, A., Nylund, O. and Scholin, B., 1981, An experimental study of the effect of the of the axial heat flux distribution on the dryout conditions in a 3650mm long annulus. Int. J. Multiphase Flow, 7, 47-61.
23. Doğan, T., Kakaç, S. and Veziroğlu, T. N., 1983, Analysis of forced convection boiling flow instabilities in a single channel upflow system. Int. J. Heat and Fluid Flow, 4, 54-67.
24. Choen, A. B. and Ruder, Z. and Griffith, P., 1983, Circumferential wall temperature variations in horizontal boiler tubes. Int. J. Multiphase Flow, 9, 1-12.

25. Menteş, A., Yıldırım, O. T., Kakaç, S. and Veziroğlu, T. N., 1983, Effect of heat transfer augmentation on two phase flow instabilities in a vertical boiling channel. *Warme und Stoffübertragung*, 17, 161-169.
26. Yılmaz, T., 1983, Çok Fazlı Akışlar. KTÜ Müh. Mim. Fak. Yayını, 17, 1-34.
27. Lin, P. Y. and Hanratty, T. J., 1987, Effect of pipe diameter on flow patterns for air water flow in horizontal pipes. . *Int. J. Multiphase Flow*, 13, 549-563.
28. Wong, Y. L., Groneveld, D. C. and Cheng, S.C., 1990, CHF prediction for horizontal tubes. *Int. J. Multiphase Flow*. 16, 123-138.
29. Xu, Bao-Hua and Chen and Xue, J., 1990, An experimental investigation of two phase flow density wave type instability in vertical upflow tube. *Proc. of 2 nd Int. symp. on Multiphase flow and heat transfer*, Xian, China, Hemisphere, New york, 212-221.
30. Wang, Q., Veziroğlu, T. N., Kakaç, S., Chen, X. J. and Chen, T. K., 1990, An investigation on density wave oscillation. *Proc. 2 nd Int. symp. on multiphase flow and heat transfer*, Xian, China, Hemisphere, New York, 134-144.
31. Gao, Zuying, Li, Jincai and Qian, Like, 1990, Analysis of stability in a low pressure low quality and two phase flow with natural circulation. *Proc. 2 nd Int. symp. multiphase flow and heat transfer*, Xian, China, Hemisphere, New York, 22-29.
32. Wang, Chen, Gao, Zuying, Li, Jincai and Qian, Like, 1990, Analysis of stability in a low pressure low quality and two phase flow with natural circulation. *Proc. 2 nd Int. symp. multiphase flow and heat transfer*, Xian, China, Hemisphere, New York, 22-29.

33. Tso, C. P. and Sugawara, S., 1990, Film thickness prediction in a horizontal annular two phase flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 16, 867-884.
34. Kakaç, S. and Liu, H. T., 1990, Two phase flow dynamic instabilities in boiling systems. *Proc. of 2 nd Int. symp. on multiphase flow and heat transfer*, Xian, China, 125-148.
35. Liu, H. and Kakaç, S., 1991, An experimental investigation of thermally induced flow instabilities in a convective boiling upflow system. *Warme Stoffübertragung*, 26, 365-376.
36. Padki, M. M., Liu, H. T. and Kakaç, S., 1991, Two phase flow pressure drop type and thermal oscillations. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 12, 240-248.
37. Liu, H. T. and Kakaç, S., 1991, Parametric study of two phase flow instabilities in a convective boiling upflow system. ' nd World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Dubrovnik, Yugoslavia, 23-26.
38. Chen, T. and Zheng, J., 1991, Experimental investigation of boiling heat transfer characteristics in horizontal tube. *Multiphase Flow and Heat Transfer*. Chen, X. J., Veziroğlu, T. N. and Tien, C. L. (Ed.), Hemisphere, New York, 341-348.
39. Padki, M. M., Palmer, K., Kakaç, S. and veziroğlu, T. N., 1991, Bifurcation analysis of pressure drop oscillations and the Ledinegg instability. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 35, 525-532.
40. Padki, M. M., Liu, H. T. and Kakaç, S., 1991, Two phase flow pressure drop type and thermal oscillations. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 12, 240- 248.

41. Padki, M. M., Palmer, K., Kakaç, S. and Veziroğlu, T. N., 1992, Bifurcation analysis of pressure drop oscillations and the Ledinegg instability. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 35 (2), 525-532.
42. França, F. And Lahey, R. T., 1992, The use of drift flux techniques for the analysis of horizontal two phase flows. *Int. J. Multiphase Flow*, 18, 787-801.
43. Wang, Q., Chen, X. J., Chen, T. K., Veziroğlu, T. N. and Kakaç, S., 1992, An investigation on density wave oscillation. *Int. J. Multiphase Flow*, 6, 445-451.
44. Xiao, M., Chen, X. J., Zhang, M. Y., Veziroğlu, T. N. and Kakaç, S., 1993, A multivariable linear investigation of two phase flow instabilities in parallel boiling channels under high pressure. *Int. J. Multiphase Flow*, 19, 65-77.
45. Ding, Y., 1993, Experimental investigation of two phase flow phenomena in horizontal convective in tube boiling system. Ph.D. Thesis, University of Miami, Florida, USA, 21-65, (unpublished).
46. Fan, Z., Ruder, Z. and Hanratty, T. J., 1993, Pressure profiles for slugs in horizontal pipe lines. *Int. J. Multiphase Flow*, 19, 421-437.
47. Crowe, K. E. and Griffith, P., 1993, Intermittent flow dry-out limit in heated horizontal tubes. *Int. J. Multiphase Flow*, 19, 575-588.
48. Spedding, P. L. and Spence, D. R., 1993, Flow regimes in two phase gas-liquid flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 19, 245- 280.
49. Liu, H. T., Kakaç, S. and Mayinger, F., 1993, Characteristics of transition boiling and thermal oscillations in an up flow convective boiling

system. 29 th ASME/ AIChE/ ANS/ AIAA, National heat transfer conference, Atlanta, Georgia, 8-11.

50. Xu, B. and Chen, X. J., 1993, An experimental investigation of two phase flow density wave type instability in vertical upflow tube. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 33, 497-503.
51. Ding, Y., Scholz, F., Shen, R. H. and Kakaç, S., 1993, Two phase flow instabilities in a horizontal in tube boiling system. The 6 th int. symp. transport phenomena thermal engineering, Seoul, Korea, 221-233.
52. Wang, Q., Chen, X. J., Kakaç, S. and Ding, Y., 1994, An experimental investigation of density wave type oscillations in a convective boiling upflow system. University of Miami, Coral Gables, Florida, 1-26.
53. Stenning, A. H., 1994, Instabilities in the flow of a boiling liquid. *J. Basic Engineering. Trans. ASME Series D*, 86, 213.
54. Mayinger, F., Kakaç, S., Veziroğlu, T. N., Özboya, N. and Lee, S. S., 1994, transient boiling flow instabilities in a multi channel upflow system. *Warme Stoffübertragung*, 10, 175-188.
55. Pakopoulos, C. D., El- Shirbini, A. A. and Murgatroyd, W., 1994, Heat flux flow coupling effects in the stability of vapor generators. *Warme Stoffübertragung*, 13, 275-286.
56. Stapelberg, H. H. and Mewes, D., 1994, The pressure loss and slug frequency of liquid- liquid- gas slug flow in horizontal pipes. *Int. J. Multiphase Flow*, 20, 285-303.

57. Wilmarth, T. and Ishii, M., 1994, Two phase flow regimes in narrow rectangular vertical and horizontal channels. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 37, 1749-1758.
58. Cornwell, K. and Houston, S. D., 1994, Nucleate pool boiling on horizontal tubes: a convection based correlation. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 37, 303- 309.
59. Papell, S. S., 1994, An instability effect on two phase heat transfer for subcooled water flowing under conditions of zero gravity. NASA TN D-2259, 1-6.
60. Rizwan-uddin, 1994, On density wave oscillations in two phase flows. *Int. J. Multiphase Flow*, 20, 721-737.
61. Kakaç, S., 1994, A review of two phase flow instabilities. *Int. J. Multiphase Flow*, 22, 1-67.
62. Wu, S. R., Bo, J. H., Yao, M. S., Jiang, S. Y., Han, B. and Li, R. Z., 1994, An experimental investigation on hydrodynamic stability of low quality two phase flow in a low pressure natural circulation system. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 11, 488- 496.
63. Gupta, A., Saini, J. S. and Varna, H. K., 1995, Boiling heat transfer in small horizontal tube bundles at low cross flow velocities. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 38, 599-605.
64. Flores, A. G., Crowe, K. E. and Griffith, P., 1995, Gas- phase secondary flow in horizontal, stratified and annular two phase flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 21, 207-221.

65. Yüksel, C., 1988, İki Fazlı Akımlar. Yıldız Üniversitesi, Yüksek Lisans Ders Notları, 1-30.
66. Butterworth, D. and Hewitt, G. F., 1978, Two- Phase Flow and Heat Transfer. Oxford University, ISBN 0 19 851715 7, Great Britain, 1-511.
67. Genceli, O., 1995, Ölçme Tekniği. İTÜ Mak. Fak., Birsen Yayınevi, İstanbul, 185- 192.

