

**ISI TRANSFERİ İYİLEŞTİRMESİNİN
İKİ FAZLI AKIŞ KARANRSIZLIKLARINA
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Şendoğan KARAGÖZ

**Doktora Tezi
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Mehmet YILMAZ
2007**

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**ISI TRANSFERİ İYİLEŞTİRMESİNİN İKİ FAZLI AKIŞ
KARARSIZLIKLARINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Şendoğan KARAGÖZ

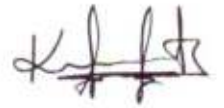
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ERZURUM
2007**

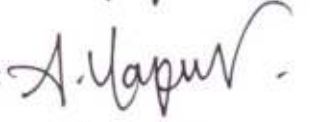
Her hakkı saklıdır

Doç. Dr. Mehmet YILMAZ'ın danışmanlığında, Şendoğan KARAGÖZ tarafından hazırlanan bu çalışma 08/06/2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Kamil KAYGUSUZ

İmza : 

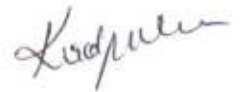
Üye : Prof. Dr. Sinan YAPICI

İmza : 

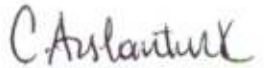
Üye : Doç. Dr. Mehmet YILMAZ

İmza : 

Üye : Doç. Dr. Kadir BİLEN

İmza : 

Üye : Doç. Dr. Cihat ASLANTÜRK

İmza : 

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım esnasında her zaman güvenini ve desteğini gördüğüm danışmanım Sayın hocam Doç. Dr. Mehmet YILMAZ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmaların yapılmasında bilgisine başvurduğum Sayın hocam Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI'ya teşekkürleri bir borç bilirim.

Bu çalışma, 105M026 nolu “Isı Transfer İyileştirmesi ve İki Fazlı Akış Kararsızlıkları ” isimli Tübitak projesi ve 2005/01 nolu “Isı Transfer İyileştirmesi ve İki Fazlı Akış Kararsızlıkları” isimli Atatürk Üniversitesi Araştırma Fonu projeleri kapsamında Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü’nde yürütülmüştür. Proje Yürütücüsü Sayın Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI'ya, Proje Araştırmacıları Sayın Doç. Dr. Mehmet YILMAZ, Sayın Yrd. Doç. Dr. Süleyman KARSLI, Sayın Yrd. Doç. Dr. Bayram ŞAHİN, Sayın Yrd. Doç. Dr. Kemal ÇOMAKLI ve Sayın Dr. Mehmet KAYA'ya teşekkür ederim. Ayrıca bu projedeki maddi ve manevi katkılarından dolayı Makine Mühendisliği Bölümü Başkanlığına ve Mühendislik Fakültesi Dekanlığına teşekkür ederim.

Katkılarından dolayı Sayın Yrd. Doç. Dr. Kadir BAKIRCI, Sayın Yrd. Doç. Dr. Tevhit KARACALI, Sayın Yrd. Doç. Dr. Sadık ERDOĞAN ve Sayın Yüksek Lisans Öğrencisi Özgür Bedir'e, sistemin kurulmasında büyük emeği geçen Sayın Tekniker Ahmet CEBE, Sayın Tekniker Abit CÖMERT ve Sayın Tekniker Sedat KOTAN'a teşekkür ederim.

Şendoğan KARAGÖZ

Haziran 2007

ÖZET

Doktora Tezi

ISI TRANSFERİ İYİLEŞTİRMESİNİN İKİ FAZLI AKIŞ KARARSIZLIKLARINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Şendoğan KARAGÖZ

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Mehmet YILMAZ

İki fazlı akış ve bu akışlarla ilişkili ısı transferi endüstride gittikçe artan bir önem kazanmaktadır. Bunun nedeni iki fazlı akışlarda elde edilen ısı transfer katsayılarının tek fazlı akışlarda elde edilenlere göre çok daha yüksek olması ve yüksek ısı akısı kullanan uygulamaların varlığıdır. Bunlar arasında boylerler, nükleer reaktörler, kimyasal prosesler, ısı pompaları, ısı değiştiricileri, vs. sayılabilir.

Bu çalışmada iş yapan akışkanı su, test kısmı yatay bir boru olan zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı deney düzeneği kurularak iki fazlı akışların dinamik kararsızlıklarına ısı transfer iyileştirmesinin etkileri incelenmiştir. Bu osilasyonlar üzerine aşırı soğutma miktarının, akışkan giriş debisinin, ısıl gücün, çıkış kısıtlayıcısının ve boru içerisine yerleştirilen farklı ısı transfer iyileştirme elemanlarının yaptıkları etkiler araştırılmıştır. Dört farklı ısı transfer yüzey konfigürasyonu kullanılmıştır.

Yapılan çalışmaların sonucunda yoğunluk değişim tipi osilasyonların periyot ve genliklerinin basınç düşümü tipi osilasyonların periyot ve genliklerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Sisteme verilen ısıl güç arttıkça karakteristik eğride minimum noktanın sağa doğru kaydığı ve iki fazlı bölgede belirli bir kütleli debi değerinde ısıl güç arttıkça basınç düşümünün arttığı görülmüştür. Akışkan giriş sıcaklığındaki azalmayla yani aşırı soğutma seviyesinin artmasıyla kaynamanın başladığı noktanın daha düşük kütleli debilere doğru kaydığı ve iki fazlı bölgede belirli bir kütleli debi değerinde giriş sıcaklığı arttıkça basınç düşümünün arttığı gözlemlenmiştir. İki fazlı bölgede en yüksek basınç düşümü iç yay içeren B (yay adımı:3,6mm) ve C (yay adımı:11mm) borusunda, en düşük basınç düşümü ise boş boruda meydana gelmiştir. İç yay içeren borularda ise adımı düşük olan B borusu adımı yüksek olan C borusundan daha yüksek basınç düşümü oluşturmıştır.

2007, 138 sayfa

Anahtar Kelimeler: İki Fazlı Akış, kararsızlık, osilasyon, ısı transferi iyileştirmesi, su

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF HEAT TRANSFER ENHANCEMENT ON TWO-PHASE FLOW INSTABILITIES

Şendoğan KARAGÖZ

Atatürk University
Institute of Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Doç. Dr. Mehmet YILMAZ

Two-phase flows and heat transfer phenomenon is gaining more and more importance in industry. This is because heat transfer coefficients for two phase flows are higher than those for single phase flows and there are applications that need high heat fluxes. These applications include boilers, nuclear reactors, chemical processes, heat pumps, heat exchangers etc. On the other hand, two-phase systems are prone to hydrodynamic instabilities.

The effect of heat transfer enhancement on two phase flow dynamic instabilities are investigated in a horizontal tube system whose working fluid is water. The effect of subcooling rate, fluid flow rate, heat power, exit restriction and heat transfer enhancement devices placed into tubes are investigated. Four different tube surface configurations are used.

As a result of the studies, the periods and amplitudes of the density wave type oscillations were lower than those of pressure drop type oscillations. It was found that with increasing heat power minimum point of characteristic curve proceeded toward to right and increasing heat power increased the pressure drop for given value of mass flow rate in two phase region. It was also determined that with decreasing inlet fluid temperature the point in which the boiling proceeded toward to lower mass flow rate and increasing inlet fluid temperature increased the pressure drop for given value of mass flow rate in two phase region. The results showed that the highest pressure drop occurred in tube-B (spring pitch: 3,6mm) and tube-C (spring pitch: 11mm) with inner spring the lowest pressure drop in the bare tube. In the tubes with interior spring, however, the B tube with lower pitch performed higher pressure drop than the C tube with higher pitch.

2007, 138 Pages

Keywords: Two phase flow, instabilities, osilation, heat transfer enhancement, water

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. İki Fazlı Akışlar ve İki Fazlı Akış Kararsızlıkları	1
1.1.1. İki fazlı akış araştırmaları	4
1.1.2. İki fazlı akış kararsızlıkları araştırmaları	4
1.2. Isı Transfer İyileştirmesi	18
1.2.1. Isı transfer iyileştirmesinin iki fazlı akışlara etkisini inceleyen araştırmalar	18
1.2.2. Isı transfer iyileştirmesinin iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisini inceleyen araştırmalar	20
1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı	29
2. KURAMSAL TEMEL	33
2.1. İki Fazlı Akışlar	33
2.2. Kaynamalı Kanalda Basınç Düşümü-Debi Karakteristikleri	36
2.3. İki Fazlı Akış Kararsızlıkları ve Tipleri	39
2.3.1. Statik Kararsızlıklar	41
2.3.1.1. Akış gezintisi (Ledinegg kararsızlığı)	42
2.3.1.2. Kaynama krizi	44
2.3.1.3. Akış rejimi relaxation kararsızlıkları	45

2.3.1.4. Geysering	45
2.3.1.5. Bumping	46
2.3.1.6. Chugging	46
2.3.2. Dinamik Kararsızlıklar	47
2.3.2.1. Yoğunluk değişim osilasyonları	48
2.3.2.2. Basınç düşümü osilasyonları	52
2.3.2.3. Termal osilasyonlar	55
2.3.2.4. Akustik osilasyonlar	58
3. MATERYAL ve YÖNTEM	60
3.1. Deney Düzeneği	60
3.1.1. Akışkan besleme bölümü	61
3.1.2. Test bölümü	64
3.1.3. Akışkan depolama bölümü	67
3.2. Ölçümler ve Belirsizlik Analizi	69
3.2.1. Sıcaklık ölçümleri	69
3.2.2. Basınç ölçümleri	71
3.2.3. Debi ölçümleri	71
3.2.4. Isı gücü ölçümleri	72
3.2.5. Osilasyon periyotlarının Tesbiti.....	72
3.3. Deneysel Yöntem	73
3.3.1. Kararlı durum karakteristiklerinin belirlenmesi deneyleri	75
3.3.2. Kararsız durum karakteristiklerinin belirlenmesi deneyleri	77
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	79
4.1. Boş Borudaki İki Fazlı Akış	79

4.1.1. Kararlı durum karakteristikleri	79
4.1.2. Osilasyon sınırları	84
4.1.3. Kararsız durum karakteristikleri	85
4.1.4.1. Basınç düşümü osilasyonlar	85
4.1.4.2. Yoğunluk değişim tipi osilasyonlar	94
4.2. Isı Transferi İyileştirme Elemanı Kullanan Borulardaki İki Fazlı Akış	100
4.2.1. Kararlı durum karakteristiği	100
4.2.2. Osilasyon sınırları	102
4.2.3. Basınç düşümü osilasyonları	104
4.2.4. Yoğunluk değişim tipi osilasyonlar	105
4.3. Isı Transfer İyileştirme Yöntemlerinin İki Fazlı Akış Karakteristikleri	
Açısından Karşılaştırılması	118
5. SONUÇ	126
5.1. Sonuçlar	126
5.2. Öneriler	129
KAYNAKLAR	131
ÖZGEÇMİŞ	138

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Boru Kesit Alanı [m^2]
A_t	Boru Toplam Yüzey Alanı [m^2]
d	Boru Çapı [m]
D	Yay Tel Çapı [m]
D_0	Orifis Çapı [m]
F	Sürtünme Katsayısı
g	Yer Çekim İvmesi [m/s^2]
G	Kütleli Akı [kg/m^2s]
h	Isı Taşınım Katsayısı [W/m^2K]
H_l	Sıvı Faz Entalpisi [J/kg]
H_g	Gaz Fazı Entalpisi [J/kg]
H_{lg}	Buharlaştırma Gizli Isısı [J/kg]
H_y	Yay Adımı [m]
L	Test Borusu Uzunluğu [m]
$\dot{m}$	Kütleli Debi [kg/s]
Nu	Nusselt Sayısı
P	Basınç [bar]
ΔP	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]
ΔP_0	Orifiste Ki Basınç Düşümü [bar]
$\dot{Q}$	Isı Akısı [kW/m^2]
Q	Isıl Güç [kW]
R	Yarıçap [m]
Re	Reynolds Sayısı
t	Zaman [s]
ΔT	Sıcaklık Farkı [$^{\circ}C$]
T	Sıcaklık [$^{\circ}C$]
ΔT_s	Cidar Sıcaklık Farkı [$^{\circ}C$]
T_f	Akışkan Sıcaklığı [$^{\circ}C$]
U	Hız [m/s]
V	Hacim [m^3]
V'	Boru Net İç Hacmi [m^3]
$\dot{V}$	Hacimsel Debi [m^3/s]
Z	İki Termokupul Arasında ki Uzaklık [m]
ΔZ	Her Bir Hesap Adımında ki Uzaklık [m]
$\bar{Z}$	Eşdeğer Uzunluk [m]
α	Boşluk Oranı (Void Fraction)
β	Kısıtlayıcı Parametresi
μ	Dinamik Viskozite [kg/ms]

ν	Kinematik Viskozite [m ² /s]
ρ	Yoğunluk [kg/m ³]
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_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
σ_x (%)	Ölçüm Düzenekleri İle İlgili Belirsizlik Terimi
τ	Geçiş Zamanı [s]
δ_x (%)	Ölçüm Düzenekleri İle İlgili Belirsizlik Terimi
$\bar{x}$	Ortalama Data Değeri
x'	Ölçüm Elemanlarından Alınan Gerçek Okuma Değeri

İndisler

c	Kritik
ç	Çıkış
d	Doymuş
e	Efektif
f	Sürtünme
g	Giriş
g	Gaz
l	Sıvı Fazı
o	Orifis
s	Cidar
s	Dengeleyici Tank
sis	Sistem

Kısaltmalar

AO	Akustik Osilasyon
BDO	Basınç Düşümü Osilasyonu
TO	Termal Osilasyon
YDO	Yoğunluk Değişim Tip Osilasyon

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Lin et al (1982) tarafından kullanılan iyileştirme elemanları	23
Şekil 1.2. Widmann <i>et al.</i> (1994, 1995) ve Kakaç et al. (1995) tarafından kullanılan ısı transfer iyileştirme elemanları	26
Şekil 1.3. Karanlı vd (2000) tarafından kullanılan ısı transfer iyileştirme elemanları	28
Şekil 2.1. İki fazlı akışların genel sınıflandırılması (Ding, 1993).....	34
Şekil 2.2. Yatay borulardaki akış rejimleri (Bell, 1984,)	35
Şekil 2.3. Karakteristik durum eğrisi	38
Şekil 2.4. Karakteristik durum eğrisi	39
Şekil 2.5. Ledinegg kararsızlığının şematik olarak gösterimi (Park, 2006)	44
Şekil 2.6. Yoğunluk Değişim Osilasyonlarının Şematik Olarak Gösterilişi (Liu, 1993)	50
Şekil 2.7. Basınç düşümü tipi osilasyonların şematik olarak gösterilişi ...	54
Şekil 2.8. Termal osilasyonların mekanizması (Chu <i>et al.</i> , 1978)	57
Şekil 2.9. Geçiş kaynama modeli (Chu <i>et al.</i> , 1978)	59
Şekil 3.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü	62
Şekil 3.2. Ana Besleme Tankı	63
Şekil 3.3. Suyun test borusuna sabit sıcaklıkta girmesini sağlayan düzenek	63
Şekil 3.4. Dengeleyici Tank	65
Şekil 3.5. Deney düzeneğinin dengeleyici tank ile test borusu arasındaki kısmı	66
Şekil 3.6. Test Borusu ve Bağlantı Flanşları	66
Şekil 3.7. Termoeleman bağlantı şekilleri	66
Şekil 3.8. Test borusu izolasyon tabakasının ve termoeleman uçlarının şematik gösterimi	67
Şekil 3.9. Test borusu elektriksel bağlantısı	67
Şekil 3.10. Çıkış kısıtlayıcısının şematik gösterimi	68
Şekil 3.11. Yoğuşurucu	69
Şekil 3.12. Test borusu cidar sıcaklığı ölçüm noktaları	70
Şekil 3.13. Termoçiftlerin data okuma kartına bağlantısının şematik gösterimi	70
Şekil 3.14. Isı transfer yüzey konfigürasyonları ve karakteristikleri	74
Şekil 3.15. Isı transfer iyileştirme elemanları	75
Şekil 4.1. Kararlı durum karakteristiklerine giriş aşırı soğutmasının etkileri ($p_g = 7.5 \text{ bar}$, $P = 24 \text{ kW}$, $T_g = 25^\circ \text{C}$, $\beta = 0.45$)	80
Şekil 4.2. Kararlı durum karakteristiklerine giriş ısı gücünün etkileri ($p_g = 7.5 \text{ bar}$, $T_g = 20^\circ \text{C}$, $\beta = 0.45$)	82
Şekil 4.3. Kararlı durum karakteristiklerine çıkış orifisinin etkileri ($p_g = 7.5 \text{ bar}$, $P = 24 \text{ kW}$, $T_g = 25^\circ \text{C}$)	83
Şekil 4.4. Kararlı durum karakteristiklerine giriş aşırı soğutmasının etkileri ($p_g = 7.5 \text{ bar}$, $P = 24 \text{ kW}$, $\beta = 0.25$)	83
Şekil 4.5. Osilasyon sınırları	85
Şekil 4.6. Basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 54 \text{ g/s}$, $P = 24 \text{ kW}$, $T_g = 35^\circ \text{C}$)	87
Şekil 4.7. Basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 77 \text{ g/s}$, $P = 24 \text{ kW}$, $T_g = 25^\circ \text{C}$)	88
Şekil 4.8. Basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 74 \text{ g/s}$, $P = 24 \text{ kW}$, $T_g = 15^\circ \text{C}$)	89

Şekil 4.9. Kütlesel debinin basınç düşümü osilasyonlarının genliklerine etkisi	90
Şekil 4.10. Kütlesel debinin basınç düşümü osilasyonlarının periyotlarına etkisi	91
Şekil 4.11. Giriş aşırı soğutmasının basınç düşümü osilasyonlarının genliklerine etkisi	92
Şekil 4.12. Giriş aşırı soğutmasının basınç düşümü osilasyonlarının periyotlarına etkisi	92
Şekil 4.13. Basınç düşümü osilasyonların genliklerinin kütlesel debiyle değişimi ...	93
Şekil 4.14. Basınç düşümü osilasyonların periyotlarının kütlesel debiyle değişimi ..	93
Şekil 4.15. Yoğunluk değişim tipi osilasyonlar ($\dot{m} = 30 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=35^\circ\text{C}$) ...	96
Şekil 4.16. Yoğunluk değişim tipi osilasyonlar ($\dot{m} = 32 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=25^\circ\text{C}$) ...	97
Şekil 4.17. Yoğunluk değişim tipi osilasyonlar ($\dot{m} = 34 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$) .	98
Şekil 4.18. Kütlesel debinin yoğunluk değişim tipi osilasyonlarının genliklerine etkisi	99
Şekil 4.19. Kütlesel debinin yoğunluk değişim tipi osilasyonlarının periyotlarına etkisi	100
Şekil 4.20. Boru B için kararlı durum karakterine aşırı soğutmanın etkisi	101
Şekil 4.21. Boru C için kararlı durum karakterine aşırı soğutmanın etkisi	101
Şekil 4.22. Boru D için kararlı durum karakterine aşırı soğutmanın etkisi	102
Şekil 4.23. Boru B için osilasyon sınırları	103
Şekil 4.24. Boru C için osilasyon sınırları	103
Şekil 4.25. Boru D için osilasyon sınırları	104
Şekil 4.26. B borusu için basınç düşümü tipi osilasyonlar ($\dot{m} = 67 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)	106
Şekil 4.27. C borusu için basınç düşümü tipi osilasyonlar ($\dot{m} = 67 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)	107
Şekil 4.28. D borusu için basınç düşümü tipi osilasyonlar ($\dot{m} = 66 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)	108
Şekil 4.29. B borusu için BDO genliklerinin kütlesel debiyle değişimi	109
Şekil 4.30. B borusu için BDO periyotlarının kütlesel debiyle değişimi	109
Şekil 4.31. C borusu için BDO genliklerinin kütlesel debiyle değişimi	110
Şekil 4.32. C borusu için BDO periyotlarının kütlesel debiyle değişimi	110
Şekil 4.33. D borusu için BDO genliklerinin kütlesel debiyle değişimi	111
Şekil 4.34. D borusu için BDO periyotlarının kütlesel debiyle değişimi	111
Şekil 4.35. B borusu için yoğunluk değişim tipi osilasyonlar ($\dot{m} = 37 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)	112
Şekil 4.36. C borusu için yoğunluk değişim tipi osilasyonlar ($\dot{m} = 36 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)	113
Şekil 4.37. D borusu için yoğunluk değişim tipi osilasyonlar ($\dot{m} = 40 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)	114
Şekil 4.38. B borusu için YDO genliklerinin kütlesel debiyle değişimi	115
Şekil 4.39. B borusu için YDO periyotlarının kütlesel debiyle değişimi	115

Şekil 4.40. C borusu için YDO genliklerinin kütlelel debiyle değişimi	116
Şekil 4.41. C borusu için YDO periyotlarının kütlelel debiyle değişimi	116
Şekil 4.42. D borusu için YDO genliklerinin kütlelel debiyle değişimi	117
Şekil 4.43. D borusu için YDO periyotlarının kütlelel debiyle değişimi	117
Şekil 4.44. Boruların kararlı durum karakteristiklerin karşılaştırılması	120
Şekil 4.45. Boruların osilasyon sınırlarının karşılaştırılması	120
Şekil 4.46. BDO genliklerinin karşılaştırılması	123
Şekil 4.47. BDO periyotlarının karşılaştırılması	124
Şekil 4.48. YDO genliklerinin karşılaştırılması	125
Şekil 4.49. YDO periyotlarının karşılaştırılması	125

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1.	Isı transferi iyileştirme yöntemleri (Bergles 1985)	18
Çizelge 1.2.	Isı transferi iyileştirme yöntemlerinin ısı transfer moduna göre sınıflandırılması (Reay 1991)	19
Çizelge 1.3.	İki fazlı akışta kullanılan pasif ısı transfer iyileştirme yöntemleri (Yılmaz vd 2007)	20
Çizelge 1.4.	İki fazlı akışta kullanılan aktif ısı transfer iyileştirme yöntemleri (Yılmaz vd 2007)	21
Çizelge 1.5.	Isı transfer iyileştirmesinin iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisini inceleyen araştırmalar	27
Çizelge 1.6.	Isı transfer iyileştirmesinin iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisini (Boure 1973; Gergles 1976; Kakaç 1994)	30
Çizelge 2.1.	İki Fazlı Akış Kararsızlıklarının Sınıflandırılması (Bergles, 1973)	40
Çizelge 2.2.	İki fazlı akış kararsızlıklarını etkileyen parametreler (Boure <i>et al.</i> , 1973; Bergles, 1976; Kakaç, 1994)	42
Çizelge 2.3.	Sıvı metalde buhar patlaması kararsızlığı olayı	47
Çizelge 2.4.	Çeşitli parametrelerin dinamik iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi (Wedekind, 1971; Boure <i>et al.</i> , 1973; Bergles, 1976; Kakaç <i>et al.</i> 1990; Padki <i>et al.</i> , 1991; Ding <i>et al.</i> , 1995).....	52
Çizelge 3.1.	Türbin tipi debi ölçerin teknik özellikleri	72
Çizelge 4.1.	Boru yüzey konfigürasyonlarının kararlılık açısından karşılaştırılması	121
Çizelge 4.2.	Osilasyon genlik ve periyotlarının karşılaştırılması	123

1. GİRİŞ

Kaynamalı ısı transferinin neden olduğu akış kararsızlıkları iki fazlı akışların meydana geldiği reaktörler, buhar santralleri, soğutma santralleri, kimyasal üretim ünite ve rafinerileri ile çeşitli ısı değiştiricilerinde vs. yaygın olarak görülmektedir. İki fazlı akış sistemlerinde debinin, sistem basıncının ve diğer parametrelerin osilasyonları genellikle istenmezler; çünkü bu osilasyonlar, mekanik titreşimlere, kaynama krizlerine, yüksek geçici sıcaklıklara, kontrol gücüne ve hatta yüzeyde burn-out olayına neden olabilmektedirler. Ayrıca bu kararsızlıklar, özellikle nükleer santrallerde yakıt donanımlarındaki boru cidarlarının termal yorulmalardan dolayı deforme olarak bünyelerindeki radyoaktif malzemenin çevreye yayılmasına neden olabilmektedir. Bu nedenlerle, iki fazlı akış sistemlerinin tasarım ve dizaynında, osilasyonları önlemek veya kontrol etmek için etkin yöntemler geliştirme, pratik mühendislik uygulamalarında hayati önem taşımaktadır.

Bu tezin amacı ısı transferi iyileştirmesinin iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisini araştırmaktır. Birinci bölüm olan bu bölümde ısı transferi iyileştirmesinin iki fazlı akışlara ve iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisini inceleyen araştırmalarla ilgili literatür taraması verilmiştir. İkinci bölümde iki fazlı akış kararsızlıklarının kuramsal temelleri anlatılmıştır. Kuramsal temeller kısmında iki fazlı akış kararsızlıkları sınıflandırılmış, statik kararsızlıklar ile ilgili özet bilgi verilmiş, bu tezin araştırma konusu olan dinamik kararsızlıklar ile ilgili ayrıntılı bilgi verilmiştir. Üçüncü bölüm olan materyal ve yöntem kısmında deney düzeneği tanıtılmış ve deneylerin yapılmasını içeren deneysel yöntem anlatılmıştır. Dördüncü bölümde elde edilen bulgular sunulmuş ve tartışılmıştır. Son bölüm olan beşinci bölümde ise sonuçlar özetlenmiş ve öneriler sunulmuştur.

1.1. İki Fazlı Akışlar ve İki Fazlı Akış Kararsızlıkları

İki fazlı akış ve bu akışlarla ilişkili ısı transferi endüstride gittikçe artan bir önem kazanmaktadır. Bunun nedeni iki fazlı akışlarda elde edilen ısı transfer katsayılarının tek

fazlı akışlarda elde edilenlere göre çok daha yüksek olması ve yüksek ısı akısı kullanan uygulamaların varlığıdır. İki fazlı akışlar; buhar üreteçleri, soğutma sistemleri, nükleer reaktörler, kimyasal üretim ünite ve rafinerileri vs. gibi çeşitli endüstriyel sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

İki fazlı akışlarda, iki faz arasında bir ara yüzey oluşmakta, ve bu ara yüzey özellikle gaz-sıvı akışlarında çok farklı şekiller almaktadır. Akış yönü ara yüzey üzerinde çok etkilidir ve iki fazlı akışlar akış yönüne göre “yatay”, “düşey” ve “eğik” iki fazlı akışlar olarak sınıflandırılır. Yatay borulardaki akış karakteristikleri ve dolayısıyla akış rejimleri, düşey borulardaki akış karakteristikleri ve akış rejimlerinden daha farklıdır. Düşey borularda yerçekimi ivmesi akış yönüne paralel olarak etkirken, yatay borularda yerçekimi kuvveti akış yönüne dik olarak etkimekte ve bu nedenle yatay bir boru kanalında düşey bir boru kanalında meydana gelen iki fazlı akış rejimlerinden daha fazla akış rejimi meydana gelmektedir. Ağırlık kuvvetleri, yoğunluğu düşük olan buhar fazının borunun üst cidarına doğru, yoğunluğu yüksek olan sıvı fazının ise borunun alt cidarına doğru yer değiştirmesini sağlayarak “katmanlaşma” olarak adlandırılan olayın meydana gelmesine yol açmaktadır. Katmanlaşma oluştuğunda borunun üst yüzeyi buhar fazıyla, alt yüzeyi ise sıvı fazıyla kaplanmaktadır. Buharın ısı transfer katsayısı sıvının ısı transfer katsayısından daha düşük olduğundan borunun üst tarafında “burnout” olarak adlandırılan olay meydana gelmektedir.

İki fazlı karışımın içerisinde aktığı boru veya kanal içerisindeki iki fazın fiziksel düzenlemesi “akış rejimi” veya “akış deseni” olarak adlandırılır. Belirli koşullar altında oluşacak akış rejimi iki fazın akış debilerinin mutlak ve bağıl büyüklüklerine, sistemin geometrisine ve özellikle fazlar üzerine etkiyen kuvvetler arasındaki etkileşime bağlıdır. İki fazlı akışlarda çok farklı akış rejimleri tanımlanmış ve çok değişik isimler kullanılmıştır. Düşey borulardaki akış rejimleri i- kabarcıklı akış, ii- slug veya plug akış, iii- churn akış, iv- halkasal akış ve v- wispy halkasal akış olarak sınıflandırılmıştır. Yatay borulardaki akış rejimleri düşey borulardakinden oldukça farklıdır ve akış yönüne dik etkiyen yerçekimi kuvvetlerinin oluşturduğu asimetri nedeniyle düşey akışlardakinden çok daha karmaşıktır. Yatay borulardaki akış rejimleri i- katmanlı düz

akış, ii- katmanlı dalgalı akış, iii- ara akış (plug akış, yarı-slug akış ve slug akış), iv- dağılı-kabarcıklı akış ve v- halkasal dağılı akış olarak adlandırılır. Bu rejimlerden yerçekiminin baskın olduğu akışlar katmanlı düz akış ve katmanlı dalgalı akış; buhar-kayma etkisinin baskın olduğu akışlar ise dağılı kabarcıklı akış ve halkasal dağılı akış rejimleridir. Ara akışlar yer çekiminin baskın olduğu akışlar ile buhar kayma etkisini baskın olduğu akışlar arasındaki akışlardır ve bu akışlar plug akış, yarı-slug akış ve slug akışları kapsar.

İki fazlı akış sistemlerinde oluşan kararsızlıklar, “statik kararsızlıklar” ve “dinamik kararsızlıklar” olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır. Eğer akış koşulları orijinal kararlı durumundan az bir miktar değişime uğradığında yeni çalışma noktası orijinal çalışma noktasından farklı bir noktaya doğru asimptotik olarak yaklaşıyorsa, bu tip kararsızlıklar “statik kararsızlıklar” olarak isimlendirilir. Akış gezintisi, kaynama krizi vs. statik kararsızlıklara örnek olarak verilebilir. Eğer atalet ve diğer geri-besleme etkileri proste önemli bir etkiye sahipse ortaya çıkan kararsızlıklar “dinamik kararsızlıklar” olarak adlandırılmaktadır. Bu kararsızlıklar, akışın ataleti ile iki fazlı karışımın sıkıştırılabilirliği arasında yeterli etkileşimden, geri-beslemeden veya kaynamanın olduğu kanalda debi, basınç düşümü ve yoğunluktaki değişim arasında çoklu geri-beslemelerden kaynaklanabilirler. Yoğunluk-değişim tipi osilasyonlar (YDO), basınç düşümü tipi osilasyonlar (BDO), termal osilasyonlar (TO) ve akustik osilasyonlar olmak üzere 4 tip dinamik kararsızlık tanımlanmıştır. Yoğunluk değişim tipi osilasyonlar, periyodu, akışkanın geçiş zamanı değerine eşit olan (akışkan partiküllerinin kaynama bölgesinden akma zamanına eşit) ve genliği basınç düşümü tipi osilasyonların genliğinden küçük olan osilasyonlardır. Termal osilasyonlar, cidar sıcaklıklarında büyük çalkantılara neden olarak boru cidarının termal yorulmasına neden olan osilasyonlardır. Akustik osilasyonlar ise yüksek frekanslı osilasyonlardır. Bunların periyotları basınç dalgasının sistem boyunca hareket etmesi için gerekli zamanla benzer büyüklüktedir (Bergles 1977; Kakaç 1994).

1.1.1. İki Fazlı Akış Araştırmaları

1.1.2. İki Fazlı Akış Kararsızlıkları Araştırmaları

İki fazlı akış kararsızlıkları ile ilgili ilk çalışma 1909 yılında Lorentz tarafından yapılmıştır. Lorentz gaz-sıvı karışımını homojen kabul ederek borulardaki iki fazlı akışın hidrodinamiğini araştırmış ve deneylerini kararlı hal koşullarında yapmıştır. İki fazlı akış kararsızlıkları ile ilgili ilk başarılı çalışma ise 1938 yılında Ledinegg yapmıştır. Ledinegg ısıtılan paralel buhar jeneratörü kanallarında akış kararsızlığına yol açan koşulları incelemiştir. Ledinegg yaptığı araştırmalarda $\Delta p - \dot{m}$ karakteristik eğrisinde bazı debi aralıklarında eğrinin eğiminin negatif olduğunu görmüştür. Oysaki tek fazlı akışta eğri sürekli pozitif bir eğime sahiptir. Tek bir basınç düşümüne karşılık gelen tek bir debi değeri olmadığından sistemin bir kararlı halde çalışırken diğer bir kararlı hale geçtiğini gözlemlemiştir. Bu akış gezintisi daha sonraları Ledinegg kararsızlığı olarak adlandırılmıştır.

Davidov (1956) elektriksel olarak ısıtılan test borularını kullanarak akış osilasyonlarını deneysel olarak incelediği çalışmada osilasyon periyotlarının yaklaşık olarak akışkan partikülünün test borusundan geçme zamanına eşit olduğunu gözlemlemiştir. Davidov ayrıca kanalları birbiriyle bağlantılı yapmanın ve borunun aşırı soğutulmuş kısmının uzunluğunu artırmanın sistemi daha kararlı yaptığı, çıkış kısıtlayıcısı kullanmanın ise sistemi daha kararsız hale getirdiğini bulmuştur.

Stenning ve Veziroğlu (1965) R11 soğutkanı ile yaptıkları deneysel çalışmalarda üç farklı tip dinamik kararsızlık önermişlerdir. Birinci tip kararsızlık “yoğunluk değişim tipi kararsızlık” olarak adlandırılmış ve bu kararsızlığın alternatif olarak yüksek ve düşük yoğunluğa sahip akışkan dalgalarının ısıtılan kanal boyunca hareketi sonucu ortaya çıktığını vurgulamışlardır. İkinci tip kararsızlık “basınç düşümü tip osilasyon” olarak adlandırılmış ve bu kararsızlığın basınçta, cidar sıcaklığında ve akış debisinde büyük genlikli osilasyonlara neden olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca BDO’nun oluşması

için test kısmının önünde sıkıştırılabilir bir hacim olması gerektiği söylenmiştir. Üçüncü tip osilasyon ise “termal osilasyon” olarak adlandırılmış ve bu osilasyonun sıvı filminin kararsızlığıyla ilişkili olduğu belirtilmiştir.

Veziroğlu ve Lee (1968a, 1968b, 1970) tarafından iş yapan akışkan olarak R11’in kullanıldığı tek düşey bir kanalda BDO ve YDO tip osilasyonlar araştırılmıştır. Bulunan sonuçlar yatay kanal sisteminden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve yukarı doğru akışlı düşey sistemlerin yatay sistemlerden daha kararlı olduğu belirlenmiştir. Araştırmacılar ayrıca çapraz bağlantılı olan ve olmayan iki paralel kanaldaki kararsızlıkları araştırmışlardır.

Wedekind (1971) yatay bir boruda karışım-buhar geçiş noktasının osilasyon hareketini inceleyen deneysel bir araştırma yapmıştır. Wedekind tam buharlaşmanın olduğu boruyu “iki-fazlı akış bölgesi” ve “kızgın buhar” bölgesi olarak iki kısma ayırıp inceleme yaptığında karışım-buhar geçiş noktasının osilasyon yaptığını gözlemlemiştir. Bu geçiş noktası iki bölgeyi birbirinden ayıran bir noktadır ve bu nokta osilasyon hareketi yapmaktadır. Wedekind bu osilasyonun istatistiksel karakteristiklerini, fiziksel mekanizmalarını ve çeşitli evaporatör parametrelerinin etkisini araştırmıştır. Çalışma sonucunda geçiş noktası osilasyonlarının istatistiksel karakteristiklerinin transform Rayleigh dağılımı ile tanımlanabileceği ve giriş kurulum derecesi ve ısı gücün bu dağılım üzerine önemli derecede etkili olduğu belirlenmiştir.

Yadigaroglu ve Bergles (1972) kaynamalı bir kanalda YDO tipi kararsızlıkları incelemişlerdir. Statik ve dinamik basınç düşümü çalkantıları dikkate alınarak kaynama sınırının hareketleri incelenmiştir. Kaynama sınırının hareketine cidar ısı kapasitesi ve basınç değişimlerinin etkisini dikkate alan bir dinamik analiz yapılmıştır. Deneylerde iş yapan akışkan olarak R-113 kullanılmış ve deneyler atmosfer basıncında yapılmıştır. Yüksek aşırı soğutma ve düşük güç seviyelerinde ortaya çıkan bu tip osilasyonların oldukça kısa periyotlara sahip oldukları görülmüştür. Yüksek modlu bu osilasyonların varlığı kaynama sınırının dinamik davranışına bağlanmıştır.

Bergles 1977 yılında yayınladığı “Review of Instabilities in Two-Phase Systems” isimli literatür taramasında iki fazlı akış kararsızlıklarını, kararsızlık mekanizmalarını temel olarak sınıflandırmıştır. Akış kararsızlığı üzerine etkin olan parametrik etkiler sistematik olarak sunulmuştur. Kararsızlık sınırlarını tahmin etmek için kullanılan çeşitli analitik yöntemler anlatılmıştır.

Boure vd 1973 yılında yayınladığı iki fazlı akış kararsızlıklarını konu alan literatür taramasında iki fazlı akış kararsızlıklarının nedenlerini ve mekanizmalarını tanımlanmış ve mekanizmaları dikkate alarak çeşitli tip kararsızlıkları sınıflandırılmıştır. Kararsızlıklar “statik” ve “dinamik” kararsızlıklar olmak üzere iki temel sınıfa ayrılmış ayrıca kararsızlıkların “birincil” veya “ikincil” olay olması açısından da sınıflandırma yapılmıştır. Deneysel olarak gözlemlenen akış kararsızlıkları üzerindeki parametrik etkiler sistematik olarak sunulmuştur. Çeşitli deneysel araştırmalar taranarak kararsızlıkların belirlenmesine yönelik ölçütler sunulmuştur. Boure vd. ayrıca çeşitli tip iki fazlı akış kararsızlıklarını analiz etmek için geliştirilen çeşitli yöntemleri sunmuş ve kararsızlıkları tahmin etmek için kullanılan bilgisayar paket programlarından en yaygın olanları çizelge halinde vermiştir. Bu yöntemlerin uygulanabilirlikleri ve doğruluklarına ilişkin bilgi verilmiştir. Boure vd. ayrıca kaynama cihazındaki akış kararsızlıklarını belirlemek için gerekli adımları öneriler olarak maddeler halinde vermiştir.

Fallows *et al.* (1973) üç paralel devreye sahip bir once-through boyler düzeneğinde akış stabilite karakteristiklerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarda osilasyonların başlangıç sınırları, genlik ve frekansları ile dry-out sınırının hareketi incelenmiştir. Elde edilen deneysel verilere dayanılarak kararsız akış başlangıç şartlarını veren deneysel bir bağıntı geliştirilmiştir.

Kakaç vd (1974, 1977) düşey akışlı dört adet paralel kanal içeren sistemde kaynamalı iki fazlı akış dinamik kararsızlıklarını incelemiştir. İş yapan akışkan olarak R11’in kullanıldığı deneysel çalışmalarda tek kanal içeren ve başka tip paralel bağlı kanallar içeren sistemlerde karşılaşılanlara benzer şekilde BDO ve DYO olmak üzere iki temel osilasyon gözlenmiştir. Bazı durumlarda sıcaklık osilasyonları da gözlenmiştir. BDO ve

YDO için kararlı ve kararsız bölgelerin sınırları belirlenmiştir. Sistemde gözlenen kararsızlıklar faz ilişkileri, osilasyon periyodları ve kararlılık açısından diğer basit sistemlerle karşılaştırılmış ve sistemin diğerlerine göre daha kararlı olduğu tespit edilmiştir.

Aritromi *et al.* (1977, 1979, 1982) zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı iş yapan akışkanı su olan yukarı akışlı paralel bir kanal sisteminde kararsızlıkları deneysel olarak incelemişler ve kararsızlıklarla ilgili lineer olmayan matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Çeşitli giriş hızları, ısı akıları, sıvı sıcaklıkları, kanal kesit alanı ve giriş kısıtlayıcısı vb. parametrelerin paralel kanallarda oluşan giriş akış osilasyonları ile kararsızlık sınırlarına etkileri deneysel olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar matematiksel model ile analiz edilmiştir. İki paralel kanalda dört tip kararsızlık olduğu gözlemlenmiştir. Bunlardan üçü tek kanalda da oluşan BDO, YDO ve TO kararsızlıkları iken, dördüncüsü paralel kanallarda kanallar arasındaki etkileşimden meydana gelen kararsızlıktır. Geliştirilen model iki paralel kanallı sistemden elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve iyi bir uyum olduğu bulunmuştur. Model daha sonra üç ve dört adet kanal içeren paralel kanallara uygulanmıştır. Aritromi *et al.* (1982) ayrıca paralel kaynamalı sistemde yoğunluk değişim osilasyonlarını deneysel ve analitik olarak incelemişlerdir. Model olarak yeni bir kompleks analitik model kullanılmıştır. Bu model kullanılarak stabilite üzerine kayma oranının etkisi incelenmiştir. LMFBF tip reaktörün buhar jeneratörünü simüle etmek amacıyla deneysel çalışmalarda iş yapan akışkan olarak R113 kullanılmış ve R113 sıcak su ile ısıtılmıştır. Akış osilasyon periyotlarına etki eden faktörler belirlenmiştir.

Ünal *et al.* (1977) sodyumla ısıtılan büyük kapasiteli, düz borulara sahip bir buhar jeneratörünün borularında iki fazlı akış dinamik kararsızlıklarından yoğunluk değişim tipi osilasyonları incelemişlerdir. Osilasyonların genliklerinin 9-60 K arasında, periyotlarının ise 4-7.6 s arasında değiştiği bulunmuştur. Dinamik kararsızlıkların periyodunun kanalın kaynama bölgesinde akışkan partikülünün geçiş süresine, Froude sayısına ve kaynama bölgesinin uzunluğunun toplam ısıtılan uzunluğuna oranına bağlı olduğu ifade edilmiştir. Dinamik kararsızlıkların ilk olduğu çalışma koşullarını buhar jeneratöründeki ortalama çalışma koşulları ile ilişkilendiren “sıcak kanal faktörü” olarak

adlandırılan bir kanal faktörü tanımlanmıştır. Ünal (1985) ayrıca çeşitli geometri ve çalışma koşullarına ait 363 araştırma datasını kullanarak sodyumla ısıtılan uzun borulara sahip buhar jeneratöründe YDO'nun başlangıç sınırlarını tahmin eden iki korelasyon önermiştir.

Takitani ve Takemura (1978) once-through tek bir kaynamalı akış sisteminde YDO tipi kararsızlıkların 20-43 ata sistem çalışma basınç aralığında çalışan, üniform olarak ısıtılan ve iş yapan akışkanı su olan sistemde sistematik olarak oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Test kısmı paralel bağlı iki borudan oluşmuştur. Kütleli debi, sistem basıncı, giriş direnci, giriş aşırı soğutma miktarı, bypas oranı ve çıkış kurulum derecesinin kararsızlık sınırları üzerine etkileri incelenmiştir. Deneysel veriler kararsızlık sınırlarının belirlenmesinde kullanılan çeşitli analitik yöntemlerin doğrulanmasında kullanılmaya uygun bir biçimde sunulmuştur.

Tek üniform olarak ısıtılmış evaporatör kanallarındaki akış kararsızlıkları Friedly vd. (1979) tarafından araştırılmıştır. YDO stabilite limitleri minimum üç boyutsuz sayı ile karakterize edilmiştir. Bu sayılar Jakob sayısı (Ja), çıkış kurulum derecesi parametresi (X) ve basınç düşüm oranıdır (ΔP). Boyutsuz parametrelerin aralığını belirlemek amacıyla daha önce yayınlanmış 9 adet araştırmadan stabilite- limit verisi seçilmiştir. Çıkış valf basıncının dominant olduğu koşullarda sıvı azot kullanılarak yeni deneysel veriler sunulmuştur. Bu veriler kararlı ve kararlı olmayan davranışları ve Ledinegg kararsızlık bölgesini göstermektedir. Araştırmada ayrıca test kısmının sürtünmesinin azar azar artırılmasının etkileri de incelenmiştir. Sürtünmenin artmasının sistemi daha az kararlı yaptığı gözlemlenmiştir.

Fukuda ve Hasegawa (1979) paralel çoklu kanallarda iki fazlı akış hidrodinamik kararsızlıklarını analiz etmişlerdir. Kararsızlıklar ve osilasyonları karakterize eden denklemler türetilerek sistem değerlendirilmiştir. Karakteristik denklem, kökleri ve kanal transfer fonksiyonlarını araştırarak osilasyonların oluşumu ve bunların modlarının değerlendirileceğini ifade etmişlerdir. Türetilen denklemlerin birazcık farklı kanallardan

oluşan sistemlerin osilasyon modlarını bulmak için de uygulanabileceğini söylemişlerdir.

Fukuda ve Kobori (1979) analitik yöntemle iki fazlı akış hidrodinamik kararsızlıklarının 8 tipe ayrılabilirliğini gösteren bir analiz yapmışlardır. Analitik yöntem daha sonra bazı deneysel sonuçlara uygulanmıştır. Bu kararsızlıklardan üç tanesi statik veya Ledinegg kararsızlığı diğer beş tanesi ise dinamik kararsızlıklardır. Her bir kararsızlık tipinde farklı tip basınç düşümü terimi (gravitasyonel basınç düşümü, sürtünme basınç düşümü) baskın rol oynamaktadır. Ayrıca Japonya'da O'arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC)'de kurulan 14 MW ısı transfer çevriminde deneyler yapmışlardır. Test akışkanı olarak su kullanılan deneylerde sistem basıncının, giriş aşırı soğutmasının, kanal ısı gücünün, giriş kısıtlamasının ve akış debisinin etkileri incelenmiştir. Deneylerde iki tipik kararsızlık gözlenmiştir. Birinci tip kararsızlık hemen hemen sıfır çıkış kurulum derecesi koşullarında, ikinci tip kararsızlık ise yüksek kurulum derecesinde oluşmuştur. Birinci tip kararsızlıkta gravitasyonel basınç düşümü önemli rol oynarken ikinci tip kararsızlıkta ise sürtünme basınç düşümü önemli rol oynamıştır.

Akyüzlü vd (1979) iki fazlı akış basınç düşümü ve yoğunluk değişim osilasyonlarını sonlu farklar yöntemiyle analiz ederek deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. İki fazlı akış karakteristikleri homojen faz denge modeli kullanılarak incelenmiştir. Boru cidarı ile akışkan arasındaki sürtünme efektif iki faz vizkozite kabulü yapılarak Moody diyagramının kullanılmasıyla modellenmiştir. Yapılan analizde yer çekimi kuvvetleri dikkate alınmış, akışkana olan ısı transferinin cidar sıcaklığı, akışkan sıcaklığı ve ısı taşınım katsayısının fonksiyonu olduğu kabulü yapılmıştır. BDO ve YDO nun fiziksel karakterleri farklı olduğundan her biri için ayrı çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Basit bir model olmasına rağmen bu modelin BDO ve YDO osilasyonlarını simüle etmede oldukça başarılı olduğu görülmüştür. Ayrıca HEM modelinin farklı ısı gücü ve giriş sıcaklıkları için osilasyonların genlik ve periyotlarını bulmak amacıyla kullanılabileceği bulunmuştur.

Lahey (1980) ve Bergles (1981) Boure'nin yaptığı iki fazlı akışları sınıflandırılmasını daha da genişletmişlerdir. Bu sınıflandırma daha çok kararsızlık tiplerini içermektedir (Bkz. Çizelge 2.1).

Pakopoulos et al. (1980) buhar jeneratörlerinde iki fazlı akış dinamik kararsızlıkları ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Ayrıca iki fazlı akış korunum denklemlerinin zamana bağlı çözümlerini de çözerek teorik analiz yapmışlar ve bu teorik analizde ısıtıcı cidarının dinamiğini de dikkate almışlardır. Çalışma sonucunda ısıl güç-akış etkileşiminin sistemin stabilitesi üzerine önemli etkileri olduğu bulunmuştur.

Cumo vd (1981) farklı ısı akılı profillere sahip paralel kanallarda iki fazlı akış kararsızlıklarını deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan 116 adet deneysel çalışma sonucunda girişte çeşitli kısıtlama dereceleri ile çıkışta dry-out olan ve olmayan koşullar için stabilite haritaları çizilmiştir. Sistemin özel çalışma koşullarında osilasyon periyotlarının azaldığı ve kanallardaki eksenel ısı akı profil biçimlerinin farklı iki fazlı akışlar oluşturduğu bulunmuştur.

Yüncü (1981) yatay bir kanaldaki iki fazlı akış kararsızlıklarını deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Yüncü kararlı durum karakteristiklerini ve BDO ve YDO için kararlılık ve kararsızlık sınırlarını belirlemek amacıyla bir analitik yöntem geliştirmiştir. Korunum denklemlerinden kararlı durum çözümlerini elde etmiş ve pertürbasyon yöntemini kullanarak kararsız durum çözümlerini bulmuştur. Karakteristik denklemi elde etmek amacıyla kararsız çözümlerin Laplace transformasyonunu almış ve Nyquist kriterini kullanarak sistemin kararlılık ve kararsızlık sınırlarını belirlemiştir.

Yılmaz (1983) iki fazlı akış olaylarını detaylı bir şekilde incelenerek iki fazlı akış kararsızlık olaylarının temel mekanizmalarını matematiksel bağıntılar yardımıyla açıklamıştır.

Gurgenci *et al.* (1983) sabit basınçlar arasında çalışan yukarı akışlı kaynamalı tek bir kanal sisteminde yoğunluk değişimi ile basınç düşümü osilasyonlarının limit çevrimlerini üretmek amacıyla sabit özellikli bir homojen akış modeli geliştirmişlerdir. Bu modelde termodinamiksel denge şartlarının var olduğu kabulü yapılmış ve test kanalı cidar ısı depolama etkileri ile akışkan özelliklerinde oluşan değişiklikler ihmal edilmiştir. Model kullanıldığında BDO tipi osilasyonlar için bulunan sonuçların deneysel çalışmalarla oldukça iyi bir uyum gösterdiğini gözlemlemişlerdir. YDO tip osilasyonlarda ise osilasyonların periyodu deneysel sonuçlarla iyi bir uyum göstermiş, genliklerde ise iyi bir uyum bulunmamıştır. Bu ise sistem boyunca olan dağılı basınç düşümünü ihmal etmeye bağlanmıştır.

Doğan *et al.* (1983) tarafından yukarı akışlı tek bir kanal sisteminde zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı akış kararsızlıklarının analizi yapılmış ve kararlı ile kararsız durum davranışlarını belirlemek amacıyla nümerik bir model geliştirilmiştir. Model homojen iki fazlı akış ve fazlar arasında termodinamiksel denge varsayımına dayanan bir modeldir. Analizde iki fazlı bölgedeki sıkıştırılabilirlik etkileri, kaynama ara yüzeyinin hareketi ve ısıtıcı cidarının ısı kapasitesi dikkate alınmıştır. Model kullanılarak debi, giriş aşırı soğutması ve ısı gücünün sistemin davranışları üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Ayrıca deneysel çalışmalar yapılmış ve kararlı durum karakteristikleri, kararlı ve kararsız bölgeler ısı gücünü, giriş aşırı soğutması ve kütleli debinin fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda homojen iki fazlı denge modelinin zorlanmış konveksiyonlu yukarı akışlı sistemde BDO ve YDO için kararsızlık sınırlarını belirlemede kullanılabileceği bulunmuştur. Ayrıca modelin osilasyonların deneysel olarak gözlemlenen karakteristiklerini simüle etmede başarılı olduğu ve böylece farklı ısı güçleri, kütleli debiler ve aşırı soğutma miktarları için osilasyonların karakterini belirlemede kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Gurgenci *et al.* (1986) sabit basınçlar arasında çalışan yukarı akışlı tek bir kanalda hem basınç düşümü hem de yoğunluk değişim tipi osilasyonları için lineer kararlılık kriteri geliştirmişlerdir. Sabit özellik varsayımını kullanan homojen akış modeli ve değişken özellik kabulünü kullanan drift-flux modelini kullanmışlardır. Önce her bir model için

korunum denklemleri ve dengeleyici tank dinamiği denklemleri küçük pertürbasyonlar için lineer hale getirilmiş ve her bir model için ortaya çıkan denklemlerin stabilitesi Nyquist eğrilerinin kullanımıyla incelenmiştir. Sistemin stabilitesinin ölçütü olarak belirli çalışma koşullarında sistemi stabilize etmek için gerekli giriş kısıtlama miktarı hesaplanmıştır. Teorik sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve drift-flux modelinin stabilize sınırlarını belirlemede basit bir güvenilir yöntem olduğu belirlenmiştir.

Lin vd (1988) yatay bir U borusundaki kaynamalı akışta kararlı durum karakteristiklerini ve basınç düşümü tip kararsızlıkları deneysel olarak araştırmışlardır. BDO kararsızlıklarını tahmin edebilmek amacıyla homojen faz denge modelini kullanmışlardır.

Wang *et al.* (1989, 1994) iş yapan akışkan su olan dikey bir dairesel kanalda yoğunluk değişim tipi osilasyonlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışılan deneysel koşullarda yoğunluk değişim osilasyonlarının başladığı ısı akısı ve kuruluk dereceleri belirlenmiştir. Sistem basıncı, kütleli akı, giriş aşırı soğutması ve çıkış orifisinin boyutunun etkileri incelenmiştir. YDO'nun periyodunun sistemde hareket eden karışım partiküllerinin sistemde kalma zamanına bağlı olduğu, kütleli debi osilasyonlarının genliğinin oldukça büyük olduğu ve bu osilasyonlar esnasında ters akış olduğu belirlenmiştir. DYD'nun 1.5-4.5 s periyotlarıyla en yaygın karşılaşılan kararsızlık tipi olduğu ve YDO'nun iki fazlı akış sistemleri için çok tehlikeli olan termal osilasyonları indüklediği bulunmuştur. Ayrıca YDO esnasında ortalama sıcaklıklarının 10-30°C genlikleriyle osilasyon yaptığı gözlemlenmiştir. Wang *et al.* Ayrıca YDO'ya ait sınırlayıcı ısı akısı ve kuruluk derecesi için bir korelasyon önermişlerdir.

Xu ve Chen (1990) iş yapan akışkan olarak su kullanılan dikey bir sistemde yoğunluk değişim tipi kararsızlıkları deneysel olarak incelemişlerdir. Orta basınç seviyelerinde ve üniform ısı güçlerinde deney yapılmış kararlı durum karakteristik eğrileri çizilmiş ve osilasyon sınırları belirlenmiştir.

Kakaç vd (1990) düşey yukarı akışlı tek bir zorlanmış kanal sisteminde oluşan termal osilasyonları deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. İş yapan akışkan olarak R11 kullanılmış ve akışkan giriş sıcaklığı, ısı gücü ve ısıtıcı boru boyutlarının termal osilasyonlara etkisi incelenmiştir. Çalışılan deneysel koşullarda BDO, YDO ve TO olmak üzere üç temel tip osilasyon gözlenmiştir. Homojen iki-fazlı akış modeli kullanılarak tek boyutlu akış denklemleri çözülmüş ve termal osilasyonların hangi koşullarda oluşacağı belirlenmiştir. Model kullanılarak bulunan kararlı durum karakteristikleri, osilasyonların periyot ve genlikleri deneysel sonuçlarla iyi bir uyum göstermiştir. Termal osilasyonlar BDO ya eşlik etmiş ve basınç ve sıcaklık osilasyonları faz halinde olmuştur. Ancak basınç osilasyonlarının maksimumu daima sıcaklık osilasyonlarının maksimumundan faz gecikmesi oluşturmuştur.

Padki *et al.* (1991) zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı düşey tek bir kanal içeren bir sistemde basınç düşümü ve termal osilasyonları deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. İş yapan akışkan olarak R11'in kullanıldığı çalışmalarda iç çapı 7.5 mm, dış çapı 9.5 mm olan biri düz diğeri Linde High-Akı kaplamalı iki boru kullanılmıştır. Isıl gücün ve giriş aşırı soğutmasının kararlı ve kararsız durum karakteristiklerine etkisi incelenmiştir. Basınç düşümü tip osilasyonlar, termal osilasyonlar ve yoğunluk değişim tipi osilasyonlarla süperimpoze basınç düşümü tipi osilasyonların oluştuğu gözlemlenmiştir. Tüm ısıl güçlerde hem BDO hem de TO osilasyonları gözlenmiştir. Belirli bir giriş sıcaklığında osilasyonların genlik ve periyotları ısıl gücün artmasıyla artmıştır. Ayrıca belirli bir ısıl güçte giriş aşırı soğutması arttıkça osilasyonların genlikleri ve periyotları artmıştır. Drift-flux modeli kullanılarak osilasyon karakteristikleri elde edilmiş ve teori ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu bulunmuştur.

Padki *et al.* (1992) basınç düşümü osilasyonları ile Ledinegg kararsızlığını teorik olarak incelemişlerdir. İki fazlı akışı simüle etmek için bir integral formülasyon geliştirmişlerdir. Hem basınç düşümü osilasyonları hem de Ledinegg kararsızlıkları için gerçek iki fazlı akış modelinden bağımsız kararsızlık kriterleri türetilmiştir. Çalışma sonucunda BDO limit çevrimlerinin süper kritik Hopf bifurcation'undan sonra oluştuğu

bulunmuştur. Ledinegg kararsızlığının ve BDO tipi osilasyonların temel mekanizmalarını belirleyebilmek amacıyla daha geniş bir analiz yapılmıştır. Ledinegg kararsızlığı ve BDO tipi osilasyonları bifurcation açısı teorisine göre sınıflandırılmış ve aralarındaki farklar açıklanmıştır.

Ding (1993) ve Ding *et al.* (1995) iş yapan akışkanı R11 olan yatay kaynamalı bir boru sisteminde iki fazlı akış kararsızlıklarını deneysel olarak incelemişlerdir. İş yapan akışkan olarak R11'in kullanıldığı çalışmada iki fazlı akış katmanlaşması ve iki fazlı akış kararsızlıkları araştırılmıştır. Yatay borudaki iki fazlı akış dinamik kararsızlıklarının düşey borudakine benzerlikler gösterdiği belirlenmiş ancak tüm kararsız bölgenin düşey akışa göre kararlı akış karakteristik düzleminde ($\Delta P - G$) sağa doğru kaydığı görülmüştür. Bu ise osilasyonların düşey sistemlere göre daha erken başladığı anlamına gelmektedir. İki fazlı akış kararsızlıklarından BDO, YDO ve TO osilasyonları gözlemlenmiş ve bu osilasyonların genlik ve periyotlarına kütleli debi, ısı gücü, giriş aşırı soğutması, çıkış orifisi gibi parametrelerin etkisi incelenmiştir. BDO esnasında giriş basıncının osilasyon genliğinin debi, aşırı soğutma miktarı ve ısı gücü arttıkça arttığı belirlenmiştir. Periyodun ise debi arttıkça arttığı ve ısı gücü arttıkça azaldığı bulunmuştur. Termal osilasyonlar ise BDO ile birlikte ortaya çıkan osilasyondan ziyade bağımsız bir olay olarak tanımlanmıştır. Ayrıca kararlı durum karakteristiklerini incelemek için boyut analizi yöntemi kullanılmıştır.

Liu *et al.* (1993, 1994) zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı dikey bir kanalda iki fazlı akış geçiş kaynaması ve termal osilasyonlarını deneysel olarak araştırmışlardır. İş yapan akışkan olarak R12 kullanılmış ve hidrodinamik olarak kararlı ve kararsız koşullarda geçiş kaynama bölgesinde boru cidarındaki sıcaklık çalkantıları ölçülmüştür. Çıkış kısıtlayıcısı olmadığında sistemin hidrodinamik olarak kararlı olduğu bulunmuş bu durumda geçiş kaynama bölgesinde alışıldık düzensiz cidar sıcaklık çalkantıları gözlemlenmiştir. Çıkış kısıtlayıcısı olduğunda ise sistemin hidrodinamik olarak kararsız olduğu bulunmuş ve bu durumda devamlı büyük genlikli ve büyük periyotlu sıcaklık çalkantıları oluşmuştur. Oluşan bu tip sıcaklık çalkantılarına termal osilasyon adı verilmiştir. Cidar ısı kapasitesi ve konvektif geçiş kaynamalı ısı transferinin termal

osilasyonların dinamik kaynağı olduğu ve eksenel kondüksiyon ile hidrodinamik kararsızlıkların kararsızlığı azaltıcı etmenler olduğu bulunmuştur. Ayrıca hidrodinamik olarak kararsız sistemin daha düşük kritik ısı akılarına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Xu ve Chen (1993) dikey yukarı akışlı bir boruda iki fazlı akış yoğunluk değişim tipi kararsızlıklarını deneysel olarak incelemiştir. İş yapan akışkan olarak su kullanılmış ve test borusu üniform olarak ısıtılmıştır. YDO oluştuğu zaman test borusunun çıkışındaki cidar sıcaklığı osilasyon yapmıştır. Sıcaklık osilasyon genliğinin düşük, buna karşılık frekansının yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Belirli bir zaman geçtikten sonra ısı yorulma nedeniyle burn-out olayının meydana geldiği görülmüştür. YDO nun periyodu ısı akısının ve sistem basıncının artmasıyla azalmış, giriş kütleli debisinin ve giriş aşırı soğutmasının artmasıyla artmıştır. Ayrıca YDO nun kritik ısı akısı giriş kütleli debisinin, giriş aşırı soğutması ve sistem basıncının artmasıyla artmış, çıkış orifisinin çapının artmasıyla azalmıştır.

Xiao *et al.* (1993) yüksek basınçlı paralel kanallarda YDO yu analitik model kurarak incelemişler ve yüksek basınçlı buhar-su çevriminde deneysel çalışmalar yapmışlardır. YDO, BDO, termal ve ikinci YDO osilasyonları oluştuğunu gözlemlemişlerdir. YDO nun 192 bar basınca kadar oluştuğu ve 207 bar basıncın üzerinde yok olduğu görülmüştür. YDO nun paralel kanallarda tek kanaldakinden çok daha kolay oluşacağı, YDO nun bazı durumlarda paralel kanallarda BDO oluşmadan önce başlayabileceği ve BDO nun dengeleyici tank olmadan da oluşabileceği belirlenmiştir.

Rızwan-uddin (1994) iki fazlı akışlardaki yoğunluk değişim osilasyonlarını iki adet lineer olmayan, fonksiyonel, integral/diferansiyel denklemlerine dayanan bir model yardımıyla nümerik olarak incelemiştir. Elde ettiği nümerik simülasyon sonuçlarından bir kısmını yoğunluk değişim osilasyonlarının oluşmasına temel neden olan bazı fiziksel mekanizmaları anlamak için kullanmıştır. Geniş aralığa sahip parametrelerin kullanıldığı araştırma sonucunda şu bulgulara erişilmiştir:

1. Osilasyonlar esnasında hareketli yoğunluk dalgaları önemli bir role sahip değildir ve osilasyonlar çok zayıf karakterde hareket eden yoğunluk dalgaları ile de var olabilirler.
2. Osilasyon periyotları literatürde daha önceki çalışmalarda belirtilen kanal geçiş zamanının yaklaşık iki katı mertebesinde değil de üç ile dört katı arası bir mertebededir.
3. Karışım hızındaki değişim genellikle kanal basınç düşümü karakteristikliklerinin belirlenmesinde karışım yoğunluğundaki değişimden daha önemli bir rol oynamaktadır.

Kakaç, 1994 yılında “A Review of Two-Phase Flow Instabilities” isimli bir literatür taraması yapmıştır. Kakaç, çeşitli yıllarda farklı araştırmacılar tarafından yapılan deneysel ve teorik çalışmaların özetini sunmuştur. İki fazlı akış kararsızlıkları sınıflandırılmış ve üç temel tip kararsızlığın (BDO, YDO ve TO) mekanizmaları ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Çalışmada Kakaç ve arkadaşları tarafından tek kanal, çift kanal, çapraz bağlı çift kanal, dört kanal, çapraz bağlı dört kanal ve yatay U borulardan oluşan sistemlerden elde edilen deneysel sonuçları sunulmuştur. Isıl güç, giriş aşırı soğutması, debi, ısı transfer iyileştirmesi, giriş ve çıkış kısıtlayıcılarının etkileri incelenmiştir. Ayrıca düşey tek bir kanaldaki iki fazlı akış kararsızlıklarına ısı transfer iyileştirmesinin etkileri ile ilgili sonuçlar sunulmuştur. Kakaç ayrıca yukarı akışlı tek bir düşey kanaldaki iki fazlı akışın kararlı ve kararsız davranışı için kullanılan nümerik modelleri özetlemiş ve bunların çözümlerinin bazılarını vermiştir.

Kakaç (1995) kaynamalı sistemlerde iki-fazlı akış dinamik kararsızlıklarını sunduğu çalışmasında düşey ve yatay sistemlerde iki fazlı akış kararsızlıklarını deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Tek kanal içeren yukarı akışlı düşey sistemde iş yapan akışkan olarak su kullanılmış ve YDO nun başladığı ısııl güç ve kuruluk derecesi belirlenmiş ve bunların üzerine sistem basıncı, kütleel debi, giriş aşırı soğutması ve çıkış orifisinin etkileri tespit edilmiştir. Ayrıca bu sistem için YDO nun başlangıcını ısııl güç ve kuruluk derecesine bağlı olarak veren aşağıdaki korelasyon önerilmiştir:

$$x_c N_Q = A + B \frac{N_p}{N_{TS}} \quad (1.1)$$

Bu eşitlikte bulunan N_Q , N_p ve N_{TS} boyutsuz sayılardır:

$$N_Q = \frac{4Q_c L_h}{(h_s - h_0)Gd} \quad (1.2)$$

$$N_p = \frac{P_e \rho_l}{G^2 L_h} \quad (1.3)$$

$$N_{TS} = \frac{h_s - h_0}{\Delta h_v} \quad (1.4)$$

N_Q test kısmında toplam ısıtılan uzunluğun sıvı faz tarafından işgal edilen uzunluğa oranı olarak tanımlanır ve ısı gücü ile giriş aşırı soğutma arasındaki ilişkiyi verir. N_p basıncın ve kütleli debinin YDO üzerindeki etkisini gösteren bir boyutsuz sayıdır. N_{TS} ise akışkanın termodinamik özelliklerini dikkate alan ve aşırı soğutmanın etkisini gösteren boyutsuz sayıdır. Yatay sistemde ise iş yapan akışkan olarak R11 kullanılmış ve drift-flux yöntemi ile kararlı durum karakteristik eğrileri belirlenmiştir. Nümerik yöntemde explicit sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Teorik ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonucunda kaynamalı iki fazlı akış sistemlerinde YDO nun oluşumunun sistem basıncı, giriş aşırı soğutması ve çıkış orifis boyutuna bağlı olduğu; YDO nun periyodunun sistem karışım partikülünün sistem boyunca hareket etme süresine bağlı olduğu; kütleli debi osilasyonunun genliğinin oldukça büyük olduğu ve osilasyon esnasında ters akış oluştuğu vurgulanmıştır.

Kakaç ve Cao (1999) yatay kaynamalı bir boru sisteminde iki fazlı akış kararsızlıklarını araştırmışlardır. R11 soğutkanının kullanıldığı sistemde çalışılan tüm ısı güçlerinde BDO ve TO nun oluştuğu gözlenmiştir. Osilasyonların genlik ve periyotları ısı gücün ve giriş aşırı soğutmasının artmasıyla artmıştır. Ayrıca kararlı durum karakteristikleri ve osilasyonlar drift-flux yöntemi kullanılarak teorik olarak analiz edilmiş ve teorik sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum bulunmuştur.

1.2. Isı Transfer İyileştirmesi

Isı transferi iyileştirme yöntemleri ısı değiştiricilerin performansını iyileştirmek veya ısı değiştiricinin boyutunu ve maliyetini azaltmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Isı transferi iyileştirme yöntemleri genel olarak *pasif*, *aktif* ve *karma* yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Isı aktarılan akışkana ilave enerji verilerek ısı transferindeki iyileştirmeyi sağlayan yöntem aktif yöntem, ilave enerji verilmeden ısı transferindeki iyileştirmeyi sağlayan yöntem ise pasif yöntem olarak adlandırılmaktadır. Aktif yöntemlerde ilave dış güç gerektiğinden bunun maliyeti genel değerlendirmede göz önüne alınmalıdır. Endüstriyel uygulamalar için genellikle pasif yöntemler tercih edilmektedir. Karma yöntemlerde aktif veya pasif yöntemlerden iki veya daha fazlası birlikte kullanılmaktadır (Bergles 1985; Reay 1991; Webb 1994; Kalinin and Dreitser 1998; Somersclaes and Bergles 1997). Bergles (1985) ısı transfer iyileştirme yöntemlerini Çizelge 1.1’de gösterildiği gibi sınıflandırmıştır. Çizelge 1.2’de ise ısı transferi iyileştirme yöntemlerinin ısı transfer moduna göre sınıflandırılması verilmiştir.

1.2.1. Isı transfer iyileştirmesinin iki fazlı akışlara etkisini inceleyen araştırmalar

İki fazlı akışlı sistemlerde ısı transfer iyileştirme yöntemleri kullanmaktaki amaç ısı transfer katsayısı yüksek, sürtünme katsayısı düşük ve kararlı çalışma karakteristiklerine sahip sistem tasarlamaktır. Çeşitli pasif ve aktif ısı transfer iyileştirme yöntemlerinin geniş koşullar altında iki fazlı akış ısı taşınım katsayılarını arttırdığı belirlenmiştir.

Çizelge 1.1. Isı transferi iyileştirme yöntemleri (Bergles 1985)

Pasif Yöntemler	Aktif Yöntemler
İşlenmiş yüzeyler	Mekanik yardımcılar
Pürüzlü yüzeyler	Yüzey titreşimi
Genişletilmiş yüzeyler	Akışkan titreşimi
Yerleşik iyileştirme aygıtları	Elektrostatik alanlar
Dönmeli akış aygıtları	Emme veya enjeksiyon
Bobinli borular	Jet çarpması
Yüzey gerilim aygıtları	
Katkı maddeleri	

Çizelge 1.2. Isı transferi iyileştirme yöntemlerinin ısı transfer moduna göre sınıflandırılması (Reay 1991)

	Isı Transfer Modu				
	Zorlanmış Taşınım (Gazlar)	Zorlanmış Taşınım (Sıvılar)	Kaynama/buharlaştırma	Yoğuşma	Kütle Transferi
Pasif Yöntemler					
İşlenmiş yüzeyler	-	-	A	A	-
Pürüzlü yüzeyler	C	B	B	B	B
Genişletilmiş yüzeyler	A	-	B	B	C
Yerleşik iyileştirme aygıtları	B	-	C	-	-
Dönmeli akış	B	A	B	B	C
Yüzey gerilimi	-	-	B	C	-
Gözenekli yapılar	-	-	A	C	C
Katkı maddeleri	B	C	C	(B)	C
Bobinli borular	-	C	-	-	-
Yüzey katalizörleri	(B)	-	-	-	(B)
Mikro oluklar	C	(B)	-	-	-
Aktif Yöntemler					
Mekanik yardımcılar	-	B	C	-	B
Yüzey titreşimi	C	C	-	C	-
Akışkan titreşimi	C	(B)	(B)	-	B
Elektrostatik alanlar	(B)	-	B	B	(A)
Diğer elektrik yöntemler	-	-	(A)	-	(B)
Emme/Enjeksiyon	C	-	-	C	-
Jet çarpması	(B)	(C)	-	-	-
Yüzey dönmesi	-	(C)	(A)	(A)	(A)
İndüklenmiş akış	(B)	(B)	-	-	-

A: En Önemli, B: Önemli, C: Biraz İlgili, -: İlgili Değil, (): Tahmin Edilen Önem

İki fazlı akışlarda ısı transfer iyileştirme yöntemleri kullanan çok sayıda araştırma yapılmıştır ve bu konuda geniş bir literatür bulunmaktadır. Tan ve Deng (1986) yaptıkları kaynamalı yatay, iş yapan akışkan R - 113 olan ve helisel sıralı olarak dizayn edilmiş borularda meydana gelen ısı transfer karakteristiklikleri ve sürtünme faktörleri araştırılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda helisel sıralı borularda elde edilen ısı transfer katsayıları pürüzsüz içi boş borular için elde edilen değerlerden $1.54 \div 2.1$ katı kadar daha yüksek ısı transfer katsayıları elde edilmiştir. Deneysel araştırmanın ısı transfer ve sürtünme dataları üzerine bina edilen ve boru iç yüzey konfigürasyonlarına bağlı parametreleri ihtiva eden daha önce genel mahiyette kabul gören korelasyonları söz konusu boru elemanları için sürtünme faktörü ve Nusselt sayısına bağlı olarak yeni bir bilgisayar programı geliştirilmiştir.

İki fazlı akışlarda kullanılan ısı transfer iyileştirme yöntemleri ile ilgili olarak vurgulanması gereken hususlar Çizelge 1.3 ve 1.4’de özetlenmiştir.

Çizelge 1.3. İki fazlı akışta kullanılan pasif ısı transfer iyileştirme yöntemleri (Yılmaz vd 2007; Comaklı vd. 2007)

Yöntem	Karakteristikleri
İşlenmiş Yüzeyler	1. Genellikle kaynama ve yoğuşmayı iyileştirmek amacıyla kullanılırlar. 2. İşlenmiş yüzeyler kaynamalı akışta havuz kaynamasından daha az etkindir.
Pürüzlü Yüzeyler	1. Pürüzlülük laminar akış ısı transferinde az etkiye sahiptir veya hiç etkisi yoktur. 2. Pürüzlülük kaynamada çekirdeklenme sitelerinin artmasını sağlar ve buharlaşmayı, kritik ısı akısını, ve post dry-out ısı transfer karakteristiklerini iyileştirir. 3. Buharlaştırıcı boruları için çeşitli pürüzlülük konfigürasyonları geliştirilmiştir.
Genişletilmiş Yüzeyler	1. Kanatçıklar genellikle zorlanmış ısı transferini iyileştirirler, bunun yanında küçük kanatçıklar kaynama ve yoğuşmayı iyileştirmek amacıyla kullanılırlar. 2. Integral veya yerleşik içten kanatçıklı borular soğutma buharlaşma uygulamalarında düz boruya göre ısı transfer miktarını birkaç kat artırır. 3. Düşey veya yatay buharlaştırıcılar için iyileştirilmiş ısı transfer boruları ticari olarak üretilmektedir.
Yerleşik İyileştirme Aygıtları	1. Yerleşik boru iyileştirme aygıtları kaynama kritik ısı akısını arttırmak için ısıtılmış yüzey yanındaki akışı karıştırmak amacıyla kullanılmaktadır.
Dönmeli Akış Aygıtları	1. Boruda suyun aşırı soğutulmuş kaynaması veya iç borusu ısıtılmış halkasal akışta giriş dönmesinin kritik ısı akısını arttırmada etkin olduğu belirlenmiştir. 2. Suyun aşırı soğutulmuş kaynamasında spiral eğimli veya teğetsel delikli giriş vorteks üreteçleri çok büyük ısı akıları sağlamaktadırlar.
Yüzey Gerilim Aygıtları	1. Yüzey gerilim aygıtları sıvı akısını buharlaşma bölgesine yönlendirmir veya yoğuşma alanından uzaklaştırır. 2. Yüzey gerilim aygıtları kaynamada çekirdeklenme sitelerinin sayısını artırır.
Gözenekli Yapılar	1. Gözenekli yapılar çok sayıda çekirdeklenme siteleri sağlayarak buhar üretmek için gerekli kızgın ısı miktarını minimuma indirirler. 2. Gözenekli yapıları içeren çeşitli borular ticari olarak bulunmakta ve soğutma sistemlerinde kullanılmaktadır.
Katkı Maddeleri	1. Kaynamada sıvı izleyici katkı maddeleri, damlacıklı yoğuşmada kimyasal maddeler kullanılmaktadır. 2. Katkı maddeleri aşırı soğutulmuş çekirdekli kaynamada pek etkili değildir. Akışkan ile yüzey arasındaki sıcaklık farkı bazı katkı maddelerinde azalırken diğerlerinde artmaktadır.
Bobinli Borular	Zorlanmış taşınım buharlaşmasında çevresel ortalama ısı taşınım katsayısında önemli iyileşmeler oluşmakta ve bobinli boru çapı azaldıkça iyileşmeler artmaktadır.

1.2.2. Isı Transfer İyileştirmesinin İki Fazlı Akış Kararsızlıklarına Etkisini İnceleyen Araştırmalar

Yukarı kısımlarda belirtildiği gibi iki fazlı akışlarda ısı transfer iyileştirme yöntemleri kullanan çok sayıda araştırma yapılmıştır ve bu konuda geniş bir literatür bulunmaktadır. Bunun yanında ısı transferi iyileştirmesinin iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisini incelemek amacıyla yapılan araştırmalar sınırlı sayıdadır (Çizelge 1.5). Reay (1991) tarafından ısı transferi iyileştirme yöntemleri için yapılan sınıflandırmada 11 adet pasif yöntem 9 adet de aktif yöntem bulunmaktadır (Çizelge

1.1). Literatür taramasından iki fazlı akışlarda çok sayıda ısı transfer iyileştirme yöntemleri kullanılmış olmasına rağmen iki fazlı akış kararsızlık çalışmalarında işlenmiş ve pürüzlü yüzeyler, yerleşik iyileştirme aygıtları ve bobinli boruların iyileştirme yöntemleri olarak kullanıldığı ve bunlarla ilgili araştırma sayılarının sınırlı olduğu görülmektedir.

Çizelge 1.4. İki fazlı akışta kullanılan aktif ısı transfer iyileştirme yöntemleri (Yılmaz vd 2007)

Yöntem	Karakteristikleri
Mekanik Yardımcılar	1. Mekanik yardımcıları kullanarak ısı transferini iyileştirme mekanik yöntemlerle akışkanın karıştırılması, yüzeyin dönmesi veya çok viskoz akışkanlar için yüzey kazıyıcıları kullanmayı kapsar. 2. İnce buhar filmleri oluşturma için kazıyıcıların kullanımı önerilir
Yüzey Titreşimi	1. Çoğu uygulamalarda titreşim frekansları 1000 Hz'den daha azdır. 2. İyileştirme oranları genellikle iki katına kadar çıkar. Ağır ısı transfer yüzeyleri için iyileştirme akustik enerjiyi yüzeye iletmedeki zorluklar nedeniyle daha düşüktür.
Akışkan Titreşimi	1. Frekans 1-10 MHz arasında değişir. 2. Isı transfer iyileştirmesi esas olarak akustik indüklenmiş akış ve ilave ajitasyon nedeniyle oluşur. 3. Sonik veya ultrasonik akışkan titreşimlerinin önemli derecede akış kaynamasını etkilemediği bulunmuştur.
Elektrostatik Alanlar	1. Elektrostatik alanların kullanılmasıyla ısı transfer yüzeyi yakınındaki ısı sınır tabakayı kararsız hale getiren ikincil hareketler oluşur. 2. Yöntem kaynama, yoğunlaşma, erime ve katılaşma içeren faz değişim proseslerinde kullanılmaktadır. 3. % 100-2300 arasında değişen iyileştirme oranları elde edilebilmektedir. 4. Pompa gücünü içeren işletme maliyeti karşılaştırması elektro-hidro dinamik sistemin geleneksel sistemden biraz daha üstün olduğunu ortaya koymaktadır
Diğer Elektrik Yöntemler	1. Bu elektrik yöntemleri termodinamiksel ve mikrodalga, indüksiyon ve radyo frekans ısıtmasını içerir.
Yüzey Dönmesi	1. Sistem ve dönme hızına bağlı olarak az bir miktardan % 500'e kadar ısı transfer iyileştirmesi elde edilebilir. 2. Dönme yöntemi iki fazlı akışlar özellikle kaynama ve yoğunlaşma için özel öneme sahiptir.

Lin *et al.* (1982) osilasyon yapan iki fazlı akışlarda ısı transferini ve ısı transfer iyileştirme elemanlarının etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. İş yapan akışkan olarak R11 soğutkanı kullanılmış ve altı farklı düşey boru konfigürasyonunda kararlı ve osilasyonlu duruma ait kaynama ısı taşınım katsayıları elde edilmiştir. Lin *et al.* tarafından kullanılan ısı transfer iyileştirme elemanları ve karakteristik boyutları Şekil 1.1'de verilmiştir. Çalışmada yüksek hızlı kayıt yapabilen fotoğrafik bir sistem kullanılmış ve osilasyonlu akış koşullarında iki fazlı akış rejiminin tüp uzunluğu boyunca üniform olmadığı ve zamanla değiştiği başka bir deyişle yerel ısı taşınım katsayılarının zamanla değiştiği belirlenmiştir. Çalışmada şu karakteristik sonuçlar bulunmuştur:

1. Ortalama iki fazlı akış ısı taşınım katsayısı büyük oranda ısı akısına daha az derecede ise basınca bağlı olmuştur. Isı akısı ve basınç arttıkça ısı taşınım katsayısı artmış ancak kuruluk derecesi arttıkça ise hafif bir şekilde azalmıştır. Nusselt sayısı aşağıdaki şekilde korele edilmiştir:

$$Nu = 190 \cdot C_s \left(\frac{P}{P_c} \right)^{0.25} \cdot \left(\frac{qD_e}{\Delta h_v \mu_l} \right)^{0.7} e^{-0.125 X} \quad (1.5)$$

Nu :Nusselt sayısı ($Nu = hD_e / k_l$)

D_e : Efektif tüp çapı (m)

k_l : Isı iletim katsayısı (W/mK)

C_s : Yüzey koşul katsayısı

Q : Isı akısı (W/m²)

X : Kuruluk derecesi

P : Sistem çalışma basıncı (bar)

P_c : Akışkan kritik basıncı (bar)

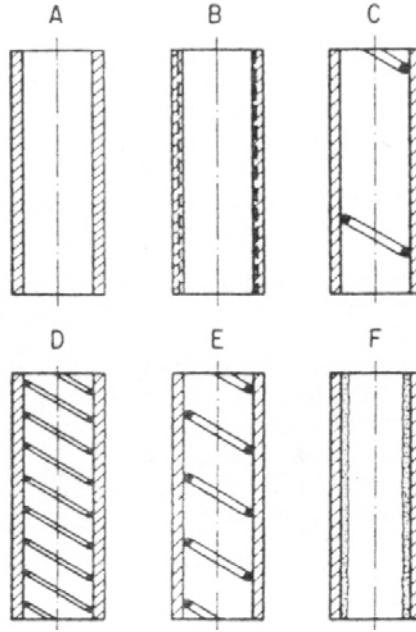
μ_l : Doymuş sıvı viskozitesi (kg/ms)

Δh_v : Buharlaşma gizli ısı (J/kg)

2. İyileştirme elemanlarının kullanıldığı yüzeyler arasından Union Carbide Linde yüksek akıllı kaplama en yüksek osilasyon ısı taşınım katsayısı vermiştir. İçten yivli boruda ısı taşınım katsayısı yaklaşık %20 artmıştır. İç yayın kullanıldığı borularda ise ısı transferindeki iyileşme miktarının yayın adımına ve tel boyutuna bağlı olduğu bulunmuştur.

3. Osilasyonlu koşullardaki ortalama ısı taşınım katsayısının kararlı durum ısı taşınım katsayısından biraz daha küçük olduğu tespit edilmiştir.

Bergles ve Joshi (1983) dairesel kesitli kanallarda iki fazlı akış kararsızlıkları ve ısı transfer karakteristiklerine farklı konfigürasyonlara sahip ısı transfer iyileştirme elemanlarının etkilerini incelemişlerdir.



Boru	İyileştirme Elemanları	Eşdeğer Çap (d_e)
A	Boş boru	7.493
B	Threaded, 7.938mm–16 threads per 25.4mm	7.619
C	İç Yay, Tel çapı: 0.794; adım:19.05mm	7.446
D	İç Yay, Tel çapı: 0.432; adım:3.175mm	7.401
E	İç Yay, Tel çapı: 1.191; adım:6.350mm	7.192
F	Union Carbide Linde Yüksek ısı akılı kaplama	7.073

Şekil 1.1. Lin *et al.* (1982) tarafından kullanılan iyileştirme elemanları

Ünal (1985) tarafından sodyum ile ısıtılan buhar jeneratör borularındaki YDO ile ilgili araştırma yapılmış ve YDO'nun başlangıç sınırlarını tahmin etmek amacıyla iki korelasyon önerilmiştir. Çeşitli geometri ve çalışma koşullarına ait 363 araştırma datası kullanılmıştır. Kullanılan data düz düşey borular, düşey ve yatay borudan oluşan borular, helisel bükülmüş borular ve serpantin borulara ait datayı içermektedir. Kullanılan çalışmada kullanılan bir boru da helisel bükülmüş borudur. Bu boruda kızgın buhar bölgesi uzunluğunun toplam boru uzunluğunun %70–80 arasında olduğu zaman YDO'nun başladığı belirlenmiştir.

Menteş vd (1983) farklı ısı transfer iyileştirme elemanlarının kullanıldığı iş yapan akışkanı R11 olan zorlanmış konveksiyonlu yukarı akışlı tek kanallı bir sistemde iki fazlı akış kararsızlıklarını deneysel olarak incelemiştir. Deneysel çalışmalarda beş farklı ısı gücü, altı farklı akışkan giriş sıcaklığı ve altı farklı ısı transfer iyileştirme elemanları kullanılmıştır (Şekil 1.1). Sıcaklık ve basınç ölçümlerine ilaveten iki fazlı

akışın yüksek hızlı kamera kaydı yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda ısı transfer iyileştirme elemanlarının kullanıldığı test borularında oluşan iki fazlı akışın boş boruda oluşan iki fazlı akışlardan daha kararlı olduğu tespit edilmiştir. Giriş sıcaklığı azaldıkça stabilite artmış, bununla birlikte osilasyonların periyot ve genliklerinde de artış gözlemlenmiş ve osilasyonlar daha şiddetli olmuştur. Yüzey kaplamalı borunun test edilen borular arasında en kararsız olduğu belirlenmiştir. Bu boruda osilasyonlar diğer iyileştirilmiş boru tiplerine göre daha yüksek debilerde başlamış ve karakteristik durum diyagramında daha geniş bir bölgeyi kaplamıştır. Yüzey kaplamalı boru sistemini kararlı duruma getirmek için en yüksek giriş kısıtlayıcısı gerekmiştir. Yaylı boruların incelenen diğer boru konfigürasyonlarına göre (boş boru, iç yüzeyi işlenmiş boru, yüzey kaplama yapılmış boru) daha kararlı oldukları ve yaylı borular arasında ise efektif çapın azalmasının stabiliteyi arttırdığı belirlenmiştir.

Zhou vd (1990) düşey helisel-bükülmüş borularda yoğunluk değişim osilasyonunu sistematik olarak incelemişlerdir. Sistem basıncı, kütleli debi, ısı akısı, giriş aşırı soğutma miktarı, giriş ve çıkış kısıtlayıcılarının etkileri incelenmiştir. Sistemin stabilite eşik diyagramları saptanmış ve ayrıca yoğunluk değişim osilasyonlarının eşikini belirlemek için deneysel korelasyon sunulmuştur. Bulunan sonuçlar şöyle özetlenebilir:

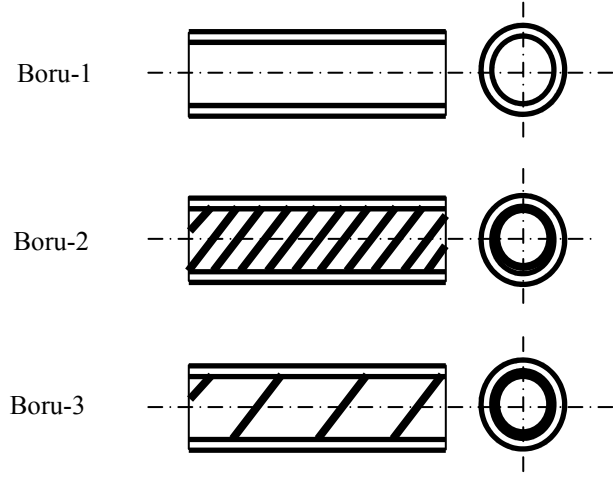
1. YDO karakteristik eğrinin pozitif eğimli kısmında oluşmuştur.
2. Osilasyon periyotları 3-14 s aralığında değişmiş, osilasyon periyodu kütleli debi ve sistem basıncının artmasıyla artmıştır.
3. Kütleli debinin artmasıyla kütleli debinin osilasyon genliği artmıştır.
4. Çıkış kurulum derecesi eşik kütleli debi ve çıkış kısıtlama derecesinin artmasıyla azalmış, sistem basıncı ile giriş kısıtlama derecesinin artmasıyla artmıştır.

Ting-Kuan vd (1990) helisel bükülmüş eğimli borular bulunan boylerde yüksek basınçlı su-buhar iki fazlı akışına ait hidrodinamik kararsızlıklarını deneysel olarak araştırmışlardır. İki fazlı akış kararsızlıkları üzerine basınç, kütleli debi, giriş aşırı soğutma derecesi, ısı akısı ve dağılımı, giriş ve çıkış akış kısıtlayıcısı, sıkıştırılabilir hacmin vb. etkileri detaylı olarak çalışılmıştır. Eğik boruda BDO, YDO ve TO deneysel olarak gözlemlenmiştir. Şu bulgulara erişilmiştir:

1. BDO karakteristik eğrinin negatif eğimli bölgesinde, YDO pozitif eğimli bölgesinde, TO akış kaynama krizinde olduğu zaman oluşmuştur. TO ya BDO ya da YDO bölgelerinde oluşmuş, yalnız başına oluşmamıştır.
2. BDO'nun periyotları 20-180 s, YDO'nun 1.9-15 s, periyodun akışkanın test borusunda ortalama kalma zamanına oranı 1.8-3.5 olarak bulunmuştur.
3. Sistem stabilitesi dengeleyici tanktaki sıkıştırılabilir hacim, kütsel debi, giriş aşırı soğutması, giriş ve çıkış kısıtlayıcısı gibi parametrelerden etkilenmektedir.

Yerleşik boru iyileştirme aygıtları ısıtılan yüzeyde enerji transferini indirekt olarak geliştirmek amacıyla akışkan akımına yerleştirilen elemanlardır. Yerleşik boru iyileştirme aygıtları kaynama kritik ısı akısını arttırmak için ısıtılmış yüzey yanındaki akışı karıştırmak amacıyla kullanılmaktadır. Widmann *et al.* (1994, 1995) ve Kakaç *et al.* (1995) 106cm uzunluğundaki yatay tek borulu sisteme yerleşik iyileştirme elemanları olarak farklı adımlara sahip yaylar yerleştirmişlerdir (Şekil 1.2). 5 ve 15mm adımlara sahip 1.0mm çapında telden yapılmış yaylar kullanılmıştır. BDO, YDO ve TO'nun gözlemlendiği çalışmadan elde edilen bulgular şunlardır:

1. İyileştirilmiş yüzeyler için BDO hemen hemen tamamen karakteristik eğrinin negatif eğimli bölgesinde oluşmuştur.
2. BDO esnasında cidar sıcaklıklarının periyot ve genlikleri iyileştirilmiş yüzeylerde düz boruya göre daha yüksektir.
3. İyileştirilmiş yüzeylerde kütsel debinin azalmasıyla BDO'nun periyot ve genlikleri artmaktadır. Oysaki düz borularda periyot ve genlik debinin azalmasıyla azalmaktadır.
4. BDO esnasında iyileştirilmiş yüzeylerde oluşan cidar sıcaklıkları düz borulardakinden daha yüksektir.
5. BDO için olan kararsız bölge iyileştirilmiş yüzeylerde düz boruya göre büyüktür. İyileştirilmiş yüzeylerde BDO için stabilite sınırları daha düşük kütsel debilere kayar.
6. İyileştirilmiş iç yüzeye sahip olan yatay borular düşey borulara daha çok benzemektedir. Bunun nedeni oluşan akış katmanlaşmasının düz boruya göre daha düşük olmasıdır.
7. İyileştirilmiş yüzeyler için olan karakteristik eğrinin negatif eğimi daha dik ve dolayısıyla sistem daha az kararlıdır.



Boru	İyileştirme Elemanları	Eşdeğer Çap (d_e)
1	Boş boru	10.90
2	İç Yay, Tel çapı: 1.0mm; adım: 5mm	10.50
3	İç Yay, Tel çapı: 1.0mm; adım: 15mm	10.77

Şekil 1.2. Widmann *et al.* (1994, 1995) ve Kakaç *et al.* (1995) tarafından kullanılan ısı transfer iyileştirme elemanları

Guo ve arkadaşları (2001) helisel olarak bükülmüş bir borudaki su-buhar iki-fazlı akıştaki basınç düşümü osilasyonlarını deneysel olarak incelemişler ve basınç düşümü osilasyonlarının oluşumunu engellemek için yeni bir yöntem önermişlerdir. İki fazlı akış çevriminde sıkıştırılabilir gaz hacmi sağlayan deponun yerinin BDO oluşma sınırlarını oldukça etkilediği, farklı osilasyon ilk koşulları, farklı periyot ve genliklere yol açtığı belirlenmiştir. Hareketli sıkıştırılabilir hacim kullanılması BDO oluşumunu önemli ölçüde ortadan kaldırmıştır. Ayrıca üniform olmayan ısı akısı dağılımının BDO başlama sınırlarını ciddi bir şekilde azalttığı ve helis açısı yönlerinin BDO karakteristiklerine önemli etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Sıkıştırılabilir hacmin yerini değiştirerek, ısı akısı dağılımını üniform şekilde düzenleyerek veya üniform olmayan ısı akısından kaçınılamayacak ise düşük kuruluk dereceli bölgede daha fazla ısı akısı sağlayarak BDO oluşumunun engellenebileceği ifade edilmiştir.

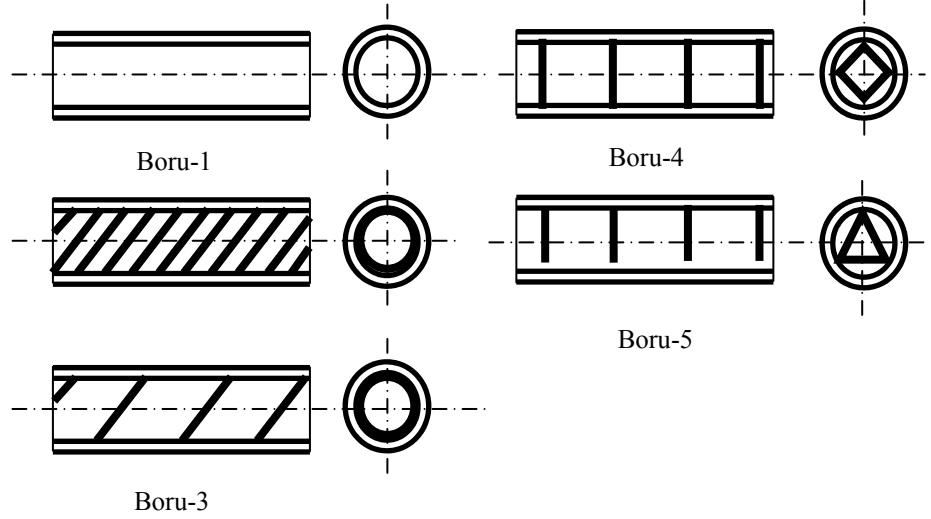
Çizelge 1.5. Isı transfer iyileştirmesinin iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisini inceleyen araştırmalar

Yazar (Yıl)	Boru Tipi	Oryantasyon	Akışkan	İyileştirme Yöntemi	İncelenen Parametreler
Yerleşik İyileştirme Aygıtları					
Widmann vd (1995)	Tek Boru	Yatay	R 11	İç yay Tel çapı: 1.0 mm Tel adımı: 5, 15 mm	BDO, YDO, TO
Karlı vd (2002)	Tek Boru	Yatay	R 11	İç yay Tel çapı: 1.8 mm Tel adımı: 3.6, 11 mm	BDO, YDO, TO
Karlı vd (2002)	Tek Boru	Yatay	R 11	Eşdeğer kare bilezik Tel çapı: 1.8 mm Tel adımı: 11 mm	BDO, YDO, TO
Karlı vd (2002)	Tek Boru	Yatay	R 11	Eşdeğer üçgen bilezik Tel çapı: 1.8 mm Tel adımı: 11 mm	BDO, YDO, TO
Mentes vd (1983)	Tek Boru	Düşey	R 11	İç yay Tel çapı: 0.794, 0.432, 1.191 mm Tel adımı: 19.05, 3.175, 6.350 mm	BDO, YDO, TO
Pürüzlü Yüzeyler					
Mentes vd (1983)	Tek Boru	Düşey	R 11	Pürüzlü yüzey Bir inç başına 16 yiv	BDO, YDO, TO
Mentes vd (1983)	Tek Boru	Düşey	R 11	Yüzey kaplama Union Carbide Linde yüksek ısı aklı kaplama	BDO, YDO, TO
Bobinli Borular					
Zhou vd (1990)	Tek Boru	Düşey	Su	Helisel bükülmüş boru Helis açısı: 3.94° Helis çapı: 1.37 m	YDO
Ting-Kuan vd (1990)	Tek Boru	Eğik	Su	Helisel bükülmüş boru Boru çapı: 0.016 m Eğim açısı: 14°	BDO, YDO, TO
Guo vd (2001)	Tek Boru	Düşey	Su	Helisel bükülmüş boru Helis açısı: 4.27° Boru çapı: 15 mm Bobin çapı: 256 mm Bobin adımı: 60 mm	BDO
Ünal (1985)	Tek Boru	Düşey Yatay	ve Su	Helisel bükülmüş boru Helis açısı: 4.27° Boru çapı: 15 mm Bobin çapı: 256 mm Bobin adımı: 60 mm H	

Karlı vd (2002) çeşitli yerleşik iyileştirme aygıtlarının kullanıldığı yatay bir borudaki iki fazlı akış kararsızlıklarını incelemişlerdir. 5 farklı ısı transfer yüzeyi kullanılmıştır: boş boru, farklı adıma sahip iki adet yay içeren boru, eşdeğer kare bilezikli boru ve eşdeğer üçgen bilezikli boru (Şekil 1.3). Çalışmadan elde edilen bulgular şöyle özetlenebilir:

1. Tüm ısıtıcı boru konfigürasyonları ve giriş sıcaklıkları için BDO, YDO ve TO gözlemlenmiştir.

2. Giriş sıcaklığı azaldıkça stabilite sınırları düşük debilere kaymış ve böylece sistem stabilitesi artmıştır.



Boru ismi	Borunun Karakteristiği	d _e (mm)
Boru-1	Boş boru	13
Boru-2	İçerisinde çapı 1.8 mm ve adımı 3.6 mm olan yay elemanı bulunan boru	9.56
Boru-3	İçerisinde çapı 1.8 mm ve adımı 11 mm olan yay elemanı bulunan boru	12.53
Boru-4	İçerisinde çapı 1.8 mm ve adımı 11 mm olan eşkenar dörtgen halkalı eleman bulunan boru	12.56
Boru-5	İçerisinde çapı 1.8 mm ve adımı 11 mm olan eşkenar üçgen halkalı eleman bulunan boru	12.66

Şekil 1.3. Karslı vd (2000) tarafından kullanılan ısı transfer iyileştirme elemanları

- İyileştirilmiş yüzeylerde kararsız bölge genişliği düz boruya göre daha büyüktür.
 - Düz boru en kararlı boru, adımı yüksek olan yay elemanlı boru ise en kararsız olarak bulunmuştur.
 - Eşdeğer üçgen ve kare bilezikli konfigürasyonlar yaylı konfigürasyonlardan daha kararlıdır.
 - Kütleli debi ve giriş sıcaklığı azaldıkça BDO ve YDO'nun periyot ve genlikleri artmaktadır.
 - En yüksek genlik ve periyota sahip osilasyonlar büyük adımlı yay içeren konfigürasyonda oluşmuştur.
- Isı transfer iyileştirmesinin iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi konusunda vurgulanması önemli noktalar Çizelge 1.6'da özetlenmiştir.

1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı

Enerji kaynaklarının sürekli olarak azaldığı ve giderek daha pahalı elde edildiği günümüzde alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması üzerine bilimsel ve siyasi çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bugün Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı Küçük Destek Programı (UNDP/SGP) ve AB destek programları enerji tasarrufuna yönelik projelere önem vermektedir. Enerjinin daha etkili ve verimli bir şekilde kullanılması bugün için alternatif enerji kaynağı olarak görülmektedir. Bu kapsamda ısı transferini iyileştirmeye yönelik çalışmalar da enerji ekonomisi açısından dikkate alınması gereken çalışmalardır. Isı transferi iyileştirme yöntemleri genel olarak “pasif”, “aktif” ve “karma” yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır.

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 yaklaşmıyor ya da akımın debi, basınç, sıcaklık gibi hidrodinamik ve ısı özelliklerinde periyodik salınımlar yani osilasyonlar meydana geliyorsa bu akıma da kararsız akım adı verilmektedir. Zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı termal sistemlerin dinamik davranışları hakkında bilgi sahibi olmak, bu sistemlerin lokal ve global kararlılıklarını anlamak açısından çok önemlidir. Kararsızlık olayları ile nükleer reaktörler, buhar kazanları, özel ısı değiştiricileri, soğutma sistemleri, buhar üreteçleri gibi iki fazlı akışların söz konusu olduğu endüstriyel uygulamalarda sıkça karşılaşılabilmektedir. Kaynamalı iki fazlı akışlardan kaynaklanan değişik tipli kararsızlıklar yukarıda bahsedilen endüstriyel uygulamaların dizayn ve işletme aşamalarında dikkate alınmalıdır. Kararsızlıklardan kaynaklanan osilasyonların karakteristiklerinin bilinmesi bu uygulamalarda sistemlerin güvenli bir şekilde işletilmesi için oldukça önemli bir noktadır. İçerisinde sıvı akışkanın ısıtıldığı ve kaynamaya başladığı bütün sistemlerde geri besleme (feed back) mekanizmaları ile oluşan kararsızlıklar; 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.

Çizelge 1.6. Isı transferi iyileştirmesinin iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi (Boure 1973, Kakaç; 1994)

Parametre	Karakteristikler
Kararlı Durum Karakteristikleri	1. Tüm iyileştirilmiş yüzeylerde karakteristik eğri yatık S şeklindedir. 2. İki fazlı akış bölgesi karakteristik eğrinin lokal minimum civarında başlar. 3. İyileştirilmiş yüzeylerde giriş sıcaklığı azaldıkça basınç düşümü azalır. 4. İyileştirilmiş yüzeylerdeki basınç düşümleri düz borulardakinden daha yüksektir.
Stabilite Sınırları	1. Giriş sıcaklığı azaldıkça BDO'nun başladığı nokta düşük debilere kaymaktadır. 2. İyileştirilmiş yüzeylerde osilasyonlar karakteristik eğride düz boruya göre daha geniş bir bölgeyi kapsar. Bu bölge ne kadar büyük olursa osilasyonlar da o kadar uzun sürer. 3. Yerleşik iyileştirme aygıtı olarak yay elemanı kullanımında efektif çap azaldıkça stabilite artar. Ancak diğer iyileştirilmiş yüzeyler için bu sonuç genelleştirilemez.
Basınç Düşümü Osilasyonları	1. Kütleli debi azaldıkça BDO'nun periyot ve genlikleri artar. 2. Giriş sıcaklığı azaldıkça BDO'nun periyot ve genlikleri artar. 3. İyileştirilmiş yüzeylerde BDO'nun periyot ve genlikleri düz borudakine göre daha yüksektir.
Yoğunluk Değişim Osilasyonları	1. Kütleli debi azaldıkça YDO'nun periyot ve genlikleri azalır. 2. Giriş sıcaklığı azaldıkça YDO'nun periyot ve genlikleri artar. 3. İyileştirilmiş yüzeylerde YDO'nun periyot ve genlikleri düz borudakine göre daha yüksektir.
Termal Osilasyonlar	1. İyileştirilmiş yüzeylerin cidar sıcaklıkları düz borulardakine göre daha yüksektir. 2. İyileştirilmiş yüzeylerde cidar sıcaklıklarının periyot ve genlikleri düz borulardakine göre daha yüksektir. 3. Termal osilasyonların periyot ve genlikleri giriş sıcaklığının azalmasıyla artar. 4. Termal osilasyonların periyot ve genlikleri kütleli debinin azalmasıyla artar.

İki fazlı akışlarda kararsızlıklar farklı tesirler sonucu farklı karakterlerde ortaya çıkmaktadırlar. Ortaya çıkış nedenleri ve karakterleri farklı olduğundan kontrol veya yok etme metodları 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. Diğer taraftan, bu kararsızlıklar kanal geometrisi, basınç, debi, sıcaklık gibi işletme ve sınır şartları ile değişmektedir. Tüm bu değişkenlikleri parametre olarak dikkate alarak yapılacak deneysel çalışmalar ya sınırlı kalacak ya da hepsini gerçekleştirmek oldukça fazla zaman ve deneysel maliyeti beraberinde getirecektir.

Literatür taramasından görüldüğü gibi iki fazlı akış kararsızlıkları ile ilgili araştırmalar daha çok düşey boru/kanallar üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu tez ısı transferi iyileştirmesinin yatay borulardaki iki fazlı akış rejimlerine ve iki fazlı akış

kararsızlıklarına etkisini incelemek amacıyla hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan sistem Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Isı Transferi laboratuvarında bulunan ve daha önce çeşitli deneysel araştırmalarda kullanılan bir iki fazlı akış sistemidir. Daha önce bu sistem kullanılarak yapılan araştırmalarda iş yapan akışkan olarak R-11 akışkanı kullanılmıştır. İş yapan akışkan olarak R-11 akışkanının kullanılmasının nedeni şunlardır:

- (a) R-11 bağıl olarak düşük kaynama noktasına sahiptir.
- (b) R-11 bağıl olarak düşük buharlaşma gizli ısıya sahiptir.
- (c) R-11 suyla benzer tortu karakteristiklerine sahiptir.

Yatay borularda iki fazlı akış kararsızlıklarını inceleyen çalışmaların birçoğunda da özellikle düşük basınçlı sistemlerde bu nedenlerle çeşitli soğutkanlar R11, R113 vb. kullanılmıştır. Bilimsel gelişmeler sonucunda, iş yapan akışkan olarak kullanılan R11 soğutkanının, yüksek ozon tüketme potansiyeli ve yüksek global ısınma potansiyeli nedeniyle uluslararası organizasyon ve antlaşmalar sonucu belirli bir program çerçevesinde Türkiye dahil birçok ülkede üretimi ve kullanımı yasaklanmıştır. Türkiye’de bu antlaşmalara imza atmış ve gerekli yönetmelikleri imzalamış bulunmaktadır. Ayrıca Freonların kullanıldığı sistemlerdeki osilasyon koşulları endüstriyel sistemlerdeki koşullardan farklıdır. Yapılan bazı araştırmalarda iş yapan akışkan olarak su kullanan sistemler olmasına rağmen endüstriyel cihaz tasarımı ve sistem çalışması için yeterli deneysel sonuçların olduğu söylenemez. Bu nedenlerle, deney düzeneğinde yeni bir iş yapan akışkan kullanımı zorunluluğu doğduğundan suyun kullanılmasına karara verilmiş ve tez çalışmalarında su-buhar iki fazlı akış kararsızlıkları incelenmiştir. Bu tezin bilimsel bilgi birikimine şu noktalarda katkı yapması umulmaktadır:

1. İki fazlı akış içeren yatay borulu evaporatörler ve ısı değiştiricilerin kararsızlıklar sonucu oluşabilecek burn-out, ısıl yorulma, titreşim ve arızaların oluşmasına meydan vermeyecek tasarımının yapılması, çalışma koşullarının buna göre belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Burnout olayı; geometriye (boruların uzunluğu, çapı), çalışma koşullarına (basınç, giriş sıcaklığı, akışkanın hızı, sisteme verilen ısı vs.) ve sınır

koşullarına (eksenel ısı akısı dağılımı) bağlıdır. Bu nedenlerle bu parametrelerin kararsızlıklara etkisinin araştırılması çok önemlidir.

2. Şu ana kadar R11 soğutkanıyla yapılan çalışmalardan üretilen yurtiçi ve yurtdışı makale/bildirilerimizde sunulan sonuçların iş yapan akışkan olarak su kullanılmasıyla elde edilecek sonuçlarla karşılaştırmasına olanak verecektir.

3. İki fazlı akış kararsızlıkları ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmasına rağmen, ısı transfer iyileştirmesinin bu kararsızlıklara etkisini inceleyen araştırmalar sınırlı sayıdadır. Farklı türbülatorler kullanılarak yapılacak çalışmanın ve ardından nümerik modellemenin bu konuya önemli katkı yapacağı düşünülmektedir.

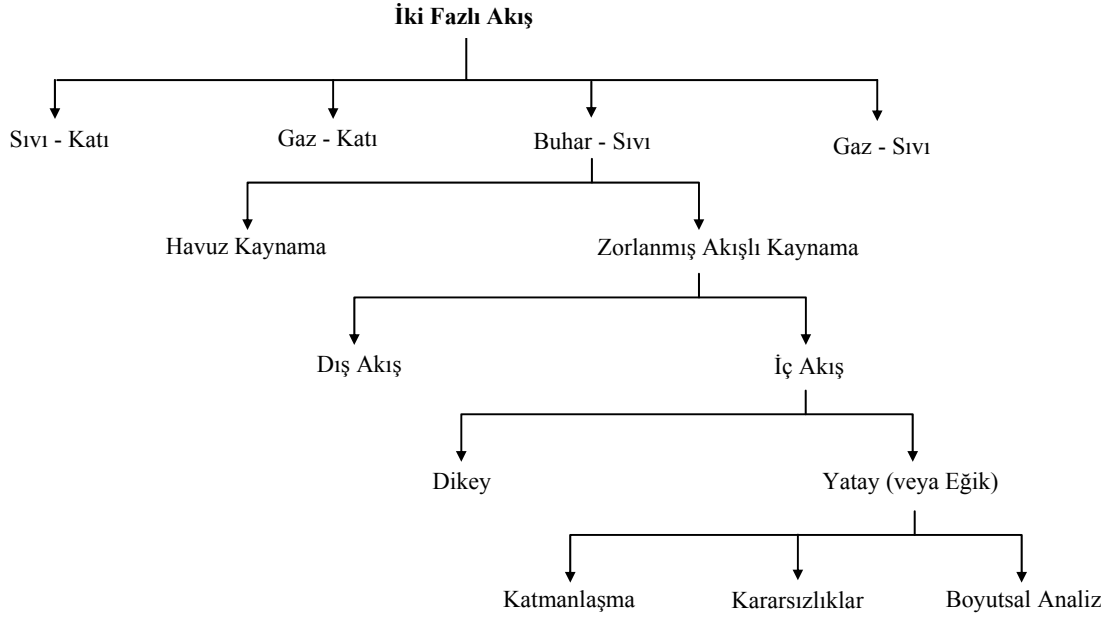
2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. İki Fazlı Akışlar

İki fazlı akış iki fazın (gaz, sıvı veya katı) etkileşimli akışını ifade eden bir terimdir. İki fazlı akış terimi çok farklı olaylara verilen genel bir isimdir. Bununla birlikte iki fazlı akıştan bahsedilebilmesi için “farklı yoğunluklara sahip olan iki madde aynı sistemde dengeli veya dengesiz koşullar altında eş zamanlı olarak mevcut” olmalıdır. Sıvı-katı, gaz-katı, buhar-sıvı ve gaz-sıvı akışları en yaygın görülen iki fazlı akış örnekleridir. Şekil 2.1’de iki fazlı akışların sınıflandırılması gösterilmiştir. Buhar-sıvı akışı sıvı ısıtıldığı ve sistemde kaynama olduğu zaman elde edilir. Bu akış tipinde iki faz da aynı kimyasal bileşimlere sahiptir. Transport mekanizmasına göre kaynama “havuz kaynama” ve “zorlanmış akışlı kaynama” olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Zorlanmış akışlı kaynama akış koşullarına göre “dış akış” ve “iç akış” olarak iki sınıfa ayrılır. Dış akış düzlem veya eğrisel ısı transfer yüzeyi üzerindeki akışkan akışını, iç akış ise dairesel boru veya diğer geometrik kesitlere sahip kanal gibi kapalı bir alandan geçen akışı ifade eder. İç akış, akış yönüne göre “dikey akış”, “yatay akış” ve “eğik akış” olarak sınıflandırılır.

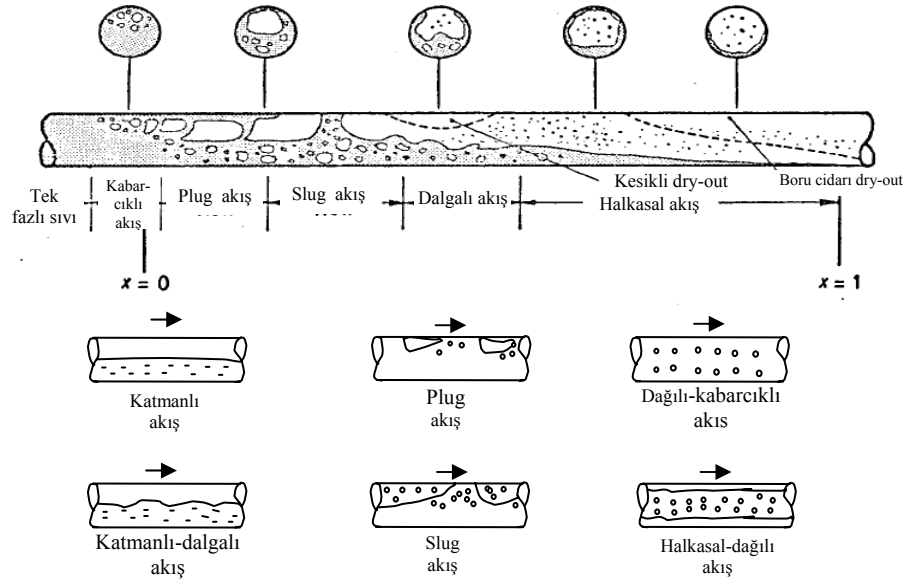
İki fazlı akışların temel karakteristik özelliği iki faz arasında bir ara yüzeyin olması ve gaz-sıvı akışlarında bu ara yüzeyin çeşitli şekiller almasıdır. Akış oryantasyonu bu ara yüzey üzerinde önemli etkiye sahiptir. Yukarıda da belirtildiği gibi iki fazlı akışlar oryantasyonlarına göre yatay, eğik ve düşey olarak sınıflandırılırlar. Düşey iki fazlı akışlarda akışın yönü kanalda aşağıya veya yukarıya doğru olabilir. Yatay iki fazlı akış karakteristikleri düşey iki fazlı akış karakteristiklerinden çok farklıdır. Düşey akışlarda yerçekimi yönü akışın hareket yönüne paralel, boru boyunca herhangi bir kesite dik ve akış borunun eksenine göre simetriktir. Oysaki yatay akışta yerçekimi kuvvetleri akışkan akımına dik bir yönde buhar ve sıvı fazları üzerine etki yapar, bu ise asimetric faz dağılımına neden olur ve faz ayrışması oluşabilir. Bu kuvvetler yoğunluğu yüksek

olan sıvı fazını borunun tabanına, düşük olan buhar fazını ise borunun üst taraflarına doğru yönlendirir (Karlı vd 2001).



Şekil 2.1. İki fazlı akışların genel sınıflandırılması (Ding 1993)

İki fazlı akışlarda belirli koşullar altında oluşan akış rejimleri iki fazın bağıl ve mutlak akış debilerine, sistemin geometrisine ve özellikle fazlar üzerine etkiyen kuvvetler arasındaki etkileşime bağlıdır. İki fazlı akışlarda çok farklı akış rejimleri tanımlanmış ve çok çeşitli terminoloji kullanılmıştır. Düşey borularda oluşan akış rejimleri kabarcıklı akış, slug akış, halkasal akış, halkasal-dağılı akış ve damlacıklı akış rejimleridir. Yatay borularda oluşan akış rejimleri düşey borulardakinden oldukça farklıdır ve akış yönüne dik etkiyen yerçekimi kuvvetleri nedeniyle oluşan asimetriclik sonucu düşey akışlardakinden çok daha karmaşıktır. Yatay borulardaki akış rejimleri kabarcıklı akış, ara akış (plug, yarı-slug ve slug akış), halkasal akış, halkasal dağılı akış ve sisli akış olarak adlandırılır (Bell 1984; Griffith 1985; Hewitt and Kawaji 1999). Şekil 2.2’de yatay borulardaki akış rejimleri şematik olarak gösterilmiş ve bu akış rejimlerinin karakteristikleri aşağıda kısaca açıklanmıştır:



Şekil 2.2. Yatay borulardaki akış rejimleri (Bell 1984)

(a) Katmanlı düz akış: Bu akışta yerçekiminden kaynaklanan ayrışma tamamlanmış haldedir. Boru üst cidarı boyunca tamamen gaz fazı akışı olurken boru alt cidarı boyunca ise tamamen sıvı faz akışı söz konusu olmaktadır. Bu akış rejiminde gaz hızı sıvı üzerine çok az etki yapacak büyüklüktedir.

(b) Katmanlı dalgalı akış: Yeterince yüksek gaz hızlarında gaz-sıvı ara yüzeyinde dalgalar oluşur. Eğer serbest sıvı yüzeyinde gözlenebilir dalgalar var ise akış katmanlı-dalgalı veya dalgalı akış rejimi olarak adlandırılır. Dalgaların oluşumu sıvı yayılımı ile sınırlıdır ve sıvı yayılımı dalga yüksekliğini belirler.

(c) Dağılı kabarcıklı akış: Sıvının tüm hacmi boyunca küçük buhar kabarcıkları dağılmıştır ve bu kabarcıklar borunun üst taraflarında toplanma eğilimindedirler. Yüksek sıvı debileri için sıvıdaki türbülans çalkantıları kaldırma kuvvetlerini yenecek, parçalayacak, ve kabarcıkları dağıtacak kadar yeterlidir. Böylece dağılı kabarcıklı rejim oluşur.

(d) Halkasal-dağılı akış: Eğer yeterince sıvı yok ise çalkantılar boruyu dolduracak kadar büyüyemez ve slug akış yerine halkasal-dağılı akış oluşur. Bu akış rejimine film akış rejimi de denmektedir. Tüm boru çapı çevresi boyunca sürekli bir sıvı filmi vardır,

ancak bu akış rejiminde film kalınlığı üniform değildir. Film kalınlığı yerçekimi nedeniyle genellikle borunun alt tarafında borunun üst tarafındakinden daha kalındır.

(e) Ara akışlar: Eğer gaz hızı yeterince yüksek ise katmanlı dalgalı akış rejiminden ara rejime geçiş oluşur. Gaz hızı dalganın tepesine etkiyen Bernoulli kuvvetlerinin dalgayı büyütmesine yetecek kadar büyük ise bu geçiş rejimi oluşur. Bu durumda Bernoulli kuvvetleri yerçekimi kuvvetlerinden çok daha önemli olur. Ara akış genellikle üç alt kısma ayrılır:

i- Plug akış: Plug akışta kabarcıklar mermi şeklindedir. Kaldırma kuvvetleri nedeniyle kabarcıklar borunun üst tarafına hareket eder. Düşük kütleli debilerde sıvı akışının etkilemesi sonucunda kabarcıklar uzun kuyruklu bir yapıdadır.

ii- Slug akış: Dalgalı akış rejiminde fazlar arası yüzeyde oluşan dalgaların büyüklüğü artarak boru kanalı üst cidar yüzeyi ile temas etmesi sonucu slug akış rejimi oluşur. Slug olarak adlandırılan sıvı paketçikleri boru boyunca akar ve bu sluglar gaz kabarcıkları içerirler.

iii- Yarı-slug akış: Bu geçiş akış rejiminde slug borunun alt tarafında katmanlaşmış tabakanın yüzeyinde bulunan dalganın şeklini alır ve borunun üst tarafına temas etmez.

Yatay borulardaki akış rejimleri Hewitt (1978), Widmann (1993) ve Ding (1993) tarafından kabarcıklı akış, plug akış, katmanlı akış, dalgalı akış, slug akış ve halkasal akış olarak sınıflandırılmıştır.

2.2. Kaynamalı Kanalda Basınç Düşümü-Debi Karakteristikleri

Kanal boyunca oluşan basınç düşümü ($\Delta p = p_{\text{giriş}} - p_{\text{çıkı}}$) ile akış debisi arasındaki ilişki “sistemin kararlı durum karakteristiği” olarak adlandırılır. Bu, ayrıca bazı araştırmacılar tarafından iç karakteristikler olarak da adlandırılmaktadır. Isıtılan bir kanalda tek fazlı akışta basınç düşümü ile debi arasındaki ilişki aşağıdaki bağıntıyla verilmektedir (Park 2006):

$$\Delta p = k \frac{G^2}{2\rho} + \Delta p_g \quad (2.1)$$

Görüldüğü gibi basınç düşümü debinin karesiyle orantılı olarak değişmekte ve parabolik karakter göstermektedir. Basınç düşümünde meydana gelen küçük değişikliklere yanıt ise aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir:

$$\frac{d(\Delta p)}{dt} = k \frac{G_o}{\rho} \frac{dG}{dt} \quad \text{veya} \quad \frac{dG}{dt} = \frac{d(\Delta p)}{dt} \frac{\rho}{k G_o} \quad (2.2)$$

İki fazlı akışta ise laminar (karışık) momentum denklemi:

$$\Delta p = k \Phi_{2\phi}(G) \frac{G^2}{2\rho} + \Delta p_g(G) \quad (2.3)$$

şeklindedir. Basınç düşümünde meydana gelen küçük değişikliklere yanıt ise aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir:

$$\frac{d(\Delta p)}{dt} = k \frac{G_o}{\rho} \left(\Phi_{2\phi} + \frac{G_o}{2} \frac{d\Phi_{2\phi}}{dG} \right) \frac{dG}{dt} + \frac{d(\Delta p_g)}{dt}; \quad \frac{d\Phi_{2\phi}}{dG} < 0 \Rightarrow G \uparrow, \Phi_{2\phi} \downarrow \quad (2.4)$$

veya

$$\frac{d(G)}{dt} = \frac{\rho}{k G_o} \left(\frac{1}{\Phi_{2\phi} + \frac{G_o}{2} \frac{d\Phi_{2\phi}}{dG}} \right) \frac{d(\Delta p - \Delta p_g)}{dt}; \quad \Phi_{2\phi} + \frac{G_o}{2} \frac{d\Phi_{2\phi}}{dG} \quad (2.5)$$

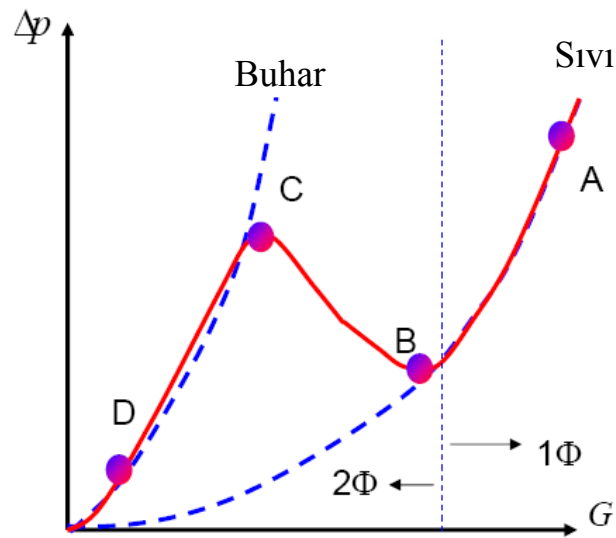
Şekil 2.3’de A noktasında akışkan tek fazlı sıvı haldedir ve debi yüksektir. Sistem basıncı kütleel debinin azalması nedeniyle sürtünme basınç kaybıyla orantılı olarak azalır:

$$(f \approx C/Re^m) \approx G^{2-m} \quad (2.6)$$

Debi azaldıkça B noktasının hemen öncesinde kaynama başlar. Artık buhar üretimi yeterlidir ve iki fazlı akış sürtünmesinden kaynaklanan (Δp) iki fazlı akış yerçekiminden kaynaklanan sürtünmeden (Δp_g) daha baskın olduğundan debinin azalmasıyla basınç düşümü artar. C noktasında hemen hemen tümüyle buhar fazı vardır. Akış debisi kanalda çok miktarda buhar üretecek kadar düşüktür ve basınç düşümü tekrar tek fazlı buhar yasasına $(\approx G^{2-m})$ uyar. D noktasından sonra yerçekimi prosese baskın olmaktadır. Şekil 2.4'den görüldüğü gibi $\Delta p > \Delta p_C$ ve $\Delta p < \Delta p_B$ ise belirli bir basınç düşümü için sadece tek bir debi bulunmaktadır. Oysaki $\Delta p_B < \Delta p < \Delta p_C$ olduğu bölgede tek bir basınç düşümü için birden fazla debi mevcuttur. Bu durumdaki kesişim noktaları tümüyle kararlı değildir. Stabilite kriteri

$$\frac{\partial(\Delta p)}{\partial \dot{G}} < \frac{\partial(\Delta p_f)}{\partial \dot{G}} \quad (2.7)$$

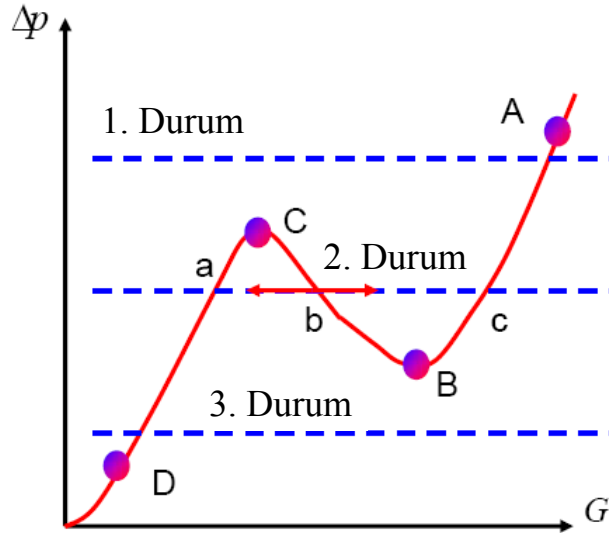
şeklinde. Bu nedenle (a) ve (c) kesişim noktaları kararlıdır ancak (b) kesişim noktası kararsızdır. (b) noktasında debi hafifçe azalırsa iki fazlı sürtünme basınç kaybı artar, debi (a) noktasına gelinceye kadar daha da azalır.



Şekil 2.3. Karakteristik durum eğrisi

Diğer taraftan pompa boyunca basınç artışı sabit değildir ve akış debisiyle değişir. Pompa boyunca basınç artışı (Δp_{pompa}) ile akış debisi arasındaki ilişki pompa karakteristikleri olarak adlandırılır. Bu ilişki ayrıca dış karakteristikler olarak da isimlendirilir. Pompa karakteristiği daima negatif eğimlere sahiptir; kullanılan pompaya bağlı olarak bu eğim çok dik veya düz olabilir.

$$\frac{d\Delta p_{\text{pompa}}(G)}{dG} < 0 \quad (2.8)$$



Şekil 2.4. Karakteristik durum eğrisi

2.3. İki Fazlı Akış Kararsızlıkları ve Tipleri

Çoğu kararlı kaynamalı akış prosesleri küçük ölçekli kararsızlıklar içerirler. Bu akışlarda kabarcıklar oluşur ve çöker, diğer taraftan akış alanında göz önüne alınan herhangi bir nokta belli bir anda sıvı diğer bir anda ise buhar tarafından işgal edilmiş olabilir. Bu olaylar sıvı-gaz ara yüzeyinde yerel olarak meydana gelir ve “mikroskobik kararsızlıklar” olarak adlandırılır. Mikroskobik kararsızlıklar klasik akışkanlar mekaniği yöntemleri ile incelenebilir. Diğer bir tip kararsızlık makroskobik kararsızlıklardır.

Mikroskobik osilasyonlar kendiliğinden yüksek genlikli sürekli osilasyonlara neden olmazlar. Eğer çalışma esnasında bunun dışında makroskobik kararsızlık mekanizmaları var ise mikroskobik osilasyonlar gerçek sistem osilasyonlarını tetikleyebilir. Eğer küçük ölçekli yerel kararsızlıklar herhangi bir sürekli osilasyona neden olmuyorsa bu akış kararlı akış olarak adlandırılır. İki fazlı akış kararsızlıkları genel olarak “statik kararsızlıklar” ve “dinamik kararsızlıklar olmak üzere iki temel sınıfa ayrılmaktadır. İki fazlı akış statik ve dinamik kararsızlık çeşitleri ile bunların oluşmasında etkin rol oynayan temel mekanizmalar ve karakteristiklikleri Çizelge 2.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. İki Fazlı Akış Kararsızlıklarının Sınıflandırılması (Boure et al. 1973)

Kararsızlıklar		Kararsızlık Tipi	Mekanizmaları	Karakteristiklikleri
Statik Kararsızlıklar	Temel (veya saf) statik kararsızlıklar	Akış Gezintisi veya Ledinegg Kararsızlığı	Negatif eğimli bölgede iç karakteristik eğrisi dış karakteristik eğrisinden daha dik bir eğime sahiptir.	Akış ani ve büyük genlikli bir gezinti ile yeni bir kararlı çalışma durumuna geçiş yapar.
		Kaynama Krizi	Isıtılan yüzeyden etkin olmayan ısı çekilmesi	Cıdar sıcaklık gezintisi ve akış osilasyonu
	Temel relaxation kararsızlık	Akış Rejimi Geçiş Kararsızlığı	Kabarcıklı akış, halkasal akıştan daha düşük boşluk oranına fakat daha yüksek bir basınç düşümüne sahiptir.	Çevrimsel akış rejimi dönüşümleri ve debi değişimleri
	Bileşik relaxation kararsızlığı	"Bumping" (darbeli akış), "Geysering" (püskürtmeli akış) ve "Chugging" (gürültülü akış)	Genellikle çekirdekleşme sitelerinin eksikliği nedeniyle metastabil duruma periyodik olarak ayarlanma	Olası püskürtme ve emmeli aşırı kızgın ve şiddetli buharlaşma
Dinamik Kararsızlıklar	Temel (veya saf) dinamik kararsızlıklar	Akustik Osilasyonlar	Basınç dalgalarının rezonansı	Sistemde oluşan basınç dalgalarının yayılması için gerekli zamana bağlı yüksek frekanslar (10-100 Hz)
		Yoğunluk Değişim Osilasyonları	Debi, yoğunluk ve basınç düşümü arasında gecikme ve feed back etkileri	Sürekli bir dalga geçiş zamanıyla ilgili olarak ortaya çıkan düşük frekanslar (1 Hz)
	Bileşik Dinamik Kararsızlıklar	Termal Osilasyonlar	Değişken ısı transfer katsayısı ile akış dinamikleri arasında meydana gelen etkileşim	Film kaynamada meydana gelir.
		Kaynamalı Su Reaktör Kararsızlığı	Akış dinamikleri ile ısı transferinin yanı sıra boşluk oranı reaktivitesi arasındaki etkileşim	Sadece düşük yakıt zaman sabiti ve düşük basınçlar altında şiddetlidir.
		Paralel Kanal Kararsızlığı	Az sayıdaki paralel kanallar arasındaki etkileşim	Çeşitli akış dağılım modları
	İkincil olay olarak bileşik dinamik kararsızlıklar	Basınç Düşümü Osilasyonları	Akış gezintisi, kanal ve sıkıştırılabilir hacim arasında dinamik etkileşim başlatır.	Çok düşük frekanslı periyodik proses (0.1 Hz)

İki fazlı akış kararsızlıklarını sınıflandırırken Çizelge 2.1’de kullanılan bazı temel kavramların açıklanması aşağıda verilmiştir (Boure et al. 1973):

(a) Kararlı Akış: Genel olarak sistem parametrelerinin sadece konumun fonksiyonu olduğu akış “kararlı akış” olarak adlandırılır. Bununla birlikte türbülans, çekirdekleşme veya slug akış nedeniyle uygulamada akış küçük çalkantılar içerebilir. Bu çalkantılar çeşitli kararsızlık olaylarını tetiklemede rol oynamaktadır. Eğer akış ani olarak rahatsız edildiğinde yeni çalışma koşulları ilk duruma asimptotik olarak yöneliyorsa bu akışın “kararlı akış” olduğu söylenir.

(b) Statik Kararsızlık: Eğer akış koşulları orijinal durumundan küçük bir miktar değiştiğinde orijinal durumun yakınında diğer bir kararlı durum oluşmaz ise akışın “statik kararsızlığa” maruz olduğu söylenir. Statik kararsızlığın nedeni süreklilik yasalarına dayanmaktadır. Bu nedenle, kararsızlık eşiği sadece süreklilik yasaları ile bulunabilir. Statik kararsızlık ya farklı bir kararlı duruma ya da periyodik bir davranışa yol açabilir.

(c) Dinamik Kararsızlık: Atalet ve diğer geri besleme etkileri prosesde önemli ise akışın “dinamik kararsızlığa” maruz olduğu söylenir. Sistem bir servomekanizma gibi davranır ve eşik tahmini için bile süreklilik yasaları bilgisi yeterli değildir. Kararlı durum, sistemin denklemlerinin çözümü olabilir fakat tek çözümü değildir. Kararlı akışta yukarıda belirtilen çalkantılar kararsızlığı başlatmak için yeterli olabilir.

(d) İkincil Olay: İkincil olay birincil olaydan sonra oluşan bir olaydır. Birincil olayın oluşması ikincil olayın oluşması için gerekli bir koşul olduğu durumlarda “ikincil olay” terimi kullanılır.

(e) Bileşik Kararsızlık: Çeşitli temel mekanizmalar proseste etkileşiyorsa ve ayrı olarak incelenemiyor ise kararsızlığın “bileşik kararsızlık” olduğu söylenir. Bileşik kararsızlığın zıttı temel (veya saf) kararsızlıktır.

İki fazlı akış kararsızlıklarını kanal geometrisi, çalışma koşulları ve sınır şartları gibi birçok parametre etkilemektedir. Bu parametreler Çizelge 2.2’de özetlenmiştir.

2.3.1. 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 ya da osilasyonlar oluşuyorsa böyle bir akışın kararlı olduğu söylenebilir. Kararlı bir akış durumunda ulaşılan yeni çalışma şartları başlangıç çalışma noktasına asimptotik olarak yaklaşır. Akışta zamanla oluşabilecek tedirginlik nedeniyle kararlı bir çalışma noktasından farklı bir çalışma noktası ortaya çıkıyorsa oluşan kararsızlıklar "statik kararsızlıklar" olarak adlandırılmaktadır. Statik kararsızlıklar aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır (Boure et al. 1973; Kakaç 1994; Anglard 2006; Park 2006):

1. Temel veya saf statik kararsızlıklar (akış gezintisi ve kaynama krizi)
2. Temel relaxation kararsızlığı (Akış rejimi geçiş kararsızlığı)
3. Bileşik relaxation kararsızlığı (bumping, geysering ve chugging)

Çizelge 2.2. İki fazlı akış kararsızlıklarını etkileyen parametreler (Boure et al. 1973; Bergles 1976; Kakaç 1994)

Temel Parametre	Parametre
Kanal geometrisi	Kanalın boyutu ve uzunluğu
	Kanalın hacmi
	Yüzey koşulları
	Sistemdeki kanal sayısı (tek veya çok kanal)
	Giriş ve çıkış akış kısıtlayıcıları
	Kanalın yatay ya da dikey oluşu
Çalışma koşulları	Sistem basıncı
	Kütleli debi
	Isı gücü
	Giriş aşırı soğutması
Sınır şartları	Isıl sınır şartları
	Giriş ve çıkış basınçları

2.3.1.1. Akış gezintisi (Ledinegg kararsızlığı)

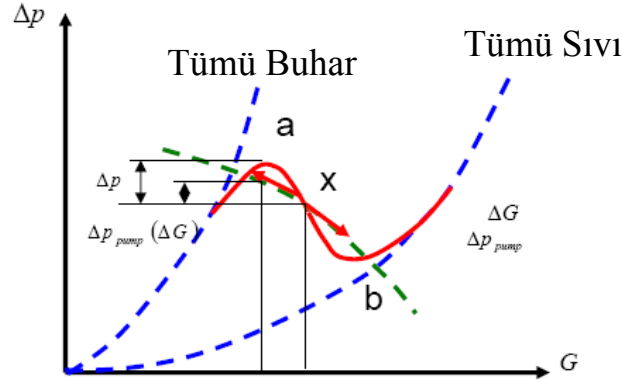
Bu kararsızlık ilk olarak Ledinegg tarafından 1938'de analiz edildiğinden literatürde "Ledinegg Kararsızlığı" olarak anılmaktadır. Ledinegg kararsızlığı akış debisinin aniden daha farklı bir değere değişmesi ile ortaya çıkmaktadır. Ledinegg, iç karakteristik eğrisinin iki pozitif eğimli kısma ilaveten bir de negatif eğimli bölgeye sahip olduğunu ve böylece akış debisinin basınç düşümünün çok değerli bir fonksiyonu olduğunu gözlemlemiştir. Ledinegg kararsızlığının mekanizması Şekil 2.5'de gösterilmiştir. En

yüksek giriş debisinde kaynama oluşmaz ve basınç düşümü (Δp) tek fazlı sistemin basınç düşümü şeklindedir. Daha düşük debilere gidildikçe, debi azalmasına rağmen toplam basınç düşümü artmaya başlar. Debi daha da azalırsa kanalda kaynama çok daha fazla oluşur. Bunun sonucunda debiyi azaltmanın etkisi iki fazlı akış sürtünmesinin etkisini yener ve toplam basınç düşümü tekrar azalmaya başlar. En sonunda çok düşük debilerde boru tamamen kızgın buhar ile dolar ve basınç düşümü tekrar tek fazlı sistemin basınç düşümü gibi olur. Şekil 2.5'deki kesikli çizgi kaynamalı kanalda pompaya ait dış karakteristik eğrisini göstermektedir. Dış karakteristik eğri iç karakteristik eğriden daha düz olduğunda (x) noktasında çalışmak imkansız olmaktadır ve şekildeki x pozisyonu kararsızdır. Debi küçük bir çalkantı sonucu daha düşük bir değere indiğinde, sistemde dış sistemde mevcut olandan daha fazla basınç düşümü oluşacak ve akış debisi daha da azalacaktır. Bu nedenle debide hafif bir azalış (a) noktasına ani bir değişime neden olacaktır. Yeni denge noktası (a) genellikle burnout'un olduğu düşük bir akış debisine karşılık gelir. (a) noktasında çalışma yüksek buhar çıkış kurulum derecesi, yüksek cidar sıcaklıkları ve olası boru arızası ile ilişkili burnouta yol açabileceğinden sorunlu olabilir. Görüldüğü gibi düz bir dış karakteristik eğrisiyle iç karakteristik eğrisi üzerinde minimum noktanın sol tarafında çalışmak imkansız olmaktadır. Bunun aksine debide herhangi bir küçük artış (b) noktasına akış gezintisine neden olacaktır. Akışın çoğunlukla aşırı soğutulmuş olduğu (b) noktasında çalışan sistemde birkaç problem ortaya çıkabilir. Bu tip basınç düşümü karakteristikleri daima statik tip kararsızlık problemi oluştururlar ve sistemi yeniden dizayn ederek veya akış debisiyle orantılı ilave basınç düşümü üreten bir giriş kısıtlayıcısı ilave ederek düzeltilebilir (Liu 1993; Widmann 1994; Park 2006).

Ledinegg kararsızlığı ile ilişkili şunlar ifade edilebilir (Boure et al. 1973; Park 2006):

1. Akış gezintisi veya Ledinegg kararsızlığı basınç düşümü-debi ilişkisi sonucu olarak ortaya çıkar.
2. Bu kararsızlıklar toplam basınç düşümünün (sürtünme+ivmelenme+yerçekimsel basınç düşümleri) debi artışıyla azaldığı durumlarda oluşur.
3. Bu kararsızlık kanal basınç düşümü-debi eğrisinin eğimi (kanalın iç karakteristiği) sistem basınç düşümü-debi eğrisinin eğiminden (kanalın dış karakteristiği) cebrik olarak

daha küçük olduğu zaman meydana gelir.



Şekil 2.5. Ledinegg kararsızlığının şematik olarak gösterimi (Park 2006)

2.3.1.2. Kaynama krizi

Kaynama krizi ısı transfer mekanizmasında ani bir değişim oluşması sonucunda meydana gelir. Kaynama krizinde kararlı çalışma için yüzeyden yeterince ısı çekilemez. Bu olayda akış osilasyonu ve bununla birlikte cidar sıcaklığında hızlı bir artış gözlemlenir. Kaynama krizi çeşitli iş yapan akışkanlar, ısıtıcı geometrileri ve akış koşullarında gözlenmiştir. Mathisen (1967) 870 psia'den daha yüksek basınçlarda bir kaynamalı su kanalında, kaynama krizinin akış osilasyonları ile birlikte eşzamanlı olarak oluştuğunu gözlemlemiştir. Kaynama krizi kaynamalı ısı transfer yapıları nedeniyle kaynamalı su reaktörlerinde (BWR, boiling water reactors) direkt etkiye sahiptir. Kaynamalı su reaktörlerinde karşılaşılan en önemli problemlerden birisi de kaynama krizidir. Kaynama krizinin nedeni olarak çeşitli hipotezler önerilmiştir. Aşırı soğutulmuş ve düşük kuruluk dereceli kaynamada cidar yakınında hidrodinamik ve ısı transfer ilişkileri birçok araştırmacı tarafından kaynama krizi esnasında sınır tabaka ayrılması olarak düşünülmüş ve bu ayrılmanın akış osilasyonuna neden olduğu söylenmiştir. Katto and Yokoya (1984) havuz kaynamada kaynama krizi ile ilgili yaptıkları araştırmada kaynama krizinin oluşumunu üretilen buhar kütlesinin kesikli davranışına ve kaynama yüzeyi boyunca buhar tabakasının tüketimine bağlamışlardır. Benzer şekilde kaynama krizinin başlaması, kaynama rejiminin ısıtılan yüzeyde

CHF'nin başlamasında gözlemlenen koşullara doğru değişimine bağlanabilir (Jones and Judd 2003). Bununla ilişkili literatürde çok sayıda araştırma bulunmaktadır.

2.3.1.3. Akış rejimi relaxation kararsızlıkları

Akış rejimi relaksasyon kararsızlıklarına farklı akış rejimlerinin basınç düşümü karakteristikleri neden olmaktadır. Bu kararsızlıklar sonucunda akışta periyodik değişimler oluşur. Örneğin aynı gaz ve sıvı debilerinde slug akışlardaki basınç düşümü kabarcıklı akıştakinden daha düşüktür. Eğer bir sistem kabarcıklı akış rejiminde akış rejimi sınırının yakınında çalışıyorsa sıvı akış debisinde küçük bir negatif çalkantı slug akışa geçişe neden olabilir. Bunun sonucunda kanaldaki basınç düşümü azalır. Eğer kanal sabit basınç düşümü koşulunda çalışıyorsa (çok sayıda paralel kanalda olduğu gibi) daha çok sıvı sınır koşullarını sağlamak için kanala girecektir. Böylece bu durum sistemi kabarcıklı akış rejimine geri döndürecektir (Anglart 2006). Diğer bir örnek, akış koşulları kabarcıklı ve halkasal akış arasında geçişe yakın olduğu zamanki buharlaşan akışlardır. Debide geçici bir azalma oluştuğunda

- Buhar üretimi artar
- Kabarcıklı akış rejiminden halkasal akış rejimine geçilir.
- Basınç düşümü azalır.
- Akış hızlanır ve buharlaşma yavaşlar
- Halkasal akıştan kabarcıklı akışa dönüş oluşur.

Akışın hızlanması ile yavaşlaması arasındaki zaman gecikmesi düzenli aralıklarla bu çevrimin tekrarlanmasını sağlayacak kadar yeterlidir (Park 2006).

2.3.1.4. Geysering

Geysering, doğal sirkülasyon çevriminin düşey kanalında veya tabandan ısıtılan kapalı uçlu boruda oluşur. Isı akısı yeterli miktarda yüksek olduğunda, kaynama alt taraftan başlar. Düşük basınçlı sistemlerde, ısı akısı arttığında hidrostatik basınçta düşme nedeniyle buhar üretimi ani olarak artar ve genellikle buharın kanaldan

püskürtülmesiyle sonuçlanır. Bunun ardından buharın yerine sıvı gelir ve aşırı soğutulmuş kaynamasız durum tekrar oluşur ve çevrim tekrar başlar. Temel nedeni tek fazlı akıştakinden daha küçük hidrostatik yük nedeniyle iki fazlı akış için olan toplam basınç düşümünün azalmasıdır. Yeterli buhar üretildiğinde ($\Delta p < \Delta p_{siv}$) iki fazlı karışım püskürtülür ve onun yerine sıvı gelir. Geysering sadece doğada değil aynı zamanda roket yakıt deposu ve besleme sistemlerinde de gözlenir. Laboratuvar testlerinde Griffith geysering periyodlarının yaklaşık 10-1000 s aralığında oluştuğunu gözlemlemiştir (Boure et al. 1973; Kakaç and Liu 1990; Park 2006).

2.3.1.5. Bumping

Buhar patlaması kararsızlığı (bumping), doğal konveksiyon ile şiddetli çekirdekli kaynama arasında bir değişimdir. Bu kararsızlık, ısıtılan katı yüzeyde bulunan büyük oyuklarda buharın birikmesini engelleme eğilimi gösteren ıslatma oranı yüksek sıvılarda meydana gelir. Örnek olarak alkali sıvı metalleri ve florokarbonlar verilebilir. Her iki akışkan da mühendislik yüzeylerinde sifıra yakın temas açılmasına sahip akışkanlar sınıfına girdiklerinden bu kararsızlık bu akışkanlarda çok sıklıkla meydana gelir. Böyle iyi ıslatabilme özelliğine sahip sıvılarda, büyük boşlukların tümü sıvı ile dolabilir, taşabilir ve çekirdekleşme için yüksek aşırı ısıtmanın gerekli olduğu bir durum ortaya çıkar. Isı akısı arttığında, çekirdekleşme ve bununla ilişkili sıcaklık gezintisi gözlemlenir. Kararsızlığın karakteristik özelliği yüksek aşırı ısıtma olan bir sıvıda buhar fazının aniden ortaya çıkması ve hızlı büyümesidir (Boure et al. 1973; Park 2006). Örneğin düşük basınçtaki sıvı metal göz önüne alındığında oluşan buhar patlaması kararsızlığı olayı Çizelge 2.3.'de özetlenmiştir.

2.3.1.6. Chugging

Chugging terimi, genellikle bir akış kanalından periyodik olarak akışkanın püskürtülmesiyle karakterize edilen çevrimsel olay için kullanılır. Chugging terimi ilk olarak Fleck tarafından kullanılmıştır. Püskürtme, genellikle kanalın uçlarından basit

geçici giriş ve çıkış debi değişimlerinden soğutkanın büyük miktarlarda şiddetli püskürtülmesine kadar değişebilir. Diğer iki fazlı akış kararsızlık olaylarında olduğu gibi çevrim; kuluçka, çekirdekleşme, püskürtme ve akışkanın tekrar girişinden oluşmaktadır (Kakaç and Liu1991; Boure et al. 1973). Chugging kararsızlığının TRIGA vb. çeşitli reaktörlerde olduğu gözlemlenmiştir. Eğer bir boşluk oluşturmak amacıyla buhar kabarcıkları kanalın en sıcak kısmında birleşirlerse negatif boşluk katsayısı hemen reaktör gücünü azaltır. Azalan güç seviyesinde buhar boşluğu reaktör gücünü orijinal seviyesine döndürecek şekilde ayrışır ve proses tekrar eder.

Çizelge 2.3. Sıvı metalde buhar patlaması kararsızlığı olayı

Sıvı metal yüzeyi çok etkili bir şekilde ıslatır.	Doğal konveksiyon
Birkaç tane çekirdekleşme sitesi kalır.	
Kaynama başlamadan önce sıvı oldukça aşırı ısıtılabilir.	
Sıvı çok hızlı bir şekilde buharlaşır.	Çekirdekli kaynama
Buhar çok büyük bir hacmi işgal eder.	
Sıvı atılır (chugging)	

2.3.2. Dinamik Kararsızlıklar

İki-fazlı akış içeren çoğu endüstriyel sistemler dinamik kararsızlık oluşturma eğilimindedirler. Atalet ve diğer geri-besleme etkileri proseste önemli bir etkiye sahipse ortaya çıkan kararsızlıklar “dinamik kararsızlıklar” olarak adlandırılmaktadır. Bu kararsızlıklar, akışın ataleti ile iki fazlı karışımın sıkıştırılabilirliği arasında yeterli etkileşimden ve geri-beslemeden veya kaynamanın olduğu kanalda debi, basınç düşümü ve yoğunluktaki değişim arasında çoklu geri-beslemelerden kaynaklanabilirler. Yoğunluğun değişimi kaynamalı kanaldaki buhar üretiminden kaynaklanır (Widmann 1993).

Dinamik kararsızlık mekanizmaları; herhangi bir iki fazlı akış sisteminde, yayılım gecikme süreleri ve mevcut geri besleme olayı ile açıklanabilir. Ani bir çalkantının sistem boyunca diğer noktalara ulaşması dalga yayılım hızıyla orantılı olan belirli bir süre alır. Giriş akışkan hızındaki çalkantı sadece belirli bir süre geçtikten sonra sistem

çıkışında hissedilebilir. Sistem boyunca bu gecikmeli çalkantılar yeni bir çalkantı oluşturarak çalkantının başlangıç noktasına tekrar yansıtılır ve böylece devam eder. Belirli şartlar oluştuğunda bu proses kendiliğinden beslenerek süresiz devam edebilir ve böylece sürekli akış osilasyonları ortaya çıkar. Bu osilasyonların periyodu bir çalkantı dalgasının sistem boyunca hareket etmesi için gerekli zamana bağlıdır. Bütün dinamik kararsızlıklar; kütleli debi, ısı gücü ve sistem basıncına bağlı olan belirli bir çalışma moduyla ilişkilidir (Kakaç and Liu1991; Widmann 1993). Dinamik kararsızlıklar

- 1- Yoğunluk değişim tipi osilasyonlar (YDO, density wave type oscillations)
 - 2- Basınç düşümü tip osilasyonlar (BDO, pressure-drop type oscillations)
 - 3- Akustik osilasyonlar (AO, acoustic oscillations)
 - 4- Termal osilasyonlar (TO, thermal oscillations)
- olmak üzere 4 temel sınıfa ayrılmaktadır

2.3.2.1. Yoğunluk değişim osilasyonları

Yoğunluk değişim osilasyonları (YDO) endüstride en yaygın olarak karşılaşılan dinamik iki fazlı akış kararsızlık tipidir. Bu osilasyonlar, osilasyonların periyodu bir yoğunluk dalgasının göz önüne alınan sistem boyunca hareket etmesi için gerekli zaman mertebesinde olduğundan “yoğunluk değişim osilasyonları” olarak isimlendirilir. Bu osilasyonlar kinematik dalga yayılımı ile ilgili olduklarından “akış-boşluk geri besleme kararsızlıkları (flow-void feed-back instabilities)”, iletim gecikmeleri önemli olduğundan “zaman-gecikmeli osilasyonları (time-delay oscillations)” terimleri de kullanılmaktadır. En çok kullanılan terim “yoğunluk değişim osilasyonları” terimidir (Stenning and Veziroğlu 1965). YDO alternatif olarak yüksek ve düşük yoğunluğa sahip karışım akışkan dalgalarının sistem içinde hareket etme gerçeğine dayanır ve yüksek frekanslı osilasyonlardır. Buharın sıkıştırılabilirliği YDO’nun ortaya çıkmasında önemli bir faktör değildir. YDO’nun ortaya çıkmasında önemli rol oynayan iki temel faktörden birincisi; farklı yoğunluklara sahip iki bileşenden meydana gelmiş bir akışın söz konusu olması, ikinci önemli faktör de bu iki faz bileşeninin farklı oranlarda karışımında bulunduğu halde akışın devam etmesidir (Ding 1993).

YDO kararsızlıkları aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir (Anglart 2006):

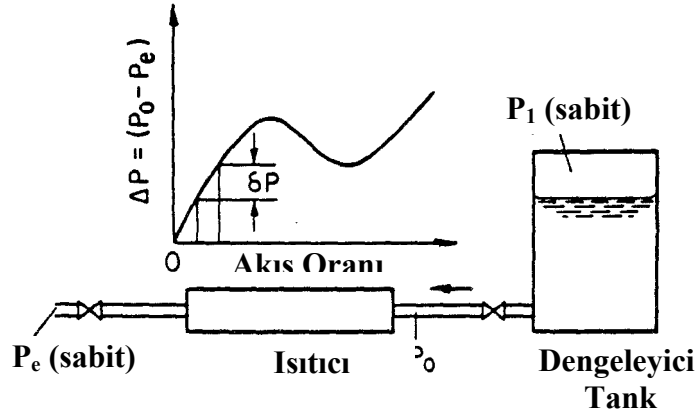
1. Çevrim kararsızlıkları
2. Paralel kanal kararsızlıkları
3. Kanal-kanal kararsızlıkları
4. Nötronik bağlantılı kararsızlıklar

Yoğunluk değişim kararsızlıklarının en önemlileri çevrim ve paralel kanal kararsızlıklarıdır. Paralel-kanal kararsızlıkları paralel bağlı çok sayıda kanal içeren sistemlerde oluşur. Her bir kanalda sabit basınç koşulu geçerlidir. Çevrim kararsızlıkları da paralel kanal kararsızlıklarına benzerdir ancak çevrimde sıfır basınç düşümü sınır koşulu vardır.

YDO'nun orijininin ve mekanizmasının basit bir açıklaması Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ısıtılan boruyu bir kanal ve akış kısıtlayıcısı takip etmektedir. Isıtılan boruda üretilen buhar miktarının sabit olduğu ve sistemin sabit bir çıkış basıncına sahip olduğu kabul edilir. Basınç düşümü-debi eğrisinin pozitif eğimli bölgesinde kısıtlayıcı boyunca olan basınç düşümü debideki değişimle benzer bir değişim gösterir, yani debi azaldıkça basınç düşümü de azalır. Eğer yüksek yoğunluğa sahip olan karışım kısıtlayıcıya ulaşırsa, kısıtlayıcı boyunca olan basınç düşümü artar. Çıkış basıncı sabit olduğu için bu durum sistemin debisinde azalmaya yol açar. Buhar üretimi sabit olduğundan düşük yoğunluklu karışım meydana gelir. Yüksek yoğunluklu karışım kısıtlayıcıdan geçtikten sonra düşük yoğunluklu karışım kısıtlayıcıya ulaşır. Bu düşük yoğunluklu karışım kısıtlayıcıdan geçtiğinde kısıtlayıcı boyunca olan basınç düşümü azalır ve bunun sonucunda sistemdeki debi artar. Daha fazla debi sistemde daha yüksek yoğunluklu karışıma yol açar. Bu yüksek yoğunluklu karışım kısıtlayıcıya ulaştığında tüm döngü tekrar başlar (Liu 1993).

İki fazlı akışın olduğu ısıtılan kanallarda YDO tipi osilasyonların fiziksel mekanizması çeşitli araştırmacılar tarafından farklı şekillerde (basit yoğunlaştırılmış basınç düşümü modeli, entalpi artış modeli, sürekli matematik model) açıklanmıştır (Rızwan-uddin 1994). YDO'nun oluşma mekanizması giriş debisinde ani bir azalış olduğu göz önüne alınarak aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Park 2006):

1. Giriş bölgesinde akışkanın özgül entalpisi artar.
2. Daha yüksek yerel sıcaklıklar oluşur ve aşırı soğutma miktarı azalır.
3. Kaynama daha erken başlar, yani kaynamanın başladığı nokta kanalın girişine yaklaşır.
4. Kuruluk derecesi ve boşluk oranı artar.
5. Sıvı filmi halkasal akış bölgesine sıkışır.
6. Buharlaşma miktarı ani olarak artar.
7. Akış daha da hızlanır.
8. Yerel basınç gradyenti artar.
9. Akışın sabit yükü için (tek ve iki fazlı) iki fazlı basınç gradyentindeki artış tek fazlı basınç yükünde azalmaya neden olur ve giriş debisini azaltır.
10. Basınç düşümü etkisi yoğunluk çalkantılarının sonlu hızı ile hemen kanal boyunca hissedildiğinden (basınç dalgaları hızlı hareket eder) girişteki orijinal çalkantı ile girişteki etkiyi hissetme zamanı arasında bir zaman farkı vardır.
11. Osilasyon oluşur.



Şekil 2.6. Yoğunluk Değişim Osilasyonlarının Şematik Olarak Gösterilişi (Liu 1993)

Basitleştirilmiş Basınç Düşümü Modeli : Giriş hızındaki (debisindeki) ani bir artış iki fazlı akış bölgesinde yüksek yoğunluklu dalgaya dönüşür. Yüksek yoğunluklu dalga kanal çıkışına ulaştıktan bir süre sonra çıkıştaki basınç düşümünün artmasına neden

olur. Sınır koşulu olarak belirlenen sabit değerdeki toplam basınç düşümünü koruyabilmek için giriş hızında ani bir hız düşüşü meydana gelir. Bunun aksine giriş hızındaki (debisindeki) ani bir azalış iki fazlı akış bölgesinde düşük yoğunluklu dalgaya dönüşür. Düşük yoğunluklu dalga kanal çıkışına ulaştıktan bir süre sonra çıkıştaki basınç düşümünün azalmasına neden olur. Sınır koşulu olarak belirlenen sabit değerdeki toplam basınç düşümünü koruyabilmek için giriş hızında ani bir artış meydana gelir ve çevrim bu şekilde devam eder. Bu yaklaşıma göre osilasyonlar iki fazlı karışım akış hızı ile hareket eden entalpi pertürbasyonlarının bir ürünüdür ve bunun sonucunda alternatif olarak yüksek ve düşük yoğunluğa sahip olan karışımlar sistem boyunca hareket ederler. Bu modele göre “hareket eden yoğunluk dalgaları” bu osilasyonların önemli bir karakteristiğidir. Bu dalgalar osilasyonları üretecek şekilde kanaldaki basınç düşümünü etkiler. Bu modele göre osilasyonun periyodu genel olarak kanal boyunca olan geçiş zamanının 1 - 2 katıdır (Boure 1978; Kakaç and Liu 1991; Kakaç 1994).

Entalpi artış modeli: Bazı araştırmacılar bazı koşullarda hareket eden yoğunluk dalgalarının osilasyon mekanizmasının temeli olmadığını belirlemişlerdir. Isıtılan kanalda giriş debisindeki geçici bir azalma akışkan entalpi artış miktarını artırır ve ortalama yoğunluğu azaltır. Bu pertürbasyon basınç düşümünü ve ısı transfer davranışını etkiler. Belirli geometrik koşullar, çalışma koşulları ve sınır koşulları altında çalkantılar çıkışta 180°'lik faz farkına sahip basınç çalkantısı kazanabilir. Bu tedirginlikler hemen giriş debisine iletilir ve sürekli hale gelirler. Basınç dalgaları sonik hızlarda hareket ederler ve bu hızlar iki fazlı akış sistemlerinde karşılaşılan karışım hızlarıyla kıyaslanamayacak kadar büyüktür. Bu nedenle basınç dalgalarının sistem boyunca sonsuz hızla yayıldığı kabul edilir. Görüldüğü gibi, bu modelde basınç dalgalarının sonsuz hızla yayıldığı kabul edilmiştir. Dolayısıyla bu model sonsuz küçük genlikli osilasyonlar için geçerli olabilmesine rağmen iki fazlı akışın olduğu ısıtılan kanallarda sonlu genliğe sahip osilasyonlar ideal olarak simetrik osilasyonlar oluşturmadığından, “giriş pertürbasyonlarının osilasyonlar oluşturacak şekilde kanal çıkışında 180 °'lik faz farkına sahip basınç çalkantısı ürettiği” açıklaması modifiye edilmeli ve sonlu genliğe sahip osilasyonları içerecek şekilde genişletilmelidir. Rızwanud-din'e göre YDO'unun fiziksel mekanizmalarını açıklayan modeller akış

kinetiğini (osilasyonlar esnasında karışım yoğunluğu ve karışım hızının değişimi) ve giriş debisindeki değişimin tek fazlı ve iki fazlı bölgelerden sürekli yayılımını dikkate almalıdır. (Bergles 1976; Rızwan-Uddin 1994).

Sürekli matematik model: Bu model YDO'nun fiziksel mekanizmalarını yukarıda açıklayan teorileri tamamlamak için geliştirilmiştir. Bu modele göre i- hareket eden yoğunluk dalgaları osilasyonlar esnasında önemli rol oynamazlar ve osilasyonlar çok zayıf hareket eden dalgalarla da oluşabilir; ii- osilasyon periyotları ortalama kanal geçiş süresinin 3-4 katı arasında değişmektedir; iii- Genel olarak kanal basınç düşümü karakteristiklerini belirlemede karışım hızındaki değişim karışım yoğunluğundaki değişimden daha önemli rol oynar (Rızwan-uddin 1994; Achard *et al.* 1985).

Çizelge 2.4'de çeşitli parametrelerin yoğunluk değişim osilasyonlarına etkisi özet olarak verilmiştir. Çizelgede artar terimi kararlılığın arttığı, azalır terimi ise kararlılığın azaldığı anlamına gelmektedir.

Çizelge 2.4. Çeşitli parametrelerin dinamik iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi (Wedekind 1971; Boure *et al.* 1973; Bergles 1976; Kakaç *et al.* 1990; Padki *et al.* 1991; Ding *et al.* 1995)

	Kararsızlık Tipi		
	Basınç Düşümü Osilasyonları	Yoğunluk Değişimi Osilasyonları	Termal Osilasyonlar
Isıtıcı gücünde artış	Azalır	Azalır	Azalır
Çıkış basınç düşümünde artış	Azalır	Azalır	Azalır
Giriş basınç düşümünde artış	Artar	Artar	Artar
Sistem Basıncında Artış	Artar	Artar	Artar
Giriş aşırı soğutmasında artış	Artar	Artar (yüksek ve orta aşırı soğutmalarda)	Artar
Kütlesel debide artış	Artar	Artar	Artar
Ortalama yoğunluk oranında artış	Azalır	Azalır	Azalır
Isıtılan uzunlukta artış	Azalır	Azalır	Azalır
Osilasyon periyodu	Orta seviye	En küçük	En büyük

2.3.2.2. Basınç düşümü osilasyonları

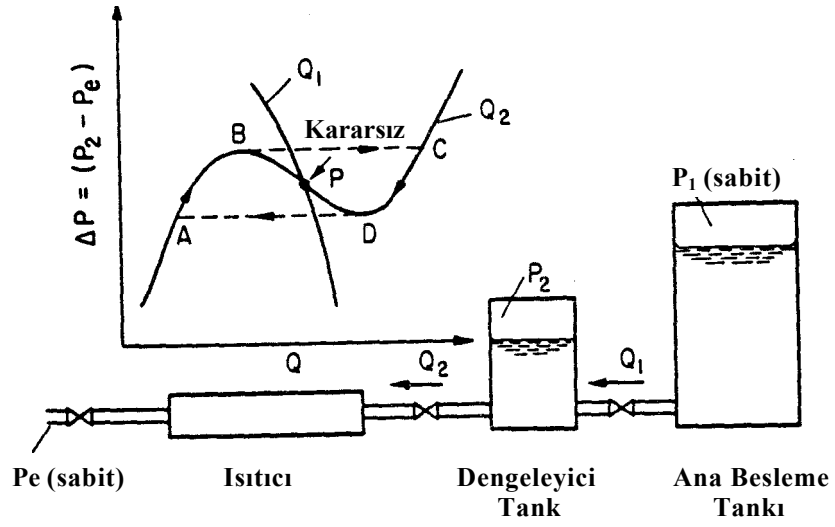
İkinci önemli dinamik iki fazlı akış kararsızlığı basınç düşümü tip osilasyonlarıdır (BDO). Basınç düşümü osilasyonları ismi en yaygın kullanılan isimdir ve Stenning and

Veziroğlu (1965) tarafından önerilmiştir. BDO'nun oluşması için akış ortamında sıkıştırılabilir hacim gereklidir. Bu nedenle bu tip osilasyonlar ısıtılan kanalın üst tarafında veya kanalın içinde sıkıştırılabilir hacme sahip olan sistemlerde oluşurlar. Bu osilasyonlar genellikle kanal boyunca olan basınç düşümünün debinin artmasıyla azaldığı bölgede başka bir deyişle kararlı durum karakteristik eğrisinin negatif eğimli bölgesinde oluşmaktadırlar (Widmann 1993).

Sıkıştırılabilir hacim, bir dengeleyici tank kullanılarak ısıtılan kanalın dış tarafında olabildiği gibi (Stenning and Veziroğlu 1965), uzun test bölümlerinin ($L/d > 150$) iç sıkıştırılabilirliği ile de sağlanabilir (Maulbetsch and Griffith 1966). Eğer test kısmı çok uzunsa, buradaki iç sıkıştırılabilirlik BDO tip osilasyonlarının oluşmasına yeterli olabilir. Fakat iç sıkıştırılabilir hacim durumunda büyük olsa bile iç kısıtlayıcı sistemi kararlı hale getirmeyecektir (Ding 1993). Eğer iç sıkıştırılabilirlik yeterli değilse sıkıştırılabilir hacim test kısmının önüne yerleştirilen bir dengeleyici tank ile sağlanır (Guo *et al.* 2001). Dış sıkıştırılabilir hacim kullanılması durumunda, test bölümü ve sıkıştırılabilir hacim arasındaki bir kısma valfi sistemi kararlı hale getirmek için kullanılabilir (Veziroğlu and Kakaç 1983). BDO tip osilasyonlar, uzun osilasyon periyoduna ve daima yüksek osilasyon genliğine sahip olan ve aşırı cidar sıcaklık yükselmesinin eşlik ettiği osilasyonlardır. Bu nedenle buhar üretiminin olduğu sistemlerde bu tip osilasyonların oluşmasını engelleme cihazın güvenlik içinde çalışması için çok önemlidir.

BDO tip osilasyonların periyotları genellikle YDO tip osilasyonların periyotlarından daha büyüktür. Bu osilasyonların periyotları sıkıştırılabilir hacmin miktarıyla ilgili bir sabit olan zaman aralığı ile belirlenir. BDO tip osilasyonların periyotları şu parametrelere bağlıdır:

- (a)- Sistemdeki buharın hacmine
- (b)- Sistemdeki buharın sıkıştırılabilirliğine
- (c)- Dengeleyici tank tarafından test kısmının ön tarafında oluşturulan sıkıştırılabilirliğe



Şekil 2.7. Basınç düşümü tipi osilasyonların şematik olarak gösterilişi

BDO tipi osilasyonların mekanizmalarının şematik olarak gösterildiği Şekil 2.7'deki sisteme uygun olan kararlı durum için basınç düşümünü ifade eden bağıntılar şöyle yazılabilir:

$$(P_a - P_s)_s = K_1 \dot{m}_1^2 \quad (2.9)$$

$$(P_s - P_\zeta)_s = f(\dot{m}_2) \quad (2.10)$$

Burada P_a ve P_ζ 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 sistem basınç düşümünü ısıtıcı test borusu giriş debisi $\dot{m}_2$ 'ye ilişkilendiren bir fonksiyonu göstermektedir. Herhangi bir kararlı durum çalışma noktası (P) için $\dot{m} = \dot{m}_1 = \dot{m}_2$ olması gerekmektedir (Widmann 1993). Şekil 2.7'den de görülebileceği gibi sabit P_a ve P_ζ değerleri için iki adet $P_s - \dot{m}$ eğrisi çizilebilir. Bu eğrilerden birisi P_s 'yi $\dot{m}_1$ 'in fonksiyonu olarak göstermektedir. Bu iki faktör arasındaki bağıntı (1)

denklemleriyle verilmektedir ve bu bağıntıya “dış karakteristikler” adı verilmektedir. Diğer eğri ise P_s 'yi $\dot{m}_2$ 'nin fonksiyonu olarak göstermektedir. (2) denklemleriyle ifade edilen bu ilişki “iç karakteristikler” olarak adlandırılmaktadır. Şayet bu iki eğri $d(P_s - P_c)/d\dot{m}_2 < 0$ olan bir bölgede kesişirlerse (Şekil 2.7’de bu kesişim noktası P ile gösterilmiştir) P_s 'deki küçük bir artış $\dot{m}_2$ 'nin $\dot{m}_1$ 'den daha fazla azalmasına neden olacaktır. Bu da dengeleyici tankta sıvı birikimine neden olacak ve bunun sonucunda P_s basıncı daha da artacaktır. Bu yüzden çalışma noktası B noktasına ulaşıncaya kadar $\dot{m}_2$ eğrisi boyunca hareket eder. Bu proses, dengeleyici tank giriş ve çıkış debileri arasındaki dengesizlik nedeniyle B noktasında durmayacak ve çalışma noktasını C 'ye götüren bir akış gezintisi meydana gelecektir. C noktasında $\dot{m}_2$ debisi $\dot{m}_1$ 'den daha büyüktür ve dengeleyici tanktaki sıvı seviyesi düşer. Dengeleyici tanktaki azot-buhar karışımının basıncının azalmasından dolayı P_2 basıncı azalır ve çalışma noktası eğri boyunca C 'den D 'ye hareket eder. D noktasında başka bir akış gezintisinden dolayı çalışma noktası A 'ya doğru hareket eder ve proses ABCDA limit çevrimi boyunca tekrarlanır. Bu model BDO tipi osilasyonları genel olarak açıklar ve bu osilasyonların periyotlarının belirlenmesinde iyi sonuçlar verir (Widmann 1993).

2.3.2.3. Termal osilasyonlar

YDO, BDO ve akustik tip osilasyonlar dinamik iki fazlı akış kararsızlıklarının en yaygın olan tipleridir. Bununla birlikte iki fazlı akış sistemleri ile ilgili daha birçok akış kararsızlıkları vardır. Bunlardan bir tanesi Stenning and Veziroğlu (1965) ve Veziroğlu and Kakaç (1980) tarafından tanımlanan termal osilasyonlardır. Termal osilasyonlar bileşik dinamik kararsızlıklardır ve sıvı filminin kararsızlığı ile ilgilidir. Isıtıcı cidar sıcaklığında büyük sıcaklık dalgalanmaları oluştururlar. Belirli bir noktada akış, film kaynaması ile geçiş kaynaması arasında osilasyon yapar ve böylece büyük genlikli termal osilasyonlar meydana gelir (Ding, 1993). Termal osilasyonlarını başlatmak için YDO tipi osilasyonlar gereklidir. İki fazlı akış sistemlerinde termal osilasyonlar çeşitli nedenlerle istenmezler (Boure et al. 1973; Bergles 1976; Kakaç 1994):

1. Elemanların zorlanmış mekanik titreşimine neden olabilirler.

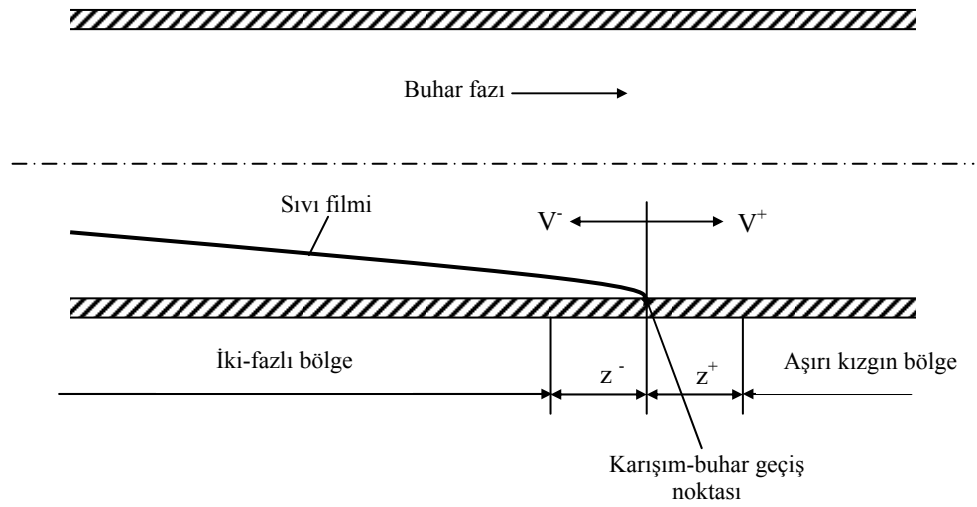
2. Yerel ısı transfer karakteristiklerini etkileyebilirler ve kaynama krizine (kritik ısı akısı, DNB, dryout) oluşturabilirler.
3. Cidar sıcaklığının sürekli çevriminin neden olduğu ısı yorulma oluşturabilirler.
4. Sistem kontrol problemlerine ve cidar sıcaklık artışının neden olduğu boru arızasına yol açabilirler.

Bu nedenlerle termal kararsızlıkları önleme veya kontrol etme amacıyla etkin yöntemler geliştirme iki fazlı akış içeren çoğu endüstriyel sistemlerin dizaynı ve çalışması için büyük önem arz etmektedir.

Termal osilasyonlar genel olarak iki türlü tanımlanmaktadır (Wedekind 1971; Boure *et al.* 1973; Bergles 1976; Kakaç *et al.* 1990; Padki *et al.* 1991; Ding *et al.* 1995):

1. Diğer osilasyonlar ile birlikte ortaya çıkan termal osilasyonlar: Bu osilasyonlar, bağımsız olarak üretilmezler, BDO tip veya YDO tip osilasyonların yan ürünüdürler ve cidar sıcaklığının bu osilasyonlara cevabı olarak ortaya çıkarlar.
2. Bağımsız termal osilasyonlar: Bu osilasyonlar bağımsız olarak ortaya çıkan dinamik osilasyonlardandır. Çok küçük debiler hariç BDO tip ve YDO tip osilasyonlar esnasında alt cidar daima bir sıvı tabakası tarafından ıslatılmaktadır. Bu, kütesel debi alt cidar boyunca kanalın tümünün sıvı fazıyla temas etmesini sağlayacak kadar yeterli olduğundan kanalın içerisinde akışkanın tümüyle buharlaşmadığı anlamına gelir. Ancak debi çok küçük değerlere düştüğünde, kanala giren sıvı üst cidar civarında tümüyle buharlaşmakta, alt cidardaki sıvı ise kanalın çıkışına doğru tümüyle buharlaşmaktadır. İki fazlı bölge sıvı ve buhar karışımından oluşurken kızgın buhar bölgesi sadece saf buhardan oluşmaktadır. Evaporatörde sıvının son buharlaştığı eksenel pozisyon “karışım-buhar geçiş noktası” olarak adlandırılır. Bu nokta iki fazlı bölge ile kızgın buhar bölgesi arasındaki sınırı gösterir (Şekil 2.8). Akış bu noktada film kaynaması ile geçiş kaynaması arasında osilasyon yaptığından karışım buhar geçiş noktası osilasyon yapar ve böylece büyük genlikli osilasyonlar üretir. Bu osilasyonlar kuruma ve ıslanmanın sonucudur ve sıvı filminin kararsızlığı ile ilişkilidir. Bunlar boru cidar sıcaklıklarında büyük sıcaklık çalkantılarına neden olurlar. Alt cidarda sıcaklığın büyük genliklerle osilasyon yapması ile kendini gösteren bu osilasyon tipine “termal osilasyonlar” adı verilmektedir. Alt cidarda oluşan bu termal osilasyonların nedeni,

akışın belli bir noktada düzensiz olarak geçiş kaynaması ile film kaynaması arasında değişim göstermesinden ve karışım-buhar geçiş noktasının rastgele hareketinden kaynaklanmaktadır. Geçici noktanın bu düzensiz hareketi termal osilasyonların oluşmasında başlıca rolü oynamaktadır. Bunun sonucu olarak sabit ısı akılı sistemlerde cidar sıcaklığı büyük genliklerle osilasyon yapmaktadır. Buna göre aşırı ısınmış bölgede (tam burn-out olayının gerçekleştiği bölge) ve iki-fazlı akış bölgesinde (alt cidar ıslak) termal osilasyon oluşmaz. Widmann (1993) tarafından belirtildiği gibi termal osilasyonlar 3.4-6.8 bar basınç genliğine ve 300°C kadar sıcaklık değişimine neden olabilirler. Özellikle alt cidarda büyük genlikli titreşimlerle kendini gösteren bu tip osilasyonlar burn-out olayına neden olarak boru cidarlarında termal gerilmelerin oluşmasına ve bunun sonucunda boru cidarlarında deformasyonlara sebep olmaktadır.



Şekil 2.8. Termal osilasyonların mekanizması (Chu *et al.* 1978)

Yatay borularda karışım-buhar geçiş noktasının osilasyon hareketi çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan deneysel ve/veya teorik çalışmalarda gözlemlenmiştir (Wedekind and Stoecker 1966; Wedekind 1971; Chu *et al.* 1978; Kakaç *et al.* 1990; Liu *et al.* 1994; Ding *et al.* 1995; Abid *et al.* 2002; etc.). Bu araştırmacılar bağımsız termal osilasyonları çeşitli şekillerde açıklamışlardır. Wedekind (1971) yatay buharlaşan akışta geçiş noktasının zamana bağlı hareketinin fotoğrafını kaydeden bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem kullanılarak boruda en son sıvının buharlaştığı noktanın yeri

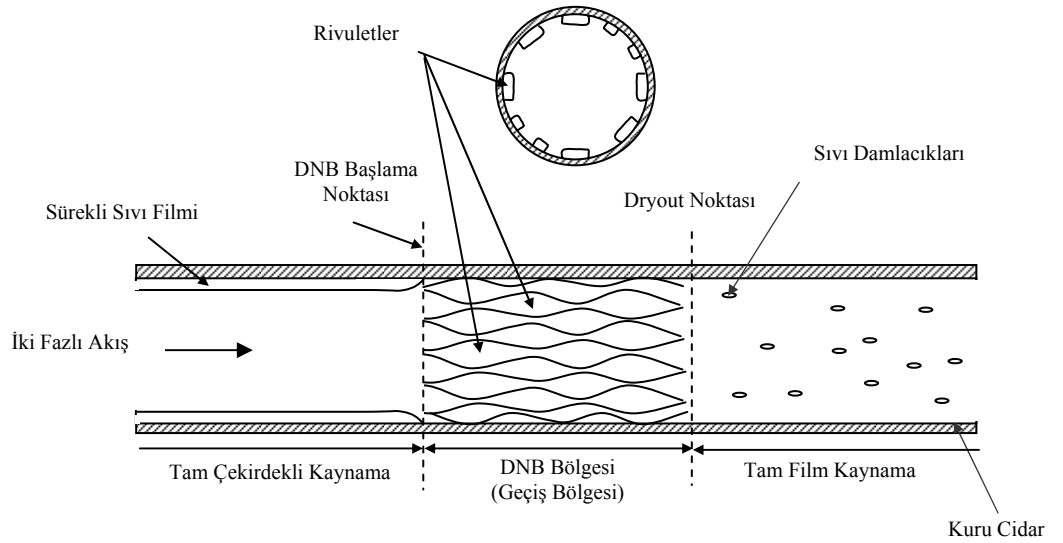
saptanmıştır. Sürekli akış koşullarında karışım-buhar geçiş noktasının hareketinin osilasyonlu bir karaktere sahip olduğunu gözlemlemiştir. Geçiş noktasının osilasyonlarına halkasal akış rejiminde sıvı halka boyunca yayılan sıvı dalgalarının neden olduğunu ve kızgın buhar bölgesine erişen dalgaların ısıtıp, kuruttuğunu ifade etmiştir. Wedekind and Stoecker (1966) plaj yüzeyine gelen göl yüzey dalgalarının geçiş noktası osilasyonlarıyla ilişkili dalgalara benzediğini söylemişlerdir. Chu et al. (1978) evaporatör boruları için DNB osilasyon sıcaklığını ve ısıl gerilmesini karakterize etmek için kullanılacak bir ıslak termal model (rivulet thermal model) önermişlerdir (Şekil 2.9). Bu modele göre DNB başlangıç noktasının önündeki akış dağılımı halkasal akıştır. Sıvı filmi buharlaştıkça kalınlığı azalır ve DNB bölgesinin başlangıcında film ıslak ve kuru bölgelere dönüşür. Bu geçiş kaynama bölgesinde boru uzunluğu boyunca üç veya dört sıvı parçacıkları teğetsel yönde dönerler ve alternatif olarak boru iç cidarını kurutur ve ısıtırlar. Sıvı parçacıkları buharlaştıktan sonra cidar sıvı damlacıkları içeren buharla kaplanır. Boru cidar yüzeyleri üzerinde sıvı parçacıklarının görünmesi ve kaybolması su parçacıklarının oluşumunun yapısındaki rastgelelik nedeniyle cidar ve kuru cidar arasında osilasyonlara neden olabilir. Bu durum boru cidar sıcaklığının osilasyon yapmasına neden olur.

2.3.2.4. Akustik osilasyonlar

Akustik osilasyonlar iki fazlı karışımın sonik hızında hareket eden basınç çalkantılarıdır. Akustik osilasyonlar uygun geometrik karakteristikler ve sonik hız birleşimine sahip iki fazlı sistemlerde oluşabilir. Tek fazlı gaz akışlarında olduğu gibi bir basınç dalgası devreden akan iki fazlı karışım boyunca yayıldığında organ-pipe tip dalgalar oluşabilir. Bu dalgalar bir alan değişimi veya engele ulaştığında akustik impedansta oluşan değişim ters kutuplu bir basınç dalgasının zıt yönde yayılmasına neden olur. Uyarım frekansı ve devrenin geometrisi uygun koşullarda akustik osilasyonları oluşturabilir. Basınç dalga yayılımının gecikme zamanı ve geri besleme etkileriyle ilişkili olan bu osilasyonlar çok yüksek frekanslıdır (10-100Hz) ve çoğu durumlarda tiz bir ses oluştururlar. Bu dalgaların periyodu, bir basınç dalgasının sistem içinde seyahat etmesi için gerekli zamanla mertebe olarak benzer büyüklüktedir.

Akustik osilasyonların aşırı soğutulmuş kaynamada, bulk kaynamada ve film kaynamada olduğu gözlemlenmiştir. Genellikle oldukça küçük genliklere sahiptirler; fakat basınç düşümü genlikleri kararlı durum değerlerine göre çok daha büyük olabilir ve giriş basınç çalkantıları basınç seviyesinin önemli bir kısmını oluşturabilir. Bu osilasyonlar, basınç düşümü-debi eğrisinin negatif eğimli bölgesinde oluşmaktadır. (Boure et al. 1973; Liu 1993; Anglart 2006). Akustik osilasyonların karakteristikleri şöyle özetlenebilir (Park 2006):

1. İki fazlı akışta akustik dalgalar büyür.
2. Aşırı soğutulmuş akıştaki kaynama, CHF'den daha düşük ısı akılarında doymuş akışlı kaynama ve konvektif film kaynamada oluşur.
3. Akustik osilasyon akış üzerine az bir etkiye sahiptir.
4. Yüksek frekanslı osilasyonlardır (10-100Hz).



Şekil 2.9. Geçiş kaynama modeli (Chu *et al.* 1978)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deney Düzenegi

Bu tezin amacı yatay borulardaki iki fazlı kararlı ve kararsız akış karakteristiklerine; giriş aşırı soğutmasının, ısı akısının, akış debisinin, çıkış kısıtlayıcı elemanın ve boru kanalı içerisine yerleştirilen farklı ısı transfer iyileştirme elemanlarının etkilerini incelemektir. Deneyler iki fazlı akış dinamik kararsızlıklarından basınç düşümü, yoğunluk değişimi ve termal osilasyonları üretebilecek bir deney düzeneginde yapılmıştır. Bu deney düzenegi Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında yaklaşık 10 yıl önce kurulmuş ve akışkan olarak R11 kullanılarak çeşitli deneysel çalışmalar yapılmıştır (Karlı 2000; Karlı vd 2001, 2002; Çomaklı vd 2002, 2004; Yılmaz vd 2001, 2002). İş yapan akışkan olarak su kullanılabilmesi için önceki deney sisteminde aşağıdaki modifikasyonlar yapılmıştır:

1. Daha önceki sistemde test borusu olarak 3195mm uzunluğunda, 13mm iç çapında ve 18 mm dış çapında çekme çelik bir boru kullanılmıştı. Ancak bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda iş yapan akışkan olarak su kullanılacağından ve suyun buharlaşma özgül ısısı daha önceki iş yapan akışkan olan R11'in buharlaşma özgül ısısından çok daha büyük olduğundan elektriksel ızdirenci daha yüksek olan bir test borusu kullanmak gerekmiştir. Bu nedenle test borusu olarak uzunluğu 3030mm, iç çapı 12.7mm ve dış çapı 17mm olan Cr-Ni (paslanmaz çelik 316L) malzemeden yapılmış çekme boru deney düzenegine yeniden uyarlanmıştır.
2. Dengeleyici tankın bulunduğu yerdeki gözetleme camı daha yüksek basınçlara dayanıklı hale getirilmiştir.
3. Suyun buharlaşma ısısı R11'den çok yüksek olduğundan mevcut güç kaynağı yetersiz kalmaktaydı. Bu nedenle yeni bir güç kaynağı (120 000VA DC güç kaynağı) satın alınarak sisteme monte edilmiştir.
4. Daha önceki sistemin ana besleme tankının çalışma basıncı yaklaşık 20 bar idi. Su ile yapılacak çalışmalarda maksimum çalışma basıncı olarak 50 bar olarak düşünüldüğünden, bu çalışma basıncına dayanıklı yeni bir ana besleme tankı satın alınarak sisteme monte edilmiştir.

5. Sisteme giren iş yapan akışkanın debi osilasyonlarını ölçmek için türbin tipi debi ölçer satın alınarak sisteme monte edilmiştir.
6. Termoelemanlardan, basınç transdüserinden ve türbin tipi debi ölçerden alınan bilgilerin bilgisayar ortamında değerlendirilmesi için Advantech PC-LabCard satın alınarak bilgisayara takılmıştır.
7. Ayrıca sistemdeki giriş sıcaklığını değiştiren ısıtıcı, debi ayar vanaları, orifis levhası, kondenser ve boru bağlantı elemanları gibi sistemin birçok elemanı gözden geçirilerek gerekli olanları yenileri ile değiştirilmiş ve bir kısmı da bakımdan geçirilerek çalışır hale getirilmiştir.

Deney düzeneği akışkan besleme bölümü, test bölümü ve akışkan depolama bölümü olmak üzere üç temel bölümden oluşmaktadır (Şekil 3.1).

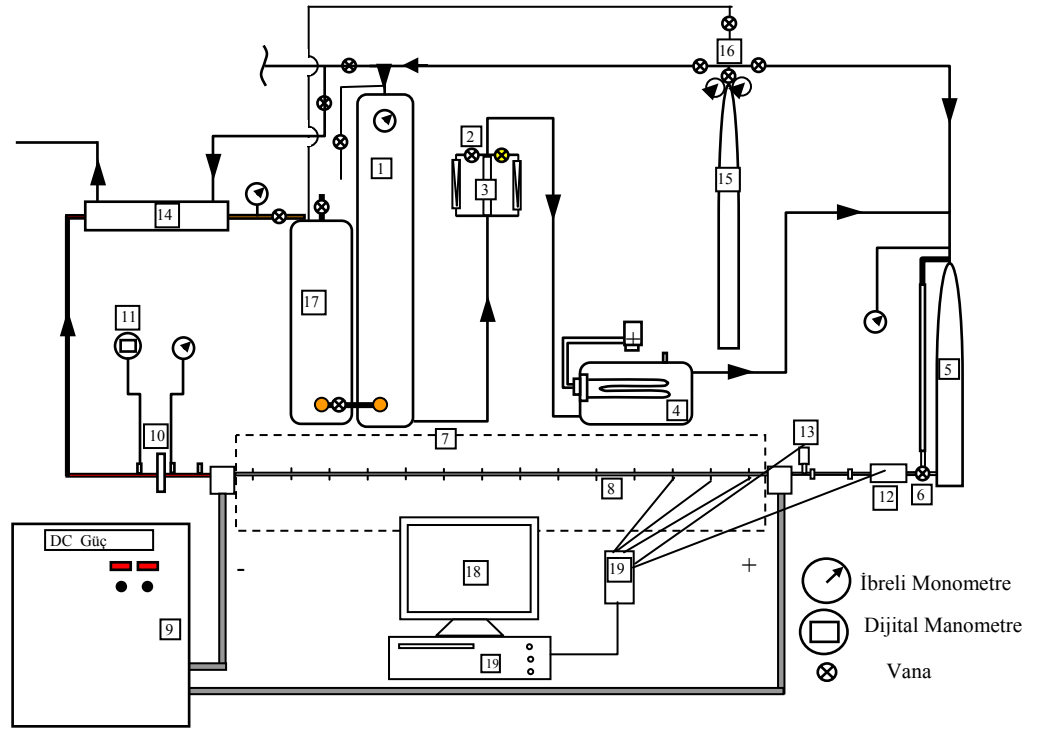
3.1.1. Akışkan Besleme Bölümü

Akışkan besleme bölümü; ana besleme tankı (1), debi ayar vanası (2), iki adet flowmetre (3) ve akışkanın sisteme belli sıcaklıklarda girmesini sağlamak için kullanılan ısıtıcıdan (4) oluşmaktadır. Akışkan besleme bölümü iş yapan akışkan olan suyun test borusuna giriş koşullarına getirilmesini sağlamaktadır.

Ana Besleme Tankı: Ana besleme tankı deneyler süresince kullanılabilecek yeterli miktarda su depolamaktadır. Bu tank 3m yüksekliğinde ve 0.7 m^3 hacminde dikey pozisyonda yerleştirilmiş olan silindirik bir tanktır (Şekil 3.2). Tank paslanmaz çelikten yapılmış olup 50 bar işletme basıncına mukavemet edecek şekilde imal edilmiştir.

Flowmetreler: Akışkanın debisini ölçmek ve ayarlamak amacıyla sistemde iki adet flowmetre kullanılmıştır. İstenen debi ayarı flowmetre üzerinde bulunan kontrol vanası yardımıyla yapılmaktadır. Birinci flowmetrenin debi ölçme aralığı 0-400 l/h, ikinci flowmetrenin debi ölçme aralığı ise 0-1000 l/h arasındadır. Hassas okuma yapmak amacıyla küçük çalışma debilerinde birinci tip flowmetre kullanılarak ölçüm ve ayar

yapılmıştır. Flowmetreler çelik malzemeden yapılmış olup maksimum çalışma basıncı 40 bar ve maksimum çalışma sıcaklığı 100 °C'dir.

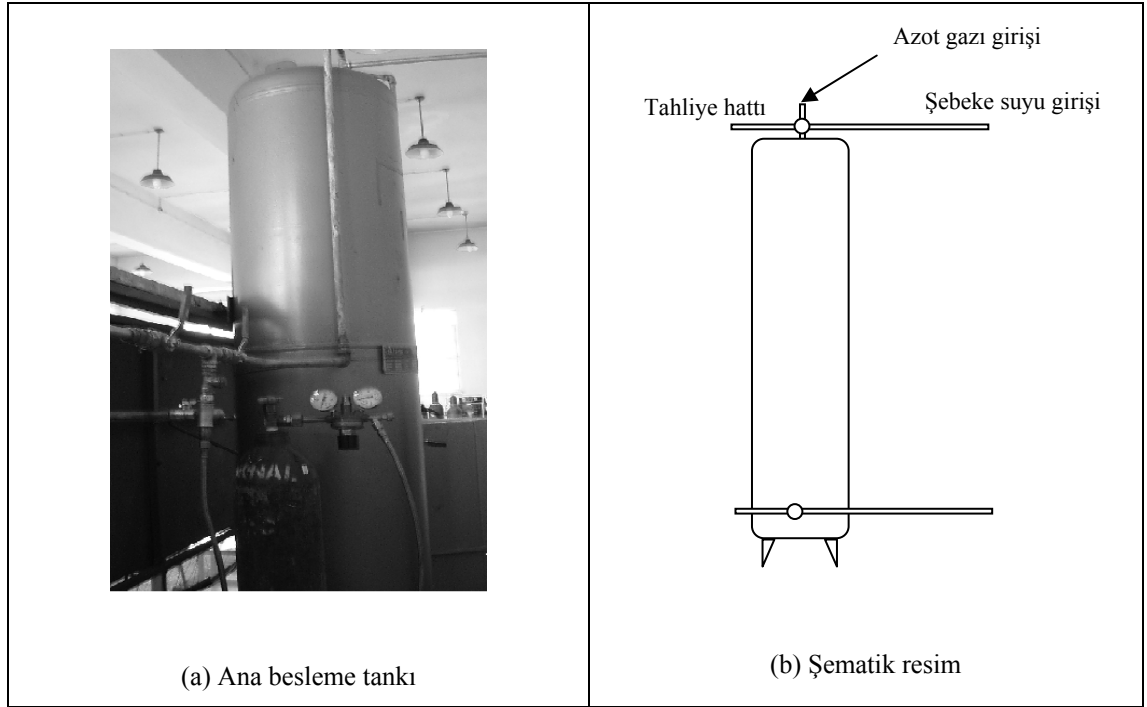


Akışkan Besleme Bölümü	Test Bölümü	Akışkan Çıkış Bölümü
1- Ana besleme tankı	5- Dengeleyici tank	14- Yoğuşturucu
2- Debi ayar vanası	6- Akışkan giriş kontrol vanası	15- Azot tankı
3- Flowmetre (iki adet)	7- Test odası	16- Regülatör
4- Isıtıcı	8- Test borusu	17- Akışkan depolama tankı
	9- DC güç kaynağı	18- Bilgisayar
	10- Orifis	19- Data okuma kartı
	11- Dijital manometre	
	12- Türbin tipi debi ölçer (Debi transdüseri)	
	13- Basınç transdüseri	

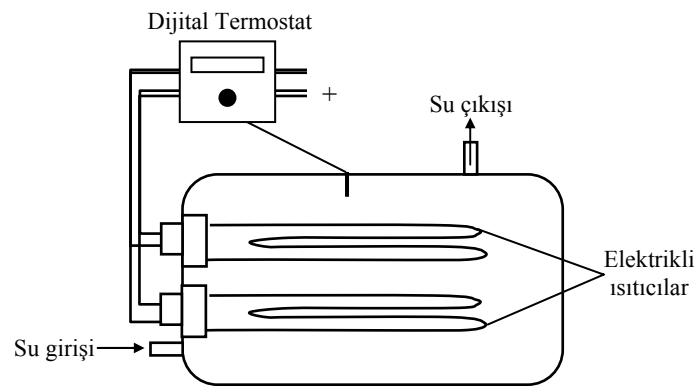
Şekil 3.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü

Elektrikli Isıtıcı: İki fazlı akış çalışmalarında akışkan giriş sıcaklığının büyük önemi vardır. Akışkan besleme bölümünün son elemanı olan elektrikli ısıtıcı suyun test bölümüne istenen sıcaklıkta girmesini sağlamaktadır. Elektrikli ısıtıcı bölümünün dış gövdesi 0.35m çapında ve 0.6m uzunluğunda dikişli siyah boru malzemesinden yatay olarak imal edilmiştir. Dış gövde içerisinde iki adet her biri 4 kW değerinde ısıtıcı

bulunmaktadır (Şekil 3.3). Suyun test borusuna sabit sıcaklıkta girmesini sağlamak amacıyla ısıtıcı dijital termostat ile kontrol edilmiştir.



Şekil 3.2. Ana Besleme Tankı



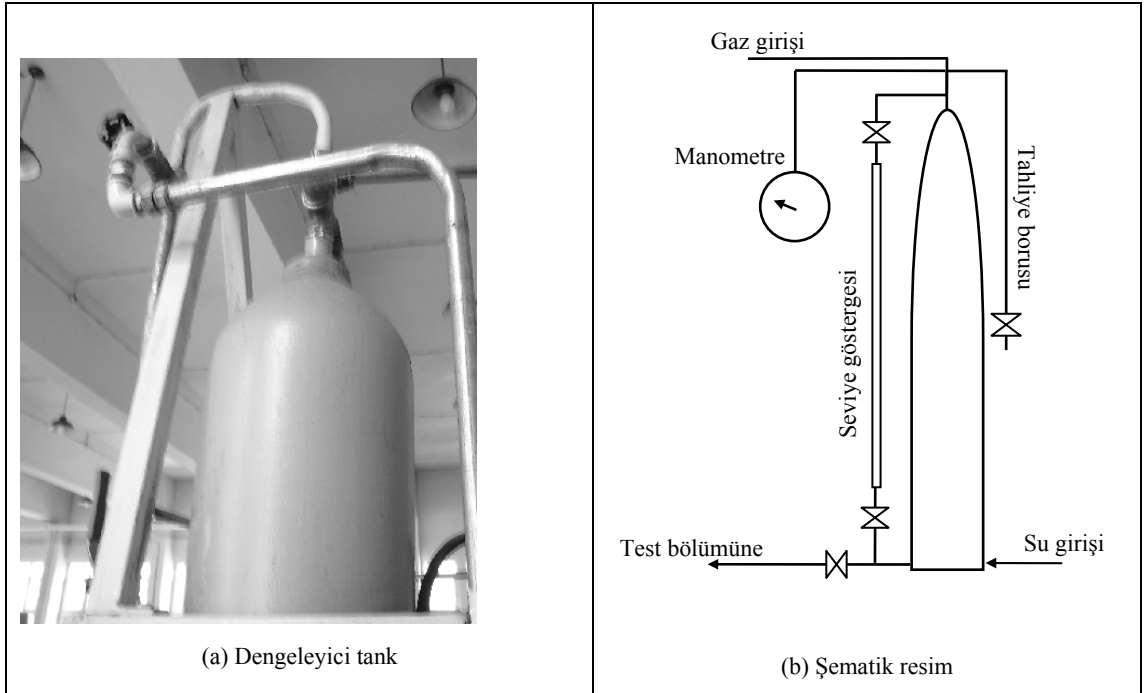
Şekil 3.3. Suyun test borusuna sabit sıcaklıkta girmesini sağlayan düzenek

3.1.2. Test Bölümü

Test bölümü kontrollü kaynama ve iki fazlı akış osilasyonlarının meydana geldiği kısımdır. Test bölümü; dengeleyici tank (5), akışkan giriş kontrol vanası (6), ısıtıcı test borusunun yerleştirildiği test odası (7), test borusu (8), ısıtıcı test borusuna gerekli olan ısı gücünü temin eden bir DC güç kaynağı (9), test bölümü çıkışında kısıtlama görevi yapan bir orifis (10), dijital manometre (11), türbin tipi debi ölçer (12) ve basınç transdüserinden (13) oluşmaktadır.

Dengeleyici tank: 0.05 m^3 hacminde olan dengeleyici tank test borusu boyunca oluşacak iki fazlı akış kararsızlıklarını incelemek için gerekli olan sıkıştırılabilir hacmi sağlamaktadır. Dengeleyici tanka, içindeki iş yapan akışkan ve sıkıştırılabilir hacim seviyelerinde oluşacak değişimleri gözlemleyebilmek amacıyla 30 bar basınca dayanıklı ve şeffaf plastik malzemeden yapılmış seviye göstergesinin yanı sıra dengeleyici tank basıncını gösteren bir manometre monte edilmiştir (Şekil 3.4).

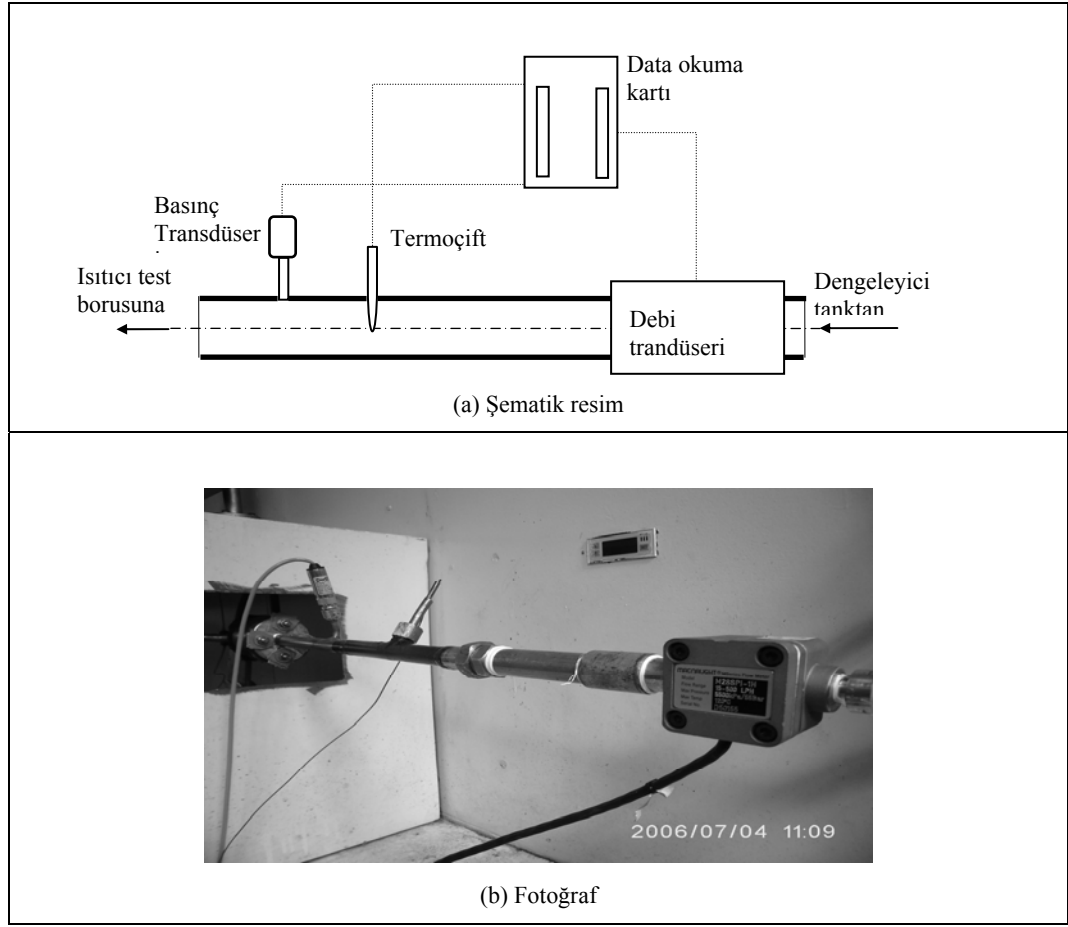
Dengeleyici Tank ile Test Borusu Arasındaki Kısım: Dengeleyici tank ile test borusu arasında türbin tipi debi ölçer, Bourdon tipi manometre, basınç transdüseri ve sıcaklık ölçüm elemanı bulunmaktadır (Şekil 3.5). Türbin tipi debi ölçer su debisinde oluşan osilasyonları, Bourdon tipi manometre suyun test borusuna girişteki basıncını ve basınç transdüseri test borusuna girişteki su basıncında oluşan osilasyonları ölçmek amacıyla kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan kütleli debi değerleri 25 – 140 g/s arasında değişmiştir. İş yapan akışkanın giriş sıcaklığı test bölümüne girmeden önce T tipi termoeleman ile ölçülmüştür.



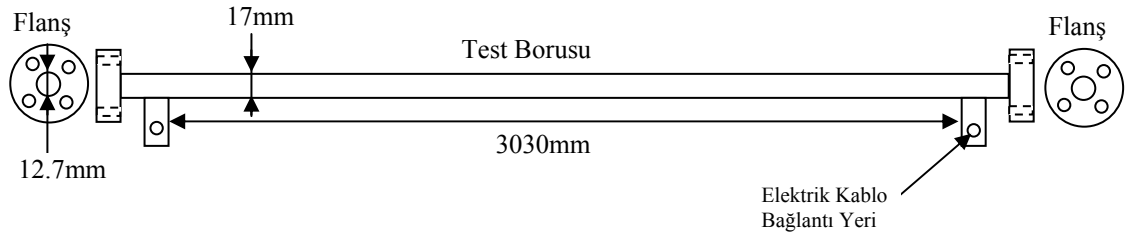
Şekil 3.4. Dengeleyici Tank

DC Güç Kaynağı: Gerekli ısı gücü, borunun her iki ucuna DC güç kaynağının pozitif (+) ve negatif (-) uçları bağlanarak temin edilmiştir (Şekil 3.9). Test borusunun her iki ucunu sistemin diğer kısımlarından elektriksel olarak izole etmek amacıyla yüksek sıcaklığa dayanıklı klindirlik conta kullanılmış ve ayrıca vida bağlantılarına porselen halka geçirilmiştir. Isıtıcı test borusuna verilen ısı gücü değerleri DC güç kaynağının üzerinde bulunan dijital volt ve akım göstergelerinden okunmuştur. Deney sisteminde kullanılan DC güç kaynağı yaklaşık 40 kW güç kapasitesindedir.

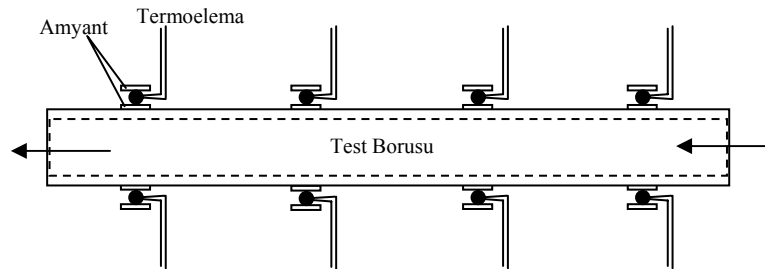
Orifis Levhası: Akış osilasyonları üzerine çıkış kısıtlayıcısının etkilerini belirlemek ve istenen basınç düşümünü sağlamak amacıyla test borusu çıkışına bir orifis levhası monte edilmiştir. Orifis levhasının giriş tarafındaki basınç Bourdon-tipi manometre, çıkış tarafındaki basınç ise bourdon-tipi dijital manometre ile ölçülmüştür (Şekil 3.10). Deneylerde orifis çapının boru çapına oranı (β) 0.25 ve 0.45 olarak alınmıştır.



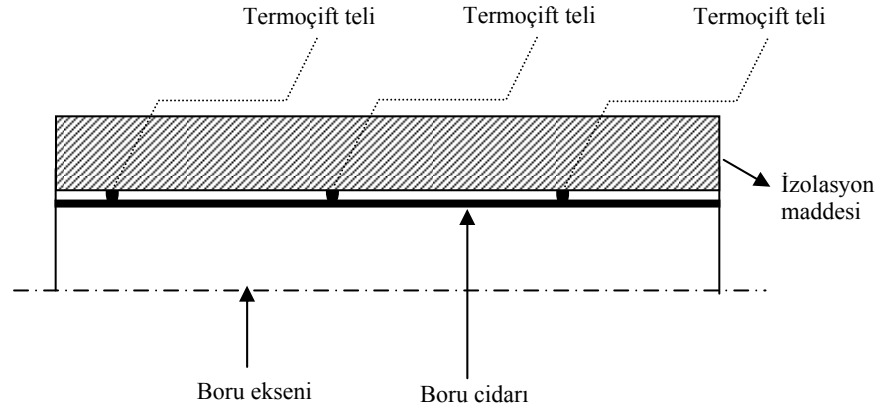
Şekil 3.5. Deney düzeneğinin dengeleyici tank ile test borusu arasındaki kısmı



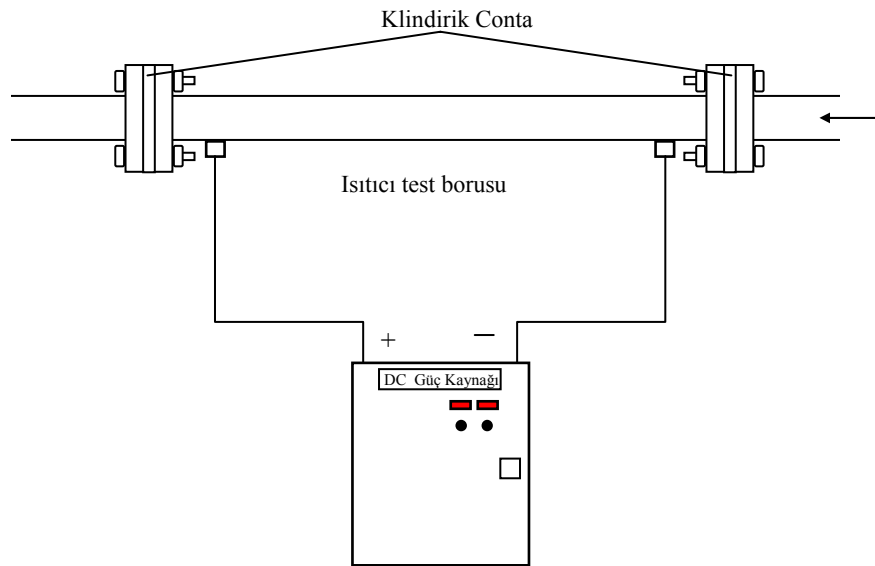
Şekil 3.6. Test Borusu ve Bağlantı Flanşları



Şekil 3.7. Termoeleman bağlantı şekilleri



Şekil 3.8. Test borusu izolasyon tabakasının ve termoeleman uçlarının şematik gösterimi

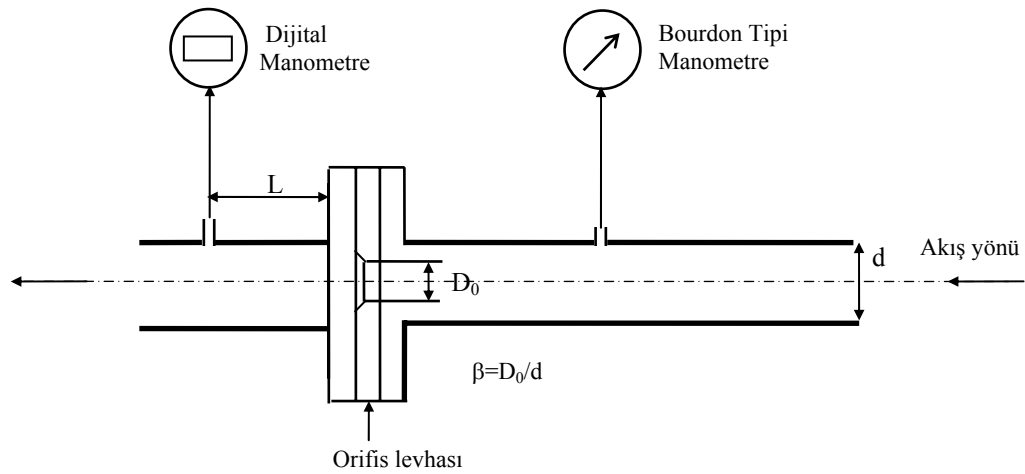


Şekil 3.9. Test borusu elektriksel bağlantısı

3.1.3. Akışkan Depolama Bölümü

İş yapan akışkan olan su test bölümünden sonra depolama bölümüne gelir. Depolama bölümünün görevi test borusundan genellikle buhar fazında çıkan suyun deneysel çalışma başlangıç şartlarına getirilmesi amacıyla soğutulması ve depolanmasını

sağlamaktır. Akışkan depolama bölümü; yoğuşturucu (14), azot tankı (15), regülatör (16) ve akışkan depolama tankından (17) oluşmaktadır. Test bölümü çıkışında hemen hemen tamamı buhar fazında olan iş yapan akışkan su soğutmalı yoğuşturucudan geçirilerek yoğuşturulur. Yoğuşturulan su sıvı fazda depolama tankına sevk edilir. Bu tankta depolanan su azot gazı yardımıyla tekrar basınçlandırılarak ana besleme tankına sevk edilir. Bundan sonra iş yapan akışkan olan suyun sistemdeki çevrimsel sirkülasyonu aynı şekilde tekrarlanarak devam eder.

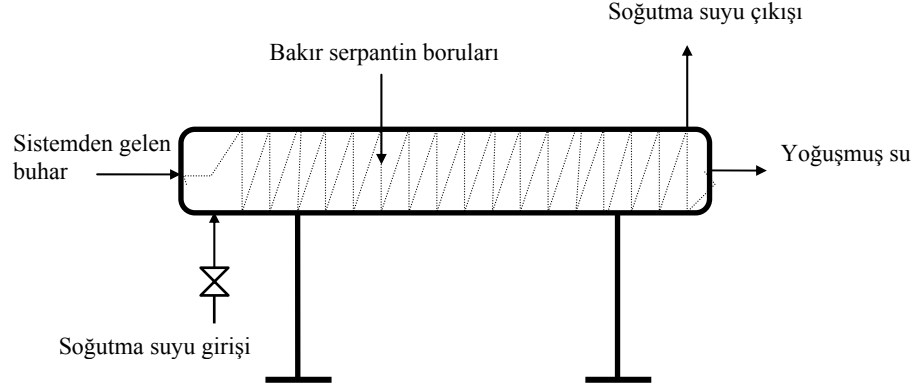


Şekil 3.10. Çıkış kısıtlayıcısının şematik gösterimi

Yoğuşturucu: Akışkanı buhar fazından sıvı fazına geçirmek için kullanılan yoğuşturucu yatay gövde-boru tipi bir ısı değiştiricidir. Yoğuşturucunun dış gövdesi 0.16 m çap ve 1.45 m uzunluğunda dikişli siyah boru malzemesinden imal edilmiştir. Test çıkışında istenilen sıvı fazını sağlamak amacıyla yoğuşturucu içerisindeki 0.02m çapa sahip bakır borunun dışından soğutma suyu geçmekte, spiral olarak yerleştirilen bakır borunun içerisinden ise iş yapan akışkan geçmektedir (Şekil 3.11).

Depolama Tankı: Yoğuşturucuda sıvı hale gelen akışkan sıvı fazda depolama tankına sevk edilir. Depolama tankı 0.75 m çapında, 1.75 m boyunda ve 1 cm cidar kalınlığına sahip normal düz siyah sac malzemesinden silindirik olarak imal edilmiş ve dikey

pozisyonda yerleştirilmiştir. Depolama tankındaki sıvı fazdaki su ana besleme tankına yüksek basınçlı azot gazı kullanılarak gönderilmektedir.



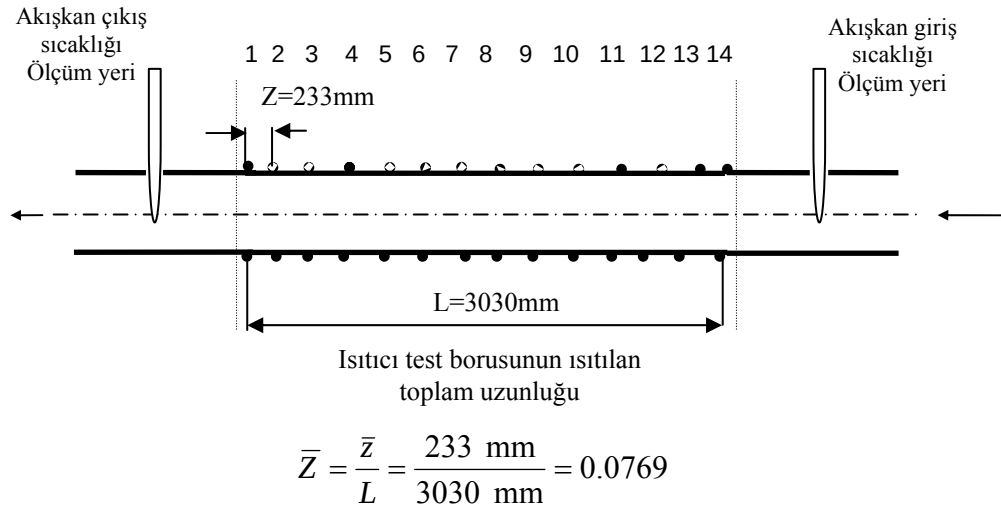
Şekil 3.11. Yoğuşturucu

3.2. Ölçümler ve Belirsizlik Analizi

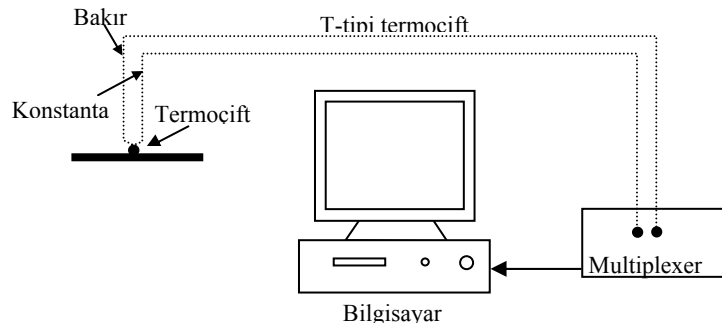
3.2.1. Sıcaklık ölçümleri

Deney düzeneğinde toplam 30 ölçüm yerinde 0.25mm çapında T tipi bakır-konstantan termoçiftleri kullanılarak sıcaklıklar ölçülmüştür. Bu termoelemanlar vasıtasıyla alınan sıcaklık okuma hatası $\pm \% 0.5^{\circ}\text{C}$ civarındadır. Akışkanın test borusuna giriş ve çıkıştaki sıcaklıklarının ölçümü için 5mm çapında bir ucu kapalı ince bakır boru içerisine yerleştirilen termoelemanlar kullanılmış ve bakır boru test borusunun giriş ve çıkışında boru içerisine daldırılarak sıcaklıklar ölçülmüştür. İki fazlı akış rejimlerini ve akış osilasyonlarını belirlemek amacıyla kullanılan termoçiftler ise termoeleman uçlarının test borusu cidarının dış yüzeyine tespit edilmesi yoluyla ölçülmüştür. Test borusu yüzey sıcaklıkları eşit aralıklarla 14 tanesi üst cidar boyunca diğer 14 tanesi de alt cidar boyunca olmak üzere toplam 28 termoeleman çifti kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 3.12). Test borusu direkt olarak elektrikle ısıtıldığından elektriksel gürültü etkisini ortadan kaldırmak amacıyla termoeleman çiftlerinin uçları elektriksel olarak yalıtkan fakat termal iletkenliği iyi olan amiyant levhalar arasına yerleştirilmiştir. Termoelemanlar ve basınç/debi transdüserlerinden alınan sinyallerin okunabilmesi ve değerlendirilmesi

amacıyla analog/dijital Advantec Data Okuma kartı kullanılmıştır. Şekil 3.13 termociftlerin data okuma kartına bağlantısını şematik olarak göstermektedir. Termoelemanların bakır ucu kartta bulunan herhangi bir kanalın pozitif ucuna, konstantan ucu ise negatif ucuna 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 $\pm \%0,5^{\circ}\text{C}$ arasında değişmektedir.



Şekil 3.12. Test borusu cidar sıcaklığı ölçüm noktaları



Şekil 3.13. Termociftlerin data okuma kartına bağlantısının şematik gösterimi

3.2.2. Basınç ölçümleri

Deney düzeneğinde ana tank, dengeleyici tank, azot tankı, test borusu girişi ve orifisden önce ve orifisden sonraki basınçlar ölçülmüştür. Ana tank, dengeleyici tank, azot tankı ve orifisin girişindeki basınçlar analog Bourdon tipi manometreler kullanılarak ölçülmüştür. Bourdon tipi manometreler 0-100 bar arasındaki basınçları okuyabilmektedir. Skala üzerinde 0.5 bar'lık basınç okunabilmektedir. Orifisin çıkışındaki basınç ise dijital bir manometre kullanılarak ölçülmüştür. Analog manometrelerde okunan basınç değerlerindeki toplam hata oranı $\pm\%0.1$ bar düzeyindedir. Test borusu girişinde ise giriş basıncını ve giriş basıncında oluşacak osilasyonları ölçmek amacıyla basınç transdüseri kullanılmıştır. Bu basınç transdüserinden alınan 4-20 mA seviyesindeki analog sinyaller data okuma kartıyla işlenmiştir (Şekil 3.5). Transdüseri elektriksel olarak beslemek için DC güç kaynağı kullanılmıştır. Basınç transdüserinden alınan datalardaki toplam hata oranı $\pm\%0.1$ düzeyindedir.

3.2.3. Debi ölçümleri

Kütleli debi akış rejimlerinin, kararlılık sınırlarının ve osilasyon tiplerinin belirlenmesinde kullanıldığından çok hassas olarak ölçülmesi gerekmektedir. Akışkanın debisini ölçmek ve ayarlamak amacıyla sistemde iki adet flowmetre kullanılmıştır. Bu flowmetrelerden birisinin ölçüm aralığı 0-400 l/h, diğerinin ölçüm aralığı ise 0-1000 l/h'dir. İstenen debi ayarı flowmetre üzerinde bulunan kontrol vanası yardımıyla yapılmaktadır. Bu flowmetreler kullanılarak bulunan kütleli debi değerlerindeki toplam hata oranı $\pm\%0.4$ civarındadır. Deneysel çalışmalar boyunca kullanılan maksimum ve minimum debi değerleri 25–140 g/s arasında değişmiştir. Sistemde oluşan debi osilasyonlarını ölçmek amacıyla türbin tipi debi ölçer kullanılmıştır (Şekil 3.5). Debi ölçer deney sisteminde dengeleyici tank ile test borusu arasına monte edilmiştir. Bu transdüserin teknik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Debi ölçerden alınan veri okumalarındaki toplam hata oranı $\pm\%0.05$ 'dir.

Çizelge 3.1. Türbin tipi debi ölçerin teknik özellikleri

Parametre	Değer
Akış Debisi	15-500 l/h
Doğruluk	±%1
Maksimum viskozite	1000 centipoise
Maksimum çalışma basıncı	500 kPa/
Maksimum çalışma sıcaklığı	80°C
Pulse tipi	Hall effect sensör/reed switch
Pulse/Litre	400
Çıkış sinyali	4-20 mA
Boyut	50mm*50mm

3.2.4. Isı gücü ölçümleri

Her bir deneysel adımda kullanılan güç değeri DC güç kaynağının üzerinde bulunan ayar düğmesiyle yapılmıştır. Test borusuna verilen ısı gücü değerleri DC güç kaynağının üzerinde bulunan dijital volt ve akım göstergelerinden okunmuştur. Deney sisteminde kullanılan DC güç kaynağı yaklaşık 40 kW güç kapasitesindedir. Yapılan hata analizi sonucu elektriksel güç değerlerinin ölçülmesinde ortaya çıkan toplam hata oranının $\pm \% 0.2$ düzeyinde olduğu bulunmuştur.

3.2.5. Osilasyon periyotlarının tesbiti

Oluşan osilasyonların periyotlarının tesbiti Hızlı Fourier Dönüşümü metodu ile yapılmıştır.

Bu dönüşüm, zaman uzayında gözlenen bir olayın fourier dönüşümü olayın 1/zaman, yani frekans uzayında gözlemlenmesini sağlar. Bütün uzayda tanımlı bir $f(t)$ fonksiyonunun w uzayında fourier dönüşümü

$$F(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-iwt} dt \quad \text{ile verilir.} \quad (3.1)$$

Fourier dönüşümü matematik işlemlerin çeşitli çözümlerinde analitik olarak kullanılmaktadır. Fakat bilimsel ve teknolojik uygulamalarda elde edilen ölçüm değeri

bir fonksiyon değil belirli eleman sayısı olan sayısal bir dizidir. Dolayısıyla bu tür sayısal verilerin dönüşümlerinde sayısal olarak alınması gerekir. Sayısal Fourier dönüşümü analitik dönüşümün tüm özelliklerini sağlar. Fourier dönüşümü tanımlarından hareketle

$$F_L = \frac{1}{N} \int_{k=0}^{N-1} f_k e^{-2i\pi k l / N} \quad (3.2)$$

Sayısal fourier dönüşümü için veri sayısında bir sınırlama yoktur. Fourier dönüşümünde dönüşüm periyodik olan sin ve cos fonksiyonlarıyla da yapılıyorsa da her hangi bir veri sayısı (N) için periyodikliği bulmak zor ve problemlidir. Eğer veri sayısı ikinin katları ise, tam, yarım ve çeyrek periyotlarda sin ve cos fonksiyonlarının işaret değiştirerek aynı değerleri tekrarladığı dikkate alınırsa daha az işlemle dönüşüm yapılabileceği gerçeğinden yola çıkılarak hızlı sayısal fourier dönüşüm algoritmaları geliştirilmiştir.

Çalışmalarımızda Matlab’da kullanılan hazır hızlı fourier dönüşümü fonksiyonu kullanılmıştır. (EK1)

3.3. Deneysel Yöntem

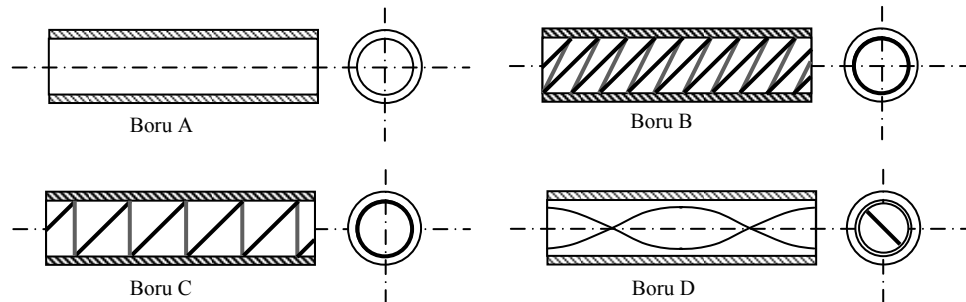
Deneysel çalışmalar kararlı deneyler ve kararsız deneyler olmak üzere iki kategoride yapılmıştır. Kararlı deneylerde kararlı durum karakteristikleri belirlenmiş, kararsız deneylerde ise iki fazlı akış dinamik kararsızlıkları araştırılmıştır. Deneyler 25-140 g/s debi aralığında on farklı debide yapılmıştır. Isıl gücün kararlı ve kararsız durum karakteristiklerine etkisini belirlemek amacıyla deneyler 0, 15, 21, 24 ve 28 kW olmak üzere 5 farklı ısıl güçte yapılmıştır. Giriş aşırı soğutmasının kararlı ve kararsız durum karakteristiklerine etkisini belirlemek amacıyla 15, 25 ve 35°C olmak üzere üç farklı akışkan giriş sıcaklığı kullanılmıştır. Çıkış kısıtlamasının kararlı ve kararsız durum karakteristiklerine etkisini belirlemek amacıyla ise 0.25 ve 0.45 olmak üzere iki farklı çıkış orifis çapı oranı kullanılmıştır. Isı transfer iyileştirmesinin etkisini belirlemek amacıyla 4 farklı ısı transfer yüzey konfigürasyonu kullanılmıştır. Şekil 3.14’de bu ısı

transfer yüzeyleri ve karakteristikleri verilmiştir. Şekil 3.15. ısı transfer iyileştirme elemanlarının fotoğrafını göstermektedir. A borusu boş boru, B ve C borusu farklı adımlara sahip yay elemanları içeren borular, D borusu ise bükülmüş şerit içeren borudur.

Şekil 3.14’de de gösterildiği gibi ısı transfer yüzeyleri efektif çapla karakterize edilmektedir. Efektif çap aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$d_e = \sqrt{\frac{4V'}{\pi L}} \quad (3.1)$$

Burada V' boru net iç hacmini ve L boru uzunluğunu göstermektedir.

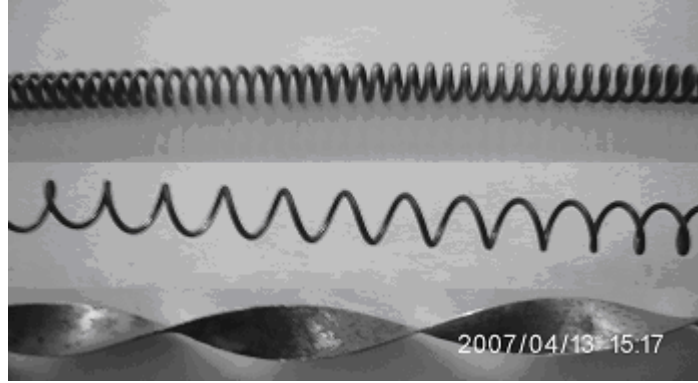


Boru İsmi	Borunun Karakteristiği	De (mm)
Boru A	Boş boru	12,7
Boru B	Tel çapı: 1.8 mm, yay adımı: 3.6 mm olan boru	9,56
Boru C	Tel çapı: 1.8 mm, yay adımı: 11 mm olan boru	12,46
Boru D	Bükülmüş şerit adımı: 140 mm	12,53

Şekil 3.14. Isı transfer yüzey konfigürasyonları ve karakteristikleri

Önce boş boruda deneyler yapılmıştır. İlk deneylerde sisteme ısı gücü verilmemiş ve $p_{\text{sist}} = 7.5 \text{ bar}$, $T_g = 15^\circ \text{C}$ ve $\beta = 0.45$ sabit tutulmuştur. Giriş sıcaklığı artırılarak $T_g = 25^\circ \text{C}$ ve $T_g = 35^\circ \text{C}$ sıcaklıkları için deneyler yapılmıştır. Ardından sırasıyla ısı gücü $\dot{Q} = 15 \text{ kW}$, $\dot{Q} = 21 \text{ kW}$, $\dot{Q} = 24 \text{ kW}$ ve $\dot{Q} = 28 \text{ kW}$ için aynı koşullardaki deneyler yapılmıştır. Bunun ardından çıkış orifisi değiştirilerek yani $\beta = 0.25$ orifisi takılarak

gerekli deneyler yapılmıştır. Kararlı durum karakteristiklerini bulmak için yapılan bu deneyler tamamlandıktan sonra aynı deneysel parametreler kullanılarak kararsız deneyler yapılmıştır. Boş boru deneyleri bittikten sonra sırasıyla B, C ve D borularına ait deneyler yapılmıştır.



Şekil 3.15. Isı transfer iyileştirme elemanları

Her bir deneyde aşağıda belirtilen parametreler ölçülmüştür:

1. Test borusu yüzey sıcaklığı (14 alt, 14 üstten olmak üzere 28 adet)
2. Akışkanın test borusuna giriş ve çıkış sıcaklıkları
3. Akışkanın test borusuna giriş ve çıkışındaki statik basınç
4. Test borusu girişindeki debi
5. Test borusu girişindeki debi osilasyonları
6. Test borusu girişindeki basınç osilasyonları
7. Orifisin girişindeki ve çıkışındaki basınç

3.3.1. Kararlı Durum Karakteristiklerinin Belirlenmesi Deneyleri

Kararlı durum deneyleri kararlı durum karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Kararlı durum karakteristikleri basınç düşümünün debiyle değişimini gösteren $\Delta p - \dot{m}$ grafikleriyle gösterilmektedir. Buradaki basınç düşümü dengeleyici tank basıncı ile orifis plakasından sonraki akışkanın basıncı arasındaki farktır.

Deneylere $\dot{m} = 140 \text{ g/s}$ debisiyle başlanmıştır. Yüksek debilerde akış tek fazlı sıvı akışıdır ve karakteristik eğriyi belirlemek amacıyla debi yaklaşık 10-12 g/s aralıklarla azaltılmıştır. Tümüyle buhar akışının karakteristiğini belirlemek amacıyla debi çok düşük değerlere azaltılmalıdır. Deneylerde en düşük debi değeri 25 g/s olarak alınmıştır. Burnout olasılığı nedeniyle deneylerin tümünde daha düşük debi değerlerine erişilememiştir. Cidar sıcaklıkları ve akışkan çıkış sıcaklığı gözlenerek borunun burnout bölgesine erişip erişmediği kontrol edilmiştir.

Kararlı durum karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılan deneylerde sırasıyla aşağıda belirtilen deneysel çalışma adımları izlenmiştir:

- a. Ana tank azot gazı ile sistem basıncı seviyesine basınçlandırılmış ve sistem basıncı azot tüpü üzerinde bulunan basınç regülâtörü vanası vasıtasıyla ayarlanmıştır.
- b. Kararlı durum çalışmalarında kullanılmayan dengeleyici tankta sıkıştırılabilir hacmin olmaması için dengeleyici tanktaki seviye göstergesi izlenerek bu tank içerisinde bulunan azot gazı tahliye edilmiştir.
- c. Sistemin debisi kontrol vanası kullanılarak deneysel çalışmada tespit edilen en yüksek debi değerine ayarlanmıştır.
- d. Ana tanktan gelen suyun test borusuna giriş sıcaklığına gelmesi için dijital termostat vasıtasıyla belirlenen sıcaklığa ayar yapılmıştır.
- e. İş yapan akışkanın yoğunlaştırıldığı ısı değiştiricinin soğutma suyu açılmıştır.
- f. Sistem çalıştırılmış ve kararlı hale gelmesi beklenmiştir.
- g. Test borusuna gerekli ısı gücünü temin eden ayarlanabilir DC güç kaynağı istenen güç değerine ayarlanarak sisteme ısı verilmiştir.
- h. Sistemin kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Test borusu yüzey sıcaklıklarında 0.5°C 'den daha fazla bir değişim gözlenmediğinde sistemin kararlı hale geldiğine karar verilmiştir.
- i. Sistem kararlı hale ulaştıktan sonra gerekli tüm ölçümler alınmış ve böylece belirlenen debi için deney tamamlanmıştır.
- j. Giriş debisi 25 g/s değerine gelene kadar çeşitli debilerde yeni bir debi değeri için yukarıda anlatılan işlemler tekrar edilmiştir.

3.3.2. Kararsız Durum Karakteristiklerinin Belirlenmesi Deneyleri

Kararsız deneylerde BDO, YDO ve TO gibi iki fazlı akış dinamik kararsızlıkları araştırılmıştır. Bu deneylerin amacı belirli çalışma koşullarında ortaya çıkan kararsızlıkları, sınırlarını ve tiplerini belirlemek ve bunların oluştuğu çalışma koşullarını ve geometrik parametreleri tespit etmektir. Kararsızlıkları elde etmede en önemli koşul sistemdeki sıkıştırılabilir hacimdir. Deney sisteminde sıkıştırılabilir hacim test kısmından önce yerleştirilen dengeleyici tankı basınçlandırarak sağlanmıştır. Dengeleyici tanktaki akışkan seviyesi basınçlı azot gazı kullanılarak belirli seviyede tutulmuştur. Osilasyon genlik ve periyotları, kararsızlık sınırları vb. kararsızlık parametrelerini karşılaştırabilmek amacıyla tüm deneylerde sıkıştırılabilir hacim sabit tutulmuştur. Osilasyonlar esnasında basınç ve kütleli debi değiştiğinden sıkıştırılabilir hacmin büyüklüğü değişmektedir.

Kararsız deneyler yapılırken sırasıyla aşağıda belirtilen deneysel çalışma adımları izlenmiştir:

- a. Ana tank azot gazı ile sistem basıncı seviyesine basınçlandırılmış ve sistem basıncı azot tüpü üzerinde bulunan basınç regülâtör vanası ile ayarlanmıştır.
- b. Osilasyonların karşılaştırılabilmesi için her bir deneyde dengeleyici tanktaki sıkıştırılabilir hacim seviyesinin sabit olması gerekmektedir. Dengeleyici tank azot gazı ile basınçlandırılmış ve tank içerisindeki sıkıştırılabilir hacim şeffaf boru seviye göstergesinden su seviyesi kontrol edilerek ayarlanmıştır.
- c. Sistemin debisi kontrol vanası kullanılarak deneysel çalışmada tespit edilen en yüksek debi değerine ayarlanmıştır.
- d. Ana tanktan gelen suyun test borusuna giriş sıcaklığına gelmesi için dijital termostat vasıtasıyla belirlenen sıcaklığa ayar yapılmıştır.
- e. İş yapan akışkanın yoğunlaştırıldığı ısı değiştiricinin soğutma suyu açılmıştır.
- f. Sistem çalıştırılmış ve kararlı hale gelmesi beklenmiştir.
- g. Test borusuna gerekli ısı gücünü temin eden ayarlanabilir DC güç kaynağı istenen güç değerine ayarlanarak sisteme ısı verilmiştir.

- h. Sistemin kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Test borusu yüzey sıcaklıklarında 0.5°C 'den daha fazla bir değişim gözlenmediğinde sistemin kararlı hale geldiğine karar verilmiştir.
- i. Osilasyon sınırına ulaşıncaya kadar kütleli debi değeri azaltılmaya devam edilmiştir. Dengeleyici tankın basınç değeri ve su seviyesinde hızlı değişimler gözlenmesi osilasyonların başladığı anlamına gelmektedir.
- j. Basınç düşümü tipi osilasyonların sona erdiği noktayı bulabilmek için kütleli debi yine çok küçük miktarlarda azaltılarak osilasyonların periyotları incelenmiştir. Düşük periyotlar basınç düşümü tipi osilasyonların bitip yoğunluk değişim tipi osilasyonların başlaması anlamına gelmektedir.
- j. Kütleli debideki azaltmalara devam edilerek cidar sıcaklıkları dikkatlice gözlenerek termal osilasyonların oluşumu incelenmiştir.
- k. Burn-out olayının başladığı noktalara ulaşıldığı anlaşılır anlaşılır deneysel çalışmalar durdurulmuştur.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

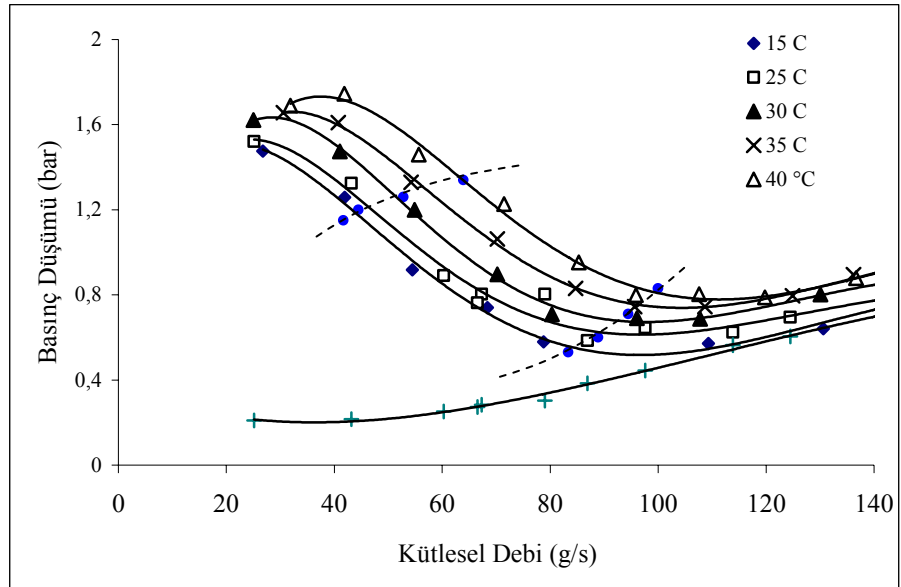
Bu bölümde deneysel çalışmalar sonucu elde edilen araştırma bulguları sunulacak ve değerlendirilecektir. Araştırma bulguları ve tartışma ismini taşıyan bu bölüm boş borudaki iki fazlı akış, iyileştirme elemanı kullanan borulardaki iki fazlı akış ve boru yüzey konfigürasyonlarının karşılaştırılması olmak üzere üç alt bölüm halinde düzenlenmiştir.

4.1. Boş Borudaki İki Fazlı Akış

4.1.1. Kararlı durum karakteristikleri

İki fazlı akışları incelenirken kararlı durum karakteristiklikleri $\Delta p - \dot{m}$ grafikleriyle gösterilir (Şekil 4.1). Δp dengeleyici tank ile test borusunun bitiminde bulunan orifis levhasından sonraki nokta arasında ölçülen basınç düşümünü göstermektedir. Şekil 4.1’de çeşitli akışkan giriş sıcaklıkları için kararlı durum karakteristik eğrileri gösterilmiştir. Şekilde en alttaki eğri sisteme ısı girişinin olmadığı tek fazlı akışa ait basınç düşümünü göstermektedir. İki fazlı akışa ait eğrilerin her birisi yatık “S” şeklindedir. Eğrilerin yüksek kütleli debi değerlerine karşılık gelen sağ tarafları tek fazlı sıvı bölgesini göstermektedir. Tek fazlı akış bölgesinde kütleli debi azaldıkça basınç düşümü azalmaktadır ve eğrilerin eğimleri bu bölgede pozitifdir. Debi değerlerinin azalmasıyla tek fazlı akış rejiminin sona erdiği minimum noktaya gelmektedir. Bu noktadan itibaren kütleli debideki azalma ile basınç düşümünün azaldığı iki fazlı bölge başlamaktadır. İki fazlı bölgede eğrilerin eğimleri negatiftir. Bunun nedeni sıvı fazına göre buhar fazının daha düşük yoğunluğa sahip olması sonucu basınç düşümünün artması ve buna bağlı olarak kabarcık sayısının artmasıdır. Debi değerinin daha da azaltılmasıyla boru içerisindeki akışkanın tümü buharlaşmakta ve bu noktadan sonra basınç düşümünün azaldığı tek fazlı buhar bölgesi oluşmaktadır.

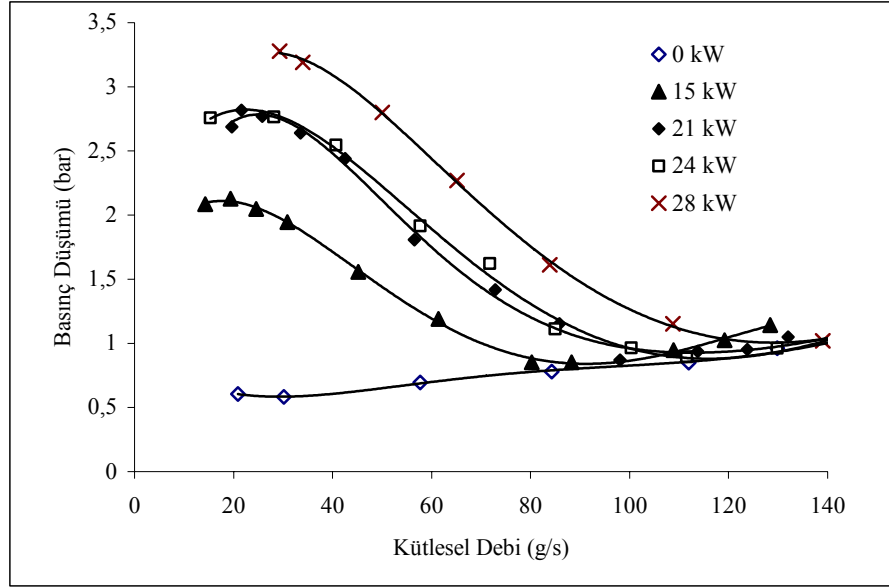
Kararlı durum karakteristiklerine aşırı soğutmanın etkisi incelendiğinde akışkan giriş sıcaklığındaki azalmayla yani aşırı soğutma seviyesinin artmasıyla kaynamanın başladığı noktanın daha düşük kütleli debilere doğru kaydığı görülür (Şekil 4.1). Başka bir deyişle akışkan giriş sıcaklığının değişmesi kaynamanın başladığı noktayı değiştirmektedir. Düşük giriş sıcaklığına sahip akışkan aynı ısı gücünde daha düşük debiye erişinceye kadar kaynama noktasına ulaşmamaktadır. Ayrıca şeklin incelenmesinden iki fazlı bölgede belirli bir kütleli debi değerinde giriş sıcaklığı arttıkça basınç düşümünün arttığı görülmektedir. Benzer sonuçlar iki fazlı akış dinamik kararsızlıklarına giriş aşırı soğutmasının etkisini araştıran diğer araştırmacılar tarafından da bulunmuştur (Saha *et al.*, 1976; Veziroğlu and Kakaç, 1980; Menten *et al.*, 1983; Xu and Chen, 1990; Kakaç *et al.*, 1990; Duffey and Hughes, 1991; Ding *et al.*, 1993; Karlı vd 2002). Menten *et al.* (1983) dikey yukarı akışlı tek bir kanal sisteminde, Widmann *et al.* (1994, 1995) yatay bir boru sisteminde, Kakaç *et al.* (1995) yatay bir boru sisteminde yaptıkları araştırmalarda giriş sıcaklığını artırmanın akışkanın daha yüksek kütleli debilerde kaynamasına yol açtığını ve belirli bir kütleli debi değerinde giriş sıcaklığı arttıkça basınç düşümünün arttığını gözlemlemişlerdir. Karlı *et al.* (2002) 16°C, 19°C, 22°C, 24°C ve 28°C olmak üzere beş farklı R11 giriş sıcaklığı kullandıkları çalışmada benzer sonuçlar bulmuşlardır.



Şekil 4.1. Kararlı durum karakteristiklerine giriş aşırı soğutmasının etkileri ($p_g = 7.5 \text{ bar}$, $P = 24 \text{ kW}$, $T_g = 25^\circ \text{C}$, $\beta = 0.45$)

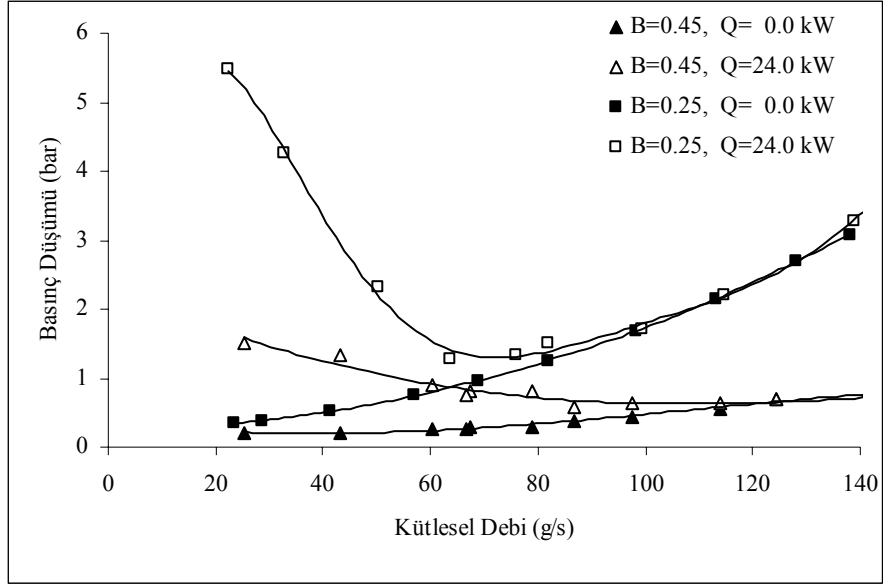
Kararlı durum karakteristiklerine sisteme verilen ısı miktarının etkisi Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Sisteme ısı gücün verilmediği durum hariç 15, 21, 24 ve 28 kW olmak üzere dört farklı ısı gücünde çalışılmıştır. Şekilde en alttaki eğri sisteme ısı girişinin olmadığı tek fazlı akışa ait basınç düşümünü göstermektedir. Sisteme verilen ısı gücü arttıkça minimum noktanın sağa doğru kaydığı görülmektedir. Bu ise iki fazlı akış bölgesinin daha yüksek kütleli debilerde başladığı anlamına gelir. Ayrıca şekilden iki fazlı bölgede belirli bir kütleli debi değerinde ısı gücü arttıkça basınç düşümünün arttığı görülmektedir. Isıl güç arttıkça belirli bir kütleli debiyle boruya giren akışkan daha çok enerji absorbe etmekte ve daha kısa bir sürede doyma haline ulaşmaktadır. Bunun sonucunda iki fazlı akış bölgesi boru içerisinde daha uzun bir bölgeyi kaplamakta ve boru boyunca daha büyük bir basınç düşümü meydana gelmektedir. Bu sonuçlar literatürdeki sonuçlarla uyum içerisindedir. Saha *et al.* (1976) ilk kabarcıkların oluşup cidardan ayrıldığı girişten olan uzaklığın sisteme verilen ısı gücüyle ters orantılı olduğunu belirlemiştir. Ding (1993) R11 soğutkanı kullanarak 0.0, 54.6, 68.3, 76.5 ve 84.7 kW/m² özgül ısı gücü değerleriyle yaptığı çalışmalarda ısı gücü arttıkça boru içerisindeki iki fazlı bölgenin arttığını ve buna bağlı olarak da basınç düşümünün arttığını belirlemiştir. Benzer sonuçlar, Kakaç (1994) tarafından da bulunmuştur.

Şekil 4.3’de çıkış orifisinin kararlı durum karakteristiklerine etkisi gösterilmiştir. Test kısmının sonuna çıkış orifisinin konulması uzun tüp kullanılması anlamına gelir ve akış daha küçük bir kesitten geçmek zorunda kaldığından basınç düşümü artar. Çalışmalarda $\beta = 0.25$ ve $\beta = 0.45$ olmak üzere iki farklı orifis kullanılmıştır. Şekilde sisteme ısı verilmediği durum ve 24 kW’lık ısı verildiği durumlar için olan değişimler gösterilmiştir. Isı verilmediğinde borunun içerisinde tek fazlı sıvı bulunmaktadır. Şekilden görüldüğü gibi orifis çapının küçülmesi tek fazlı akışta sistem boyunca olan basınç düşümünü artırmaktadır. Aynı değişim ısı verilen durum için de gözlemlenmiştir. Yani orifis çapının küçülmesi basınç düşümünü artırmaktadır. Bunun nedeni küçük çaplı orifisin test kısmında iki fazlı akışa karşı daha yüksek direnç göstermesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle küçük çaplı orifise ait karakteristik eğri büyük çaplı orifise ait eğriye göre eğri yüksek eğimlere sahiptir.

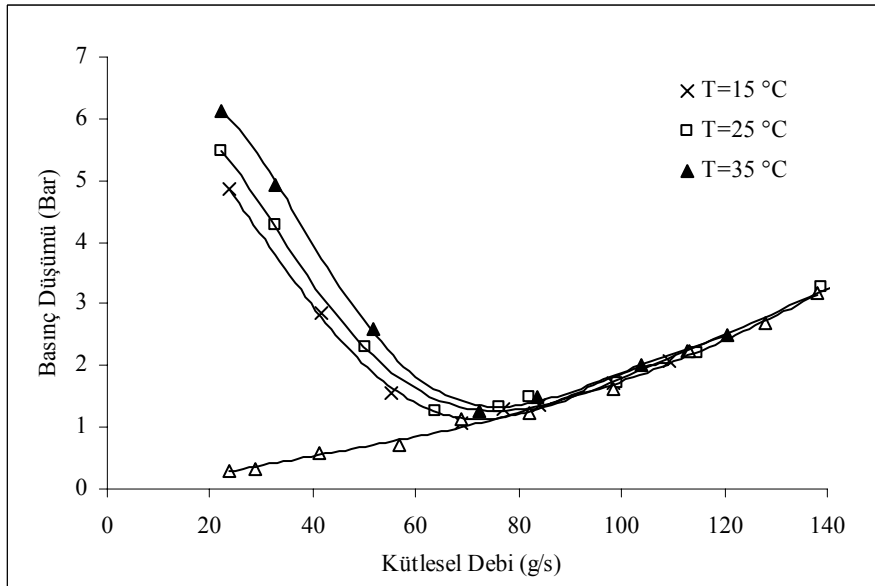


Şekil 4.2. Kararlı durum karakteristiklerine giriş ısı gücünün etkileri ($p_g = 7.5 \text{ bar}$, $T_g = 20^\circ \text{C}$, $\beta = 0.45$)

Orifis çapının küçülmesinin kaynama olayına etkisi ile sistem basıncının kaynama olayına etkisi aynıdır. Yani orifis çapının küçülmesi sonucu akışkan borudan daha küçük bir kesitten çıkmak zorunda kalmakta ve böylece sistemin basıncı artmaktadır. Büyük çaplı orifisde ise borudaki iki fazlı akışa daha düşük bir direnç oluşmakta ve karakteristik eğri daha düz bir hale gelmektedir. Küçük çaplı orifis durumunda yüksek basınçlı akışkanın kaynama noktası yükselmekte, gizli ısı miktarı azalmakta ve sıvıdan buhar fazına geçiş için daha kısa bir işlem gerekmektedir (Ding, 1993). Bu durum deneysel sonuçlarda da gözlemlenmiştir. Şekil 4.10 incelendiğinde küçük çaplı orifise ait karakteristik eğrinin minimum noktasının büyük çaplı orifise ait karakteristik eğrinin minimum noktasından daha düşük kütleli debide olduğu görülür. Şekil 4.4 küçük çaplı orifise ait karakteristik eğrilere girişteki aşırı soğutmanın etkisini göstermektedir. Bu orifise ait eğrilerin büyük çaplı orifise ait eğrilerle benzer karakteristikler değişimler gösterdiği görülmektedir. Çıkış kısıtlayıcısına ait bulunan bu sonuçlar literatürdeki sonuçlarla uyum içerisindedir. Çeşitli araştırmacılar (Wallis ve Heasley, 1961; Anderson *et al.*, 1962; Jain, 1965) giriş ve çıkış kısıtlayıcılarının iki fazlı akışlarda yaptıkları etkileri incelemişlerdir. Ding (1993) yatay bir boru sisteminde $\beta=0.24$ ve $\beta=0.30$ olmak üzere iki adet çıkış kısıtlayıcı kullanarak yaptığı araştırmada çıkış



Şekil 4.3. Kararlı durum karakteristiklerine çıkış orifisinin etkileri ($p_g = 7.5 \text{ bar}$, $P = 24 \text{ kW}$, $T_g = 25^\circ \text{C}$)



Şekil 4.4. Kararlı durum karakteristiklerine giriş aşırı soğutmasının etkileri ($p_g = 7.5 \text{ bar}$, $P = 24 \text{ kW}$, $\beta = 0.25$)

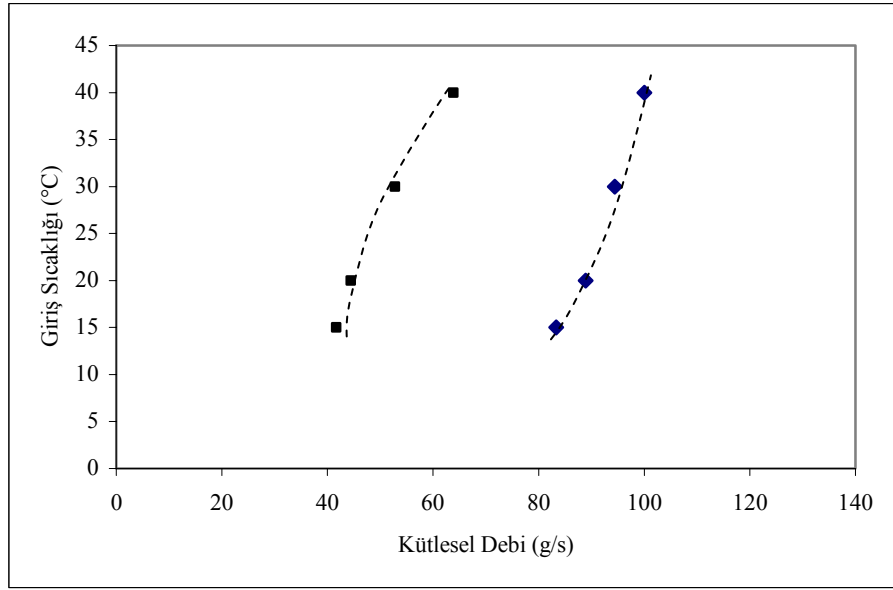
kısıtlayıcı çapının azaltılmasının sistem içerisindeki basıncı artırdığını bunun sonucunda kaynama sıcaklığının artıp, gizli ısıнын azaldığını ve akışkanın daha kısa bir sürede sıvı fazdan buhar fazına geçtiğini belirlemiştir. Genel olarak araştırmacılar tek fazlı akışta

sürtünmenin artmasına neden olan giriş kısıtlayıcısının iki fazlı akışlı sistemlerde sistemi kararlı yapıcı bir etkiye sahip olduğunu, çıkış kısıtlayıcısının da iki fazlı akışta sürtünmenin artmasına neden olmasına rağmen sistemde akış kararsızlığını azalttığını belirlemişlerdir.

4.1.3. Osilasyon Sınırları

Yukarıda da gösterildiği gibi tüm ısı gücü, tüm giriş aşırı soğutması ve tüm çıkış orifisleri değerleri için bulunan karakteristik eğriler yatık S şeklindedir. Bu eğriler çalışılan deneysel koşullarda genellikle birbirleriyle kesişmemektedir. Su için osilasyon sınırlarının su giriş sıcaklığıyla değişimi Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Bu osilasyon sınırları ayrıca Şekil 4.1’de de kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Şeklin sağ tarafındaki sınırlar BDO’nun başlama noktalarını, sol taraftaki sınırlar ise BDO’nun bitiş noktalarını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi giriş sıcaklığı azaldıkça BDO’nun başlangıcı daha düşük debilere doğru kaymaktadır. Örnek olarak vermek gerekirse giriş sıcaklığı 40°C olduğunda osilasyon 100 g/s değerinde başlarken giriş sıcaklığı 15°C’ye düştüğünde 83 g/s değerinde başlamaktadır. Ayrıca BDO’nun bitiş noktaları da daha düşük debilere doğru kaymaktadır. Giriş sıcaklığının azalmasıyla boru içerisindeki tek fazlı sıvı bölgesi artmakta ve böylece sistem daha kararlı olmaktadır. Sistemin daha kararlı olmasının nedeni osilasyonların gecikerek daha düşük bir debi değerinde başlamasıdır. Çeşitli araştırmacılar giriş aşırı soğutma miktarını artırmanın kararsız bölgeyi azaltacağını ve böylece akışı daha kararlı hale getireceğini belirlemişlerdir (Saha *et al.* 1976; Veziroğlu and Kakaç, 1980; Montes *et al.* 1983; Xu and Chen, 1990; Kakaç *et al.*, 1990; Duffey and Hughes, 1991; Ding *et al.*, 1993; Karlı vd 2002). Hands (1979) düşük aşırı soğutma değerlerinde giriş aşırı soğutma miktarını artırmanın ve yüksek aşırı soğutma değerlerinde ise giriş aşırı soğutma miktarını azaltmanın akışı daha kararsız hale getireceğini ifade etmektedir. Bergles’e (1976) göre giriş aşırı soğutma miktarındaki artışın akışı daha kararlı yapmasının nedeni giriş aşırı soğutma miktarındaki artışla boşluk oranının azalması, tek fazlı yani kaynama olmayan bölgenin artması ve böylece geçiş süresinin artmasıdır. Giriş aşırı soğutmasını artırmak boruya kısa bir ısıtılmayan uzunluk eklemekle aynı etkiyi yapmaktadır. Böylece giriş aşırı

soğutma miktarının artması orta veya yüksek aşırı soğutma miktarlarında iki fazlı akışı daha kararlı yapmaktadır. Düşük aşırı soğutma miktarlarında ise geçiş süresinin artışı giriş akımından boşluk üretiminin yanıt gecikmesinde önemli olmaktadır ve giriş aşırı soğutma miktarındaki artış akışı daha kararsız yapmaktadır. Böylece kararlı yapıcı ve kararsız yapısı etkenler birbirleriyle yarışmaktadır.



Şekil 4.5. Osilasyon sınırları

4.1.4. Kararsız durum karakteristikleri

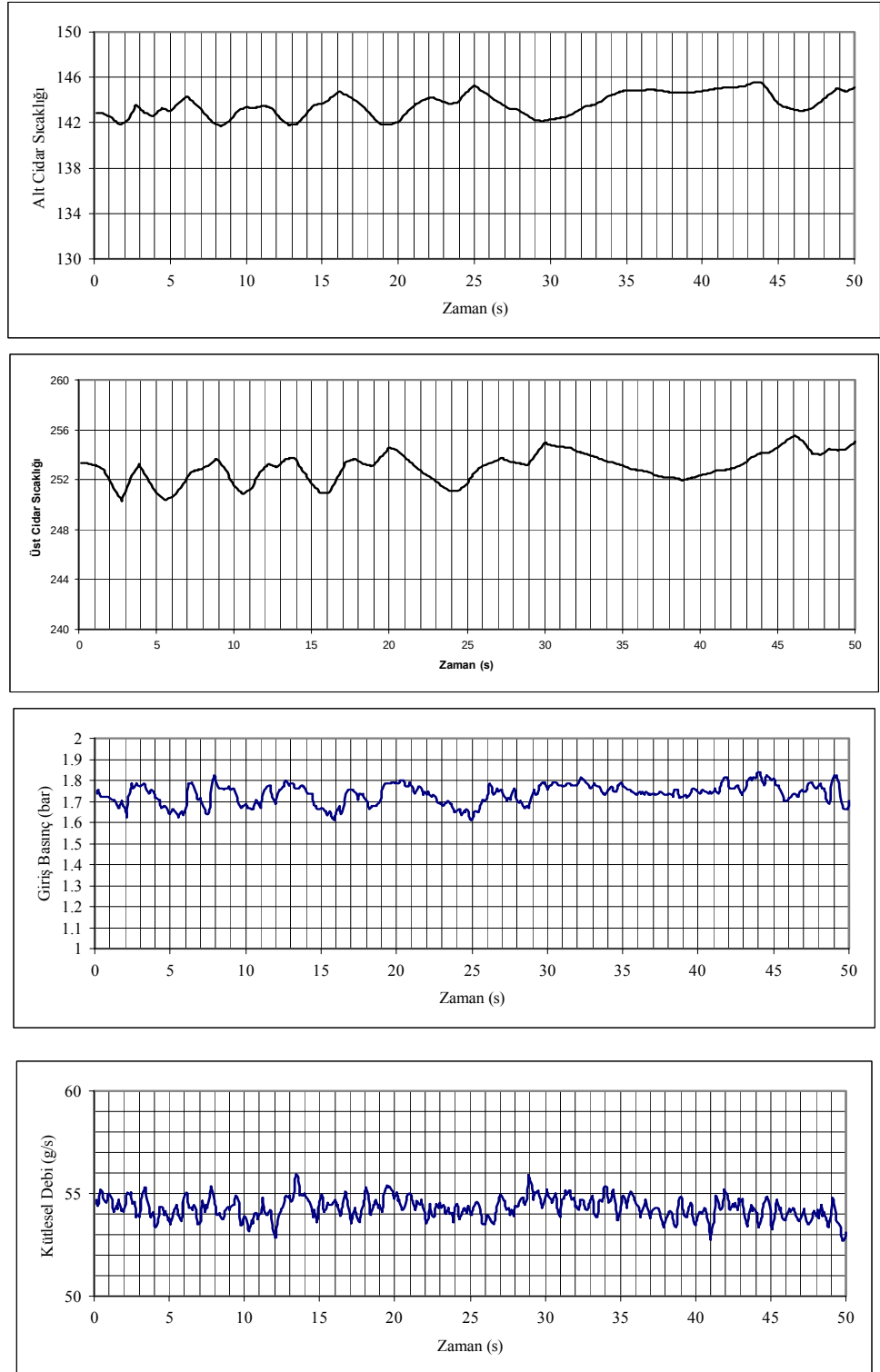
Deneyler çalışmalar esnasında üç farklı tip osilasyon gözlemlenmiştir. Bunlar basınç düşümü osilasyonlar, yoğunluk değişimi osilasyonlar ve termal osilasyonlar dır.

4.1.4.1. Basınç düşümü osilasyonlar

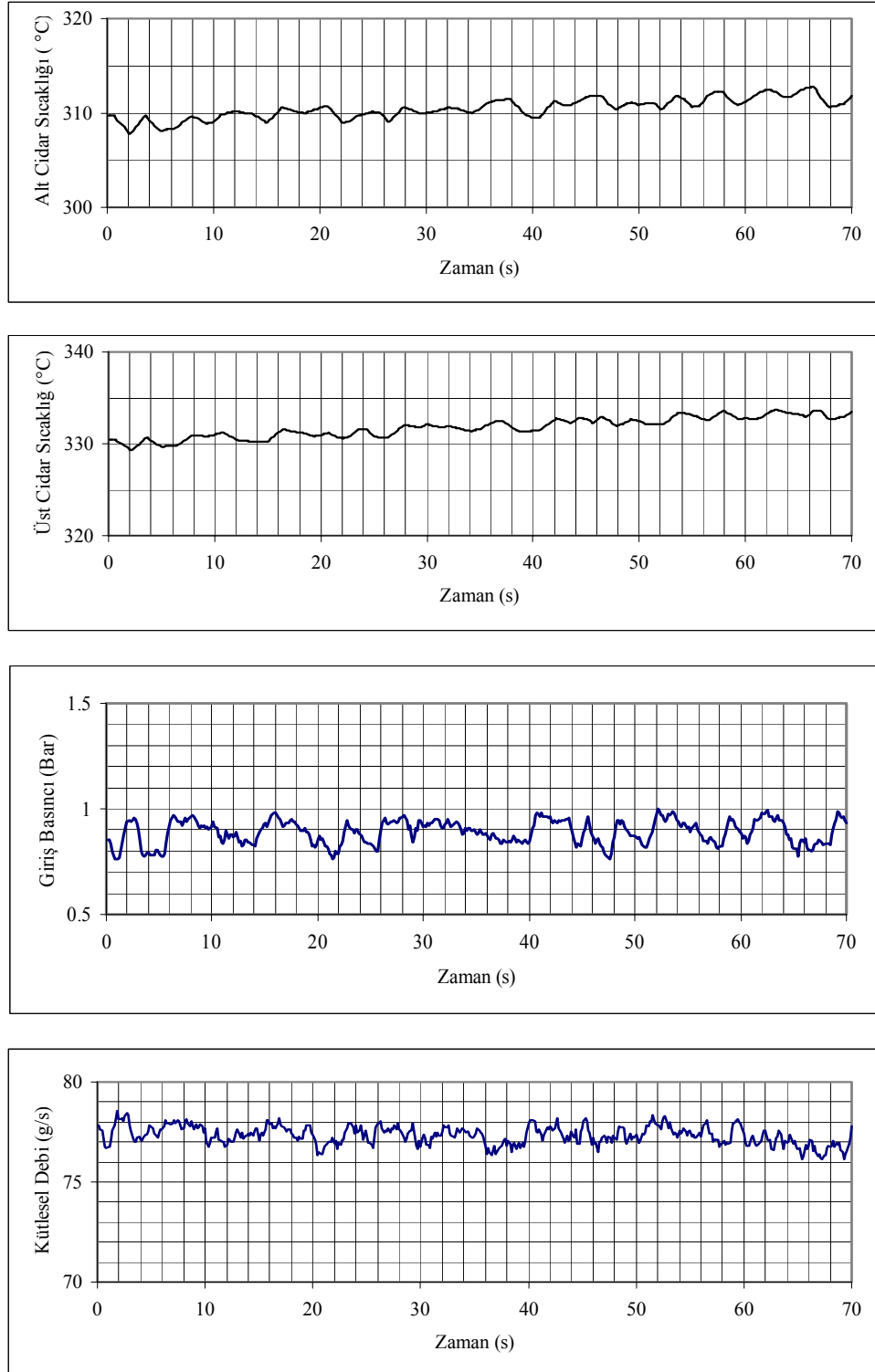
Basınç düşümü tip osilasyonlar ısıtılan kanalın üst tarafında veya kanalın içinde sıkıştırılabilir hacme sahip olan sistemlerde oluşurlar. Bu osilasyonlar, karakteristik eğride minimum nokta civarında başlamakta ve genellikle kanal boyunca olan basınç

düşümü debinin artmasıyla azaldığı zaman oluşmaktadır (Şekil 4.1). Başka bir deyişle kararlı durum karakteristik eğrisinin negatif eğimli bölgesinde oluşmaktadır. BDO osilasyonlarının periyotları sistemdeki buharın hacmine, sistemdeki buharın sıkıştırılabilirliğine ve dengeleyici tank tarafından test kısmının ön tarafında oluşturulan sıkıştırılabilirliğe bağlıdır. Eğer test kısmı çok uzunsa, buradaki iç sıkıştırılabilirlik, basınç düşümü tip osilasyonlarının oluşmasına yeterli olabilir. Eğer bu yeterli değilse sıkıştırılabilir hacim test kısmının önüne yerleştirilen bir dengeleyici tank ile sağlanır. BDO tip osilasyonlar, uzun osilasyon periyoduna ve daima yüksek osilasyon genliğine sahip olan ve aşırı cidar-sıcaklık yükselmesinin eşlik ettiği osilasyonlardır. Bu nedenle buhar üretiminin olduğu sistemlerde bu tip osilasyonların oluşmasını engelleme cihazın güvenlik içinde çalışması için çok önemlidir.

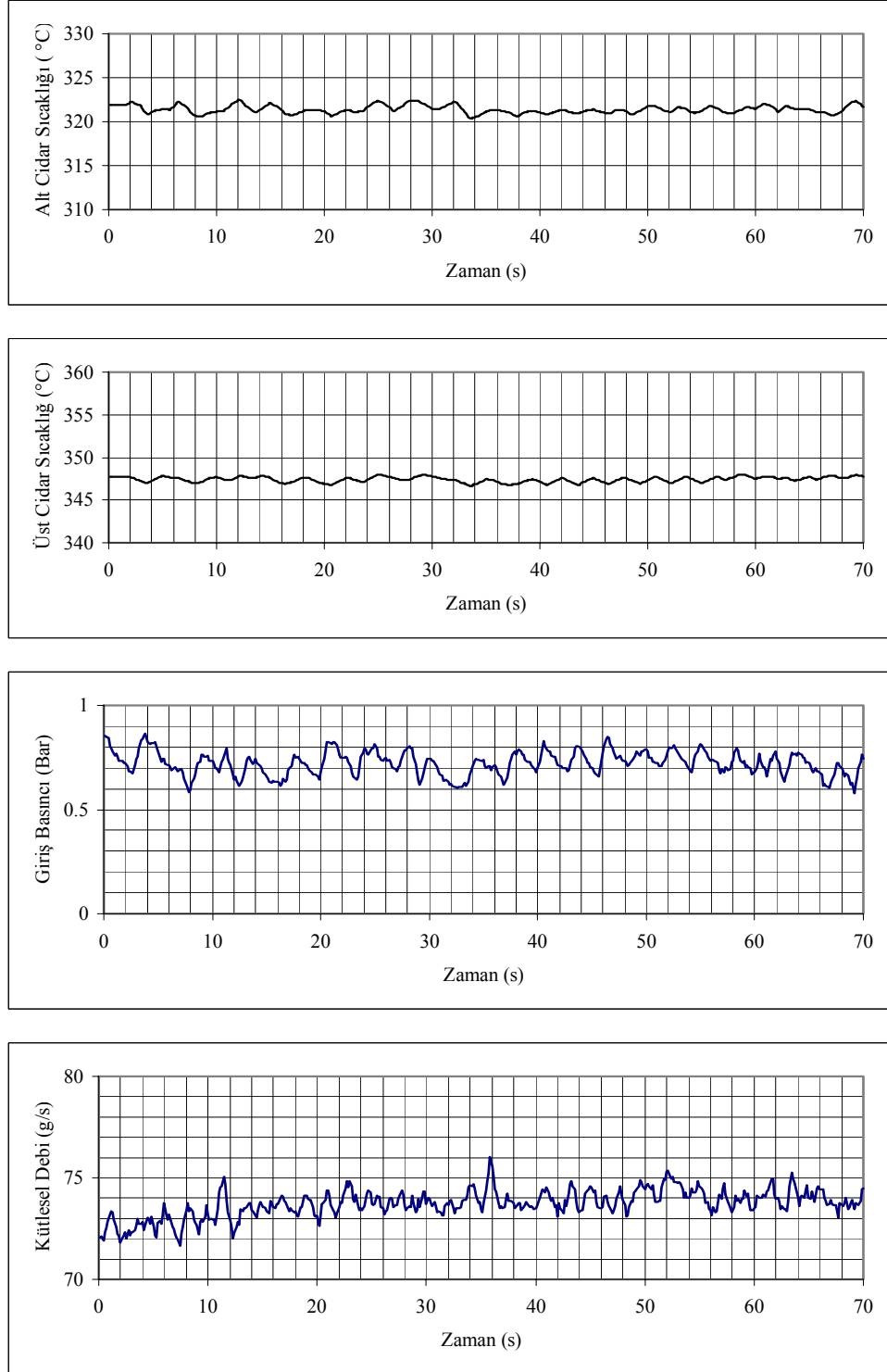
Bu deneysel sistemde sıkıştırılabilir hacim dengeleyici tankta bulunan N_2 gazı yardımıyla dış sıkıştırılabilir hacim kullanılarak sağlanmıştır. Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8’de sırasıyla giriş sıcaklığının $35^\circ C$, $25^\circ C$ ve $15^\circ C$ değerleri için basınç düşümü osilasyonuna ait grafikler gösterilmiştir. Her bir şekilde alt cidar, üst cidar, kütleli debi ve basınçta oluşan osilasyonlar bulunmaktadır. Görüldüğü gibi BDO tip osilasyonlar giriş basıncı, cidar sıcaklığı ve giriş kütleli debisi gibi akış parametrelerinde büyük genlikli çalkantılara neden olmuşlardır. Boş boru için BDO osilasyonların periyotları 10-14 saniye civarındadır. Bu osilasyonların karakteristik özellikleri şöyle özetlenebilir: (a) BDO tip osilasyonlar giriş basıncı, alt ve üst cidar sıcaklığı ile kütleli debide büyük genlikli çalkantılara neden olmuşlardır.



Şekil 4.6. Basıncı düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 54 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=35^\circ\text{C}$)



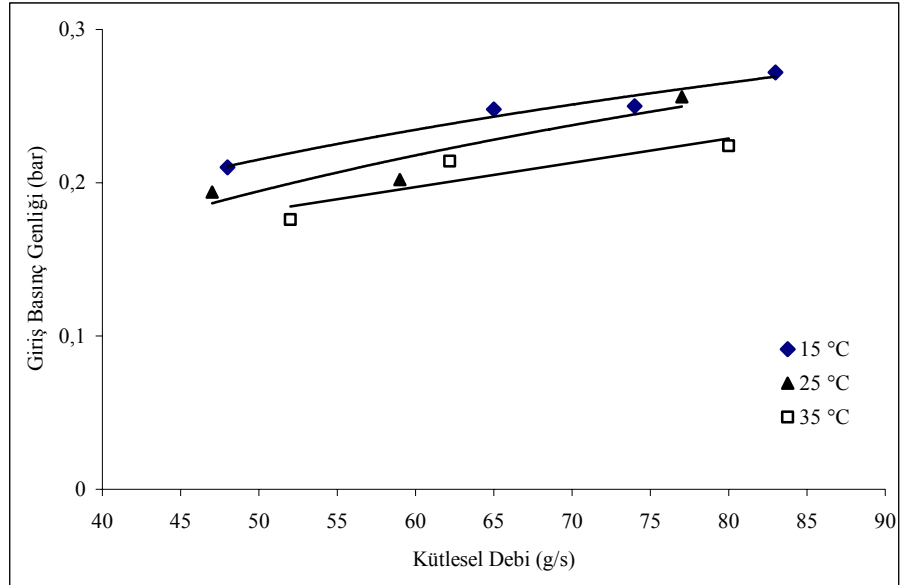
Şekil 4.7. Basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 77 \text{ g/s}$, $P = 24 \text{ kW}$, $T_g = 25^\circ\text{C}$)



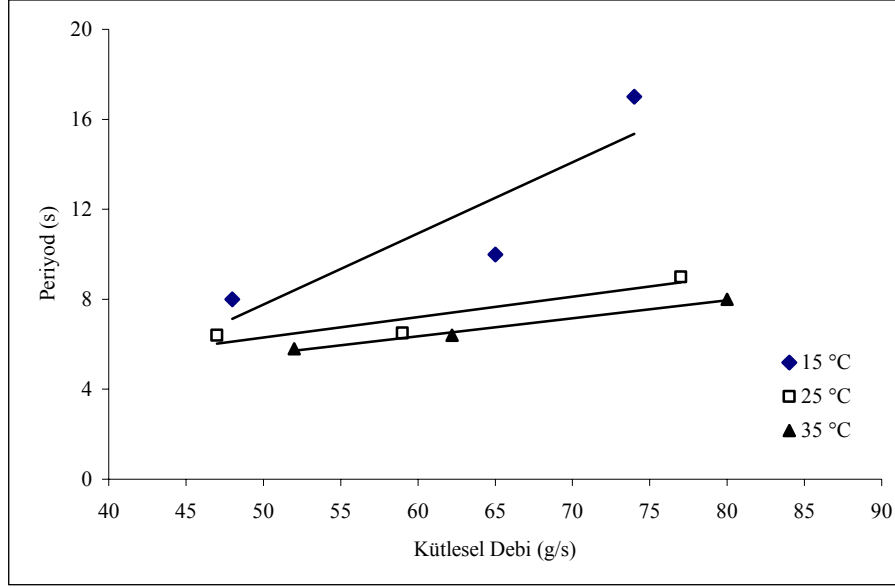
Şekil 4.8. Basıncı düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 74 \text{ g/s}$, $P = 24 \text{ kW}$, $T_g = 15^\circ\text{C}$)

- (b) Bu osilasyonlar genellikle kanal boyunca olan basınç düşümü, debinin artmasıyla azaldığı zaman başka bir deyişle kararlı durum karakteristik eğrisinin negatif eğimli bölgesinde oluşmaktadır.
- (c) Yoğunluk değişim tipi osilasyonlar basınç eğrisinin negatif eğimli kısmında basınç düşümü osilasyonları ile süperimpoze tarzda ortaya çıkabilmektedir.
- (d) Üst cidar sıcaklıklarının genlikleri alt cidar sıcaklık genliklerinden daha büyük olmuştur.

Şekil 4.9 ve 4.10 sırasıyla BDO osilasyonlarının genliklerine ve periyotlarına kütleli debinin etkilerini göstermektedir. Şekillerin incelenmesinden kütleli debiyi azaltmanın genlikleri ve periyotları azalttığı görülebilir. Kütleli debi azaldıkça genlik ve periyotların azalmasının nedeni olarak debinin azalmasıyla üretilen buhar hacminin artması sonucu boru içerisindeki basıncın artması ve bunun da dengeleyici tank içerisindeki sıkıştırılabilir hacmi azaltması olduğu söylenebilir. Sistemin bu durumda esnekliği azalır ve bu nedenle osilasyon genlik ve periyotları azalır (Ding, 1993).



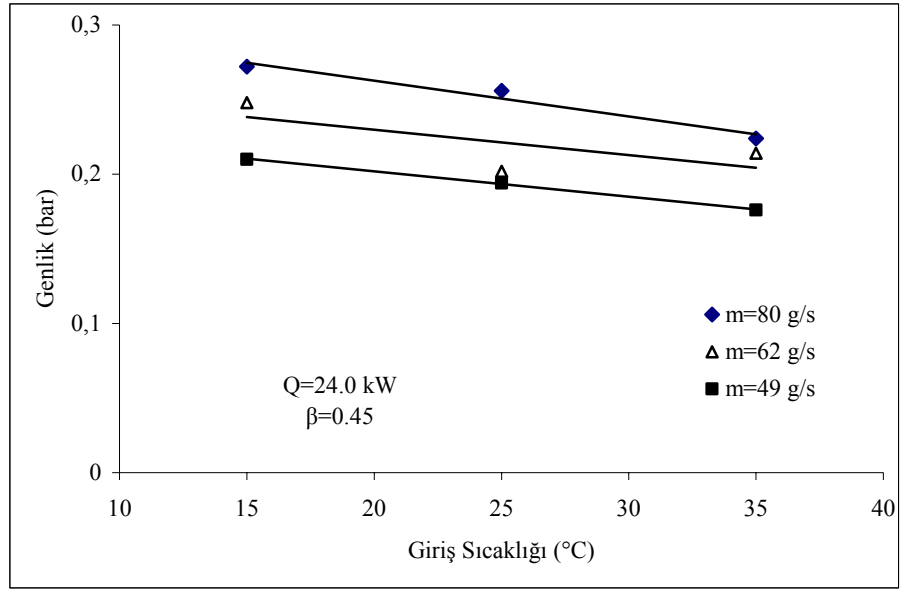
Şekil 4.9. Kütleli debinin basınç düşümü osilasyonlarının genliklerine etkisi



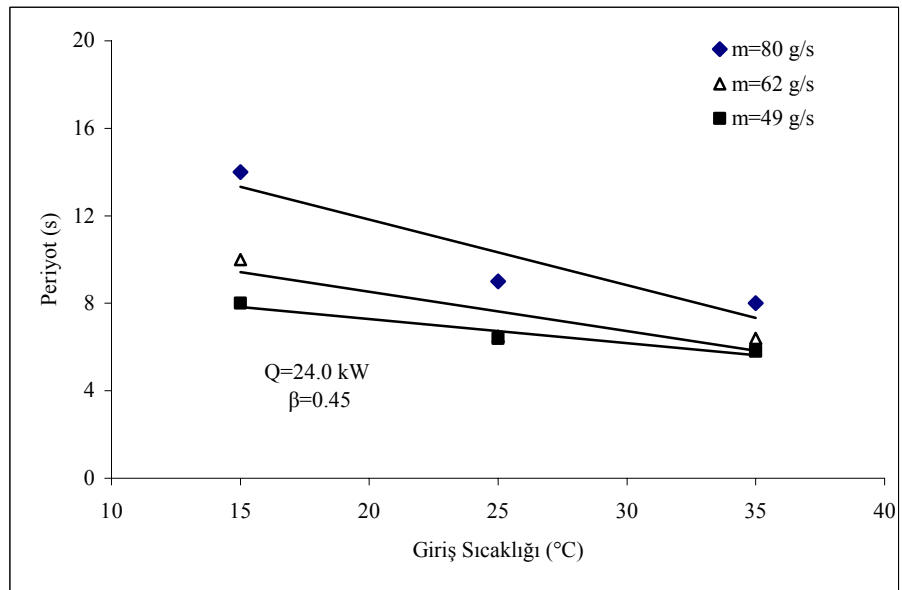
Şekil 4.10. Kütlesel debinin basınç düşümü osilasyonlarının periyotlarına etkisi

Giriş aşırı soğutmasının BDO tip osilasyonların genliklerine etkisi Şekil 4.11’de, periyotlarına etkisi ise Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Giriş sıcaklığı azaldıkça genliklerin ve periyotların arttığı görülmektedir. Farklı giriş sıcaklıkları için olan karakteristik eğriler incelendiğinde (Şekil 4.1) farklı giriş sıcaklıkları için olan maksimum noktaların birbirlerine çok yakın olduğu, halbuki minimum noktaların ise birbirlerinden daha uzak olduğu ve en düşük sıcaklığa karşılık gelen eğrinin en altta olduğu görülür. Bu ise maksimum ve minimum basınçlar arasındaki farkın giriş sıcaklığı düştükçe arttığını göstermektedir. Bu nedenlerle limit çevrimi takip ederken BDO düşük giriş sıcaklığında büyük genlikli osilasyonlar üretir ve bunun sonucunda periyodu da büyük olur (Ding 1993).

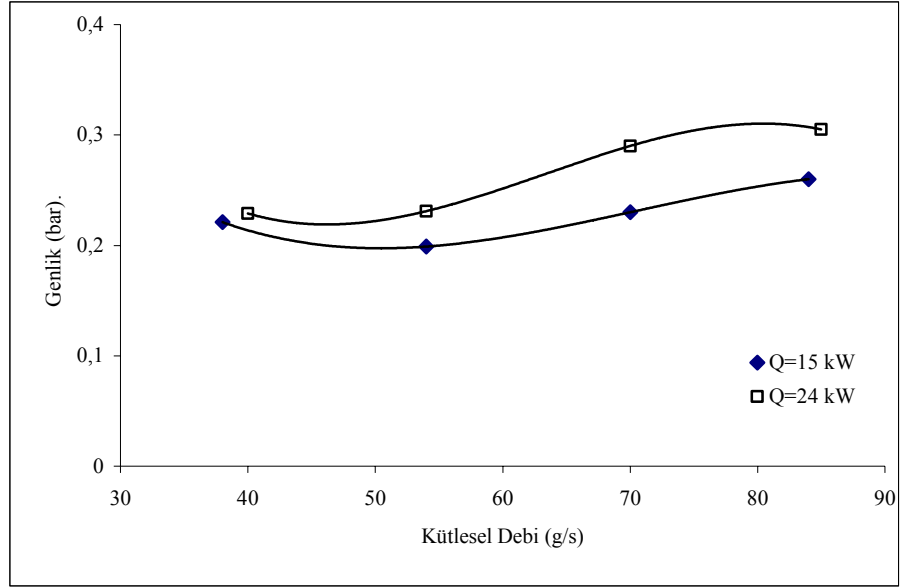
Şekil 4.13 ve 4.14 ısı gücünün sırasıyla BDO tip osilasyonların genliklerine ve periyotlarına etkisini göstermektedir. Şekil 4.20’den ısı gücü arttıkça genliklerin arttığı Şekil 4.14’den ise ısı gücü arttıkça periyotların azaldığı görülmektedir. Bu durum ısı gücü arttıkça akışkana daha fazla enerjinin verilmesi ve bunun sonucunda sıkıştırılabilir hacmin daha büyük genlikle ve daha yüksek hızla itilmesine bağlanabilir (Ding 1993).



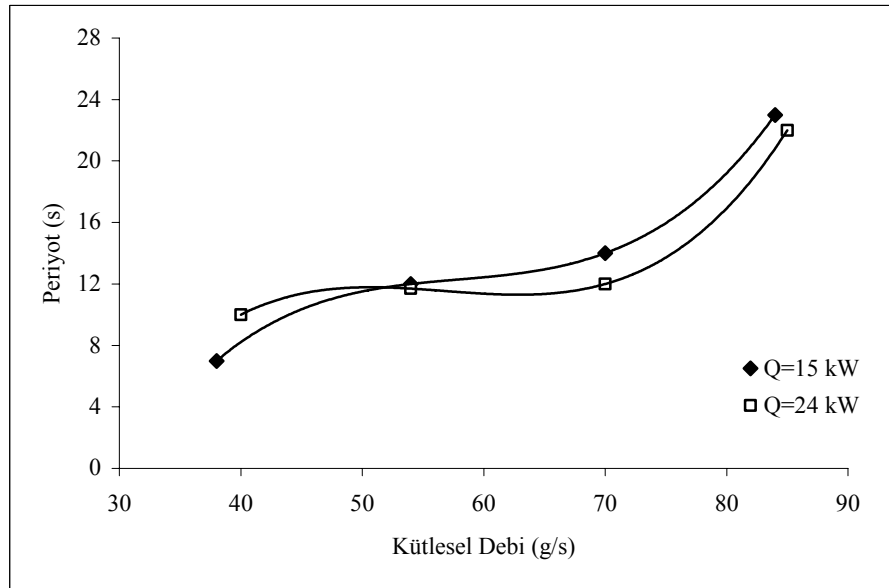
Şekil 4.11. Giriş aşırı soğutmasının basınç düşümü osilasyonlarının genliklerine etkisi



Şekil 4.12. Giriş aşırı soğutmasının basınç düşümü osilasyonlarının periyotlarına etkisi



Şekil 4.13. Basınç düşümü osilasyonların genliklerinin kütleli debiyle değişimi



Şekil 4.14. Basınç düşümü osilasyonların periyotlarının kütleli debiyle değişimi

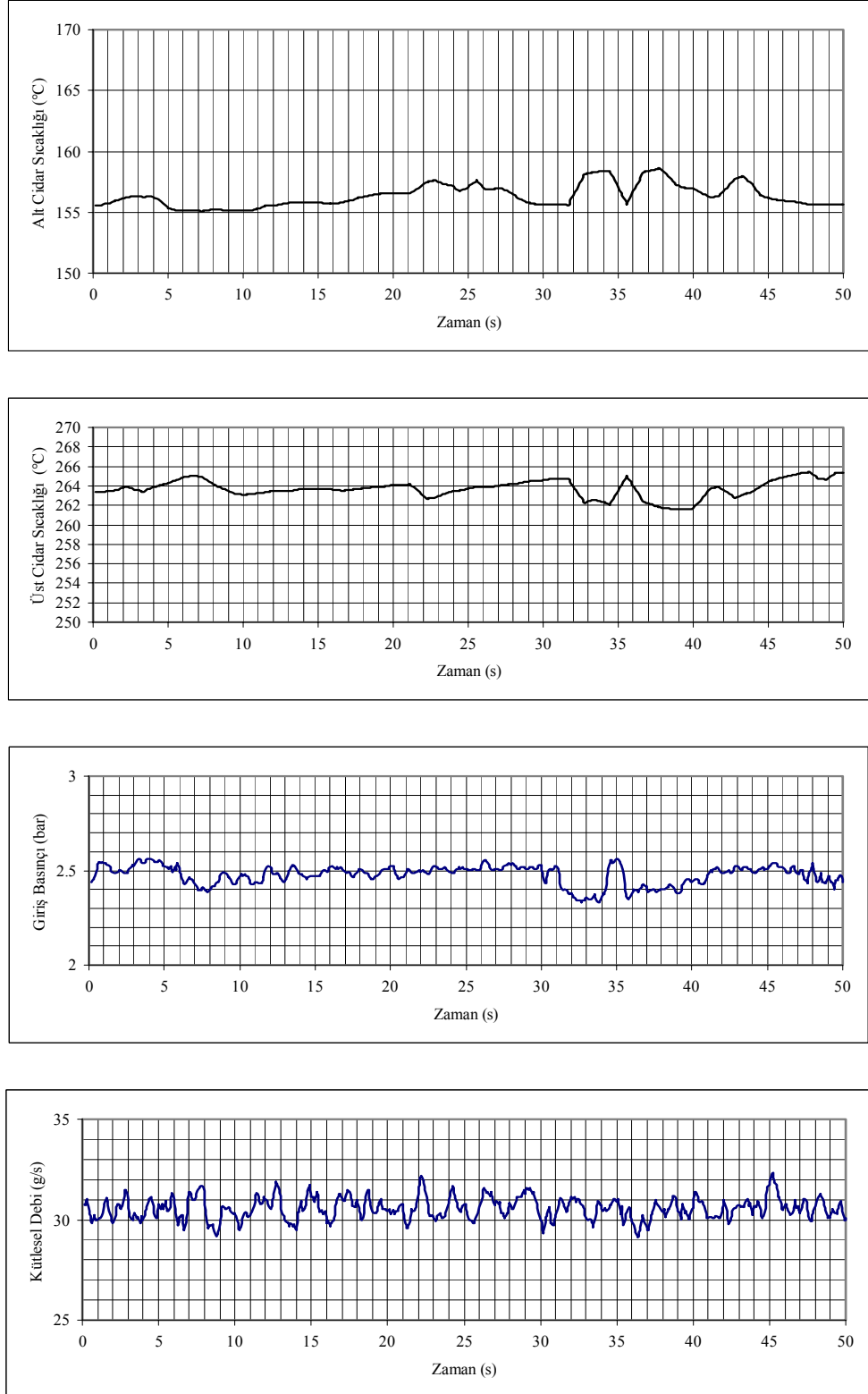
4.1.4.2. Yoğunluk değişim tipi osilasyonlar

Yoğunluk değişim osilasyonları (YDO), endüstride en yaygın olarak karşılaşılan dinamik iki fazlı akış kararsızlık tipidir. Bu osilasyonlar kinematik dalga yayılım olayı ile ilgili olduklarından “akış-boşluk geri besleme kararsızlıkları (flow-void feed-back instabilities)” ismi veya iletim gecikmeleri önemli olduğundan alternatif deyim olarak “zaman-gecikmeli osilasyonları (time-delay oscillations)” ismi kullanılmaktadır. Bu osilasyonlar, osilasyonların periyodu bir yoğunluk dalgasının göz önüne alınan sistem boyunca seyahat etmesi için gerekli zaman mertebesinde olduğundan “yoğunluk değişim osilasyonları” olarak isimlendirilir. En çok kullanılan terim “yoğunluk değişim osilasyonları” terimidir (Stenning and Veziroğlu 1965) ve alternatif olarak yüksek ve düşük yoğunluklu karışım akışkan dalgalarının sistem içinde hareket etme gerçeğine dayanır. Bu osilasyonlar yüksek frekanslı osilasyonlardır ve buharın sıkıştırılabilirliği YDO tip osilasyonların ortaya çıkmasında önemli bir faktör değildir. YDO tip osilasyonların ortaya çıkmasında önemli rol oynayan iki temel faktörden birincisi; farklı yoğunluklara sahip iki bileşenden meydana gelmiş bir akışın söz konusu olması, ikinci önemli faktör de bu iki faz bileşeninin farklı oranlarda karışımında bulunduğu halde akışın devam etmesidir (Ding 1993).

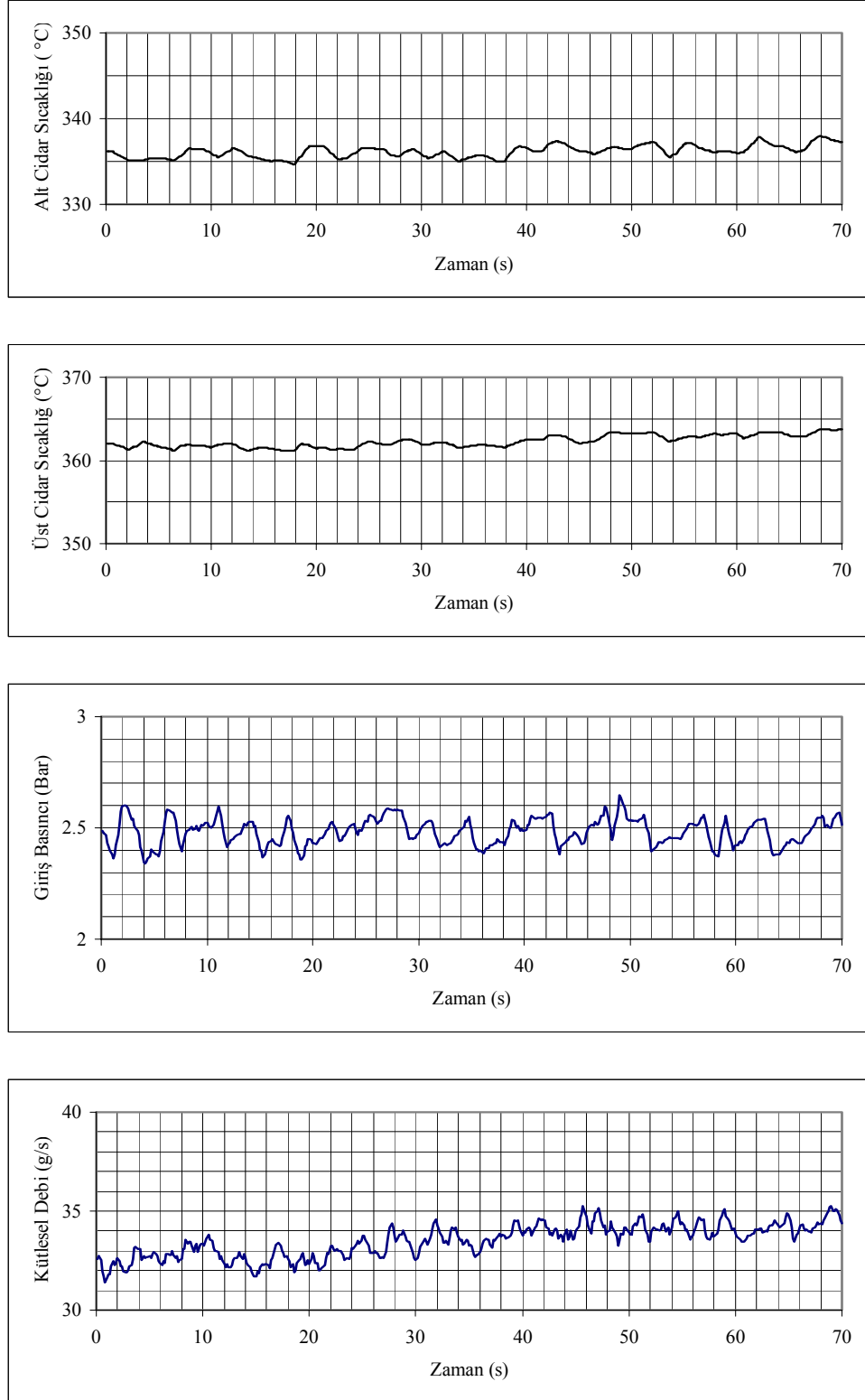
YDO tip osilasyonlar karakteristik eğride negatif eğimli bölgede meydana gelmektedirler. Bu osilasyonlar basınç düşümü tipi osilasyonlarla süperimpozed tarzda ortaya çıkmaktadırlar. Karakteristik eğrinin negatif eğimli bölgesinde yukarıya doğru çıkıldıkça süperimpoze osilasyonlar bitip saf yoğunluk değişimi osilasyonlar başlamaktadır. YDO tip osilasyonların periyot ve genlikleri basınç düşümü tipi osilasyonların periyot ve genliklerine göre daha düşük değerlere sahiptirler. Herhangi bir iki fazlı kararsız akış ortamında yoğunluk değişim tipi osilasyonların oluşması için akışta boşluk oranının (void fraction) uygun değerlerde olması gerekmektedir. Bu osilasyonlara sistem içerisinde yüksek ve düşük yoğunluklara sahip entalpi dalgalarının geçmesi neden olmaktadır.

Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17’de sırasıyla giriş sıcaklığının 35°C, 25°C ve 15°C değerleri için YDO tip osilasyonlara ait grafikler gösterilmiştir. Her bir şekilde alt cidar, üst cidar, kütleli debi ve basınçta oluşan osilasyonlar bulunmaktadır. Boş boru için elde edilen YDO osilasyonlarının genlikleri 0.198-0.248 bar, periyotları ise 4-8 s aralığında değişmiştir. Maksimum genlik 0.248 bar, maksimum periyot ise 8 s olmuştur. Üst cidar sıcaklıkları daima alt cidar sıcaklıklarından yüksek olmuştur. Bunun nedeni borunun alt cidarının sıvı fazıyla üst cidarının ise buhar fazı ile kaplı olmasıdır. Örneğin Şekil 4.15’den üst cidar sıcaklığının 264 civarında alt cidar sıcaklığının ise 157°C civarında olduğu görülmektedir. Boş boruda üst cidar sıcaklıkları 350°C sıcaklığa kadar çıkmıştır. BDO tip osilasyonların genlik ve periyot değerleri ile karşılaştırıldığında kütleli debi ve giriş basınç değerlerinde titreşimlerle ortaya çıkan YDO tipi osilasyonlarının periyot ve genliklerinin BDO tip osilasyonların periyot ve genliklerine göre daha düşük olduğu görülür.

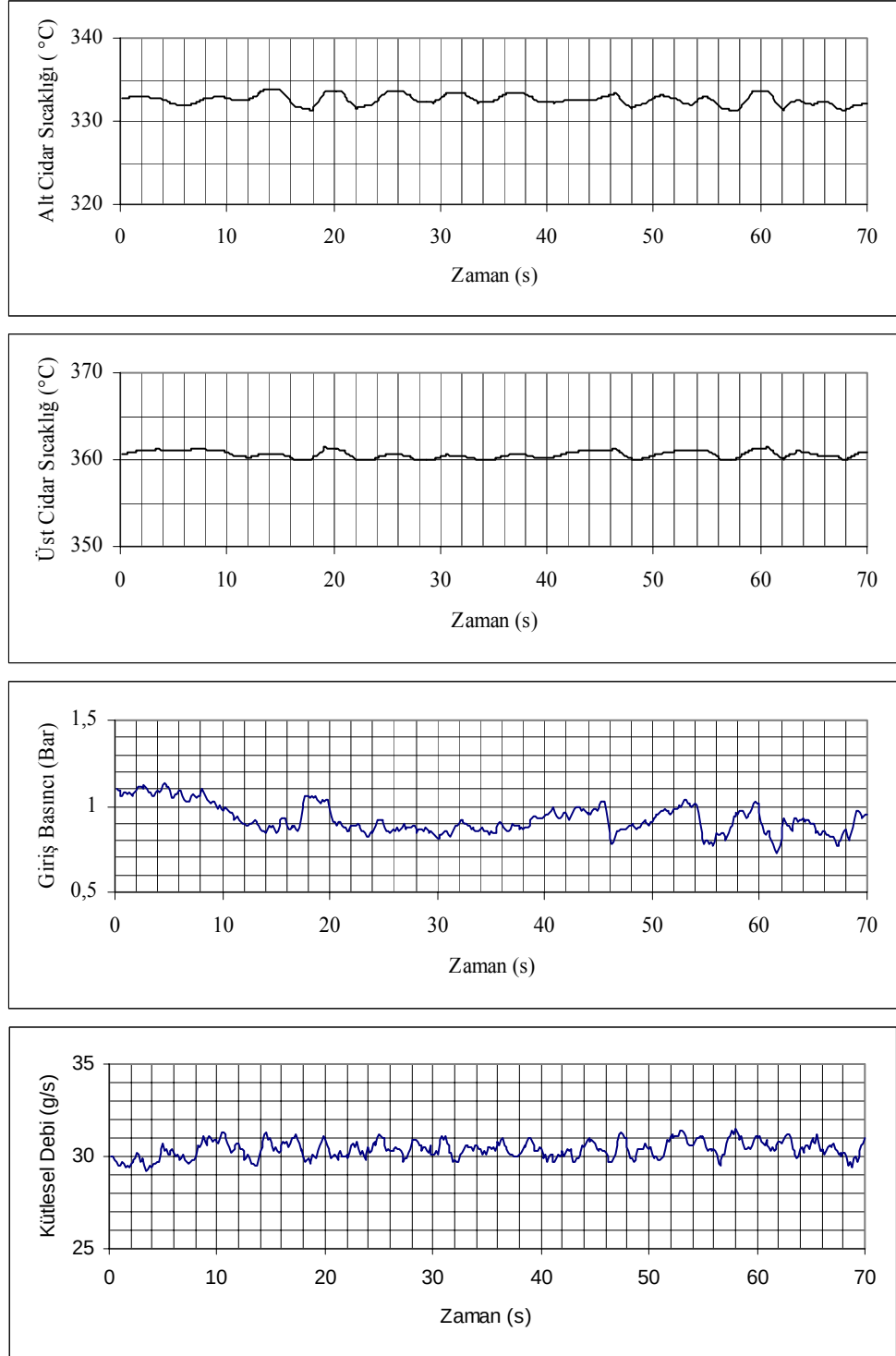
YDO osilasyonlarının genliklerine ve periyotlarına kütleli debinin etkileri sırasıyla Şekil 4.18 ve 4.19’da gösterilmiştir. Şekil 4.18’in incelenmesi kütleli debinin artmasıyla osilasyon genliklerinin arttığını göstermektedir. Genliklerin artmasına, kütleli debi arttığında farklı yoğunluğa ve entalpi değerlerine sahip dalgalar arasındaki yoğunluk farkının artması neden olmaktadır. YDO oluşum mekanizmalarından birisi yüksek ve düşük yoğunluğa sahip entalpi dalgalarının sistem boyunca alternatif hareketine dayanmaktadır. Bu nedenle genlikler yüksek ve düşük yoğunluk dalgaları arasındaki yoğunluk farkına bağlıdır. Kütleli debi arttıkça sistemde yüksek miktarda sıvı olacağından yoğunluk farkı da artacaktır. Yüksek yoğunluklu dalga oluşunca sisteme giren çok miktardaki sıvı nedeniyle sıvı miktarı artacaktır. Böylece osilasyon genlikleri de artacaktır. Oysaki düşük kütleli debilerde sıvı miktarı sınırlı olacaktır. Yüksek yoğunluklu dalga oluşunca bunun yoğunluğu yüksek debili duruma göre nispeten düşük olacak ve bunun sonucunda osilasyonun genliği de küçük olacaktır. Şekil 4.19’ın incelenmesinden kütleli debinin azalmasıyla osilasyon periyotunun azaldığı görülmektedir. YDO teorisine göre zaman ölçeği bir yoğunluk dalgasının sistemin girişinden çıkışına kadar sistem boyunca hareket etmesi için gerekli zamanın yaklaşık iki katıdır.



Şekil 4.15. Yoğunluk değişim tipi osilasyonlar ($\dot{m} = 30 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=35^\circ\text{C}$)



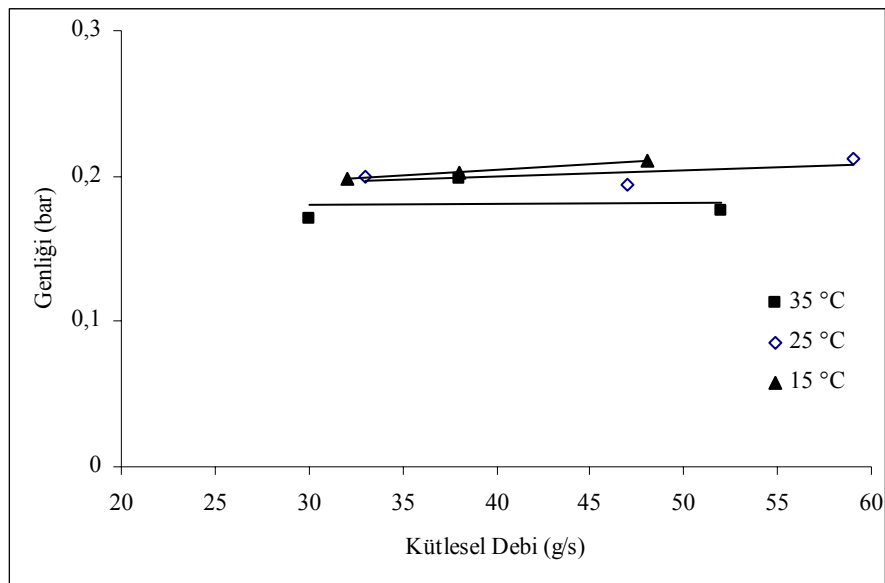
Şekil 4.16. Yoğunluk değişim tipi osilasyonlar ($\dot{m} = 32 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=25^\circ\text{C}$)



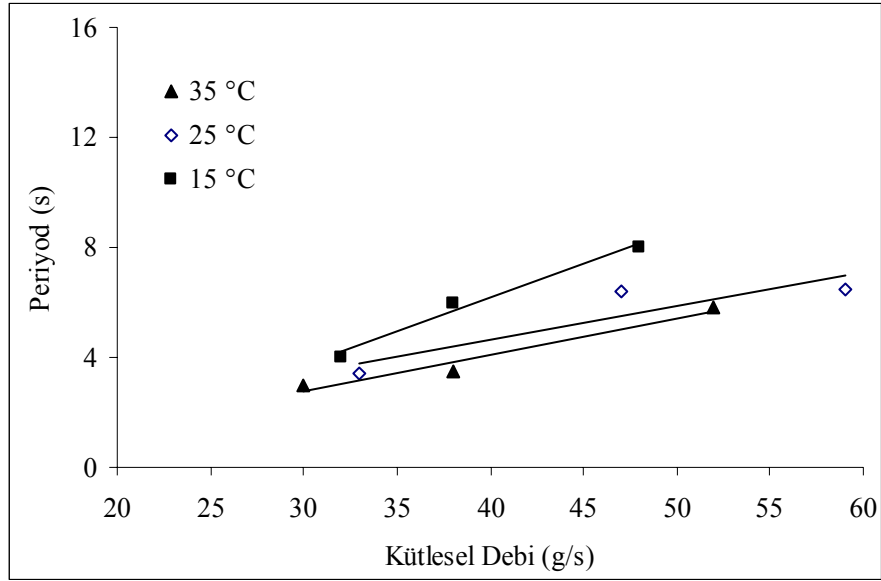
Şekil 4.17. Yoğunluk değişim tipi osilasyonlar ($\dot{m} = 31 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)

Debi azaldığında akışkan partiküllerinin hızı azalacağından osilasyon periyodu artacaktır. Ancak akışkanın ısınma etkileri dikkate alındığında bu sonucun oluşmayacağı görülür. Akışkan hızı tek fazlı sıvı bölgesinde düşük debilerde azalır ancak akışkan partikülleri iki fazlı bölgede daha da hızlanır. Bu iki faktör birlikte düşünüldüğünde bu partiküllerin sistem boyunca hareket etmesi için gerekli zaman kısalmır. Bu etki özellikle yatay sistemlerde daha bir önemlidir. Çünkü buhar fazı borunun içerisinde üst kısımlarda yoğunlaşır ve ısıtma etkisi düşey sistemlerden daha baskındır. Bu nedenlerle yoğunluk dalgası osilasyonunun periyodu, akışkan taneciklerini hızlandıran ısı ile sıvı taneciklerin hızını baskın yapan debi arasında oluşan denge ile belirlenir (Ding 1993).

Girişteki aşırı soğutmanın YDO tip osilasyonların genliklerine etkisi Şekil 4.18’de, periyotlarına etkisi ise Şekil 4.19’da gösterilmiştir. Giriş sıcaklığının azalması yani aşırı soğutma miktarının artması YDO genlik ve periyotlarını artırmaktadır. Giriş sıcaklığının artmasıyla yüksek ve düşük yoğunluklu dalgalar arasındaki yoğunluk farkı azalmakta ve böylece genlik azalmaktadır. Ayrıca giriş sıcaklığının artmasıyla akışkan partikülleri daha uzun olan iki fazlı akış bölgesinde hızlanmakta ve böylece tüm sistem boyunca hareket etme süresi kısalmaktadır (Ding 1993).



Şekil 4.18. Kütlesel debinin yoğunluk değişim tipi osilasyonlarının genliklerine etkisi

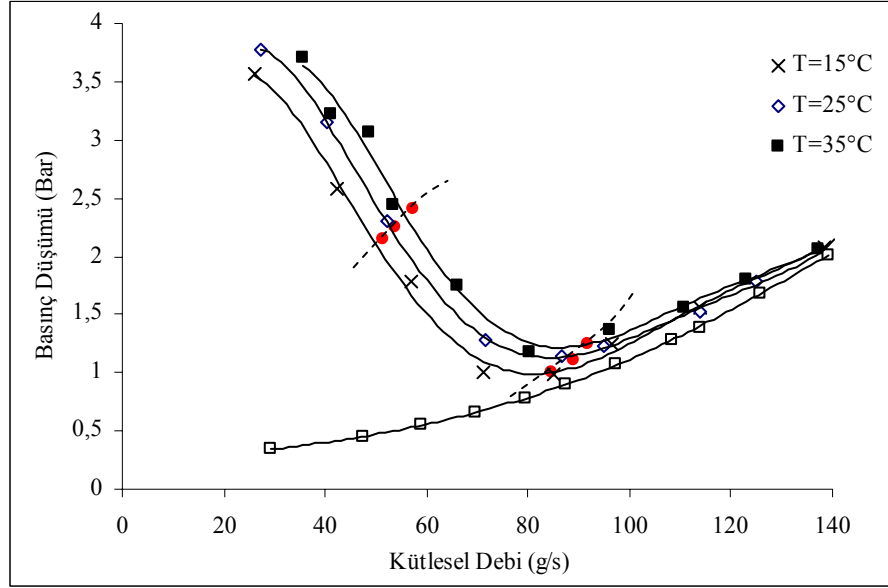


Şekil 4.19. Kütlesel debinin yoğunluk değişim tipi osilasyonlarının periyotlarına etkisi

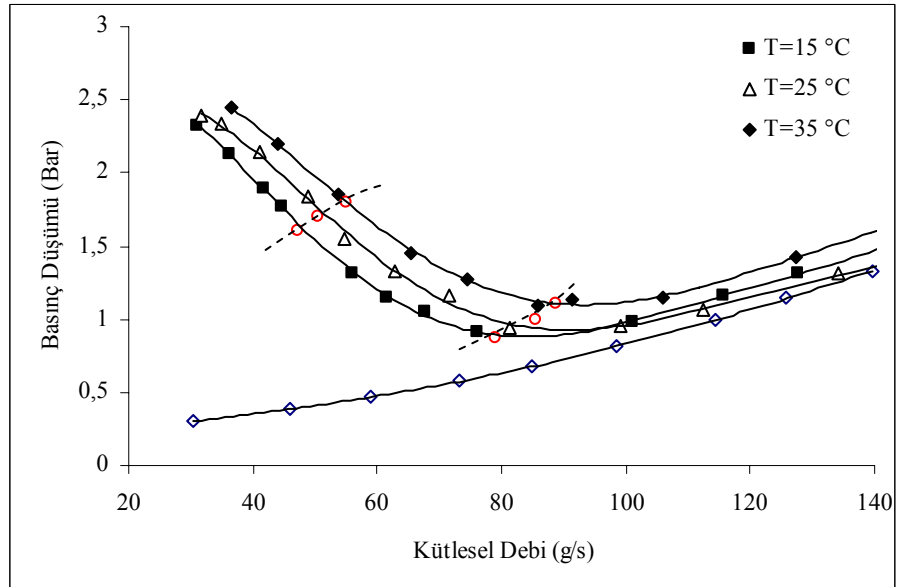
4.2. Isı Transferi İyileştirme Elemanı Kullanan Borulardaki İki Fazlı Akış

4.2.1. Kararlı durum karakteristikleri

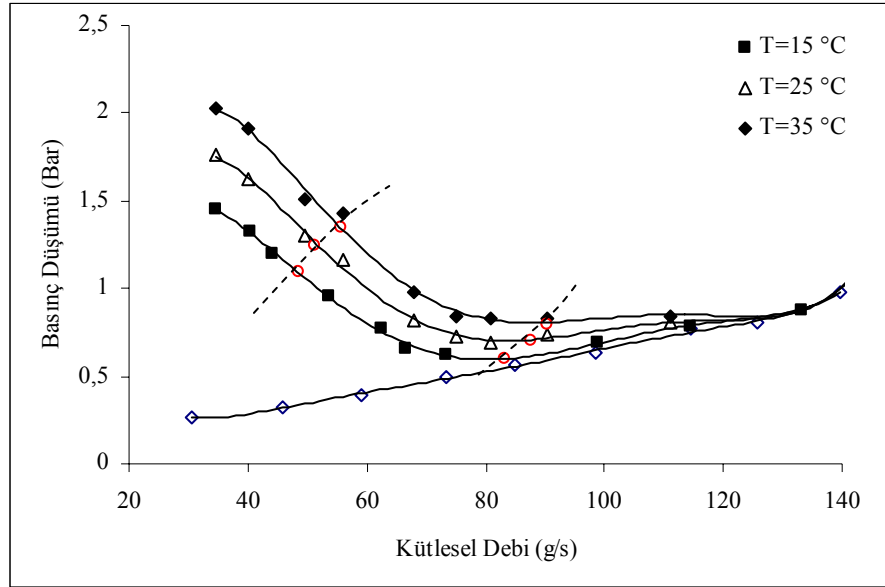
Şekil 4.20-4.22 sırasıyla B, C ve D boruları için kararlı durum karakteristiklerini göstermektedir. Her bir şekilde çeşitli akışkan giriş sıcaklıkları için olan kararlı durum karakteristik eğrileri gösterilmiştir. İki fazlı akışa ait eğrilerin her birisi yatık “S” şeklindedir. Her üç boru için de akışkanın giriş sıcaklığının azalmasıyla yani aşırı soğutma seviyesinin artmasıyla kaynamanın başladığı noktanın daha düşük kütlesel debilere doğru kaydığı görülmektedir. Ayrıca her üç boru için de iki fazlı bölgede belirli bir kütlesel debi değerinde giriş sıcaklığı arttıkça basınç düşümünün arttığı gözlenmektedir.



Şekil 4.20. Boru B için kararlı durum karakterine aşırı soğutmanın etkisi



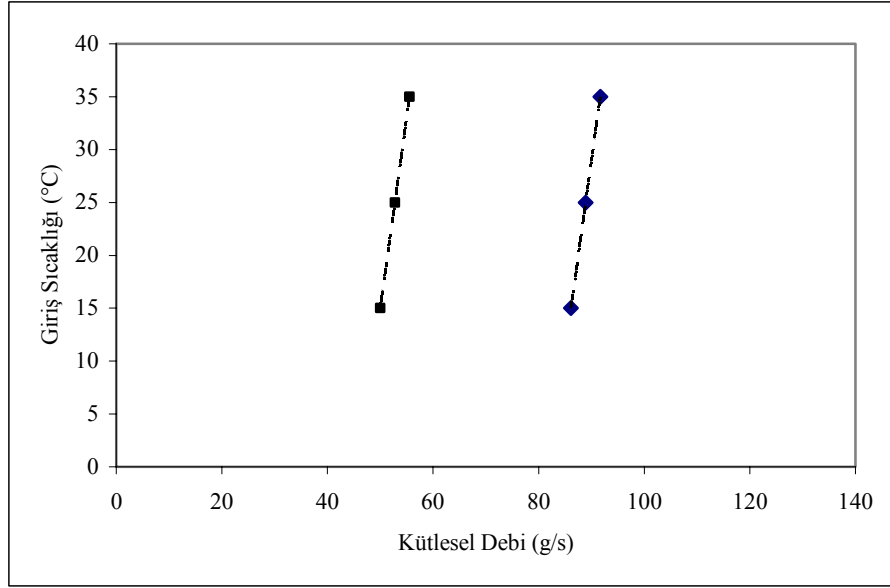
Şekil 4.21. Boru C için kararlı durum karakterine aşırı soğutmanın etkisi



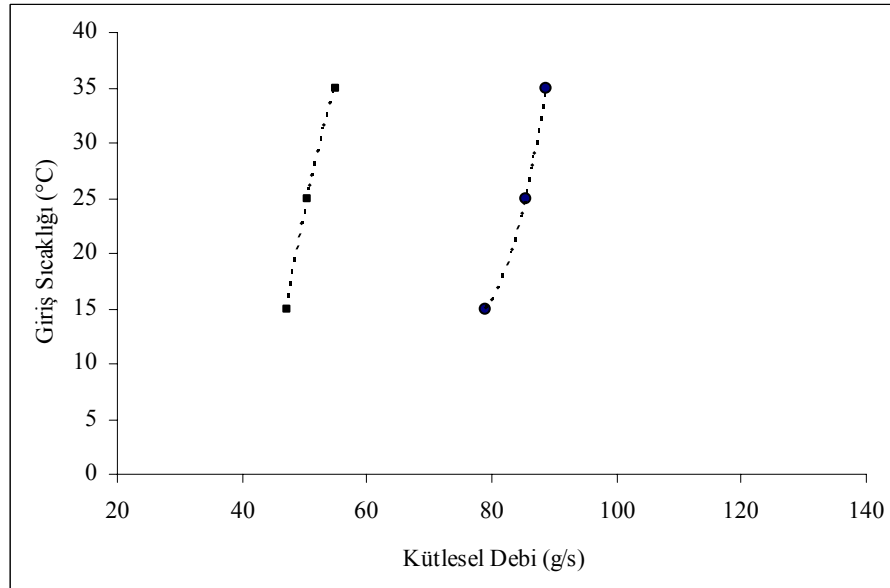
Şekil 4.22. Boru D için kararlı durum karakterine aşırı soğutmanın etkisi

4.2.2. Osilasyon Sınırları

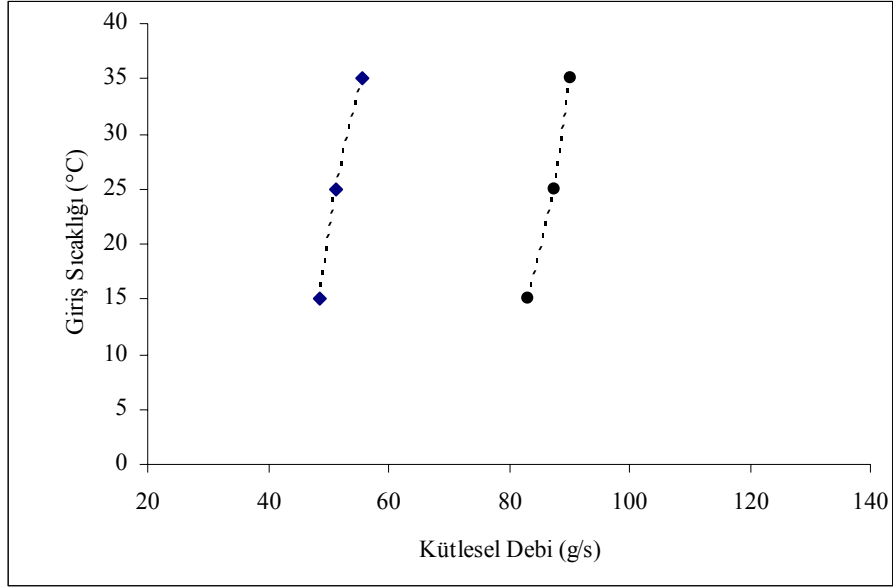
Şekil 4.23-4.25'de sırasıyla B, C ve D boruları için osilasyon sınırları gösterilmiştir. Deneyler esnasında her üç boru için de BDO, YDO ve TO olmak üzere üç farklı tip osilasyon gözlemlenmiştir. B borusu için osilasyon sınırlarının giriş sıcaklığıyla değişimi Şekil 4.23'de, C borusu için Şekil 4.24'de, D borusu için Şekil 4.25'de gösterilmiştir. Osilasyon sınırları ayrıca Şekil 4.20-4.22'de de kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Şeklin sağ tarafındaki sınırlar BDO tipi osilasyonların başlama noktalarını, sol taraftaki sınırlar ise BDO'nun bitiş noktalarını göstermektedir. Şekillerin incelenmesi her üç boru için de giriş sıcaklığının azalmasıyla BDO'nun başlangıcının daha düşük debilere doğru kaydığını göstermektedir. Ayrıca her üç boru için de BDO'nun bitiş noktaları da daha düşük debilere doğru kaymaktadır.



Şekil 4.23. Boru B için osilasyon sınırları



Şekil 4.24. Boru C için osilasyon sınırları



Şekil 4.25. Boru D için osilasyon sınırları

4.2.3. Basınç Düşümü Osilasyonları

Şekil 4.26, 4.27 ve 4.28’de sırasıyla B, C ve D borularına ait örnek basınç düşümü osilasyonları gösterilmiştir. Her üç boruda da BDO tip osilasyonlar oluşmuş ve bu osilasyonlar giriş basıncı, alt ve üst cidar sıcaklığı ile kütlesel debide büyük genlikli çalkantılara neden olmuşlardır. BDO osilasyonları her üç boru için de kararlı durum karakteristik eğrisinin negatif eğimli bölgesinde oluşmuştur. Her üç boruda da giriş basıncında gözlemlenen osilasyonlarla beraber kütlesel debide de osilasyonlar gözlemlenmiştir. Ayrıca her üç boru için de üst cidar sıcaklıklarının genlikleri alt cidar sıcaklık genliklerinden daha büyük olmuştur.

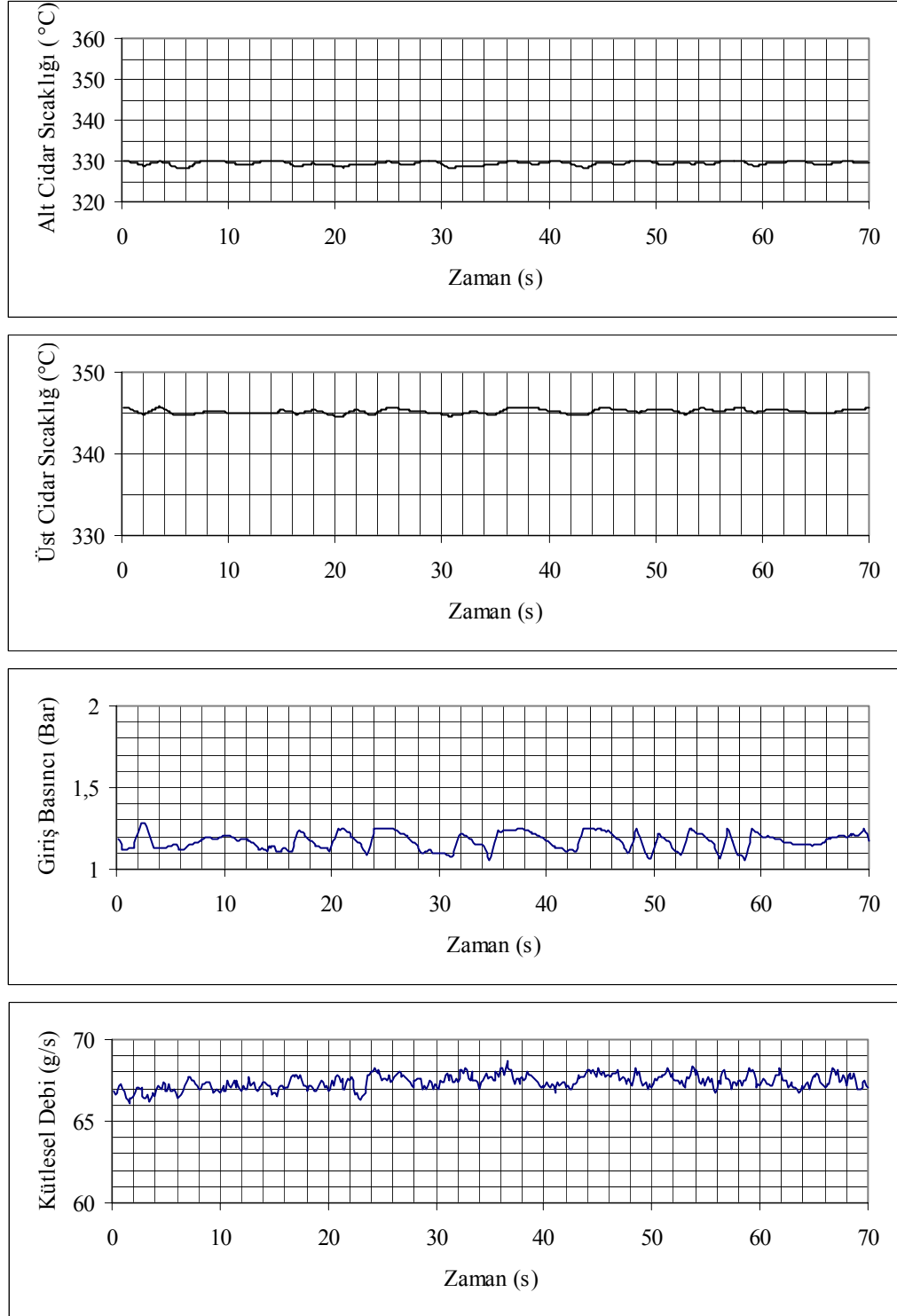
Şekil 4.29-4.30’da B borusu için BDO genlik ve periyotlarının kütlesel debiyle değişimi, Şekil 4.31-4.32’de C borusu için BDO genlik ve periyotlarının kütlesel debiyle değişimi, Şekil 4.33-4.34’de D borusu için BDO genlik ve periyotlarının kütlesel debiyle değişimi gösterilmiştir. Görüldüğü gibi tüm boru tiplerinde kütlesel debi azaldıkça osilasyon genlikleri ve periyotları azalmaktadır. Şekillerin

incelenmesinden tüm borular için giriş sıcaklığının azalmasıyla genliklerin ve periyotların arttığı da görülmektedir.

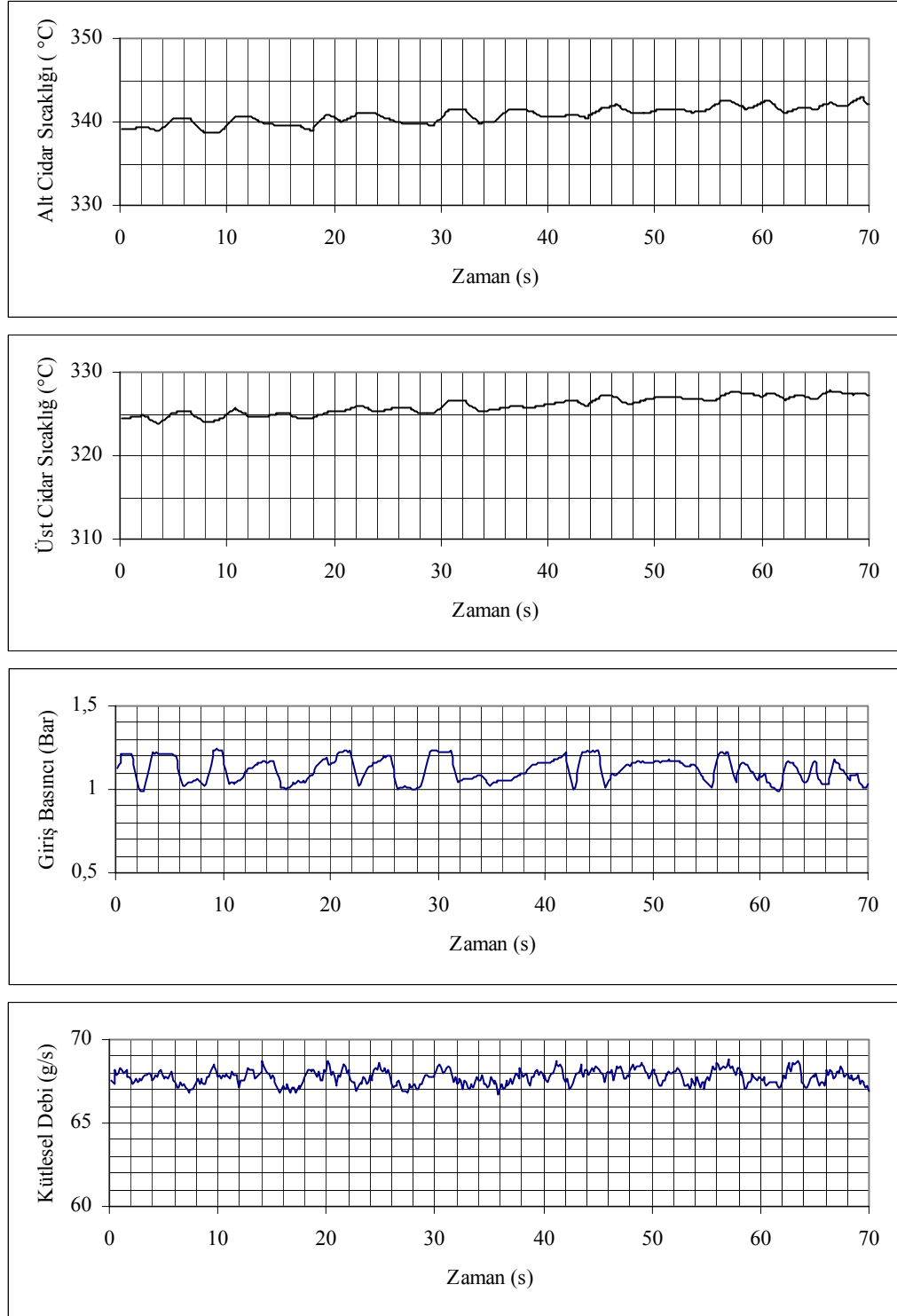
4.2.4. Yoğunluk Değişim Tipi Osilasyonlar

Şekil 4.35, 4.36 ve 4.37’de sırasıyla B, C ve D borularına ait örnek YDO tipi osilasyonlar gösterilmiştir. Her üç boruda da YDO tip osilasyonlar oluşmuştur. Giriş basıncı, alt ve üst cidar sıcaklığı ile kütleli debide oluşan bu osilasyonların incelenmesinden de anlaşılabacağı gibi oluşan YDO osilasyonlarının genlik ve periyotları BDO osilasyonlarınkine göre daha düşüktür. YDO osilasyonları her üç boru için de kararlı durum karakteristik eğrisinin negatif eğimli bölgesinde önce BDO tip osilasyonlarla birlikte oluşmuş daha sonra BDO tip osilasyonların bitmesiyle saf YDO osilasyonları başlamıştır. Her üç boruda da giriş basıncında gözlemlenen osilasyonlarla beraber kütleli debide de osilasyonlar gözlemlenmiştir.

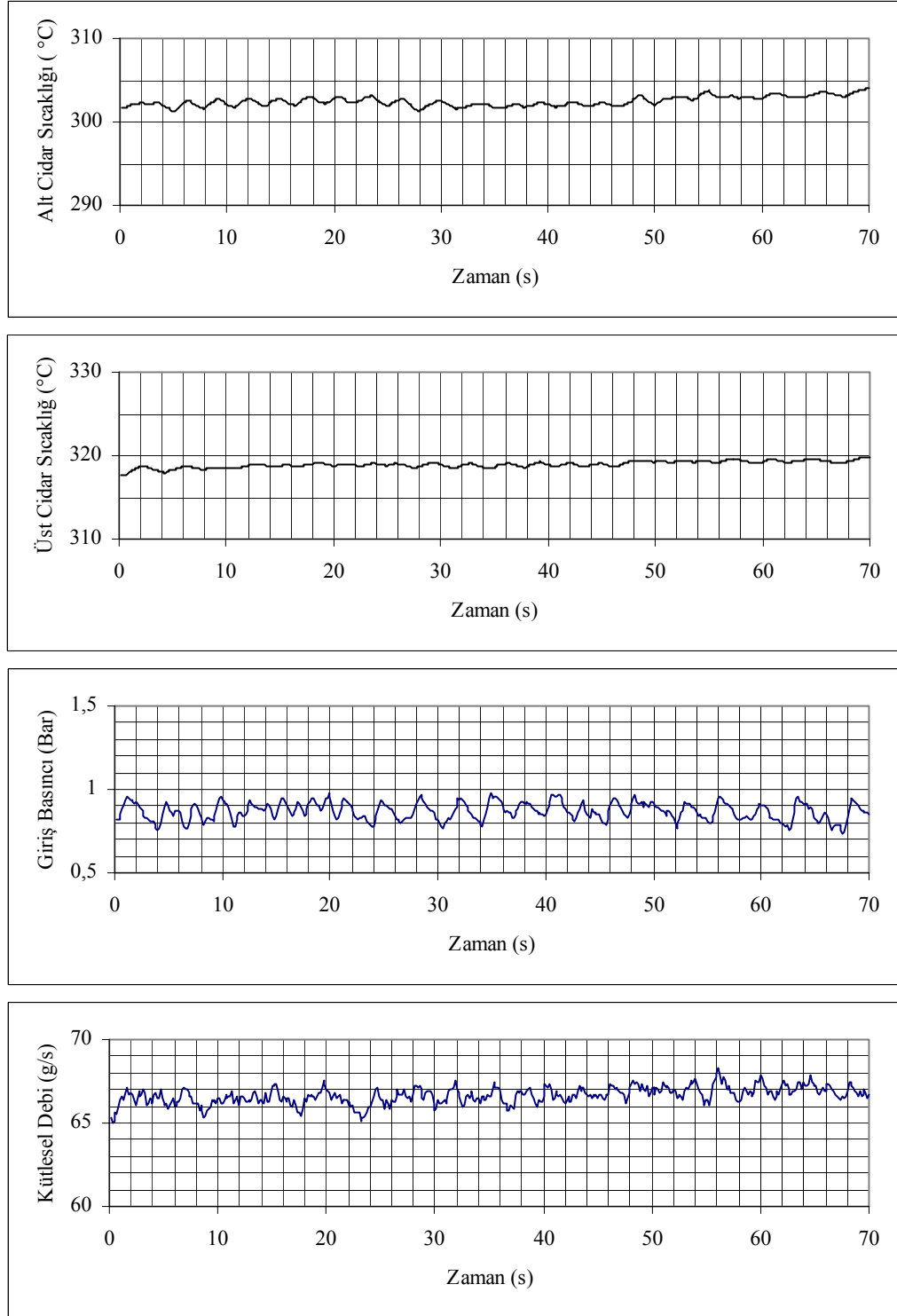
Şekil 4.38-4.39’da B borusu için YDO genlik ve periyotlarının kütleli debiyle değişimi, Şekil 4.40-4.41’de C borusu için YDO genlik ve periyotlarının kütleli debiyle değişimi, Şekil 4.42-4.43’de D borusu için YDO genlik ve periyotlarının kütleli debiyle değişimi gösterilmiştir. Şekillerden her üç boru içinde kütleli debiyi azaltmanın genlikleri ve periyotları azalttığı görülmektedir. Ayrıca tüm borular için giriş sıcaklığının azalmasıyla genliklerin ve periyotlarının arttığı tespit edilmiştir.



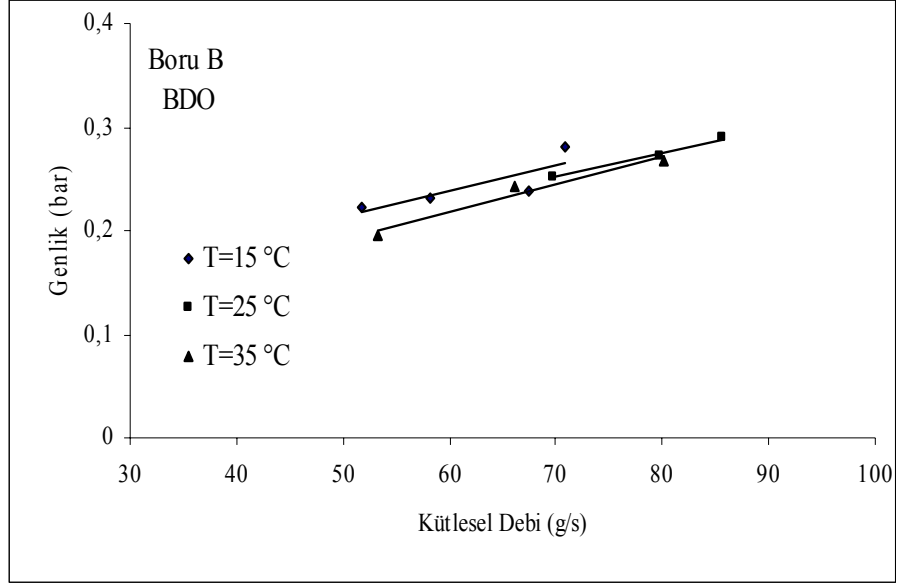
Şekil 4.26. B borusu için basınç düşümü tipi osilasyonlar ($\dot{m} = 67 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)



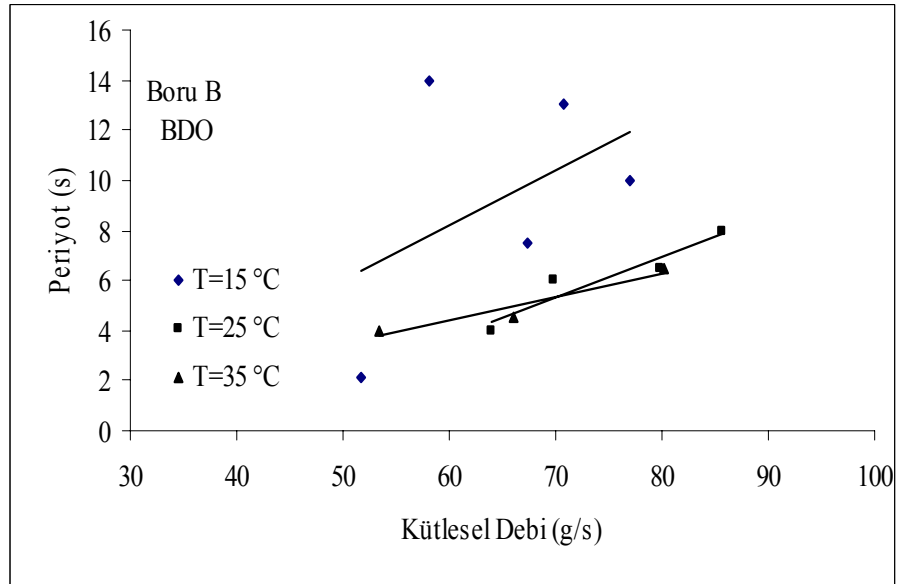
Şekil 4.27. C borusu için basınç düşümü tipi osilasyonlar ($\dot{m} = 67 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)



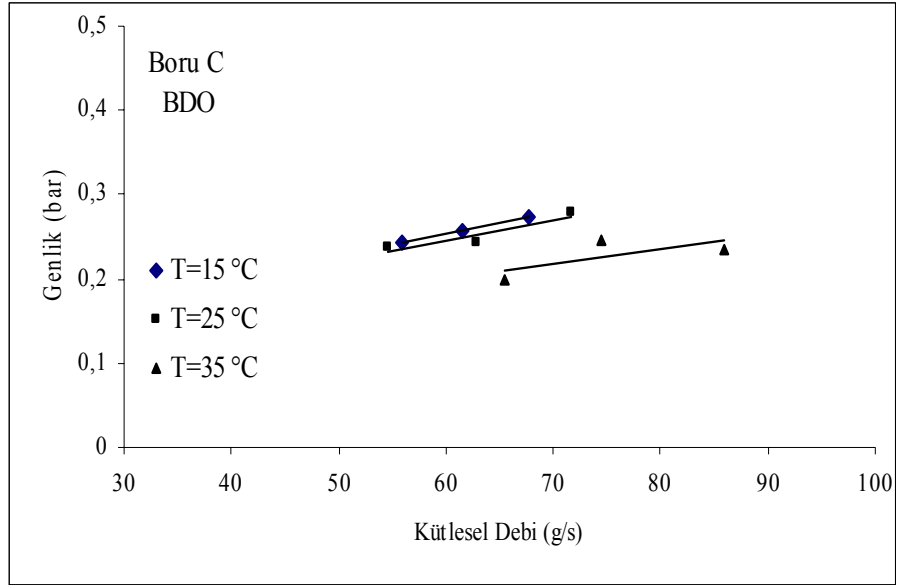
Şekil 4.28. D borusu için basınç düşümü tipi osilasyonlar ($\dot{m} = 66 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)



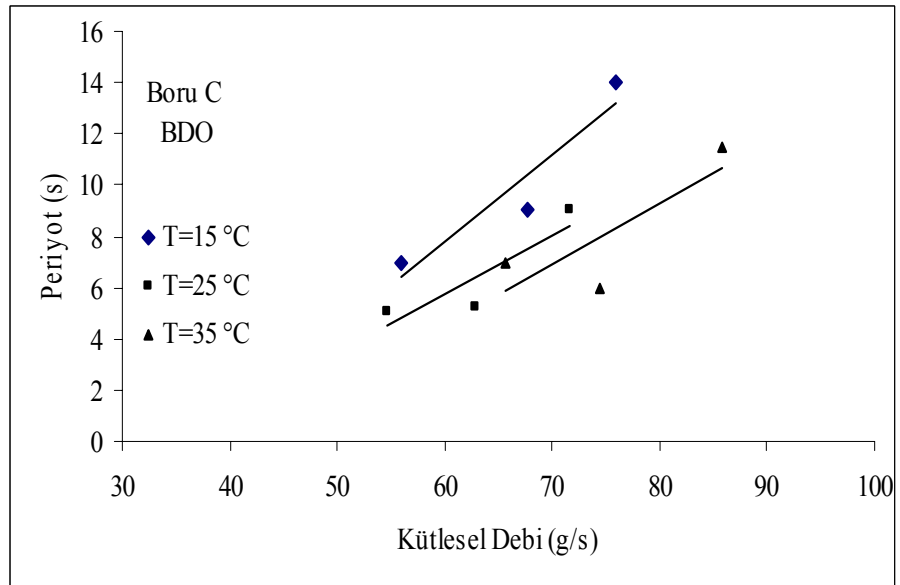
Şekil 4.29. B borusu için BDO genliklerinin kütleli debiyle değişimi



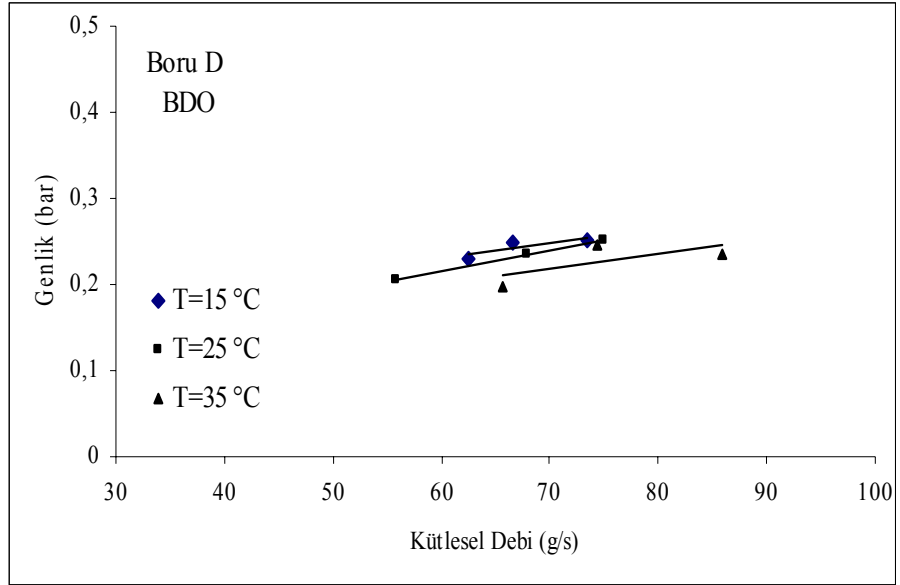
Şekil 4.30. B borusu için BDO periyotlarının kütleli debiyle değişimi



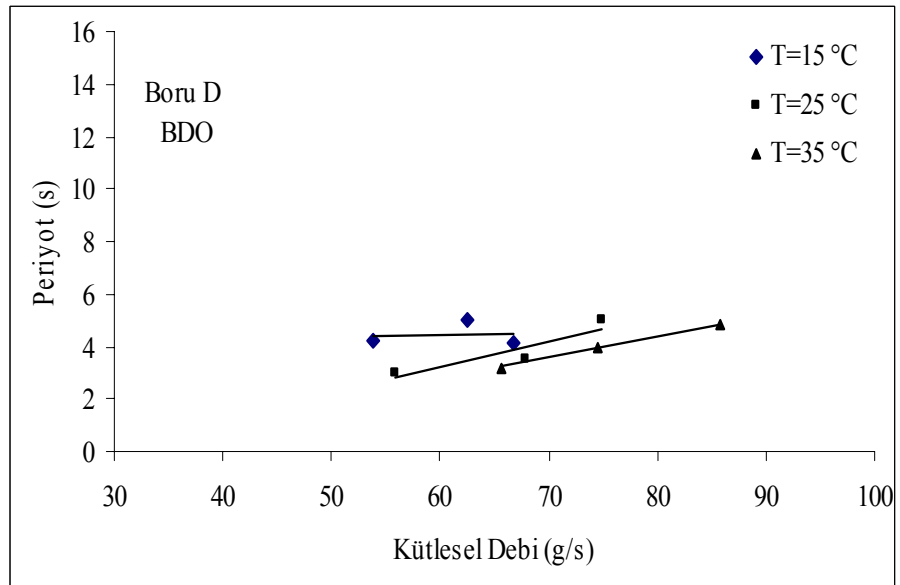
Şekil 4.31. C borusu için BDO genliklerinin kütleli debiyle değişimi



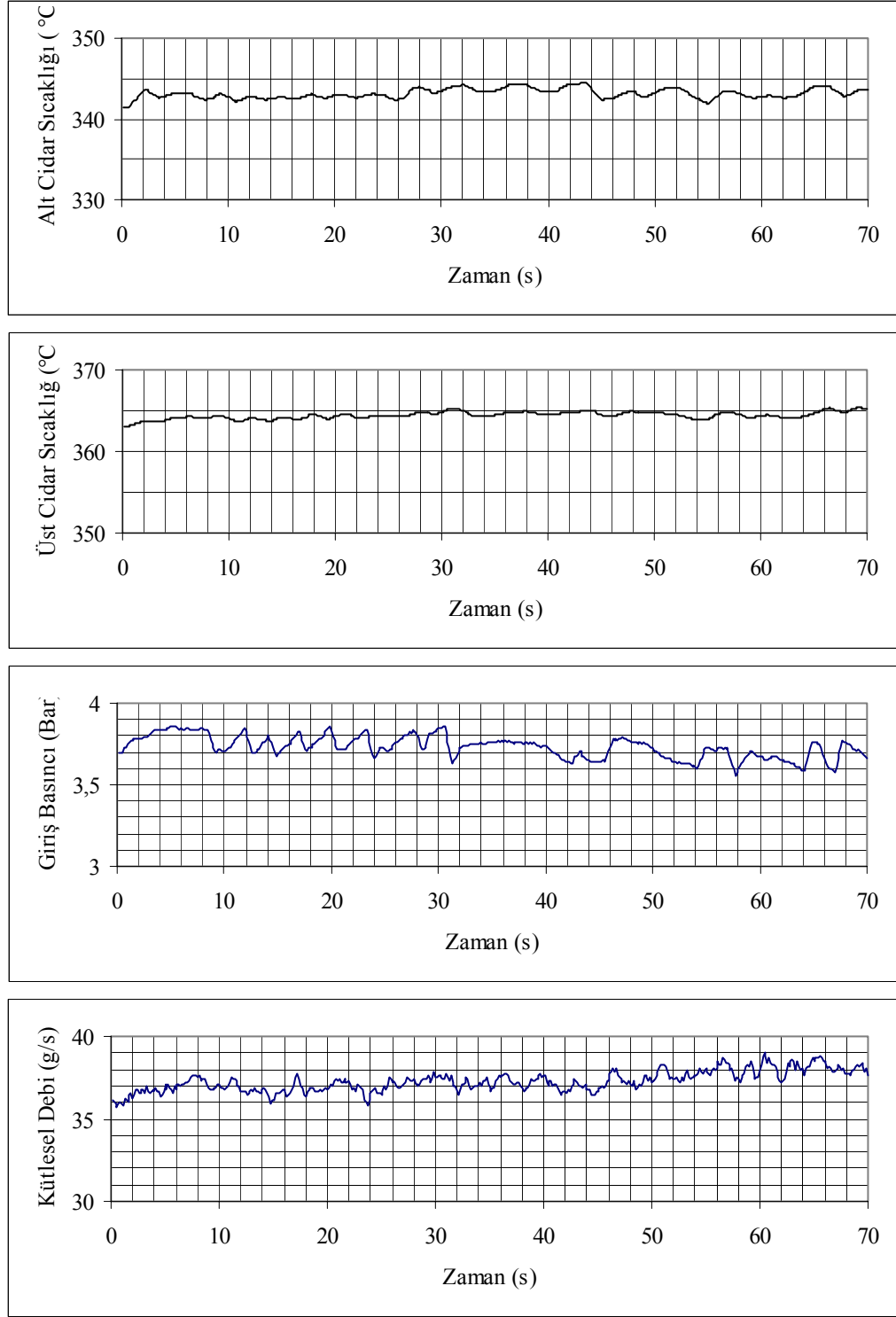
Şekil 4.32. C borusu için BDO periyotlarının kütleli debiyle değişimi



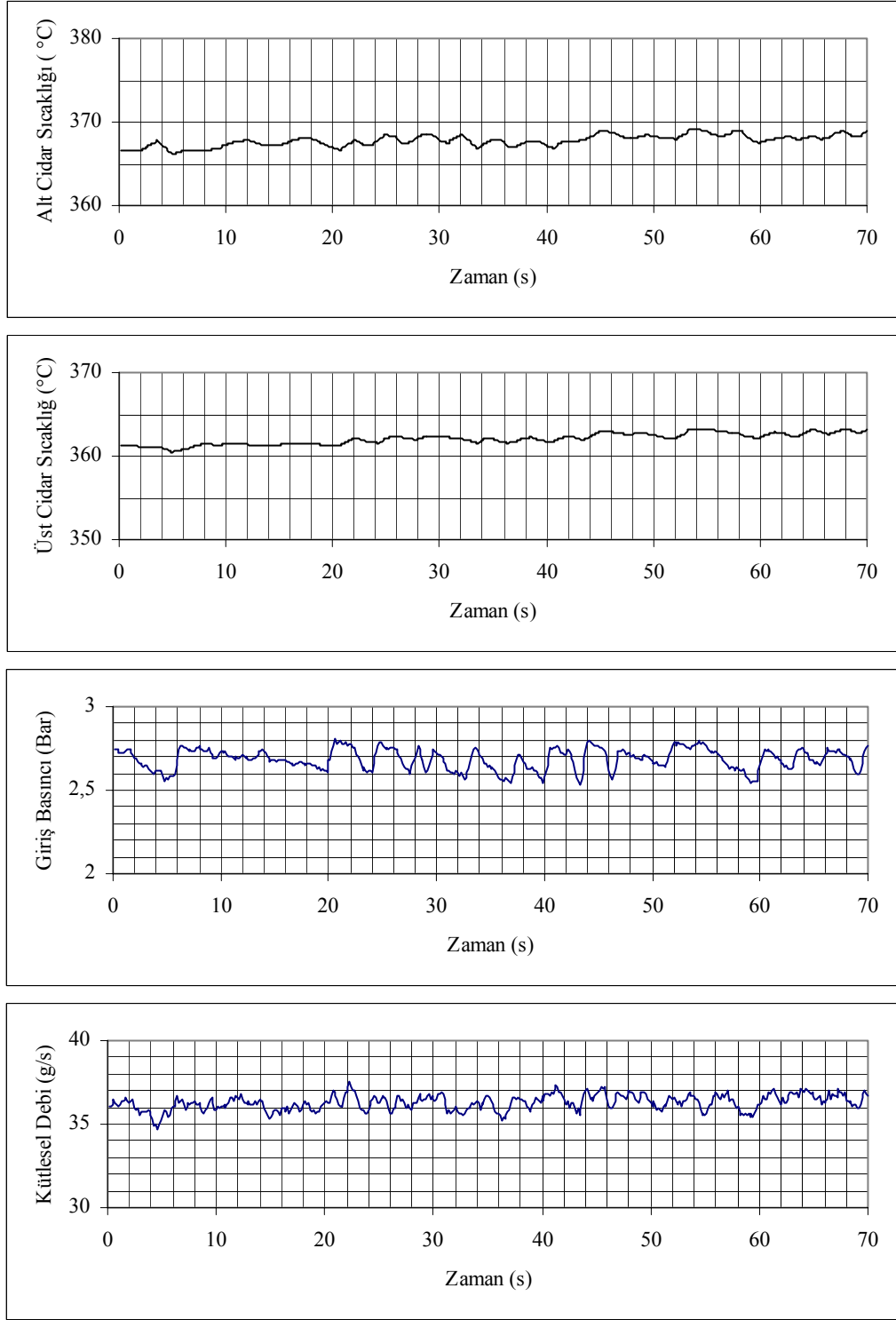
Şekil 4.33. D borusu için BDO genliklerinin kütlelel debiyle değişimi



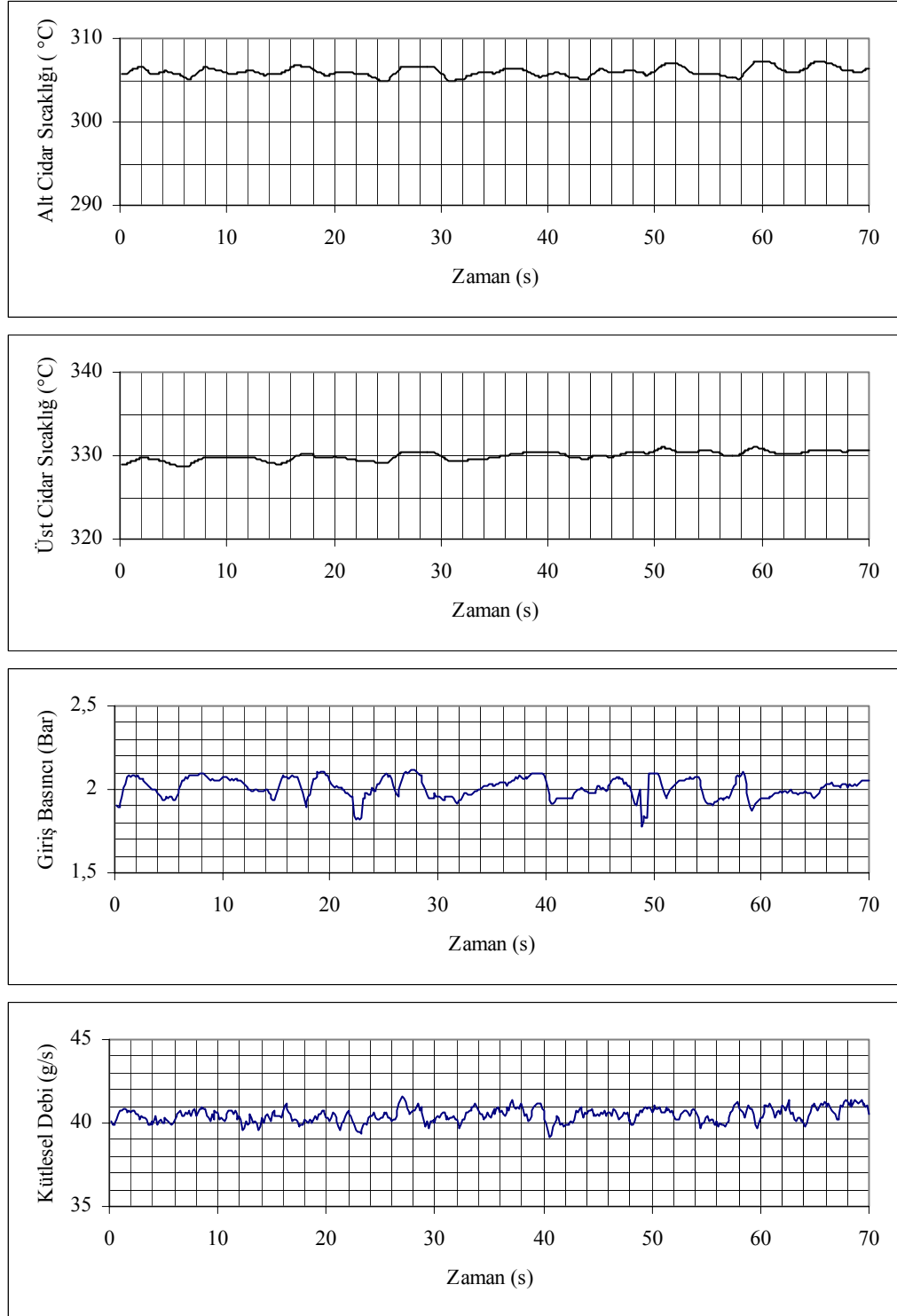
Şekil 4.34. D borusu için BDO periyotlarının kütlelel debiyle değişimi



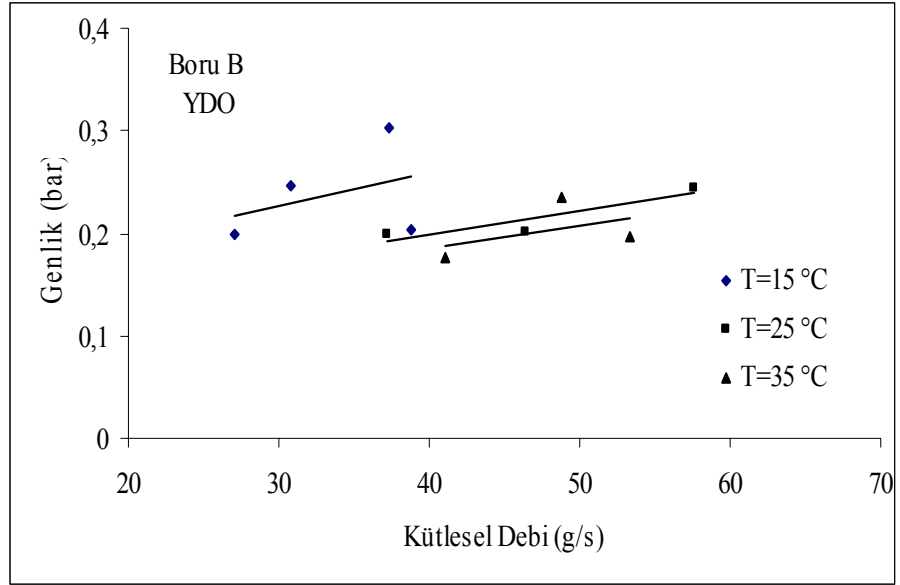
Şekil 4.35. B borusu için yoğunluk değişim tipi osilasyonlar ($\dot{m} = 37 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)



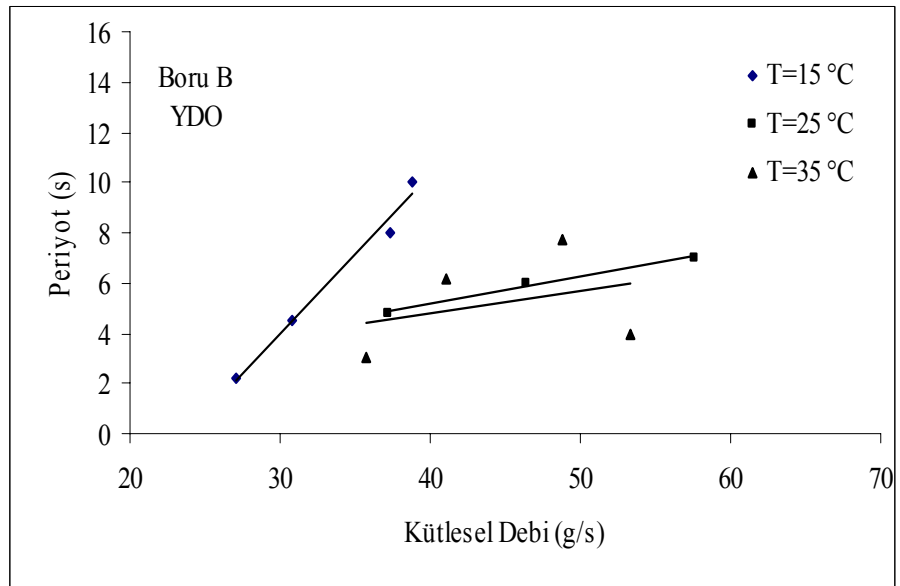
Şekil 4.36. C borusu için yoğunluk değişim tipi osilasyonlar ($\dot{m} = 36 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)



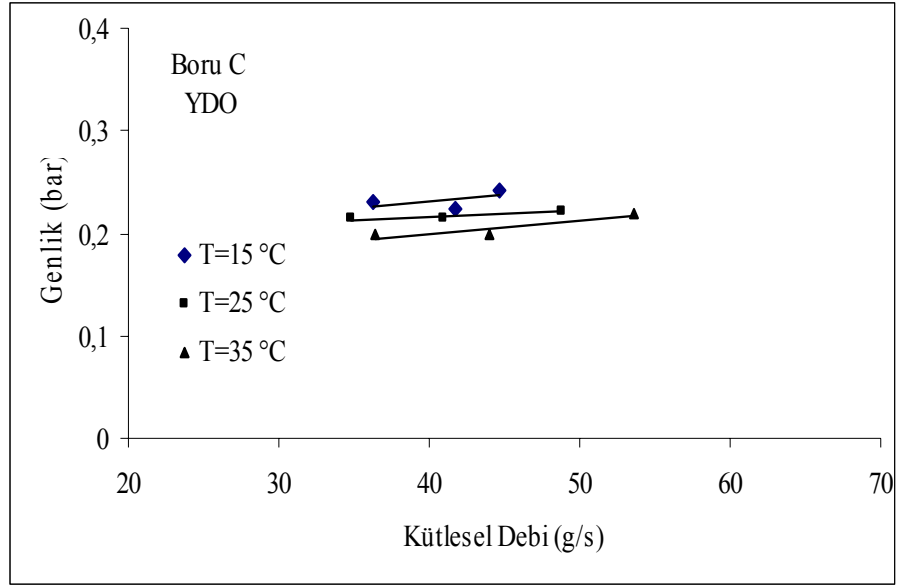
Şekil 4.37. D borusu için yoğunluk değişim tipi osilasyonlar ($\dot{m} = 40 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)



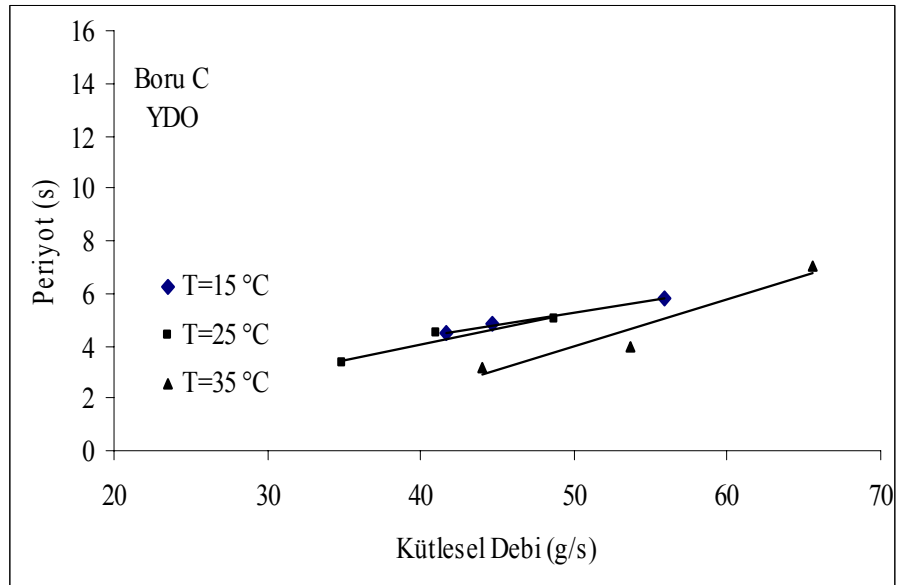
Şekil 4.38. B borusu için YDO genliklerinin kütleli debiyle değişimi



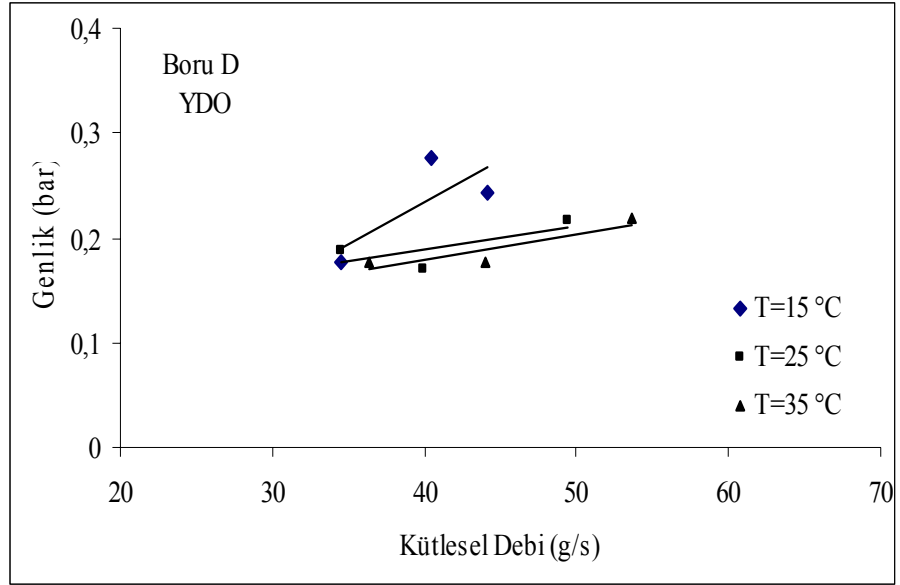
Şekil 4.39. B borusu için YDO periyotlarının kütleli debiyle değişimi



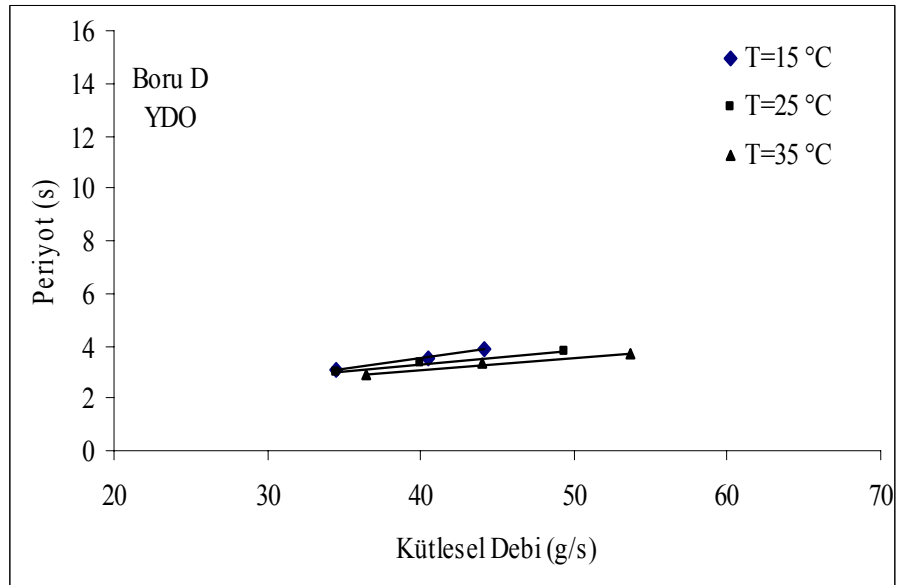
Şekil 4.40. C borusu için YDO genliklerinin kütleli debiyle değişimi



Şekil 4.41. C borusu için YDO periyotlarının kütleli debiyle değişimi



Şekil 4.42. D borusu için YDO genliklerinin kütleli debiyle değişimi



Şekil 4.43. D borusu için YDO periyotlarının kütleli debiyle değişimi

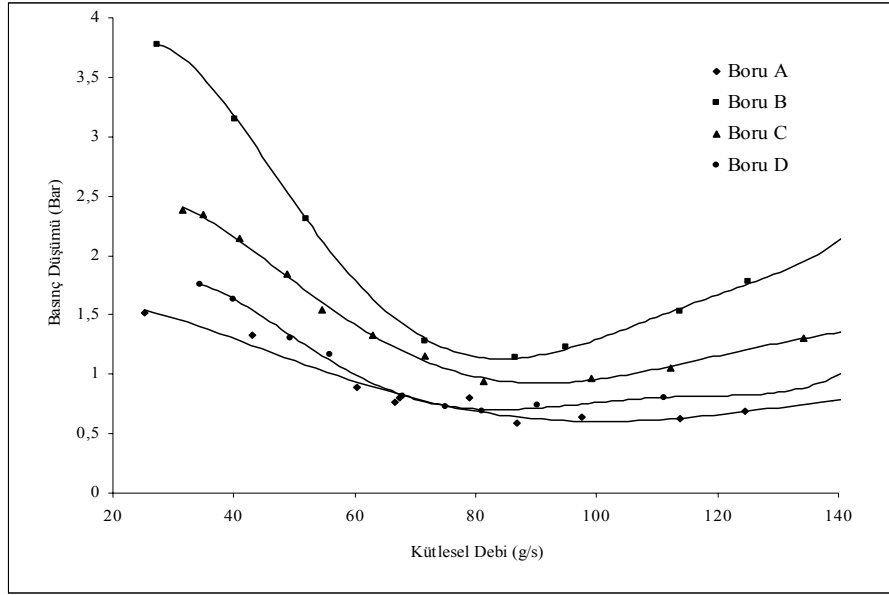
4.3. Isı Transfer İyileştirme Yöntemlerinin İki Fazlı Akış Karakteristikleri Açısından Karşılaştırılması

Şekil 4.44’de boruların kararlı durum karakteristik eğrileri karşılaştırılmıştır. Tüm karakteristik eğriler çalışılan tüm giriş sıcaklıkları, ısı güçleri, çıkış kısıtlayıcısı ve boru konfigürasyonları için yatık “S” şeklindedir. Çalışılan deneysel koşullarda eğriler genellikle birbirini kesmemektedir. Şeklin incelenmesi iki fazlı akış için olan basınç düşümü karakteristiklerinin tek fazlı akış için olanla aynı karakterde olduğunu göstermektedir. Yani iki fazlı bölgede de en yüksek basınç düşümü iç yay içeren B ve C borusunda, en düşük basınç düşümü ise boş boruda meydana gelmiştir. İç yay içeren borularda ise adımı düşük olan B borusu adımı yüksek olan C borusundan daha yüksek basınç düşümü oluşturmuştur. Ayrıca şekilden iyileştirme elemanı kullanan borulardaki basınç düşümünün özellikle düşük kütleli debilerde çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni katmanlaşma olayı olabilir. Çünkü katmanlaşma oluştuğunda sürtünme basınç düşümünün yanında yüksek buhar yoğunluğunun neden olduğu ilave basınç düşümü meydana gelmektedir. Menten *et al.* (1983) altı yüzey konfigürasyonunun kullanıldığı dikey yukarı akışlı kaynamalı bir kanalda, Widmann *et al.* (1994, 1995) farklı üç yüzey konfigürasyonunun kullanıldığı yatay bir boruda, Karlı *et al.* (2002) farklı beş yüzey konfigürasyonunun kullanıldığı yatay bir boruda benzer davranışların oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Tüm araştırmacılar ısı transfer iyileştirme elemanlı boruları boş boru ile karşılaştırmışlar ve kararlı durum karakteristik diyagramında boş boruya ait karakteristik eğrinin daima en altta olduğunu bulmuşlardır. Yine aynı araştırmacılar iyileştirme elemanı kullanan yatay borularda özellikle düşük kütleli debilerde karakteristik durum eğrisinin yerel maksimum noktası civarlarında katmanlaşma oluştuğunu bulmuşlardır.

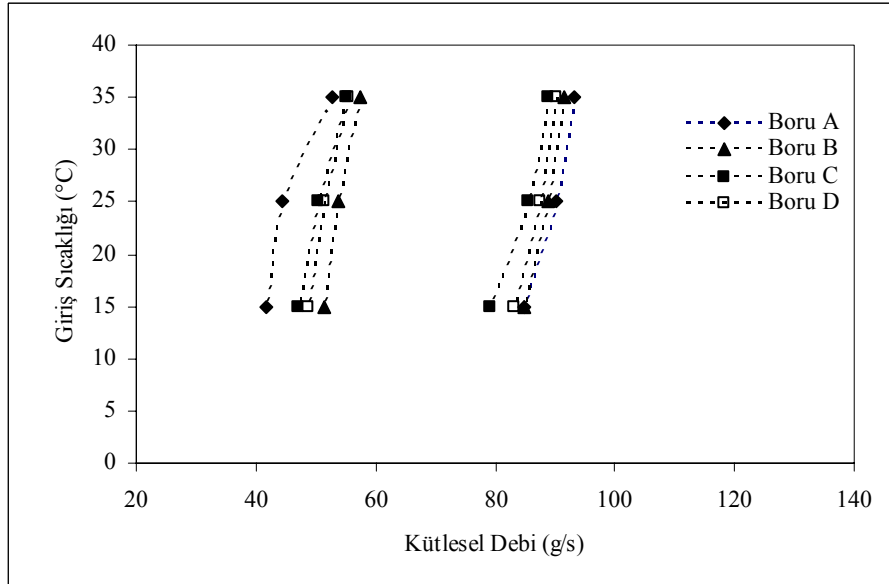
Şekil 4.45’de borular osilasyon sınırları açısından karşılaştırılmıştır. Şekildeki sağ tarafta bulunan sınırlar BDO osilasyonlarının başlangıcını, sol taraftaki sınırlar ise BDO osilasyonlarının bitip saf YDO osilasyonlarının başladığı sınırları göstermektedir. Şeklin incelenmesi ısı transfer iyileştirme elemanlarının osilasyonların davranışına

önemli derecede etki yaptığını göstermektedir. Tüm borularda akışkan giriş sıcaklığı azaldıkça BDO'nun başlama noktası daha düşük kütleli debilere doğru kaymaktadır. Bu ise giriş aşırı soğutma miktarını artırmanın tüm borular için akışı daha kararlı hale getirdiği anlamına gelmektedir. Ayrıca BDO bitiş sınırları da kütleli debi azaldıkça daha düşük kütleli debilere kaymaktadır. Böylece tüm borular için olan stabilite sınır eğrilerinin giriş sıcaklığı bazında benzer davranışlar sergilediği ifade edilebilir. İyileştirme elemanı kullanılan borularda BDO boş boruya göre daha düşük debilerde başlamaktadır. Şekilde en soldaki eğri yine boş boruya aittir. Başka bir deyişle boş boru için olan BDO en erken başlayıp en son bitmekte ve böylece şekilde en fazla alanı kaplamaktadır. Başka bir deyişle iyileştirme elemanı kullanan borulardaki BDO'nun boş borudan daha az bir alanı kapladığı söylenebilir. İyileştirme elemanı kullanılan borularda BDO karakteristik eğrinin hemen hemen ortalarında biterken, boş boruda ise negatif eğimli bölgenin yerel maksimum noktalarına yakın yerlerde bitmektedir. Kesikli çizgilerle gösterilen bu iki eğri arasında BDO genellikle YDO ile birlikte oluşmaktadır. Bu bölge ne kadar büyük olursa osilasyonlar o kadar uzun sürmekte ve akış o kadar az kararlı olmaktadır. Şekilden de görüldüğü gibi kütleli debi bölgesini en az kaplayan boru, içerisinde bükülmüş şerit bulunan D borusudur. Bu ise D borusunun en kararlı olduğu anlamına gelmektedir. En kararsız boru ise şekilde kütleli debi bölgesini en çok kaplayan boş borudur. İç yay elemanı kullanan borular kendi aralarında karşılaştırıldığında ise adımı küçük olan yaya sahip B borusunun C borusundan daha kararlı olduğu görülür. Borular kararlılık açısından en yüksek kararlılığa sahip olandan en düşük kararlılığa sahip olana doğru sıralandığında Boru-D, Boru-C, Boru-B ve Boru-A sıralaması elde edilir.

B borusunun efektif çapı 9.56 mm, C borusunun 12.46 mm ve D borusunun ise 12.53 mm'dir. Şekil 4.75 ve Çizelge 4.1'den en kararsız borunun B borusu en kararlı borunun ise D borusu olduğu görülmektedir. Bu ise efektif çapın artmasıyla kararlılığın arttığı anlamına gelmektedir. Bu nedenle ısı transfer iyileştirme elemanlarının kullanıldığı borularda efektif çap arttığında kararlılığın arttığı söylenebilir.



Şekil 4.44. Boruların kararlı durum karakteristiklerinin karşılaştırılması



Şekil 4.45. Boruların osilasyon sınırlarının karşılaştırılması

Çizelge 4.1. Boru yüzey konfigürasyonlarının kararlılık açısından karşılaştırılması

	Boru-A	Boru-B	Boru-C	Boru-D
Eşdeğer çap (d_e)^a	****	*	**	***
Tek fazlı basınç düşümü^b	*	****	***	**
Stabilite sınırları^c	**** (en kararsız)	***	**	* (en kararlı)
BDO periyodu^d	****	***	**	*
BDO genliği^d	***	***	**	*
YDO periyodu^d	***	**	****	*
YDO genliği^d	****	*	**	***

a “*” sayısı arttıkça efektif çap artar.

b “*” sayısı arttıkça tek fazlı basınç düşümü artar.

c “*” sayısı arttıkça efektif çap artar BDO’nun başlangıcı ve bitişi arasındaki mesafe artar.

d “*” sayısı arttıkça osilasyonların genlik ve periyodu artar.

Literatürde bu konuyla ilgili yapılan araştırmalara bakıldığında bazı noktalarda birbirine benzer bazı noktalarda ise farklı sonuçların bulunduğu görülür. Widmann *et al.* (1994, 1995) yatay boru sisteminde üç farklı yüzey konfigürasyonu kullanarak yaptıkları araştırmada iç yay elemanı kullanan borudaki BDO tip osilasyonların boş borudakine göre daha yüksek kütleli debi bölgesini kapladığı ve bu nedenle daha kararsız olduğunu belirlemişlerdir. Widman’a göre iyileştirme elemanı kullanan borular boş boruya göre daha az katmanlaşma oluşturmaktadır. İyileştirme elemanı kullanan borulardaki katmanlaşma boş boruya göre daha düşük debilerde başlamaktadır. Boru içerisine yerleştirilen ısı transfer iyileştirme elemanları türbülansa neden olmakta ve böylece sıvıyı karıştırmaktadır. Bu karışma sonucunda daha soğuk olan sıvı boru yüzeyine temas etmekte ve katmanlaşmayı geciktirmektedir. Menten *et al.* (1983) düşey borularda altı farklı yüzey konfigürasyonu kullandıkları çalışmada iç yay içeren boruların karakteristik diyagramda en dar bölgeyi kapladığını ve dolayısıyla altı tip konfigürasyon arasından en kararlı olduğunu bulmuşlardır. Başka bir ifadeyle iç yay içeren borular boş boru, pürüzlü boru ve yüzey kaplamalı borudan daha kararlı bulunmuştur. Menten *et al.* “iç yayı sahip borularda efektif çap azaldıkça kararlılık artar, ancak diğer borular için böyle bir genelleştirme yapılamaz” sonucuna varmışlardır. Karalı *et al.* (2002) beş farklı yüzey konfigürasyonu kullandıkları çalışmalarında iyileştirme elemanlarının kullanıldığı dört borunun da karakteristik

diyagramda boş boruya göre daha fazla bölge kapladığını tespit etmişlerdir. Boş borunun en kararlı iç yay içeren boruların ise en kararsız olduğu, diğer iki tip iyileştirme elemanı içeren boruların ise kararlılık açısından boş boru ile iç yaylı borular arasında kaldığını gözlemlemişlerdir. İç yaylı borular kendi aralarında karşılaştırıldığında büyük adımlı yay içeren borunun küçük adımlı yay içeren boruya göre daha kararsız olduğu tespit edilmiştir. Karşlı et al. (2002) çalıştıkları ısı transfer yüzey konfigürasyonlarını iç yay ve halkasal elemanlar şeklinde iki temel grup olarak düşünmüş ve her bir ısı transferi iyileştirme elemanları kendi grupları içerisinde değerlendirildiğinde efektif çapın azalmasıyla kararlılığın arttığını tespit etmişlerdir. Görüldüğü gibi ısı transfer iyileştirmesinin iki fazlı kararsızlık karakteristiklerine etkisini inceleyen araştırmaların sonuçlarının bazı noktalarda birbirleriyle çeliştiği görülmektedir. Bu farklılıklar bu çalışmalarda akışkan tiplerinin (su ve R11), boru oryantasyonlarının (yatay ve düşey) ve ısı transfer iyileştirme elemanları tiplerinin farklı olmasından kaynaklanmakta olabilir. Bununla birlikte bu çalışma dahil araştırmacıların birbirleriyle çelişmeyen aşağıdaki sonuçlarının topluca vurgulanması önem kazanmaktadır:

1. İç yaylı borularda adım arttıkça kararsızlık artmaktadır.
2. İç yaylı borularda efektif çap azaldıkça kararlılık artmaktadır.
3. Giriş sıcaklığını artırmak akışkanın daha yüksek kütleli debilerde kaynamasına yol açmakta ve belirli bir kütleli debi değerinde giriş sıcaklığı arttıkça basınç düşümü artmaktadır.

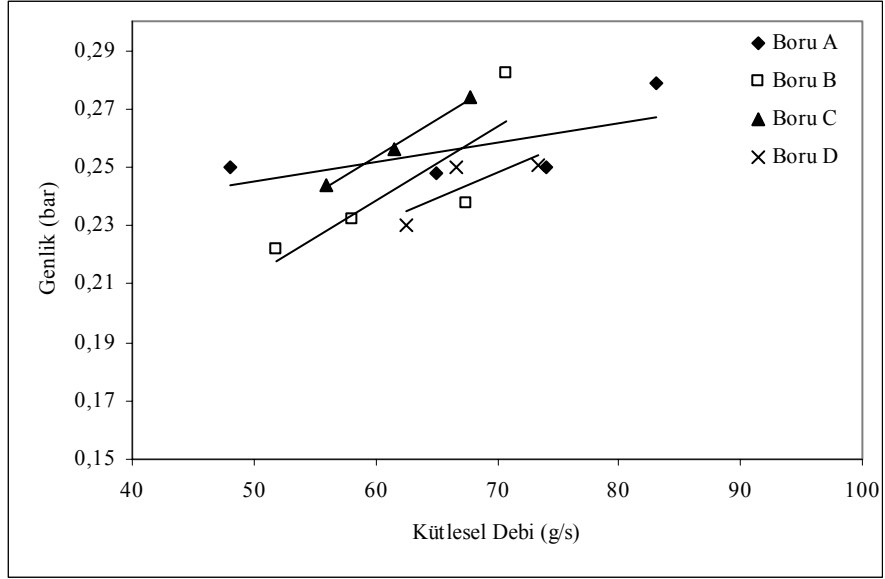
Tüm borularda $T_g=15$ °C için BDO tip osilasyonların genlik ve periyotlarının karşılaştırılması Şekil 4.46 ve 4.47’de gösterilmiştir. Kütleli debi azaldıkça tüm borularda BDO’nun periyot ve genlikleri azalmaktadır. Ayrıca tüm boru konfigürasyonlarında giriş sıcaklığı azaldıkça BDO genlik ve periyotlarının arttığı bulunmuştur (Şekil 4.6). Bu çalışmada elde edilen BDO genlik ve periyotlarının aralığı Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Boş borudaki BDO’nun genliği 0.248-0.279 bar aralığında değişirken iyileştirme elemanlarının kullanıldığı B, C ve D borularında sırasıyla 0.222-0.282, 0.244-0.274, 0.230-0.251 aralığında değişmiştir. Periyotlar karşılaştırıldığında iyileştirme elemanlarının kullanıldığı borulardaki BDO periyotlarının daha düşük olduğu görülür. Minimum giriş basıncı periyodu boş boruda oluşurken maksimum giriş

basıncı periyodu büyük adıma sahip yay elemanlı boruda oluşmuştur. BDO periyotları açısından maksimumdan minimuma doğru sıralama Boru-A, Boru-B, Boru-C ve Boru-D şeklindedir. BDO genliği açısından bir sıralama yapıldığında ise Boru-A, Boru-B, Boru-C ve Boru-D sıralamasının olduğu görülür. Bu sıralama BDO periyodu için olan sıralama ile aynıdır. Bu bulgular literatürdeki bulgularla uyum içerisindedir. Karşlı *et al.* (2002) yay adımının artmasıyla osilasyonların periyot ve genliklerinin arttığını belirlemiştir.

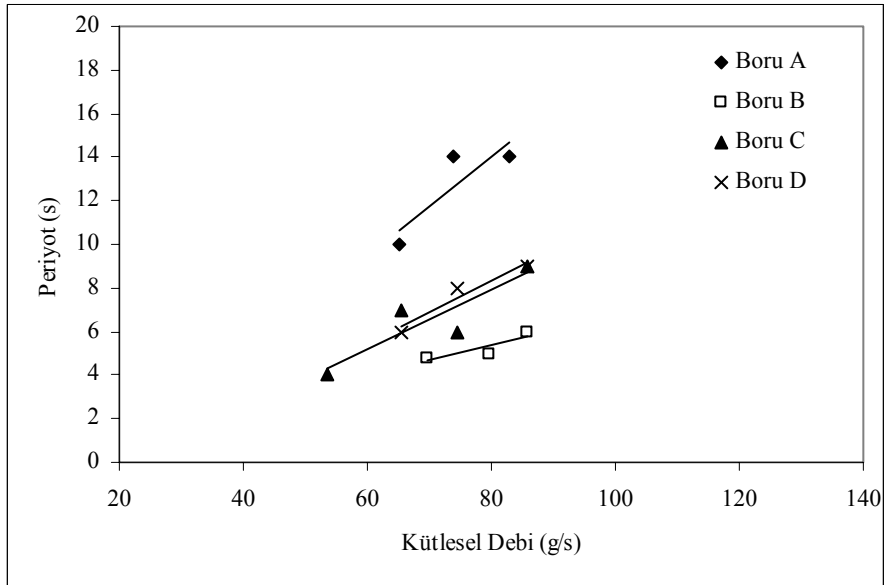
Şekil 4.48 ve 4.49 tüm borular için YDO tip osilasyonların periyot ve genliklerinin karşılaştırılmasını göstermektedir. Kütlesel debi azalmasıyla tüm borularda YDO'nun periyot ve genlikleri azalmaktadır. Ayrıca tüm borularda giriş sıcaklığının azalmasıyla YDO genlik ve periyotlarının arttığı belirlenmiştir (Şekil 4.6). Bu çalışmada elde edilen YDO genlik ve periyotlarının aralığı Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Boş borudaki YDO'nun genliği 0.198-0.248 bar aralığında değişirken iyileştirme elemanlarının kullanıldığı B, C ve D borularında sırasıyla 0.198-0.246, 0.230-0.242, 0.176-0.244 aralığında değişmektedir. Diğer taraftan boş borunun periyotları 4-8 s aralığında değişirken, iyileştirme elemanlarının kullanıldığı B, C ve D borularında sırasıyla 2.2-10, 4.5-4.8, 3.1-3.9 aralığında değişmektedir. Maksimum giriş basıncı periyodu boş boruda oluşmuştur. Başka bir deyişle iyileştirme elemanlarının kullanıldığı borulardaki YDO periyotlarının daha düşük olduğu görülmektedir. YDO periyotları açısından maksimumdan minimuma doğru sıralama Boru-A, Boru-B, Boru-C ve Boru-D şeklindedir. BDO genliği açısından bir sıralama yapıldığında ise Boru-A, Boru-B, Boru-C ve Boru-D sıralamasının olduğu görülür.

Çizelge 4.2. Osilasyon genlik ve periyotlarının karşılaştırılması

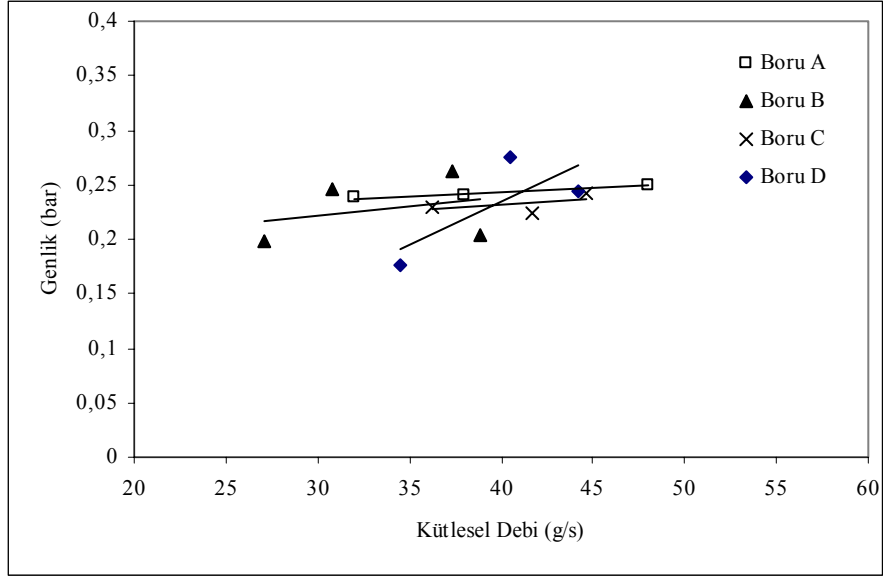
	BDO		YDO	
	Periyod (s)	Genlik (bar)	Periyot (s)	Genlik (bar)
Boru-A	10 - 14	0,248 - 0,279	4 - 8	0,198 – 0,248
Boru-B	7,5 - 14	0,222 – 0,282	2,2 - 10	0,198 – 0,246
Boru-C	5,8 - 9	0,244 – 0,274	4,5 – 4,8	0,230 – 0,242
Boru-D	4,1 - 5	0,230 – 0,251	3,1 – 3,9	0,176 – 0,244



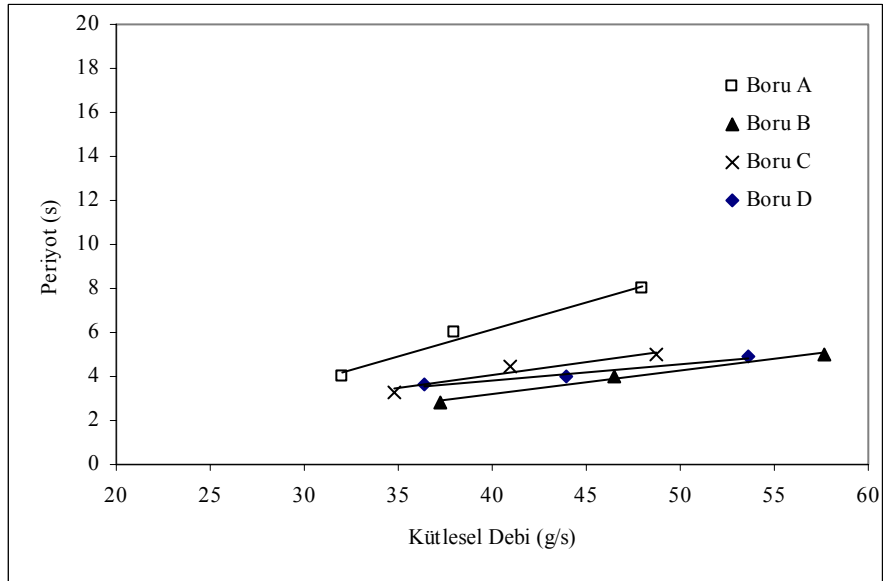
Şekil. 4.46. BDO genliklerinin karşılaştırılması



Şekil. 4.47. BDO periyotlarının karşılaştırılması



Şekil. 4.48. YDO genliklerinin karşılaştırılması



Şekil. 4.49. YDO periyotlarının karşılaştırılması

5. SONUÇ

5.1. Sonuçlar

Bu tezde ısı transferi iyileştirmesinin iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. İş yapan akışkanı su olan kaynamalı yatay bir boru sisteminde deneyler yapılmış ve biri boş boru olmak üzere dört farklı ısı transfer yüzey konfigürasyonu kullanılmıştır. Deneylerde dört farklı ısı gücü, üç farklı giriş aşırı soğutması ve iki fazlı çıkış orifis çapı kullanılarak ısı gücün, giriş aşırı soğutmasının ve çıkış kısıtlayıcı elemanının iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi araştırılmıştır. Karakteristik durum eğrileri elde edilmiş ve ısı transfer iyileştirmesinin kararlı/kararsız durum karakteristiklerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir:

A. Boş Boru İçin Olan Sonuçlar

A1. Kararlı Durum Karakteristikleri ile İlgili Sonuçlar

1. Tüm ısı gücü, tüm giriş aşırı soğutması ve tüm çıkış orifisleri değerleri için karakteristik eğriler yatık S şeklinde bulunmuştur. Bu eğriler çalışılan deneysel koşullarda genellikle birbirleriyle kesişmemektedir.
2. Aşırı soğutma miktarının artmasıyla kararlı durum karakteristik eğrisinde kaynamanın başladığı nokta daha düşük kütleli debilere doğru kaymaktadır.
3. İki fazlı bölgede belirli bir kütleli debi değerinde giriş sıcaklığı arttıkça basınç düşümü artmaktadır.
4. Sisteme verilen ısı gücü arttıkça kararlı durum karakteristik eğrisinde minimum nokta sağa doğru kaymakta ve iki fazlı akış bölgesi daha yüksek kütleli debilerde başlamaktadır.
5. İki fazlı bölgede belirli bir kütleli debi değerinde ısı gücü arttıkça basınç düşümü artmaktadır.

6. Çıkış orifis çapının azalmasıyla sistem içerisindeki basınç artmaktadır. Bunun sonucunda kaynama sıcaklığı artıp, gizli ısı azalmakta ve akışkan daha kısa bir sürede sıvı fazdan buhar fazına geçmektedir.
7. Küçük çaplı orifiste borudaki iki fazlı akışa daha büyük bir direnç oluşmakta ve bunun sonucunda karakteristik eğri büyük çaplı orifise ait eğriye göre eğri yüksek eğimlere sahip olmaktadır.

A2. Kararsız Durum Karakteristikleri İle İlgili Sonuçlar

1. Tüm borularda akış parametrelerine ve geometrik boyutlara bağlı olarak basınç düşümü, yoğunluk değişimi ve termal osilasyon olmak üzere üç farklı osilasyon tipi gözlemlenmiştir.
2. BDO tip osilasyonlar giriş basıncı, cidar sıcaklığı ve giriş kütleli debisi gibi akış parametrelerinde büyük genlikli çalkantılar oluşturmaktadırlar. Boş boru için BDO osilasyonların periyotları 10-14 saniye civarındadır.
3. BDO tip osilasyonlar genellikle kararlı durum karakteristik eğrisinin negatif eğimli bölgesinde oluşmaktadır.
4. Giriş sıcaklığının azalmasıyla BDO'nun başlangıç ve bitiş noktaları düşük debilere doğru kaymaktadır. Giriş sıcaklığının azalmasıyla boru içerisindeki tek fazlı sıvı bölgesi artmakta ve böylece sistem daha kararlı olmaktadır.
5. BDO tip osilasyonların genlikleri ve periyotları kütleli debinin azalmasıyla azalmaktadır.
6. Giriş sıcaklığı azaldıkça BDO tip osilasyonların genlikleri ve periyotları artmaktadır.
7. Isıl güç arttıkça BDO tip osilasyonların genliklerin artmakta periyotları ise azalmaktadır.
- 8 YDO tip osilasyonların genlik ve periyotları BDO tip osilasyonların periyot ve genliklerine göre daha düşük olmaktadır.
9. Boş boru için elde edilen YDO osilasyonlarının genlikleri 0.198-0.248 bar, periyotları ise 4-8 s aralığında değişmiştir. Maksimum genlik 0.248 bar, maksimum periyot ise 8 s olmuştur.

10. YDO tip osilasyonların genlikleri ve periyotları kütleli debinin artmasıyla artmaktadır.

11. Giriş sıcaklığının azalması yani aşırı soğutma miktarının artması YDO genlik ve periyotlarını artırmaktadır.

B. Isı Transferi İyileştirme Elemanlarının Kullanıldığı Borular İçin Olan Sonuçlar

1. Her üç boru için de BDO, YDO ve TO olmak üzere üç farklı tip osilasyon gözlemlenmiştir.

2. Her üç boru için de akışkanın giriş sıcaklığının azalmasıyla yani aşırı soğutma seviyesinin artmasıyla kaynamanın başladığı noktanın daha düşük kütleli debilere doğru kaymakta ve iki fazlı bölgede belirli bir kütleli debi değerinde giriş sıcaklığı arttıkça basınç düşümü artmaktadır.

3. Yoğunluk değişim tipi osilasyonların periyot ve genlikleri tüm test boruları için basınç düşümü tipi osilasyonların periyot ve genliklerinden daha düşük olmaktadır.

4. Her üç boru için de giriş sıcaklığının azalmasıyla BDO'nun başlangıç ve bitiş noktaları daha düşük debilere doğru kaymaktadır.

5. Tüm boru tiplerinde kütleli debi azaldıkça BDO tip osilasyon genlikleri ve periyotları azalmaktadır.

6. Tüm borular için giriş sıcaklığının azalmasıyla BDO tip osilasyon genlikleri ve periyotları artmaktadır.

7. Her üç boruda da YDO osilasyonlarının genlik ve periyotları BDO osilasyonlarına göre daha düşüktür.

8. Her üç boru için de YDO genlik ve periyotları kütleli debinin azalmasıyla azalmakta ancak giriş sıcaklığının azalmasıyla artmaktadır.

9. Karakteristik diyagramda en yüksek basınç düşümü iç yay içeren B ve C borusunda, en düşük basınç düşümü ise boş boruda meydana gelmektedir. İç yay içeren borularda ise adımı düşük olan B borusu adımı yüksek olan C borusundan daha yüksek basınç düşümü oluşturmaktadır.

10. Isı transfer iyileştirme elemanları osilasyonların davranışına önemli derecede etki yapmaktadır.

11. İyileştirme elemanı kullanılan borularda BDO boş boruya göre daha düşük debilerde başlamaktadır.
12. Borular kararlılık açısından en yüksek kararlılığa sahip olandan en düşük kararlılığa sahip olana doğru Boru-D, Boru-C, Boru-B ve Boru-A sıralaması oluşturmaktadır.
13. Isı transfer iyileştirme elemanlarının kullanıldığı borularda efektif çap arttığında kararlılığın artmaktadır.

5.2. Öneriler

Bu tez iş yapan akışkanı su olan kaynamalı yatay bir boru sisteminde iki fazlı akış karasızlıkları ve bu karasızlıklara ısı transfer iyileştirmesinin etkisini inceleyen bir çalışmadır. Tez içerik ve hacim olarak çok geniş olamayacağından tezin kapsamı şu andaki sınırlarıyla belirlenmiştir. Aşağıda belirtilen konularda yapılacak çalışmaların bu çalışmada elde edilen bulguları tamamlayacağı, bundan sonra bu konuda yapılacak çalışmalara katkı yapacağı ve iki fazlı akış sistemlerinin tasarımında bilgi birikimine katkı sağlayacağı düşünülmektedir:

1. İki fazlı akışlarda akış rejimlerini belirlemek ve çeşitli parametreleri ölçmek için yüksek hızlı video kameralar, mikrotermoelemanlar, optik probalar, elektrikli probalar, tek veya çok ışınli yoğunluk-ölçer vb. cihaz/yöntemler kullanılmaktadır. Ayrıca akış rejimleri boru içerisindeki iki nokta arasında basınç düşümünü ölçmek veya boru alt ve üst cidar sıcaklıklarını ölçmek yoluyla da belirlenebilmektedir. Bu çalışmada test borusunun alt ve üst yüzey sıcaklıkları ölçülmüş ve iki fazlı akış rejimleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bununla birlikte bu çalışmada yatay borularda oluşan tek fazlı konveksiyon, kısmi kaynama, çekirdekli kaynama, merkezi katmanlaşma, lokal katmanlaşma, tam katmanlaşma akış rejimlerini boru alt ve üst yüzey sıcaklıklarından yararlanılarak belirlemek tümüyle mümkün olmamıştır. Bu deneysel sistemin geometrik ve çalışma parametrelerinden kaynaklanmaktadır. Oysaki aynı sistemde R11 akışkanı kullanıldığında bu yöntem kullanılarak iki fazlı akış rejimleri tümüyle belirlenebilmiştir. Bu nedenle diğer akış görüntüleme yöntemleri kullanılarak akış rejimlerinin belirlenmesi önerilmektedir.

2. Nükleer reaktörlerde kullanılan basınçlar genellikle yüksek olduğundan daha yüksek basınçlarda deneysel araştırmalar yapılabilir.
3. Bu tez sadece deneysel araştırma sonuçlarını içermektedir. Teorik modelleme çalışmaları yapılabilir ve model sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılabilir.
4. İki fazlı akışlarda çeşitli ısı transfer iyileştirme yöntemleri kullanılarak araştırmalar yapılmıştır. Ancak bunların az bir kısmında iki fazlı akış kararsızlıkları incelenmiştir. Bu nedenle iki fazlı akışlarda kullanılan ısı transfer iyileştirme yöntemlerinin kararsızlık karakteristikleri incelenebilir.
5. Farklı ısı transfer iyileştirme elemanları kullanılarak iki fazlı akış kararsızlıkları araştırılabilir.
6. Bu çalışmada yatay tek bir boruda deneysel araştırmalar yapılmıştır. Aynı veya farklı ısı transfer iyileştirme yöntemleri kullanılarak eğik boru, düşey boru, paralel yatay ve düşey kanallar vb. sistemlerde araştırmalar yapılabilir.
7. Basınç düşümü tipi osilasyonların meydana gelmesi için sistemde sıkıştırılabilir bir hacmin bulunması gerekmektedir. Bu çalışmada iç sıkıştırılabilir hacim test borusunun önünde bulunan dengeleyici tank ile sağlanmıştır. Sıkıştırılabilir hacmin iç sıkıştırılabilirlik (uzun borular) ile sağlandığı çalışmalar yapılabilir.
8. Boyutsal analiz yardımıyla kararlı durum karakteristik eğrileri daha basit formda tek bir eğri ile gösterilebilmektedir. Bu nedenle boyut analiz yöntemleri kullanılarak iki fazlı akış ve akış kararsızlıkları incelenebilir.
9. Saf yoğunluk değişim osilasyonları çok küçük debilerde ortaya çıkmakta ve periyot ve genlikleri basınç düşümü osilasyonlarına göre çok daha düşük olmaktadır. Bu osilasyonlar esnasında test borusu cidar sıcaklıkları oldukça yüksek değerlere erişebildiğinden burn-out olayları ile bu tip osilasyonlar arasındaki ilişkiyi tümüyle ortaya çıkaracak çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abid, C., Martin, R., Papine, F., 2002. Thermal instabilities in a horizontal cylindrical duct: a physical approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45 2153-2157.
- Achard JL, Drew DA, Lahey RT., 1985. The analysis of nonlinear oscillations in boiling channels. *J. Fluid Mech*, 155:213-232.
- Akyüz, K., Veziroğlu, T. N., Kakaç, S. and Doğan, T., 1979. Finite difference analysis of two phase flow pressure drop and density wave oscillations. *Int. J. Multiphase Flow*, 13, p 1-30.
- Anderson, R. P., Bryant, L. T., Carter, J. C. and Marchaterre, J. F., 1962, Transient analysis of two phase natural circulation systems. USAEC Report ANL-6653, p 1-13.
- Anglart, H., 2006. Two-Phase Flows in Heated Channels. *Applied Reactor Technology*, 154-227.
- Aritomi, M., Aoki, S. and Inoue, A., 1977, Instabilities in parallel channel of forced convection boiling upflow system. *J. Nuclear Science and Technology*, p 1-30.
- Aritomi, M., Aoki, S. and Inoue, A., 1979, Instabilities in parallel channel of forced convection boiling upflow system, (II). *J. Nuc. Sci. And Tech.*, 14 (2), p 88-96.
- Aritomi, M., Aoki, S. and Inoue, A., 1982, Instabilities in parallel channel of forced convection boiling upflow system (V). *J. of Nuclear Science and Technology*, 20 (4), p 286-301.
- Bell KJ., 1984. Two-phase flow in heat exchangers. *Two-Phase Flow and Heat Transfer* Eds. by Chen XJ, Veziroğlu TN, 341-361.
- Bergles, A. E., 1976. Review of instabilities in two-phase systems. *Advanced Study Institute on Two-Phase Flows&Heat Transfer*, August 16-27, İstanbul TURKEY, 1-40.
- Bergles, A. E., 1977. Review of instabilities in two phase systems. *Two Phase Flows and Heat Transfer*, Kakaç, S. and Mayinger, F. (ed.), 1, p 383- 385.
- 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., p 231-246.
- Bergles, A. E., 1985. Enhancement of boiling and condensing. *Two-Phase Flow and Heat Transfer*. Eds. by Chen X. J., Veziroğlu T. N., Hemisphere Publishing Corporation, Washington, 283-307.
- Bergles, A. E. and Joshi, S. D., 1983. Augmentation techniques for low Reynolds number in tube flow. *Low Reynolds Number Flow Heat Exchangers*, Kakaç, S. and Shah, R. K. (ed.), Hemisphere Publishing Corp., p 1-13.
- Boure JA., 1978. Oscillatory two-phase flows. In *Two-phase Flows and Heat Transfer with Application to Nuclear Reactor Design Problems*. Ed. by Ginoux JJ. Hemisphere, Washington.
- Boure, J. A., Bergles, A. E. and Tong, L.S., 1973. Review of two-phase flow instability. *Nucl. Eng. Des.*, 25, 165-192.

- Chu, C. L., Roberts, J. M. and Daicher, A. W., 1978. DNB Oscillatory Temperature and Thermal Stress Responses for Evaporator Tubes Based on Rivulet Model. *Journal of Engineering for Power*, 100, 424-431.
- Cumo, M., Palazzi, G. and Rinaldi, L., 1981. An experimental study on two phase flow instability in parallel channels with different heat flux profile. *Comitato nazionale energia Nucleare, CNEN- RT/ ING (81) 1*, p 1- 15.
- Çomaklı, O., Karslı, S., Yılmaz, M., 2002. Experimental Investigation of Two Phase Flow Instabilities in A Horizontal in-Tube Boiling System. *Energy Conversion and Management*, 43, 249-268.
- Çomaklı, O., Yılmaz, M., Ozyurt, O., Karslı, S., 2004. Two-phase flow thermal instabilities in a horizontal in-tube boiling system with enhanced surfaces. *Experimental Heat Transfer*, 17, 199-226.
- Çomaklı, Ö., Yılmaz, M., Bedir, Ö., Şahin, B., 2007. Isı Transfer İyileştirmesinin İki Fazlı Akış Kararsızlıklarına Etkisi. *Mühendis ve Makina*, 48 (565), 9-17.
- Davidov, A. A., 1956. Elimination of pulsation in once through boilers. *Elektricheskie Stantzu, USSR*, 3, 36-43.
- 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, p 21-65.
- Ding, Y., Kakaç, S., Chen, X. J., 1995. Dynamic Instabilities of Boiling Two-Phase Flow in A Single Horizontal Channel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 11, 327-342.
- Ding Y., Scholz F., Shen R.H., Kakaç S., 1993. Two-phase flow instabilities in a horizontal in tube boiling system. *The 6TH International Symposium on Transport Phenomena in Thermal Engineering*, May 9-13, Seoul, Korea, 221-233.
- 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 & Fluid Flow*, 4 (3), 145-156.
- Duffey, R. B., Hughes, E.D., 1991. Static flow instability onset in tubes, channels, annuli, and rod bundles. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 34(10): 2483-2496.
- Fallows, T., Hitchcock, J. A., Jones, R. C., Lis, J. and Northover, E. W., 1973. A study of oscillatory instabilities in the parallel channels of high pressure once through boiler rig. *Conf. On boiler dynamics and control in nuclear power station*, British Nuclear Energy Society, 14, 1-8.
- Friedly, J. C., Akinjiola, P. O. and Robertson, J. M., 1979. Flow Oscillations in Boiling Channels, *The American Institute of Chemical Engineers*, 204-217.
- Fukuda, K. and Hasegawa, S., 1979. Analysis on Two-Phase Flow Instability in Parallel Multichannels. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 16(3), 190-199.
- Fukuda, K. and Kobori, T., 1979. Classification of Two-Phase Flow Instability by Density Wave Oscillation Model. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 16(2), 95-108.
- Griffith, P., 1985. Two-Phase Flow. In *Handbook of Heat Transfer Fundamentals*, Rohsenow WM, Hartnett JP, Ganic EN (ed.); McGraw-Hill Book Company: 13.1-13.41.

- Guo, L-J., Feng, Z-P. and Chen, X-J. 2001. Pressure drop oscillation of steam-water two-phase flow in a helically coiled tube. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 44, 1555-1564.
- Gurgenci, H., Yıldırım, T., Kakaç, S. and Veziroğlu, T. N., 1986. Pressure drop and density wave instability thresholds in boiling channels. ASME winter annual meeting, Anaheim, CA, USA, p 123-128.
- Gurgenci, H., Veziroğlu, T. N. and Kakaç, S., 1983. Simplified nonlinear descriptions of two phase flow instabilities in vertical boiling channel. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 26 (5), p 671-679.
- Hands, B.A., 1979. Density wave oscillations: The use of vector diagrams to identify some different types. *AIChE Symposium Series*, 189, Volume 75, 165-176.
- Hewitt, G.F., 1978 Flow Patterns. In *Two-Phase Flow and Heat Transfer*. Ed. by Butterworth D, Hewitt, G.F., Oxford University Press, 18-39.
- Hewitt, G.F., Kawaji, M., 1999. Fluid mechanic aspects of two-phase flow. In *Handbook of Phase Change: Boiling and Condensation*. Ed. by Kandlikar SG, Shoji M, Dhir VK. Taylor&Francis, 205-259.
- Jain, K. C., 1965, Self sustained hydrodynamics oscillations in a natural circulation two phase flow boiling loop. Ph.D thesis, Northwestern University, p 23-67.
- Jones, R. C. and Judd, R. L., 2003. An investigation of dryout/rewetting in subcooled two-phase flow boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 17, 3143-3152
- Kakaç, S., 1994. A review of two-phase flow instabilities. *Advances in Two-Phase Flow on Heat Transfer*, Martinus, Nijhoff, Boston. Vol.II, 577-668.
- Kakaç, S., Akyüzlü, K. and Veziroğlu, T. N., 1977. Sustained boiling flow instabilities in a cross connected four parallel system. *METU J. Pure and App. Sci.*, Ankara, 10 (2), p 157-178.
- Kakaç, S. and Cao, L., 1999. The effect of heat transfer enhancement on two-phase flow dynamic instabilities in a boiling system. CHMT99, Proceedings of the International Conference on Computational Heat and Mass Transfer, Ed. By Mohamad, A. A. and Sezai, I. Eastern Mediterranean University, G. Mağusa, April 26-29, 1999, 448-462.
- Kakaç, S., Gavrilescu, C.O. and Çomaklı, Ö., 1995. Two-phase flow instabilities with augmented surfaces in a horizontal in-tube boiling system. 10. Turkish National Conference on Thermal Sciences and Technologies. 6-8 September, 1995, Ankara. 1-26.
- Kakaç, S. and Liu, H. T., 1990. Two phase flow dynamic instabilities in boiling systems. *Proc. of Second Int. Symp. on Multiphase Flow and Heat Transfer*, Xian, China, 125-148.
- Kakaç, S., Liu H.T., 1991. Two-phase flow dynamics instabilities in boiling systems. In *Multiphase Flow and Heat Transfer- Second International Symposium*. Ed. by Xue-Jun Chen, Veziroğlu TN. and Tien CL., Vol.1, pp 403-444.
- Kakaç, S., Veziroğlu, T. N., Akyüzlü, K. and Berkol, O., 1974. Sustained and transient boiling flow instabilities in a cross connected four parallel channel upflow system. 5 th Int. Heat Trans. Conf., Tokyo, 35, p 11-14.
- Kakaç, S., Veziroğlu, T. N., Ergür, H. S. and Uçar, I., 1977. The effect of inlet subcooling on sustained and transient boiling flow instabilities in a single boiling channel. *Proc. 6 th Int. heat transfer conf.*, paper no. FB-16, 1, p 363-368.

- Kakaç, S., Veziroğlu, T. N., Özboya, N. and Lee, S. S., 1977. Transient boiling flow instabilities in a multi channel upflow system. *Warme Stoffübertragung*, 10, p 175-188.
- 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*, 3, 191-201.
- Kalinin, E.K., Dreitser, G.A., 1998. Heat transfer enhancement in heat exchangers. *Advances in Heat Transfer*, Vol. 31, 159-332.
- Karslı S., 2000, Zorlanmış Konveksiyonlu Kaynamalı Yatay Bir Boru Sisteminde İki Fazlı Akış Kararsızlıklarının Deneysel Olarak İncelenmesi. Doktora tezi, Atatürk Ün. Mühendislik Fakültesi, Erzurum.
- Karslı S., Yılmaz M., ve Çomaklı Ö., 2001. Isı transferi iyileştirmesinin iki fazlı akış katmanlaştırmasına etkisi. *Termodinamik*, 102, 68-78, 2001.
- Karslı, S., Yılmaz, M., ve Çomaklı, Ö., 2001. Isı transfer iyileştirmesinin yatay bir borudaki iki fazlı akış termal osilasyonlarına etkisi. 13. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Konya, 10- 16.
- Karsli, S., Yilmaz, M., Çomakli, O., 2002. The Effect of Internal Surface Modification on Flow Instabilities in Forced Convection Boiling in A Horizontal Tube. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 23, 776-791, 2002.
- Katto, Y. and Yokoya, S., 1984. Critical heat flux of liquid helium (I) in forced convective boiling. *Int. J. Multiphase Flow*, 10, p 404-413.
- Lahey, R. T., 1980. An assessment of the literature related to LWR instability mode.
- Lin, Z. H., Veziroğlu, T. N., Kakaç, S., Gürgenci, H. and Menteş, A., 1982, Heat transfer in oscillating two phase flows and effect of heater surface conditions. *Proc. 7 th int. heat transfer conference*, München, Germany, p 331-336.
- Lin, Z. H., Zhang, X., Chen, X. J., Veziroğlu, T. N. and Kakaç, S., 1988. An analytical study of the pressure drop type instabilities in a horizontal hairpin tube. *Int. J. Engineering Fluid Mechanics*. 4, p 427- 444.
- Liu, H., 1993. Pressure drop type and thermal oscillations in convective boiling systems. PhD Thesis, University of Miami, Florida, p 3-45.
- 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, p 8-11.
- Liu, H. T., Kakaç, S. and Mayinger, F., 1994. Characteristics of transition boiling and thermal oscillation in an upflow convective boiling system. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 8, No. 3, 195-205.
- Mathisen, R.P., 1967. Out of pile channel instability in the loop Skalvan. EURATOM Report, Symp. on Two-Phase Dynamics, Eindhoven, September.
- Menteş, A., Yıldırım, O. T., Kakaç, S. and Veziroğlu, T. N., 1983. The effect of heat transfer augmentation on two phase flow instabilities in a vertical boiling channel. Clean Energy Research Institute, University of Miami, Florida, p 1-19.
- Menteş, A., Yıldırım, O. T., Gürgenci, H., 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, p 161-169.
- 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.

- 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, p 525-532.
- 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), p 525-532.
- Pakopoulos, C. D., El- Shirbini, A. A. and Murgatroyd, W., 1980. Heat flux flow coupling effects in the stability of vapor generators. *Warme Stoffübertragung*, 13, p 275-286.
- Park, S., 2006. Fundamentals of Multiphase Flow and Heat Transfer. Lecture Note No. 2. <http://www.safety.sci.kth.se/Multiphase/fall2006/>
- Reay, D.A., 1991. Heat transfer enhancement- A review of techniques and their possible impact on energy efficiency in the U. K. *Heat Recovery Systems&CHP*, 11(1), 1-40.
- Rızwan-uddin, 1994. On density wave oscillations in two phase flows. *Int. J. Multiphase Flow*, 20, p 721-737.
- Saha, P., Ishii, M., Zuber, N., 1976. An experimental investigation of the thermally induced flow oscillations in two-phase systems. *Journal of Heat Transfer*, Trans ASME, November, 616-622.
- Somerscales, E. F. C., Bergles, A. E., 1997. Enhancement of heat transfer and fouling mitigation. *Advances in Heat Transfer*, Vol. 30, 197-253.
- Stenning, A. H. and Veziroğlu, T. N., 1965. Flow oscillation modes in forced convection boiling. *Proc. Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute*, Stanford Univ. Press., p 301-316.
- Takitani, K. and Takemura, T., 1978. Density wave instability in once-through boiling flow system (I). *J. of Nuclear Science and Technology*, 15, 355-364.
- Ting-Kuan, C., 1990. Selected papers on two-phase flow and boiling heat transfer. Xi'an Jiaotong University, China.
- Ünal, H. C., Van Gasselt, M. L. G. and Ludwig, P. W. P. H., 1977. Dynamic instabilities in tubes of a large capacity straight tube once through sodium heated steam generator. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 20 p 1389-1399.
- Ünal, H.C., 1985. Two simple correlations for the inception of density-wave oscillations in long sodium-heated steam generator tubes. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 28(7): 1385-1392.
- Veziroğlu, T.N., Kakaç, S., 1980. Two-phase flow instabilities and the effect of subcooling. N.S.F. Project ENG 75-16618, Final Report.
- Veziroğlu, T.N. and Lee, S.S., 1968a. Instabilities in boiling upward flow. *Int. Symp. On Concurrent Gas-Liquid Flow*, sept.
- Veziroğlu, T.N. and Lee, S.S., 1968b. Boiling upward flow instabilities. AEC- Oak Ridge National Laboratory Subcontract No: 2975, Final Report.
- Veziroğlu, T.N. and Lee, S.S., 1970. Boiling flow instabilities in a two paralel channel upflow system. AEC- Oak Ridge National Laboratory Subcontract No: 2975, Final Report.
- Wallis, G. B. and Heasley, J. H., 1961. Oscillations in two phase systems. *J. heat Transfer*, Trans. ASME, series C, 83, p 363-369.
- Wang, Q., Chen, X. J., Chen, T. K., Veziroğlu, T. N. and Kakaç, S., 1989. An investigation on density wave oscillation. *Proceedings of the 2nd Xian*

- International Symposium on Multiphase Flow and Heat Transfer. Ed. by Chen, X.J., Veziroğlu, T.N. and Tien, C.L. September 18-21, 1989, Xi'an, China. 445-452.
- 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., *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 15, 241-246.
- Webb, R. L., 1994. *Principles of Enhanced Heat Transfer*. John Wiley&Sons, Inc., New York.
- Wedekind, G.L., 1971. An experimental investigation into the oscillatory motion of the mixture-vapor transition point in horizontal evaporating flow. *J. Heat Transfer*, Paper No:70-HT-G, 47-54.
- Wedekind, G.L. and Stoecker, W.F., 1966. Transient Response of the Mixture Vapor Transition Point in Horizontal Evaporating Flow. *ASHRAE Transactions*, 72, Part 1
- Widmann, F., 1993. Experimental investigation of two-phase flow instabilities in a horizontal convective in-tube boiling system. Ms. thesis. University of Miami, Coral Gables, Florida.
- Widmann, F., 1994. Experimental investigation of two phase flow instabilities in a horizontal convective in tube boiling system. *DIPLOMARBEIT SS 93-WS*. Universitat Stuttgart, Germany, p 1-116.
- Widmann, F., Çomaklı, Ö., Gavrilescu, C.O., Ding, Y. and Kakaç, S., 1995. The effect of augmented surfaces on two-phase flow instabilities in a horizontal system. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2(4), 263-271.
- Widmann, F., Çomaklı, Ö., Gavrilescu, C. O. and Kakaç, S., 1994. The effect of inlet subcooling on two-phase flow instabilities in a horizontal in-tube flow boiling system. In *The 3rd International Symposium on Multiphase Flow and Heat Transfer*, September 19-21, Xi'an, China.
- 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, p 65-77.
- Xu B, Chen, X.J., 1990. An experimental investigation of two-phase flow density wave type instability in vertical upflow tube. *Proceedings of the Second International Symposium on Multiphase Flow and Heat Transfer*. Ed. by XJ Chen, TN Veziroğlu, CL Tien. 18-21 September, 1989, Xi'an, China, Hemisphere, New York, pp 497-503.
- 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, p 497-503.
- Yadigaroglu, G. and Bergles, A. E., 1972. Fundamental and higher mode density wave oscillations in two phase flow. *J. Heat transfer*, 26, p 189-195.
- Yılmaz, T., 1983. Çok Fazlı Akışlar. *KTÜ Müh. Mim. Fak. Yayını*, 17, s 1-34.
- Yılmaz, M., Çomaklı, Ö., Karagöz, Ş., Bedir, Ö., 2007. İki Fazlı Akışlarda Isı Transfer İyileştirmesi-1 Termodinamik, 176, 76-86.
- Yılmaz, M., Çomaklı, Ö., Karagöz, Ş., Bedir, Ö., 2007. İki Fazlı Akışlarda Isı Transfer İyileştirmesi-2 Termodinamik, 177, 76-86.

- Yilmaz, M., Çomaklı, Ö., Karslı, S., 2002. The Effect of Inlet Subcooling on Two-Phase Flow Instabilities in A Horizontal Pipe System with Augmented Surfaces. *Int. J. Energy Res.*, 26(2), 113-131.
- Yılmaz, M., Karslı, S., Çomaklı, Ö., 2001. Isı transfer iyileştirmesinin yatay bir borudaki iki fazlı akış basınç düşümü osilasyonlarına etkisi. 13. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Konya, 1-9.
- Yüncü, H., 1981. İki fazlı akımların dinamik kararsızlığı. Doçentlik tezi, O. D. T. Ü. Mühendislik Fakültesi, Ankara, s 5-44.
- Zhou, Y. I., Chen, T. K., Chen, X. J., Veziroğlu, T. N., Kakaç, S., 1990. An investigation on density wave oscillation in helical coiled tubes. In selected papers on two-phase flow and boiling heat transfer. Xi'an Jiaotong University, China.

EK 1. MATLAB’da FFT’nin çözümü

```
clc;
clear all;
load C:\MATLAB6p5\work\veriler\basinc.LOG
ver=basinc(:,1)
Y=fft(ver);
Y(1)=[];
n=length(Y);
power = abs(Y(1:floor(n/2))).^2;
nyquist = 1/2;
freq = (1:n/2)/(n/2)*nyquist;
period=(1./freq)*70/n;
%plot(1:1:length(ver),ver);
hold on;
plot(period,power);
axis([0 30 0 300]);
```

ÖZGEÇMİŞ

1970 yılında Zonguldak Çaycuma’da doğdu. İlk öğrenimini Almanya’da, orta ve lise öğrenimini Zonguldak’ta tamamladı. 1992 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Bölümü’nden 1996 yılında mezun oldu. 1997 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalından 2002 yılında mezun oldu. 2003 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora’ya başladı.

Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Bölümü’nde 1998 yılından beri Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.