

Isı Transferi İyileştirmesinin İki Fazlı Akış Kararsızlıklarına Etkisi

Ömer ÇOMAKLI

Prof. Dr., Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü

Mehmet YILMAZ

Doç. Dr., Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü

Özgür BEDİR

Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü

Bayram ŞAHİN

Yrd. Doç. Dr. Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü

ÖZET

İki fazlı akış sistemleri hidrodinamik kararsızlıklar oluşturma eğilimindedirler. Bu kararsızlıklar kuruma (dry-out), ısıl yorulma ve arızaya yol açabilir. Bu osilasyonların karakteristiklerini ve sınırlarını bilerek iki fazlı sistemlerin tasarımı ve emniyetli çalışması için önemli sonuçlar elde edilebilir. Diğer taraftan dünya enerji rezervlerinin gittikçe azalması, ülkeleri enerji kaynaklarını daha verimli kullanmaya ve alternatif enerji kaynakları bulma çalışmalarını yoğunlaştırmaya itmiştir. Bu çabalardan birisi de ısı transferini iyileştirme amacıyla yürütülen çalışmalardır. Bu çalışmada ısı transfer iyileştirmesinin iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi incelenmiş ve bu konuyla ilişkili temel ve önemli bulgular vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: İki fazlı akış, kararsızlıklar, osilasyonlar, ısı transferi iyileştirmesi

ABSTRACT

Two phase systems are prone to hydrodynamic instabilities. These stabilities can lead to dry-out, thermal fatigues, and failure. Knowing the characteristics of the oscillations and boundaries, important conclusions can be drawn for the design and safe operation of two-phase systems. On the other hand depletion of world energy sources makes the country to use energy sources more efficiently and to find alternative energy resources. One of these efforts is the studies related to heat transfer enhancement. In this study the effect of heat transfer enhancement on the two-phase flow instabilities is studied, and basic and important results are summarized.

Keywords: Two phase flow, instabilities, oscillations, heat transfer enhancement

GİRİŞ

İki fazlı akış sistemleri hidrodinamik kararsızlıklar oluşturma eğilimindedirler. Bu kararsızlıkların farklı tipleri vardır, fakat en önemli olanları periyodik olanlardır. Çoğu sistemler bu kararsızlıklara sahip olsalar bile uygun bir şekilde çalışmaya devam ederler. Bununla birlikte bazı sistemlerde bazı koşullarda kuruma (dry-out), ısıl yorulma ve arıza oluşabilir. Bu nedenlerle istenmeyen iki fazlı akış kararsızlıklarını önlemek veya kontrol etmek için önlemler alınmalıdır [1-3].

Diğer taraftan dünya enerji rezervlerinin gittikçe azalması, ülkeleri enerji kaynaklarını daha verimli kullanmaya ve alternatif enerji kaynakları bulma çalışmalarını yoğunlaştırmaya itmiştir. Bu çabalardan birisi

de ısı transferini iyileştirme amacıyla yürütülen çalışmalardır. Isı transferi iyileştirme yöntemleri genel olarak pasif, aktif ve karma yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Pasif yöntemler dış güç kullanılmasını gerektirmeyen, aktif yöntemler ise dış güç kaynağının kullanılmasını gerektiren yöntemlerdir. Karma yöntemlerde ise aktif veya pasif yöntemlerden iki veya daha fazlası birlikte kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı ısı transfer iyileştirmesinin iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi konusunu araştırmaktır. Bu amaçla iki fazlı akış kararsızlıkları, tipleri ve kararlı durum karakteristikleri, ısı transferini iyileştirme yöntemleri ile bilgi verilmiş ve ısı transfer iyileştirmesinin iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi incelenmiştir.

İKİ FAZLI AKIŞ KARARSIZLIKLARI

Kaynamalı ısı transferinin neden olduğu akış kararsızlıkları iki fazlı akışların kullanıldığı reaktörler, buhar santralleri, soğutma santralleri, kimyasal üretim ünite ve rafinerileri ile çeşitli ısı değiştiricilerinde yaygın olarak görülmektedir. İki fazlı akış sistemlerinde debi, sistem basıncı ve diğer parametrelerde oluşacak osilasyonlar mekanik titreşimlere, kaynama krizlerine, yüksek geçici sıcaklıklara, kontrol gücüne ve hatta yüzeyde yanma (burn-out) olayına neden olabildiklerinden genellikle istenmezler. Bu nedenlerle iki fazlı akış kararsızlıklarının anlaşılması iki fazlı akış sistemlerinin tasarımı, kontrolü ve performansının belirlenmesinde son derece önemlidir. Bu nedenle osilasyonları önlemek veya kontrol etmek için etkin yöntemler geliştirilmelidir. İki fazlı akış kararsızlıklarını kanal geometrisi, çalışma koşulları ve sınır şartları gibi birçok parametre etkilemektedir [1-10]. Bu parametreler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. İki fazlı Akış Kararsızlıklarını Etkileyen Parametreler [1-3]

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

İki Fazlı Akış Kararsızlık Tipleri

İki fazlı akış sistemlerinde oluşan kararsızlıklar statik kararsızlıklar ve dinamik kararsızlıklar olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır.

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 akışta ulaşılan yeni çalışma şartları başlangıç çalışma noktasına asimptotik olarak yaklaşır. 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. Statik kararsızlıkların bilinen tipleri şunlardır [1-3]:

1. Akış gezintisi (Ledinegg kararsızlığı)
2. Kaynama krizi
3. Gevşeme (relaxation) kararsızlıkları: akış rejimi geçiş kararsızlığı, darbeli akış (bumping), püskürtmeli akış (geysering), gürültülü akış (chugging) ve çekirdeklenme kararsızlıkları.

Dinamik Kararsızlıklar

İki fazlı akış içeren çoğu endüstriyel sistemler dinamik kararsızlık oluşturma eğilimindedirler. Eğer 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. Dinamik kararsızlıklar Basınç Düşümü Osilasyonları (BDO), Yoğunluk Değişim Osilasyonları (YDO), Isıl Osilasyonlar (IO) ve Akustik Osilasyonlar (AO) olmak üzere 4 sınıfa ayrılmaktadır [1-3].

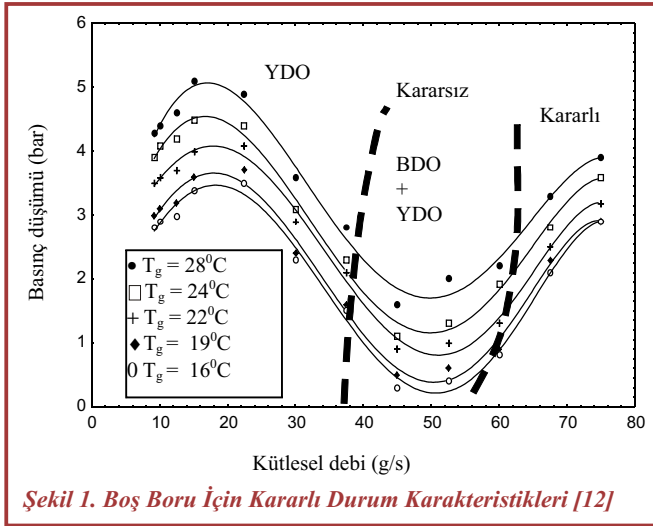
Yoğunluk Değişim Osilasyonları

Yoğunluk değişim osilasyonları endüstride çok yaygın olarak karşılaşılan dinamik iki fazlı akış kararsızlık tipidir. Osilasyonların periyodu bir yoğunluk dalgasının göz önüne alınan sistem boyunca seyahat etmesi için gerekli zaman mertebesinde olduğundan yoğunluk değişim osilasyonları ismi kullanılmaktadır. Yüksek ve düşük yoğunluklu karışım

akışkan dalgalarının sistem içinde hareket etmesinden kaynaklanan bu osilasyonlar yüksek frekanslı osilasyonlardır ve buharın sıkıştırılabilirliği yoğunluk değişim osilasyonlarının ortaya çıkmasında önemli bir faktör değildir. Yoğunluk değişim osilasyonlarının ortaya çıkmasında önemli rol oynayan iki temel faktörden birincisi farklı yoğunluklara sahip iki bileşenden meydana gelmiş bir akışın söz konusu olması, ikincisi ise bu iki faz bileşeninin farklı oranlarda karışımında bulunduğu halde akışın devam etmesidir [3, 7].

Basınç Düşümü Osilasyonları

Basınç düşümü tip osilasyonların oluşması için akış ortamında sıkıştırılabilir hacim gereklidir. Bu osilasyonlar genellikle kanal boyunca olan basınç düşümü, debinin artmasıyla azaldığı zaman oluşmakta başka bir deyişle kararlı durum karakteristik eğrisinin negatif eğimli bölgesinde meydana gelmektedir (Şekil 1. BDO'nun periyotları genellikle yoğunluk değişim tipi osilasyonların periyotlarından daha büyüktür ve aşağıdaki parametrelere bağlıdır [11]:



Şekil 1. Boş Boru İçin Kararlı Durum Karakteristikleri [12]

1. Sistemdeki buharın hacmine
2. Sistemdeki buharın sıkıştırılabilirliğine
3. Dengeleyici tank tarafından test kısmının ön tarafında oluşturulan sıkıştırılabilirliğe

Isıl Osilasyonlar

Isıl osilasyonlar bağımsız ısıl osilasyonlar ve diğer osilasyonlar ile birlikte ortaya çıkan ısıl osilasyonlar olarak iki türlü tanımlanmaktadır [13, 14].

1. Bağımsız ısıl osilasyonlar: Bu osilasyonlar bağımsız olarak ortaya çıkan dinamik osilasyonlardır. Çok küçük debiler hariç basınç düşümü tip ve yoğunluk değişimi tip osilasyonlar esnasında alt cidar daima bir sıvı tabakası tarafından ıslatılmaktadır. Ancak debi çok küçük değerlere düştüğünde kanala giren sıvı üst cidar civarında tümüyle buharlaşmakta, alt cidardaki sıvı ise kanalın çıkışına doğru tümüyle buharlaşmaktadır. Bu durumda giriş basıncı küçük genliklerle osilasyon yaparken kanalın çıkış kısımlarında alt cidar sıcaklığı büyük genliklerle osilasyon yapmaktadır. Alt cidarda sıcaklığın büyük genliklerle osilasyon yapması ile kendini gösteren bu osilasyon tipine ısıl osilasyonlar adı verilmektedir. Alt cidarda oluşan bu ısıl osilasyonların nedeni akışın belli bir noktada düzensiz olarak geçiş kaynaması ile film kaynaması arasında değişim göstermesinden ve karışım-buhar geçiş noktasının rasgele hareketinden kaynaklanmaktadır.

2. Diğer osilasyonlar ile birlikte ortaya çıkan ısıl osilasyonlar: Bu osilasyonlar bağımsız olarak üretilmezler, basınç düşümü tip veya yoğunluk değişim tipi osilasyonların yan ürünüdürler ve cidar sıcaklığının bu osilasyonlara cevabı olarak ortaya çıkarlar.

Akustik Osilasyonlar

Akustik osilasyonlar karışımın sonik hızında hareket eden basınç pertürbasyonlarıdır. Bu nedenle 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. Akustik osilasyonlar aşırı soğutulmuş kaynama, bulk kaynama ve film kaynamada 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 [1-3].

Kararlı Durum Karakteristikleri

Şekil 1'de boş boru için olan karakteristik eğri gösterilmiştir. Bu şekilde osilasyon sınırları koyu kesikli

çizgilerle gösterilmiştir. Karakteristik eğrinin yüksek debi değerlerindeki pozitif eğimli kısmı tek fazlı akışa karşılık gelmekte ve bu bölgede boruya verilen ısı akışkanı buharlaştırarak kadar yeterli olmadığından akışkan sıvı fazında bulunmaktadır. Şekilden görüldüğü gibi BDO karakteristik eğrinin pozitif eğime sahip olan sıvı faz hattı bölgesinde minimum noktaya yakın yerlerde başlamakta ve esas olarak karakteristik eğrinin negatif eğimli kısmında oluşmaktadır. Karakteristik eğrinin negatif eğimli bölgesinde oluşan bu osilasyonlar genellikle yoğunluk değişim tipi osilasyonlarla süperimpoze tarzda ortaya çıkmaktadırlar. BDO'nun sona erip saf YDO'nun başladığı nokta karakteristik eğrinin negatif eğimli kısmında bulunmakta ve boru konfigürasyonuna göre bu noktanın yeri değişmektedir. YDO karakteristik eğrinin pozitif eğimli kısımlarında çok küçük debi değerlerine kadar devam edebilmektedir. Özet olarak maksimum debiyle deneylere başlanıldığında debi miktarı azaltıldıkça önce BDO

ISI TRANSFERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

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 [15-19]. Bergles [15] ısı transfer iyileştirme yöntemlerini Tablo 3'de gösterildiği gibi sınıflandırmıştır. Tablo 4'de ise ısı transferi iyileştirme yöntemlerinin ısı transfer moduna göre sınıflandırılması verilmiştir.

Tablo 2. Çeşitli Parametrelerin Dinamik İki Fazlı Akış Kararsızlıklarına Etkisi [1-14]

	Kararsızlık Tipi		
	Basınç Düşümü Osilasyonları	Yoğunluk Değişimi Osilasyonları	Isıl 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

başlamakta ve bu osilasyonlar genellikle YDO ile süperimpoze tarzda ortaya çıkmaktadır. Debi azaltılmaya devam edildikçe süperimpoze osilasyonlar bitip saf YDO başlamaktadır. Debi daha da azaltıldıkça tek fazlı buhar akış bölgesine girilmektedir.

Tablo 2'de çeşitli parametrelerin dinamik iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi özet olarak verilmiştir. Tabloda artar terimi kararlılığın arttığı, azalır terimi ise kararlılığın azaldığı anlamına gelmektedir.

Tablo 3. Isı Transferi İyileştirme Yöntemleri [15]

Pasif Yöntemler	Aktif Yöntemler
İşlenmiş yüzeyler	Mekanik yardımcıları
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	

ISI TRANSFERİ İYİLEŞTİRMESİNİN İKİ FAZLI AKIŞ KARARSIZLIKLARINA ETKİSİ

İki 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. Reay [17] tarafından ısı transferi iyileştirme yöntemleri için yapılan sınıflandırmada 11 adet pasif yöntem 9 adet de aktif yöntem bulunmaktadır (Tablo 4). Literatür taramasından iki fazlı akış kararsızlıkları için kullanılan ısı transfer iyileştirme yöntemlerinin

1. İşlenmiş ve pürüzlü yüzeyler
2. Yerleşik iyileştirme aygıtları
3. Bobinli borular

olduğu görülmektedir. Diğer aktif ve pasif yöntemleri kullanan iki fazlı akış kararsızlık araştırmalarına yazarlarca rastlanılmamıştır.

İşlenmiş ve Pürüzlü Yüzeyler

Bir borunun iç yüzeyini modifiye etmek oldukça zor olmasına rağmen literatürde iç akışlarda çeşitli işlenmiş ve pürüzlü yüzeyler kullanılmış ve buharlaştırıcı boruları için çeşitli pürüzlülük konfigürasyonları geliştirilmiştir. İşlenmiş yüzeyler pürüzlü yüzeylerin aksine yüzey bitirme işlemlerinin bağıl olarak küçük ölçekli değişimine sahip yüzeyler veya kaplama uygulanmış yüzeylerdir. Menten vd. [9] ısı transfer iyileştirmesinin ve giriş aşırı soğutmasının düşey bir kanaldaki iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisini araştırmışlardır. İyileştirme yöntemi olarak iç yüzeyi işlenmiş boru ve Union Carbide Linde yüksek ısı akıllı yüzey kaplaması yapılmış boru kullanılmıştır (Tablo 5). 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 sistemi kararlı duruma

Tablo 4. Transferi İyileştirme Yöntemlerinin Isı Transfer Moduna Göre Sınıflandırılması [17]

	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 yardımcıları	-	B	C	-	B
Yüzey titreşimi	C	C	-	C	-
Akışkan titreşimi	C	(B)	(B)	-	B
Elektrostatik alanlar	(B)	-	B	B	(A)
Diğer elektrik yöntemleri	-	-	(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

Tablo 5. İşlenmiş ve Pürüzlü Yüzeyler Kullanan Borularda İki Fazlı Akış Kararsızlıkları

Yazar (Yıl)	Boru Tipi	Oryantasyon	Akışkan	İyileştirme Yöntemi	İncelenen Parametreler
Mentes vd.. [9]	Tek Boru	Düşey	R 11	Pürüzlü yüzey Bir inç başına 16 yiv	BDO, YDO, TO
Mentes vd.. [9]	Tek Boru	Düşey	R 11	Yüzey kaplama Union Carbide Linde yüksek ısı akılı kaplama	BDO, YDO, TO

getirmek için en yüksek giriş kısıtlayıcısı gerekmiştir. Ayrıca iç yüzeyi işlenmiş borudaki kaynama ısı transfer katsayısının boş boruya göre yaklaşık % 20, kaplamalı durumdaki kaynama ısı transfer katsayısının ise % 94'e kadar arttığı belirlenmiştir [22].

Yerleşik İyileştirme Aygıtları

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 vd. [8] yerleşik iyileştirme elemanları olarak boruya farklı adımlara sahip yaylar yerleştirmişlerdir (Tablo 6). 5 ve 15 mm adımlara sahip 1.0 mm 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.

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

Karlı vd. [5] çeşitli yerleşik iyileştirme aygıtlarının

Tablo 6. Yerleşik İyileştirme Aygıtları Kullanan Borularda İki Fazlı Akış Kararsızlıkları

Yazar (Yıl)	Boru Tipi	Oryantasyon	Akışkan	İyileştirme Yöntemi	İncelenen Parametreler
Widmann vd. [8]	Tek Boru	Yatay	R 11	İç yay Tel çapı: 1.0 mm Tel adımı: 5, 15 mm	BDO, YDO, ITO
Karlı vd. [5]	Tek Boru	Yatay	R 11	İç yay Tel çapı: 1.8 mm Tel adımı: 3.6, 11 mm	BDO, YDO, IO
Karlı vd. [5]	Tek Boru	Yatay	R 11	Eşdeğer kare bilezik Tel çapı: 1.8 mm Tel adımı: 11 mm	BDO, YDO, IO
Karlı vd. [5]	Tek Boru	Yatay	R 11	Eşdeğer üçgen bilezik Tel çapı: 1.8 mm Tel adımı: 11 mm	BDO, YDO, IO
Mentes vd. [9]	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, IO

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 (Tablo 6). 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.
3. İyileştirilmiş yüzeylerde kararsız bölge genişliği düz boruya göre daha büyüktür.
4. Düz boru en kararlı boru, adımı yüksek olan yay elemanlı boru ise en kararsız olarak bulunmuştur.
5. Eşdeğer üçgen ve kare bilezikli konfigürasyonlar yaylı konfigürasyonlardan daha kararlıdır.
6. Kütleli debi ve giriş sıcaklığı azaldıkça BDO ve YDO'nun periyot ve genlikleri artmaktadır.
7. En yüksek genlik ve periyota sahip osilasyonlar büyük adımlı yay içeren konfigürasyonda oluşmuştur.

Mentes vd. [9] ısı transfer iyileştirme elemanı olarak farklı adımlara sahip yay içeren üç boru konfigürasyonu kullanmışlardır (Tablo 6). Yaylı boruların incelenen diğer boru geometrilerine göre (boş boru, iç yüzeyi işlenmiş boru, yüzey

kaplama yapılmış boru) daha kararlı oldukları ve yaylı borular arasında ise efektif çapın azalmasının stabilizeyi arttırdığı belirlenmiştir.

Bobinli Borular

Zhou vd. [20] düşey helisel-bükülmüş borularda yoğunluk değişim osilasyonunu sistematik olarak incelemişlerdir (Tablo 7). Sistem basıncı, kütleli debi, ısı akısı, giriş aşırı soğutma miktarı, giriş ve çıkış kısıtlayıcılarının etkileri incelenmiştir. Sistemin stabilize eşik diyagramları saptanmış ve ayrıca yoğunluk değişim osilasyonlarının eşikliğini 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 eşikli kütleli debi ve çıkış kısıtlama derecesinin artmasıyla azalmış, sistem basıncı ile giriş kısıtlama derecesinin artmasıyla artmıştır.

Ting-Kuan vd. [21] boylerde helisel bükülmüş eğimli borularda yüksek basınçlı su-buhar iki fazlı akışın hidrodinamik kararsızlıklarını deneysel olarak araştırmışlardır (Tablo 7). İki

Tablo 7. Bobinli Borularda İki Fazlı Akış Kararsızlıkları

Yazar (Yıl)	Boru Tipi	Oryantasyon	Akışkan	İyileştirme Yöntemi	İncelenen Osilasyon Tipi
Zhou vd. [20]	Tek Boru	Düşey	Su	Helisel bükülmüş boru Helis açısı: 3.94° Helis çapı: 1.37 m	YDO
Ting-Kuan vd. [21]	Tek Boru	Eğik	Su	Helisel bükülmüş boru Boru çapı: 0.016 m Eğim açısı: 14°	BDO, YDO, IO
Guo vd. [11]	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 [23]	Tek Boru	Düşey ve Yatay	Su	Helisel bükülmüş boru Helis açısı: 4.27° Boru çapı: 15 mm Bobin çapı: 256 mm Bobin adımı: 60 mm H	

Tablo 8. Isı Transferi İyileştirmesinin İki Fazlı Akış Kararsızlıklarına Etkisi [1-3]

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 borulardan 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.
Isıl Osilasyonlar	1. İyileştirilmiş yüzeylerin cidar sıcaklıkları düz borulardan daha yüksektir. 2. İyileştirilmiş yüzeylerde cidar sıcaklıklarının periyot ve genlikleri düz borulardan daha yüksektir. 3. Isıl osilasyonların periyot ve genlikleri giriş sıcaklığının azalmasıyla artar. 4. Isıl osilasyonların periyot ve genlikleri kütleli debinin azalmasıyla artar.

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 da 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, kütleli debi, giriş aşırı soğutması, giriş ve çıkış kısıtlayıcısı gibi parametrelerden etkilenmektedir.

Guo vd. [11] helisel bükülmüş bir boruda su-buhar iki fazlı akışında basınç düşümü osilasyonlarını incelemiştir. 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 şiddetli bir şekilde engellemiştir. 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.

Ünal [23] tarafından sodyum ile ısıtılan buhar jeneratör borularındaki YDO ile ilgili yapılan bir 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.

SONUÇ

İki fazlı akış kararsızlığı içeren sistemlerde ısı transfer iyileştirme yöntemleri kullanılmaktaki amaç ısı transfer katsayısı yüksek, sürtünme katsayısı düşük ve kararlı çalışma karakteristiklerine sahip sistem tasarlamaktır. Bu makale ısı transfer iyileştirmesinin iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisini incelemek amacıyla hazırlanmıştır. İki 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. Isı transfer iyileştirmesinin iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi konusunda vurgulanması önemli noktalar Tablo 8'de özetlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar “Isı Transfer İyileştirmesi ve İki Fazlı Akış Kararsızlıkları” isimli 105M026 Nolu Tübitak ve 2005/1 nolu Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında hazırlanan bu çalışmaya olan destekleri nedeniyle Tübitak ve Atatürk Üniversitesi Araştırma Fonu'na teşekkür ederler.

KAYNAKÇA

1. **Boure, J.A., Bergles, A. E., Tong, L. S.,** 1973. Review of Two-Phase Flow Instability, Nuc. Eng. & Design, 25, 165-192.
2. **Bergles, A. E.,** 1976. Review of Instabilities in Two-Phase Systems, Advanced Study Institute on Two-Phase Flows & Heat Transfer, August, Istanbul TURKEY 16-27, 1976.
3. **Kakaç, S.,** A Review of Two-Phase Flow Instabilities. In Advances in Two-Phase Flow on Heat Transfer, Martinus, Nijhoff, Boston. vol.II, 577-668, 1994.
4. **Yılmaz, 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.
5. **Karslı, S., Yılmaz, M., Çomaklı, 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.
6. **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.
7. **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.
8. **Widmann, F., Çomaklı, O., Gavrilescu, C. O., Ding, Y., 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.
9. **Mentes, A., Yıldırım, O. T., Gurgenci, H., Kakaç, S., Veziroğlu, T. N.,** 1983. Effect of Heat Transfer Augmentation on two-phase Flow Instabilities in a Vertical Boiling Channel, Wärme-und Stoffübertragung, 17, 161-169.
10. **Wedekind, G. L.,** 1971. An Experimental Investigation into The Oscillatory Motion of The Mixture Vapor Transition Point in Horizontal Evaporating Flow, Journal of Heat Transfer, July 28, 93, 47-54.
11. **Guo, L. J., Feng, Z. P., 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.
12. **Yılmaz, M., Karslı, S., ve Çomaklı, Ö.,** 2001. Isı transfer İyileştirmesinin Yatay Bir Borudaki İki Fazlı Akış Basınç Düşümü Osilasyonlarına Etkisi, 13. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 1-9, Konya.
13. **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.
14. **Liu, H. and Kakaç, S.** 1991. An Experimental Investigation of Thermally Induced Flow Instabilities in a Convective Boiling Upflow System. Waerme- und Stoffübertragung, 26, 365-376.
15. **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.
16. **Webb, R. L.,** 1994. Principles of Enhanced Heat Transfer, John Wiley & Sons, New York.
17. **Reay, D. A.,** 1991. Heat Transfer Enhancement - A Review of Techniques and Their Possible Impact of Energy Efficiency in the U.K. Heat Recovery Systems & CHP, 11 (1), 1-40.
18. **Ohadi, M. M., Dessiatoun, S.V., Darabi, J., Salehi, M.,** 1996. Active Augmentation of Single-Phase and Phase-Change Heat Transfer - an Overview. Process, Enhanced, and Multiphase Heat Transfer: A Festschrift for A. E. Bergles. Ed. by Manglik, R.M. and Kraus, A.D., Begell House, New York, 277-286.
19. **Thome, J.R.,** 1990. Enhanced Boiling Heat Transfer, Hemisphere Publishing Corp., Washington, D.C.
20. **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.
21. **Ting-Kuan, C.,** 1990. Selected Papers on Two-Phase Flow and Boiling Heat Transfer. Xi'an Jiaotong University, China.
22. **Lin, Z. H., Veziroğlu, T. N., Kakaç, S., Gurgenci, H., Mentes, A.,** 1982. Proceedings of The Seventh International Heat Transfer Conference. Eds. Grigull, U., Hahne, E., Stephan, K., Straub, J., 331-336.
23. **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.