



Konik sarımlı yay elemanlarının kaynamalı iki fazlı akış rejimlerine etkisi

Effect of conical helical spring elements on boiling two-phase flow regimes

Yeşim Solak Coşkun¹, Ömer Çomaklı², Fatin Sönmez^{3*}, Orhan Yıldırım⁴, Şendoğan Karagöz⁵

¹ Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, yesim.solak.123@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3533-3796>

² Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ocomakli@atauni.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4631-7989>

³ Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, fatinsonmez@artvin.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9630-1232>

⁴ Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, orhan.yildirim@atauni.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8780-1297>

⁵ Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, skaragoz@atauni.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2618-8788>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 28 Ekim 2025
Revizyon 30 Kasım 2025
Kabul 9 Aralık 2025
Online 25 Mart 2025

Anahtar Kelimeler:

İki fazlı akış,
Kaynamalı ısı transferi,
Akış kararsızlığı,
Isı transferi iyileştirilmesi,
Konik yay

ÖZ

Bu çalışmada, yatay borularda gerçekleşen iki fazlı kararlı akış koşullarında, yüzey artırıcı eleman olarak kullanılan konik sarımlı yay (çapı azalan ve artan yönde) dizisinin ısı transferi ve akış kararsızlıklarına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, sabit giriş sıcaklığı (15 °C), sabit ısı gücü (22 kW) ve sabit çıkış kısıtlaması altında iki farklı boru tipinde (boş boru ve konik yay dizili boru) gerçekleştirilmiştir. Kütleli debi 72 g/s'den başlayarak 17 g/s'ye kadar kademeli olarak azaltılmış ve her kademede sistemin kararlı duruma ulaşması beklenerek ölçümler alınmıştır. Deneysel sonuçlar, yüzey artırıcı eleman kullanılan boruda (Boru-2) basınç düşümünün düz boruya (Boru-1) kıyasla daha yüksek olduğunu, ancak akışın daha homojen ve dengeli bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca, cidar sıcaklıkları daha düşük seviyelerde seyretmiş ve üst-alt cidar sıcaklıkları arasındaki fark azalmıştır. Bu durum, konik yay elemanının oluşturduğu türbülans sayesinde sıvı ve buhar fazlarının daha iyi karışmasına bağlanmıştır. Burn-out olayının daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştiği, böylece boru cidarının aşırı ısınmaya karşı daha iyi korunduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler, bu tür yüzey artırıcı elemanların iki fazlı ısı transfer sistemlerinde ısı performansı artırırken aynı zamanda sistem kararlılığını da olumlu yönde etkilediğini ortaya koymuştur. Çalışma, özellikle kaynamalı akış içeren mühendislik sistemlerinde, güvenli ve verimli tasarım açısından önemli katkılar sunmaktadır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 October 2025
Received in revised form 30 November 2025
Accepted 9 December 2025
Available online 25 March 2025

Keywords:

Two-phase flow,
Boiling heat transfer,
Flow instability,
Heat transfer enhancement,
Conical spring

ABSTRACT

In this study, the effects of a conical helical spring insert (with a diameter that decreases and then increases along the flow direction), used as a surface enhancement element, on heat transfer and flow instability under steady-state two-phase flow conditions in horizontal tubes were experimentally investigated. The experiments were conducted at a constant inlet temperature (15 °C), a constant heat input (22 kW), and a fixed outlet restriction, using two different tube configurations: a smooth tube and a tube equipped with a conical helical spring insert. The mass flow rate was gradually decreased from 72 g/s to 17 g/s, and measurements were taken after the system reached steady-state conditions at each stage. Experimental results showed that the pressure drop in the tube with the surface enhancement element (Tube-2) was higher compared to the smooth tube (Tube-1), but the flow was more homogeneous and uniform. Moreover, the wall temperatures were observed to be lower, and the temperature difference between the upper and lower tube walls decreased. This behavior is attributed to improved mixing of the liquid and vapor phases due to turbulence generated by the conical helical spring. The burn-out phenomenon occurred at lower wall temperatures, indicating better protection of the tube wall against overheating. The results indicate that these surface enhancement elements not only improve thermal performance in two-phase heat transfer systems but also enhance flow stability. This study provides important insights for achieving safe and efficient designs, especially in engineering systems involving boiling flow.

Doi: 10.24012/dumf.1812587

* Sorumlu Yazar

Giriş

İki fazlı akışlar; nükleer reaktörler, kimyasal üretim tesisleri, rafineriler, ilaç ve gıda işleme sistemleri, soğutma uygulamaları, çevresel mühendislik sistemleri ile buhar jeneratörleri gibi pek çok endüstriyel sürecin merkezinde yer almaktadır. Aynı zamanda atmosferde yağmur damlalarının oluşumu veya suyun donma süreci gibi çeşitli doğal olaylarda da bu akış tipiyle karşılaşmaktadır. Tek fazlı akışlara kıyasla daha yüksek ısı transfer katsayısına sahip olmaları, özellikle yüksek ısı akısı gerektiren uygulamalarda iki fazlı akışlara olan ilgiyi artırmıştır. Bu artan ilgi, ısı transfer performansının iyileştirilmesi ve sistem güvenliğinin artırılması amacıyla yapılan araştırmaların sayısında da önemli bir yükselişe yol açmıştır [1]-[8].

Kaynamalı ısı transferi içeren sistemlerde, akışkan debisi ve sistem basıncındaki dalgalanmalar sonucu oluşan akış kararsızlıkları, ısı değiştirici yüzeylerde performans düşüşlerine ve yapısal bozulmalara neden olabilmektedir. Bu kararsızlıklar; kaynama krizi (boiling crisis), ısıl yorulma, geçici sıcaklık artışlarının kontrol zorlukları, mekanik titreşimler ve yüzeyde burn-out (yüzeyin lokal olarak aşırı ısınarak hasar görmesi) gibi problemlerle kendini gösterebilmektedir. Bu tür sorunlar, sistemlerin hem ekonomik ömrünü azaltmakta hem de işletme güvenliğini tehdit etmektedir.

İki fazlı akış sistemlerinin doğru şekilde tasarlanabilmesi ve güvenilir biçimde işletilebilmesi, bu akışların ısı karakteristiklerinin ve hidrodinamik davranışlarının önceden öngörülebilmesine bağlıdır. Bu bağlamda, sistem verimliliğinin artırılması, optimum işletme koşullarının belirlenmesi ve arızaların önlenmesi amacıyla akış kararlılığı önemli bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Akışın kararlı olması, sistem içerisindeki debi, sıcaklık ve basınç gibi parametrelerin zamanla sabit bir düzene ulaşması ya da çok sınırlı değişimlerle yeni bir sürekli duruma yönelmesi anlamına gelmektedir. Buna karşın kararsız akış koşullarında, bu parametrelerde periyodik ya da düzensiz salınımlar görülmekte ve akış başka bir dengeli duruma asimptotik olarak yaklaşmamaktadır. Bu tür kararsızlıkların anlaşılması ve modellenmesi hem akademik hem de endüstriyel açıdan büyük önem taşımaktadır.

Rakopoulos ve Murgatroyd, (1980) buhar jeneratörlerinde iki fazlı akışın dinamik kararsızlıklarını inceleyerek, zamana bağlı koşullar altında iki fazlı akışa ait korunum denklemlerinin çözümlerini sunmuş ve ayrıca ısıtıcı cidarının dinamik davranışını teorik olarak analiz etmişlerdir. Çalışmada, sistemin kararlılığı üzerinde ısıl güç ile akış arasındaki etkileşimin belirleyici bir rol oynadığı vurgulanmıştır [9]. Tewari vd. (1988), yatay boruda 0.6 ila 1 bar arasındaki basınç koşullarında saf su ve sodyum klorür kullanarak azalan film tabakasında çekirdek kaynamalı ısı transfer katsayısını incelemiştir. Atmosfer ve altı basınçlarda, paslanmaz çelik boruda kaynamalı ısı transfer katsayısı için bir korelasyon geliştirilmiştir. Doyma basıncının düşmesiyle birlikte, ısı transfer katsayısında azalma meydana geldiği tespit edilmiştir [10]. Yu vd. (2002), 0.91 m uzunluğunda ve 2.98 mm çapında yatay boruda iki fazlı basınç düşümü. Kritik ısı akısı ve kaynamalı ısı transferini incelemişlerdir. Elde edilen veriler hem küçük hem de büyük kanallar için mevcut korelasyonlarla uyumlu bulunmuştur. Küçük kanallarda

basınç düşümünün, aynı debide büyük kanallara göre daha düşük olduğu gözlenmiştir; Chisholm korelasyonu bu farklara göre uyarlanmıştır. Ayrıca, ısıl gücün kaynamalı ısı transferi üzerinde belirgin etkisi olduğu sonucuna varılmıştır [11]. Leung vd. (2005), ısı verilen borular içinde buhar ve suyun birlikte akışı sırasında oluşan basınç kaybını deneysel olarak incelemiştir. Artan ısı akısının tek fazlı akışta basınç gradyanını azalttığı, iki fazlı akışta ise sürtünme çarpanının kabarcıklı akışta arttığı, halkalı akışta azaldığı gözlemlenmiştir. Dry-out öncesi sürtünme çarpanı en yüksek seviyeye ulaşmış, ardından termodinamik kalite düşmüştür. Bu durum, sıvı film incilmesi ve sürüklenmenin sona ermesiyle ilişkilendirilmiştir [12]. Li vd. (2007), nitrojenle yapılan çalışmalarında, düşey yönde kaynamalı iki fazlı akış sırasında basınç düşümünü sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Değişken ısı akısı ve sabit kütesel debi altında, 6 mm çapındaki dikey bir boruda toplam basınç düşümü karakteristikleri analiz edilmiş ve sayısal bir korelasyonla desteklenmiştir. Sonuçlar, geçiş noktasının daha erken gerçekleştiği ve deneysel verilerle öngörülerin uyumlu olduğunu göstermiştir [13]. Moreno Quibén ve Thome, (2007), yatay borularda buharlaşma sürecinde yaşanan iki fazlı basınç düşümünü analitik olarak incelemişlerdir. Deneysel veriler, Wojtan-Ursenbacher-Thome akış modeline dayalı bir akış rejimi ile ilişkilendirilerek, akış modeli haritasına göre iki fazlı sürtünmeli basınç düşümünü tahmin etmeye yönelik yeni bir modelin geliştirilmesine temel oluşturmuştur. Geliştirilen modelin detaylı tanıtımı da çalışmada sunulmuştur [14]. Çomaklı vd. (2005), iki fazlı akışlardaki kararsızlık karakteristiklerini deneysel olarak analiz etmiş; aşırı soğutma ve ısıl gücün sistem üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur [15]. Diğer önemli çalışmalarda boru içi türbülans oluşturma, farklı çapların etkisi, sürtünme basınç kayıpları ve akış kararsızlığı gibi konular farklı koşullarda incelenmiştir [16]-[21]. Yeşilyurt (2015), boru içi konik sarımlı yay elemanları kullanarak zorlanmış taşınımli iki fazlı akışlarda ısı transferi ve akış kararlılığı üzerindeki etkileri ortaya koymuştur [22]. Adiguzel ve Göcücü, (2022) iki fazlı akışlarda ısı transfer katsayısının yüksek olmasından hareketle, bu çalışmada yatay bir boruda halka biçimli türbülantörlerin akış kararsızlıkları ve ısı transferine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Boş boru ile halka serisi yerleştirilmiş boru karşılaştırıldığında, yüzeyi artırılmış boruda burn-out sıcaklık sınırlarının belirgin şekilde azaldığı, ancak aynı zamanda basınç düşümünün daha yüksek olduğu görülmüştür [23]. Zhu vd. (2024), küçük çaplı yatay borularda iki fazlı karşı akım akış sınırlaması (CCFL) ve akış davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Boru çapı CCFL karakteristiklerini önemli ölçüde etkilerken, üst plenumdaki su yükünün etkisi azdır. Görüntü işleme ve istatistiksel analizlerle, CCFL karakteristikleri viskozite etkisini içeren boyutsuz parametrelerle iyi ilişkilendirilmiştir. Gaz-sıvı arayüzü periyodik dalgalanmakta, akış deseni geçişleri görülmekte ve artan hava hızıyla sıvı kütlesi su girişine doğru kaymaktadır. Su girişinden uzaklaştıkça sıvı tutulması azalmaktadır [24]. Zhang vd. (2023), 3.12 mm iç çaplı bir mini tüp içerisinde hava-su iki fazlı akışları deneysel olarak incelenmiştir. Akışkan hızları geniş bir aralıkta değiştirilmiş ve dik açılı prizma yardımıyla iki yönden eşzamanlı görüntüleme yapılarak üç boyutlu gaz-sıvı arayüzleri oluşturulmuştur. Gaz boşluk oranı, hızlı kapanan vana yöntemiyle doğrulanan verilerle analiz edilmiştir. Kabarcıklı,

yoğun ve halka şeklinde olmak üzere üç farklı akış deseni gözlemlenmiştir. Kesit boşluk oranı dağılımı, aralıklı akışta çift tepe, halka akışta ise tek tepe göstermiştir. Hacimsel boşluk oranı akış deseni ve hızına bağlı olmakla birlikte, çok yüksek gaz hızlarında sıvı oranından bağımsız hale gelmektedir. Deneysel bulgulara dayanarak yeni bir sürtünme basınç düşüşü korelasyonu geliştirilmiştir [25]. Cheon vd. (2023) yaptıkları çalışmada, değişen yarıçaplı kapiler bir tüpte sıkıştırılabilir (gaz) ve sıkıştırılamaz (Newtonyen sıvı) iki fazlı karışmayan akışların davranışını incelemektedir. Yüzey geriliminden kaynaklanan kapiler kuvvetler ve gazın sıkıştırılabilirliği etkileşerek alışılmadık akış özelliklerine yol açmaktadır. Gaz kabarcıkları tüp boyunca ilerledikçe basınç düşüşü nedeniyle genişler ve bu da çıkışta girişe göre daha yüksek bir hacimsel akış hızına neden olur. Bu genişleme yalnızca basınç farkına değil, ortam basıncına da bağlıdır. Ayrıca, kapiler kuvvetler belirli bir basınç eşliğinin altında akışı engeller. Eşik aşıldığında ise akış hızı ile basınç farkı arasında zayıf doğrusal olmayan bir ilişki gözlemlenmiştir [26].

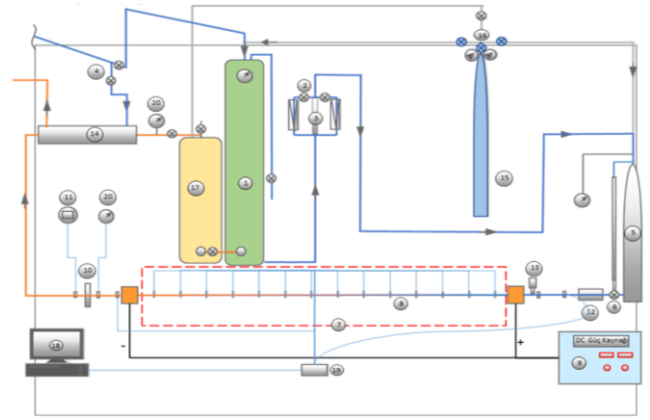
Literatürde sayısal olarak da yapılan iki fazlı akış çalışmaları mevcuttur. Karagoz vd. (2017), eşanjör borusunda türbülans oluşturan silindirik türbülantörlerle ısı transferini artırmayı amaçlayan deneysel ve sayısal bir çalışma yapmıştır. Farklı türbülantör aralıkları (101, 216, 340 mm) ve açılar (0° , 45° , 90°) ile su akış hızları ($Re=6000-17.000$) ayarlanmıştır. Nu sayısı, Re sayısı ve sürtünme faktörü incelenmiş, boru eklerinin ısı transferi ve enerji tasarrufunu artırdığı bulunmuştur. En yüksek Nu sayısı 101 mm aralıkta %24 artışla elde edilmiştir. Sürtünme faktörleri sırasıyla 0.30, 0.19 ve 0.14 olarak ölçülmüştür; akış ve ısı transferi analizleri ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [27]. González-Estrada vd. (2024), yatay yağ-su akış rejimlerini incelemek için Eulerian-Eulerian ve karışım çokfazlı modelleri, realizable k- ϵ türbülans modeli ile kullanılarak sayısal çalışmalar yapılmıştır. Deneylerde, yoğunluğu 880 kg/m^3 ve viskozitesi 180 cP olan su ve mineral yağ kullanılmış, yüzeyel hızları sırasıyla 0.1–1.2 m/s ve 0.1–0.5 m/s aralığında değiştirilmiştir. Sayısal model deney koşullarına uygun olarak tanımlanmış ve karışık halde giriş yapan akışkanların tabakalaşmış akış modeli oluşturması sağlanmıştır. Eulerian-Eulerian modeli, üç boyutlu dağılımı deney sonuçlarına yakın şekilde görselleştirebilmiş, karışım modeli ise özellikle yağ-su dağılımlarında benzerlik göstermemiştir. Ayrıca Eulerian-Eulerian modeli, deneysel tutma değerlerini ortalama %15.2 hata ile tahmin etmiştir [28]. Oyelade vd. (2024), iki fazlı akış taşıyan yatay borularda doğrusal olmayan sınır koşulları ilk kez incelenmiştir. Galerkin yöntemiyle denklem setine dönüştürülüp, farklı durumlar analiz edilmiştir. Harmonik denge yöntemi ile borunun kararlı tepkileri incelenmiş, sonuçlar sayısal yöntemlerle doğrulanmıştır. Doğrusal olmayan sınır koşulları üç gruba ayrılmış, sadece birinde kararlı durum oluşmaktadır. Borunun eğriligi ve buhar kalitesi rezonans frekansını etkiler. Çalışma, bu tür boruların titreşim davranışını daha iyi anlamaya katkı sağlamıştır [29]. Banerjee vd. (2024), iki fazlı ham petrol farklı borulardaki su akışı ANSYS kullanılarak simüle edip karmaşık hesaplamalar olmadan hız, hız profilleri ve basınç düşüşünü tahmin etmişlerdir. CFD analizi, deneysel sonuçlarla iyi bir uyum sağladığını belirtmişlerdir [30]. Feng vd. (2024), düşük boşluk fraksiyonları altında sürtünme

basınç düşüşü tahminlerini değerlendirmek için akış hızlarını, boşluk fraksiyonlarını ve akış modellerini analiz ederek, özellikle kabarcıklı ve sümüklü akışlara odaklanarak yatay tüplerdeki hava-su iki fazlı akışının kararlı durum özelliklerini deneysel olarak araştırmıştır [31].

Bu çalışma, yatay borular içinde uygulanan ısı transferi iyileştirme yöntemlerinin, iki fazlı akış rejimleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla yürütülmüştür. Elde edilen bulgular kapsamlı bir değerlendirme sunulmuştur.

Materyal ve Metot

Bu araştırmada, yatay borularda gerçekleşen iki fazlı kararlı akışın karakteristikleri; ısı akışı, akış debisi ve konik yay dizilerinden oluşan boru içi elemanların etkileri açısından değerlendirilmiştir. Şekil 1’de görüldüğü gibi, deney düzeneği üç ana bölümden oluşmaktadır: akışkan besleme, test ve depolama bölümü.



Şekil 1. Deney düzeneği

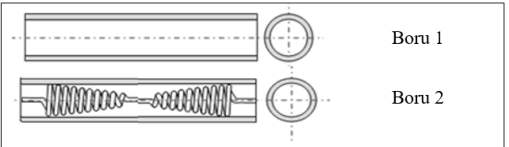
İş yapan suyun test borusuna giriş koşullarını sağlayan akışkan besleme bölümü; ana besleme tankı (1), debi ayar vanası (2), iki flowmetre (3), bir debi transdüseri (12), azot tankı (15) ve basınç regülatöründen (16) oluşmaktadır. Dikey konumlandırılmış silindirik ana tank, 3 m yüksekliğe ve 0.7 m^3 hacme sahip olup, 50 bar işletme basıncına dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Akışkan debisi, kontrol vanası ile ayarlanmakta; biri 0–400 l/h, diğeri 0–1000 l/h aralığında çalışan iki ibreli flowmetre ve dijital transdüser yardımıyla ölçülmektedir. Her iki flowmetre 40 bar basınca ve 100°C sıcaklığa kadar çalışabilmektedir.

Test bölümü; dengeleyici tank (5), giriş kontrol vanası (6), test odası (7), test borusu (8), DC güç kaynağı (9), orifis (10), dijital manometre (11), türbin tipi debi ölçer (12) ve basınç transdüseri (13) olmak üzere dokuz ana bileşenden oluşur. Dengeleyici tank, test borusu yeterli uzunlukta değilse sıkıştırılabilir hacmi sağlamak amacıyla kullanılır ve 0.05 m^3 hacminde. Akışkan seviyesi ve hacim değişimlerinin izlenebilmesi için, bu tanka 30 bar basınca dayanıklı şeffaf seviye göstergesi ile bir manometre entegre edilmiştir. Dengeleyici tank ile test borusu arasında türbin tipi debi ölçer, bourdon tipi manometre, basınç transdüseri ve sıcaklık sensörü yer alır. Türbin tipi ölçer debi salınımlarını, bourdon tipi manometre boru girişindeki basıncı ve basınç transdüseri ise bu noktadaki basınç dalgalanmalarını ölçmek amacıyla kullanılmıştır. Akışkan giriş sıcaklığı T tipi termoelemanla ölçülmüş ve deneyler 17–72 g/s arası kütleli debilerde

gerçekleştirilmiştir. 40 kW gücündeki DC güç kaynağının pozitif ve negatif uçları, test borusunun giriş ve çıkışına bağlanarak ısı gücü aktarımı sağlanmıştır. Verilen ısı gücü, güç kaynağındaki dijital voltaj ve akım göstergelerinden okunmuştur. Akış osilasyonları ve basınç düşümünü kontrol etmek amacıyla test borusu çıkışına bir orifis levhası yerleştirilmiş; giriş basıncı bourdon tipi manometreyle, çıkış basıncı ise fark basınç manometresiyle ölçülmüştür.

Depolama bölümü; yoğuşturucu (14), azot tankı (15), basınç regülatörü (16) ve akışkan depolama tankı (17) olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır. Bu bölüm, test borusundan çıkan akışkanın toplandığı ve yeniden sisteme kazandırıldığı kısımdır. Genellikle buhar fazında çıkan su, çalışma başlangıç koşullarına döndürülmek üzere, su soğutmalı bir yoğuşturucudan geçirilerek yoğuşturulmakta ve ardından depolama tankına yönlendirilmektedir. Yoğuşturucu, yatay gövde-boru tipinde bir ısı değiştirici olup, buhar fazındaki akışkanın sıvı faza dönüştürmek amacıyla kullanılmaktadır. 0.16 m çapında ve 1.45 m uzunluğundaki gövdesi dikişli siyah borudan üretilmiş olup, içerisinde 0.02 m çapında spiral şekilde yerleştirilmiş bakır bir boru bulunmaktadır. Bu yapıda, bakır boru içinden test bölümünden gelen akışkan, dışından ise soğutma suyu geçmektedir. Yoğuşurma işlemi sonrası sıvı faza geçen akışkan, 0.75 m çapında, 1.75 m yüksekliğinde ve 1 cm cidar kalınlığına sahip, dikey konumlandırılmış çelik sac malzemeden imal edilen depolama tankında toplanmaktadır. Deneyler sırasında, bu tankta biriken su, yüksek basınçlı azot gazı ile tekrar ana besleme tankına gönderilerek sistem döngüsü tamamlanmaktadır.

Deneyler iki farklı boru tipinde sabit akışkan giriş sıcaklığında, sabit ısı gücü ve sabit çıkış orifis çapında yapılmıştır.



Boru İsmi	Borunun Karakteristiği	de (mm)
Boru-1	Boş boru	17.60
Boru-2	Tel çapı: 1.8mm, 150mm aralıklı, yay adımı: 10mm konik yay dizisi	17.34

Şekil 2. Isı transfer elemanının yüzey konfigürasyonları ve karakteristikleri

Şekil 2’de, ısı transfer iyileştirme elemanının şematik görünümü ile yüzey konfigürasyonları ve karakteristikleri sunulmuştur. Boru-1, herhangi bir yüzey artırıcı içermeyen yalın boruyu; Boru-2 ise konik sarımlı yay dizileriyle donatılmış yüzey artırmalı boruyu temsil etmektedir. Şekilde gösterildiği üzere, ısı transfer yüzeyleri, aşağıda verilen eşitlik yardımıyla hesaplanan efektif çap (d_e) esas alınarak tanımlanmaktadır.

$$d_e = \sqrt{4V'/\pi L} \quad (1)$$

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

Kararlı durum karakteristiklerini bulmak amacıyla boş boru tipinden başlanarak sabit çıkış orifis kısıtlamasında, sistem

basıncı (P_{sist}) 7.5 bar ve $T_g=15^\circ\text{C}$ akışkan giriş sıcaklığında $Q=22\text{ kW}$ ısı gücünde deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Kararlı durum karakteristiklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen deneylerde, basınç düşümünün debiyle değişimi $\Delta P-\dot{m}$ grafiklerle değerlendirilmiştir. Bu deneylerde, dengeleyici tank basıncı ile orifis sonrasındaki akışkan basıncı arasındaki fark, sistemdeki basınç düşümünü göstermektedir.

Deneylere $\dot{m}=72\text{ g/s}$ başlangıç debisi ile başlanmış; bu değerlerde akış, tek fazlı ve sıvı karakterlidir. Karakteristik eğrinin elde edilebilmesi için debi, yaklaşık 8–9 g/s aralıklarla kademeli olarak azaltılmıştır. Tamamen buhar fazına ait karakteristiklerin belirlenmesi amacıyla debi, minimum 17 g/s seviyesine kadar düşürülmüştür. Ancak, burn-out riski nedeniyle bu değer altına inilmemiştir. Burn-out bölgesine ulaşıp ulaşılmadığı, boru cidar sıcaklıkları ve çıkış sıcaklıkları gözlemlenerek değerlendirilmiştir.

Kararlı durum deneylerinde izlenen adımlar şu şekildedir:

- Ana tank, azot gazı ile basınçlandırılmış ve sistem basıncı, regülatör vanası ile ayarlanmıştır.
- Dengeleyici tankın giriş-çıkış vanaları kapatılarak, burada sıkıştırılabilir hacim oluşması engellenmiştir.
- Debi, kontrol vanası yardımıyla en yüksek değerine ayarlanmıştır.
- Test borusuna giren su, dijital termostat yardımıyla hedef sıcaklığa getirilmiştir.
- Yoğuşturucunun soğutma suyu devresi aktif hale getirilmiştir.
- Sistem çalıştırılmış ve kararlı duruma gelinceye kadar beklenmiştir.
- DC güç kaynağı, hedef ısı gücüne ayarlanarak test borusuna ısı verilmiştir.
- Boru yüzey sıcaklıklarında 0.5°C 'den fazla değişim gözlenmediğinde sistemin kararlı duruma ulaştığı kabul edilmiştir.
- Kararlı durumda gerekli tüm ölçümler alınarak deney tamamlanmıştır.
- Her yeni debi değeri için, sistem 17 g/s'ye ulaşana kadar yukarıdaki adımlar tekrarlanarak deneyler sürdürülmüştür.

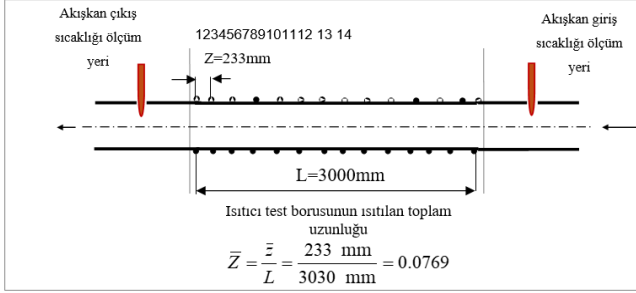
Ölçümler ve belirsizlik analizi

Deney sisteminde, $\pm 0.5^\circ\text{C}$ hassasiyetle sıcaklık ölçümleri, 0.25 mm çapındaki T tipi (bakır-konstantan) termociftlerle toplam 30 noktada gerçekleştirilmiştir. Boru cidar sıcaklıkları, test borusu boyunca iki amyant levha arasına yerleştirilen termoeleman uçları ile doğrudan cıdardan alınmıştır. Akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıkları ise, boru içine daldırılmış, ucu kapalı 5 mm çapındaki ince bakır borulara yerleştirilen termoelemanlarla ölçülmüştür.

Şekil 3'te görüldüğü üzere, test borusu boyunca eşit aralıklarla yerleştirilen toplam 28 termoeleman çiftinin 14'ü üst, 14'ü alt tepe noktasında konumlandırılmıştır. Elektriksel ısıtma nedeniyle oluşabilecek gürültüyü önlemek amacıyla

termoçift uçları, elektriksel olarak yalıtkan ancak termal iletkenliği yüksek amiyant levhalar arasında yerleştirilmiştir.

Termoelemanlardan ve basınç/debi transdüserlerinden gelen analog sinyaller, Advantech veri toplama kartı ve VisiDAQ 3.1 yazılımı ile sayısallaştırılarak analiz edilmiştir. Termoelemanların negatif (konstantan) ucu kartın negatif girişine, pozitif (bakır) ucu ise kanal girişine bağlanmıştır. Saniyede 100 örnekleme yapabilen veri toplama kartının toplam ölçüm hatası, seçilen kazanç değerine bağlı olarak $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ile $\pm 0.5^\circ\text{C}$ arasında değişmektedir [27].



Şekil 3. Test borusu cidar sıcaklığı ölçüm noktaları

Deney sisteminde; ana tank, dengeleyici tank, azot tankı, test borusu girişi, orifis öncesi ve sonrası olmak üzere çeşitli noktalarda basınç ölçümleri yapılmıştır. Ana tank, dengeleyici tank, azot tankı ve orifis girişindeki basınçlar, 0-100 bar aralığında ölçüm yapabilen bourdon tipi manometrelerle belirlenmiş; bu manometrelerin toplam hata payı ± 0.1 bar olarak kaydedilmiştir. Orifis çıkış basıncı ise dijital manometre ile ölçülmüş ve 0.5 bar hassasiyetle okunmuştur. Test borusu girişinde kullanılan basınç transdüseri, giriş basıncını ve bu noktadaki osilasyonları tespit etmek amacıyla kullanılmıştır. 4-20 mA aralığında sinyal veren transdüserden alınan analog veriler, veri toplama kartı ile işlenmiş ve ölçüm hatası ± 0.1 seviyesinde gerçekleşmiştir. Kütleli debi, sistemin akış rejimleri ile osilasyon ve kararlılık sınırlarının belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Akışkanın debisi, kontrol vanası yardımıyla ayarlanmakta; biri 0-400 l/h, diğeri 0-1000 l/h aralığında çalışan iki flowmetre ile ölçülmektedir. Flowmetrelerin toplam hata oranı $\pm 0.4\%$ 'tir. Deneyler, 17-72 g/s kütleli debi aralığında yürütülmüştür. Debi osilasyonlarını tespit etmek amacıyla, dengeleyici tank ile test borusu arasına türbin tipi bir debi ölçer yerleştirilmiştir. Bu ölçere ait teknik özellikler Tablo 1'de verilmiş olup, ölçüm hatası $\pm 1\%$ seviyesindedir.

Tablo 1. Türbin tipi debi ölçerin teknik özellikleri

Parametre	Değer
Akış debisi	15-500 l/h
Doğruluk	$\pm 1\%$
Maksimum viskozite	1000 centipoise
Maksimum çalışma basıncı	500 kPa
Maksimum çalışma sıcaklığı	80°C
Pulse tipi	Hall effect sensör
Pulse/Litre	400
Çıkış sinyali	4-20 mA
Boyut	50×50 mm

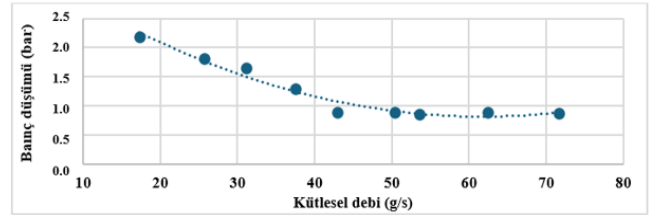
Deneylerde kullanılan DC güç kaynağı yaklaşık 40 kW kapasiteye sahiptir. Voltaj ve akım değerleri doğrudan güç kaynağı üzerinden ayarlanmakta ve dijital göstergelerden okunabilmektedir. Elektriksel güç ölçümlerinde toplam hata oranı $\pm 0.2\%$ olarak belirlenmiştir.

Bulgular ve Tartışma

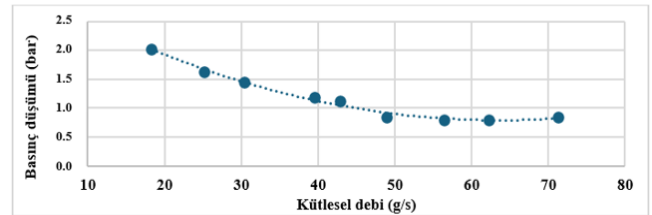
Kararlı durum karakteristiklerinin belirlenmesinde, test borusundaki kütleli debiye karşılık gelen basınç düşümleri grafiklerle gösterilmiş, literatürde sıkça kullanılan yatık "S" biçimindeki karakteristik eğriler çizilmiştir. Grafiklerde, her iki test borusu için farklı kütleli debilerde, dengeleyici tank ile test borusu çıkış basıncı arasındaki farktan hesaplanan basınç düşümleri yer almaktadır.

Eğrilerin pozitif eğimli bölgesi yüksek debilerdeki tek fazlı sıvı akışına, negatif eğimli kısmı ise ilk buhar kabarcıklarının oluştuğu ve iki fazlı akışın başladığı bölgeye karşılık gelmektedir. İki fazlı akışın ilerlemesiyle buhar hacmi artar, ortam yoğunluğu azalır ve bu durum basınç düşümünün yükselmesine neden olur. Kütleli debi daha da azaltıldığında, eğrilerde pozitif eğime geçiş gözlenir ve bu da basınç düşümünde azalmaya yol açar.

Her iki boru için karakteristik eğriler çizilmiş ve basınç düşümü değerleri k kriterine göre karşılaştırılmıştır. Sabit giriş sıcaklığı ($T_g=15^\circ\text{C}$) ve ısı güç ($Q=22$ kW) altında yapılan deneylerde; yüzey artırımı olmayan boş boru "Boru-1", 10 mm adımlı konik yay dizili boru ise "Boru-2" olarak adlandırılmıştır.



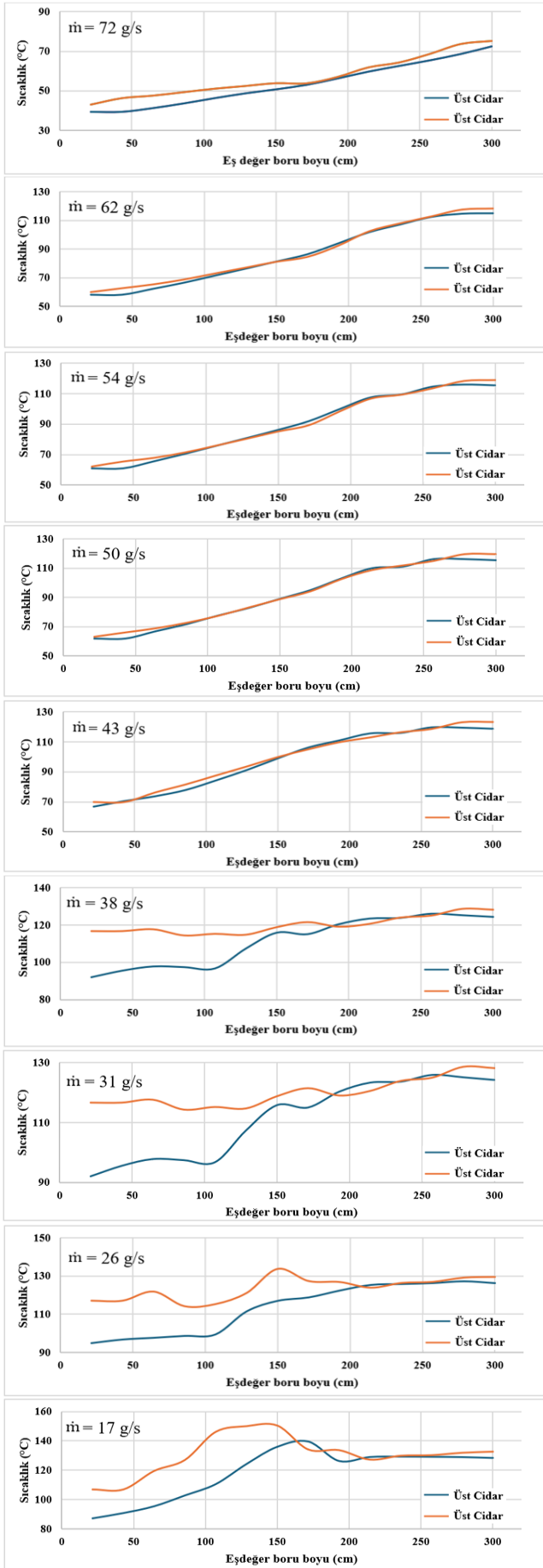
Şekil 4. Boru-1 için kararlı durum karakteristik eğrisi



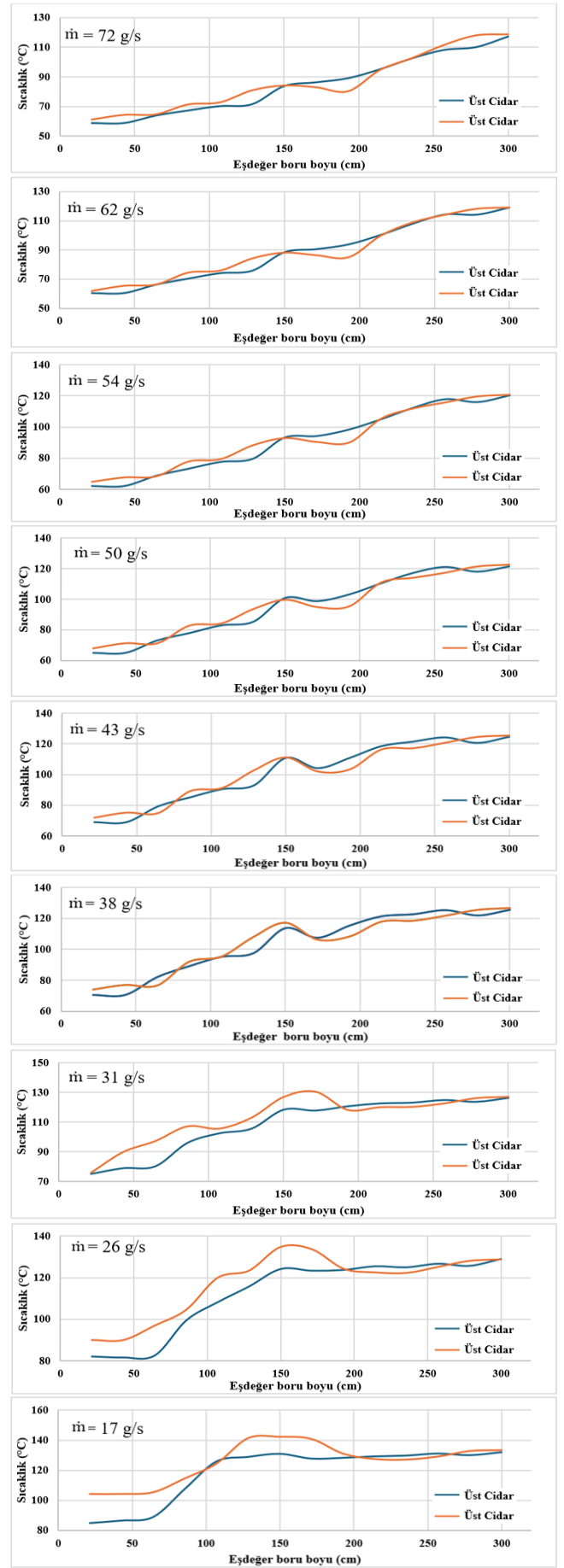
Şekil 5. Boru-2 için kararlı durum karakteristik eğrisi

Şekil 4 ve Şekil 5'e göre, boru-2'deki basınç düşümü değerleri boru-1'e göre daha yüksektir (Düşük debilerde yaklaşık %40 iken yüksek debilerde yaklaşık %10). Bu fark, yüzey artırımı boruda oluşan faz ayrımı ve ilave buhar fazı sürtünmesinden kaynaklanmaktadır. Azalan kütleli debilere karşılık gelen basınç düşümündeki artış miktarı da bu nedenle boru-2'de daha fazladır.

Ayrıca, kararlı durum eğrilerinde negatif eğimin dikleştiği bölgeler sistem kararsızlığının arttığını gösterir. Bu bağlamda, boru-1'e ait eğrilerin daha az negatif eğimli olması, yüzey artırımı borulara göre daha kararlı bir akış rejimi sergilediğini göstermektedir. Elde edilen deneysel veriler bu öngörüye desteklemektedir.



Şekil 6. Boru-1 için, $\dot{m}=17-72$ g/s aralığındaki kütleli debilerde alt ve üst cidar sıcaklıkları



Şekil 7. Boru-2 için, $\dot{m}=17-72$ g/s aralığındaki kütleli debilerde alt ve üst cidar sıcaklıkları

Şekil 6'da gösterilen, $\dot{m}=72$ g/s debi, $T_g=15$ °C giriş sıcaklığı ve $Q=22$ kW ısı girdisiyle yürütülen deneyde, test borusunda yalnızca sıvı faz gözlenmiştir. Üretilen ısı, sıvı fazın tamamına aktarılmakta ancak bu ısı miktarı sıvıyı kaynama noktasına ulaştırmamaktadır. Alt ve üst cidar sıcaklıkları girişten itibaren yaklaşık lineer artış göstermektedir. Üst cidar sıcaklığı, kaldırma kuvvetleri etkisiyle üst cidara yönelen düşük yoğunluklu sıvı tabakası nedeniyle alt cidardan daha yüksektir. Bu tabakanın ısı transfer katsayısı, alt cidardaki daha yoğun sıvıya kıyasla daha düşük olduğundan, üst cidarda aktarılan ısı miktarı da daha azdır. Sonuç olarak, üst cidar sıcaklığı akış yönünde daima alt cidardan yüksek seyretmektedir.

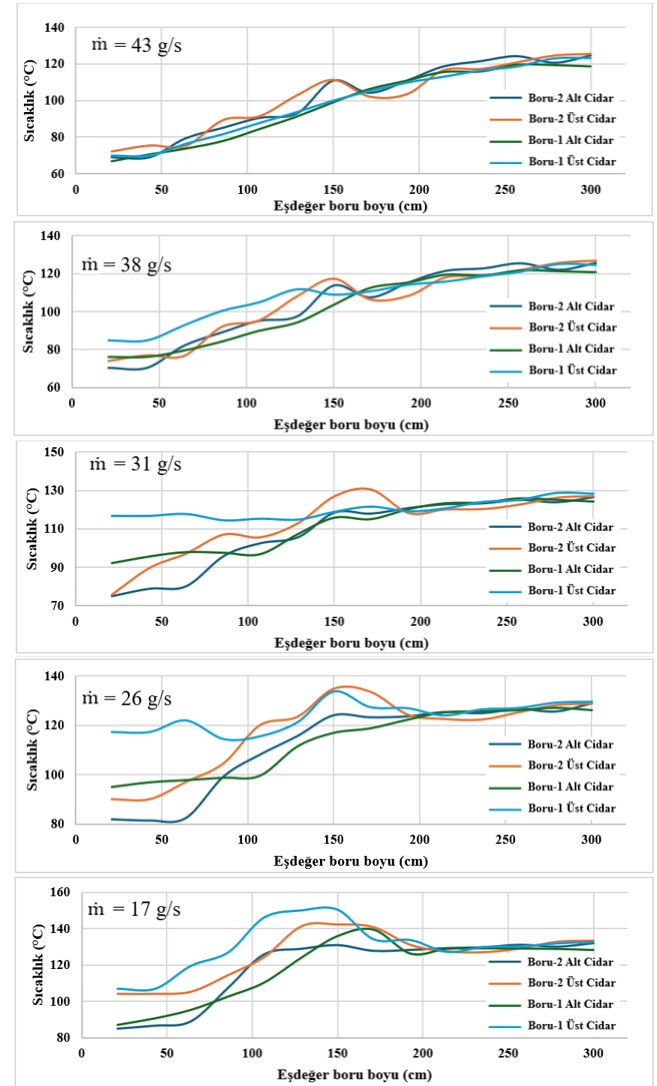
17-38 g/s debide üst cidar sıcaklıklarının borunun orta kısmına doğru belirgin biçimde arttığı, alt cidar sıcaklıklarının ise daha dengeli seyrettiği görülmektedir. Boru sonuna doğru alt ve üst cidar sıcaklıkları birbirine yaklaşmaktadır. Konik yay dizisi, burn-out'un oluştuğu cidar sıcaklığını yaklaşık %10–20 kadar aşağı çekerek aşırı ısınmaya karşı tolerans aralığını artırmıştır. Alt cidarda ısıtılan sıvının yoğunluğunun azalması, akışkanın borunun ortasına doğru hareketine ve sıcaklık artışına neden olmaktadır. Üst cidarda ise orta bölgelerde burn-out (dry-out) oluşmaktadır. Bu, buhar kabarcıklarının birleşerek üst cidarla sürekli temas hâlinde bir buhar yastığı oluşturması sonucu gerçekleşir. Bu nedenle burn-out, sadece orta bölgeyle sınırlı kalmamalı; boru boyunca olası oluşum noktaları da dikkate alınmalıdır.

Burn-out sonrası üst cidar sıcaklığında düşüş gözlenmektedir. Akış yönünde buhar fazı arttıkça, yüksek hızlı buhar akışı sıvı-buhar ara yüzeyinde dalgalı bir yapı oluşturur. Bu dalgalılar, sıvı parçacıklarının buhar fazına püskürtülmesine neden olur. Püsküren sıvı damlacıklarının cidarda birikmesiyle, tüm cidarı kaplayan ve "annular" olarak adlandırılan dairesel akış rejimi gelişir [32]. Test borusu içinde, tel çapı 1.8 mm, adımı 10 mm ve efektif çapı 17.34 mm olan bir konik yay elemanı bulunmaktadır. Bu eleman, akış boyunca türbülansı artırarak sıvı ve buhar fazlarının karışık şekilde akmasını sağlamaktadır.

Şekil 7'de tek fazlı bölgede alt ve üst cidar sıcaklıkları lineer artış göstermekte ve aralarında belirgin bir fark bulunmamaktadır. İki fazlı akışın başlamasıyla birlikte, bu fazların karışık şekilde akması sonucu alt ve üst cidar sıcaklıkları birbirine yaklaşmaktadır. Özellikle düşük debilerde bu fark daha belirgindir. Düşük debide (≈ 17 g/s) boru-2'nin üst cidar sıcaklığı, boru-1'e göre yaklaşık %15 daha düşük olup, bu durum konik yay dizisinin burn-out öncesi kritik sıcaklık seviyelerini aşağı çektiğini göstermektedir. Boru sonuna doğru sıcaklık değerlerinin neredeyse eşitlendiği görülmektedir ki bu da konik yay elemanının akışta sağladığı türbülans etkisinin bir sonucudur.

Şekil 8'de tüm debi aralıklarında sıcaklık profilleri genel olarak boru boyunca artış eğilimi göstermektedir. Bu durum, akışkanın ısıtılmasıyla birlikte faz değişiminin gerçekleştiğini ve buhar oranının arttığını göstermektedir. Özellikle 38 g/s ve daha düşük debilerde, boru ortasına doğru sıcaklıklarda ani artışlar, buhar kabarcığı oluşumu ve burn-out belirtileridir. Boru-2'de alt ve üst cidar sıcaklıkları boru-1'e kıyasla genellikle daha düşük seviyelerde seyretmiştir. Bu durum, konik yay elemanının akışı türbülanslı hale getirerek sıvı ve

buhar fazlarının daha etkin karışmasına neden olduğunu göstermektedir. Özellikle düşük debilerde (31, 26 ve 17 g/s), boru-2'nin cidar sıcaklık farkları daha azdır (Boru-2'de üst-alt cidar sıcaklık farkının boru-1'e kıyasla yaklaşık %30–50 oranında azalmıştır); bu da daha homojen ısı dağılımı ve termal stresin azalması anlamına gelir. Boru-2'de gözlenen sıcaklık dalgalanmalarının daha az salınımlı olması, sistemin daha kararlı bir akış rejimi sunduğunu da göstermektedir. 17 g/s gibi düşük debilerde boru-1'in üst cidarında sıcaklıklar 140 °C'ye kadar çıkmakta, bu da dry-out bölgesine girildiğini göstermektedir. Bu sıcaklık artışı, boru cidarının sıvıyla teması kaybetmesi nedeniyle ısı transferinin bozulduğunu işaret etmektedir. Aynı koşullarda boru-2'de üst cidar sıcaklığı daha düşük kaldığı gibi, alt-üst cidar farkı da daha düşüktür. Bu da konik yay sayesinde oluşan türbülansın sıvı dağılımını daha etkin sağladığını ve burn-out riskini azalttığını göstermektedir. Boru-1, özellikle alt ve üst cidar sıcaklıkları arasında önemli farklar gözlenmektedir. Bu farklar, laminar bölgelerde oluşan zayıf karışım ve sıvı-buhar faz ayrımının sonucudur. Boru-2, cidar sıcaklıkları birbirine daha yakın seyretmekte, bu da ısı transfer yüzeyinin daha homojen çalıştığını göstermektedir.



Şekil 8. Boru-1 ve Boru-2 için, $\dot{m}=17-43$ g/s aralığındaki kütleli debilerde alt ve üst cidar sıcaklıklarının karşılaştırılması

Sonuç

Bu çalışmada, yatay borularda iki fazlı kararlı akış koşullarında boş boru ve konik sarımlı yay dizisi içeren bir yüzey artırma elemanının ısı transferi ve akış kararsızlıkları üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, sabit giriş sıcaklığı ve sabit ısıl güç koşullarında, boş boru (Boru-1) ile yüzey artırmalı boru (Boru-2) üzerinde gerçekleştirilmiş; elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

Kararlı durum karakteristik eğrileri her iki boru için de tipik yatık "S" şeklinde olup, iki fazlı akış rejimlerine geçişte eğrilerin negatif eğim gösterdiği gözlemlenmiştir. Boru-2'de, yüzey artırıcı elemanın etkisiyle basınç düşümlerinin Boru-1'e göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Debiye artışına bağlı olarak yaklaşık %10–40 artış.). Bu fark, boru içi türbülansın artması ve faz ayrımının daha belirgin hale gelmesiyle açıklanabilir. Ancak bu durum, akış kararsızlığını artırmak yerine türbülans yoluyla faz karışımını geliştirerek sıcaklık dağılımını daha dengeli hâle getirmiştir.

Alt ve üst cidar sıcaklıkları açısından yapılan değerlendirmelerde; Boru-2'de cidar sıcaklıklarının boru-1'e göre daha düşük kaldığı ve daha dengeli dağıldığı görülmüştür (ortalama cidar sıcaklığında yaklaşık %10–15 düşüş). Özellikle düşük debi değerlerinde, boru-2'deki konik yay elemanı sayesinde sıvı ve buhar fazlarının homojen karışımı sağlanarak sıcaklık farkı minimize edilmiştir. Bu da burn-out riskini daha düşük sıcaklık seviyelerinde ortaya çıkararak sistem güvenliğini artırmıştır (kritik üst cidar sıcaklığında yaklaşık %10–20 azalma). Deneysel bulgular; konik sarımlı yay gibi yüzey artırıcı elemanların, iki fazlı akış koşullarında hem ısı transferini iyileştirdiğini hem de akış kararlılığı üzerinde olumlu etkiler sağladığını ortaya koymuştur. Bu tür elemanların, kaynamalı akış sistemlerinde güvenli çalışma koşullarının sağlanması ve sistem ömrünün artırılması açısından önemli katkılar sunduğu sonucuna varılmıştır.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır

Yazar katkıları

Yeşim Solak Coşkun¹ çalışma konsepti ve tasarım, veri toplama, verilerin analizi ve yorumlanması aşamasında, Ömer Çomaklı² çalışma konsepti ve tasarım, verilerin analizi ve yorumlanması aşamasında, Fatin Sönmez^{3*} çalışma konsepti ve tasarım, veri toplama, verilerin analizi ve yorumlanması aşamasında, taslağın oluşturulması ve revizyon aşamasında, Orhan Yıldırım⁴ veri toplama, verilerin analizi ve yorumlanması aşamasında ve Şendoğan Karagöz⁵ çalışma konsepti ve tasarım, verilerin analizi ve yorumlanması ve revizyon aşamasında makaleye katkı sağlamışlardır.

Yapay zekâ katkı beyanı

Bu çalışmada yer alan dil düzenlemeleri ve metinsel iyileştirmeler yapay zekâ destekli bir araç (ChatGPT) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ancak, metin, veri analizi, şekiller ve tüm bilimsel içerik yalnızca yazar(lar) tarafından

oluşturulmuş ve bilimsel sorumluluğu yazar(lar) tarafından üstlenilmiştir.

Kaynakça

- [1] N. Iwata and F. Bozzoli, "Investigation of operational limit of a pulsating heat pipe by estimating local heat transfer," *Exp. Comput. Multiph. Flow*, vol. 6, no. 3, pp. 265–276, 2024, doi: 10.1007/s42757-023-0179-5.
- [2] C. Wang et al., "Dynamic analysis for ultra-supercritical boiler water wall considering uneven heat flux distribution and combustion instability," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 236, no. P1, p. 126269, 2025, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126269.
- [3] T. Xue and S. Zhang, "Investigation on heat transfer characteristics of falling liquid film by planar laser-induced fluorescence," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 126, pp. 715–724, 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.039.
- [4] X. Lv et al., "Study on two-phase flow dynamics in variable-diameter flow field and gas diffusion layer of proton exchange membrane fuel cells," *Fuel*, vol. 392, no. January, p. 134911, 2025, doi: 10.1016/j.fuel.2025.134911.
- [5] G. Abdul-Majeed, A. Al-Sarkhi, A. O. Mohammed, and M. R. Hamoudi, "An empirical approach for predicting slug to pseudo-slug transition of air/water upward two-phase flow," *Exp. Comput. Multiph. Flow*, vol. 6, no. 2, pp. 154–169, 2024, doi: 10.1007/s42757-023-0170-1.
- [6] A. Arabi, Y. Salhi, Y. Zenati, E. K. Si-Ahmed, and J. Legrand, "Analysis of horizontal gas-liquid intermittent flow subregime transitions: Physical mechanisms and flow maps," *Exp. Comput. Multiph. Flow*, vol. 7, no. 1, pp. 50–66, 2025, doi: 10.1007/s42757-023-0180-z.
- [7] S. Li, T. Xue, and Z. Li, "A simple 3D reconstruction algorithm based on laser scanning: Research on flow characteristics of bubbles rising vertically in liquid phase," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 276, no. January, p. 118796, 2023, doi: 10.1016/j.ces.2023.118796.
- [8] D. Wu et al., "Heat exchanger design and performance evaluation for a high-temperature heat pump system under different two-phase correlations: 4E analysis," *Appl. Energy*, vol. 384, no. January, 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2025.125492.
- [9] C. D. Rakopoulos and W. Murgatroyd, "Warme- und Stoffübertragung Heat Flux-Flow Coupling Effects in the Stability of Vapour Generators," vol. 286, 1980.
- [10] Tewari, P.K., Verma, R.K., Ramani, M.P.S., "Nucleate boiling in a thin film on a horizontal tube at atmospheric and sub atmospheric pressures," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 20, pp. 723–728, 1988.
- [11] W. Yu, D. M. France, M. W. Wambsganss, and J. R. Hull, "Two-phase pressure drop, boiling heat transfer, and critical heat flux to water in a small-diameter horizontal tube," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 28, no. 6, pp. 927–941, 2002, doi: 10.1016/S0301-9322(02)00019-8.
- [12] L. K. H. Leung, D. C. Groeneveld, A. Teyssedou, and F. Aubé, "Pressure drops for steam and water flow in heated

tubes,” Nucl. Eng. Des., vol. 235, no. 1, pp. 53–65, 2005, doi: 10.1016/j.nucengdes.2004.08.020.

[13] X. Li, R. Wang, R. Huang, and Y. Shi, “Numerical and experimental investigation of pressure drop characteristics during upward boiling two-phase flow of nitrogen,” Int. J. Heat Mass Transf., vol. 50, no. 9–10, pp. 1971–1981, 2007, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.09.036.

[14] J. Moreno Quibén and J. R. Thome, “Flow pattern based two-phase frictional pressure drop model for horizontal tubes, Part II: New phenomenological model,” Int. J. Heat Fluid Flow, vol. 28, no. 5, pp. 1060–1072, 2007, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.01.004.

[15] Çomaklı Ö, Yılmaz M, Bedir Ö, Şahin B. “Isı Transferi İyileştirmesinin İki Fazlı Akış Kararsızlıklarına Etkisi,” Makina ve Mühendis, vol. 48, no. 565, p. 12, 2005, [Online]. http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/2e7aaa88b48137a_ek.pdf?dergi=95

[16] G. Sotgia, P. Tartarini, and E. Stalio, “Experimental analysis of flow regimes and pressure drop reduction in oil-water mixtures,” Int. J. Multiph. Flow, vol. 34, no. 12, pp. 1161–1174, 2008, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2008.06.001.

[17] B. A. Shannak, “Frictional pressure drop of gas liquid two-phase flow in pipes,” Nucl. Eng. Des., vol. 238, no. 12, pp. 3277–3284, 2008, doi: 10.1016/j.nucengdes.2008.08.015.

[18] S. Karagoz, S. Karsli, M. Yilmaz, and O. Comakli, “Density-wave flow oscillations in a water boiling horizontal tube with inserts,” J. Enhanc. Heat Transf., vol. 16, no. 4, pp. 331–350, 2009, doi: 10.1615/JEnhHeatTransf.v16.i4.20.

[19] M. Venkatesan, S. K. Das, and A. R. Balakrishnan, “Effect of diameter on two-phase pressure drop in narrow tubes,” Exp. Therm. Fluid Sci., vol. 35, no. 3, pp. 531–541, 2011, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2010.12.007.

[20] G. Omeroglu, O. Çomaklı, S. Karagoz, and S. Karsli, “Comparison of the effects of different types of tube inserts on two-phase flow instabilities,” J. Enhanc. Heat Transf., vol. 20, no. 2, pp. 179–194, 2013, doi: 10.1615/JEnhHeatTransf.2013007708.

[21] C. Guo, T. Wang, X. Hu, and D. Tang, “Experimental and theoretical investigation on two-phase flow characteristics and pressure drop during flow condensation in heat transport pipeline,” Appl. Therm. Eng., vol. 66, no. 1–2, pp. 365–374, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.028.

[22] M. K. Yeşilyurt, “İki fazlı akışlarda konik yayların boru içi ısı transferi ve akış kararsızlığı üzerindeki etkilerinin deneysel incelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 2015.

[23] N. Adiguzel, A. Göcücü, “Experimental investigation of the effects of ring turbulators on heat transfer in two-phase flow,” Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, vol. 46, no. 3, pp. 829–838, 2022, doi: 10.1007/s40997-021-00472-y

[24] X. Zhu, C. Xu, M. Gu, and N. Wang, “Experimental Study on Two-Phase Countercurrent Flow Limitation in Horizontal Circular Pipes,” Energies, vol. 17, no. 9, 2024, doi: 10.3390/en17092081.

[25] J. Zhang et al., “Experimental investigations of gas–liquid two-phase flow in a horizontal mini pipe: Flow regime, void fraction, and frictional pressure drops,” Phys. Fluids, vol. 35, no. 1, p. 13333, 2023.

[26] H. L. Cheon, H. Fyhn, A. Hansen, Ø. Wilhelmsen, and S. Sinha, “Steady-State Two-Phase Flow of Compressible and Incompressible Fluids in a Capillary Tube of Varying Radius,” Transp. Porous Media, vol. 147, no. 1, pp. 15–33, 2023, doi: 10.1007/s11242-022-01893-2.

[27] S. Karagoz, F. Afshari, O. Yildirim, and O. Comakli, “Experimental and numerical investigation of the cylindrical blade tube inserts effect on the heat transfer enhancement in the horizontal pipe exchangers,” Heat Mass Transf. und Stoffuebertragung, vol. 53, no. 9, pp. 2769–2784, 2017, doi: 10.1007/s00231-017-2021-8.

[28] O. A. González-Estrada, S. Hernández, and G. González-Silva, “Modeling of Oil–Water Two-Phase Flow in Horizontal Pipes Using CFD for the Prediction of Flow Patterns,” Eng., vol. 5, no. 4, pp. 3316–3334, 2024, doi: 10.3390/eng5040173.

[29] A. O. Oyelade, J. O. Ehigie, K. Orolu, and A. O. Oyediran, “Dynamics of horizontal pipes conveying two phase flow with nonlinear boundary conditions,” Mech. Syst. Signal Process., vol. 217, no. May, p. 111520, 2024, doi: 10.1016/j.ymsp.2024.111520.

[30] S. Banerjee et al., “Two-Phase Crude Oil-Water Flow Through Different Pipes: An Experimental Investigation Coupled with Computational Fluid Dynamics Approach,” ACS Omega, vol. 9, no. 10, pp. 11181–11193, 2024, doi: 10.1021/acsomega.3c05290.

[31] C. N. Feng, K. Miyagawa, T. Kawahara, and Y. Katayama, “Frictional pressure drop of two-phase flow in a horizontal tube under low void fraction,” J. Phys. Conf. Ser., vol. 2707, no. 1, 2024, doi: 10.1088/1742-6596/2707/1/012142.

[32] J. Huang, F. Jiang, J. Huang, J. Dai, and J. Xiang, “Numerical study on the flow characteristics of oil-water annular flow under different vibration frequencies,” Chem. Eng. Res. Des., vol. 219, no. June, pp. 534–545, 2025, doi: 10.1016/j.cherd.2025.06.026.