



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DÜZ BİR YÜZEYE ÇARPAN PULSATİF JETİN AKIŞ VE ISI
TRANSFERİ KARAKTERİSTİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa Levent KARABAYIR

**Danışman
Prof. Dr. Ünal AKDAĞ**

AKSARAY, 2018

Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 112304404 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi, Mustafa Levent KARABAYIR tarafından hazırlanan “**DÜZ BİR YÜZEYE ÇARPAN PULSATİF JETİN AKIŞ VE ISI TRANSFERİ KARAKTERİSTİĞİNİN İNCELENMESİ**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ünal AKDAĞ

Aksaray Üniversitesi

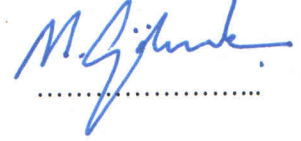
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Doç. Dr. Murat GÖKÇEK

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Dr. Öğr. Üyesi Doğan DEMİRAL

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma Tarihi: 04/07/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.



Prof. Dr. ... Mehmet Ali Hınıs

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinallliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Mustafa Levent KARABAYIR

TEŞEKKÜR

2011 yılında hayatıma, mesleğime, mesleki bilgime farklı bir yol çizmek, perspektifimi genişletmek için başladığım yüksek lisans eğitimimi bu tez çalışmasıyla tamamlamış bulunmaktayım.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde, her zaman güler yüzlü davranıp bana değerli zamanını ayırarak yardımcı olan, bilgilerini benimle paylaşan, sorunlarıma çözüm bulan ve bana sonuna kadar yardımcı olan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Ünal AKDAĞ’a “Aksaray Üniversitesi” teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez çalışmasının finansal desteği, ASÜ-BAP-2015-029 numaralı "Düz Bir Yüzeye Çarpan Pulsatif Jetin Akış Ve Isı Transferi Karakteristiğinin İncelenmesi" adlı proje ile ASÜ BAP tarafından karşılanmıştır. Bu anlamlı desteğinden dolayı ASÜ BAP'a teşekkürler ederim.

Ayrıca bu tezi hazırlama aşamasında bana desteklerini esigemeden yardımcı olan diğer hocalarıma, arkadaşlarıma, bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan aileme, her zaman yanımda olan ve beni destekleyen eşim Nazire KARABAYIR ve kızım Betül KARABAYIR'a teşekkür ederim.

Mustafa Levent KARABAYIR

AKSARAY, 2018

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	2
2.1. Isı Transferi İyileştirme Yöntemleri	2
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	14
3.1 Giriş	14
3.2 Deney Düzenegi	14
3.3 Deneylerin Yapılışı	17
3.4 Deneysel Ölçümler.....	19
3.5 Levha Yüzey Sıcaklığının Belirlenmesi	21
3.6 Isı Geçiş Hesabı	28
3.7 Fiziksel Parametreler	31
3.8 Sonuçlar.....	33
3.9 Hata Analizi.....	34
3.9.1 Nusselt sayısının belirsizliği	35
4. SAYISAL ÇALIŞMA	37
4.1 Giriş	37
4.2 Çözüm Alanı ve Kullanılan Yöntem.....	37
4.3 Matematik Model.....	39
4.4 Sınır Şartları	39
4.5 Sayısal Çözümün Değerlendirilmesi.....	41
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	49
KAYNAKLAR	51
EKLER.....	57
EK A. Deneysel Parametreler	58
EK B. Boyut Analizi.....	59
EK C. Hata Analizi.....	61
ÖZGEÇMİŞ	63

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DÜZ BİR YÜZEYE ÇARPAN PULSATİF JETİN AKIŞ VE ISI TRANSFERİ KARAKTERİSTİĞİNİN İNCELENMESİ

Mustafa Levent KARABAYIR

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ünal AKDAĞ

ÖZET

Bu çalışmada, türbülanslı akış şartlarında dairesel bir hedef yüzeye çarpan pulsatif jetin konvektif ısı transfer karakteristiği incelenmiştir. İncelemelerde jet ve hedef yüzey (H/D) arasındaki mesafe, titreşim frekansı ve titreşim genliklerinin ısı transferi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Deneysel araştırmalarda, boyutsuz mesafe H/D oranı, titreşim frekansı ve pulsatif genlik değişirken geometri ve Prandtl sayısı her durumda sabit tutulmuş ve bu parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Deneyler, üç farklı H/D oranı için altı farklı frekans ve dört farklı genlikte gerçekleştirilmiştir. Problem ayrıca, Fluent ticari kodu kullanarak sayısal olarak da araştırılmıştır. Isı transferi mekanizmasını açıklamak için anlık hız ve sıcaklık profilleri elde edilmiştir. Sayısal sonuçlar, titreşimli jetin hidrodinamik sınır tabakada, ısı transferini iyileştiren yıkıcı bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar boyutsuz parametreler cinsinden verilmiştir. Yüksek H/D oranında hem Womersley sayısı (Wo) hem de boyutsuz genlik (Ao) arttıkça ısı transferinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Pulsatif çarpan jet, Yüzey soğutma, Türbülans, Isı transferi iyileştirme.

Haziran, 2018; 63 sayfa

M.Sc. THESIS

THE INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF PULSATING IMPINGING JET ON A FLAT SURFACE

Mustafa Levent KARABAYIR

Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof.Dr. Ünal AKDAĞ

ABSTRACT

This study is presented convective heat transfer characteristics to a circular heated surface by impinging pulsating jet under turbulent flow conditions. In investigations, the effects of the distance of jet and target surface (H/D), pulsating frequency and pulsating amplitude on heat transfer are analyzed. In the experimental investigations, the dimensionless distance H/D ratio, the pulsating frequency and pulsating amplitude are changed while the geometry and Prandtl number remain constant for all cases, and the effect of these parameters on heat transfer is analyzed. The experiments are performed at six different frequencies and four different amplitudes for three different H/D ratios. The problem is also investigated numerically by using the Fluent commercial code. In order to explain the heat transfer mechanism, instantaneous velocity and temperature profiles are obtained. The numerical results reveal that there is a disruptive effect on the hydrodynamic boundary layer of pulsating jet, which improves the heat transfer. The obtained results are given as dimensionless parameters. It is observed that, the heat transfer enhancement increases with increasing both Womersley number (Wo) and dimensionless amplitude (A_o) at the high H/D ratio.

Keywords: Pulsating impingement jet, Surface cooling, Turbulence, Heat transfer enhancement.

June, 2018; 63 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Çarpan jetin şematik görünümü.....	3
Şekil 2.2. Pulsatif çarpan jet örneği	7
Şekil 2.3. Pulsatif çarpan jet sayısal modeli	12
Şekil 2.4. Çarpan çoklu jetlerin şematiği	13
Şekil 3.1. Deneysel test düzeneği şeması.....	15
Şekil 3.2. Deney düzeneği resmi.....	15
Şekil 3.3. Swirl tip hız ölçer.....	16
Şekil 3.4. Swirl tip hız ölçerin çalışma prensibinin şeması	17
Şekil 3.5. Hedef yüzeyde termoeleman yerleşimi	18
Şekil 3.6. Hedef yüzeyin yapısı ve geometrik boyutları	20
Şekil 3.7. Durma noktası (8 nolu termoeleman) sıcaklığının yüksek genlik ve düşük frekansta anlık değişimi	22
Şekil 3.8. Sürekli çarpan jet şartlarında levha boyunca sıcaklığın H/D ile değişimi. 23	
Şekil 3.9. a) Isı transferindeki iyileşmenin frekans ve genlikle değişimi ($H/D=2$) ...	25
Şekil 3.9. b) Isı transferindeki iyileşmenin frekans ve genlikle değişimi ($H/D=4$) ...	26
Şekil 3.9. c) Isı transferindeki iyileşmenin frekans ve genlikle değişimi ($H/D=6$) ...	27
Şekil 3.10. Isı transferindeki iyileşmenin boyutsuz parametrelerle değişimi	30
Şekil 4.1. Geometrik büyüklükler, ağ yapısı ve sayısal çözüm alanı	38
Şekil 4.2. Sayısal çalışmanın literatürdeki çalışmalarla doğrulanması.....	41
Şekil 4.3. Sabit genlik ve faz açısı için frekanslara göre hız konturlarının değişimi. 42	
Şekil 4.4. Sabit frekans ve faz açısı için genliğe göre hız profili değişimi.....	43
Şekil 4.5. Sabit genlik ve frekans için bir çevrim boyunca hız profillerinin değişimi44	
Şekil 4.6. Bir çevrim boyunca çeşitli faz açılarında akış alanında girdap dağılımı... 45	
Şekil 4.7. Ortalama yüzey sıcaklıklarının yüzey boyunca değişimi	46
Şekil 4.8. Yerel Nu sayısının faz açıları ile değişimi ($H/D=2$, $A_0=1.4$, $Wo=163$)	47
Şekil 4.9. Isı transferi iyileştirme faktörünün pulsatif parametrelerle değişimi	48

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge A.1 Deneysel çalışmalar için seçilen parametreler.....	58
Çizelge B.1 Boyut matrisi	59
Çizelge C.1 Deneyler için hata analiz hesabı	61



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A_0	Boyutsuz genlik
$B=H/D$	Boyutsuz üfleme mesafesi
c_p	Sabit basınçta özgül ısı (kJ/kg°C)
DC	Duty Cycle
DNS	Direct NumericSimulation
f	Frekans (Hz)
h	Isı taşınım katsayısı (W/m ² K)
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
h_m	Zaman ortalamalı anlık ısı taşınım katsayısı (W/m ² K)
$h_{x,t}$	Anlık (yerel) ısı taşınım katsayısı (W/m ² K)
k	Isı iletim katsayısı (W/mK)
L	Bakır levha uzunluğu (yarıçapı) (m)
LBM	Lattice Boltzman Method
N	Toplam veri sayısı
Nu	Nusselt Sayısı
Nu_p	Pulsatif Nusselt Sayısı
Nu_s	Daimi akış Nusselt Sayısı
Nu_{x,t}	Anlık (yerel) Nusselt Sayısı
p	Dinamik basınç (Pa)
PIV	Particle Image Velocimetry
Pr	Prandtl Sayısı
q"	Isı akısı (W/m ²)
Re	Reynolds Sayısı
Re_j	Jet Reynolds Sayısı
RNG	Random Number Generator
SST	Shear-Stress Transport
St	Strouhal Sayısı
T	Sıcaklık (°C)
TLC	Thin Layer Chromatography
T_∞	Ortalama daimi akışkan sıcaklığı (°C)
T_w	Ortalama yüzey sıcaklığı (°C)
$T_{w,i}$	Anlık yüzey sıcaklığı (°C)

$T_{w,x}$	Ortalama yüzey sıcaklığı (°C)
U_j	Ortalama jet hızı (m/s)
Wo	Womersley Sayısı
x_m	Piston stroku (m)
α	Isıl yayılım katsayısı (m ² /s)
μ	Dinamik viskozite (Pa/s)
ν	Kinematik viskozite (m ² /s)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
τ	Bir çevrim zamanı (wt)
ω	Açısal hız (rad/s)



1. GİRİŞ

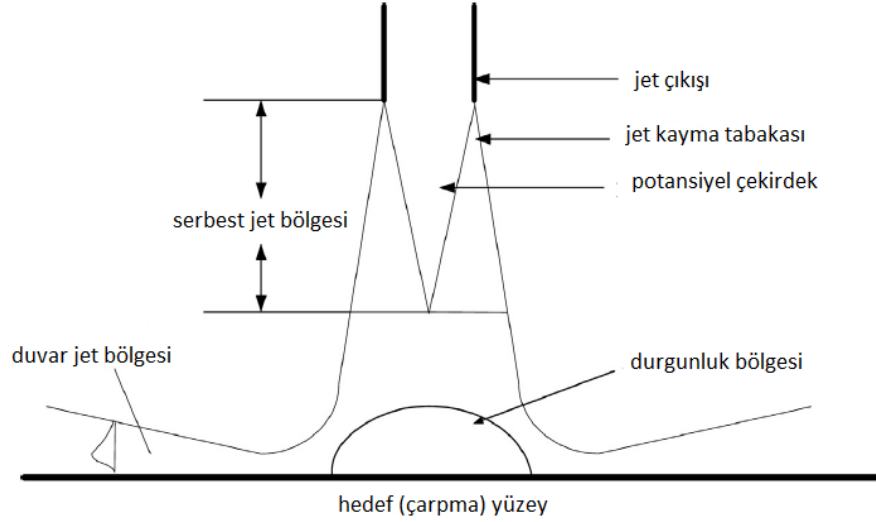
Dünyada kullanılan enerji kaynakları fosil tabanlı enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Fosil tabanlı enerji kaynaklarının rezervlerinin sınırlı olması ve dönüşümleri esnasında çevreyi kirleten emisyonlar yaymasından dolayı dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Enerji dönüşümleri yapılırken Termodinamiğin kanunları gereği mutlaka çevreye bir etki bırakmak gerekmektedir. Bu etkiyi en aza indirmek için yüksek verimli cihazlar tasarlamak, enerji dönüşümlerini en az hasarla yapmak araştırmacıların üzerinde yoğun olarak çalıştığı konuların başında gelmektedir. Bir termodinamik çevrim gerçekleştirerek enerji dönüşümü yapıyorsa, enerjinin bir kısmını atmosfere terk etmek gerekmektedir. Bundan dolayı, öyle yüksek verimli ısı transferi cihazları tasarlamak gerekiyor ki, enerji kaybı en aza indirilsin. Diğer taraftan elektronik cihazların hızla gelişmesi ve giderek boyutlarının da küçülmesi bir dizi soğutma problemini de beraberinde getirmiştir. Bu anlamda araştırmacılar elektronik cihazların soğutulması için yeni arayışlara girmişlerdir. Bunlardan bir tanesi de jet çarpması şeklinde soğutma uygulamalarıdır. Bu sayede güvenilir, etkin ve ekonomik bir soğutma sağlanabilmektedir. Elektronik cihazların hem güç yoğunluklarının artması hem de boyutlarının küçülmesi, aktif ısı transferi metotlarının uygulanmasını gerektirmiştir. Bunlardan bir tanesi de pulsatif çarpan jet uygulamasıdır ki, yüksek verimle ısı transferi sağladığından dolayı son yıllarda cazip hale gelmiştir. Bu anlamda bu çalışmada pulsatif çarpan jet kullanarak dairesel düz bir yüzeyin efektif soğutulması problemi bu tez kapsamında deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Isı transferinin hangi şartlarda en iyi olduğu akışa etki eden parametrelere bağlı olarak araştırılmıştır. Sonuç olarak bu yöntemle klasik sürekli çarpan jet durumuna göre % 30'lara varan bir ısı transferi artışı sağlanabileceği görülmüştür.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Isı Transferi İyileştirme Yöntemleri

Endüstride ısıtma, soğutma ve kurutma gibi uygulamalarda ısı transferini artıran yöntemler üzerinde pek çok araştırma yer almaktadır. Bunlardan biri olan jet uygulamaları en çok araştırma yapılan konular arasındadır. Akışa ilave edilen jetlere, uygulama yöntemine göre sürekli çarpan jetler, sentetik jetler, çarpan jetler, pulsatif çarpan jetler gibi değişik adlar verilmektedir. Ana akış içerisinde bir başka akışkanın ilave edilmesi ile elde edilen sürekli çarpan jetler ısı transferinde iyileşme sağlaması bu jet uygulamalarına olan ilgiyi arttırmıştır (Buddhika N. Hewakandamby, 2009; Chang vd., 2009; Demircan ve Türkoğlu 2010; Hu vd., 2015; Mohammadpour 2014a; Pavlova ve Amitay 2006; Smith ve Swith 2003).

Literatürde yaygın jet uygulaması çarpan jetler olup bu konuda literatürde çok sayıda deneysel ve sayısal çalışma bulunmaktadır ve yapılan çalışmalarda da bu jetlerin ısı ve kütle transferini artırdığı kanıtlanmıştır (Beitelmal vd., 2000; Chung vd., 2002; Çelik 2011; El-Gabry ve Kaminski 2005; Gori and Petracci 2015; Jambunathan vd. 1992; Klein ve Hestroni 2012; Lee vd., 2012; Shi vd., 2015; Tesar 2015; Trávníček vd., 2010; Zhou vd., 2009). Çarpan jet, değişik çıkış geometrilerindeki jetin hedef yüzeye çarptırılması ile elde edilir. Bu jetler durgunluk noktasında, hidrodinamik ve termal sınır tabakalarını inceltmek ısı ve kütle geçişinde önemli iyileşme sağlamaktadır. Dolayısı ile akışkan ile çarpma yüzeyi arasında büyük değerlerde yerel ısı transfer katsayısı elde edilerek çarptığı yüzeyde ısı ve kütle aktarımını artırır. Isı ve kütle transferindeki bu iyileşme, jet çıkışı-hedef yüzey arası mesafe, jet çıkış geometrisi, çoklu çarpan jetlerde jet dizileri arasındaki mesafe, hedef yüzeyin şekli, jet çarpma açısı gibi geometrik parametreler ile jet Re sayısı, jet sıcaklığı, fazı, jetin tipi gibi akış parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Hedef yüzey üzerine dik açıyla çarpan tekil bir jetin şematiği Şekil 2.1’de verilmiştir. Çarpan jet, üç ana bölümden oluşmaktadır. Jet çıkışı ile hedef yüzeye çarpmadan önceki bölüm serbest jet bölgesi, jetin hedef yüzeye çarptığı bölüm durgunluk noktası (geometrik çarpma noktası), jetin yüzeye çarptıktan sonra yüzey üzerinde devam eden bölüm duvar jet bölgesi olarak adlandırılır (Demircan ve Türkoğlu, 2007).



Şekil 2.1: Çarpma jetin şematik görünümü (Dutta vd. 2013).

Bu jetler ısıtma, soğutma, kurutma gibi pek çok endüstriyel alanlarda, elektronik ekipmanlarda, gaz türbini kanatlarının soğutulması, gıda ve tekstilde kurutma, baskılı prosesler, buz çözme veya uçak kanatları ile metal olmayan tabakaların ve camların temperlenmesi gibi çok yaygın uygulama alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır.

Lee vd., (2012), farklı konfigürasyondaki çarpma jetlerin akış ve ısı transferine etkilerini çarpma yüzeyine pimli-kanat ilavesi ile sayısal olarak incelemişlerdir. İncelemelerini, bir sıralı ve şaşırtmalı (zigzag) olmak üzere iki farklı jet dizilişi için, jet deliklerinin çapı d olmak üzere, farklı jet çıkışı ve yüzey arasındaki mesafe ($H/d = 0.5, 1, 4$), jetler arası mesafe ($S/d = 2, 4$), çarpma yüzeyine ilave edilen pin-fin yüksekliği ($H/d = 0, 1, 2$) kullanarak yapmışlardır. $Re = 20.000, 40.000$ ve 60.000 olmak üzere üç farklı ortalama jet hızında soğutucu hava sıcaklığını 673 K ve soğutulacak yüzey sıcaklığını 1273 K kabul etmişler ve çalışmalarının sonunda ısı transferinin jet parametrelerine bağlı olarak değiştiğini bildirmişlerdir.

Yang vd., (2015), silindirik bir kanalda, bir sırada dizili olan 10 adet çarpma jetin, $Re = 200$ laminar akış için yüzeydeki akış ve ısı transferine etkilerini sayısal olarak incelemişler ve jetlerin yüzeydeki yerel ısı transferi üzerinde önemli etkileri olduğunu bildirmişlerdir. Laminer çarpma jetlerin kendi kendine osilasyonunun Kelvin-Helmholtz kararsızlığı nedeniyle vorteks yapılarının oluşumuna neden olduğunu belirterek yerel statik basınç farklarını görüntülemişlerdir.

Hewakandamby (2009), düz bir plaka üzerine çarpan çoklu jetlerin ısı transferi iyileşmesi üzerindeki etkilerini $0 < Re < 1200$ aralığında ve sabit bir faz açısında ($\pi/2$) sonlu eleman yöntemi ile sayısal olarak incelemiştir. Çalışmasında Re sayısı, nozullar arası mesafe ve osilasyon frekansının ısı transferini etkilediğini ve osilasyonlu çarpan jetlerin geleneksel daimi jet akışına göre ısı transferini % 100'e yakın iyileştirdiğini bildirmiştir.

Dutta vd., (2013), türbülanslı çarpan jet akışını $Re = 20.000$ değerinde ve iki farklı nozul plaka arası mesafe için Navier–Stokes (RANS) eşitlikleri kullanarak sayısal olarak incelemişler ve sonuçlarını literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırarak aralarındaki uyumu göstermişlerdir.

Lee ve Lee, (2000), ısıtılmış düz bir plaka üzerine çarpan eliptik jet çıkış geometrisine sahip bir jetin ısı transfer karakteristiklerini $Re = 10.000$ değerinde, 4 farklı nozul çap oranları için deneysel olarak incelemişlerdir. Levha üzerindeki sıcaklık dağılımlarını TLC yöntemi (Thermochromic Liquidcrystal Chromatography) kullanılarak dijital görüntü işleme sistemi ile ölçmüşler ve akış yapılarını ise duman tel yöntemi kullanarak görüntülemişlerdir. Büyük nozul plaka arası mesafeler için eliptik çarpan jetin ısı transfer oranının durgunluk noktasında dairesel jetten daha küçük olduğunu, eliptik jetin en boy oranının artmasıyla ısı transfer oranının da arttığını bildirmişlerdir. Ayrıca çalışmalarının sonucunda Nu sayısı için jet nozul en boy kesit oranına ve nozul plaka arası mesafeye bağlı olarak bir korelasyon sunmuşlardır.

Chirac ve Ortega, (2002), yaptıkları sayısal çalışma ile düz bir levha üzerine çarpan jetin ısı transferine etkisini, kararlı ve kararsız akış yapıları için incelemişler, farklı Reynolds sayılarında ($Re = 250 - 750$) ve Prandtl sayısının 0,7 değeri için çarpma mesafesinin-jet genişliğine oranını ($H/W = 5$) sabit kabul ederek çalışmalarını tekrarlamışlardır. Reynolds 750'de akışın tamamen kararsız hale geldiğini bildirerek kararlı hale göre daha büyük ortalama ısı transfer katsayısı elde edildiğini belirlemişlerdir.

Öztop vd., (2011), farklı Re sayılarında (2.800, 9.000, 36.000) dairesel çarpan jetin soğutma performansı üzerindeki etkisini inceleyen deneysel bir çalışma yapmışlardır. Sabit ısı akısına sahip dairesel disk 90° ile 150° arasında değişen eğimlerde

yerleştirmişler ve jet için radyal bir fan kullanmışlardır. Jet çarpma noktası arası uzaklığın jet çapına oranı değıştirilerek ($H/D_h = 5, 10, 15$) deneylerini tekrarlamışlardır. Çalışmalarının sonunda ısı transferini etkileyen en önemli parametrenin dairesel diskin eğim açısı olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca Re sayısının artması ile durgunluk noktasında ve radyal mesafelerde soğutma performansının da arttığını belirtmişlerdir.

Yukarıda bahsedilen literatür çalışmalarında da belirtildiği gibi çarpan jetlerin kullanılması ısı ve kütle transferini önemli derecede etkilemektedir. Çarpan jetlere periyodik bileşen ilave edilmesi ile elde edilen pulsatif çarpan jetler son zamanlardaki en önemli çalışma konuları arasındadır. Periyodik olarak uyarılan akış ile pulsatif bir etki oluşturulması momentum akısında bir artışa neden olacaktır. Bu momentum akısının etkisi belirlenen jet parametrelerine bağı olarak değışecektir. Bu durum pulsatif çarpan jetleri daha da avantajlı hale getirmektedir.

Akışa salınım hareketi sağlamak için, diyafram, akustik sistemler, piezoelektrik membranlar, solenoid vana, döner kepenkler, piston-silindir gibi düzenekler kullanılmaktadır. Pulsatif çarpan jetler ile ilgili literatürde pek çok sayısal ve deneysel çalışma mevcut olup (Akalanne ve MacGregor, 2011; Hofmann 2007a-b; Tesar 2013), sürekli çarpan jet ve daimi akış şartları ile karşılaştırıldığında uygun parametrelerin seçilmesi halinde ısı ve kütle transferini önemli derecede artırdığı kanıtlanmıştır.

Selimefendigil ve Öztö, (2014), ısı transferi üzerinde dikdörtgen kesitli çarpan pulsatif jetin nanoakışkan ile kombine etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında akış ve ısı transferi üzerinde Re sayısı, pulsatif frekans, nanopartikül hacim oranının etkilerini sonlu hacim yaklaşımı metodu ile araştırmışlar ve sonuçları daimi (steady) akış şartları ile karşılaştırmışlardır. Daimi akış şartlarında, akışa nanopartikül ilave edilmesi durgunluk noktasında ve duvar jet bölgesindeki Nu sayısı için tepe bir değere ulaştığını, $Re = 200$, nanopartikül hacim oranında % 6 için ısı transferinde % 18.8'den fazla iyileşme sağlandığını belirtmişlerdir. Pulsatif akış şartlarında ise akışa ilave edilen nanopartiküllerin durgunluk noktasında daimi akış şartlarına göre ısı transferinde herhangi bir iyileşme sağlamadığını rapor etmişlerdir.

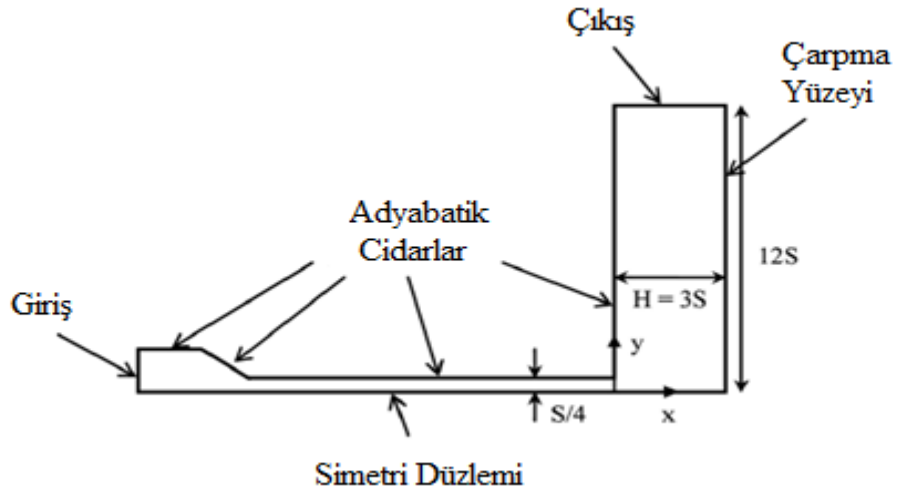
Marcum vd., (2015), sınırlandırılmamış pulsatif çarpan hava jeti kullanılması ile pulsatif frekans ve görev döngüsünün zamana bağlı ısı transferi üzerindeki etkilerini inceleyen deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarını, sürekli (steady) jet çarpması durumunda elde edilen ısı transfer değerleri ile karşılaştırmışlardır. Deneylerde $866 \leq Re \leq 3776$ aralığındaki değerleri kullanmışlar, pulsatif hava jetinin hızını sıcak tel anemometresi ile ve her bir pulsatif durumun akış alanındaki anlık ısı transfer katsayısını infrared kamera kullanılarak ölçmüşlerdir. Çalışmalarının sonunda elde edilen zaman ortalamalı Nu sayısının önceki yapılan çalışmalar ile benzerlik gösterdiğini bildirmişlerdir.

Esmailpour vd., (2015), akış ve ısı transferi üzerinde sınırlandırılmış, tekil, pulsatif çarpan jetlerin etkilerini türbülanslı akış rejiminde sonlu hacim metodu ile inceleyen teorik bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, sıcak bir yüzeydeki akış karakteristikleri ve ısı transfer oranı üzerinde değişen geometrilerde pulsatif frekans ve pulsatif genliğin etkilerini analiz etmişlerdir. Simülasyonlar sonucunda, çarpan pulsatif jetlerin ısı transferi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu, pulsatif akışın farklı bölgelerde farklı etkilere sahip olduğunu belirterek, pulsatif çarpan jetin durgunluk noktasında ısı transferini düşürdüğünü, duvar jet bölgesinde ise ısı transferini iyileştirdiğini bildirmişlerdir. Ayrıca ısı transferi için kritik bir pulsatif frekans olduğunu ve bu pulsatif frekans değerinde diğer durumlara göre en fazla ısı transferi elde edildiğini belirterek, nozul plaka arası mesafenin azalması ile artan pulsatif genlik ve pulsatif frekanslarda ısı transferinin genel olarak arttığını bildirmişlerdir.

Kim (2012), ısı transferi karakteristikleri üzerinde pulsatif frekansın etkilerini araştırmak için düz bir yüzey üzerinde sürekli ve çarpan pulsatif jet akışını laminar rejimde 2 boyutta teorik olarak incelemiştir. Çalışmasında sonlu hacim yaklaşımı ile çözüm yapan FLUENT paket programı kullanarak, enerji ve momentum eşitliklerindeki konvektif terimler için üçüncü dereceden QUICK şemasını, basınç-hız arasındaki ilişkiyi ise SIMPLE algoritmasını kullanmıştır. Simülasyonlarını, $Re = 50$, $Pr = 0.7$, boyutsuz pulsatif frekansı (Strouhal sayısı) 0.05-0.5 aralığında, jet çıkışı ve hedef yüzey arası mesafeyi jet çıkış genişliğinin 5 katı kabul ederek gerçekleştirmiştir. Çalışma sonunda, pulsatif çarpan jetler için elde edilen zaman ortalamalı Nu sayısının çarpma bölgesinde sürekli çarpan jetlerden

daha yüksek olduğunu, duvar jet bölgesinde ise daha düşük olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca çalışılan tüm durumlar için pulsatif frekansın artması ile zaman ortalamalı Nu sayısının arttığını da gözlemlemişlerdir.

Liewkongsataporn vd., (2008), slot tipi çarpan pulsatif jetlerin, sürekli çarpan akışa göre ısı transferinde ne kadar bir iyileşme sağladığını bulmak için sayısal bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda artan genlikle birlikte ısı transferinde de artış olduğunu bildirmişlerdir. Çarpma sonucunda pulsatif jetlerin hızlanmasından kaynaklanan resirkülasyon akışları, sınırlandırılmış pulsatif çarpan jetler tarafından sağlanan ısı transfer iyileştirmesi için önemli bir karakteristiktir. Çünkü bu resirkülasyon akışları nozul veya egzoz borusu içinde ters akış esasında önemli bir ısı transferi sağlayabilir. Bu karakteristikler üzerinde en büyük etkinin genlik olduğu görülmektedir. Hız genliği artarken jetin ivmelenme alanı ve resirkülasyon akışının hızı veya gücü doğrudan artmaktadır. Yüksek frekanslarda da yüzey ısı transferi artışına yardımcı olduğu ancak hız genliği ile karşılaştırıldığında daha düşük bir etkisinin olduğu görülmektedir. Isı transferi iyileştirilmesinde hız genliği ve frekans arasında bir ilişki vardır.



Şekil 2.2: Pulsatif çarpan jet örneği, (Liewkongsataporn vd., 2008).

Mladin ve Zumbrennen, (1997), pulsatif hava jetinin çarpma yüzeyi üzerindeki yerel ısı transferi etkisini deneysel olarak incelemişler ve pulsatif çarpan jetlerin Strouhal sayısına bağlı olarak sürekli çarpan jetlerle karşılaştırıldığında yüzey ısı transferinde hem artma hem de azalmanın her ikisinde olduğunu göstermişlerdir. $St = 0,018$ 'de

yüzey ısı transferi artarken, $St = 0,022$ de yüzey ısı transferi azalmaktadır ve $St = 0,06$ 'da yüzey ısı transferi aynı kalmaktadır.

Son zamanlarda çok sayıda araştırmacı pulsatif çarpan jetlerin ısı transferi üzerindeki etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemeye başladı. Sheriff ve Zumbunnen, (1994), jet dizileri kullanarak soğutma performansı üzerinde pulsatif akışın etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Uyumlu yapıların olduğunu fakat ısı transferi ile ilgili olarak hiçbir önemli iyileşmenin kaydedilmediğini bildirmişlerdir.

Sailor vd., (1999), tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, çarpan bir hava jeti için ısı transferi iyileşmesinde periyodik döngüsünün etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında pulsatif frekans, Re sayısı, jet plaka arasındaki mesafe gibi geleneksel değişkenlerin etkilerini, yeni bir parametre olan, toplam çevrim süresinde pulsatif çevrim süresi oranını temsil eden bir görev döngüsü ile birlikte araştırmışlardır. Görev döngüsünün ısı transferini önemli derecede etkilediğini bildirmişlerdir.

Mladin ve Zumbunnen, (1997), pulsatif dalga şekli, frekans ve genliğe bağlı olarak pulsatif çarpan jetin düzlemsel bir durma noktası etrafındaki davranışını detaylı sınır tabaka analiz yaparak sayısal olarak incelemişlerdir. İncelemelerinde Strouhal sayısı için bir kritik değerin olduğunu ($St > 0.26$), bu değerin altında ısı transferinde bir artış olmadığını bildirmişlerdir.

Zumbunnen ve Aziz, (1993), sabit ısı akısına sahip düzlemsel bir levhaya çarpan pulsatif su jetinin taşınım ısı transferi üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişler ve $St > 0.26$ için yapılan deneylerde yerel Nu sayısının % 100'ün üzerinde arttığını bildirmişlerdir.

Azevedo vd., (1994), döner bir valf kullanarak elde ettikleri pulsatif hava jetlerini değişik frekans ve ortalama jet hızında deneysel olarak incelemişler ve çalışmalarının sonucunda sürekli çarpan jetlerle karşılaştırıldığında pulsatif çarpan jetler için durgunluk noktasında ısı transferinde küçük bir azalma olduğunu göstermişlerdir. Pulsatif akıştaki bu bozulmaların akış yapısını ve ısı transferini de etkilediğini bildirmişlerdir.

Hofmann vd., (2007b), pulsatif çarpan jetlerin ısı transfer ve akış yapısı üzerindeki etkilerini, tüm yaygın türbülans modeli kullanarak, farklı Re sayıları ve farklı jet

çıkışı-çarpma yüzeyi arası mesafeler için sayısal olarak incelemişlerdir. Karşılaştırılan 4 farklı türbülans modeli için, değerlerin duvar jet bölgesinde birbiriyle uyumlu bulunurken durgunluk noktasında ise belirgin bir sapma görüldüğünü gözlemlemişlerdir. Ayrıca, büyük jet çıkışı, çarpma yüzeyi mesafelerinde pulsatif çarpan jetlerin ısı transferini % 30 azalttığı, düşük frekanslarda ise durgunluk noktasında pulsatif çarpan jetlerin sürekli çarpan jetlere göre ısı transferini önemli derecede iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

Sailor vd., (1999), pulsatif çarpan jetle oluşan akış döngülerinin ısı transferini önemli ölçüde artırdığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında jet ile plaka arasındaki mesafe, Reynolds sayısı ve pulsatif frekans gibi bilinen jet parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. Pulsatif çarpan jet uyarıcının kullanılmasının ısı transferini önemli ölçüde artırdığını gözlemlemişlerdir.

Kataoka vd., (1987), pulsatif asimetric daldırılmış çarpan jet kullanarak sınır tabaka üzerinde büyük ölçekli dönümlü girdap yapılarının oluştuğunu bunun da durma noktasındaki ısı transferinin iyileştirildiğini bildirmişlerdir.

Liewkongsataporn vd., (2008), slot tipi çarpan pulsatif jetlerin ısı transferi üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemiş ve aynı ortalama jet hızı için pulsatif genliğin artmasıyla yüzey üzerindeki ısı transferinin arttığını göstermişlerdir.

Hofmann vd., (2007a), pulsatif çarpan jetlerin akış yapısı ve ısı transferi üzerindeki etkisini farklı frekans, genlik, nozul-plaka arası mesafe ve Re sayılarında deneysel olarak incelemişler ve ana akıştaki periyodik dalgalanmaların konvektif ısı transferini etkilediğini göstermişlerdir. Deney sonucunda, $f = 400$ Hz, $Re = 78.000$ ile $f = 175$ Hz, $Re = 34.000$ değerlerinde kritik Strouhal sayısının elde edildiğini ($St = 0.2$) ve bu değerde durgunluk noktasında ısı transfer katsayısının arttığını bildirmişlerdir.

Xu vd., (2010a), türbülanslı akışta slot tipi tekil çarpan pulsatif jetin büyük sıcaklık farklılıklarında Nu sayısı üzerindeki etkisini ısıtma ve soğutma durumu için, iki boyutta ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak artan Re sayısı ile Nu sayısının iyileştiğini, artan sıcaklık farklılıklarında Nu sayısının azaldığını ve

durgunluk noktasından uzaktaki mesafelerde ise herhangi bir iyileşmenin olmadığını bildirilmişlerdir.

Travnic'ek, Vit. T., (2015), bir duvar üzerine çarpan dört farklı jet akışının (sentetik jetler, hibrit sentetik jetler, birleşik (mixed) pulsatif çarpan jetler ve sürekli çarpan jetler) ısı ve kütle transferi üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişler ve sonuçları duman tel yöntemi ile görüntülemişlerdir. Deneylerini 4.000 - 6.000 aralığında değişik Reynolds sayılarında, 8 mm çapında jet çıkışı kullanarak gerçekleştirmişler ve iş yapan akışkan olarak da hava kullanmışlardır. Re sayısı arttıkça ısı ve kütle transferinin de arttığını gözlemleyerek akış osilasyonlarının % 12 - 40 arasında ısı ve kütle transferinde bir iyileşmeye neden olduğunu bildirmişlerdir.

Bovo ve Davidson, (2015), düz bir levha üzerine çarpan tekli pulsatif jetin hız akış alanı ve sıcaklık alanlarını deneysel ve sayısal olarak incelemişler, akış alanındaki hızı PIV ile, çarpan hedef yüzeydeki sıcaklık değişimlerini IR kamera aracılığı ile ölçmüşlerdir. LES yöntemi ile elde edilen sayısal simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak aralarında iyi bir uyum olduğunu göstermişlerdir.

Mohammadpour vd., (2014a), slot tipi çarpan pulsatif jetin kare ve sinüzoidal dalga formları kullanarak konkav bir yüzey üzerindeki ısı transferini 2 boyutta ve 3 farklı türbülans akış modelinde analiz etmişlerdir. Çalışmalarında Re sayısının, pulsatif frekansın, pulsatif genliğin etkilerini incelemişler ve yüzey üzerinde zaman ortalamalı yerel Nu sayısını elde etmişlerdir. Sonuç olarak daimi akış (steady) şartları ile karşılaştırıldığında, Re sayısı ve pulsatif frekansın artması ile Nu sayısının arttığını ve kare dalga formunda sinüzoidal dalga formuna göre daha yüksek ısı transferi elde edildiğini göstermişlerdir.

Xu vd., (2010b), slot tipi türbülanslı pulsatif çarpan jetin ısı transferine etkisini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Çalışmalarında zaman ortalamalı jet Re sayısının, çarpma yüzeyi ile jet akışı arasındaki sıcaklık farklılıklarının ve pulsatif frekansın ısı transferine etkilerini incelemişler ve akış alanında zamana bağlı olarak gelişen anlık akış ve sıcaklık alanlarının simülasyonlarını göstermişlerdir. Akış alanında pulsasyonların etkisiyle büyük vorteks yapılarının oluştuğunu, akış sürüklenmesinin arttığını ve yüzey üzerinde zamanla gelişen ısı ve hidrodinamik sınır tabaka

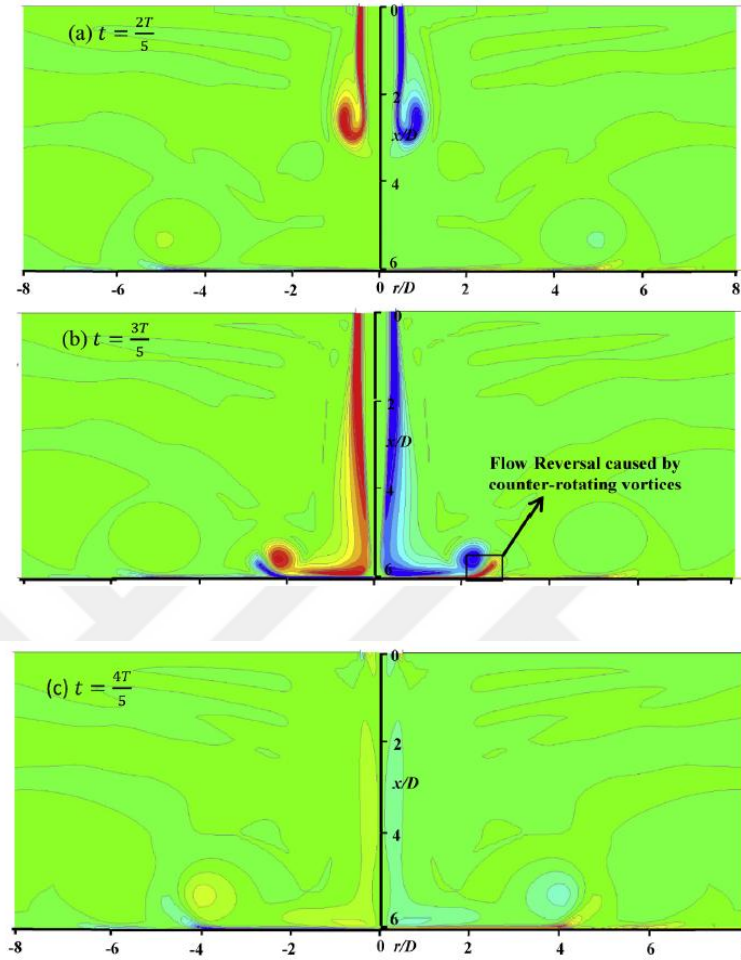
kalınlığının azaldığını bunun sonucunda da ısı transferinin iyileştiğini bildirmişlerdir. Ayrıca sayısal sonuçlardan, ortalama jet Re sayısının ve pulsatif frekansın artması ile zaman ortalamalı yerel Nu sayısının iyileştiğini belirtmişlerdir.

Pakhomov ve Terekhov, (2015), türbülanslı pulsatif çarpan hava jetlerinin akış yapısına ve ısı transferine etkilerini değişen geniş bir parametre aralığında sayısal olarak araştırdılar. Araştırmalarında pulsatif frekans, Re sayısı, jet çıkışı ile çarpma yüzeyi arası mesafe (H/D) ve jet zamanının toplam çevrim zamanına oranı (görev döngüsü) gibi parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Pulsatif frekans $f = 0 - 500$ Hz aralığında, $Re = 4.6 \times 10^3 - 4.6 \times 10^4$ aralığında, görev döngüsü için $2.25 - 0.75$ aralığındaki değerleri kullanmışlardır. Sonuç olarak, $H/D \leq 4$ de ısı transferinin % 30'un üzerinde arttığını, pulsatif frekansın artması ($f \leq 150$ Hz) ile Nu sayısının da arttığını, küçük pulsatif frekanslarda ($f \leq 30$ Hz) ise pulsatif çarpan jetin ısı transferi üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığını ve Re sayısının artması ile ısı transfer iyileşmesinin düştüğünü bildirmişlerdir. Ayrıca en fazla ısı transferinin $DC = 0.25$ 'de, $H/D = 6$ 'da ve Strouhal sayısının $St = 0.11$ değerinde elde edildiğini belirtmişlerdir.

Alimohammadi vd., (2015), pulsatif akış ile zamana bağlı çarpan jetler ile ilgili geniş kapsamlı hem deneysel hem sayısal bir çalışma yapmışlar ve yaptıkları bu çalışmaya ait sayısal modeli Şekil.2.3'de gösterilmiştir. Sayısal çalışmalarında, RANS türbülans modellerini kullanarak ısı transfer ve akışkan akışı için sürekli çarpan jetlerin simülasyonlarını elde etmişler ve sayısal sonuçların deneysel verilerle desteklendiğini göstermişlerdir. Çalışmalarında, aralıklı pulsasyonlar için kare dalga formundaki giriş hız sinyalleri kullanarak, nozul yüzey arası mesafe $1 \leq H/D \leq 6$, Reynolds sayısı $1300 \leq Re \leq 2800$ ve pulsatif frekans $5 \text{ Hz} \leq f \leq 260 \text{ Hz}$ aralığındaki değerler için geniş bir parametre aralığında incelemelerini yapmışlardır. Sonuçta pulsatif çarpan jetlerin kullanılmasında ısı transfer iyileşmesinin işlem parametrelerine büyük ölçüde bağlı olduğunu bildirmişlerdir. Bir plakaya çarpan uyarılmış pulsatif jet durumunda elde edilen Nu sayısının uyarılmamış jet durumunda elde edilen Nu sayısından oldukça yüksek olduğunu bildirmiştir.

Mohammadpour vd., (2014b), slot tipi çarpan jetin konkav bir yüzey üzerindeki ısı transfer oranını iki farklı dalga formunda (kesikli kare dalga formu ve sinüzoidal pul-

satif dalga formu), RNG k- ϵ türbülans modeli için, 2 boyutta teorik olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında yüzey üzerindeki Nu sayısına, her iki dalga formu



Şekil 2.3: Pulsatif çarpan jet sayısal modeli (Alimohammed vd. 2015).

için Re sayısının, pulsatif frekansın, jet çıkışı ve yüzey arası mesafenin ve sinüzoidal dalgaların genliğinin etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak, Re sayısının artması ile artan pulsatif frekanslarda ve belirli aralıktaki pulsatif genliklerde daimi (steady) akış durumuna göre zaman ortalamalı Nu sayısının arttığını ve azalan nozul-yüzey arası mesafede yüzey üzerindeki ısı transferinin iyileştiğini belirtmişlerdir. Ayrıca konkav bir yüzey üzerinde ısı transfer oranının kare şeklindeki dalga formunda daha yüksek olduğunu da bildirmişlerdir.

Xu vd., (2012), sınırlandırılmış bir duvarda dizili çarpan çoklu pulsatif jetlerin ısı ve kütle transferi üzerindeki etkilerini 2 boyutta inceleyen sayısal bir çalışma yapmışlar ve yaptıkları bu teorik çalışmaya ait şematik Şekil.2.4'de gösterilmiştir. Sonuç olarak

The diagram illustrates a fluid flow problem over a flat plate. The plate has a total length L and is maintained at a constant temperature T_w . The fluid above the plate has a height H and is subjected to a pressure gradient S . The flow is laminar, and the velocity profile v is shown. The plate is labeled "çarpma yüzeyi" (impact surface) and the fluid is labeled "sınırlanmış duvar $q=0$ " (bounded wall, zero heat flux). The coordinate system (x, y) is centered at the leading edge of the plate.

Kaynak özetinden de anlaşılabacağı üzere, yapılan çalışmaların genelde mikro ölçekte olması, daha çok çarpan jet uygulamaları üzerine yoğunlaşılması, salınım hareketinin daha çok akustik sistemler, piezoelektrik diyaframlar, selenoid vana ile sağlanması, seçilen pulsatif genlik ve pulsatif frekans gibi parametrelerin de bu nedenle sınırlı olması, daha geniş genlik ve frekansta, makro ölçekte çalışmaların sayısının az olması, aynı zamanda çalışmaların daha çok sayısal olması ve 2 boyutla sınırlı olması bu çalışmayı yapmamızın temel nedenini oluşturmaktadır.

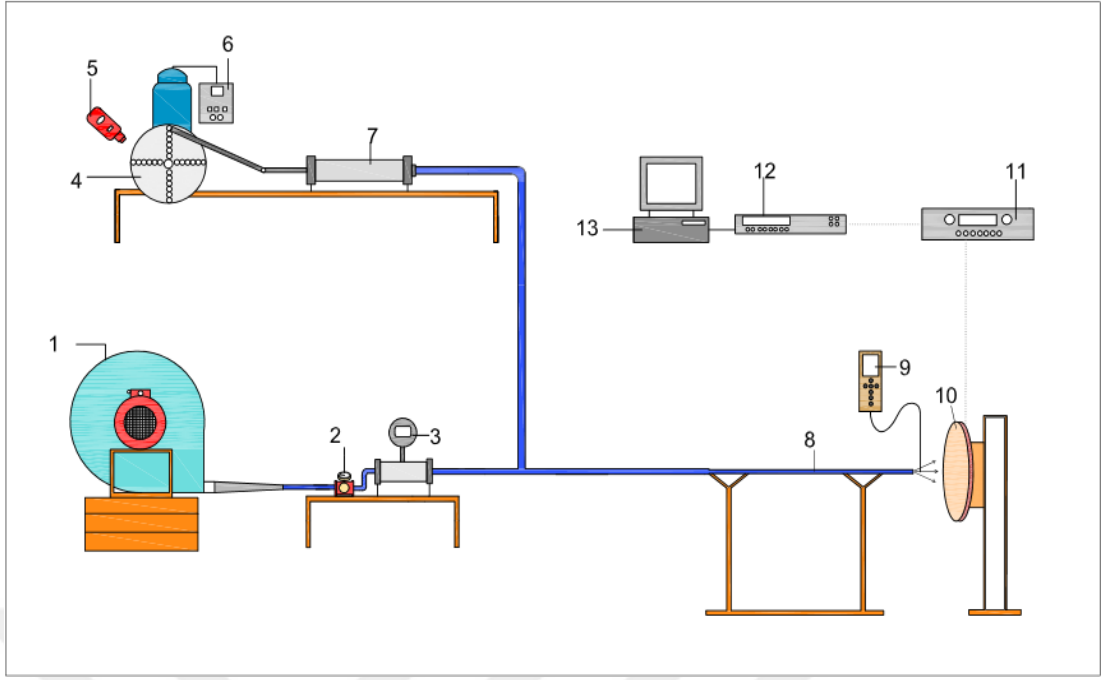
3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Giriş

Bu bölümde, sabit ısı akısına sahip yuvarlak düz levhadan oluşan hedef bir yüzeyin pulsatif jet çarpması kullanılarak soğutulması deneysel olarak incelenmektedir. Aktif ısı transferi iyileştirme yöntemi olarak kullanılan pulsatif çarpan jet için imal edilen deney düzeneği tanıtılmakta, deneylerin nasıl yapıldığı, sıcaklık ölçme noktaları, ölçme yöntemi ve deneysel verilerin nasıl değerlendirildiği açıklanmaktadır. Deney düzeneği üzerinde hız ve ayrıntılı olarak sıcaklık ölçümleri yapılmakta ve ölçülen sıcaklıklar yardımıyla Nusselt sayıları hesaplanmaktadır. Elde edilen sonuçlar, boyutsuz sayılarla ifade edilmekte ve sonuçlar sürekli jet çarpması sonucu oluşan ısı transferi sonuçlarıyla karşılaştırılmaktadır. Yapılan karşılaştırmalarda pulsatif çarpan jetin sürekli çarpan jete göre ısı transferini önemli ölçüde artırdığı gösterilmektedir.

3.2 Deney Düzeneği

Pulsatif çarpan jet deney düzeneği Şekil.3.1’de şematik olarak gösterilmektedir. Ayrıca deney tesisatına ait fotoğraflar Şekil.3.2’de verilmiştir. Pulsatif çarpan jet deney düzeneği, yüksek basınçlı bir fan, fandan gelen kütleli akıya pulsatif etki vermek için kullanılan piston-silindir düzeneğinden oluşmaktadır. Piston-silindir düzeneğini hareket ettirmek için 2.4 KW DC motor ve genliği ayarlamak için bir volan kullanılmaktadır. Volan üzerine açılan delikler vasıtasıyla genlik ayarlanabilmekte, motor devir sayısı değiştirilerek frekans ayarlanabilmektedir. Motor devir ayarı için DC sürücü kullanılmakta ve devir göstergesinden elektronik olarak okunabilmektedir. Ayrıca motor devri dijital foto takometre ile de ölçülerek doğrulanmaktadır. Fandan çıkan havanın debisi fan çıkışına konulan hassas bir basınç düzenleme valfi kullanılarak ayarlanmaktadır. Deneylerde, hava bir borulama tesisatı ile hedef yüzeye yönlendirildiğinden debi ölçme sisteminde basınç kaybı yüksek olmakta ve bu yüzden hava debisi sabit tutulmaktadır.

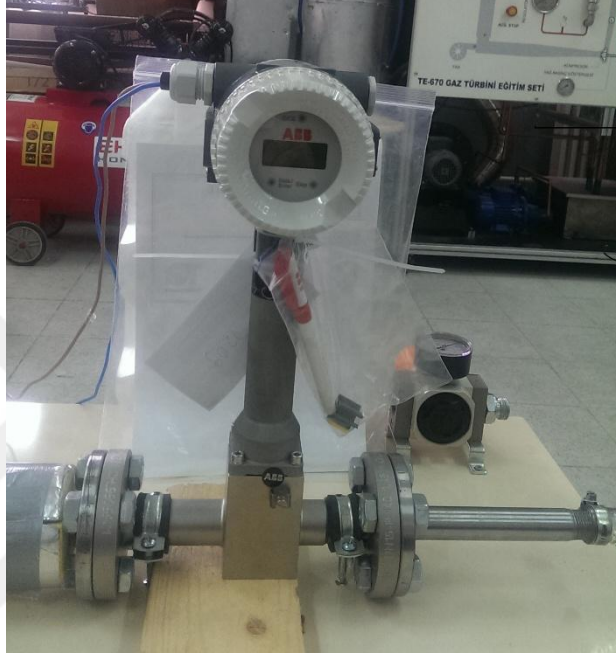


Şekil 3.1: Deneysel Test Düzeneği Şeması. (1.Yüksek basınçlı fan, 2.basınç regülatörü, 3.debi ölçer, 4. volan, 5. dijital takometre, 6.DC Motor ve kontrol ünitesi, 7.piston-silindir düzeneği, 8.üfleme borusu, 9. hız ölçer, 10. hedef yüzey, 11. güç kaynağı, 12.veri toplama sistemi, 13.CPU)



Şekil 3.2: Deney düzeneği resmi.

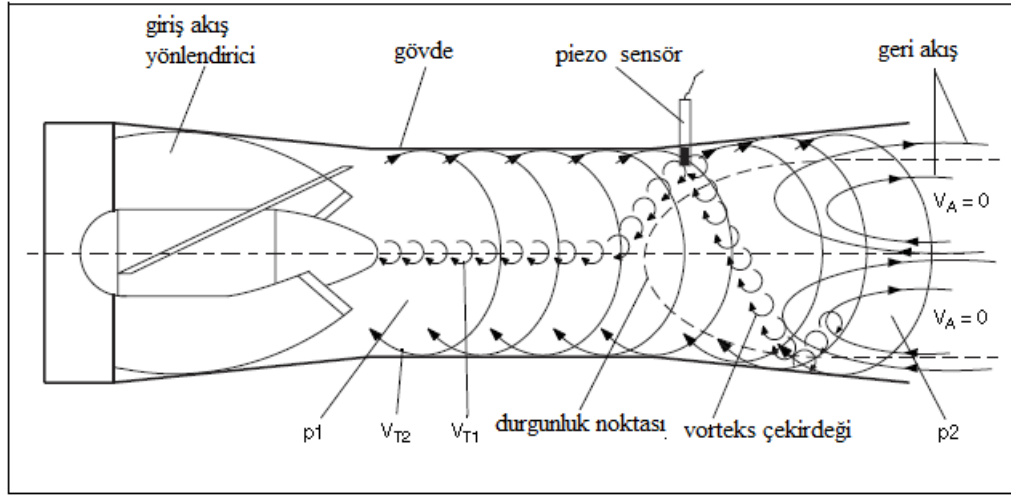
Fandan gelen yüksek debideki havayı, hedef yüzeye çarpan (Reynolds sayısının belirlenmesinde) akışkan debisi olarak belirlenen $10 \text{ m}^3/\text{h}$ değerinde sabit tutmak için fan çıkışına bir basınç regülâtörü yerleştirilmiştir. Fandan gelen akışkanın hacimsel debisini ölçmek için, Şekil 3.3’de görülen *swirl tip* (ABB-4000) bir hız ölçer kullanılmıştır. Bu hızölçer başta gazlar olmak üzere, buharın ve sıvıların akış miktarını geniş bir aralık için ölçebilmektedir.



Şekil 3.3: Swirl tip hız ölçer.

Şekil 3.3’te gösterilen Swirl tip hız ölçerin çalışması Şekil 3.4’de şematik olarak gösterilmektedir. Yüksek basınçlı fanın ürettiği akışkan hızölçere girer ve giren akışkan girişte yönlendirici kanatlar vasıtasıyla dönmeye zorlanır. Kanatlardan dönmeye çalışan fakat dönemeyen akışkan geri akış nedeniyle meydana gelen ikincil bir dönme hareketi meydana getirir. Bu dönme hareketinin merkezinde bir vorteks çekirdeği oluşur. Oluşan bu ikinci dönme hareketi, akış hızı ile orantılıdır ve akış ölçerin iç geometrisi optimize edildiğinde geniş bir akış aralığında lineerdir. Oluşan frekans bir piyazo sensör ile ölçülmektedir. İlk önce akış ölçerden akış hızı ile orantılı sinyallerin sıklığı işlenir ve daha sonra konvertör ile uygun duruma dönüştürülmektedir. Filtre algoritması bu sinyali değerlendirerek akış sinyali kullanmaktadır. Bu sinyallerin sıklığı akış hızı bilgisini dönüştürmek için işlemciye taşınmaktadır. Bu işlenen veriler daha sonra hız ölçerin göstergesinde gösterilir ve

akım ve kontak çıkışları üzerinden veya bir Fieldbus veri bağlantısı üzerinden kullanıcıya iletilmektedir.



Şekil 3.4: Swirl tip hız ölçerin çalışma prensibinin şeması.

3.3 Deneylerin Yapılışı

Deney düzeneği, Şekil 3.1’de görüldüğü gibi pulsatif akış oluşturacak gerekli düzenlemelerin yapılması ile deneylerin yapılabileceği hale getirilir. Deneyler, sürekli çarpan jet akışı ve pulsatif çarpan jet akışı olmak üzere iki farklı akış rejimi için yapılmıştır. Bunlardan ilki, yalnızca yüksek basınçlı fanın çalıştığı durum “sürekli çarpan jet”, ikincisi ise fan ve piston-silindir düzeneğinin aktif olduğu durum “pulsatif çarpan jet” için yapılan deneylerdir.

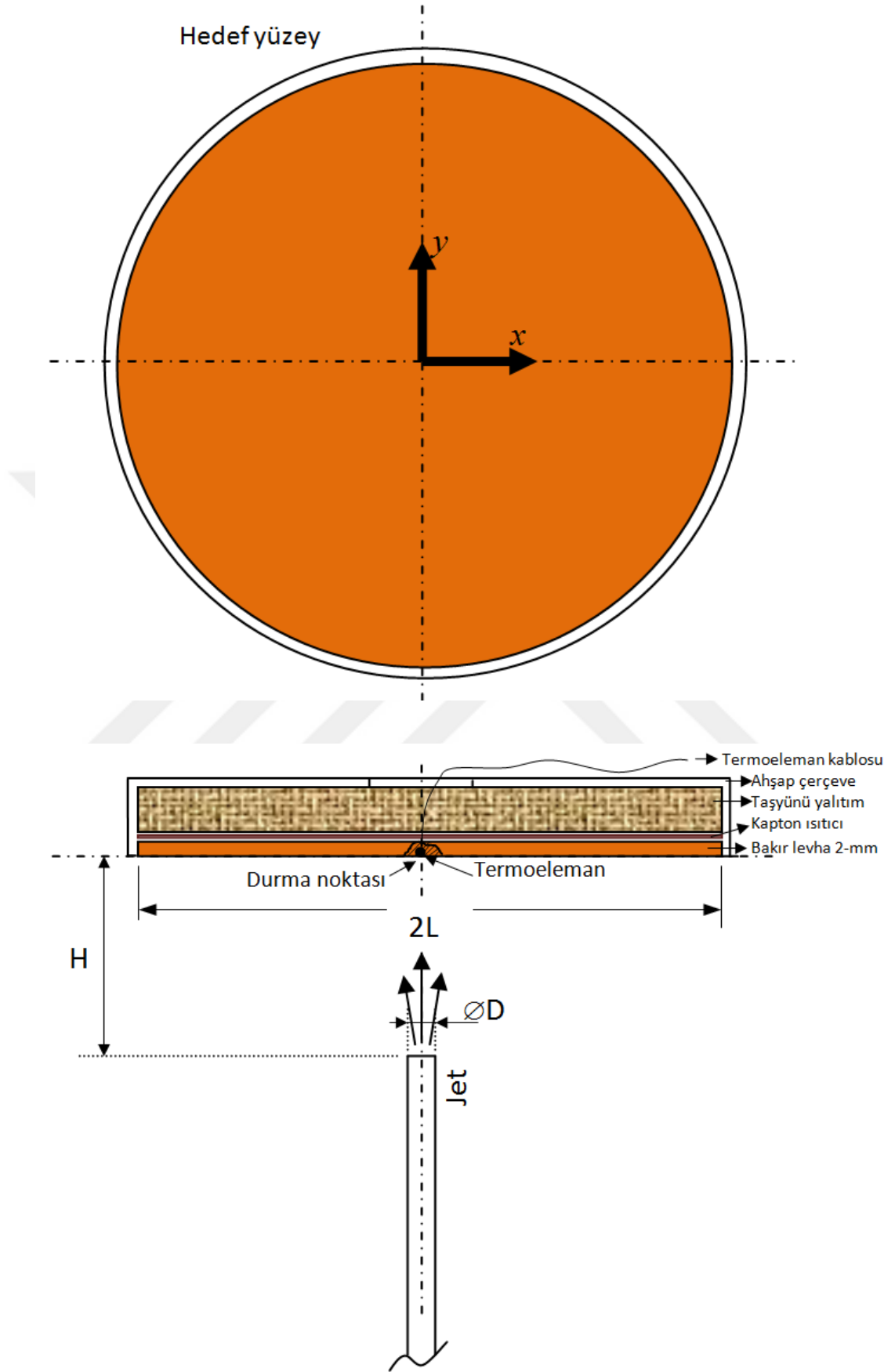
İlk durumda sadece yüksek basınçlı fanın aktif olduğu (daimi akış rejimi) sürekli çarpan jet durumu için deneyler yapılmıştır. Bunun için üfleme borusu ucundaki daimi akış hızı, sıcak tel anemometresi ölçümleri sonucunda belirlenen hıza ayarlanarak fan çalıştırılmıştır. Hedef yüzeydeki ısıtıcı aktif gücü çalıştırılarak yüzeyin ısınması sağlanmış ve sistem rejim haline gelinceye kadar beklenmiştir. Sistemin rejim haline gelip gelmediği, sıcaklık ölçmelerinden anlaşılmaktadır. Sistem rejim haline geldikten sonra belirli noktalardan (Şekil 3.5’de gösterilen dairesel levha üzerine belirli aralıklarla yerleştirilen termoelemanlar vasıtasıyla) sıcaklıklar ölçülerek kaydedilmiştir. Sürekli çarpan jet durumu için jet ile hedef yüzey arasındaki mesafe (H/D) üç defa değiştirilmiştir. Daha sonra sürekli çarpan jet durumu için ölçülen sıcaklıklar yardımıyla levha yüzeyindeki ısı transferi

ile hedef yüzey arasındaki mesafe) durumu için genlik dört defa frekans altı defa değiştirilerek sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Genlik ayarı volan üzerinde bulunan delikler vasıtasıyla yapılmaktadır. Motorun devri, bir optik dijital takometre yardımıyla ölçülerek frekans kontrolü yapılmaktadır. Ölçülen sıcaklıklar yardımıyla pulsatif jet çarpması sonucu levha yüzeyinden ısı transferi hesaplanmaktadır. Tüm deneyler tamamlandıktan sonra ısı transferi iyileştirilmesinde pulsatif çarpan jet parametrelerinin etkileri incelenmiş ve sonuçlar sürekli çarpan jet durumu ile karşılaştırılmıştır.

3.4 Deneysel Ölçümler

Bu çalışmada, sabit ısı akısı ile ısıtılan dairesel bir levha yüzeyinin soğutulması sırasında ısı transferindeki iyileşmeye akışa uygulanan pulsatif çarpan jet uyarıcının etkisinin anlaşılabilmesi için, belirlenen parametrelerde sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Termoelemanlar levha yüzeyine iki sıra halinde dizilmiştir. Dairenin iki eksenini de tarayacak şekilde belirli aralıklarla levha yüzeyine gömülen toplam yirmibeş adet termoeleman ve jet sıcaklığının ve ortam sıcaklığının belirlenmesi için iki adet termoeleman olmak üzere toplam yirmi yedi adet termoeleman vasıtasıyla sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Termoelemanların levha yüzeyindeki konumları Şekil 3.5'te verilmiştir.

Hedef yüzeyin sıcaklık dağılımının belirlenebilmesi için termoelemanlar bakır levha üzerine x ve y koordinatları boyunca yerleştirilmiştir. Durma noktasına yakın bölgelere daha sık olmak üzere, buradan uzaklaştıkça daha seyrek olacak şekilde belirli aralıklarla termoelemanlar (ısılıçiftler) yerleştirilmiştir. Termoelemanlar, ısıtıcı platform üzerinde bulunan bakır levha üzerine önce yivler açılarak uçları yerleştirilmiş, daha sonra bu yivlerin içi lehim ile doldurularak yüzeye sabitlenmiştir. Hedef levha üzerinde pürüzsüz bir yüzey elde etmek için daha sonra bu kısımlar ince bir zımpara ile zımparalanarak düzgün yüzey elde edilmiştir. Hedef yüzey üzerine termoeleman yerleşimi Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Termoeleman kabloları yüzeyin arka kısmından çıkarılarak veri toplama sistemine bağlanmıştır. Hedef yüzey 2 mm kalınlığında bakır levha, arkasına çok ince Kapton ısıtıcı, daha sonra 20 mm taşıyıcı yalıtım malzemesi gelecek şekilde özel olarak hazırlanmış ahşap bir çerçeve içerisine yerleştirilerek oluşturulmuştur. Bakır levha yüzeyde homojen bir ısı dağılımı elde etmek için kullanılmıştır. Taşıyıcı ise verilen ısıyı tamamen ön yüzeyden transfer



Şekil 3.6: Hedef yüzeyin yapısı ve geometrik boyutları.

olması için yalıtım amacıyla kullanılmıştır. Burada çok iyi bir yalıtım sağlanmış olup, deneylere başlamadan önce hedef yüzey arkasında yapılan sıcaklık ölçümlerinde ortam sıcaklığına yakın bir sıcaklık olduğu belirlenmiştir. Bu durumda güç kaynağı tarafından verilen gücün tamamının ön yüzeyden transfer olduğu kabul edilmiş ve ısı kayıpları ihmal edilmiştir.

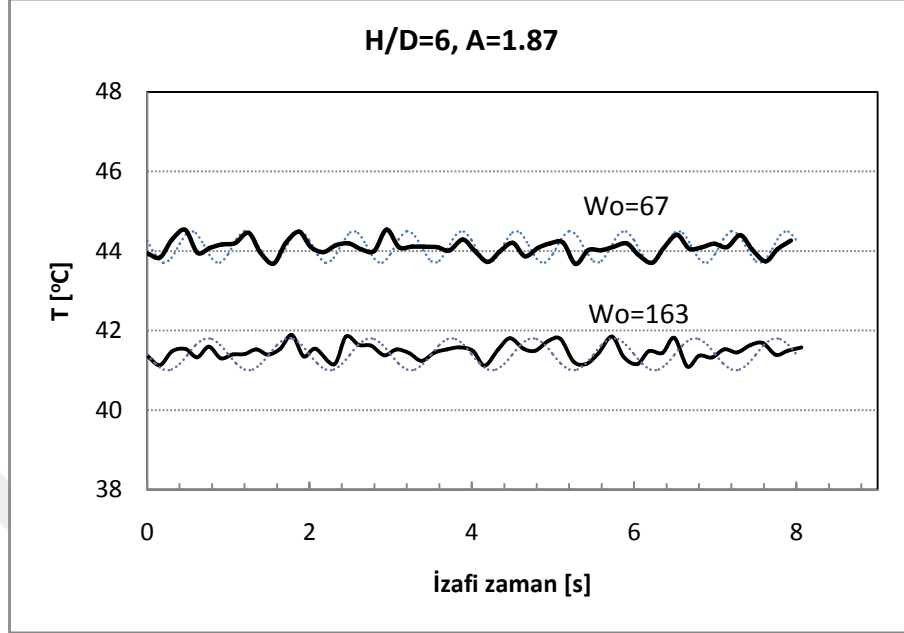
Yüzey üzerine yerleştirilen termoelemanlardan anlık okunan sıcaklık değerleri, bir veri toplama sistemi vasıtasıyla bilgisayara kaydedilmektedir. Deneylerde H/D oranı, pulsatif çarpan jet parametreleri (genlik ve frekans) değiştirilerek ölçülen anlık sıcaklıklar kaydedilmektedir. Çalışmada, fandan gelen hava debisi sabit tutulmuş olup jet ile hedef yüzey arasındaki mesafe ana parametre olarak belirlenmiştir. Üç farklı H/D oranı için genlik dört defa ve frekansta altı defa değiştirilmek kaydıyla 72 adet deney yapılmıştır. Her H/D oranı ve genlik için, hot-wire (sıcak-tel) prob ile ölçülen jet (serbest) akış hızı (jet Reynolds sayısı) sabitlenerek, pulsatif çarpan jet parametreleri olan genlik ve frekans değiştirilmiştir. Pulsatif çarpan jet parametreleri DC-motor ve piston-silindir düzeneği üzerinde gerekli genlik ve frekans ayarları yapılarak değiştirilmiştir. Motor devri değiştirilerek frekans, volan üzerinde bulunan delikler vasıtasıyla da genlik istenilen büyüklüğe ayarlanmakta, aynı zamanda volanın devri bir dijital takometre ile ölçülerek frekanslar kaydedilmektedir.

3.5. Levha Yüzey Sıcaklığının Belirlenmesi

Şekil 3.6’da kesiti görülen hedef yüzey üzerine yerleştirilen termoeleman kabloları, kapton ısıtıcı ve arkasında bulunan taşıyıcı levha içerisinden geçirilip, modelin arka kısmından dışarıya çıkarılmış ve veri toplama sistemine bağlanmıştır. Hedef yüzey boyunca sıcaklıkları daha hassas ölçmek için kullanılacak termoeleman sayısı mümkün olduğu kadar fazla tutulmuştur. Her bir termoelemandan alınan anlık sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Durma noktasına yerleştirilen 8 nolu termoelemandan alınan anlık sıcaklık değerleri Şekil 3.7’de verilmiştir. Alınan anlık sıcaklık değerlerinin frekansa bağlı değişimi en düşük ve en yüksek frekans değerleri için şekilde verilmiştir.

Hedef yüzey üzerinde periyodik jet çarpması meydana geldiği için sıcaklık değerleri zamanla değişmektedir. Bu değişim pulsatif çarpan jetten kaynaklanan periyodik değişimler olduğundan akış içerisinde birbirini takip eden periyodlar meydana

gelmektedir. Yüzey sıcaklığını hesaplamada bu anlık değerler kullanılmaktadır. Yüzeye yerleştirilen her bir termoelemanından alınan anlık sıcaklıkların zaman ortalaması



Şekil 3.7: Durma noktası (8 nolu termoeleman) sıcaklığının yüksek genlik ve düşük frekansta anlık değişimi.

alınarak bu noktaların ortalama sıcaklığı bulunur. Zaman aralıkları eşit olduğu için ortalama sıcaklıklar;

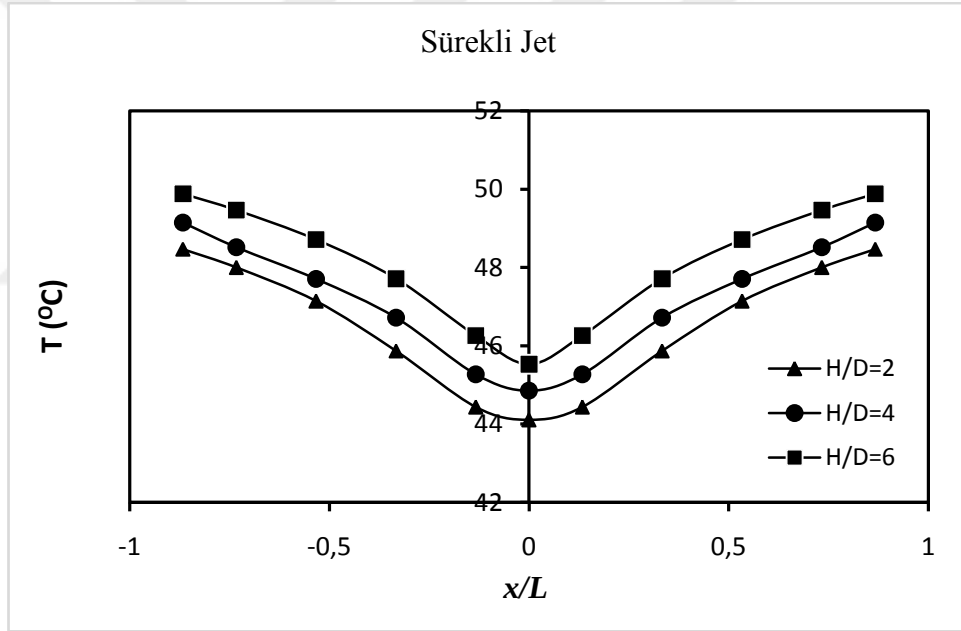
$$T_{w,x} = \frac{1}{N\Delta t} \sum_{i=1}^N T_{w,i}(x,t)\Delta t \quad (3.1)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada, N toplam veri sayısını, $T_{w,i}$ ise anlık ölçülen i . termoelemanının sıcaklıklarını göstermektedir. Hesaplanan yerel ortalama sıcaklıklar vasıtasıyla da yüzeyin ortalama sıcaklığı aşağıdaki formülde verildiği gibi alan ağırlıklı ortalamalar alınarak bulunmaktadır.

$$\bar{T}_w = \frac{1}{A} \int_A T_x(x) dA \equiv \frac{A_1 T_{w1} + A_2 T_{w2} + A_3 T_{w3} + A_4 T_{w4} + A_5 T_{w5} + A_6 T_{w6} + A_7 T_{w7} + A_8 T_{w8}}{A_T} \quad (3.2)$$

Bu ortalama yüzey sıcaklıklarının, daimi akış şartlarında farklı H/D oranları için levha boyunca dağılımı, Şekil 3.8’de verilmiştir. Hedef yüzey silindirik bir levha

olduğundan, silindirin tam merkezi olan durma noktasından dışa doğru her yönde sıcaklık dağılımının birbirine benzediği ve simetrik olduğu kabul edilmiştir. x/L oranı arttıkça yüzey sıcaklıklarının da belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Burada H/D jet üfleme ağzı ile hedef yüzey arasındaki boyutsuz mesafeyi göstermektedir. Jet tam durma noktasına çarptığı için beklendiği gibi durma noktasında ($x/L = 0$) sıcaklık en düşük seviyede ve yüzeyin dışına doğru gittikçe artmakta ve en dış kenarında en yüksek seviyeye ulaşmaktadır. Hedef yüzeye ($q'' = 1200 \text{ W/m}^2$) sabit ısı akısı uygulanmakta, verilen ısıнын tamamının jetin çarptığı yüzeyden transfer edildiği kabul edilmektedir. Jet çarpması vasıtasıyla yüzeyin soğuma (ısı transferi) davranışı incelenmektedir. Jet ile hedef yüzey arasındaki mesafe azaldıkça ölçülen yüzey sıcaklık değerleri düşmekte, mesafe arttıkça sıcaklık değerleride yükselmektedir. Bu da en iyi soğutmanın (H/D) en yakın mesafede elde edildiğini göstermektedir.

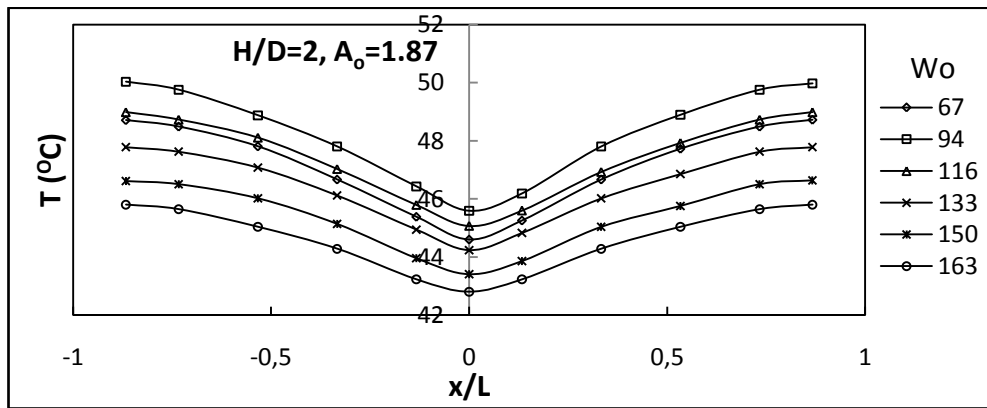
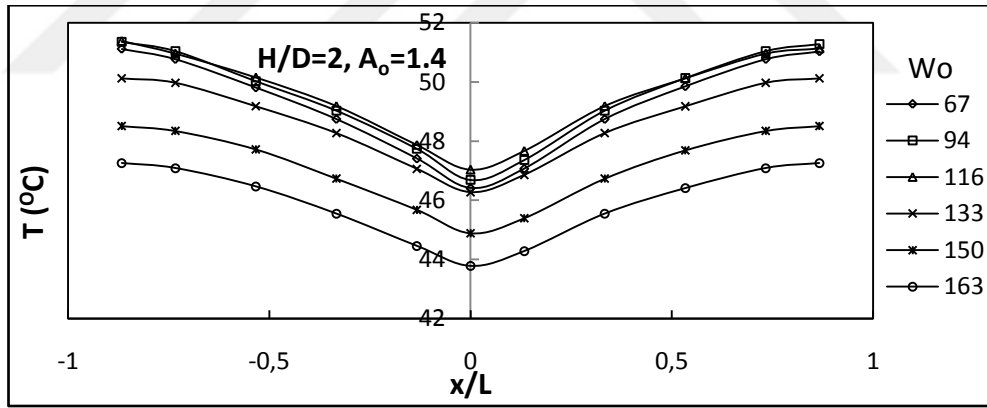
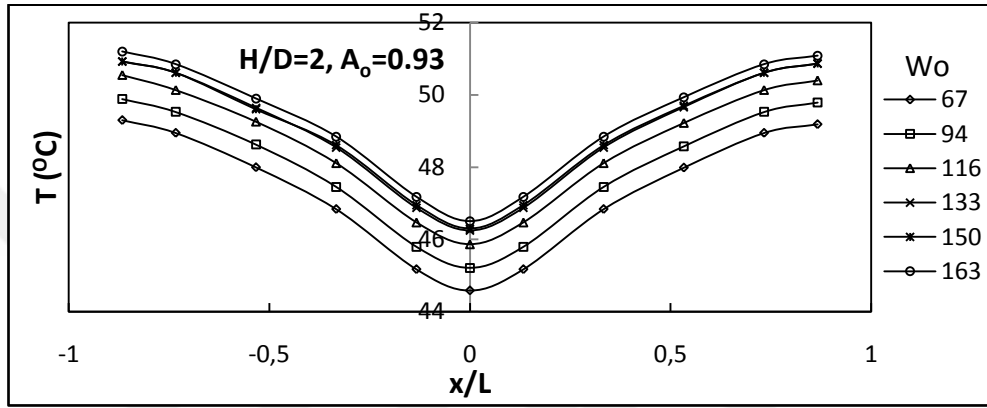
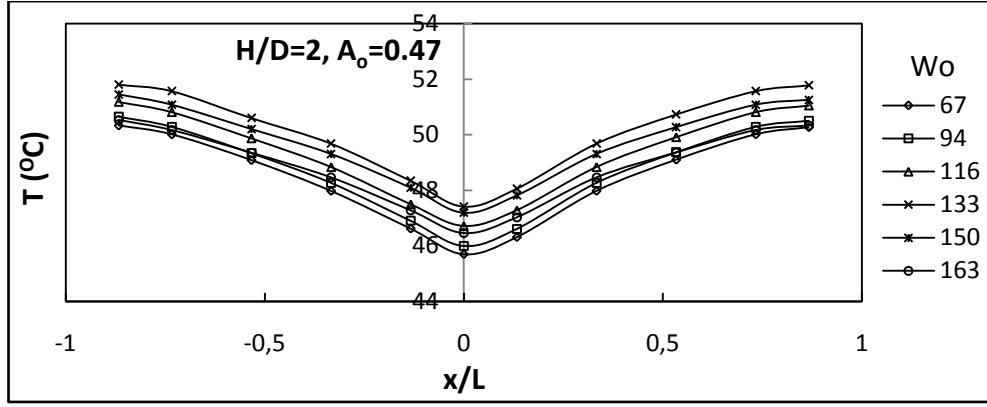


Şekil 3.8: Sürekli çarpan jet şartlarında levha boyunca sıcaklığın H/D ile değişimi.

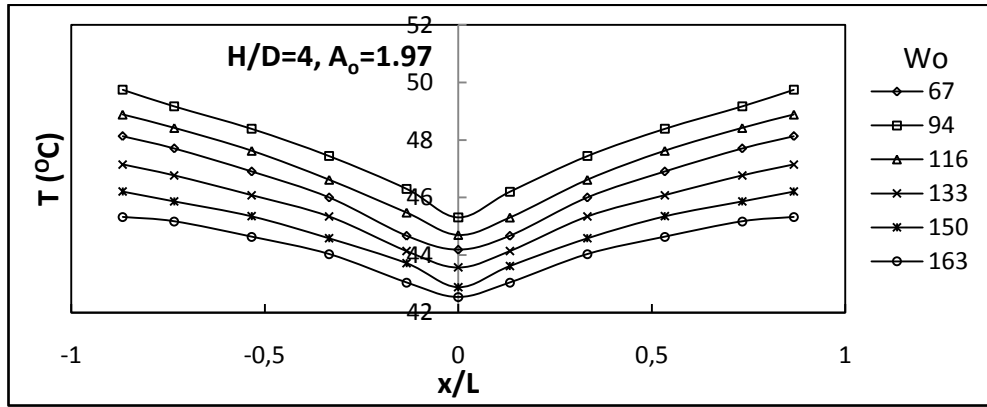
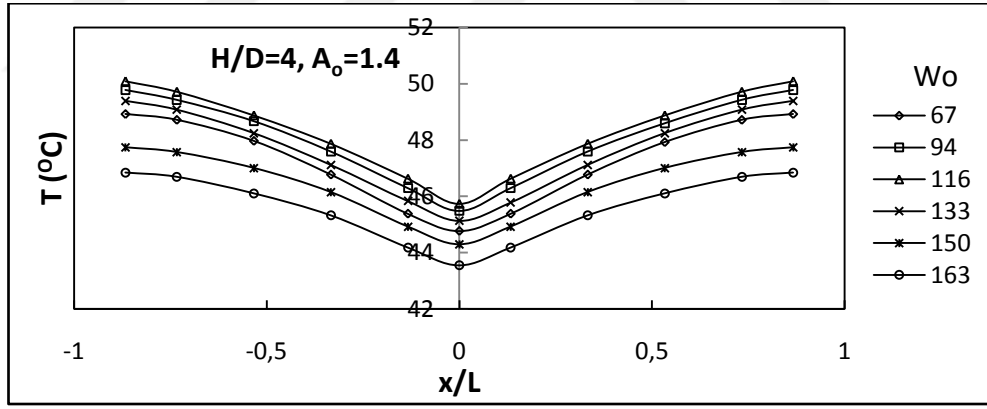
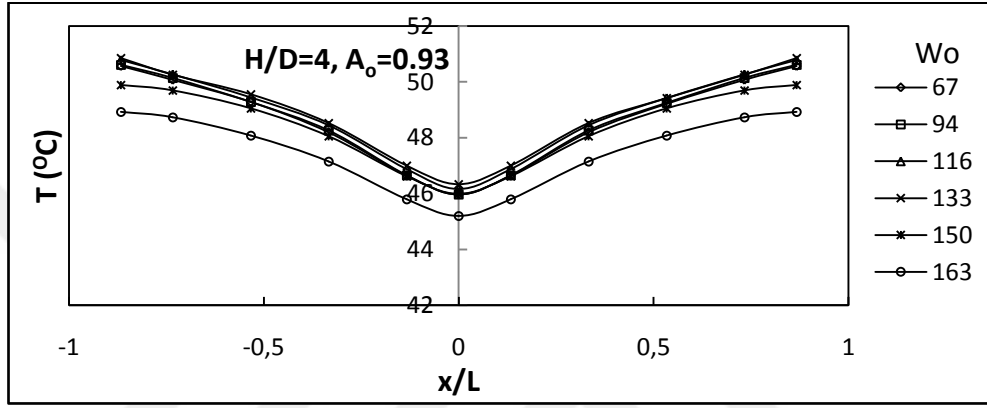
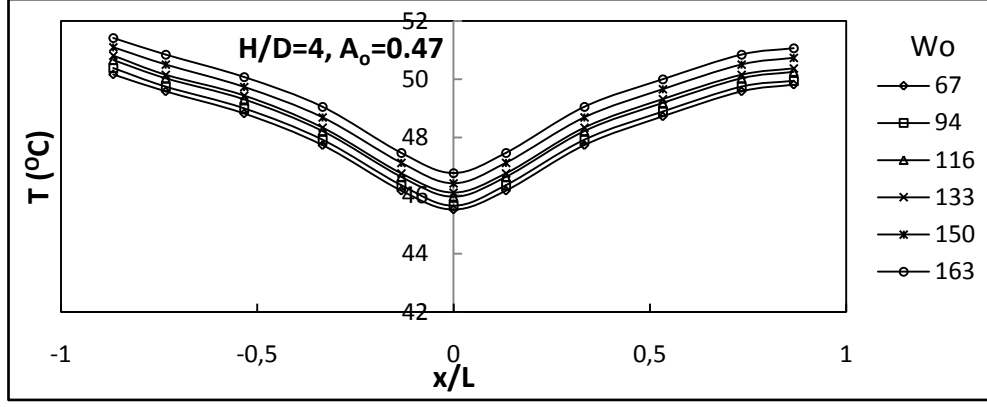
Şekil 3.8'de sürekli çarpan jet üfleme durumunda, ortalama yüzey sıcaklıklarının farklı H/D oranları için levha boyunca dağılımı verilmiştir. Beklendiği gibi sürekli çarpan jet üfleme halinde H/D oranı attıkça yüzey sıcaklıklarının belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. $H/D = 2$ durumunda yüzey sıcaklıklarının daha düşük olduğu, buda yüzeyin daha iyi soğutulduğu anlamına gelmektedir. Burada sürekli çarpan jet durumunda H/D 'nin ısı transferine etkisi açıkça görülmektedir.

Diğer taraftan, sürekli çarpan jete, bir piston silindir düzeneği vasıtasıyla kazandırılan periyodiklik, yani pulsatif jet çarpması durumunda, ana parametre olan H/D oranlarına göre genlik ve frekanslar değiştirilerek, yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Ölçülen sıcaklıkların ortalamaları alınarak belirlenen sıcaklıklar ölçülen parametrelere göre Şekil 3.9'da verilmiştir. Burada genlikler dört defa, frekanslar ise altı defa değiştirilerek deneyler yapılmıştır.

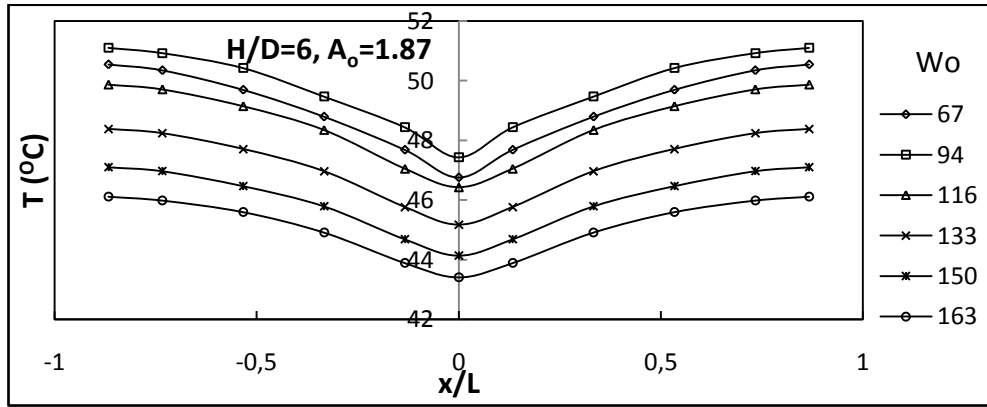
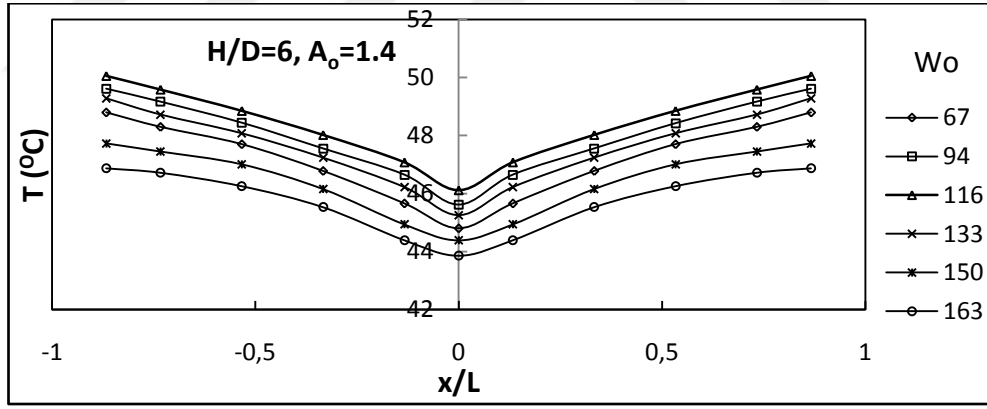
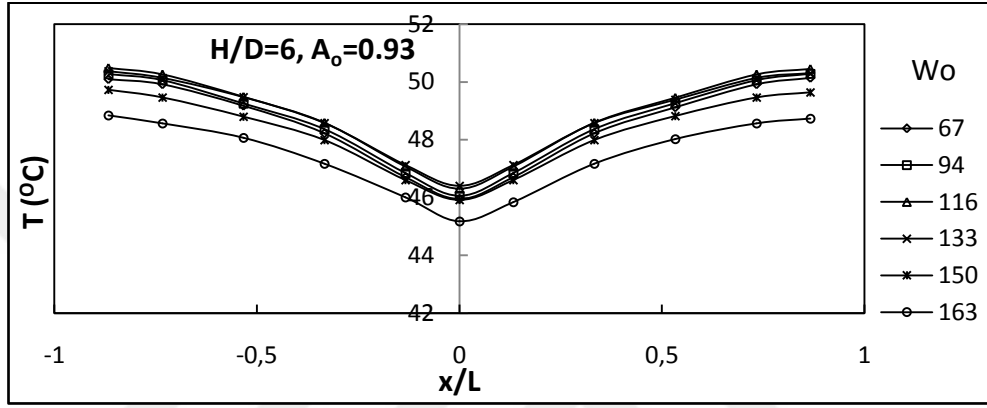
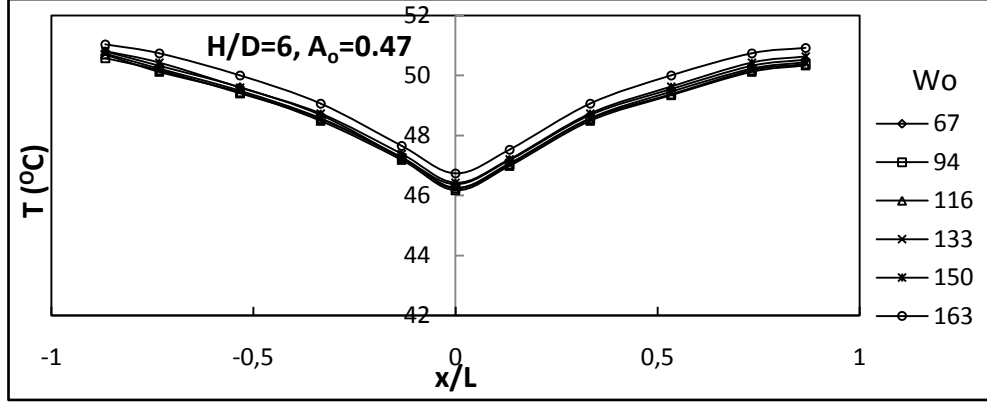
Şekil 3.9a, Şekil 3.9b ve Şekil 3.9c'de ölçülen sıcaklıkların zaman ortalamaları alınarak, konuma göre H/D oranı ve pulsatif çarpan jet parametrelerine göre değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi durma noktasından dışa doğru sıcaklıklar yükselmektedir. Bu beklenen bir durumdur. Sıcaklık değişim grafikleri birbirine benzemekle birlikte H/D oranı arttıkça yani jet ile hedef yüzey arasındaki mesafe arttıkça jetin etkisi azalmaktadır. Genliğin $A_0 = 0.47$ olduğu durum için her H/D oranında sıcaklık dağılımına bakıldığı zaman, frekansın çok fazla etkisinin olmadığı, frekans değişimlerine rağmen sıcaklıkların hemen hemen aynı değerlerde kaldığı görülmektedir. Bu durum düşük genlik ve düşük frekansın kayda değer bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Artan genlik ile beraber, frekansın etkisinin daha çok hissedildiği grafiklerde görülmektedir. Genliğin en yüksek değeri için, her frekans değerindeki sıcaklık değişimi açıkça görülmektedir. Yüksek genlik değerinde en düşük frekansla en yüksek frekans arasında 4-5 derecelik sıcaklık farkları olduğu görülmektedir. Artan genlikle beraber yüksek frekans değerinde en iyi soğutma değerinin elde edildiği grafiklerden görülmektedir. Yüksek genlik ve en yüksek frekans değerinde ortalama sıcaklıklar en düşük değerleri almaktadır. Diğer taraftan her üç H/D üfleme mesafesi karşılaştırıldığında, H/D oranının en düşük olduğu durumda ortalama sıcaklıkların daha düşük olduğu, H/D 'nin artmasıyla birlikte ortalama sıcaklıklarında arttığı görülmektedir. Bu durumda yüksek genlik, yüksek frekans ve en düşük H/D oranında en iyi ısı transferinin sağlandığı anlaşılmaktadır. Yüksek genliğin konvektif etkiyi artırdığı, yüksek frekansın ise akış karışmasını (yüzeydeki sıcak akışkanla soğuk akışkanın karışımını) artırdığı söylenebilir. H/D oranının en yakın değerinde sıcaklıkların düşük olmasının ise aynı ortalama hıza sahip, jet akışının durma noktasına daha yüksek hızla çarpması sonucu, ısı transferinde artışa sebep olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 3.9a: Isı transferindeki iyileşmenin frekans ve genlikle değişimi ($H/D = 2$).



Şekil 3.9b: Isı transferindeki iyileşmenin frekans ve genlikle değişimi ($H/D = 4$).



Şekil 3.9c: Isı transferindeki iyileşmenin frekans ve genlikle değişimi ($H/D = 6$).

3.6 Isı Geçişi Hesabı

Bu problemde, ısı taşınım katsayısının bulunabilmesi için ölçülen parametreler yardımıyla levha yüzeyinden jet çarpması sonucu geçen net ısının belirlenmesi gerekmektedir. Buda sistem üzerindeki sıcaklık ölçümü yardımıyla yapılmaktadır. Periyodik akışta, düz levha üzerindeki akışa benzer şekilde anlık (yerel) Nusselt sayısı aşağıdaki şekilde yazılabilir,

$$Nu_{x,t} = \frac{h(x,t)L}{k} \quad (3.3)$$

Burada L hedef yüzey uzunluğunu (yarıçapını), k akışkanın ısı iletim katsayısını ve $h(x,t)$ de yerel anlık ısı taşınım katsayısını göstermektedir (Bu çalışmada karakteristik uzunluk olarak L alınmıştır). Jet çapı D 'nin diğer geometrik büyüklüklere göre çok küçük olmasından ve boyutsuz büyüklüklerin çok küsuratlı sayılardan oluşmasından dolayı, bu yol tercih edilmiştir. Akış periyodik olduğu için ortalama ısı taşınım katsayısının hesaplanmasında çevrim ortalama değerleri esas alınmaktadır. Bu durumda, anlık ısı taşınım katsayısının zaman ortalaması alınarak h_m bulunmaktadır. Anlık ısı taşınım katsayısının,

$$h_{x,t} = \frac{q''}{T_{w(x,t)} - T_{j\infty}} \quad (3.4)$$

olduğu düşünülürse çevrim ortalama ısı taşınım katsayısı

$$h_m = \frac{1}{\tau L} \int_0^\tau \int_0^L h(x,t) dx dt \quad (3.5)$$

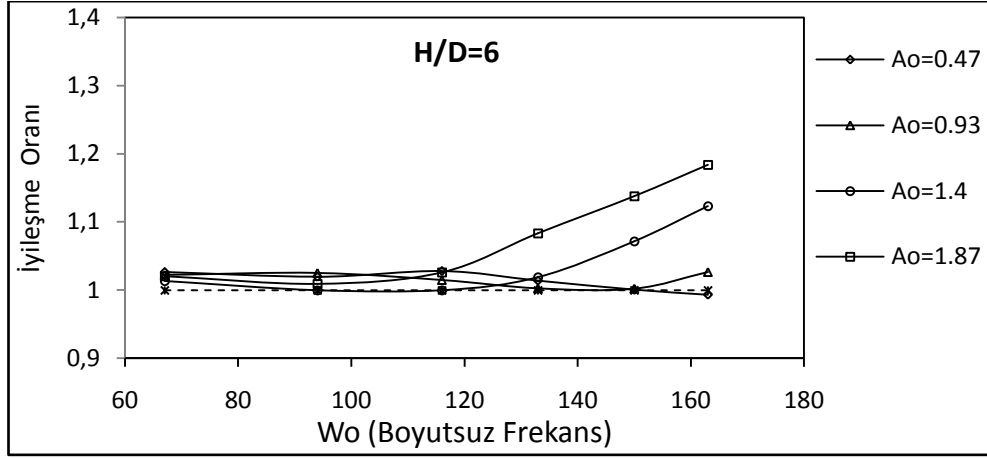
olarak ifade edilir. Burada τ , bir çevrim zamanını göstermektedir. Bu eşitlik Nusselt sayısı cinsinden ifade edilirse;

$$Nu_m = \frac{1}{\tau L} \int_0^\tau \int_0^L Nu_{x,t} dx dt \quad (3.6)$$

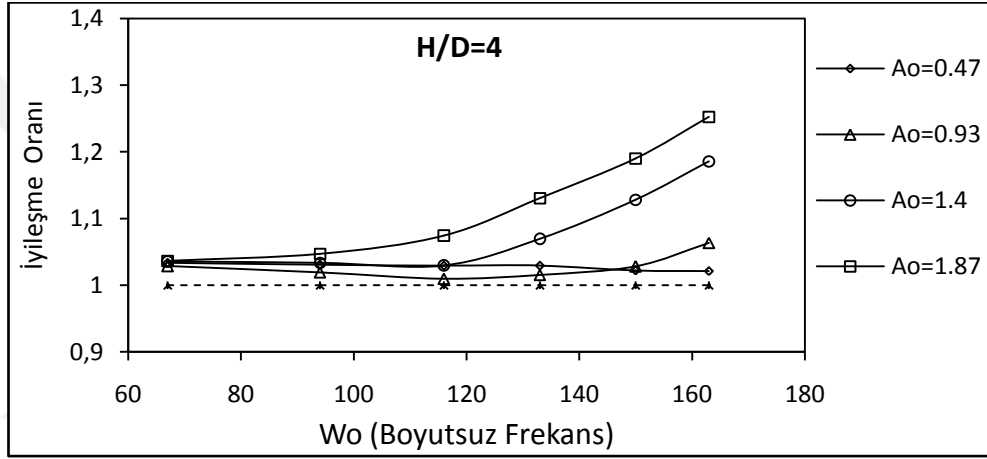
olarak çevrim ortalama Nu sayısı bulunur. Bu integrallerin hesaplanması sonucunda, ortalama Nu sayısı,

$$\overline{Nu} = \frac{q''L}{k(\overline{T}_w - T_{j\infty})} \quad (3.7)$$

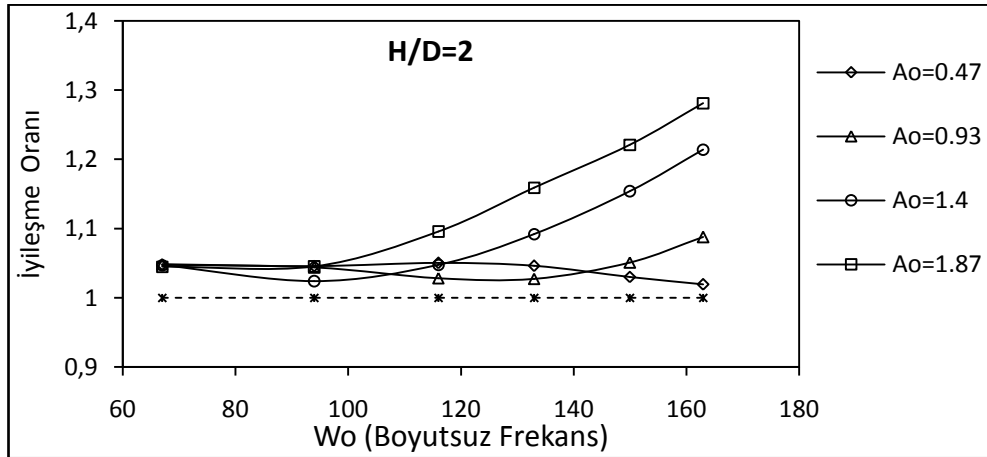
olarak ifade edilir (Kim, D., 2012). Burada, q'' ısıtıcıdan levha yüzeyine verilen ısı akısı (bu çalışmada $q'' = 1200 \text{ W/m}^2$ olarak sabit bir değer alınmıştır). L , hedef yüzey yarıçapı (karakteristik uzunluk), $\overline{T}_w$, çevrim ortalama yüzey sıcaklığı ve $T_{j\infty}$ ise çarpan jet ortalama akışkan sıcaklığıdır. Bu çalışmada sıcaklık ölçümleri sonucu elde edilen ortalama sıcaklık değerleri kullanılarak, her bir H/D ana parametresi için, genlik ve frekanslara bağlı olarak ortalama Nu sayıları hesaplanmış ve daimi akış şartlarıyla karşılaştırılarak Şekil 3.10a, Şekil 3.10b ve Şekil 3.10c’de boyutsuz parametrelerin fonksiyonu olarak verilmiştir. Burada Nu_p/Nu_s “iyileşme oranı” tanımlanmış olup, Nu_p pulsatif çarpan jet durumundaki ortalama Nu sayısını, Nu_s ise sürekli çarpan jet durumundaki ortalama Nu sayısını göstermektedir. İyileşme oranının 1 (bir)’den büyük olması pulsatif çarpan jetin ısı transferini artırdığını göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, en küçük H/D oranı, en yüksek genlik ve en yüksek frekansta en iyi ısı transferinin (iyileşme oranının) olduğu gözlenmektedir. $H/D = 2$, $A_0 = 1.87$, $Wo = 163$ değeri için ısı transferi iyileşme oranının yaklaşık % 30 civarında olduğu görülmektedir. Aynı pulsatif parametreler için, $H/D = 4$ durumunda iyileşme oranının % 25 civarında olduğu, $H/D = 6$ durumunda ise iyileşme oranının yaklaşık % 20 civarında olduğu görülmektedir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre pulsatif çarpan jetin sürekli çarpan jete göre ısı transferini iyileştirmede önemli bir rol oynadığı gözlenmektedir. Sürekli çarpan jete göre uygun parametrelerin seçilmesi halinde % 30 gibi bir iyileşmenin kayda değer olduğu düşünülmektedir. Özellikle elektronik cihazlar gibi, yüksek yoğunluklu ısı üreten cihazların etkin soğutulması uygulanmasında bu yöntemin kullanılabileceği öngörülmektedir. Pulsatif çarpan jet, hedef yüzeyde stabil olarak oluşan sınır tabakayı periyodik olarak bozarak, akış periyodikliği vasıtasıyla cidara yakın yüksek sıcaklıktaki akışkan kitlesinin yüzeyden belirli periyotlarla uzaklaştırılması, soğuk ve sıcak akışkanların çok hızlı karıştırılmasına sebep olmakta ve bu da yüzeyden ısı transferinin artmasına sebep olmaktadır. Pulsatif çarpan jetin ısı transferini artırma mekanizması bir sonraki (sayısal) bölümde ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.10: Isı transferindeki iyileşmenin boyutsuz parametrelerle değişimi
 (a): H/D=6, (b): H/D=4, (c): H/D=2.

3.7 Fiziksel Parametreler

Bir piston-silindir düzeneği vasıtasıyla oluşturulan periyodik karakteristiğine sahip, pulsatif çarpan jet için, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri uygun fiziksel parametrelerle boyutsuzlaştırılırsa benzerlik parametreleri elde edilir. Bu çalışma deneysel ağırlıklı bir çalışma olduğu için boyutsuzlaştırma yapılmış ve elde edilen sonuçların boyutsuz sayılar cinsinden verilmesine özen gösterilmiştir. Bu çalışmayı karakterize eden temel fiziksel büyüklükler aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$h = (U_j, x_m, w, \rho, \mu, c_p, k, H, D, L) \quad (3.8)$$

Bu parametreler göz önüne alınarak yapılan boyut analizinin detayları **Ek.B**'de detaylı olarak verilmiştir. Boyutsuzlaştırma sonucunda elde edilen boyutsuz büyüklükler aşağıda açıklanmaktadır:

- **Jet Reynolds sayısı:**

$$Re_j = \frac{U_j D}{\nu} \quad (3.9)$$

Re_j , Jet Reynolds sayısıdır. Burada U_j , pulsatif akış şartlarındaki ortalama jet hızı olup

$$U_j = \frac{1}{\tau r} \int_0^\tau \int_0^r u dr dt \quad (3.10)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. D , jet çıkış çapını göstermektedir. Bu çalışmalarda Re_j sayısı ($Re_j = 15.500$) pulsatif akışın karakteristiğini belirleyen bir parametredir. Bu çalışmada jet hızı (Re_j) sabit tutularak incelemeler yapılmıştır.

- **Boyutsuz Frekans:**

$$Wo = L\sqrt{\omega/\nu} \quad (3.11)$$

Wo , (*Womersley sayısı*) boyutsuz frekanstır ve pulsatif çarpan jet için dışarıdan verilen frekansı ifade eden önemli parametrelerden birisidir. Bu çalışmada frekans (Wo sayısı), deneysel düzeneğin limitleri dâhilinde değiştirilerek çalışmalar yapılmıştır. Karakteristik uzunluk olarak L alınmıştır. Düşük frekanslı akışlarda Strouhal sayısı yerine Womersley sayısı kullanılmaktadır ve boyutsuz frekansı ifade etmektedir.

- **Boyutsuz genlik:**

$$A_o = \frac{x_m}{L} \quad (3.12)$$

A_o , boyutsuz genliktir. Burada x_m , kullanılan pistonun strokunu (genliğini) göstermektedir. Deneysel düzeneğin izin verdiği mevcut aralıklar için çalışmalar yapılmıştır. Isı geçişini önemli ölçüde etkileyen parametrelerden biridir.

- **Boyutsuz üfleme mesafesi:**

$$B = H/D \quad (3.13)$$

Boyutsuz üfleme mesafesi bu çalışmadaki önemli boyutsuz parametrelerden birisidir. Jet çıkışı ile hedef yüzey arasındaki mesafeyi göstermektedir. Bu çalışmada üç farklı mesafe için incelemeler yapılmıştır.

- **Diğer parametreler:** Bu çalışmada ısı geçişini etkileyen bir diğer boyutsuz parametrede $Pr = \nu/\alpha$ Prandtl sayısıdır, kullanılan akışkanı ifade etmektedir. Bu çalışmada iş akışkanı olarak hava kullanılmıştır ve akışkan değiştirilmemiştir. Bir diğer parametre ise H/L dir ve burada H/D göz önüne alındığı için bu parametre dikkate alınmamıştır. Bu durumda yüzeyden ısı geçişini ifade eden Nu sayısı boyutsuz sayıların bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Nu = C (H/D, A_o, Wo, Re_j, Pr, H/L) \quad (3.14)$$

Boyut analizi gereği toplam $n = 11$ parametre, buna karşı, $r = 4$ temel boyut vardır ve $n-r = 7$ adet boyutsuz sayı elde edilmesi gerekmektedir ve bu sayılar yukarıda ifade edilmiştir. Bu çalışmada, ısı transferini etkileyen üç önemli parametre boyutsuz üfleme mesafesi (H/D), pulsatif çarpan jetin frekansı (Wo) ve genliğidir (A_0). Diğer parametreler sabit tutularak bu parametrelerin ısı transferine etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada diğer bir önemli parametre olan jet Reynolds sayısı (Re_j), deney düzeneğindeki ölçme problemlerinden dolayı değiştirilememiş ve sabit tutulmuştur. Debi ölçme cihazında meydana gelen aşırı basınç kaybı nedeniyle, hava debisi en yüksek değerine ayarlanmış ve değiştirilememiştir. Boyut analizinin nasıl yapıldığı **Ek.B**'de ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

3.8 Sonuçlar

Deneylerde ölçülen sıcaklıklar yardımıyla levha yüzeyindeki ısı geçişi hesaplanmıştır. İlk olarak termoelemanlar vasıtasıyla levha üzerinde belirtilen noktalardan ölçülen sıcaklıklar kullanılarak yerel Nusselt sayısı hesaplanmıştır. Burada ölçülen sıcaklıkların zaman ortalamaları alınarak hesaplama yapılmıştır.

Elde edilen ortalama sıcaklıklar vasıtasıyla, her üfleme oranında her bir genlik ve frekans için çevrim-ortalama Nusselt sayıları (Nu_p) pulsatif çarpan jet için hesaplanmıştır. Ayrıca her bir H/D oranı için (daimi akış) sürekli çarpan jet rejiminde elde edilen sıcaklıklar vasıtasıyla ortalama sürekli çarpan jet Nusselt sayıları da hesaplanmıştır. Herbir H/D oranı için elde edilen pulsatif akış çevrim-ortalama Nusselt sayısının (Nu_p), ortalama daimi akış Nusselt sayısına (Nu_s) bölünmesi (Nu_p/Nu_s) ile ısı transfer etkinliği elde edilmiştir.

Isı transferi hesapları sonucu elde edilen durum boyutsuz büyüklüklere bağlı olarak Şekil 3.10'da verilmiştir. Bu sonuçlara göre artan genlik ve frekanslarda ısı transferindeki iyileşme görülmektedir. $H/D = 6$ için yapılan değerlendirmede (Şekil 3.10a), düşük genliklerde ısı transferinde önemli bir artışın olmadığı, yalnızca yüksek genliklerde artış olduğu görülmektedir. $H/D = 6$ için en yüksek genlikte ve frekansta yaklaşık % 20'lik bir iyileşme olduğu görülmektedir.

$H/D = 4$ için (Şekil 3.10b) yapılan değerlendirmede düşük olan ilk iki genlik değeri için ısı transferinde kayda değer bir iyileşmenin olmadığı görülmektedir. Buna

rağmen yüksek olan genliklerde kayda değer artışların olduğu görülmektedir. Bu ana parametre için ($H/D = 4$), yüksek genlik ve frekansta yaklaşık % 25'lik bir artışın olduğu görülmektedir.

$H/D = 2$ için (Şekil 3.10c) yapılan değerlendirmede düşük genliklerde ısı transferinde diğer ana parametrelerde olduğu gibi, kayda değer bir iyileşmenin olmadığı gözlenmekte, diğer genliklerde, ısı transferinin artan genlikle birlikte logaritmik olarak arttığı görülmektedir. Belirli bir frekanstan sonra, artan frekans ve genlikle birlikte ısı transferinin de önemli derecede arttığı gözlenmektedir. Bu artışın frekans ve genlikle logaritmik artışa benzer bir şekilde değiştiği gözlenmektedir. En yüksek genlik ve en yüksek frekans için sürekli çarpan jete göre ısı transferinde yaklaşık % 30'luk bir iyileşme söz konusudur. Bu durumun pulsatif çarpan jet uygulaması için önemli bir ısı transferi iyileşme oranı olarak kabul edilebileceği öngörülmektedir.

Sonuç olarak bu çalışmada deneysel olarak incelenen parametrelere bağlı olarak ısı transferinin hangi şartlarda iyileştiği ortaya çıkarılmış olup, jet ile hedef yüzey arasındaki mesafenin (H/D) yakın, genlik ve frekansın yüksek değerleri için hedef yüzeyden ısı transferinin önemli bir şekilde artırıldığı görülmüştür. Günümüzde özellikle elektronik soğutma gibi kritik öneme sahip cihazların etkin bir şekilde soğutulması için ısı transferi iyileştirme teknikleri ile ilgili arayışlar devam etmektedir. Bu anlamda pulsatif çarpan jetle, ısı transferinin önemli bir oranda artırılabilmesi öngörülmektedir. Pulsatif çarpan jetlerin bu tip uygulamalar için güvenilir bir şekilde kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

3.9 Hata Analizi

Bu çalışmada, yapılan deneylerde meydana gelen hatalar daha çok ölçme hatalarından kaynaklanmaktadır. Bu durumda, deneysel hataları tespit etmek için, Holman (2001), tarafından önerilen “**belirsizlik analizi**” yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemle göre, sistemde ölçülmesi gereken büyüklük R , ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler ise $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ olsun. Burada;

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3.15)$$

olarak ifade edilmekte ve bu sonuç değerine ait toplam belirsizlik aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.16)$$

Bu çalışmada, hataya sebep olan büyüklükler, pulsatif çarpan jet hızı U_j , ölçme hatası (± 0.5 m/s), yüzey sıcaklığı T_w (± 1.5 °C) ve akışkan sıcaklığı T_j (± 0.2 °C) ölçme hatalarından kaynaklanmaktadır. Bu büyüklükler ile ilgili ölçme hataları, kaynağından itibaren alınarak sonuçta ne kadar hataya sebep olduğu bulunmaktadır.

T_w için hata oranının bulunması;

$$T_w = \frac{T_{w1} + T_{w2} + T_{w3} + T_{w4} + T_{w5} + T_{w6} + T_{w7} + T_{w8} + T_{w9} + T_{w10}}{10} \quad (3.17)$$

(3.17) formülünden her bir sıcaklık için yapılan hatanın toplam yüzey sıcaklığında ne kadarlık bir hataya sebep olduğu denklem (3.16) uygulanarak bulunur. Akışkan sıcaklığı T_j için ölçmelerden alınan anlık sıcaklıkların ortalamaları alındığından ortalama sıcaklık için belirli bir hata oranı belirlenmiştir. Benzer şekilde jet hızı ölçümü içinde belirli bir hata oranı kullanılmıştır.

3.9.1 Nusselt sayısının belirsizliği;

Deneylerde elde edilen sonuçlardan aşağıdaki bağıntı kullanılarak Nusselt sayıları hesaplanmıştır. Burada, titreşimli akış özelliği ve ana akış hızının da etkisinin görülebilmesi için Nu sayısı,

$$Nu = C(Re_j, H/D, A_o, Wo) \quad (3.18)$$

Parametrelerinin fonksiyonu olarak göz önüne alınmıştır.

Bu çalışmada;

Burada belirsizliğe sebep olan parametreler; U_j , T_w ve T_j için hata oranları ayrı ayrı tespit edilmiştir. Belirtilen hata oranlarının her bir deney için Nu sayısının hesabında ne kadar hataya sebep olduğu;

$$\frac{w_{Nu}}{Nu} = \left[\left(\frac{\partial Nu}{\partial T_w} w_{T_w} \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial T_\infty} w_{T_\infty} \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial U_j} w_{U_j} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.19)$$

şeklinde hesaplanır. Örnek bir deney (deney-1) için yapılan hesap verilirse,

$$\frac{w_{Nu}}{Nu} = \left[((1.7) (1.5))^2 + ((0.4) (0.2))^2 + ((6.0) (0.5))^2 \right]^{1/2}$$

$$\frac{w_{Nu}}{Nu} = [0.0108 + 0.027 + 0.937 + 0.0718]^{1/2} = 4.97$$

seçilen bu deney için yüzde hata miktarı $\frac{w_{Nu}}{Nu} = \%4.97$ olarak bulunur. Diğer deneyler için yapılan hata hesapları ekte çizelge halinde verilmiştir (**Çizelge Ek C.1**). Hata hesabında en çok hataya sebep olan parametrenin pulsatif çarpan jet hız ölçümünden ve daha sonra, hedef yüzey sıcaklığı ölçümlerinden kaynaklandığı görülmektedir. Tabloda, her bir deney grubu için hataların oranı verilmiştir. Buradan da anlaşılabacağı gibi yüksek frekanslarda deneylerde belirsizlikler artmakta ancak düşük frekanslarda ise hata oranı azalmaktadır. Yapılan tüm deneylerin değerlendirmeleri sonucunda ortalama belirsizliğin yaklaşık

$$\frac{w_{Nu}}{Nu} = \mp \%5.02 \quad (3.20)$$

olduğu görülmüştür. Bu oranda kabul edilebilir deneysel belirsizlik sınırları içerisinde kalmaktadır.

4. SAYISAL ÇALIŞMA

4.1 Giriş

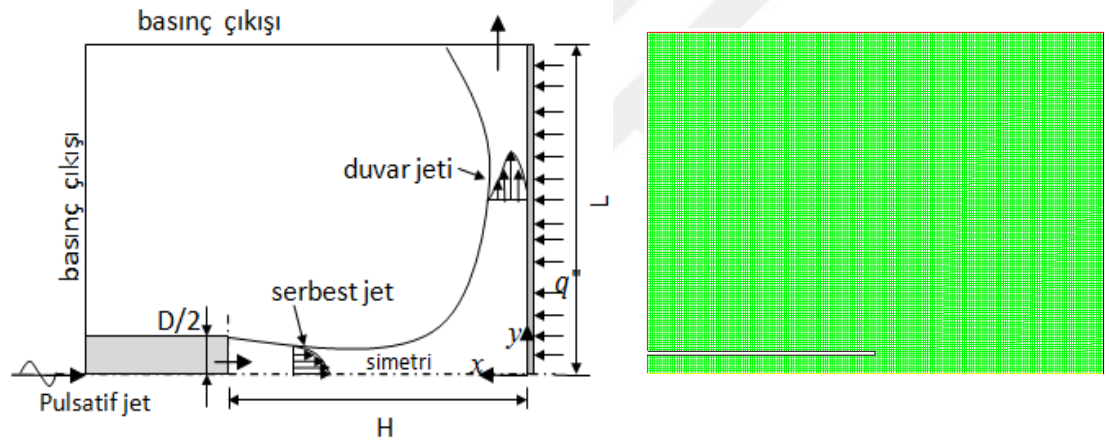
Bu bölümde, pulsatif jet çarpması ile hedef yüzey olan dairesel düz levha üzerinden olan ısı geçişi, deneysel parametreler esas alınarak sayısal olarak incelenmektedir. Bunun için sonlu hacimler prensibine göre çözüm yapan FLUENT paket programı kullanılmaktadır. Bu Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (HAD) programında süreklilik, momentum ve enerji denklemleri sonlu hacimler yöntemi ile ayrıklaştırılmaktadır (Fluent, 2006).

Bu bölümde, pulsatif jet çarpması ile sabit ısı akısına sahip (dairesele düz levha) hedef yüzeyden bir çevrim boyunca olan ısı geçişi sayısal olarak incelenmektedir. Normalde üç boyutlu olan problem, eksenel simetriden dolayı sayısal çözümde iki boyutlu olarak incelenmiştir. Yapılan incelemelerde, ısı geçiş mekanizmasının açıklanması için çözüm alanı içerisinde çevrimi ifade eden anlık hız ve sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Sayısal çözümden elde edilen sonuçlarla, deneylerde bulunan sonuçlar karşılaştırılarak çözümün doğruluğu kontrol edilmiştir.

4.2 Çözüm Alanı ve Kullanılan Yöntem

Deneysel modele bağlı olarak belirlenen sayısal çözüm alanı, Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Problem, iki boyutlu olarak incelenmiştir ve hedef yüzey dairesel olduğundan eksenel simetri göz önüne alınarak iki boyutlu ve dairenin yarısına göre yine simetri mevcut olduğundan çözüm alanı olarak yarım dairelik kısım göz önüne alınmıştır. Çözüm alanındaki ağ yapısı, Şekil 4.1’de görülmektedir. Bu çalışmada, yeterince küçük ve çözüm alanının her tarafında homojen ağ yapısı kullanılmaktadır. Çözüm alanının çizilmesi ve hücrelere bölünmesi (meshleme), bir model hazırlama programı olan Gambit yazılımı ile yapılmıştır. Çözüm alanına hücre yerleştirilmesinin uygunluğunu kontrol etmek için bazı kriterler bulunmaktadır. Bunlar arasında en önemlileri, hücrelerin en-boy oranı, komşu hücrelerin kenar uzunlukları arasındaki oran (successive ratio), hücrelerin kare şekline olan yakınlıkları (skewness) şeklinde sıralanabilmektedir. Türev terimlerinin lineerleştirilebilmesi için hücre boyutunun belirli bir büyüklüğün altında olması gerekmektedir. Bu büyüklük geometriye ve akışa bağlı olup, genel olarak akışla ilgili özelliklerin

gradyenleriyle ilişkilidir. Örneğin, sınır tabakadaki grid büyüklüğünün bu geçişi yakalayabilecek kadar küçük, bir başka deyişle sınır tabaka kalınlığının altında olması gerekmektedir. Bu sebeple, bu çalışmada çözüm alanının tamamı düzgün dağılımlı olarak sınır tabakadaki değişimleri gösterecek kadar küçük hücrelere bölünmüş olup üniform bir ağ (grid) yapısı kullanılmıştır. Grid bağımsızlığının sağlanabilmesi için, çözümün hücre genişliğine bağımlılığı adıyla bilinen ayrı bir çalışma gereklidir. Bu çözümde 10.000 ile 50.000 aralığında ağ sayısı için ön çalışmalar yapılmış olup, 30.000 gridin üzerinde Nu sayılarında % 2'nin altında bir sapma olduğu görülerek çalışmalar 35.000 grid için yapılmıştır. Bu çalışmada, akışın olduğu tüm bölgelerde homojen kare ağ yapısı kullanılmış olup akış alanını analiz edebilecek kadar küçük ağ aralığı seçilmiştir.



Şekil 4.1: Geometrik büyüklükler, ağ yapısı ve sayısal çözüm alanı.

Sayısal çözümlerde, ayrık çözüm algoritması kullanılmaktadır. Basınç ve hız arasındaki ilişki SIMPLE algoritması ile ele alınmaktadır. Basınç ve momentum ifadeleri, ikinci dereceden ileri fark denklemleri ile ayrıklaştırılmaktadır. Denklem setinin çözümünde, ardışık iki iterasyon arasındaki bağıl hatanın azalmasıyla birlikte çözümler yakınsamaktadır. Bu çalışmada, yakınsama kriteri olarak enerji denklemi için 10^{-9} , kütle ve momentum denklemleri için ise 10^{-6} değeri alınmaktadır. Sayısal çözüm $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılarak yapılmaktadır. Bu model için standart duvar fonksiyonları kabul edilmiştir.

4.3 Matematik Model

Bir piston-silindir düzeneği ile sinüzoidal olarak hareket ettirilen, pulsatif çarpan jetin periyodik hız değişimlerine maruz, sıkıştırılamaz, zamana bağlı türbülanslı akışı için, fiziksel özellikler sabit ve viskoz yayılım etkisi ihmal edilerek kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (4.2)$$

$$\rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (u_i T)}{\partial x_i} \right] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho c_p \overline{u'_i T'} \right) \quad (4.3)$$

Burada u , v sırasıyla x , y yönündeki hız bileşenlerini göstermektedir. Sıcaklık T , ve dinamik basınç p ile gösterilmiştir. Isı yayılım katsayısı $\alpha = k/\rho c_p$, ve bu ifadedeki ρ , c_p , ve k sırayla yoğunluk, özgül ısı ve ısı iletim katsayısı, u' ve T' gibi terimler de türbülans gerilmelerini göstermektedir. Burada $Re_j = 15.500$ değerinde sabitlenmiş olup deneysel ölçmelerden alınan verilere göre hesaplanmıştır. Bu durumda akış türbülanslı olup, $k-\varepsilon$ türbülans modeli seçilmiştir. Bu model kompleks akış problemlerinde hızlı ve güvenli sonuçlar verdiği için tercih edilmiştir. Özellikle çarpan türbülanslı jet akışlarında bu modelin başarılı olduğu literatürde not edilmiştir (Xu vd., 2010a).

4.4 Sınır Şartları

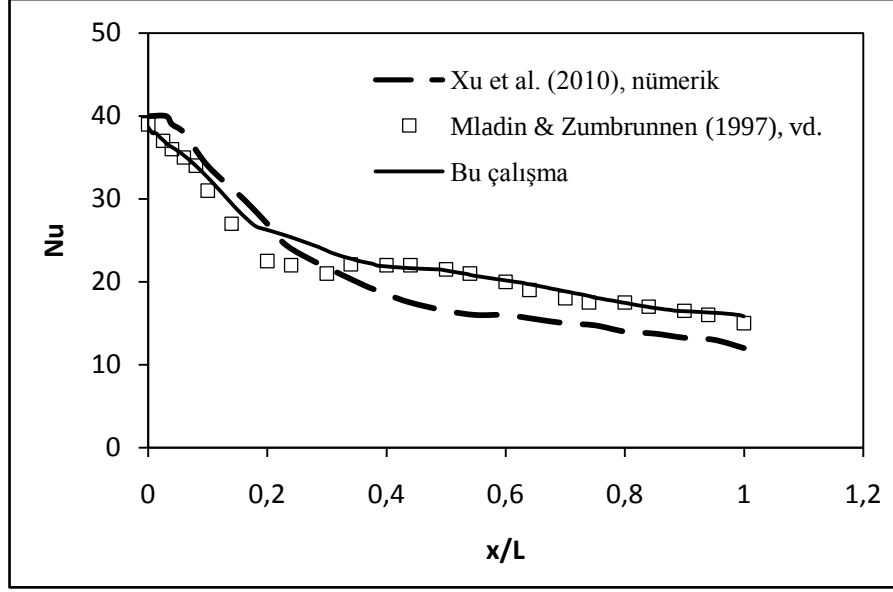
Sayısal çözüm için FLUENT paket programı kullanılmıştır. Jet girişinde “hız sınır şartı” verilmiştir. Hız fan çıkışında kullanılan swirl tip debi ölçer yardımıyla ölçülmüş olup jet çıkışında Tetso proba doğrulanmıştır. Çarpan levha yüzeyinden sabit ısı akısı sınır şartı uygulanmıştır. Jet (sınırlandırılmamış) serbest jet olup diğer kalan kısımlardan basınç çıkışı sınır şartı uygulanmıştır. Jet girişinde, sinüzoidal, zamana bağlı değişen hız profili aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$u = u_0 [1 + A_0 \sin(\omega t)] \quad (4.5)$$

Burada, A_0 boyutsuz genlik ve ω ise frekansı (açısal hızı) göstermektedir. Periyodik akış için türbülanslı kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri, sınır şartlarıyla birlikte yukarıda ifade edilmektedir. Bu çalışmada, momentum denklemleri ve enerji denklemi kısmi diferansiyel terimler içerdiği için ve hız alanı ile birlikte çözülmesi gerektiğinden analitik olarak çözülememektedir. Bu denklem sayısal olarak çözülmüş ve deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır.

Sayısal çalışmada, deneylerde kullanılan parametreleri en iyi ifade edecek şekilde kabuller yapılmaktadır. Deneylerde kullanılan değişken sayısının fazla olmasından dolayı, sayısal çözümde zaman kazanmak için bu durumu en iyi ifade edebilecek sınırlı sayıda deney için sayısal çözümler yapılmıştır. Problemden kullanılan ağ sayısının fazla olması, zamana bağlı çözümlerde yakınsama problemleri nedeniyle düşük zaman adımlarının seçilmesiyle çözüm zamanının uzun süre almasından (hesaplama maliyetinden) dolayı bu yola başvurulmaktadır.

Sayısal çözümün doğruluğunun sağlanması için literatürde bulunan çalışmalarla karşılaştırmalar yapılmıştır. Daha sonra çözümün doğruluğu deneysel sonuçlarla doğrulanarak çözümler yapılmıştır. İlk olarak sayısal çözümler benzer şartlarda aynı türbülans yöntemini kullanan Xu vd., (2010a)'nin sayısal sonuçları ve Mladin ve Zumbrennen (1997)'nin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.2: Sayısal çalışmanın literatürdeki çalışmalarla doğrulanması ($Re_j = 5000$, $H/D = 5$, $A_o = 0.5$, $Wo = 100$).

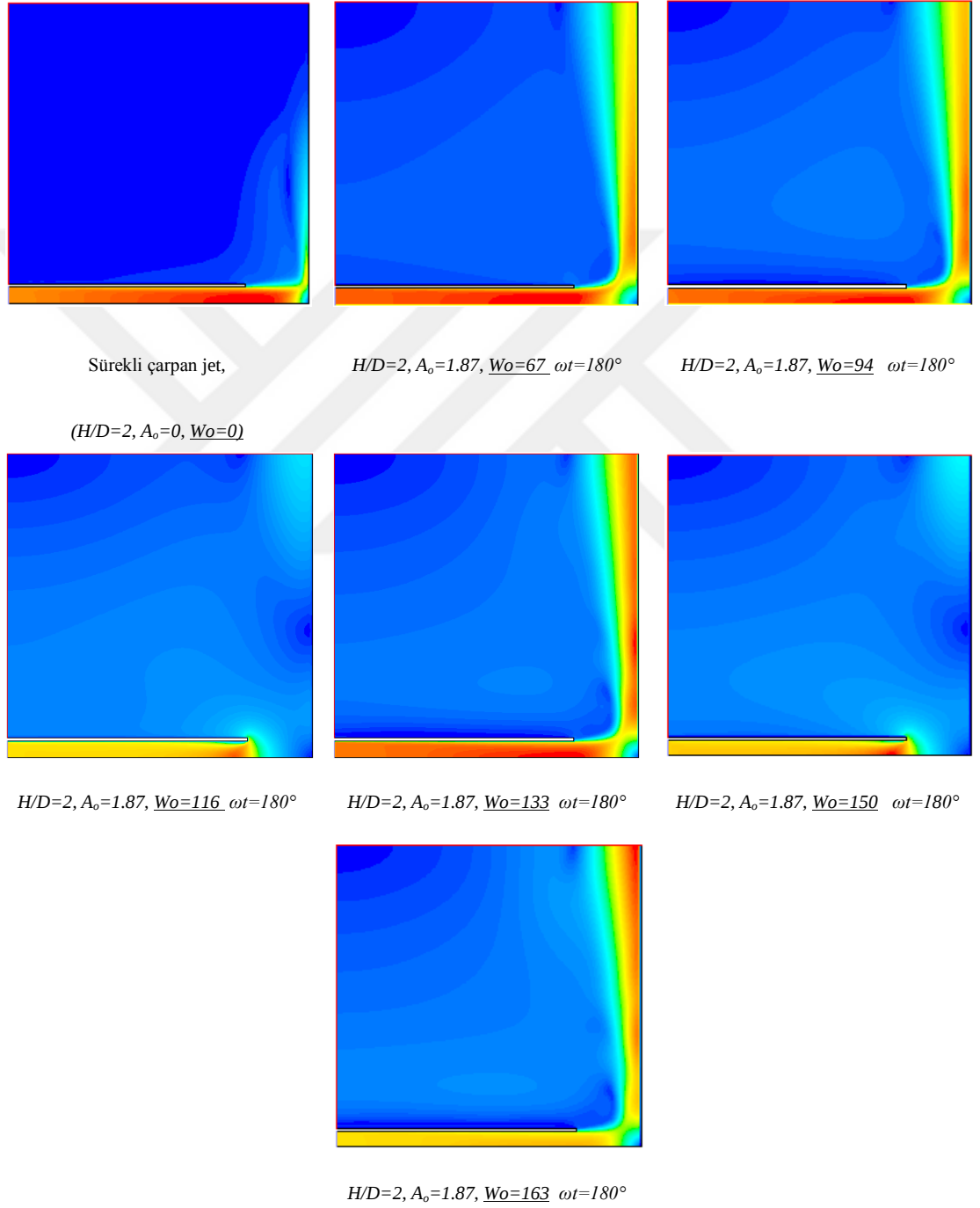
Şekil 4.2’de görüldüğü gibi sayısal çözüm literatürde bulunan çalışmalarla iyi bir uyum sağlamaktadır. Bu da sayısal çözümün doğruluğunu göstermektedir. Bu bölümde zamana bağlı hız profilinin sınır tabakada meydana getirdiği değişim ve dolayısıyla ısı transferine etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Hız profilindeki pulsatif bileşenden dolayı hedef yüzey üzerinde periyodik bir değişim olmakta, bu durumda ısı geçişide periyodik olarak gerçekleşmektedir.

4.5 Sayısal Çözümün Değerlendirilmesi

Bu kısımda, hedef yüzeyi en iyi soğutmak için, pulsatif çarpan jet etkisinin fiziksel mekanizmasını açıklamak üzere belirlenen parametrelerin etkisi analiz edilmektedir. Sayısal çalışmada, Prandtl sayısı, jet Reynolds sayısı ve H/D oranı sabit tutularak, pulsatif çarpan jet parametreleri olan genlik ve frekansın etkisi araştırılmıştır. Pulsatif çarpan jet parametrelerinin ısı geçişi üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Hedef yüzey üzerinde çarpan jetten dolayı periyodik bir akış alanı oluştuğundan ısı transferide periyodik olarak değişmektedir. Bu nedenle, ısı transferi hesabında bir çevrim boyunca geçen ısı esas alınmaktadır. Çevrim boyunca gerçekleşen mekanizmayı açıklamak için faz açıları kullanılmaktadır. Bu faz açıları ωt ile ifade edilmektedir. Bir çevrim $\tau = \omega t = 2\pi$ radyan veya 360 derece olarak ifade edilmektedir. Sayısal sonuçların analizinde, başlangıç (geçiş) şartlarından kurtulmak

için sistemin kendi içinde periyodik olması beklenmektedir. Bunun için yeterince uzun zaman diliminden sonra ($t = 3600$ sn) bir çevrimi ifade edecek çözümler yapılmakta ve sonuçlar analiz edilmektedir.

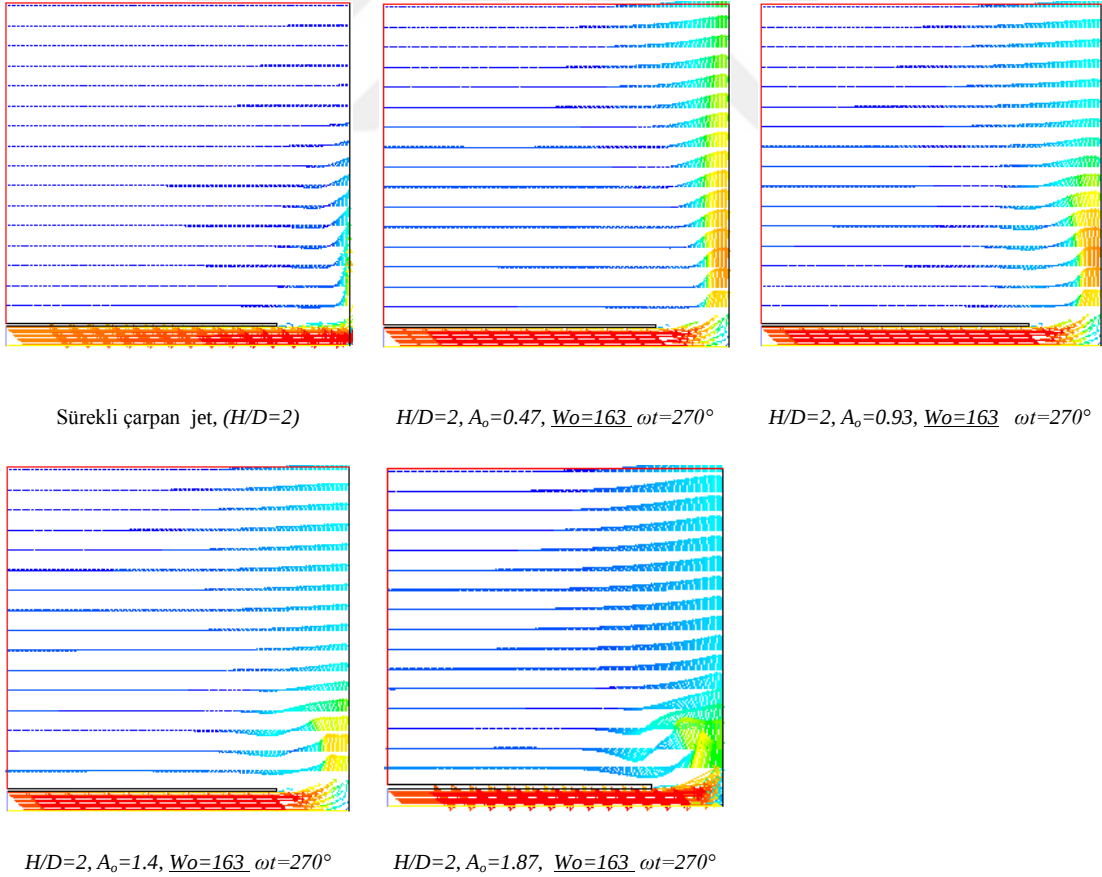
Şekil 4.3’de, $H/D = 2$ oranında sabit genlik ve faz açısı için farklı frekanslarda elde edilen akış alanındaki anlık hız dağılımının sayısal görüntüleri verilmiştir. Her durum



Şekil 4.3: Sabit genlik ve faz açısı için frekanslara göre hız konturlarının değişimi.

da durma noktasına göre tanımlanan eksene göre simetrik bir durum söz konusudur. Şekilde, karşılaştırma yapabilmek için sürekli çarpan jet ($A_0 = 0$, $Wo = 0$) için elde edilen hız dağılımı da verilmiştir. Sürekli çarpan jet için verilen durumda, stabil ve zamanla değişmeyen bir hız profili gözlenmektedir. Pulsatif çarpan jet için, sabit genlik ve faz açısında farklı frekanslar için hız profilleri her bir frekans için ayrı ayrı verilmiştir. Pulsatif çarpan jet durumunda frekansa bağlı olarak hedef yüzey boyunca sınır tabakadaki hız profilleri görülmekte, bu hız profillerinin frekansa göre değiştiği gözlenmektedir. Artan frekansla birlikte sınır tabaka kalınlığının azaldığı şekillere bakarak söylenebilir. Artan genlik ve frekanslarda sınır tabaka incelmekte ve konvektif etki artmaktadır. Bu durum yüzeyden olan ısı transferinin artışına sebep olmaktadır.

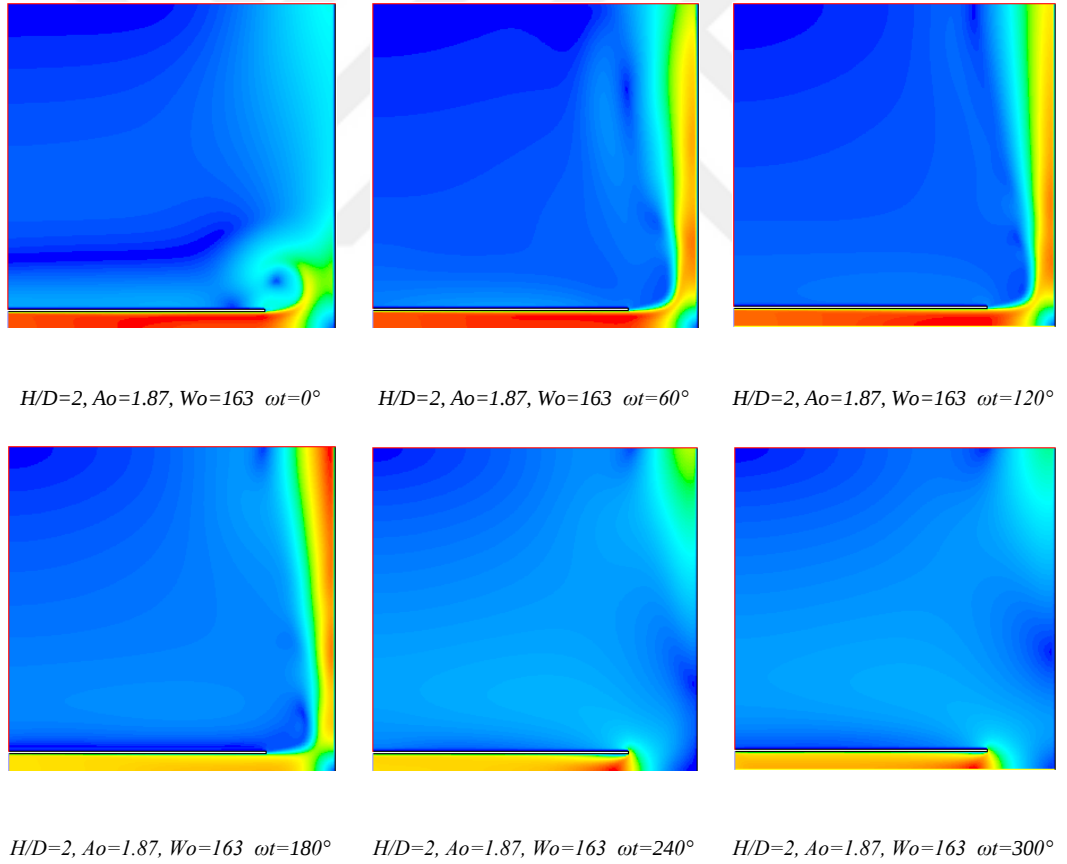
Şekil 4.4’de, dört farklı genlik (A_0), için sabit frekans ve sabit faz açılarında ($\omega t = 270^\circ$) elde edilen akış alanındaki hız dağılımlarının sayısal görüntüleri verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi genliğin artmasıyla birlikte pulsatif çarpan



Şekil 4.4: Sabit frekans ve faz açısı için genliğe göre hız profili değişimi.

jet etkisinin de arttığı görülmektedir. Özellikle durma noktası civarındaki sınır tabakanın hızla dağıldığı ve levha çıkışına doğru sürüklendiği görülmektedir. Daha büyük genlik, akış alanında daha büyük süpürmeye, çalkantıya ve akış karışmasına sebep olmaktadır. Büyük genlik değeri sınır tabaka üzerinde daha güçlü bir yıkıcı etki yaratmaktadır. Bu da sınır tabakanın hızla dağılması ve yenilenmesi anlamına gelmektedir ki, bu durumda ısı transferide önemli ölçüde artmaktadır.

Sayısal çözümde elde edilen bir çevrim boyunca akış alanındaki hız değişimi, sabit genlik ve frekans için Şekil 4.5’de verilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre en iyi performansı sağlayan genlik ve frekanslar için sayısal çözümler yapılmıştır. Burada en yüksek genlik ve frekans da yüksek ısı geçiş performansı sağlandığı için, bu parametrelere ait bir çevrimi temsil eden faz açılarında hız konturları verilmiştir.

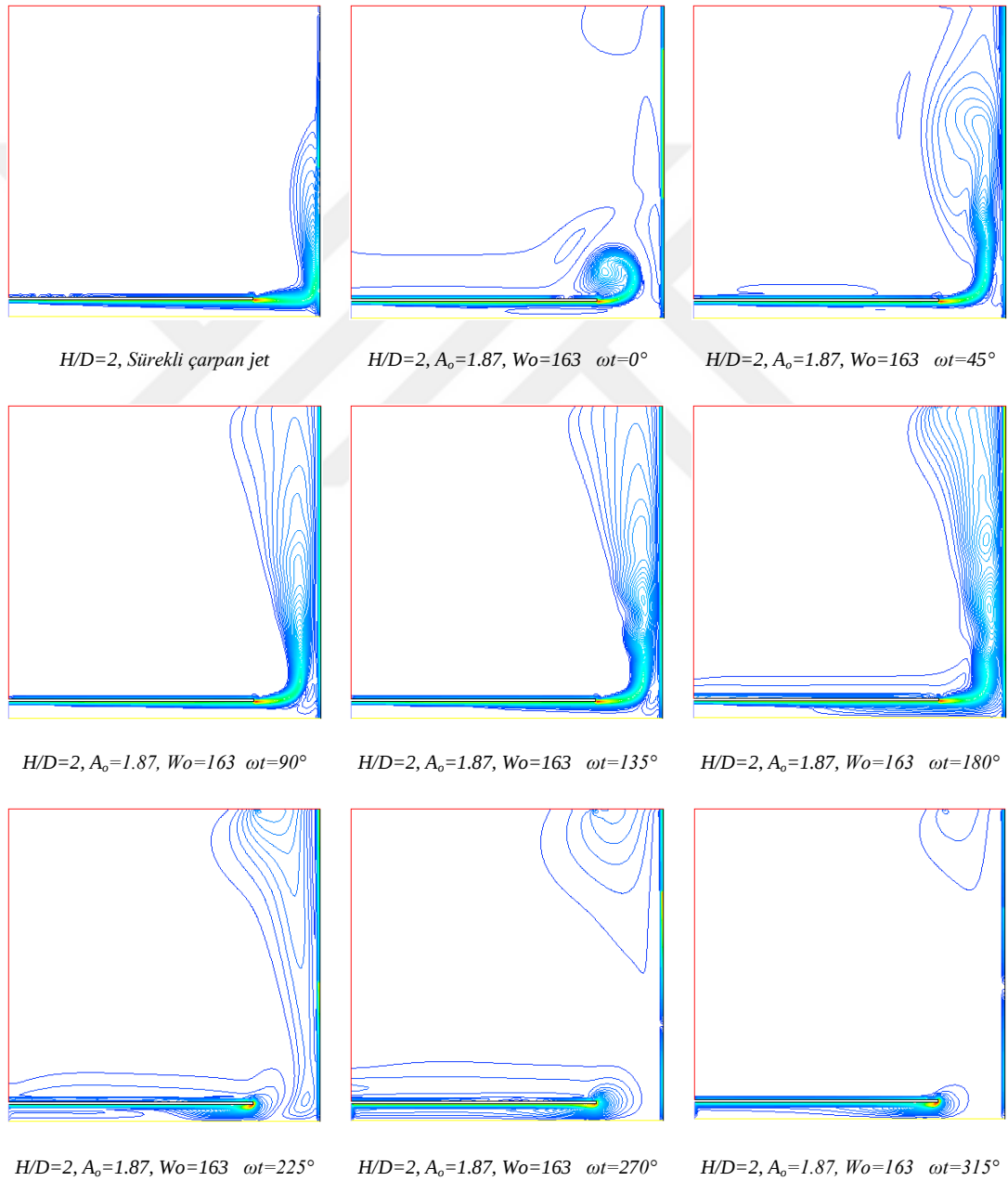


Şekil 4.5: Sabit genlik ve frekans için bir çevrim boyunca hız profillerinin değişimi.

Hız konturlarından, pulsatif akış sayesinde hız alanında meydana gelen değişiklikler açıkça görülmektedir. Çevrim esnasında sinüzoidal olarak hızlanıp tekrar yavaşlayan

jet, hedef yüzey üzerinde sürekli rejimde sabit olan sınır tabakayı hızla bozmakta, sınır tabakadaki sıcak akışkan bölgeleri hızla dağılmakta ve periyodik olarak yenilenmektedir. Bu durum ısı transferinde kayda değer bir iyileşme sağlamaktadır. Çevrimlerde genlik ve frekans arttıkça bu yenilenme sayısı da arttığı için ısı transferinde artmaktadır. Sonuç olarak pulsatif jet çarpmasının, sürekli jet çarpmasına göre ısı transferini artırmakta etkili bir yöntem olduğu söylenebilir.

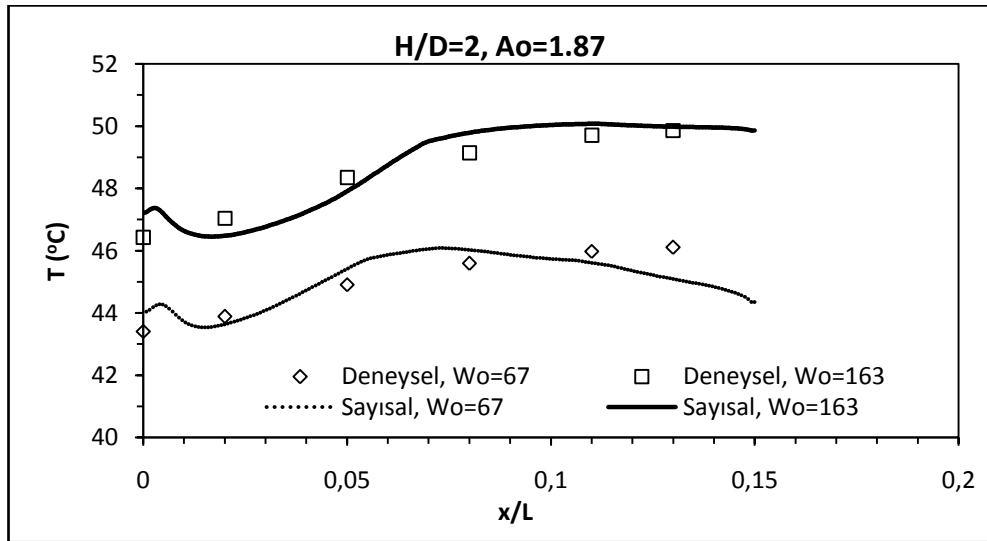
Şekil 4.6’da bir çevrim boyunca hedef yüzey üzerinde, girdap dağılımı verilmiştir.



Şekil 4.6: Bir çevrim boyunca çeşitli faz açılarında akış alanında girdap dağılımı.

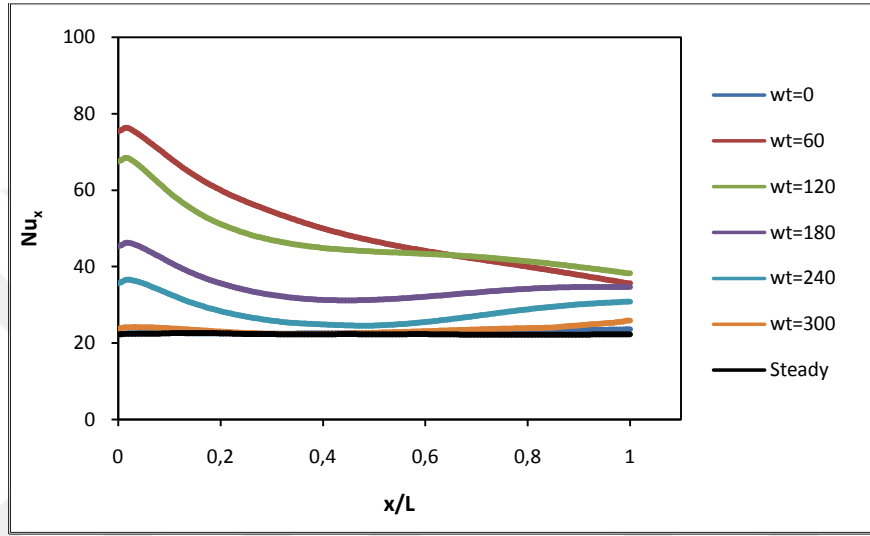
Girdap oluşumu ve sürüklenmesi ile ısı transferi arasında doğrudan bir ilişki vardır. Girdap oluşum frekansının sıklığı ve yüzey üzerindeki etkileşimi ısı transferini artıran bir durumdur. Şekillere bakıldığında, başlangıçta jet çıkışında oluşan girdaplar hedef yüzey üzerinde hızla taşınmakta, sıcak olan yüzey üzerindeki akışkan ile serbest bölgede ve daha soğuk olan akışkanla karışmasını tetiklemektedir. Bu durum ısı transferinin iyileşmesine neden olmaktadır. Sayısal çözümler sayesinde ısı transferi mekanizması açık bir şekilde gözlenmektedir. Sürekli çarpan jet için verilen şekil ile pulsatif akış durumu karşılaştırıldığında çok açık bir şekilde pulsatif etkinin rolü görülmektedir.

Sayısal çalışma ile deneysel çalışmanın karşılaştırılması amacıyla, hedef yüzey boyunca elde edilen ortalama sıcaklık değişimleri iki farklı frekans için Şekil 4.7’de verilmiştir. Burada deneysel çalışmada, yüzey boyunca konumlandırılan her bir termoelemanın alınan sıcaklıkların ortalamaları alınmış olup, ortalama sıcaklıklar kullanılarak durma noktasından başlamak üzere hedef yüzey boyunca sıcaklık değişimleri elde edilmiştir. Benzer yöntem sayısal çözüm içinde kullanılarak, ortalama yüzey sıcaklıkları elde edilmiş olup, elde edilen sıcaklıkların aynı şartlar için karşılaştırması Şekil 4.7’de verilmiştir. Sayısal çözümün, problemi başarılı bir şekilde modellediği söylenebilir. Deneysel ve sayısal sonuçların iyi bir uyum sağladığı şekilde görülmektedir. Burada şekil üzerinde karmaşa olmasının diye belirtilen genlik ve H/D oranı için en düşük ve en yüksek frekanslardaki ortalama yüzey sıcaklıkları alınmıştır.



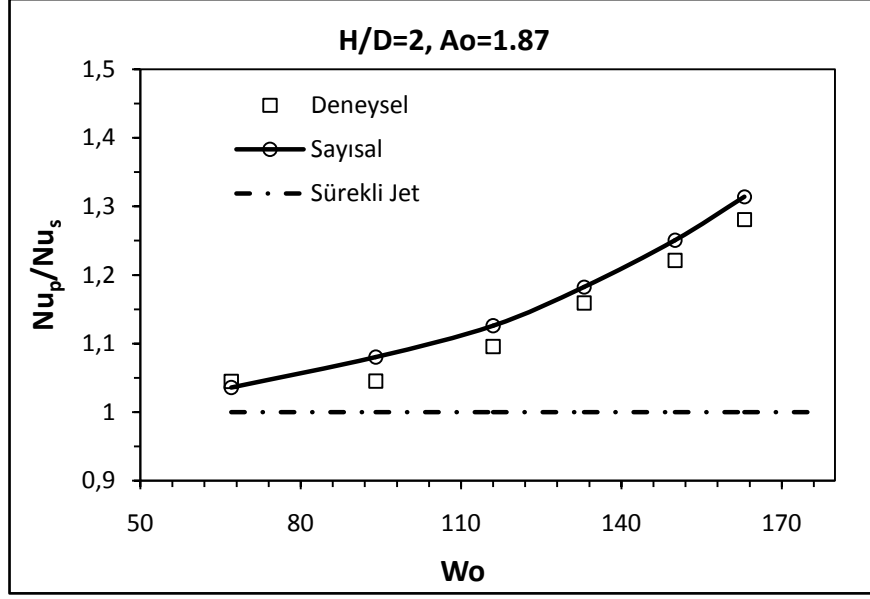
Şekil 4.7: Ortalama yüzey sıcaklıklarının yüzey boyunca değişimi.

Sayısal çözüm için deneysel çalışmalara benzer şekilde ısı geçişi hesabı yapılmış ve belirlenen H/D oranında, genlik ve frekans değişimine göre Nu sayıları hesaplanmıştır. Şekil 4.8’de levha boyunca bir çevrimi ifade eden farklı faz açılarında anlık Nu sayıları hesaplanmış ve levha boyunca değişimleri gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi yerel Nu sayısı her zaman diliminde farklı bir değişim göstermektedir. Ortalama Nusselt sayılarının hesabında bunların ortalaması alınarak belirlenen parametreler için ortalama değerler bulunmaktadır.



Şekil 4.8: Yerel Nu sayısının faz açıları ile değişimi ($H/D=2$, $A_0=1.4$, $Wo=163$).

Sayısal çalışmada daha önce bahsedildiği gibi, zaman adımının çok küçük olması ve ağ sayısının çok fazla olmasından dolayı çözüm zamanı çok uzadığı için, deneysel çalışmada en iyi performansın elde edildiği parametrelere uygun olarak seçilen bir deney grubunu ifade edecek şekilde çözümler yapılmıştır. En iyi performansın elde edildiği yüksek genlik ve bu genliğe ait tüm frekansları içeren sonuçlar, deneysel sonuçlarla birlikte Şekil 4.9’da verilmiştir. Şekildende görüldüğü gibi, deneysel sonuçlarla sayısal sonuçların iyi bir uyum sağladığı görülmektedir. Sonuçlar arasındaki çok küçük farkların deneysel çalışmadaki ölçme hatalarından kaynakladığı öngörülmektedir. Genel olarak elde edilen sonuçlardan, pulsatif çarpan jetin ısı transferini, sürekli çarpan jete göre yaklaşık % 30 daha iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, sabit $H/D = 2$ oranı için yüksek frekans ($Wo = 163$) ve yüksek genlikte ($A_0 = 1.87$) pulsatif çarpan jetin ısı transferini en iyi yaptığı durum elde edilmiştir. Isı transferi iyileştirme faktörünün artan genlik ve frekansla birlikte arttığı gözlemlenmiştir. Deneyler deney setinin izin verdiği ölçüde



Şekil 4.9: Isı transferi iyileştirme faktörünün pulsatif parametrelerle değişimi.

gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan daha yüksek frekanslarda daha yüksek ısı transferinin elde edilebileceğini göstermektedir. Ancak bu çalışmada deney düzeneği izin vermediği için daha yüksek frekanslara çıkılamamıştır. Diğer taraftan pulsatif bir jetin ısı transferi karakteristiği, titreşim genliği ve frekansının güçlü bir fonksiyonudur. Bu davranış, hidrodinamik sınır tabaka kalınlığındaki değişikliklerle ilgili olarak açıklanmıştır. Bununla birlikte, ısı transferindeki artışın genliğe göre daha fazla hassas olduğuna dikkat edilmelidir, çünkü yüksek genlik akışta konvektif etkiyi artırır ve çok yüksek ısı transferi sağlanır. Genlik, zamana bağlı hidrodinamik ve ısıl sınır tabaka gelişiminde güçlü bir etkiye sahiptir. Sonuç olarak çarpan jet uygulamalarında ısı transferini artırmak için pulsatif çarpan jetin çok güçlü bir araç olduğu, aktif ısı transferi uygulaması olarak birçok soğutma uygulamasında başarıyla kullanılabileceği tavsiye edilebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, sabit ısı akısına sahip dairesel düz levha yüzeyinin türbülanslı pulsatif çarpan jetle soğutma karakteristiği deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Aksaray Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan deney düzeneği vasıtasıyla, belirlenen jet parametreleri için hız ve sıcaklık ölçümleri yapılmış olup, her bir parametre için yüzeyden ısı geçişinin göstergesi olan Nu_p/Nu_s şeklinde ısı transfer etkinliği hesaplanmıştır. Pulsatif çarpan jetle yüzey soğutulduğu için hedef yüzey üzerinde periyodik akış alanı oluşmakta, bundan dolayı ısı geçişi de periyodik olarak gerçekleşmektedir. Isı geçişi hesaplamalarında bir çevrim esas alınarak, çevrim boyunca olan ısı geçişi bulunmaktadır. Deneylerde öncelikle, sürekli çarpan jet durumunda, üç farklı H/D oranı için yüzeyden ısı geçişi bulunmuş ve yaygın literatürle karşılaştırılmış olup, sıcaklık ölçümlerinin doğruluğu sağlanmıştır. Daha sonra bir piston-silindir düzeneği ve yüksek basınçlı fan vasıtasıyla oluşturulan pulsatif çarpan jet durumu için deneyler yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda, ortalama jet hızı sabit tutularak ana parametre olarak H/D oranları değiştirilmiştir. Bu çalışmada, $H/D = 2, 4$ ve 6 olmak üzere üç farklı H/D oranı için deneyler tekrarlanmıştır. Deneylerde, Pr ($Pr = 0.71$) sayısı sabit tutulmuştur. Her bir H/D oranı için genlik 4 defa ve frekansta 6 defa değiştirilmiş olup toplamda 72 adet deney yapılmıştır. Elde edilen ortalama Nu sayıları boyutsuz parametreler cinsinden verilmiştir.

Deneysel çalışmalar esas alınarak problem sayısal olarak da incelenmiştir. Sayısal çözümler, sonlu hacimler yöntemiyle çözüm yapan FLUENT paket programı kullanılarak yapılmıştır. Sayısal çözüm, ağ sayısının fazlalığı ve zaman adımının küçük seçilmesinden dolayı çözüm zamanı çok uzadığından sınırlı sayıda deney için yapılmıştır. Sayısal çözümler değerlendirilirken deneysel çalışmada olduğu gibi çevrim boyunca geçen ısı miktarı göz önüne alınmıştır. Problem kendi içerisinde periyodik olduğundan, öncelikle başlangıç hali etkilerinden uzaklaşmak için belirli bir zamandan sonra çözümler yapılmış (3600 sn.) ve daha sonra bir çevrimi ifade edecek şekilde yeniden çalıştırılmıştır. Çevrim boyunca her bir faz açısı için anlık sıcaklık ve hız dağılımları elde edilerek, ısı geçişi için detaylı analiz yapma imkânı elde edilmiştir. Sıcaklık ve hız alanındaki değişiklikler, belirli faz açılarında elde edilerek ısı geçiş mekanizması yorumlanmıştır. Pulsatif çarpan jetin hedef yüzeyde

akış yapısını etkili bir şekilde değiştirdiği, sınır tabaka yapısı üzerinde yıkıcı bir etki gösterdiği ve sınır tabakayı çevrim boyunca periyodik olarak yenilediği, anlaşılmıştır. Bu sayede de, ısı geçişinin iyileştiği gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak $H/D = 2$ için yani jetin hedef yüzeye en yakın olduğu durumda, yüksek genlikte ve yüksek frekansta ısı geçişinin en iyi olduğu durum belirlenmiştir. Pulsatif çarpan jetin ısı transferini iyileştirmede önemli bir araç olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada seçilen parametreler deney düzeneğinin izin verdiği ölçüde değiştirilmiştir. Bundan sonra yapılacak çalışmalar için daha yüksek genlik ve yüksek frekanslarda ısı geçişi araştırılabilir, bir optimum frekansın olup olmadığı belirlenebilir. Ayrıca bu çalışmada sabit tutulan jet Reynolds sayısı değiştirilerek bu parametrenin etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Akalanne, L.C. ve MacGregor, S.A., 2011. The effect of pulsating and streamwise flow on the heat transfer of an obstacle. *Experimental Heat Transfer*, 24:1-14.
- Alimohammadi, S., Murray, D.B. ve Persoons, T., 2015. On the numerical-experimental analysis and scaling of convective heat transfer to pulsating impinging jets , *International Journal of Thermal Sciences* 98: 296-311.
- Azevedo, L.F.A., Webb, B.W. ve Queiroz, M., 1994. Pulsed air jet impingement heat transfer, *Experimental Thermal Fluid Sci.*, 8, 206-213.
- Beitelmal, A. H., Saad, M. A. ve Patel, C. D., 2000. The effect of inclination on the heat transfer between a flat surface and an impinging two-dimensional air jet, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 21:156-163.
- Bovo, M. ve Davidson, L., 2015. Direct comparison of LES and experiment of a single-pulse impinging jet, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 88: 102–110.
- Buddhika, N. Hewakandamby, 2009. A numerical study of heat transfer performance of oscillatory impinging jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52: 396–406.
- Çelik, N., 2011. Effects of the surface roughness on heat transfer of perpendicularly impinging co-axial jet, *Heat and Mass Transfer*, 47, 10, 1209-1217.
- Chang, S.W., Yang, T.L. ve Shih, D.W., 2009. Jet-array impingement heat transfer in a concentric annular channel with rotating inner cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52: 1254–1267.
- Chiriac, V. A. ve Ortega, A., 2002. A numerical study of the unsteady flow and heat transfer in a transitional confined slot jet impinging on an isothermal surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45: 1237-1248.

- Chung, Y. M, Luo, K. H. ve Sandham, N. D., 2002. Numerical study of momentum and heat transfer in unsteady impinging jets, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 23: 592-600.
- Demircan, T. ve Türkoğlu, H., 2007. Bir yüzeye çarpan osilasyonlu iki boyutlu dikdörtgen hava jetinin sayısal olarak incelenmesi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 27: 39-50.
- Demircan, T. ve Türkoğlu, H., 2010. The Numerical Analysis of Oscillating Rectangular Impinging Jets, *Numerical Heat Transfer, Part A*, 58: 146–161.
- Dutta, R., Dewan, A. ve Srinivasan, B., 2013. Comparison of various integration to wall (ITW) RANS models for predicting turbulent slot jet impingement heat transfer, , *International Journal of Heat and Mass Transfer* 65: 750–764.
- El-Gabry, L.A. ve Kaminski, D.A., 2005. Experimental investigation of local heat transfer distribution on smooth and roughened surfaces under an array of angled impinging jets. *J Turbomachinery* 127: 532–544.
- Esmailpour, K., Hosseinalipour, M., Bozorgmehr, B. ve Mujumdar, A. S., 2015. A numerical study of heat transfer in a turbulent pulsating impinging jet. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 93: 959–969. Volume 93, Issue 5, pages 959–969.
- Fluent 6.3. FLUENT user's guide. Fluent, Inc., Lebanon, NH. 03766, USA, 2006.
- Gori, F. ve Petracci, I., 2015. Influence of screen solidity ratio on heat transfer upon a cylinder impinged by a rectangular jet, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 81, Pages 19–27.
- Hewakandamby, B.N., 2009. A numerical study of heat transfer performance of oscillatory impinging jets *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52: 396–406.
- Hofmann, H.M., Kaiser, R., Kind, M. ve Martin, H., 2007a. Calculations of steady and pulsating impinging jets- An assessment of 13 widely used turbulence models, *Numerical Heat Transfer, Part B*, 51: 565-583.

- Hofmann, H.M., Movileanu, D.L., Kind, M. ve Martin, H., 2007b. Influence of a pulsation on heat transfer and flow structure in submerged impinging jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50: 3638-3648, II.
- Holman, J.P., 2001. *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill, New York.
- Hu, D., Li, X., Tang, C.L. ve Kang, Y., 2015. Analytical and experimental investigations of the pulsed air–water jet, *Journal of Fluids and Structures*, 54: 88–102.
- Jafari, M., Farhadi, M. ve Sedighi, K., 2013. Pulsating flow effects on convection heat transfer in a corrugate channel: A LBM approach, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 45: 146-154.
- Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M.A. ve Button, B.L., 1992. A review of heat transfer data for single circular jet impingement. *Int J Heat Fluid Flow*, 13:106–115.
- Kataoka, K., Suguro, M., Degawa, H., Maruo, K. ve Mihata, I., 1987. The effect of surface renewal due to largescale eddies on jet impingement heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 30: 559-567.
- Kim, D., 2012. A numerical study on heat transfer in laminar pulsed slot jets impinging on a surface, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol:6.
- Klein, D. ve Hetsroni, G., 2012. Enhancement of heat transfer coefficients by actuation against an impinging jet, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 55, Issues 15–16, Pages 4183–4194.
- Lee, C.S., Shih, T. I-P., Bryden, K. M., Ames, R. ve Dennis, R. A., 2012. Flow and Heat Transfer in a Jet-Impingement Configuration With No Cross Flows About Impinging Jets, pp. 785-792, 8 pages. *ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*, doi:10.1115/GT2012-70080.

- Lee, J. ve Lee, S.J., 2000. The effect of nozzle aspect ratio on stagnation region heat transfer characteristics of elliptic impinging jet, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43: 555-575.
- Liewkongsataporn, W., Patterson, T. ve Ahrens Et. F., 2008. Pulsating jet impingement heat transfer enhancement, *Drying Technology: An International Journal*, 26:4, 433-442.
- Marcum, W.R., Cadell, S.R. ve Ward, C., 2015. The effect of jet location and duty cycle on the fluid mechanics of an unconfined free jet and its heat transfer on an impinging plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 88, Pages 470–480.
- Mladin, EC ve Zumbrunnen, DA., 1997. Local convective heat transfer to submerged pulsating jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40: 3305-3321.
- Mohammadpour, J., Zargarabadi, M.R., Mujumdar, A.S. ve Ahmadi, H., 2014a. Effect of intermittent and sinusoidal pulsed flows on impingement heat transfer from a concave surface, *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 76, Pages 118–127.
- Mohammadpour, J., Zolfagharian, M.M., Mujumdar, A.S., Zargarabadi, M.R. ve Abdulahzadeh, M., 2014b. Heat transfer under composite arrangement of pulsed and steady turbulent submerged multiple jets impinging on a flat surface *International Journal of Thermal Sciences* 86: 139-147.
- Öztop, H.F., Varol, Y., Koca, A., Firat, M., Turan, B. ve Metin, İ., 2011. Experimental investigation of cooling of heated circular disk using inclined circular jet, , *International Communications in Heat and Mass Transfer* 38: 990-1001.
- Pakhomov, M.A. ve Terekhov, V.I., 2015. Numerical study of fluid flow and heat transfer characteristics in an intermittent turbulent impinging round jet , *International Journal of Thermal Sciences* 87: 85-93.

- Pavlova, A. ve Amitay, M., 2006. Electronic cooling using synthetic jet impingement, *ASME J. Heat Transfer* 128: 897–907.
- Poh, HJ., Kumar, K. ve Mujumdar, AS., 2005. Heat transfer from a pulsed laminar impinging jet, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 32:1317–1324.
- Sailor, DJ., Rohli, DJ. ve Fu, Q., 1999. Effect of variable duty cycle flow pulsations on heat transfer enhancement for an impinging air jet, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 20: 574-580.
- Selimefendigil, F. ve Öztop, H.F., 2014. Pulsating nanofluids jet impingement cooling of a heated horizontal surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 69, Pages 54–65
- Sheriff, H.S. ve Zumbrennen, D.A., 1994. Effect of Flow Pulsations on the Cooling Effectiveness of an Impinging Jet, *J Heat Transf.*, 116, 4, 886-895.
- Shi, Z., Li, W., Du, K., Liu, H. ve Wang, F., 2015. Experimental study of mixing enhancement of viscous liquids in confined impinging jets reactor at low jet Reynolds numbers, *Chemical Engineering Science*, 138: 216–226.
- Smith, B.L. ve Swift, G.W., 2003. A comparison between synthetic jets and continuous jets, *Exp. Fluids*, 34, 467–472.
- Tesař, V., 2013. Flow pulsation in the near-wall layer of impinging jets, *EPJ Web of Conferences* 45, 01129 , <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20134501129> , Number of pages 12, Article Number, 01129,
- Tesař, V., 2015. Impinging Jets, *Fluid Mechanics and Its Applications*, Volume 111, pp 191-231, Date: 27 March.
- Travnic̆ek, Z. ve Vit, T., 2015. Impingement heat/mass transfer to hybrid synthetic jets and other reversible pulsating jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 85: 473–487.

- Trávníček, Z., Dancová, P., Kordík, J., Vít, T. ve Pavelka, M., 2010. Heat and mass transfer caused by a laminar channel flow equipped with a synthetic jet array, in: Proceedings of the IHTC-14, Washington, DC, USA. 609–617.
- Xu, P., Mujumdar, A.S., Poh, H.J. ve Yu, B., 2010a. Heat transfer under a pulsed slot turbulent impinging jet a large temperature differences. Thermal Science, Vol 14, No.1, pp. 271-281,
- Xu, P., Yu, B., Qiu, S., Poh, H.J. ve Mujumdar, A.S., 2010b. Turbulent impinging jet heat transfer enhancement due to intermittent pulsation, International Journal of Thermal Sciences 49: 1247-1252.
- Xu, P., Qiu, S., Yu, M., Qiao, X. ve Mujumdar, A.S., 2012. A study on the heat and mass transfer properties of multiple pulsating impinging jets. International Communications in Heat and Mass Transfer 39: 378-382.
- Yang, L., Li, Y., Ligrani, P.M., Ren, J. ve Jiang, H., 2015. Unsteady heat transfer and flow structure of a row of laminar impingement jets, including vortex development International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 88, Pages 149–164.
- Zhou, J.W., Wang, Y.G. ve Geng, L.P. 2009. Effect of surface roughness on unsteady impinging jet heat transfer characteristics. J.Engineering Thermophysics 30: 687–690.
- Zumbrunnen, D.A. ve Aziz, M., 1993. Convective Heat Transfer Enhancement Due to Intermittency in an Impinging Jet, J. Heat Transf., 115, 1, 91-98.

EKLER

EK A DENEYSEL PARAMETRELER

EK B BOYUT ANALİZİ

EK C HATA ANALİZİ



EK A

DENEYSEL PARAMETRELER

Çizelge A.1: Deneysel çalışmalar için seçilen parametreler.

$H/D=2$	ω (rad/s)	π	2π	3π	4π	5π	6π
	$Wo \cong$	67	94	116	133	150	163
$x_m=280$	$A_0=1.87$	Deney-1	Deney-2	Deney-3	Deney-4	Deney-5	Deney-6
$x_m=210$	$A_0=1.4$	Deney-7	Deney-8	Deney-9	Deney-10	Deney-11	Deney-12
$x_m=140$	$A_0=0.93$	Deney-13	Deney-14	Deney-15	Deney-16	Deney-17	Deney-18
$x_m=70$	$A_0=0.47$	Deney-19	Deney-20	Deney-21	Deney-22	Deney-23	Deney-24

$H/D=4$	ω (rad/s)	π	2π	3π	4π	5π	6π
	$Wo \cong$	67	94	116	133	150	163
$x_m=280$	$A_0=1.87$	Deney-25	Deney-26	Deney-27	Deney-28	Deney-29	Deney-30
$x_m=210$	$A_0=1.4$	Deney-31	Deney-32	Deney-33	Deney-34	Deney-35	Deney-36
$x_m=140$	$A_0=0.93$	Deney-37	Deney-38	Deney-39	Deney-40	Deney-41	Deney-42
$x_m=70$	$A_0=0.47$	Deney-43	Deney-44	Deney-45	Deney-46	Deney-47	Deney-48

$H/D=6$	ω (rad/s)	π	2π	3π	4π	5π	6π
	$Wo \cong$	67	94	116	133	150	163
$x_m=280$	$A_0=1.87$	Deney-49	Deney-50	Deney-51	Deney-52	Deney-53	Deney-54
$x_m=210$	$A_0=1.4$	Deney-55	Deney-56	Deney-57	Deney-58	Deney-59	Deney-60
$x_m=140$	$A_0=0.93$	Deney-61	Deney-62	Deney-63	Deney-64	Deney-65	Deney-66
$x_m=70$	$A_0=0.47$	Deney-67	Deney-68	Deney-69	Deney-70	Deney-71	Deney-72

EK B

BOYUT ANALİZİ

Pulsatif çarpan jetle uyarılmış düz levha (hedef yüzey) üzerine çarpan periyodik salınımlara sahip jet çarpması ile ısı geçişine etki eden parametreler,

$$h = (U_j, x_m, \omega, \rho, \mu, c_p, k, H, D, L)$$

olarak belirlenebilir. Bu parametrelerden yararlanarak sistematik yöntemle boyut analizi yapmak için, önce boyut matrisi oluşturulur.

Çizelge B.1: Boyut matrisi.

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}
	h	ω	c_p	x_m	μ	k	ρ	H	D	L	U_j
M	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
L	0	0	2	1	-1	1	-3	1	1	1	1
T	-3	-1	-2	0	-1	-3	0	0	0	0	-1
θ	-1	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0
Birim	W/m ² -K	1/s	J/kg-K	m	N-s/m ²	W/m-K	Kg/m ³	m/s	m	M	m/s
Boyut	MT ⁻³ θ ⁻¹	θ ⁻¹	L ² T ⁻² θ ⁻¹	L	ML ⁻¹ T ⁻¹	MLT ⁻³ θ ⁻¹	ML ⁻³	L	L	L	LT ⁻¹

Bu matrisin rankı $r = 4$ 'dür. Değişken parametre sayısı $n = 11$ 'dir.

Bu problemde, $(11 - 4 = 7)$ 7 adet bağımsız boyutsuz çarpan elde edilecektir. Herhangi bir boyutsuz çarpım;

$$\pi = M^0 L^0 T^0 \theta^0 = h^{k_1} \omega^{k_2} c_p^{k_3} x_m^{k_4} \rho^{k_5} H^{k_6} D^{k_7} L^{k_8} U_j^{k_9} \mu^{k_{10}} k_f^{k_{11}}$$

şeklinde olacağı için, her iki taraftaki temel boyutların üsleri birbirine eşit olacaktır. Boyut matrisi yardımıyla ikinci tarafın boyut ifadesi bulunup bu işlem yapılırsa,

$$M'nin \text{ üsleri için, } k_1 + k_5 + k_6 + k_7 = 0$$

$$L'nin \text{ üsleri için, } 2k_3 + k_4 - k_5 + k_6 - 3k_7 + k_8 + k_9 + k_{10} + k_{11} = 0$$

$$T'nin \text{ üsleri için, } -3k_1 - k_2 - 2k_3 - k_5 - 3k_6 - k_{11} = 0$$

$$\theta'nin \text{ üsleri için, } -k_1 - k_3 - k_6 = 0$$

şeklinde homojen ve lineer bir denklem sistemi elde edilir. Bu denklem sisteminde, daima temel büyüklük sayısı kadar denklem olacaktır. Oysa k değerlerinin sayısı değişken sayısı kadardır ve denklem sayısından fazladır. Bu durumda çözüm yöntemi gereği bazı k değerleri biliniyormuş gibi kabul edilecek ve diğer k değerleri bunların cinsinden bulunacaktır. Problemden $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7$, değerleri keyfi olarak seçilir ve diğer k değerleri bunların cinsinden elde edilirse, bilinen k değerleri, bilinmeyen k değerleri cinsinden ifade edilir ve toplam on bir adet denklem takımı elde edilir. Sayısal değerleri elde etmek için bilinen k değerlerine (0) ve (1) gibi basit değerler verilir ve denklem takımı çözülür, elde edilen k değerlerinden bir matris oluşturur. Buna, çözüm veya çözümler matrisi denir.

Bu durumda, aranan komple boyutsuz çarpım serisi aşağıdaki şekilde bulunur.

- $\pi_1 = \frac{hL}{k_f}$ Nu , Nusselt sayısı
- $\pi_2 = L\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}$ Wo , Womersley sayısı
- $\pi_3 = \frac{\mu C_p}{k_f}$ Pr , Prandtl sayısı
- $\pi_4 = \frac{x_m}{L}$ A_o , Boyutsuz genlik
- $\pi_5 = \frac{\rho_j U_j d_j}{\mu}$ Re_j , Jet Reynolds sayısı
- $\pi_6 = \frac{H}{D}$ Boyutsuz, jet ile hedef yüzey arasındaki mesafe
- $\pi_6 = \frac{L}{D}$ Levha uzunluğunun, jet çıkış çapına oranı

$$Nu = C(H/D, Re_j, Wo, A_o, Pr, L/D)$$

Burada, merteye analizi yapılırsa bazı boyutsuz çarpımların olaydaki etkisi ihmal edilebilir. Bu çalışmada, H/D , A_o ve Wo boyutsuz sayıları dikkate alınmıştır.

EK C

HATA ANALİZİ

Çizelge C.1: Deneyler için hata analiz hesabı.

Deney	ω	x_m	Wo	Ao	q (W/m ²)	WT _w	WT _∞	W _{Uj}	Nu,m	W _{Nu}	% Hata
H/D=2											
deney-1	3,14159	0,28	45,00	1,87	1200	0,3920	1,2	1,5	8052167,78	400293,74	4,97
deney-2	6,2832	0,28	64,00	1,87	1200	0,3920	1,2	1,5	7997592,62	394885,99	4,94
deney-3	9,4248	0,28	78,00	1,87	1200	0,3920	1,2	1,5	8062801,93	401351,74	4,98
deney-4	12,5664	0,28	90,00	1,87	1200	0,3920	1,2	1,5	7955377,38	390728,18	4,91
deney-5	15,7079	0,28	100,00	1,87	1200	0,3920	1,2	1,5	7849355,66	380383,07	4,85
deney-6	18,8496	0,28	110,00	1,87	1200	0,3920	1,2	1,5	7791853,09	374830,29	4,81
deney-7	3,14159	0,21	45,00	1,40	1200	0,3920	1,2	1,5	8021306,70	397231,25	4,95
deney-8	6,2832	0,21	64,00	1,40	1200	0,3920	1,2	1,5	8043293,32	399411,88	4,97
deney-9	9,4248	0,21	78,00	1,40	1200	0,3920	1,2	1,5	7856970,59	381121,47	4,85
deney-10	12,5664	0,21	90,00	1,40	1200	0,3920	1,2	1,5	7681446,02	364283,19	4,74
deney-11	15,7079	0,21	100,00	1,40	1200	0,3920	1,2	1,5	7848696,03	380319,14	4,85
deney-12	18,8496	0,21	110,00	1,40	1200	0,3920	1,2	1,5	8052514,60	400328,22	4,97
deney-13	3,14159	0,14	45,00	0,93	1200	0,3920	1,2	1,5	7949808,37	390181,33	4,91
deney-14	6,2832	0,14	64,00	0,93	1200	0,3920	1,2	1,5	7808081,04	376393,22	4,82
deney-15	9,4248	0,14	78,00	0,93	1200	0,3920	1,2	1,5	7756509,24	371437,54	4,79
deney-16	12,5664	0,14	90,00	0,93	1200	0,3920	1,2	1,5	7992258,15	394359,38	4,93
deney-17	15,7079	0,14	100,00	0,93	1200	0,3920	1,2	1,5	8407548,15	436407,18	5,19
deney-18	18,8496	0,14	110,00	0,93	1200	0,3920	1,2	1,5	8810534,50	479245,10	5,44
deney-19	3,14159	0,07	45,00	0,47	1200	0,3920	1,2	1,5	8005710,48	395688,04	4,94
deney-20	6,2832	0,07	64,00	0,47	1200	0,3920	1,2	1,5	7737345,68	369604,43	4,78
deney-21	9,4248	0,07	78,00	0,47	1200	0,3920	1,2	1,5	8047689,53	399848,61	4,97
deney-22	12,5664	0,07	90,00	0,47	1200	0,3920	1,2	1,5	8500302,98	446089,48	5,25
deney-23	15,7079	0,07	100,00	0,47	1200	0,3920	1,2	1,5	8927103,04	492010,37	5,51
deney-24	18,8496	0,07	110,00	0,47	1200	0,3920	1,2	1,5	9285647,46	532325,84	5,73
H/D=4											
deney-25	3,14159	0,28	45,00	1,87	1200	0,3920	1,2	1,5	7900525,08	385358,62	4,88
deney-26	6,2832	0,28	64,00	1,87	1200	0,3920	1,2	1,5	7953365,89	390530,62	4,91
deney-27	9,4248	0,28	78,00	1,87	1200	0,3920	1,2	1,5	7905666,00	385860,29	4,88
deney-28	12,5664	0,28	90,00	1,87	1200	0,3920	1,2	1,5	7868818,80	382271,79	4,86
deney-29	15,7079	0,28	100,00	1,87	1200	0,3920	1,2	1,5	7812300,35	376800,12	4,82
deney-30	18,8496	0,28	110,00	1,87	1200	0,3920	1,2	1,5	7767738,97	372513,84	4,80
deney-31	3,14159	0,21	45,00	1,40	1200	0,3920	1,2	1,5	7862680,20	381675,59	4,85
deney-32	6,2832	0,21	64,00	1,40	1200	0,3920	1,2	1,5	7790064,11	374658,19	4,81
deney-33	9,4248	0,21	78,00	1,40	1200	0,3920	1,2	1,5	7717459,53	367706,99	4,76

deney-34	12,5664	0,21	90,00	1,40	1200	0,3920	1,2	1,5	7684527,72	364575,54	4,74
deney-35	15,7079	0,21	100,00	1,40	1200	0,3920	1,2	1,5	7859150,85	381333,02	4,85
deney-36	18,8496	0,21	110,00	1,40	1200	0,3920	1,2	1,5	8128326,02	407901,59	5,02
deney-37	3,14159	0,14	45,00	0,93	1200	0,3920	1,2	1,5	8075910,66	402657,86	4,99
deney-38	6,2832	0,14	64,00	0,93	1200	0,3920	1,2	1,5	7901619,06	385465,35	4,88
deney-39	9,4248	0,14	78,00	0,93	1200	0,3920	1,2	1,5	7869344,46	382322,87	4,86
deney-40	12,5664	0,14	90,00	0,93	1200	0,3920	1,2	1,5	8173953,77	412493,89	5,05
deney-41	15,7079	0,14	100,00	0,93	1200	0,3920	1,2	1,5	8625154,53	459289,94	5,33
deney-42	18,8496	0,14	110,00	0,93	1200	0,3920	1,2	1,5	9065304,80	507362,06	5,60
deney-43	3,14159	0,07	45,00	0,47	1200	0,3920	1,2	1,5	8169018,50	411995,93	5,04
deney-44	6,2832	0,07	64,00	0,47	1200	0,3920	1,2	1,5	7851367,34	380578,07	4,85
deney-45	9,4248	0,07	78,00	0,47	1200	0,3920	1,2	1,5	8210796,54	416220,77	5,07
deney-46	12,5664	0,07	90,00	0,47	1200	0,3920	1,2	1,5	8758244,24	473573,37	5,41
deney-47	15,7079	0,07	100,00	0,47	1200	0,3920	1,2	1,5	9097836,66	511010,04	5,62
deney-48	18,8496	0,07	110,00	0,47	1200	0,3920	1,2	1,5	9574667,82	565979,36	5,91
H/D=6											
deney-49	3,14159	0,28	45,00	1,87	1200	0,3920	1,2	1,5	7910583,58	386340,48	4,88
deney-50	6,2832	0,28	64,00	1,87	1200	0,3920	1,2	1,5	7897745,22	385087,48	4,88
deney-51	9,4248	0,28	78,00	1,87	1200	0,3920	1,2	1,5	7850583,17	380502,05	4,85
deney-52	12,5664	0,28	90,00	1,87	1200	0,3920	1,2	1,5	7819843,24	377528,08	4,83
deney-53	15,7079	0,28	100,00	1,87	1200	0,3920	1,2	1,5	7700014,55	366046,50	4,75
deney-54	18,8496	0,28	110,00	1,87	1200	0,3920	1,2	1,5	7619295,37	358412,20	4,70
deney-55	3,14159	0,21	45,00	1,40	1200	0,3920	1,2	1,5	7839701,25	379447,93	4,84
deney-56	6,2832	0,21	64,00	1,40	1200	0,3920	1,2	1,5	7802475,15	375852,94	4,82
deney-57	9,4248	0,21	78,00	1,40	1200	0,3920	1,2	1,5	7685785,03	364694,85	4,75
deney-58	12,5664	0,21	90,00	1,40	1200	0,3920	1,2	1,5	7679112,91	364061,93	4,74
deney-59	15,7079	0,21	100,00	1,40	1200	0,3920	1,2	1,5	7855941,06	381021,60	4,85
deney-60	18,8496	0,21	110,00	1,40	1200	0,3920	1,2	1,5	8130711,35	408141,03	5,02
deney-61	3,14159	0,14	45,00	0,93	1200	0,3920	1,2	1,5	8071527,22	402220,87	4,98
deney-62	6,2832	0,14	64,00	0,93	1200	0,3920	1,2	1,5	7891108,73	384440,58	4,87
deney-63	9,4248	0,14	78,00	0,93	1200	0,3920	1,2	1,5	7831281,08	378633,29	4,83
deney-64	12,5664	0,14	90,00	0,93	1200	0,3920	1,2	1,5	8164634,88	411553,88	5,04
deney-65	15,7079	0,14	100,00	0,93	1200	0,3920	1,2	1,5	8678161,19	464952,50	5,36
deney-66	18,8496	0,14	110,00	0,93	1200	0,3920	1,2	1,5	9076550,80	508621,66	5,60
deney-67	3,14159	0,07	45,00	0,47	1200	0,3920	1,2	1,5	7970992,17	392263,53	4,92
deney-68	6,2832	0,07	64,00	0,47	1200	0,3920	1,2	1,5	7813497,67	376915,62	4,82
deney-69	9,4248	0,07	78,00	0,47	1200	0,3920	1,2	1,5	8190148,83	414130,06	5,06
deney-70	12,5664	0,07	90,00	0,47	1200	0,3920	1,2	1,5	8664504,47	463490,27	5,35
deney-71	15,7079	0,07	100,00	0,47	1200	0,3920	1,2	1,5	9128197,87	514426,41	5,64
deney-72	18,8496	0,07	110,00	0,47	1200	0,3920	1,2	1,5	9465135,28	553104,02	5,84
Toplam hata oranı (%)										5,02	

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Mustafa Levent KARABAYIR

Adres : Karayolları 38. Şube Şef. Lojmanı. No:4 AKSARAY

E-posta adresi : mlevent_karabayir@hotmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ

Lisans :Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, (2009)

Yüksek Lisans :Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (halen)

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Altuntaş (Obial) A.Ş. - Yaz Stajı (İmalat)
2. Sekizli Vinç - Yaz Stajı (Organizasyon)
3. Karlift Asansör – Makine Mühendisi
4. Erzincan İl Özel İdaresi – İşletme Teknik Elemanı
5. Karayolları 3. Bölge Müdürlüğü – Atölye Şefi (Makine ve İkmal Mühendisi)