

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ARDIŞIK OLARAK ÜRETİLEN FARKLI YAPIDAKİ JETLERİN ÇARPAN
JET ISI TRANSFERİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisi Mehmet Yusuf BAYAT

TEMMUZ 2021

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ARDIŞIK OLARAK ÜRETİLEN FARKLI YAPIDAKİ JETLERİN ÇARPAN JET
ISI TRANSFERİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Mehmet Yusuf BAYAT

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27.05.2021
Tezin Savunma Tarihi : 07.07.2021

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mustafa SARIOĞLU

Trabzon 2021

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Höparlor tipi aktüatör ve lüle kullanılarak elde edilen sentetik jet akışının ısıtılmış düzlem levha üzerine ardışık olarak gönderilmesiyle oluşan ısı transferi artışı incelenmiştir.

Deneyslerimi gerçekleştirdiğim Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümüne ve hocalarına katkılarından dolayı teşekkür ederim. Yüksek lisans tez çalışmalarım boyunca bana görüş ve destekleri ile yönlendiren saygıdeğer danışmanım Doç. Dr. Mustafa SARIOĞLU'na şükranlarımı arz ederim.

Bu tez çalışması, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen 215M920 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiş olup, sağlanan destek için TÜBİTAK'a teşekkür ederim. Ayrıca proje ekibine de desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Mehmet Yusuf BAYAT
Trabzon, 2021

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Ardışık Olarak Üretilen Farklı Yapıdaki Jetlerin Çarpan Jet Isı Transferi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Mustafa SARIOĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 07/07/2021

Mehmet Yusuf BAYAT

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Jet Akışları.....	1
1.2. Sentetik Jet Karakteristikleri.....	2
1.2.1. Sentetik Jet Aktüatör Tipi.....	2
1.2.1.1. Piston Silindir Mekanizması.....	2
1.2.1.2. Piezoelektrik Aktüatör	3
1.2.1.3. Hoparlör Aktüatör.....	3
1.2.2. Sentetik Jet Akış Yapısı.....	4
1.3. Literatür Araştırması.....	5
1.3.1 Çarpan Jet Yapısı ve Isı Transferi	5
1.3.2. Isıtılmış Hedef Yüzey-Jet Çıkış Mesafesi Etkisi	7
1.3.3. Boyutsuz Strok Uzunluğu Etkisi	9
1.3.4. Uyarma Frekansı Etkisi	10
1.3.5. Geometrik Parametrelerin Etkisi	11
1.3.6. Sürüm Sinyali Etkisi	13
1.4. Çalışmanın Amacı	15
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	16
2.1. Deney Düzenegi.....	16
2.1.1. Sentetik Jet Oluşum Sistemi	17
2.1.2. Sentetik Jet Aktüatör Sinyal Sürüm Sistemi.....	18
2.1.3. Kızgın-Tel Anemometresi ile Hız Ölçüm Sistemi.....	18
2.1.4. Isı Transfer Deney Düzenegi	19
2.2. Isı Tranfer Denklemleri ve Boyutsuz Sayılar	21

2.2.	Sentetik Jet Boyutsuz Sayılar	23
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	25
3.1.	Sentetik Jet Akış Alanı Anlık Hız Dağılımları.....	25
3.1.1.	İki Kare Dalga ile Ardışık Jet Oluşturulması	26
3.1.2.	Farklı Genliğe Sahip Bir Yarım Sinüzoidal ve Bir Yarım Kare Dalga ile Ardışık Jet Oluşturulması	29
3.1.2.	Ardışık Olarak Oluşturulan İki Dalga Geometrilerinin Farklı Düzenlemelerinin İncelenmesi	33
3.2.	Nusselt Sayısı Dağılımlarının Literatür Karşılaştırılması.....	38
3.3.	Çarpan Jet Isı Transferi Nusselt Sayısı Dağılımları	40
3.3.1.	Tekli Yarım Kare Sinyal ile Ardışık Yarım Kare Sinyalin Isı Transferine Etkisi.....	41
3.3.2.	Yarım Sinüzoidal Sinyal ve Yarım Kare Sinyallerin Farklı Zaman Boşluklarındaki Isı Transferine Etkisi	44
3.3.3.	Yarım Sinüzoidal Sinyal ve Periyot Süresi Değiştirilen Yarım Kare Sinyallerin Isı Transferine Etkisi	46
3.3.4.	Yarım Kare ve Negatif Yarım Kare Sinyalin Isı Transferine Etkisi	49
4.	SONUÇLAR.....	53
5.	ÖNERİLER.....	55
6.	KAYNAKLAR	56
7.	EKLER	59
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans

ÖZET

ARDIŞIK OLARAK ÜRETİLEN FARKLI YAPIDAKİ JETLERİN ÇARPAN JET ISI TRANSFERİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Mehmet Yusuf BAYAT

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Mustafa SARIOĞLU
2021, 78 Sayfa, 6 Sayfa Ek

Bu çalışmada, hoparlör tipi aktüatör ile ardışık olarak üretilen sentetik jet akışının homojen olarak ısıtılmış düzlem levha üzerine çarptırılmasıyla meydana gelen ısı transfer dağılımları termal kamera kullanılarak incelenmiştir. Sinyal jeneratörü kullanılarak kare ve sinüzoidal formdaki sinyallerin farklı yapılarda modifiye edilmesi ile elde edilen sürüm sinyalleri kullanılarak ardışık jet akışları elde edilmiştir. İki yarım kare sinyal ya da yarım sinüzoidal ve yarım kare sinyalden oluşan sabit 10 Hz frekansındaki sinyallerin ürettikleri sentetik jetin akış alanı özellikleri ve ısı transfer dağılımları incelenmiştir. Bu bağlamda, T1'den T8'e kadar isimlendirilen 8 farklı sinyal yapısı için yerel Nusselt sayısı dağılımları ortaya konulmuştur. Hız ölçümlerinde kızgın tel anemometresi kullanılarak akış alanının anlık hız değişimleri jet eksenine boyunca y/D 'nin 0-15 değerleri arasındaki konumlarda elde edilmiştir. Çarpan jet ısı transfer deneyleri jet çıkışı ile ısıtılmış plaka arasındaki boyutsuz mesafe olan $y/D=2, 4, 6, 8, 10, 12, 14$ ve 16 mesafelerinde gerçekleştirilmiştir. Sabit 34mm çapa sahip dairesel lüle tipindeki jet deliği kullanılmıştır. Tekli kare sinyal yapısına sahip T2 ve ardışık iki kare sinyal yapısına sahip T1 karşılaştırıldığında, birleşmenin gerçekleştiği $y/D=14$ konumu için tekli T2 sinyaline göre ardışık T1 sinyali Nusselt sayısında %17,8'lik bir artış elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sentetik jet, Ardışık sinyal yapısı, Jet akış yapısı, Nusselt sayısı.

Master Thesis

SUMMARY

THE INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF TANDEMLY PRODUCED JETS OF
DIFFERENT STRUCTURES ON THE IMPINGING JET HEAT TRANSFER

Mehmet Yusuf BAYAT

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa SARIOĞLU
2019, 78 Pages, 6 Pages Appendix

In this study, the heat transfer distributions created by the synthetic jet flow produced sequentially with a loudspeaker-type actuator on a homogeneously heated plane plate were investigated using a thermal camera. Tandem jet flows were obtained by using drive signals obtained by modifying the square and sinusoidal signals in different structures using the signal generator. The flow field properties and heat transfer distributions of the synthetic jet produced by the signals of fixed 10 Hz frequency consisting of two half square signals or half sinusoidal and half square signals were investigated. In this context, local Nusselt number distributions are presented for 8 different signal structures named from T1 to T8. In velocity measurements, instantaneous velocity changes of the flow field were obtained at positions between 0-15 values of y/D along the jet axis by using hot wire anemometer. Impinging jet heat transfer experiments were performed at the dimensionless distance $y/D = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14$ and 16, which is the dimensionless distance between the jet outlet and the heated plate. A circular nozzle type jet hole with a fixed diameter of 34 mm is used. When T2 signal with a single square signal structure and T1 signal with two tandem square signal structure were compared, an increase of 17,8% was obtained in the tandem T1 signal Nusselt numbers compared to the single T2 signal for $y/D=14$ positions where the merger being took place.

Key Words: Synthetic jet, Tandem signal structure, Jet flow structure, Nusselt number.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Piston silindir ve tahrik mekanizması genel görünümü (Bolat, 2010).....	3
Şekil 2. Piezo elektrik aktüatör şematik görünümü (Pavlova vd., 2006)	3
Şekil 3. Hoparlör tipi aktüatörün şematik görünümü (McGuin vd., 2007)	4
Şekil 4. Sentetik jet şematik görünümü ve Schlieren görünümü Glezer ve Amitay (2002)..	5
Şekil 5. Sentetik duvar jeti şematik görünümü (Krishnan ve Mohseni, 2010).....	6
Şekil 6. Deney düzeneği çizimi (Greco vd., 2014).....	7
Şekil 7. Çarpan sentetik jet düzeneğinin şematik görünümü (Persoons vd. 2011)	10
Şekil 8. Orifis delik şekillerinin şematik görünümü (Tan ve Zhang, 2013).....	11
Şekil 9. Sabit hacimli faklı şekilli boşluk yapılarına ait teknik resim görünümleri (Feero vd., 2015).....	12
Şekil 10. İç bükey hedefin şematik deneysel modeli (Lyu vd., 2021)	13
Şekil 11. Genlik modülasyonlu sinyalin görünümü (Qayoum vd. 2010).....	14
Şekil 12. Sinüs, kare, üçgen ve puls sinyal tipleri görünümü (Kocabıyık, 2018)	15
Şekil 13. Hoparlör aktüatör	17
Şekil 14. Sentetik jet aktüatör sinyal sürüm sistemi cihazları	18
Şekil 15. Kızgın-Tel hız ölçüm sistemi görünümü.....	19
Şekil 16. Isı transferi deney düzeneğinin şematik resmi	20
Şekil 17. Isıtılmış film levha çalışma aralıklarının görünümü	21
Şekil 18. Ardışık yarım kare sinyal ve referans tekil sinyal (Akansu vd., 2018).....	26
Şekil 19. T1 tipindeki sinyale ait hız-zaman geçmişi grafiği (Akansu vd., 2018)	27
Şekil 20. T2 tipindeki sinyale ait hız-zaman geçmişi grafiği (Akansu vd., 2018)	28
Şekil 21. T1 ve T2 sinyallerinin ortalama hız grafiği.....	29
Şekil 22. Farklı zaman boşluklu yarım sinüzoidal ve yarım kare dalga ile oluşturulan ardışık sinyaller (Akansu vd., 2018).....	29
Şekil 23. T3 tipindeki sinyale ait hız-zaman geçmişi grafiği (Akansu vd., 2018)	30
Şekil 24. T4 tipindeki sinyale ait hız-zaman geçmişi grafiği (Akansu vd., 2018)	31
Şekil 25. T5 tipindeki sinyale ait hız-zaman geçmişi grafiği (Akansu vd., 2018)	32
Şekil 26. T3, T4 ve T5 sinyallerine ait ortalama hız grafiği.....	33

Şekil 27. T5 sinyal tipi referans alınarak oluşturulan modifiye sinyal yapıları (Akansu vd., 2018)	34
Şekil 28. T5, T6 ve T7 tiplerindeki sinyallere ait hız-zaman geçmişi grafikleri (Akansu vd., 2018)	35
Şekil 29. T5, T6 ve T7 tipindeki sinyallerin ortalama hız grafiği	36
Şekil 30. T1 sinyal tipi referans alınarak oluşturulan modifiye T8 sinyali (Akansu vd., 2018)	36
Şekil 31. T1 ve T8 tiplerindeki sinyallere ait hız-zaman geçmişi grafikleri (Akansu vd., 2018)	37
Şekil 32. T1 ve T8 tipindeki sinyallerin ortalama hız grafiği.....	38
Şekil 33. Nusselt sayısı dağılımı karşılaştırılması	39
Şekil 34. Nusellt sayısı dağılımının farklı y/D mesafelerinde karşılaştırılması	39
Şekil 35. T7 tipindeki sinyallin y/D=2 ve f=10 Hz durumunda elde edilen sıcaklık dağılımı fotoğrafı ve eğrileri	40
Şekil 36. T1 ve T2 sinyal tipinin f=10 Hz frekansı için y/D mesafesine bağlı olarak yerel Nusselt sayısı dağılımları (a) Sinyal Tipi T1, (b) Sinyal Tipi T2	42
Şekil 37. T1 ve T2 sinyal tiplerine ait Nusselt sayısı dağılımlarının karşılaştırılması (y/D=2, 10 ve 16 konumlarında).....	43
Şekil 38. Farklı zaman boşluklu yarım sinüzoidal sinyal ve yarım kare sinyalin f=10 Hz frekansı için y/D mesafesine bağlı olarak yerel Nusselt sayısı dağılımları	45
Şekil 39. T3, T4 ve T5 sinyal tiplerine ait Nusselt sayısı dağılımlarının karşılaştırılması (y/D=2, 10 ve 16 konumlarında).....	46
Şekil 40. Yarım sinüzoidal sinyal ve farklı periyot süreli yarım kare sinyalin f=10 Hz frekansı için y/D mesafesine bağlı olarak yerel Nusselt sayısı dağılımları	48
Şekil 41. T5, T6 ve T7 sinyal tiplerine ait Nusselt sayısı dağılımlarının karşılaştırılması (y/D=2, 10 ve 16 konumlarında).....	49
Şekil 42. T1 ve T8 sinyalin f=10 Hz frekansı için y/D mesafesine bağlı olarak yerel Nusselt sayısı-dağılımları	50
Şekil 43. T1 ve T8 sinyal tiplerine ait Nusselt sayısı dağılımlarının karşılaştırılması (y/D=2, 10 ve 16 konumlarında).....	51
Şekil 44. Ortalama Nusselt sayısının y/D ile değişimi	52

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Sinyallerin şekli, genişliği, büyüklüğü ve zaman boşluğu değerleri tablosu	17
Tablo 2. Bu çalışmada kullanılan parametrelere göre elde edilen boyutsuz sayıların dağılımı.....	24
Tablo 3. Ardışık iki dalga yapısının parametre değerleri tablosu.....	25



SEMBOLLER DİZİNİ

- A_{alt}** : Plaka alt yüzey alanı [m²]
A_{üst} : Plaka üst yüzey alanı [m²]
D : Lüle çapı [m]
E : Gerilim [V]
f : Sentetik jet frekansı [Hz]
H : Jet çıkışı ile levha yüzeyi arası mesafe [m]
h : Zorlanmış ısı taşınım katsayısı [W/m².K]
h_{dt} : Doğal ısı taşınım katsayısı [W/m².K]
I : Akım [A]
k : Havanın ısı iletim katsayısı [W/m.K]
Nu : Nusselt sayısı
PIV : Parçacık Görüntüsü Hız Ölçümü
T_ç : Çevre sıcaklığı [°C]
T_j : Jet sıcaklığı [°C]
T_y : Yüzey sıcaklığı [°C]
V_{ort} : Ortalama jet hızı [m/s]
q''_{elektrik}: Elektrik ile üretilen ısı akısı [W/m²]
q''_{iletim} : İletim ısı akısı [W/m²]
q'' _{Radyasyon}: Radyasyon ısı akısı [W/m²]
ε : Yayılım katsayısı
σ : Stefan Boltzmann sabiti
β : Genleşme katsayısı

1. GENEL BİLGİLER

Teknolojinin hızla gelişmesi ile elektronik cihazlar, gelişmiş işlevlerle daha küçük ve daha hızlı işlem yapabilecek şekilde tasarlanmaktadır. Bununla birlikte, boyuttaki bu kompaktlık, yüksek güç yoğunluklarına ve yüksek çalışma sıcaklıklarına yol açarak elektronik cihazların performansında düşüşe neden olmaktadır. Geleneksel soğutma yöntemlerinin bu noktada yetersiz kalması araştırmacıları yeni soğutma sistemleri arayışına itmektedir. Bu yeni soğutma yöntemlerinden biri olan sentetik jetin kompakt yapıda olması uygulamada birçok farklı alanda kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Sentetik jet tanımı yapılmadan önce jet akışları ve jet akış sınıflandırılması alt başlıklar halinde sunulmuştur.

1.1. Jet Akışları

Jetin sözlük anlamı bir lüle, açıklık veya bir delikten çevreye boşaltılan genellikle kuvvetli bir sıvı akışı olarak tanımlanmaktadır. Jet akışı sınıflandırılmasında öncelikle akış ve çevre ortamın özelliklerine göre dalmış jet ve serbest jet olarak ikiye ayrılmaktadır. Jet akışkanı ve çevre ortam akışkanı benzer fiziksel özelliklere sahip ise dalmış jet (örneğin; hava içerisine hava jet olarak gönderilmesi), jet akışkanı ve çevre ortam akışkanı özellikleri farklıysa serbest jet (örneğin; hava içerisine su jeti gönderilmesi) şeklinde sınıflandırılmaktadır.

Diğer bir sınıflandırma ise jetlerin oluşum yöntemine göre sürekli jet, darbeli veya salınımlı jet ve sentetik jet olarak sınıflandırılmaktadır. Sürekli jet ve salınımlı jet akışında akışın devamlı olarak bir kaynaktan beslenmesi gerekirken sentetik jet akışında herhangi bir kaynağa ihtiyaç duyulmamakta, ortam akışını emme ve üfleme işlemini peşi sıra yaparak jet akışı oluşturmaktadır. Sürekli jet'te sabit hızda jet akışı oluşturulurken salınımlı jet'te ise değişken hızlarda jet akışı oluşturulmaktadır. Sentetik jet'te ise üfleme fazında pozitif hız, emme fazında ise negatif hızlarda jet akışı oluşturulmaktadır. Bu nedenle sentetik jetlere sıfır net kütle akılı jetler olarak tanımlama yapılmaktadır.

Jet akışları geometrik şekillerine göre sırasıyla jet çıkış geometrisi ve jet çıkış kesiti geometrisine göre sınıflandırmak mümkündür. Jet çıkış geometrisine göre; orifis, lüle ve boru tipi geometriler kullanarak jet akış elde edilebilmektedir. Jet çıkış kesitine göre; dairesel ve eliptik; dikdörtgen, kare ve slot; üçgen ve çokgen şeklinde üç farklı kategoride

sınıflandırılabilir. Ayrıca jet sayısına göre tekli, ikili ve çoklu jetler şeklinde üç grupta incelenebilir. Bu gruplandırma içerisinde ikili ve çoklu jetlerin konumlandırılmasına göre iç içe (halka) ve yan yana konumlandırılmasına göre farklı jet yapıları oluşturulabilmektedir. Son sınıflandırma türü olarak jetlerin sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış olarak iki grupta incelenebilmektedir.

1.2. Sentetik Jet Karakteristikleri

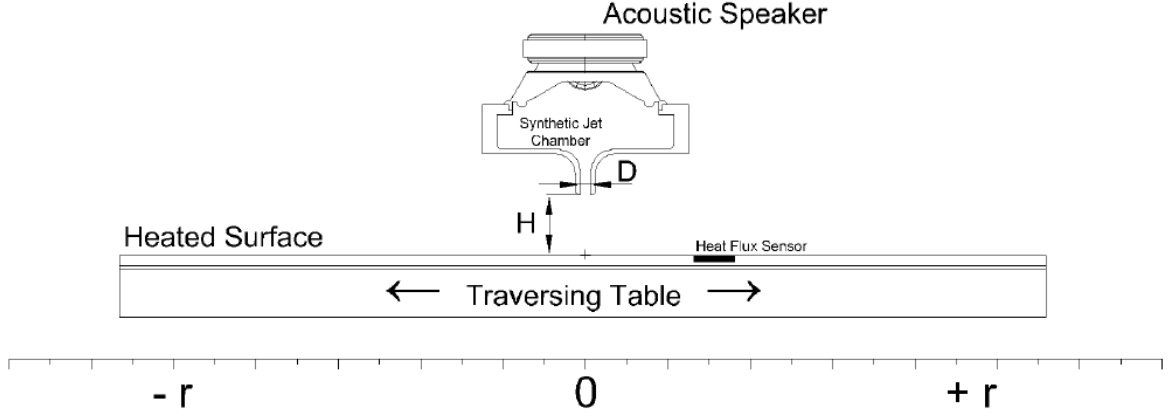
1.2.1. Sentetik Jet Aktüatör Tipi

Sentetik jet formu oluşturmak için gerekli üç temel öge vardır ve bunlar sırasıyla aktüatör, kapalı boşluk hacmi ve bu hacim içerisindeki akışın dışarıya atılması için bir delik. Sentetik jet elde etmek için kullanılan üç farklı aktüatör tipi mevcuttur. Bunlar; piston silindir mekanizması, piezoelektrik ve hoparlör şeklinde sıralanabilir. Bu aktüatörler birbirlerine göre avantaj ya da dezavantaja sahiptirler.

1.2.1.1. Piston Silindir Mekanizması

Piston silindir mekanizmasında pistonun silindir içerisindeki ileri ve geri hareketini peşi sıra gerçekleştirilmesiyle sentetik jet akışı oluşturulmaktadır. Pistonun silindir içerisinde taradığı strok uzunluğu birçok farklı mekanik tasarımlarla gerçekleştirilebilmektedir. Bu tasarımlarla sentetik jetin frekansı ve debisi ayarlanabilmektedir. Bolat (2010), yaptığı bir çalışmada piston silindir mekanizması kullanarak sentetik jet akışı elde etmiştir. Disk üzerinde farklı yarıçaplarda açılmış deliklere biyel kolu bağlanarak pistonun silindir içerisinde taradığı strok mesafesini ayarlamıştır. Şekil 1’de görüldüğü gibi elektrik motoruna bağlı delikli disk ve diske bağlı biyel kolu bulunmaktadır. Silindir içerisinde alt ölü noktadan üst ölü noktaya hareket eden piston sayesinde sentetik jet akışı elde etmiştir. Piston silindir mekanizması ile yüksek debiler elde edilebilirken kullanılan mekanik aksamdan dolayı yüksek frekanslara çıkılamamaktadır.

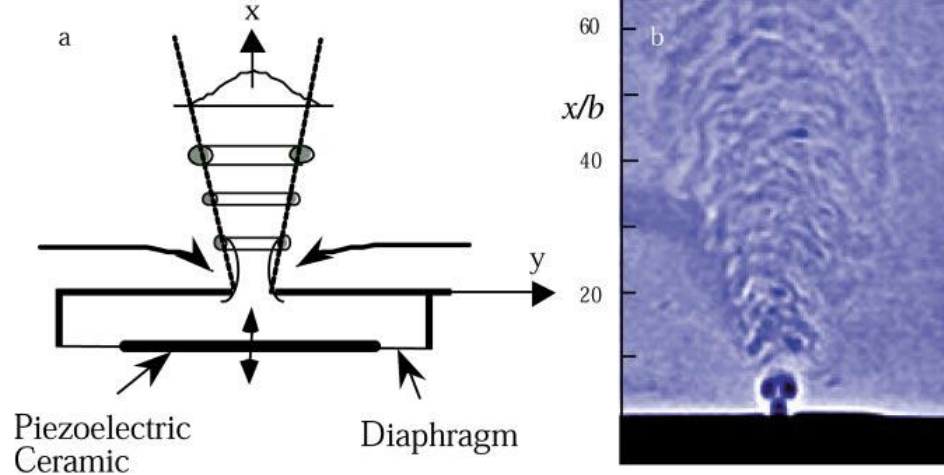
verilmiştir. Höpür türü aktüatör ile piston silindir mekanizmasına göre daha yüksek frekanslar elde edilebilir ayrıca piezoelektrik aktüatörlere göre daha yüksek genlikler elde edilebilmektedir.



Şekil 3. Höpür türü aktüatörün şematik görünümü (McGuin vd., 2007)

1.2.2. Sentetik Jet Akış Yapısı

Sentetik jet bir delik aracılığıyla emme ve üfleme işleminin peşi sıra yapılmasıyla bu delikten dışarıya girdap halkaları dizisi üretilmesiyle oluşturulur. Sentetik jetleri diğer jet akışlardan ayıran en önemli özelliği, tamamen yerleştirildikleri akış sisteminin çalışma sıvısından oluşmaları ve böylece akış sınırı boyunca net kütle akışı olmadan doğrusal momentumu akış sistemine aktarabilmeleridir. Glezer ve Amitay (2002) yaptıkları bir çalışmada sentetik jet oluşumunu incelemişler ve şekil 4'te şematik ve Schlieren yöntemiyle elde edilen görünümü verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi emme fazında delik çevresindeki akışkan kapalı hacim içerisine girerek üfleme fazında delikten dışarıya vorteks çiftleri oluşturmaktadır.



Şekil 4. Sentetik jet şematik görünümü ve Schlieren görünümü Glezer ve Amitay (2002)

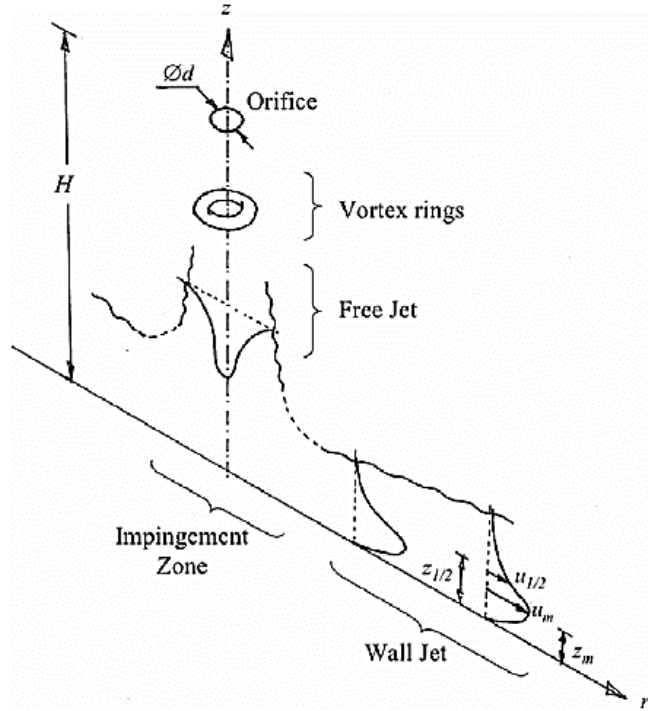
Smith ve Swift (2003), yaptıkları çalışmada sentetik jet ve sürekli jetlerin aynı Reynolds sayılarındaki ($Re = 2000$) jet yapılarını karşılaştırmışlardır. Sentetik jetlerin sürekli jetlerle olan benzerlik ve farklılıkları hakkında daha fazla bilgi edinmek üzere sentetik jetlerin bazı boyutsuz parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. Sentetik jet akış alanını yakın ve uzak alan diye iki bölge açısından incelemişler ve uzak alanda sentetik jetlerin özdeş hız profilleri bakımından sürekli jetlerle benzerlik gösterdiğini bulmuşlardır. Ayrıca yakın alanda ise sentetik jetlerin sürekli jetlere göre vorteks çiftleri üretmede daha baskın olduğunu ortaya koymuşlardır.

1.3. Literatür Araştırması

1.3.1 Çarpan Jet Yapısı ve Isı Transferi

Çarpan sentetik jet yapısı ve ısı transferi üzerine literatürde birçok farklı çalışma yapılmış ve farklı parametrelerin etkisi ortaya konulmuştur. Çarpan sentetik jet ısı transferinde, aktüatör vasıtasıyla oluşturulan sentetik jetin ısıtılmış bir yüzeye çarptırılmasıyla bu yüzeyde meydana gelen ısı transferinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu iyileştirmeleri ortaya koymak için literatürde yapılan çalışmalarda jet ile hedef yüzey arası boyutsuz mesafenin etkisi, boyutsuz strok uzunluğunun etkisi, uyarma frekansının etkisi ya da geometrik parametrelerin etkisi gibi parametreler araştırılmıştır.

Krishnan ve Mohseni (2010), dairesel bir çarpan sentetik jetin radyal duvar jet formunu deneysel bir çalışma yaparak ortaya koymuşlardır. Şekil 5'te görüldüğü gibi H yüksekliğindeki dairesel kesite sahip delikten çıkan akış bir sentetik jet halkası oluşturmaktadır. Sentetik jet halkası duvara doğru ilerledikçe yayılmakta ve bu bölge serbest jet bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Çarpma bölgesine çarpan sentetik jet radyal doğrultuda genişleyerek bir duvar jeti bölgesi oluşturmaktadır.



Şekil 5. Sentetik duvar jeti şematik görünümü (Krishnan ve Mohseni, 2010)

Çengel (1998), ısı transferinin, termal sınır tabakasının yakınında taşınımın artırılması ve ortam akışkanının karıştırılması veya yüzeyin termal sınır tabakasının azaltılması ile artırılabilceğini belirtmiştir. Çarpan jet ise yüzeyin termal sınır tabakasını bozar ve türbülansı artırır ve taze akışkanın yüzeye etkileşime girmesini sağlar. Böylece yüzeyden ısı aktarım hızı artırılmış olur. Çarpan sentetik jet ile ısı transferi performansı Re sayısına, jet-ısıtılmış yüzey arası mesafeye, uyarma frekansına ve geometrik parametrelerine bağlıdır ve bu parametreler aşağıda sırasıyla alt başlıklar halinde incelenmiştir.

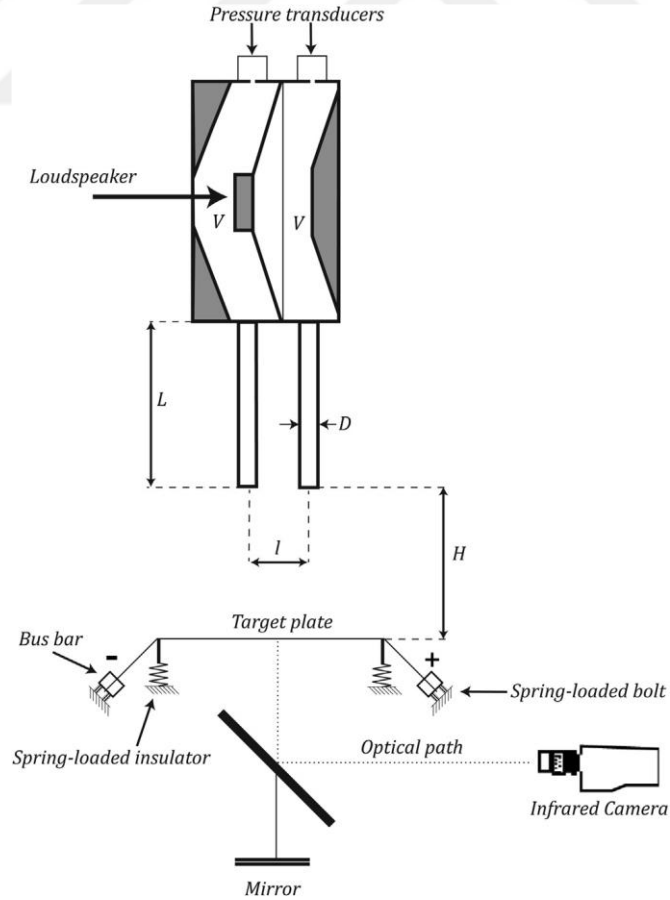
1.3.2. Isıtılmış Hedef Yüzey-Jet Çıkış Mesafesi Etkisi

Termal performans, ısıtılmış hedef yüzey ile jet çıkış deliği arasındaki mesafeye oldukça duyarlıdır. Sentetik jetin ısı transfer performansındaki bu etki literatürde birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Kercher vd. (2003), minyatürleştirilmiş sentetik jet (mikrojet) teknolojisinin mikroelektronik cihazların termal yönetiminin uygulanabilirliğini göstermek için yaptıkları deneysel çalışmada yerel soğutma için en uygun mesafenin 15-20 mm ($H/d=6,3-8,4$) olduğunu bulmuşlardır. Benzer şekilde Greco vd. (2014), deney düzeneği Şekil 6'da gösterildiği gibi tekli ve ikili çarpan jet ile maksimum ısı transferini ısıtılmış yüzey-jet mesafesinin $H/D=6$ olduğu konumda elde etmişlerdir.

Isı transfer karakteristiklerinin jet çıkış deliği ile ısıtılmış hedef yüzey arasındaki boşluğa bağımlılığını anlamak için, Gillespie vd. (2006), aşağıda verilen (1) eşitliğini önermişlerdir.

$$D = \frac{H}{d} \quad (1)$$



Şekil 6. Deney düzeneği çizimi (Greco vd., 2014)

Gillespie vd. (2006), sentetik jet akış alanını boyutsuz mesafeye bağlı olarak üç bölgeye ayırmışlardır: yakın alan, orta alan ve uzak alan. Isı transferi performansının bu bölgelerdeki hedef yüzey konumuna güçlü bir şekilde bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Yakın alanda hedef yüzeyinin varlığı, jetin ortamdaki daha soğuk olan akışkanın sürüklenme kabiliyetini kısıtlarken uzak alanlarda ise jet momentumu difüzyon nedeniyle azalır, bu da hedef plaka üzerindeki karıştırma ve ısı aktarım hızında azalmaya neden olur. Maksimum soğutma performansı, orta alanda yani daha soğuk ortam havasının daha iyi karışım gösterdiği yerde elde edilmiştir. Ayrıca, ısı transferinin Re sayısı ile arttığını da gözlemlemişlerdir.

Ghaffari vd. (2015, 2016), jet-duvar aralığının farklı varyasyonlarını sentetik jet akış fiziğini ve ısı transfer performansı üzerindeki etkisini açıklamış ve daha sonra geleneksel bir sürekli jet ile karşılaştırmışlardır. Sentetik jetin, literatürde açıklandığı gibi orta derecede gelişmiş girdap yapılarının engellenmesi nedeniyle küçük jet-duvar aralığında düşük performans gösterdiğini bulmuşlardır. Sonuçlar ayrıca ısıtılan yüzeyin delik çıkışına yakın yerleştirildiğinde emme fazı boyunca sıcak havanın delik içine yeniden girdiğini PIV'den zaman-ortalama ve faz-ortalama akış alanı sonuçlarını kullanarak desteklemişlerdir. Optimal aralık için boşluk arttırılırken, yüzeye çarpan tutarlı girdap yapılarından kaynaklanan performansta önemli artışın var olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca Stokes sayısındaki artışın, güç tüketiminde buna karşılık gelen bir artışla soğutma performansını arttırdığını bulmuşlardır.

Arik vd. (2013), sentetik jet performansının Re ve jet-ısıtılmış düz duvar aralıkları gibi benzer deney koşulları altında çalışan sürekli jetlerden neredeyse %40 daha üstün olduğunu bulmuşlardır. Bulgular, sentetik jetin akış alanında girdap çiftlerinin varlığına bağlı olarak herhangi bir çalışma koşulunda karıştırmayı arttırdığını bulmuşlardır. Benzer sonuçlar He vd. (2015) tarafından yapılan araştırmada da bulunmuştur. Sürekli bir jet için, akış rejimini, iki parçaya ayırmışlardır. Ortalama Nu , $H/D_h < 5$ için Re, nozül uzunluğu ve H/D_h 'nin bir fonksiyonu olarak bulunurken $H/D_h > 10$ ve en/boy oranı > 8 için nozül uzunluğu ve H/D_h 'den tamamen bağımsız hale geldiğini gözlemlemişlerdir. En iyi soğutmayı $H/D_h = 10$ 'da elde etmişlerdir.

Literatürde daha önceki çalışmalarda, ısı transfer rejimlerinin tanımlanması için optimum jet-duvar aralığının da kritik strok uzunluk oranını etkilediği gösterilmiştir. Valiorgue vd. (2009), ısı transferi rejimindeki değişikliği 2.5 jet-duvar aralığına göre kritik bir strok uzunluğu bulurken, Persoons vd. (2011) Valiorgue'un bulguları genişletti ve bir

asimetrik sentetik jet için bir durma noktası Nusselt sayısı korelasyonu geliştirdiler. Aynı zamanda dört farklı ısı transfer rejimi buldular. Tan vd. (2015), aynı zamanda düşük frekanslı sentetik jet için de araştırmış ve bu kritik strok uzunluğu olan 18'i jet-duvar aralığına göre bulmuştur. Yine bu, jet gelişimini kısıtlayan bir duvarın yakında konumlandırılmasının neden olduğu ve jet-duvar aralığının artması ile ısı transferinde bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Belli bir değerden sonra merkez çizgisindeki hızın bozulması nedeniyle performansta düşüş meydana geldiğini bulmuşlardır.

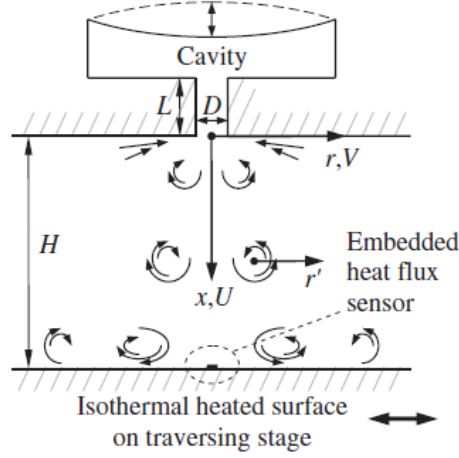
Düşük jet-duvar aralığında ısıtılmış yüzeyin yakın çevresindeki havayı ısıtarak emme fazında sentetik jet içerisine girmesi sentetik jetin ısı transfer performansını sınırlandırmaktadır. Bhapkar vd. (2015), bu durumun aşılabilmesi için farklı orifis boşluğu dış yüzey şekillerini önermiştir. Sıcak havanın yönünü değiştirerek sıcak havanın emilmesinin engellenebileceğini ve bu da düz şekle sahip orifislerden yaklaşık üç kat daha fazla ısı transferinin artırılmasına yol açacağını bulmuşlardır.

1.3.3. Boyutsuz Strok Uzunluğu Etkisi

Boyutsuz strok uzunluğu, sentetik jet gelişiminde ve dolayısıyla ısı transfer performansında önemli bir rol oynamaktadır. Valiorgue vd. (2009), sabit bir jet-yüzey aralığının $H/D=2$, strok uzunluğunun $1 < L_0/D < 22$ ve Reynolds sayısının $1000 < Re < 4300$ aralığında ısı transfer özellikleri ile çarpan sentetik jet akış yapısı arasındaki ilişkiyi araştırmışlar ve düşük bir boyutsuz strok uzunluğu için gönderilen girdap halkaları, ısıtılmış yüzeye çarptıktan sonra hareket etmek veya nüfuz etmek için yeterli güce sahip olmadığını ve bu nedenle ısı transferinin durma noktası yakınında yoğunlaştığını bulmuşlardır. Ayrıca L_0/D yerine yeni bir strok uzunluğu L_0/H tanımlamışlar ve kritik bir strok uzunluğu olduğunu bulmuşlardır. $L_0/H \approx 2,5$ veya $L_0/D \approx 5$ kritik değerinin üzerinde ısı transferinin strok uzunluğundan bağımsız olduğunu ve esas olarak Reynolds sayısına bağlı olduğunu bulmuşlardır.

Persoons vd. (2011), $2 \leq H/d_0 \leq 12$ için geniş bir L_0/H aralığında Nusselt sayısı değerlerine dayalı olarak dört farklı ısı transfer rejimi tanımlamışlardır. Düşük strok uzunluğu veya yüksek orifis-hedef yüzey mesafesi için çarpmadan önce girdapların bozulmasını, ısı transfer performansındaki genel düşüşten sorumlu tutmuşlardır. Yüksek strok uzunluğunda veya düşük orifis-yüzey mesafesinde girdapların gelişiminin sabit jete benzediğini ve bu durumda ısı transfer performansının L_0 'dan bağımsız ve sadece Re ve

H/d_0 tarafından belirlendiğini bulmuşlardır. Şekil 7’de bu çalışmaya ait sentetik jet düzeneğinin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 7. Çarpan sentetik jet düzeneğinin şematik görünümü (Persoons vd. 2011)

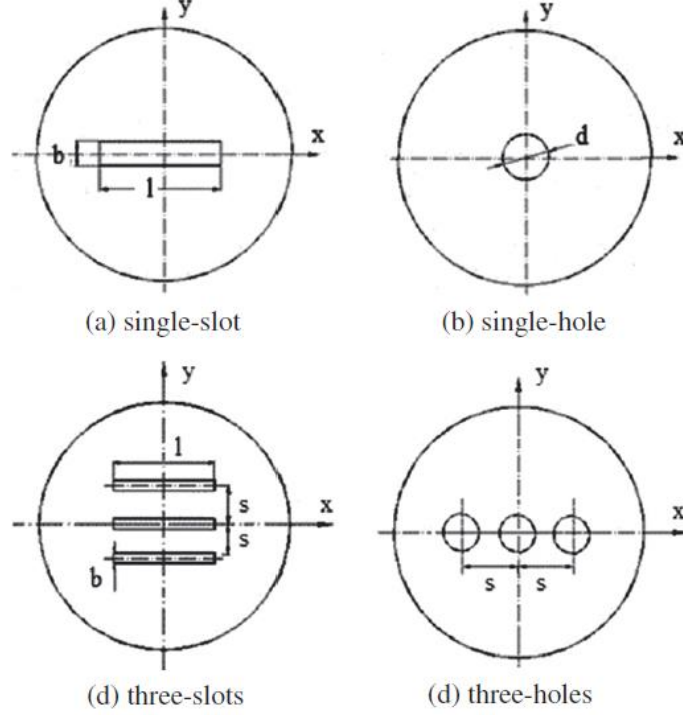
Chaudhari vd. (2010), boyutsuz aksel mesafenin bir fonksiyonu olarak strok uzunluğunun ortalama Nusselt sayısı üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. $Re=3700$ için $H/d_0 = 2$ 'de maksimum %108 Nu_{max} elde etmişler ve strok uzunluğunun 13,75'ten 7,86'ya kadar düşmesiyle azaldığını bulmuşlardır.

1.3.4. Uyarma Frekansı Etkisi

Uyarma frekansının etkisi sentetik jetlerin ısıtılmış bir yüzeydeki soğutma performansı üzerinde kritik bir etkiye sahiptir. Silva vd. (2012), farklı Reynolds sayıları $Re = 305, 406, 508$ ve $H/d_0 = 5, 10, 20$ 'nin bir fonksiyonu olarak farklı üç frekansın $f = 11, 22$ ve 33 Hz ortalama Nu üzerindeki etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Frekansın yakın alanda ($H/d_0 \leq 7,5$) Nu sayısını güçlü bir şekilde etkilediğini ve ayrıca büyük H/d_0 mesafelerinde ısı transfer oranının frekansa bağlı olmadığını bulmuşlardır.

Tan ve Zhang, (2013), yaptıkları bir çalışmada tek bir boşluktan oluşan tek-slot, tek-delik, üçlü-slot ve üçlü-delikli gibi farklı jet çıkış deliklerinin çarpan sentetik jet akış ve ısı transfer özelliklerini araştırmışlardır. Farklı çıkış deliği konfigürasyonları için 100 Hz'den 1800 Hz'e değişen uyarma frekanslarında incelemişlerdir. Tek-delikli sentetik jetin optimum frekansının aynı çıkış alanına sahip tek-slot orifisinki ile hemen hemen aynı olduğunu bulmuşlardır. Ancak çoklu delikler için optimum frekansın, tek delikli sentetik jetinkinden

daha düşük olduğunu ortaya koymuşlardır. Şekil 8’de kullanıkları orifis delik şekillerine ait şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 8. Orifis delik şekillerinin şematik görünümü (Tan ve Zhang, 2013)

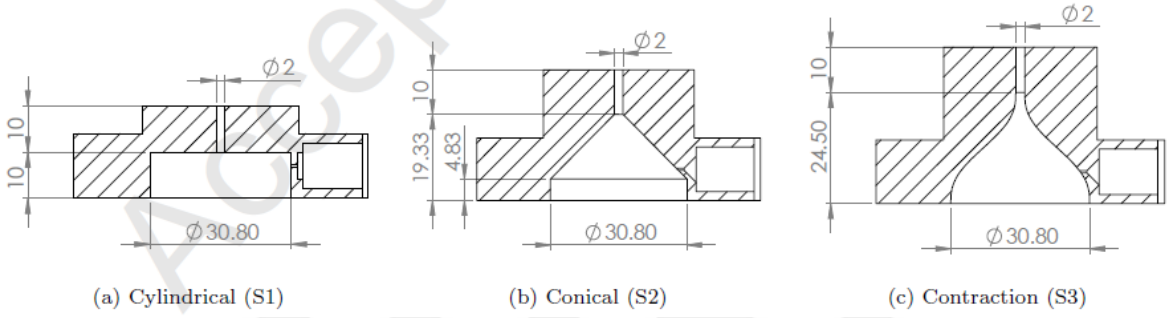
1.3.5. Geometrik Parametrelerin Etkisi

Geometrik parametreler, sentetik jetin akış alanını etkilediğinden dolayı ısı transfer özelliklerinde de büyük rol oynamaktadır. Isı transfer performansının farklı delik şekline (dairesel, kare ve dikdörtgen) sahip olan çarpan sentetik jetle ilk araştırmayı Chaudhari vd. (2010), gerçekleştirmiş ve ardından Mangate vd. (2015), elmas ve oval şekle sahip delik için deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu deliklerden, kare şekilli delik uzak alanda en iyi ısı transfer sonuçlarını sergilemiştir, yakın alanda ise sırasıyla oval ve dikdörtgen şekilli deliklerin en iyi performansı gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Mangate vd. (2015), çarpan sentetik jet ısı transferi ve akustik karakteristiklerini farklı konfigürasyonlara sahip aynı hidrolik çaplı elmas, oval ve silindirik şekilli orifisleri deneysel olarak incelemiştir. 200 Hz’de aynı hidrolik çapa sahip elmas ve oval şekilli orifislerin ortalama ısı transfer katsayılarının, dairesel şekilli orifise kıyasla sırasıyla %17 ve %7 daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca elmas ve oval şekilli orifislerin ses basınç seviyesinin

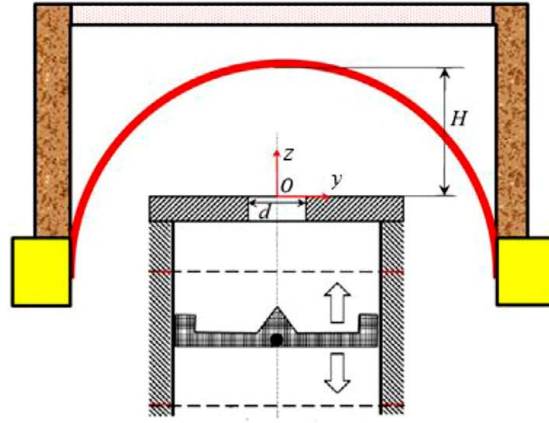
200 Hz'lik bir uyarma frekansında dairesel orifise kıyasla 7 dB daha az olduğunu bulmuşlardır. Oval şekilli deliğin, ısı transferi ve akustik açıdan daha iyi performans gösterdiğini bulmuşlardır.

Feero vd. (2015) yaptıkları bir çalışmada sabit hacimli farklı şekillere sahip boşlukların etkisini incelemişlerdir. Silindirik, konik ve daralan şekillere sahip üç farklı boşluk yapısını incelemişler ve üç boşluk şekli için de farklı büyüklüklerde benzer hız profilleri elde etmişlerdir. Ortalama momentum akılarını ise en yüksek silindirik yapılu boşlukta, en düşük ise daralan yapıya ait boşlukta elde etmişlerdir. Şekil 9'da sabit hacme sahip boşluk şekilleri verilmiştir.

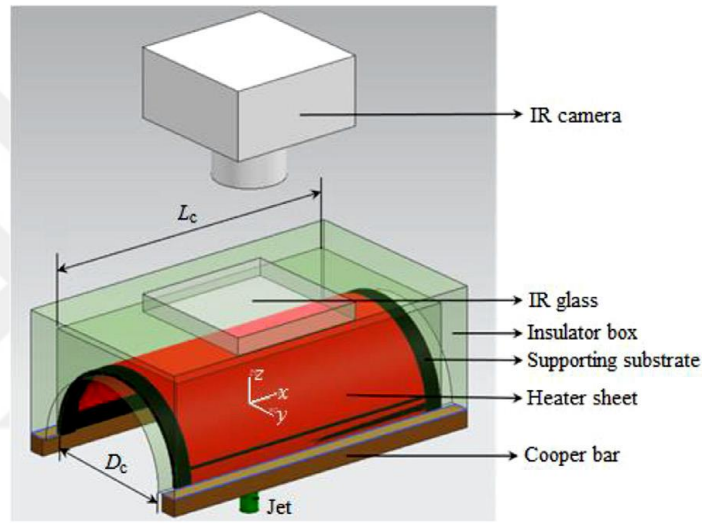


Şekil 9. Sabit hacimli faklı şekilli boşluk yapılarına ait teknik resim görünümleri (Feero vd., 2015)

Lyu vd. (2021), orifis şeklinin ve hedef yüzey şeklinin çarpan sentetik jet ısı transferi performansı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. İki özel düzlemsel loblu delik (taç şeklindeki delik ve kemer şeklindeki delik) ve iki tipik hedef (düz hedef ve yarı silindirik içbükey hedef) incelemişlerdir. Şekil 10'da hedef plakanın şematik deneysel modeli gösterilmektedir. Dairesel deliğe göre 6 taç yaprak şekilli delik ile $f = 15$ Hz ve $H/d = 10$ konumunda ortalama Nusselt sayısında %26'lık bir artış elde etmişlerdir. Düz hedef ile karşılaştırıldığında, iç bükey hedef üzerindeki çarpan sentetik jet ısı transferinde delik şekillerinden bağımsız olarak ciddi bir şekilde azalma meydana geldiğini bulmuşlardır.



(a) sectional view

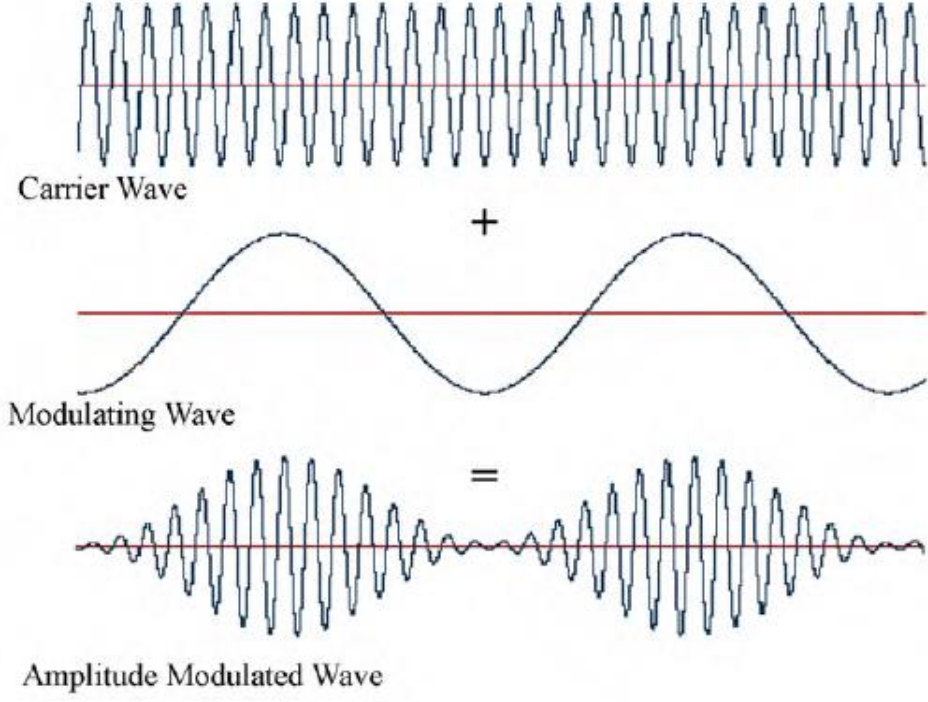


(b) 3-D view

Şekil 10. İç bükey hedefin şematik deneysel modeli (Lyu vd., 2021)

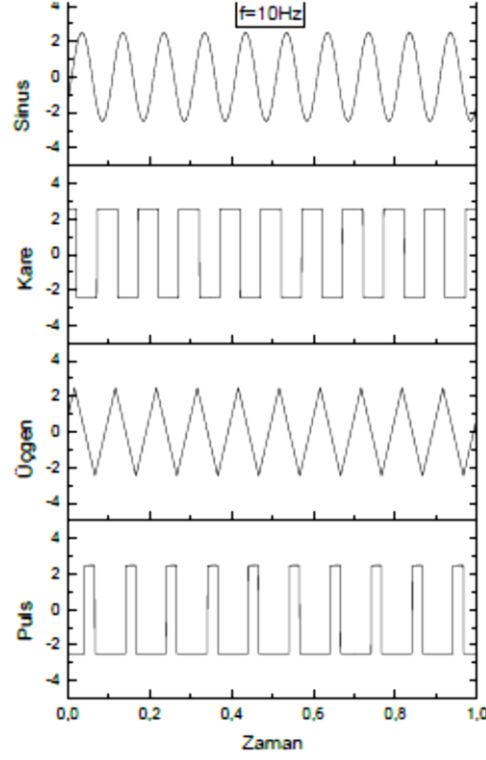
1.3.6. Sürüm Sinyali Etkisi

Literatürde yapılan çalışmalarda genel olarak sinüs sinyali ile sürülen sentetik jetler oluşturulmaktadır. Ancak bunun dışında farklı sinyal yapıları da (kare, puls..., gibi) incelenmiştir. Qayoum vd. (2010), 10 Hz ile 50 Hz arasında değişen modülasyon koşulları altında 951 Hz'lik bir frekansa sahip sentetik jet karakteristiklerini araştırmışlardır. Şekil 11'de genlik modülasyonlu sinyalin görünümü verilmiştir. Genlik modülasyonu, temel sentetik jet akış karakteristiğini önemli bir şekilde etkilediğini ve ayrıca genlik modülasyonunun hem rms hız çalkantılarının büyüklüğüne hem de jetin akış yönüne nüfuzunu arttırdığını ortaya koymuşlardır.



Şekil 11. Genlik modülasyonlu sinyalin görünümü (Qayoum vd. 2010)

Farklı sürüm sinyallerinin (sinüs, kare, üçgen ve puls) sentetik jet akış alanı ve çarpan ısı transferi karakteristiği Kocabıyık (2018), tarafından yapılan deneysel çalışmada incelenmiştir. 2-20 Hz frekans aralığında ve $H/D = 0,5-10$ değerleri arasında deneyleri gerçekleştirmiştir. Şekil 12’de sinyal yapıların görünümü verilmiştir. Düşük frekanslarda sinyal yapısının ısı transferi üzerine etkisinin büyük olduğunu ve frekansın artmasıyla sinyal yapılarının etkisinin giderek azaldığını ortaya koymuştur.



Şekil 12. Sinüs, kare, üçgen ve puls sinyal tipleri görünümü (Kocabıyık, 2018)

1.4. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, literatürde yapılmış olan çalışmalardan farklı olarak ardışık olarak üretilen farklı yapıdaki sentetik jetlerin akış karakteristikleri ve ısı transferi üzerine etkilerini incelemektir. Bu çalışmada hoparlör tipi aktüatör kullanılmasının tercih edilme sebeplerinden bazıları; farklı frekanslarda çalıştırılabilmesi ve verilen elektrik sinyaline hızlı cevap verebiliyor olmasıdır. Homojen olarak ısıtılmış levha üzerine ardışık olarak gönderilen vorteks çiftlerinin birleştirilmesi ve bu birleşme etkisiyle ısı transferi dağılımının termal kamera yardımıyla incelenmesi hedeflenmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Deney Düzeneği

Bu çalışmada sentetik jet akış alanı özelliklerini ve çarpan jet ısı transferi karakteristiklerini incelemek için iki farklı deney düzeneği kurulmuştur. Akış alanının hız ölçümünün incelendiği deney düzeneğinde; sentetik jet oluşum sistemi, sentetik jet aktüatör sürüm sistemi ve kızgın-tel anemometresi ile hız ölçüm sistemini içermektedir. Isı transferi karakteristiğinin incelendiği deney düzeneğinde ise kızgın-tel anemometresi ile hız ölçüm sistemi yerine termal kamera ile ısı transferi dağılımı ölçüm sistemi yer almaktadır. Deneyler, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan Aerodinamik Akış Laboratuvarında 215M920 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında kurulan deney düzeneği sistemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada hız ölçümleri 215M920 nolu TÜBİTAK projesinde gerçekleştirilen anlık hız ölçüm sonuçları referans alınarak ısı transferinin etkileri incelenmiştir. Hız ölçümleri, sabit 10 Hz frekansında, hedef levha ile jet çıkış arasındaki boyutsuz mesafe olan y/D 'nin 0'dan 15'e birer arttırılarak farklı yapıdaki sinyallerin anlık hız değişimleri elde edilmiştir. Çarpan jet ısı transferi deneyleri ise boyutsuz mesafe olan y/D 'nin 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 ve 16 olduğu aralıklarda gerçekleştirilmiştir. Isı transferi deneylerinde levha üzerinde sabit ısı akısında üniform bir sıcaklık dağılımı elde etmek amacıyla 0.03 mm kalınlığına sahip paslanmaz çelik levha DC güç kaynağı ile ısıtılarak elde edilmiştir.

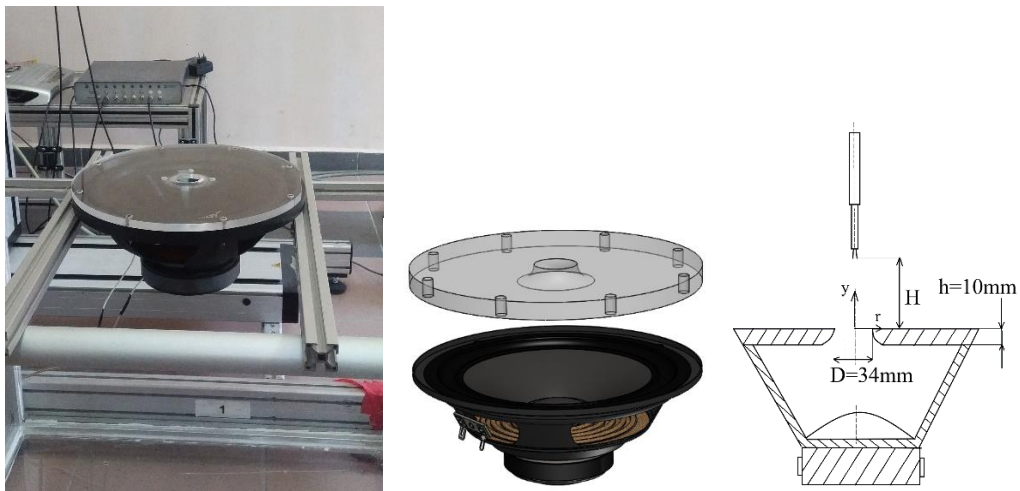
Aktüatörde ardışık olarak iki sentetik jet oluşturabilmek için sürüm sinyalinde iki sinyal oluşturulmuştur. Oluşturulan bu iki sinyalin genişlik ve şiddetinin farklı olarak düzenlenmesi ile jet eksenine boyunca ilerleyen jetin diğer jet ile birleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda çeşitli sinyal yapıları ele alınarak sinyalin şekli (kare, sinüs), genişliği, büyüklüğü ve sinyaller arası zaman boşluğu gibi parametreler için deneyler gerçekleştirilmiştir. Sinyallerin şekli, genişliği "milisaniye (ms)", büyüklüğü "Volt peak-to-peak (V_{pp})" ve zaman boşluğu gibi değerler Tablo 1'de listelenmiştir.

Tablo 1. Sinyallerin şekli, genişliği, büyüklüğü ve zaman boşluğu değerleri tablosu

Sinyal adı	Frekans (Hz)	Birinci Dalga			İkinci Dalga			İki dalga arası zaman boşluğu (ms)	Sinyallerin şematik görünümü
		Şekli	Gerilim (Vpp)	Genişlik (ms)	Şekli	Gerilim (Vpp)	Genişlik (ms)		
T1	10	Kare	2,5	5	Kare	5	5	45	
T2	10	Kare	5	5	-	-	-	95	
T3	10	Sinüs	3	50	Kare	5	10	0	
T4	10	Sinüs	3	50	Kare	5	10	10	
T5	10	Sinüs	3	50	Kare	5	10	20	
T6	10	Sinüs	3	50	Kare	5	5	20	
T7	10	Sinüs	3	50	Kare	5	15	20	
T8	10	Kare	2,5	5	Kare	-5	5	45	

2.1.1. Sentetik Jet Oluşum Sistemi

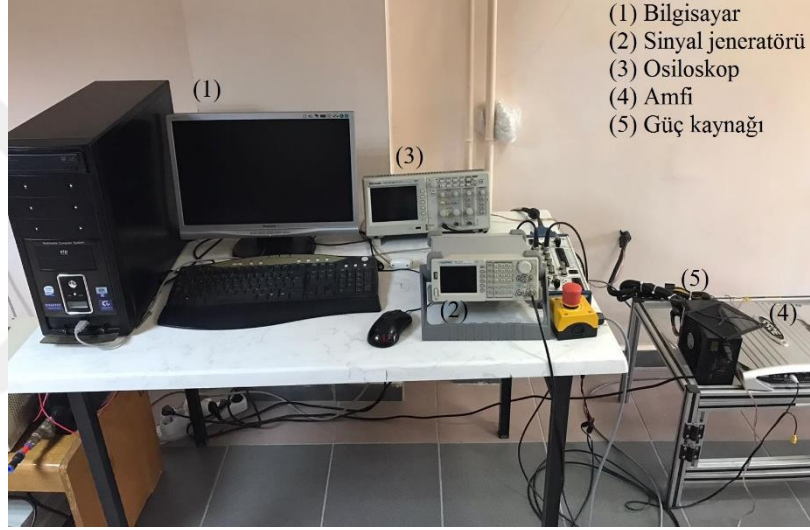
Sentetik jet oluşturmak için gerekli olan hoparlör aktüatör Şekil 13’de verilmiştir. Jameson marka JW-36 model 1000W güce sahip woofer tip hoparlör aktüatör kullanılmış ve üzerinde kapalı hacim oluşturmak için Pleksiglas plaka kapak yerleştirilmiştir. Kapak merkezine 34mm çapında lüle tipi bir dairesel delik delinmiştir.



Şekil 13. Hoparlör aktüatör

2.1.2. Sentetik Jet Aktüatör Sinyal Sürüm Sistemi

Aktüatör sürülmesinde kullanılan cihazlar Şekil 14’te gösterilmiştir. Sinyalleri oluşturmak için sinyal çizim programı olan Easywave programı kullanılarak çizilmiştir. Bilgisayarda çizilen sinyaller AA Tech marka AWG-1010 model sinyal jeneratörüne gönderilmiştir. Sürülen sinyalleri gözlemek için 2 kanallı Tektronix marka TDS2022B model osiloskop kullanılmıştır. Sürüm sinyalini yükseltmek için 800 W’a kadar güç çekebilen Boss marka CX750 model ses amfisi kullanılmıştır. Ses amfisi 1200 W’lık bir güç kaynağı kullanılarak çalıştırılmıştır.



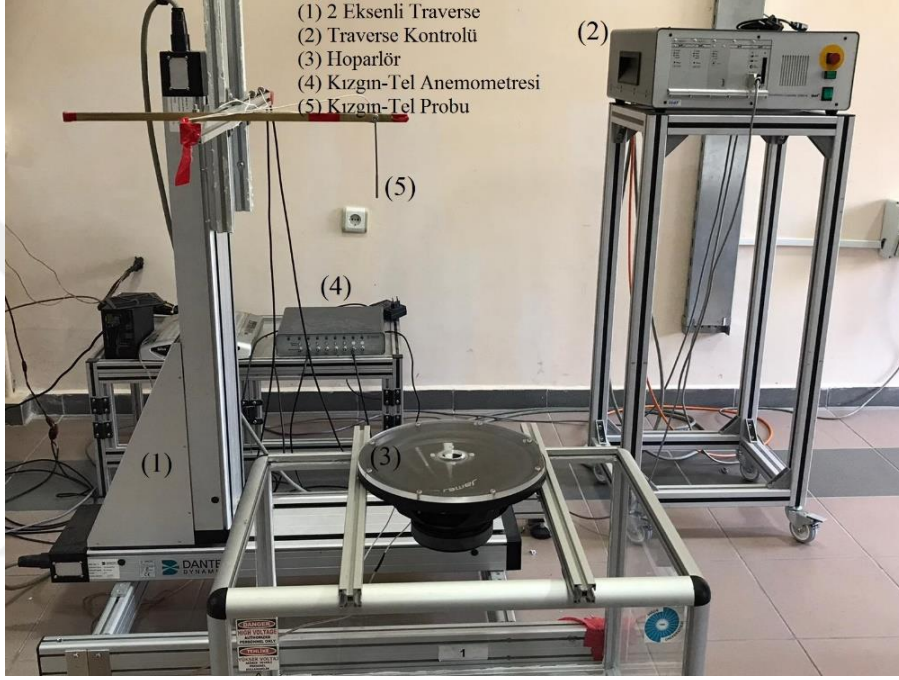
Şekil 14. Sentetik jet aktüatör sinyal sürüm sistemi cihazları

2.1.3. Kızgın-Tel Anemometresi ile Hız Ölçüm Sistemi

Sentetik jetin akış alanı hız karakteristiğinin ortaya konulabilmesi amacıyla Şekil 15’te verilen Dantec Dynamic marka Multichannel model kızgın-tel anemometresi kullanılmıştır. Bilgisayar kontrollü Dantec Dynamic marka 2 eksenli hareket kabiliyetli traverse mekanizması, hız ölçümü için kullanılan kızgın-tel probunu istenilen konuma getirmek amacıyla kullanılmıştır. 610 mm x 610 mm uzunluğunda hareket aralığına ve 6,25 µm hareket çözünürlüğüne sahip olan traverse mekanizmasının kontrolü bir kontrol ünitesi tarafından sağlanmaktadır.

Anlık hız ölçümleri yapılabilmesi için anemometrenin yazılımı olan MiniCTA’da ölçüm koordinatları ayarlanarak x-y ekseninde traverse mekanizması yardımıyla sıcak-tel probunun konumlandırılması sağlanmıştır. Ölçüm noktalarındaki hız verilerinin alınması

için National Instrument marka PCI-6220 model veri toplama kartı kullanılmıştır. 55P11 model tek telli prob yardımıyla 2 kHz örnekleme frekansında 5 saniye boyunca toplam 10000 anlık hız verisi alınarak hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Schlitzknecht marka MonoAir500 mikromanometre kullanılarak lüle tipi kalibratörde kızgın-tel probunun kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Mikromanometre ± 200 Pa ölçüm aralığında 0,1 Pa çözünürlüğe, $\pm 0,5$ Pa doğruluğa sahiptir.

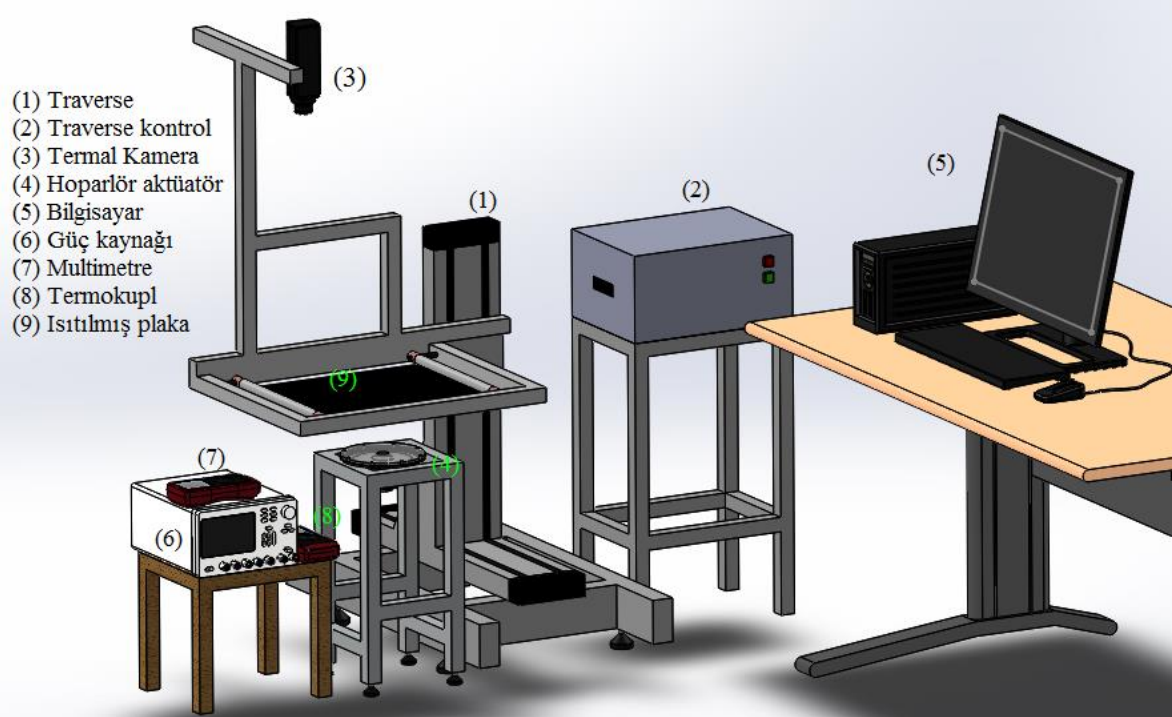


Şekil 15. Kızgın-Tel hız ölçüm sistemi görünümü

2.1.4. Isı Transfer Deney Düzeneği

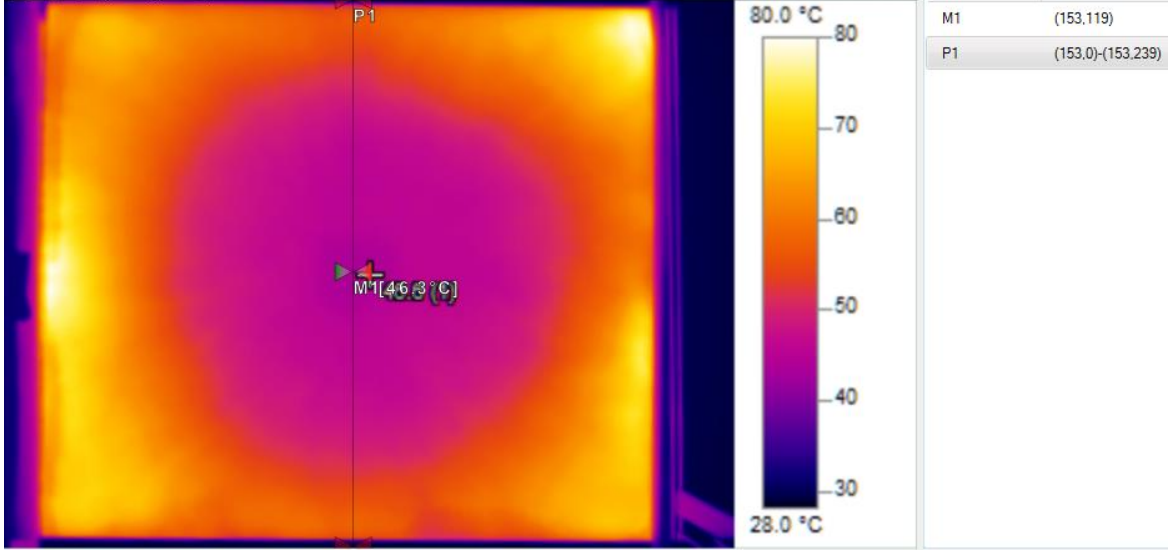
Şekil 16'da ısı transferi deney düzeneğinin şematik resmi görülmektedir. Bu deney düzeneği sentetik jet, homojen olarak ısıtılmış plaka, termal kamera, iki eksenli traverse mekanizması, bilgisayar, termokupl, multimetre ve güç kaynağından oluşmaktadır.

Repco Technology firmasından alınan 0,03 mm kalınlığa ve 305 mm genişliğe sahip paslanmaz çelik film, iki ucundan 20 mm çapındaki iki adet bakır çubuklara sarılarak mekanik olarak gerdirilmiştir. Sac yüzey üzerindeki parlaklığın giderilmesi ve termal kameranın görüntüleri daha iyi yakalayabilmesi için levhanın üst yüzeyi siyah renkli mat bir boya ile boyanmıştır. 10 mm çapa ve 2000 mm uzunluğa sahip kablonun bir ucu Sorensen Ametek XG30-50 model güç kaynağına diğer ucu bakır çubuklara bağlanmıştır.



Şekil 16. Isı transferi deney düzeneğinin şematik resmi

Güç kaynağındaki çıkış değeri ile bakır çubuğun bağlandığı noktadaki değerler multimetre ile ölçülüp karşılaştırılmıştır. Voltajdaki azalma nedeniyle bakır çubuk üzerinden voltaj değerleri alınmıştır. Güç kaynağı sabit 61 A akımda iken gerilim değerlerinin 2,42 – 2,96 V aralığında deneyler gerçekleştirilmiştir. Sentetik jet aktüatörü 375 x 305 mm boyutlarındaki homojen olarak ısıtılmış levha yüzeyine dik ve alttan bakacak bir şekilde su terazisi ile yüzeye paralel olarak konumlandırılmıştır. Ortam ve jet sıcaklık değerleri termokupl aracılığıyla ölçülmüştür. 320 x 240 piksel çözünürlüğe sahip olan Testo 885-2 model termal kamera kullanılarak homojen olarak ısıtılan plakanın yüzey sıcaklık dağılımı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 17’de termal kameranın yüzey görüntüleme için kullandığı IRSoft programındaki plaka görünümü ve çalışma alanı gösterilmiştir. Burada 305 mm genişliğe sahip olan levhaya karşılık gelen ve bakır çubuklara paralel P1 çizgisi ile gösterilen 240 piksele karşılık geldiği görülmektedir. P1 çizgisi koordinatları (153,0) alt nokta, (153,239) üst noktayı ifade etmektedir. Hedef plaka homojen sabit sıcaklığa erişmesi için 3-5 dk civarında beklenmekte ve ardından sentetik jet sürülmektedir. M1 merkez noktasındaki sıcaklığın zamanla değişimi izlenir ve sıcaklığın sabitlenmesi beklenir. Ardından termal kamera ile 2 s süresince, saniyede 20 fotoğraf olmak üzere toplam 40 fotoğrafın video kaydı alınmıştır.



Şekil 17. Isıtılmış film levha çalışma aralıklarının görünümü

2.2. Isı Tranfer Denklemleri ve Boyutsuz Sayılar

Isı tranfer deneylerinde sentetik jet aktüatörü, sinüs-kare sinyaller ve sabit 10 Hz frekansında sürülmüştür. Sıcaklık ölçümlerinden alınan veriler kullanılarak enerji denkleminde ısı taşınım katsayısı elde edilmiştir. Isı taşınım katsayısından da yerel ve ortalama Nusselt sayısı dağılımları elde edilmiştir. Yerel ısı tranfer katsayıları aşağıda verilen enerjinin korunumu denklemi (2.1) ile hesaplanmaktadır (Çalışkan vd., 2014).

$$q''_{\text{elektrik üretilen}} = q''_{\text{taşınım}} + q''_{\text{üst doğal taş}} + q''_{\text{iletim}} + q''_{\text{radyasyon}} \quad (2.1)$$

$$q''_{\text{iletim}} = k \frac{\Delta T}{t} \quad (2.2)$$

k levhanın ısı iletim katsayısı, ΔT levha boyunca sıcaklık farkı ve t plaka kalınlığıdır. Burada t kalınlığı çok ince olduğundan dolayı yanal iletim (q''_{iletim}) Lytle ve Webb, (1994) çalışmasında ihmal edilmiştir. Böylece denklem 2.3 aşağıdaki gibidir;

$$E.I = h_t.A_{\text{alt}}(T_y - T_j) + h_{dt}.A_{\text{üst}}(T_y - T_{\phi}) + \sigma.\epsilon.(A_{\text{alt}} + A_{\text{üst}})(T_y^4 - T_{\phi}^4) \quad (2.3)$$

Denklemdaki $q''_{\text{elektrik üretilen}}$ ısı akısını, E ısıtıcının voltajını, I ısıtıcının akımını ifade etmektedir. Denklemdaki $q''_{\text{taşınım}}$ katı bir yüzey ve bu yüzeye temas eden hareket halindeki

sıvı veya gaz (akışkan) arasında gerçekleşen taşınım ile ısı transferi şeklindedir. Taşınım ile ısı transferi denklemindeki h_t ısı taşınım katsayısını, A_{alt} ve $A_{üst}$ homojen olarak ısıtılmış paslanmaz levhanın alt ve üst yüzey alanını ifade etmektedir. T_y ısıtılmış levhanın herhangi bir konumdaki yüzey sıcaklığını, $T_ç$ çevre sıcaklığını ve T_j ise jetin çıkış sıcaklığını ifade etmektedir. h_{dt} doğal taşınım katsayısını, $q''_{üst}$ doğal taşınım ise birim alandan transfer olan doğal taşınım ısı transferini ifade etmektedir. Denlemin sonundaki $q''_{radyasyon}$ ise ışıyım ile olan ısı akışını belirtmektedir. Buradaki σ , Stefan Boltzmann sabitini ($5.67 \times 10^{-8} [W/(m^2K^4)]$), ϵ yayma katsayısını ifade etmektedir.

$$h = \frac{\frac{E.I}{A} - h_{dt} \cdot (T_y - T_ç) - \sigma \cdot \epsilon \cdot 2(T_y^4 - T_ç^4)}{(T_y - T_j)} \quad (2.4)$$

Isı taşınım katsayısını hesaplayabilmek için öncelikle doğal ısı taşınım katsayısının hesaplanması gerekmektedir. Doğal taşınım ısı transfer katsayısı;

$$h_{dt} = \frac{Nu_L \cdot k}{L} \quad (2.5)$$

Doğal taşınım film sıcaklığı hesaplanması;

$$T_f = \frac{T_{yort} + T_ç}{2} \quad (2.6)$$

Burada T_{yort} ortalama yüzey sıcaklığını, $T_ç$ ise çevre sıcaklığını ifade etmektedir.

Beta genişleme katsayısı değerinin bulunması;

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (2.7)$$

Karakteristik uzunluğun bulunması;

$$L_c = \frac{A_s}{P_w} \quad (2.8)$$

Burada A_s levha yüzey alanını, P_w ıslak çevreyi ifade etmektedir.

Rayleigh sayısının hesaplanması;

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{yort} - T_c) \cdot L_c^3}{\nu^2} \cdot Pr \quad (2.9)$$

2.9 denkleminde $10^4 < Ra < 10^7$ şartı sağlandığından Nusselt korelasyonu aşağıdaki gibi seçilmiştir:

$$Nu_L = 0,27 \cdot Ra_L^{0,25} \quad (2.10)$$

Hesaplanan bu değerler denklem 2.5'te yerine konularak doğal taşınım katsayısı hesaplanmış olur. (2.4) denkleminin hesaplanması ile zorlanmış taşınımına ait ısı transfer katsayısı, boyutsuz ısı transfer sayısı olan Nusselt ifadesinde yazılırsa;

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad (2.11)$$

Nu ifadesi Nusselt sayısını, D lüle çapını, k ise akışkanın ısı iletim katsayısını ifade etmektedir. k ısı iletim katsayısı, 1 atm basınçtaki havanın özelliklerinden interpolasyon yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

2.2. Sentetik Jet Boyutsuz Sayılar

Sentetik jet tanımlamasında iki denklem tanımlanmaktadır (Qayoum vd., 2010). Bunlar L boyutsuz strok uzunluğu ve Re_j Reynolds sayısı;

$$L = \frac{L_0}{D} \quad (2.12)$$

Burada, L_0 sentetik jetin strok uzunluğunu, D ise lüle çapını ifade etmektedir.

$$Re_j = \frac{V_0 \cdot D}{\nu} \quad (2.13)$$

Burada, V_0 üfleme hızının bir periyot boyunca (T) olan zaman ortalamasıdır. ν akışkanın kinematik viskozitesini ifade etmektedir.

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_0(t) dt \quad (2.14)$$

L_0 sentetik jetin strok uzunluğu; $L_0 = V_0.T$ şeklinde ifade edilmektedir. Bu, üfleme stroğu boyunca lüleden dışarıya gönderilen akışkan kolunun uzunluğunu belirtmektedir.

Bu boyutsuz sayılara ek diğer önemli bir boyutsuz parametre ise Stokes sayısıdır.

$$S = \sqrt{\frac{2\pi Re_j}{L}} \quad (2.15)$$

Bir diğer önemli boyutsuz sayı F^+ ile ifade edilen boyutsuz uyarma frekansısıdır.

$$F^+ = \frac{f_e D}{V_0} \quad (2.16)$$

Bu ifade içerisinde yer alan f_e simgesi, hoparlör aktüatörün oluşturmuş olduğu sentetik jetin lüleden çıkması esnasında, birim zamanda yaptığı üfleme ve emme hareketi sayısıdır (Hz).

Tablo 2’de bu çalışmada kullanılan 34 mm lüle geometrisinde oluşturulan sentetik jet akışına ait boyutsuz sayılar, Reynolds sayısı, strok uzunluğu ve Stokes sayıları değerleri verilmiştir. Hoparlör aktüatörü 8 farklı sinyal tipinde ve sabit 10 Hz frekansında sürülmüştür. Bu sinyaller için Reynolds sayıları 8007 ile 18506 arasında elde edilmiş olup Stokes sayıları sabittir. Boyutsuz uyarma frekansı 0,04 ile 0,10 aralığındadır.

Tablo 2. Bu çalışmada kullanılan parametrelere göre elde edilen boyutsuz sayıların dağılımı

Sinyal Yapısı	V_0	Re_{jet}	L_0	L	Stokes	F^+
T1	5,34	12109	0,53	15,71	69,57	0,06
T2	3,53	8007	0,35	10,39	69,57	0,10
T3	7,18	16276	0,72	21,12	69,57	0,05
T4	7,93	17971	0,79	23,32	69,57	0,04
T5	7,97	18060	0,80	23,43	69,57	0,04
T6	6,57	14897	0,66	19,33	69,57	0,05
T7	8,16	18506	0,82	24,01	69,57	0,04
T8	4,67	10582	0,47	13,73	69,57	0,07

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada yapılan deneysel ölçümlerden alınan verilerden oluşturulmuş grafikler ve bu grafiklerden elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Bu çalışma kapsamında iki farklı deney düzeneği kurulmuştur. Öncelikle hoparlör tipi sentetik jet aktüatörü tarafından oluşturulmuş jetin hız ölçümleri kızgın-tel anemometresi kullanılarak elde edilmiştir. Hız ölçüm deneyleri farklı sıralı sinyallerde ve farklı y/D mesafelerinde gerçekleştirilmiştir. Ardından ikinci deneyde, 34 mm çaplı lüle geometrisine sahip çıkış deliğinin oluşturduğu sıralı sentetik jetlerin etki ettiği hedef plaka üzerindeki yüzey sıcaklık dağılımları termal kamera ile ölçülmüştür. Bu çalışmadaki kriterler; sinyal yapısı, zaman boşluğu ve y/D mesafesi olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları, sıralı sentetik jet akış alanı hız dağılımı ve sıralı çarpan sentetik jet ısı transferi yani Nusselt sayısı dağılımları olmak üzere iki ana başlık altında ele alınmıştır.

3.1. Sentetik Jet Akış Alanı Anlık Hız Dağılımları

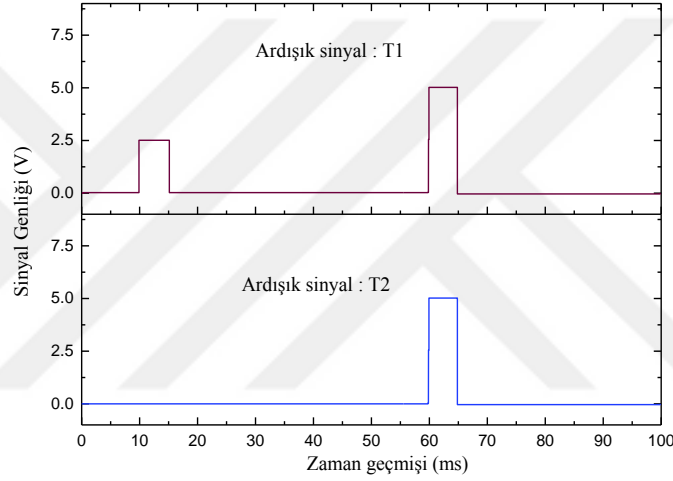
Burada ardışık olarak üretilen sentetik jetlerin 8 farklı sinyal yapısının anlık hız dağılımları farklı y/D mesafelerinde incelenmiştir. Oluşturulan bu ardışık iki jetin genişlik, şiddet ve aralarındaki zaman boşlukları farklı olması sayesinde bu jetlerin jet merkez eksenini boyunca ilerleyerek belirli mesafelerde birbirleriyle temas etmeleri ve birleşmeleri amaçlanmıştır. Bu kapsamda çeşitli dalga geometrileri ve dalga yapılarının şekli, genliği, şiddeti ve aralarındaki zaman boşluğu gibi parametrelerinin farklı değerleri için deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada incelenen ardışık dalga yapılarının parametrelerine ait değerler Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Ardışık iki dalga yapısının parametre değerleri tablosu

Jet çıkış geometrisi:	Dar lüle
Jet çıkış çapı:	34 mm
Sinyal yapısı:	T1-T8 arası toplam 8 farklı dalga yapısı
Sinyal frekansı:	10 Hz (zaman boşluklu dalga)
Sinyal jeneratörü çıkış gerilimi:	5 V _{pp} (öndeki dalga 2.5 V _{pp} veya 3 V _{pp})
Prob konumu:	Jet eksenini boyunca ($y/D=1-15$ arası) anlık hız dağılımları
İncelenen parametre:	Farklı genliğe sahip iki dalga ile ardışık jet oluşturulması

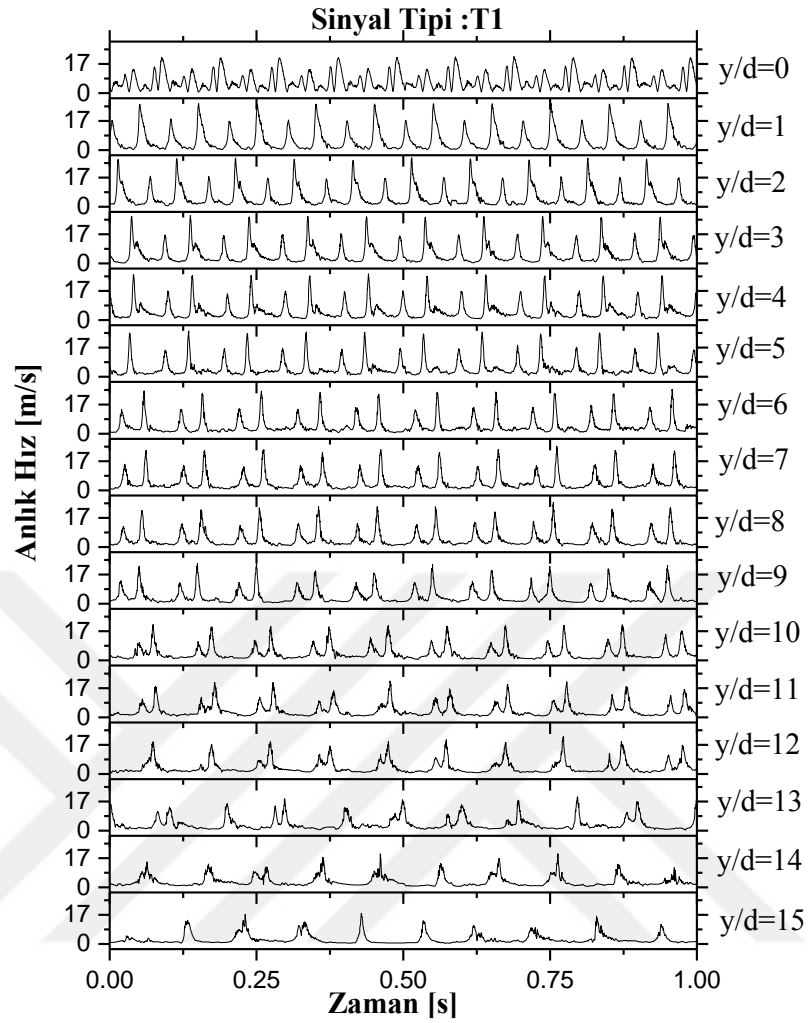
3.1.1. İki Kare Dalga ile Ardışık Jet Oluşturulması

İlk olarak ardışık sinyallerin oluşturdukları farklı hızlara sahip jetlerin belirli mesafelerde birleşmelerinin hedeflendiği bu çalışmada farklı genlikli iki yarım kare sinyal kullanılmıştır. Bu sinyallerden ikincisinin ilk sinyale göre genliğinin daha yüksek olması daha yüksek hıza sahip jet üretilmesidir. T1 ile isimlendirilen sinyal yapısının ilki $2,5 V_{pp}$, ikincisi ise $5 V_{pp}$ genliğe sahip yarım kare sinyallerdir. Ardından bu ardışık sinyallere referans olması için T2 ile isimlendirilen tekli yarım kare sinyal oluşturulmuştur. Her iki sinyal yapısı Şekil 18’de gösterilmiştir.



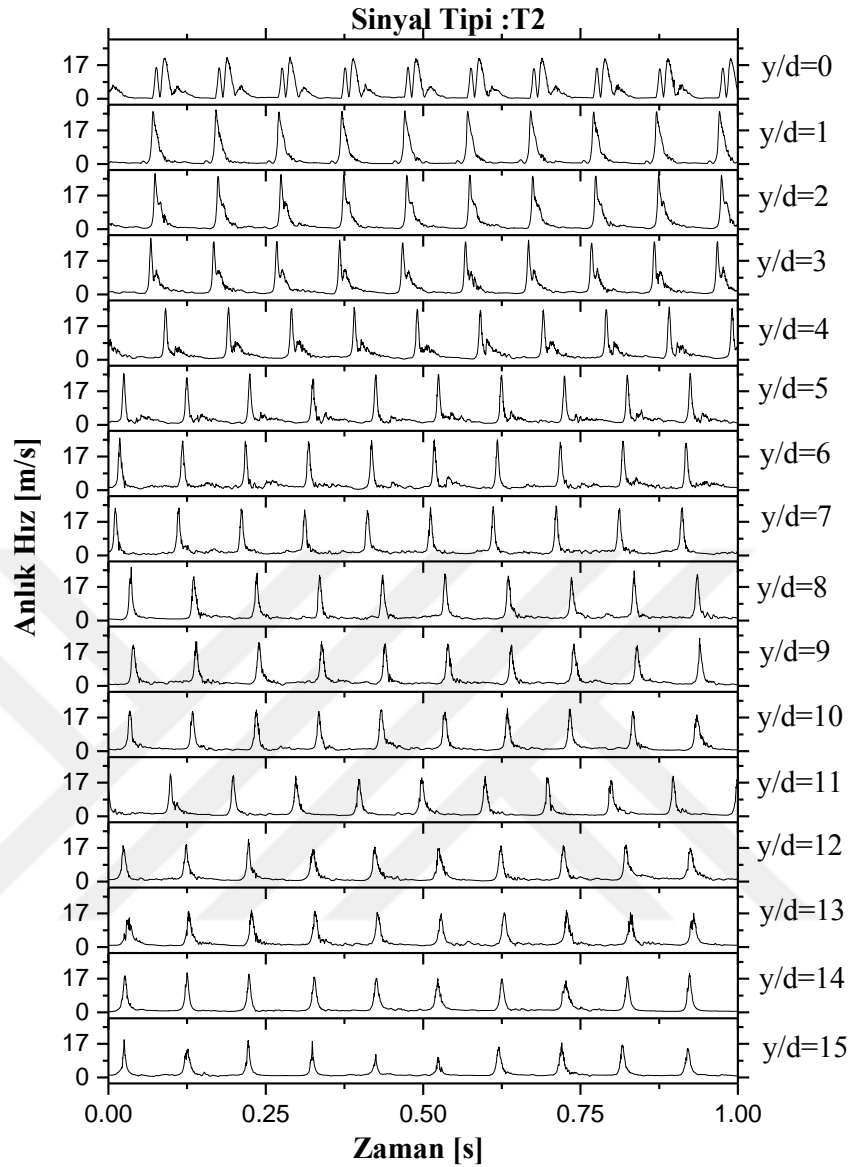
Şekil 18. Ardışık yarım kare sinyal ve referans tekil sinyal (Akansu vd., 2018)

Şekil 19’da anlık hız grafiklerinde görüldüğü gibi probun $y/D=1$ olduğu konumda eşit aralıklarla biri küçük biri büyük iki jet hızları elde edilmiştir. y/D mesafesinin artmasıyla birlikte yüksek hıza sahip olan ikinci jet tepesinin düşük hıza sahip olan ilk jet tepesine giderek yaklaşmakta ve $y/D=14$ konumunda birleşmektedir. Bu birleşme etkisiyle iki jetin daha geniş ve daha fazla çalkantılı bir jet oluşturdukları görülmektedir.



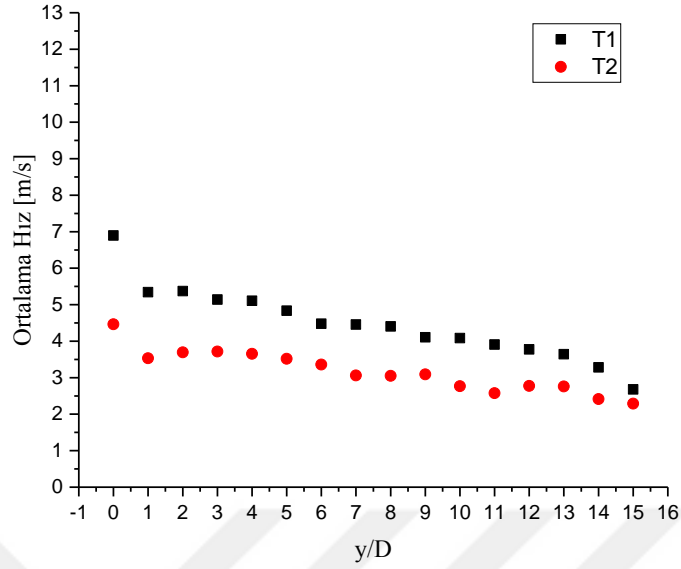
Şekil 19. T1 tipindeki sinyale ait hız-zaman geçmişi grafiği (Akansu vd., 2018)

Şekil 20’de verilen T2 tipindeki sinyalin anlık hız grafikleri y/D mesafesinin artmasıyla birlikte şiddetinin azaldığını ancak jet yapısının bozulmadığı görülmektedir. T1 tipindeki sinyalde ise birleşik jetin şiddetini koruması ile bozulmaların fazla olduğu görülmektedir. Bu bozulmaların en aza indirilmesi ve birleşme etkisinin erken gerçekleşebilmesi için farklı yapılara sahip sinyaller (T3-T8) incelenmiştir.



Şekil 20. T2 tipindeki sinyale ait hız-zaman geçmişi grafiği (Akansu vd., 2018)

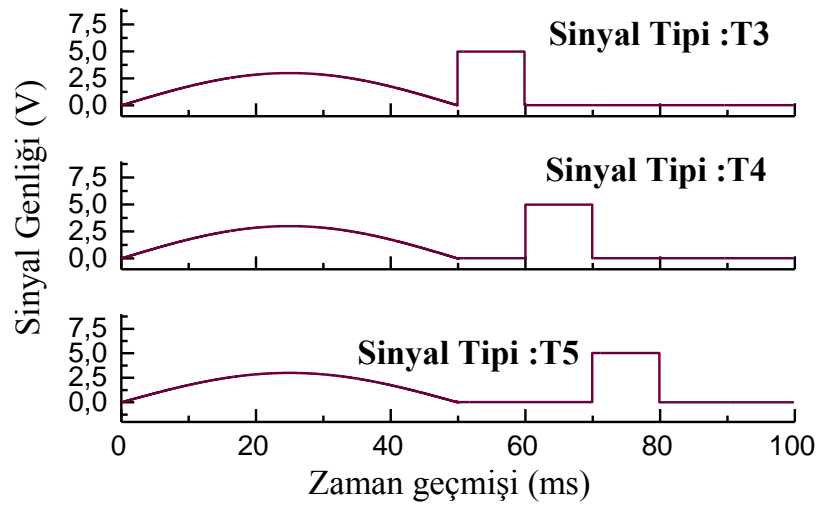
Şekil 21’de T1 ve T2 sinyallerine ait ortalama hız değerleri grafiği sunulmuştur. Tekli ve ardışık sinyallerin ortalama hız değerleri karşılaştırıldığında ardışık sinyal yapısına sahip T1 tipi sinyali tekli sinyale sahip T2 tipi sinyalinden daha yüksek ortalama hız değerleri elde edilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi y/D mesafesi arttıkça her iki sinyalin ortalama hız değerlerinde azalma meydana gelmektedir. $y/D = 0$ olduğu konumda ise en yüksek hız değerlerinin ortaya çıkmasının sebebi bu noktada kızgın-tel probunun emme fazında negatif yöndeki akış hızlarını da pozitif hız değeri olarak ölçmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 21. T1 ve T2 sinyallerinin ortalama hız grafiği

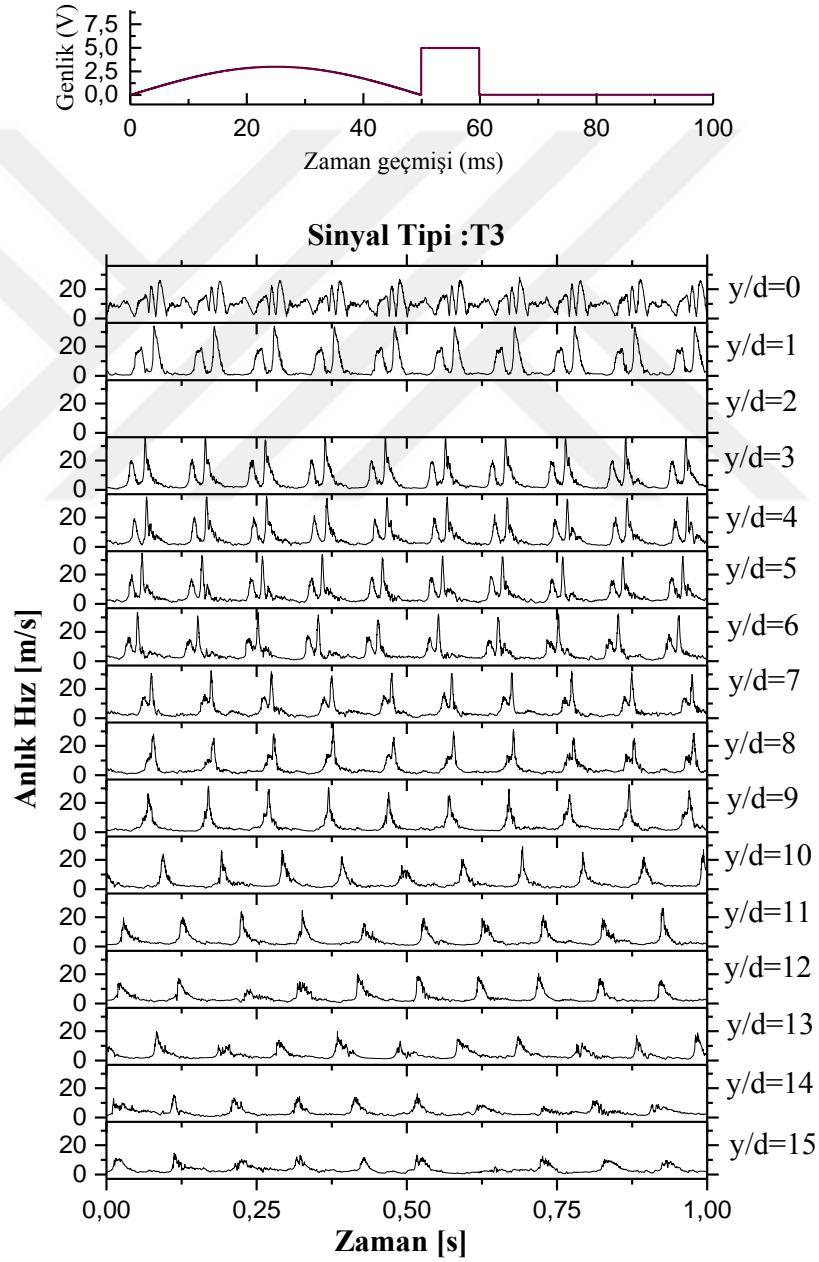
3.1.2. Farklı Genliğe Sahip Bir Yarım Sinüzoidal ve Bir Yarım Kare Dalga ile Ardışık Jet Oluşturulması

Burada farklı genliğe sahip sinüzoidal ve kare sinyal yapısına sahip ardışık jetlerin anlık hız durumları incelenmiştir. Geniş bir periyoda sahip olan sinüzoidal yarım dalga ile dar yarım kare dalganın farklı zaman boşluklarındaki 3 sinyal oluşturulmuştur. Bu sinyaller Şekil 22'de verilmiştir.



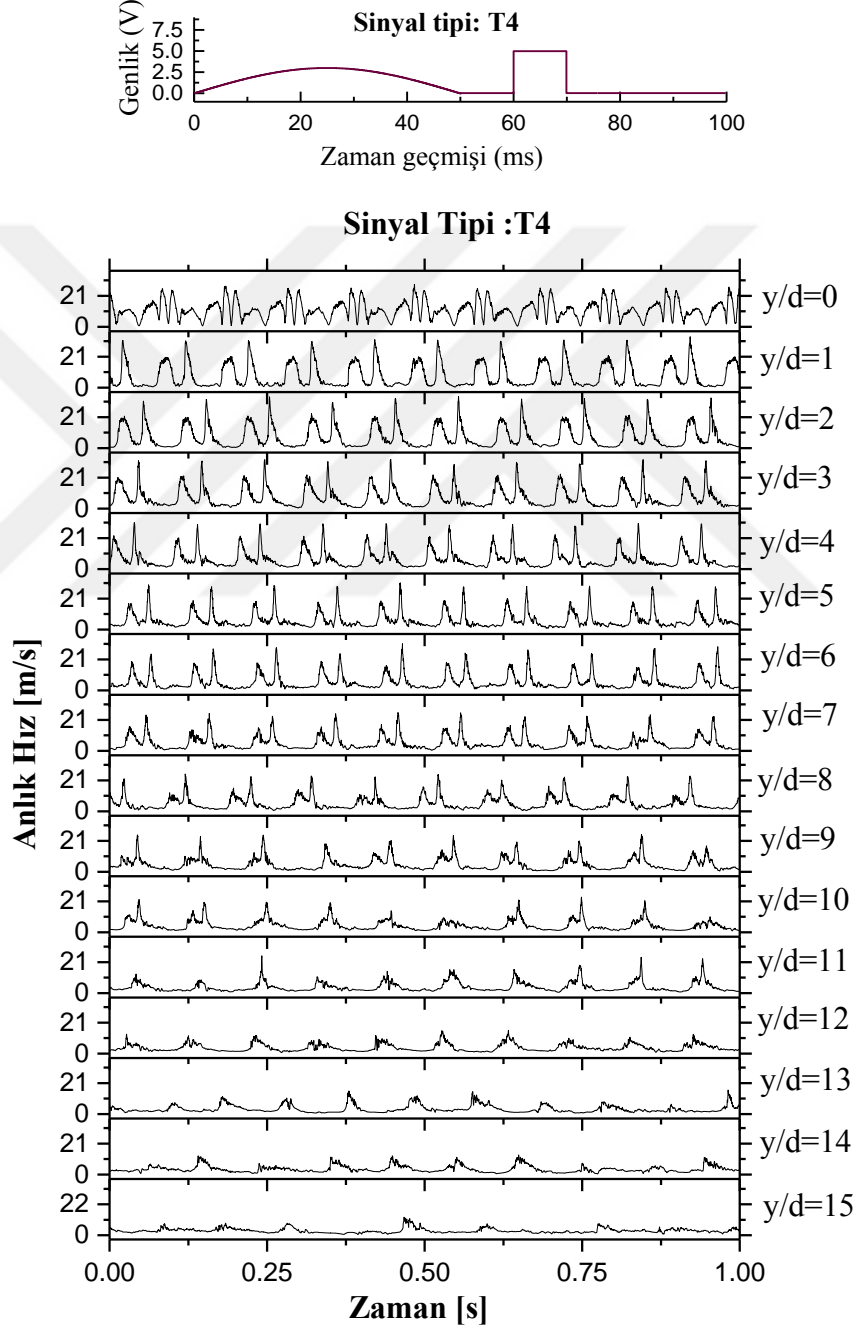
Şekil 22. Farklı zaman boşluklu yarım sinüzoidal ve yarım kare dalga ile oluşturulan ardışık sinyaller (Akansu vd., 2018)

Sırasıyla bu sinyallere ait anlık hız grafikleri incelenecek olursa Şekil 23'te T3 tipindeki sinyalin hız değişimi görülmektedir. T3 tipindeki sinyal görüldüğü üzere birbirine bitişik yarım sinüzoidal sinyal ve yarım kare sinyalden oluşmaktadır. Bu sinyaller birbirine yakın iki jet üretmekte ve y/D mesafesi arttıkça jetler arasındaki mesafe azalmaktadır. Kare sinyal ile oluşturulan jetin sinüzoidal sinyal ile oluşturulan jete giderek yaklaşmasıyla $y/D=7-8$ civarında birleşmektedir. Bunun akabinde $y/D=9$ konumunda tekli bozulmamış birleşik bir jet elde edildiği görülmektedir.



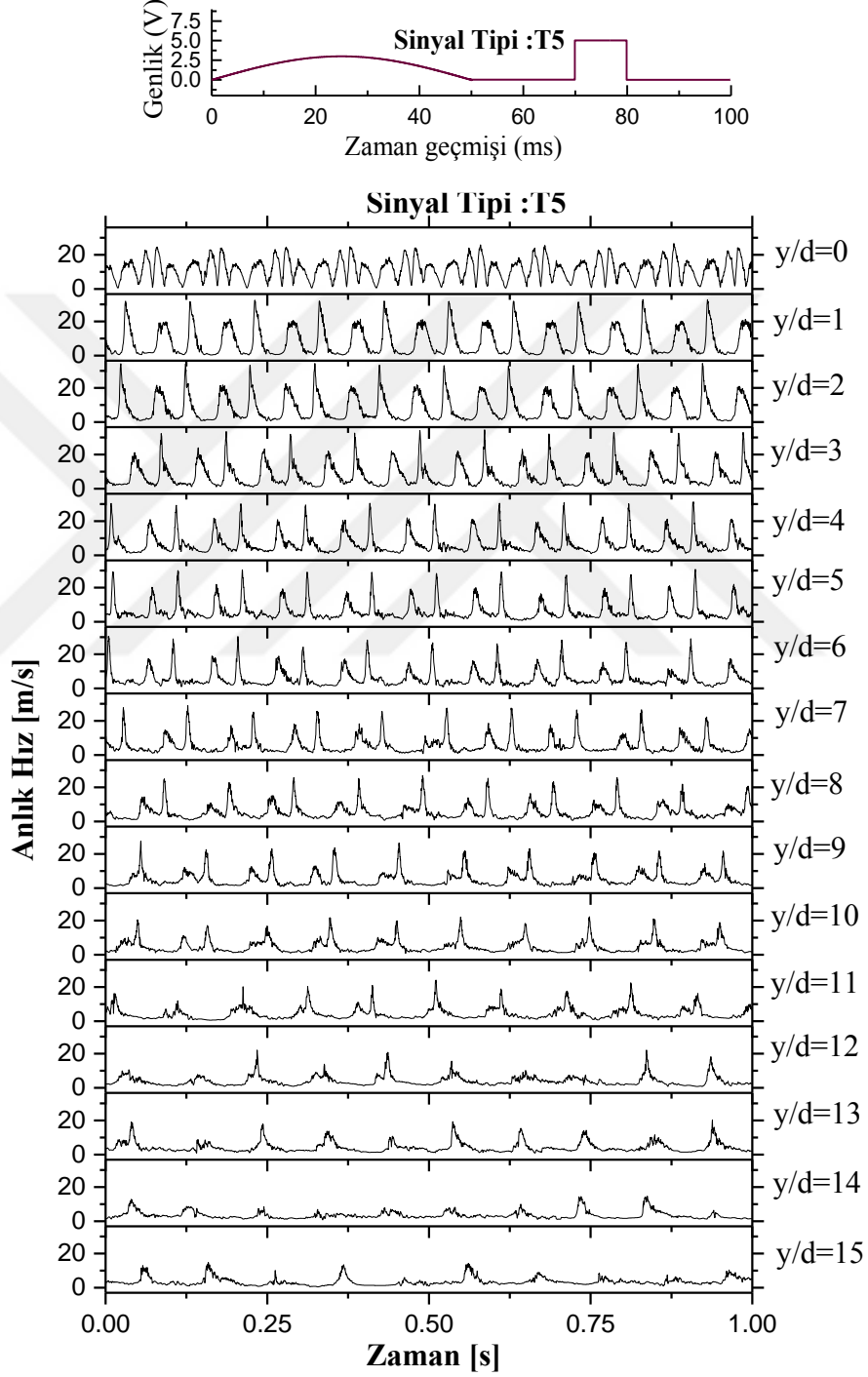
Şekil 23. T3 tipindeki sinyale ait hız-zaman geçmişi grafiği (Akansu vd., 2018)

Şekil 24'te T4 tipindeki sinyale ait hız dağılımları verilmiştir. Burada yarım sinüzoidal sinyal ile yarım kare sinyali arasında 10 ms'lik bir zaman boşluğu bulunmaktadır. İki sinyal arasındaki boşluktan dolayı jetlerin birbirine yaklaşması gecikmekte ve birleşme $y/D=10$ gibi bir konumda gerçekleşmektedir.



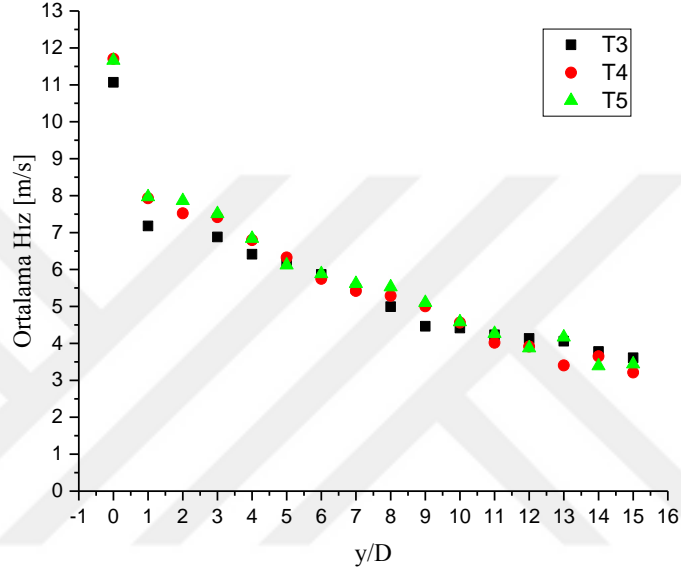
Şekil 24. T4 tipindeki sinyale ait hız-zaman geçmişi grafiği (Akansu vd., 2018)

Şekil 25'te verilen T5 tipindeki sinyalin hız değerleri verilmiştir. Görüldüğü üzere iki sinyal arası boşluğun 20 ms olduğu ve bu nedenle iki sinyalin birleşik jet oluşturması $y/D=11$ gibi bir konumda gerçekleşmektedir.



Şekil 25. T5 tipindeki sinyale ait hız-zaman geçmişi grafiği (Akansu vd., 2018)

Buradaki 3 farklı sinyalin anlık hız grafikleri karşılaştırıldığında en iyi birleşik jeti T3 tipindeki sinyalin oluşturduğu görülmektedir. Bu durum birleşmenin daha kısa mesafede gerçekleşmesiyle mümkün olmuştur. Birleşmenin daha kısa mesafede gerçekleşmesi birleşik jetteki bozulmayı azalttığını ve daha güçlü birleşik jetlerin üretilebileceğini ortaya koymaktadır.



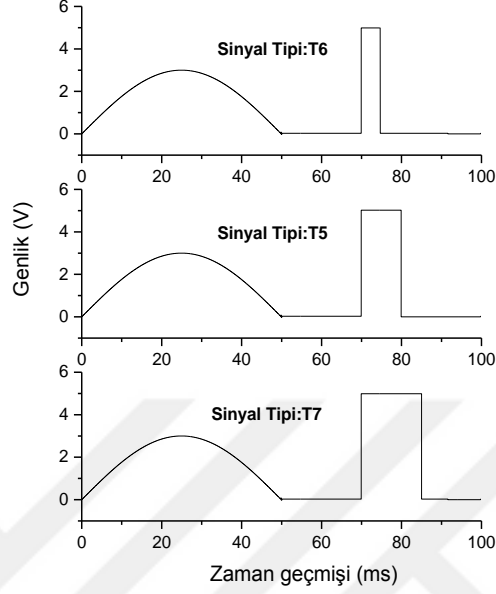
Şekil 26. T3, T4 ve T5 sinyallerine ait ortalama hız grafiği

Şekil 26'da T3, T4 ve T5 sinyallerine ait ortalama hız grafiği verilmiştir. Her üç sinyalin ortalama hızları birbirlerine yakın değerlerde olduğu görülmektedir.

3.1.2. Ardışık Olarak Oluşturulan İki Dalga Geometrilerinin Farklı Düzenlemelerinin İncelenmesi

Yukarıda verilen T1 ve T5 dalga yapılarında birtakım düzenlemeler yapılarak yeni dalga geometrileri oluşturulmuştur. Öncelikle yarım sinüzoidal ve yarım kare sinyal yapısına sahip T5 sinyal tipinin ikinci dalga geometrisi olan yarım kare sinyalin genliği sabit tutulmuş periyot süresi ise değiştirilmiştir. Yarım kare şekilli ikinci dalganın periyot süresindeki değişimin etkisi incelenmiştir. Şekil 27'de referans alınan T5 sinyalinden oluşturulan modifiye sinyal yapıları görülmektedir. Burada T6 olarak isimlendirilen sinyal yapısında

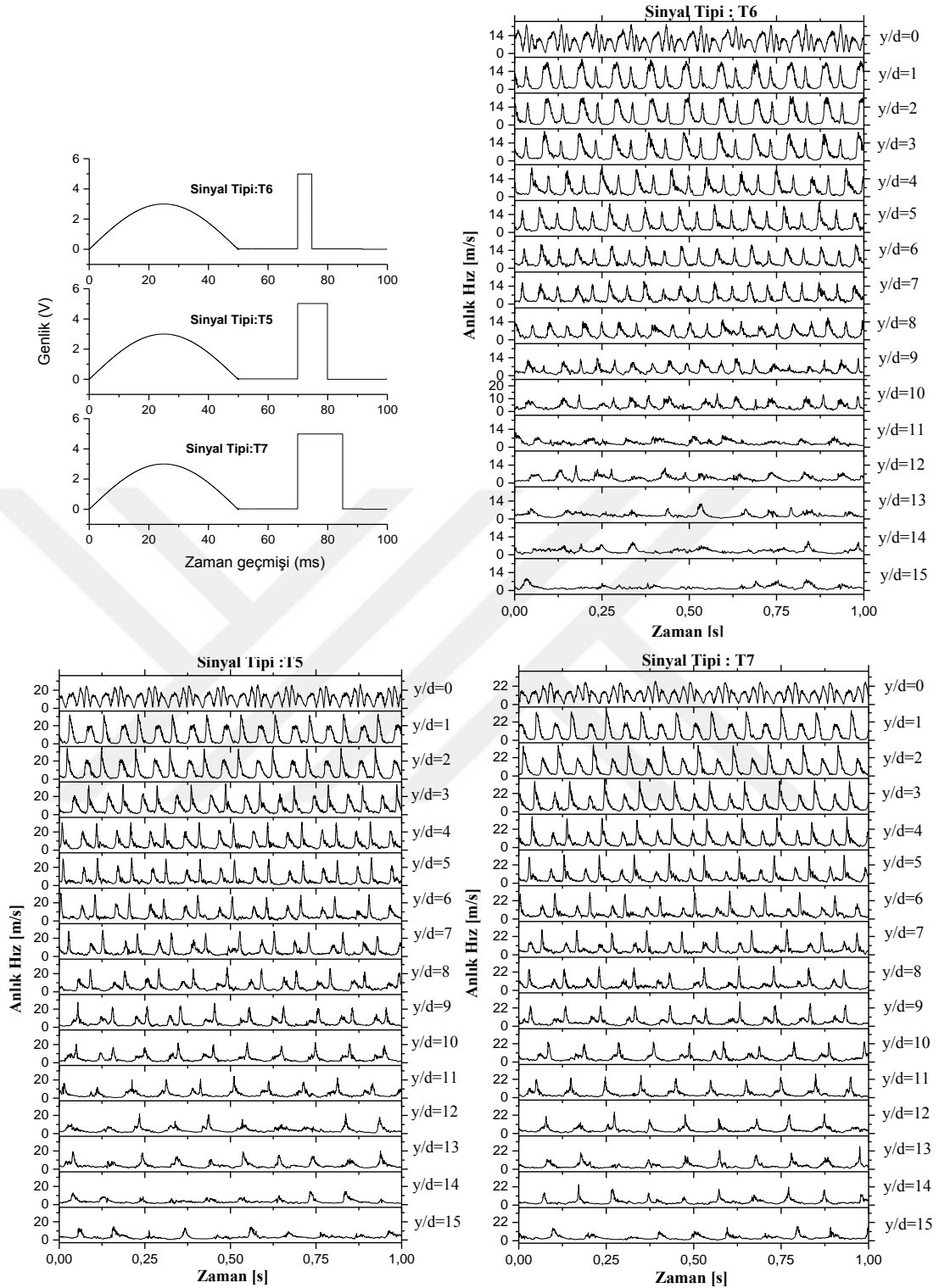
ikinci yarım kare dalganın periyodu 5 ms, T7 tipi sinyalde ise 15 ms olarak modifiye edilmiştir.



Şekil 27. T5 sinyal tipi referans alınarak oluşturulan modifiye sinyal yapıları (Akansu vd., 2018)

Şekil 28’de T6, T5 ve T7 tipi ardışık sinyal yapılarının anlık hız değişimlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Verilen grafiklerde T6 tipindeki kare sinyal 5 ms gibi kısa süre içerisinde ikinci jeti üretmekte ancak yarım sinüzoidal sinyalin oluşturduğu jetin şiddetini geçememektedir.

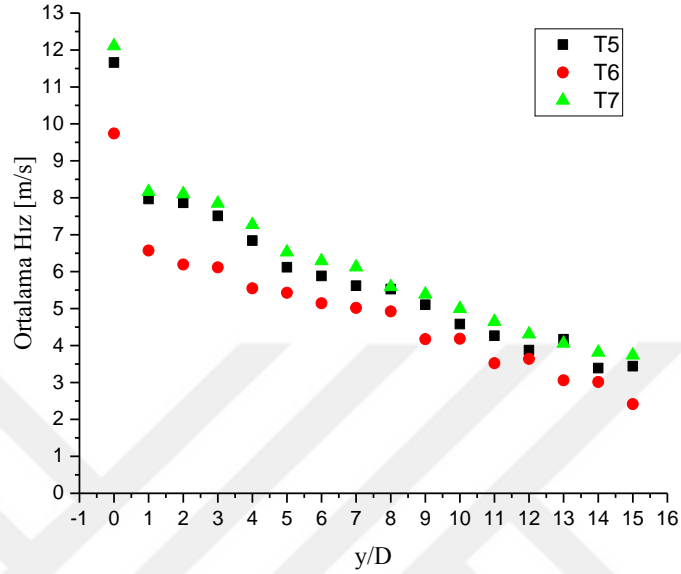
10 ms ve 15 ms periyotlu yarım kare dalga sinyaline sahip T5 ve T7 tipinde üretilen ikinci jetlerin şiddetleri daha yüksek olduğu görülmektedir. Grafikler karşılaştırıldığında ilk sinayale ait jetin hızı aynı seviyede kalırken ikinci jetin hız değeri 14 m/s’den 22 m/s seviyelerine kadar çıkmaktadır. Sinyal tipi T6’da oluşan jetlerin her ikisinde de hız değerleri aynı seviye olmakta ve artan y/D mesafelerinde bu iki jet birbirleriyle birleşmeden $y/D=10$ ’dan sonra tamamen bozulmaya başlamaktadır. Referans sinyal olan T5 tipinde iki jetin birleşmesi $y/D=12-13$ aralığındaki mesafede gerçekleşirken, birleşmiş jet yapısında da bozulmaların oluştuğu görülmektedir. Bununla birlikte T7 sinyal tipinde, ikinci jetin hızının biraz daha yüksek olmasıyla birleşmenin $y/D=11$ civarlarında başlamasına ve daha düzgün birleşmiş jet yapılarının oluşmasını sağlamaktadır.



Şekil 28. T5, T6 ve T7 tiplerindeki sinyallere ait hız-zaman geçmişi grafikleri (Akansu vd., 2018)

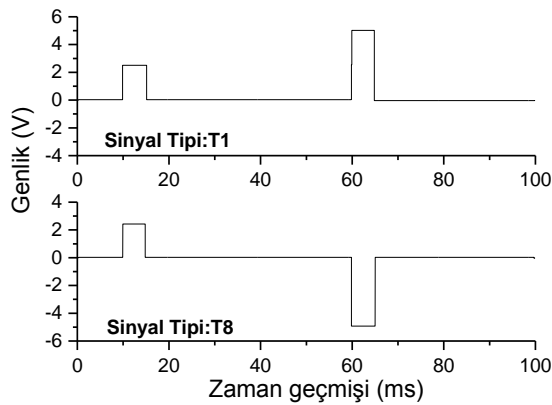
Şekil 29'da T5, T6 ve T7 sinyallerinin ortalama hız grafiği verilmiştir. 5 ms periyotlu ikinci kare dalgaya sahip olan T6 sinyalinin ortalama hız grafiği T5 ve T7 tipi sinyallerinden daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Bunun sebebi hoparlör membranının üst ölü

noktasında akışın dışarıya çıkması için yeterli süre beklemeden alt ölü noktaya çekilmesinden kaynaklanmaktadır. Üst ölü noktada bekleme süresi arttırıldığında T5 ve T7 sinyalinde olduğu gibi daha yüksek ortalama hız değerleri elde edilmiştir.



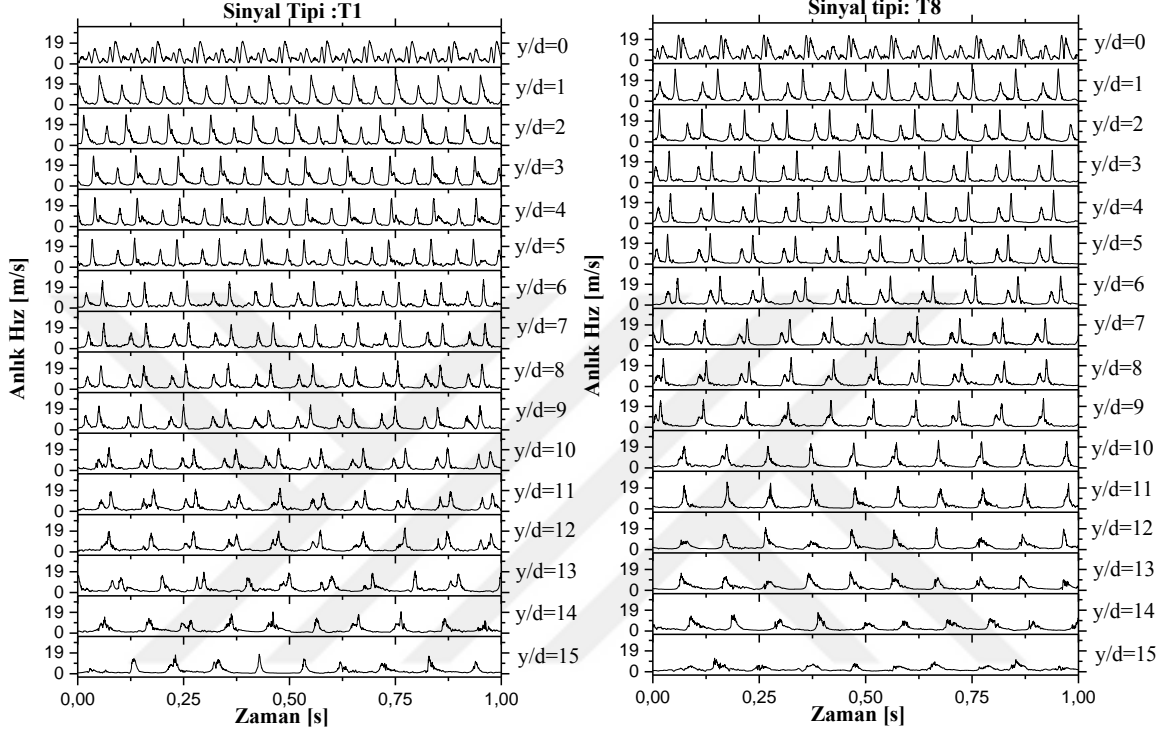
Şekil 29. T5, T6 ve T7 tipindeki sinyallerin ortalama hız grafiği

Modifiye edilmiş diğer bir sinyal tipi ise Şekil 30'da verilen T8 sinyalidir. Burada T1 sinyal tipi referans alınarak oluşturulan modifiye T8 sinyali, genliği $5 V_{pp}$ olan ikinci yarım kare dalganın genliği sabit tutularak negatif yarım dalga oluşturmasıyla elde edilmiştir.



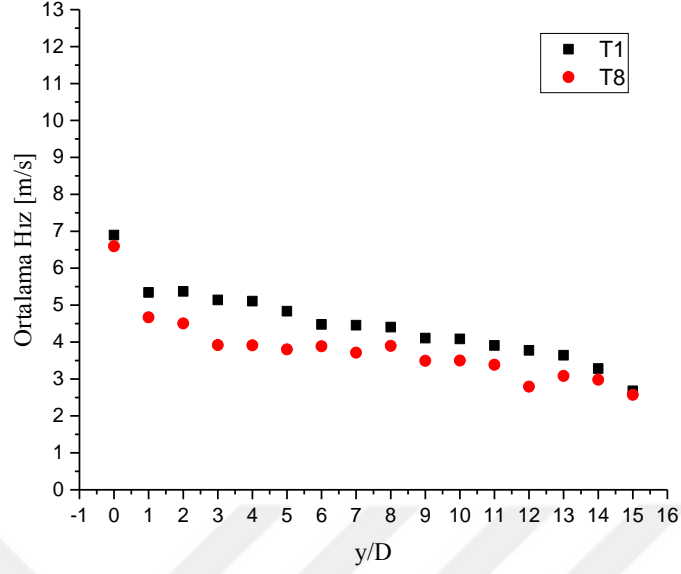
Şekil 30. T1 sinyal tipi referans alınarak oluşturulan modifiye T8 sinyali (Akansu vd., 2018)

Şekil 31’de T1 ve T8 sinyal tipine ait anlık hız grafiklerinin karşılaştırılması verilmiştir. T1 sinyal tipinde birinci jetin şiddeti ikinci jetin şiddetinin neredeyse yarısı olmasına rağmen, ilerleyen iki jetin birleşmesi $y/D=13$ ’ten sonra neredeyse birinci jetin sönümlendiği konumlarda gerçekleşmektedir. Buna karşın T8 tipindeki sinyal yapısında iki jetin birleşmesi $y/D=10$ konumunda gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 31. T1 ve T8 tiplerindeki sinyallere ait hız-zaman geçmişi grafikleri (Akansu vd., 2018)

Şekil 32’de T1 ve T8 tipi sinyallerinin ortalama hız grafiği verilmiştir. T8 tipi sinyalin ortalama hız değerleri T1 tipi sinyalinden daha düşük olduğu görülmektedir.

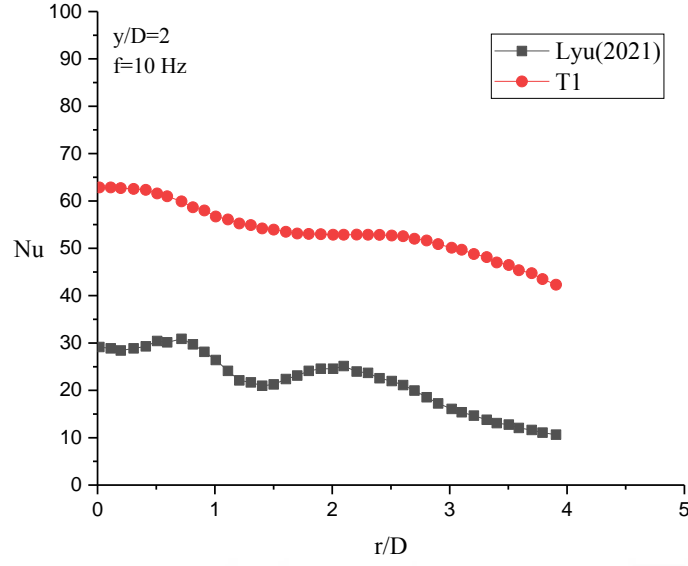


Şekil 32. T1 ve T8 tipindeki sinyallerin ortalama hız grafiği

3.2. Nusselt Sayısı Dağılımlarının Literatür Karşılaştırılması

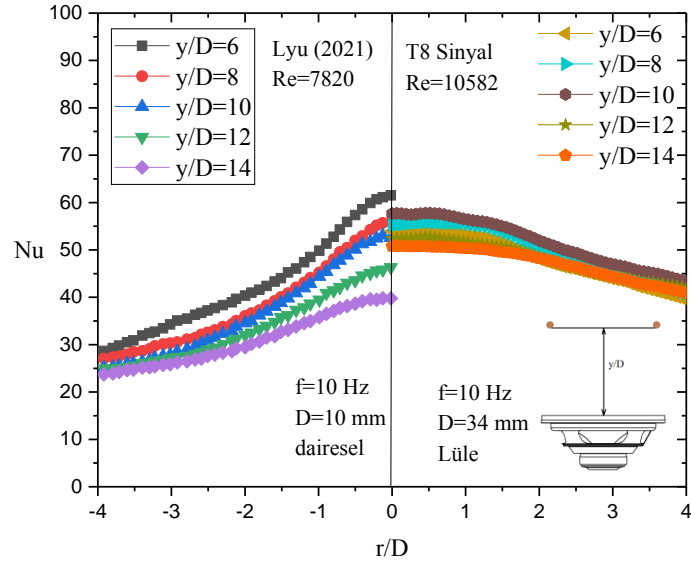
Bu çalışmada yapılan ısı transferi deneylerinden elde edilen sonuçlar verilmeden önce literatür ile uyumluluğu kontrol edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırıldığında benzer seviyelerde olduğu ve uyum içerisinde olduğu bulunmuştur.

Şekil 43'te Lyu vd. (2021) tarafından yapılan dairesel delikli, 10 Hz frekansındaki ve Reynolds sayısı 7820 olan ve piston silindir mekanizmasıyla sürülen sentetik jetin Nusselt sayısı dağılımı ile T1 sinyalinin $y/D=2$ konumundaki Nusselt sayısı dağılımının karşılaştırılması verilmiştir. Lyu vd. çalışmalarında piston-silindir mekanizması ile emme ve üfleme işlemini sırasıyla gerçekleştiren sinüs benzeri sinyal ile sentetik jet üretmiştir. Karşılaştırılma yapılabilmesi için en yakın Reynolds sayısı değeri elde edilen sinyaller ile karşılaştırılmıştır. Reynolds dışında incelenmesi gereken önemli boyutsuz sayılardan boyutsuz uyarma frekansı ve Stokes sayıları gibi parametrelerde farklılıklar olmasına karşın elde edilen dağılımların benzer olduğu bulunmuştur. Grafikte görüldüğü üzere T1 ardışık sinyal ile üretilen jetin yüzeye çarpmasıyla meydana gelen ısı transfer dağılımı çok daha yüksek değerlerdedir. Ayrıca radyal yönde genişleyen sentetik jetin $2 < r/D < 4$ aralığında her iki çalışma için ikincil vorteklerin oluşmasıyla Nusselt sayısında bu bölgede artış oluşturmaktadır.



Şekil 33. Nusselt sayısı dağılımı karşılaştırılması

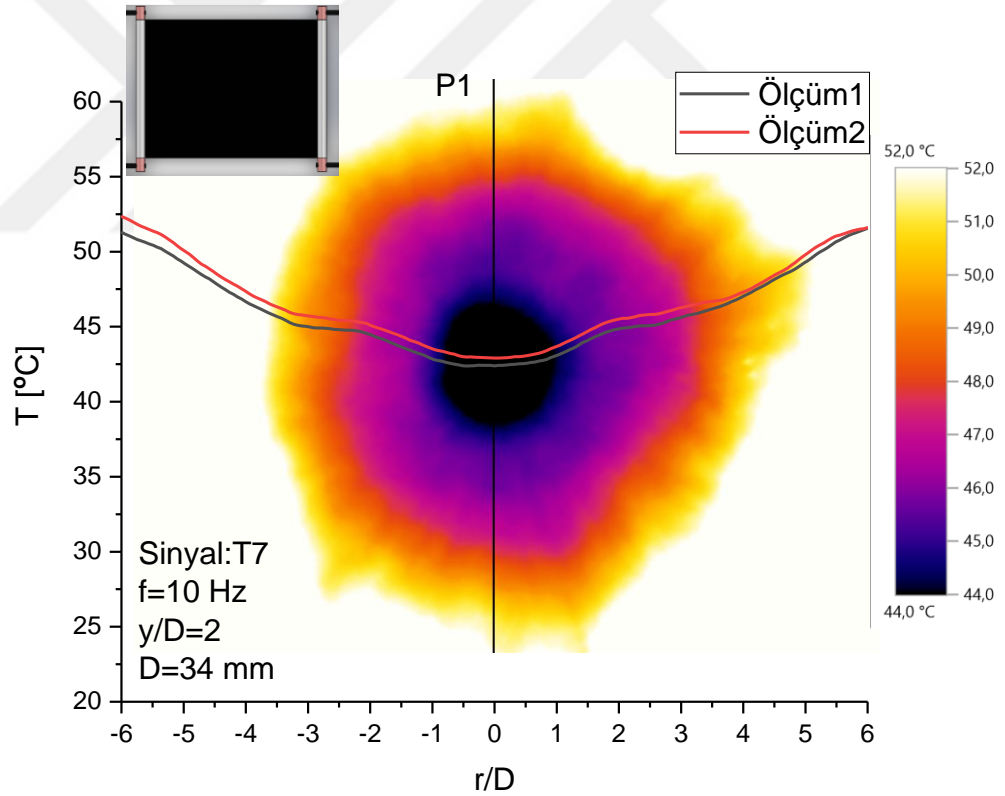
Şekil 44'te Lyu vd. (2021) 10 mm çaplı dairesel delik ile oluşturulan sentetik jetin levhaya çarptırılmasıyla oluşturdukları Nusselt dağılımı, bu çalışmada oluşturulan T8 sinyalinin Nusselt dağılımı ile kıyaslanmıştır. Grafikte sol taraf Lyu vd. (2021) yaptıkları çalışmayı, sağ tarafta ise bu çalışmadaki Nusselt sayısı dağılımını göstermektedir. Karşılaştırılan sol taraftaki Nusselt dağılımı grafiğinde r/D mesafesi arttıkça Nusselt sayısı değerlerinde hızlı azalma meydana gelirken T8 sinyalinin Nusselt dağılımında radyal yöndeki azalma daha az meydana gelmektedir. Bu durum birleşik jetin daha geniş alana etki ettiğini göstermektedir.



Şekil 34. Nusellt sayısı dağılımının farklı y/D mesafelerinde karşılaştırılması

3.3. Çarpın Jet Isı Transferi Nusselt Sayısı Dağılımları

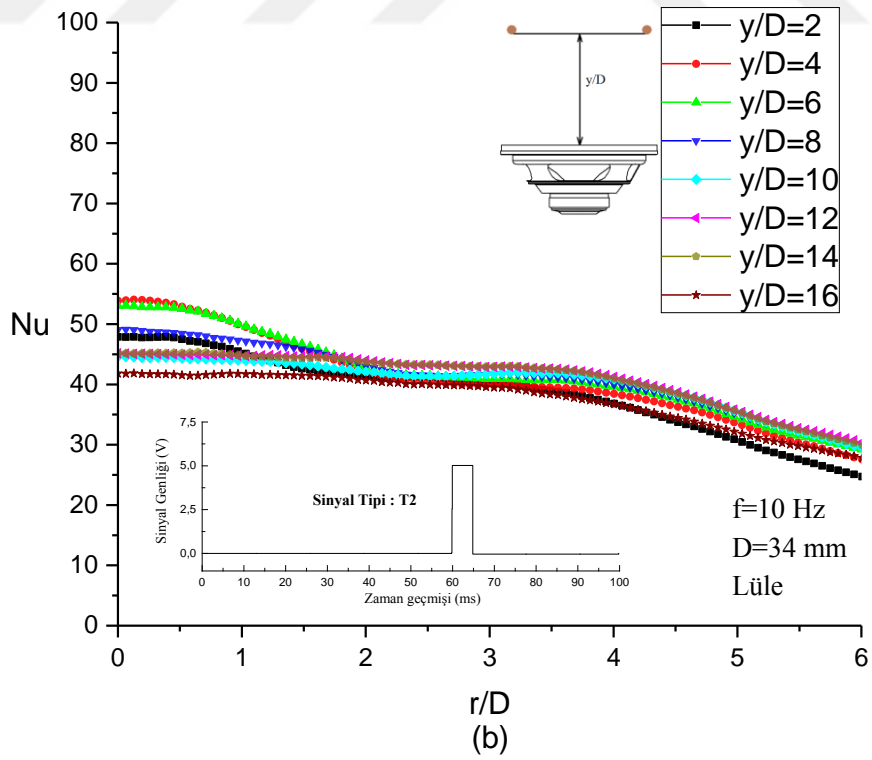
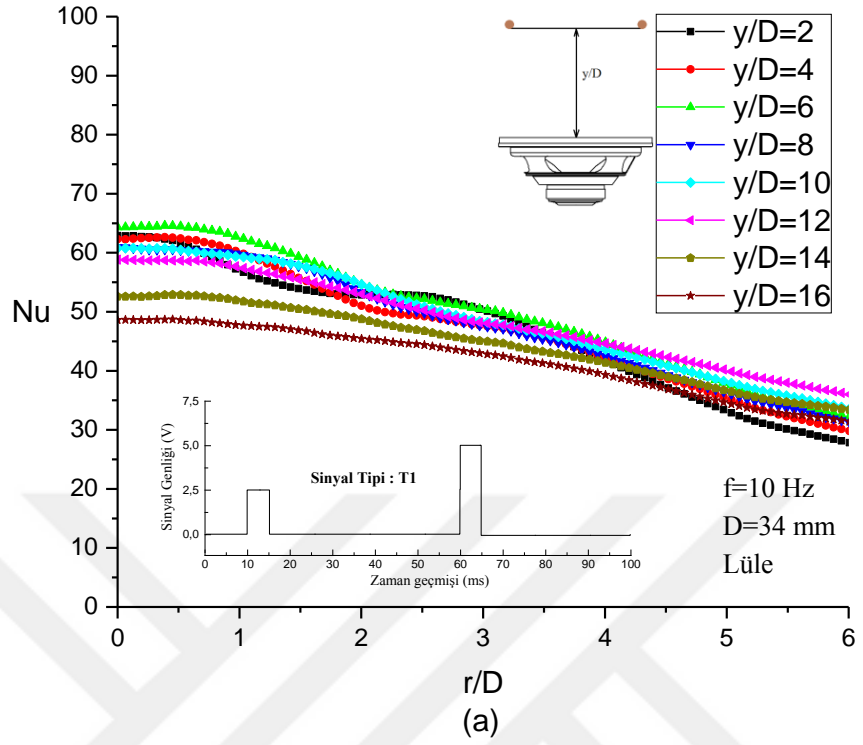
Bu kısımda sabit 10 Hz frekansındaki farklı sinyal yapılarından elde edilen ardışık ikili sentetik jet akışının hedef levha yüzeyine çeşitli y/D mesafelerinde çarpmasıyla meydana gelen ısı transferinin boyutsuz ısı transfer katsayını gösteren Nusselt sayısı dağılımları elde edilmiştir. Şekil 35'te verilen bakır çubuklara paralel P1 çizgisi boyunca levha üzerindeki sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Elde edilen bu sıcaklık dağılımları analizinden her bir durum için Nusselt sayısı dağılımları hesaplanmıştır. Deneyler 2'şer kez tekrar edilmiş olup T7 sinyal tipi durumunda $y/D=2$ ve $f=10$ Hz için her iki ölçümün P1 çizgisi boyunca elde edilen sıcaklık dağılımı eğrileri Şekil 35'te verilmiştir. Isı transfer katsayısının hesaplanmasında P1 çizgisine ait iki ölçüm sonucunun ortalaması alınarak Nusselt sayısı dağılımları elde edilmiştir.



Şekil 35. T7 tipindeki sinyalin $y/D=2$ ve $f=10$ Hz durumunda elde edilen sıcaklık dağılımı fotoğrafı ve eğrileri

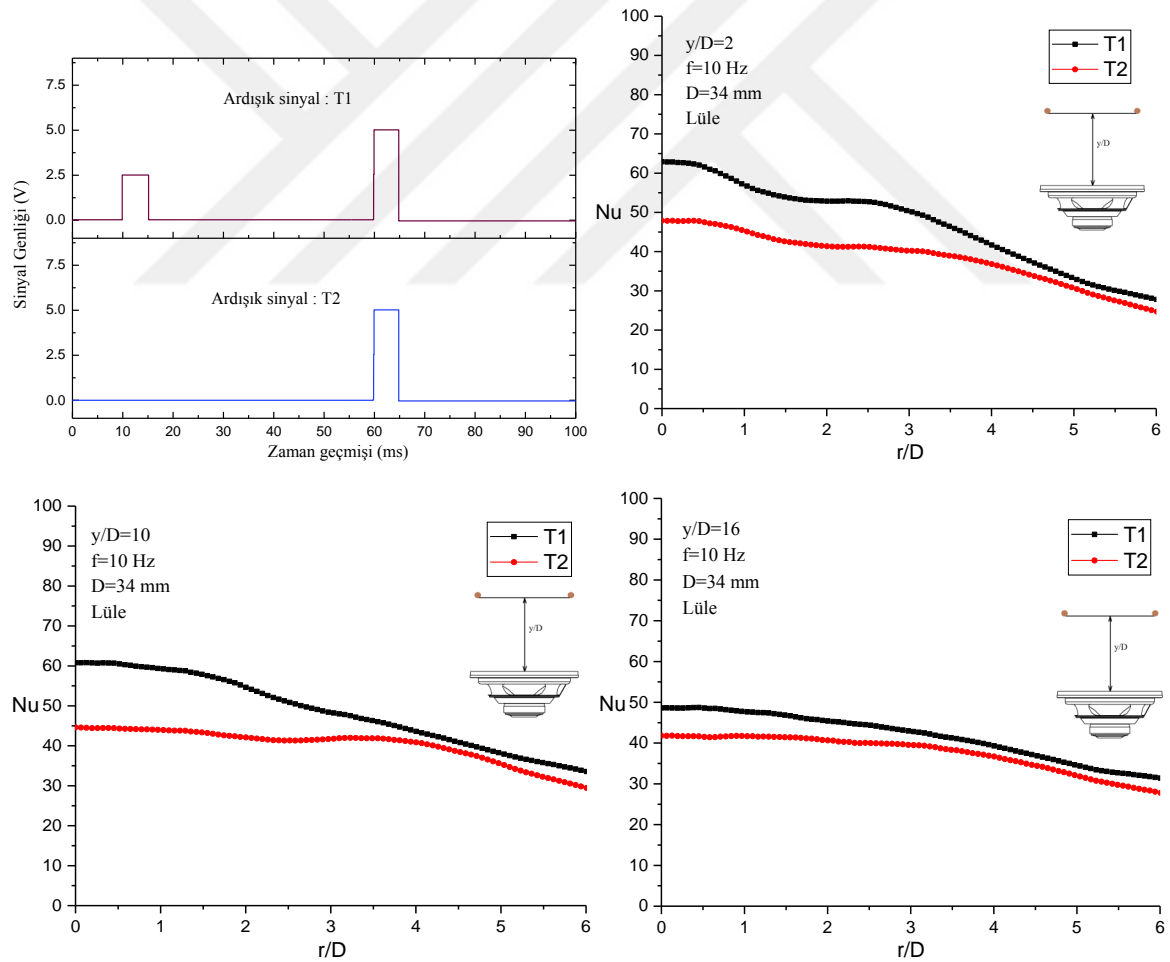
3.3.1. Tekli Yarım Kare Sinyal ile Ardışık Yarım Kare Sinyalin Isı Transferine Etkisi

Ardışık sinyal ile üretilen jet yapılarının ısı transfer dağılımlarını incelemeden önce tekli jet yapısının ısı transfer etkisi karşılaştırılmalıdır. Tekli sinyal yapısına sahip T2 ve ardışık sinyal yapısına sahip T1 sinyalinin sabit $f=10$ Hz frekansında farklı y/D mesafelerindeki Nusselt sayısı dağılımlarının karşılaştırılması Şekil 36'da verilmiştir. Genel olarak grafiklere bakılırsa ardışık sinyal olan T1'in tekli sinyal olan T2'ye göre ısı dağılımında bir iyileştirme görülmektedir. Boyutsuz radyal mesafe $r/D=0$ konumunda T2 sinyali tüm y/D konumları için Nusselt sayısı 40 – 55 bandında iken T1 için bu değer 50 – 65 aralığındadır ve $r/D=6$ konumuna doğru benzer azalan bir dağılım sergilemektedir. T2 sinyali için en iyi ısı transfer dağılımı $y/D=4-6$ arasındaki konumlarda iken T1 için bu konum $y/D=6$ belirgin bir şekilde görülmektedir. Birleşmenin gerçekleştiği $y/D=14$ konumu için tekli T2 sinyaline göre ardışık T1 sinyali Nusselt sayısında %17,8'lik bir artış elde edilmiştir.



Şekil 36. T1 ve T2 sinyal tipinin $f=10$ Hz frekansı için y/D mesafesine bağlı olarak yerel Nusselt sayısı dağılımları (a) Sinyal Tipi T1, (b) Sinyal Tipi T2

T1 ve T2 sinyallerinin $y/D=2, 10$ ve 16 konumlarındaki Nusselt sayısı dağılımlarının karşılaştırılması Şekil 37’te verilmiştir. Burada tüm boyutsuz y/D konumlarında T1 sinyal tipi için T2 sinyalinden daha yüksek Nu değerleri elde edilmiştir. Bunun nedeni aynı zaman periyodunda T1 tipi daha fazla sentetik jet üretirken T2 sinyalinin daha az sentetik jet üretmesindedir. $y/D=2$ konumunda T1 ve T2 sinyalleri merkezde en yüksek Nusselt dağılımı oluştururken, boyutsuz radyal mesafenin $2 < r/D < 4$ aralığında Nusselt sayısında ikinci bir artış olduğu görülmektedir. Bu aralıkta çarpan sentetik jetin radyal yönde ilerlemesi ikincil girdapların varlığını desteklemektedir. Boyutsuz aksel mesafe y/D ’nin artması ile sentetik jetin yayıldığı ve özellikle $y/D=16$ konumunda sinyal tipinden bağımsız olarak geniş bir alanda benzer Nusselt dağılımı oluşturduğu görülmektedir.

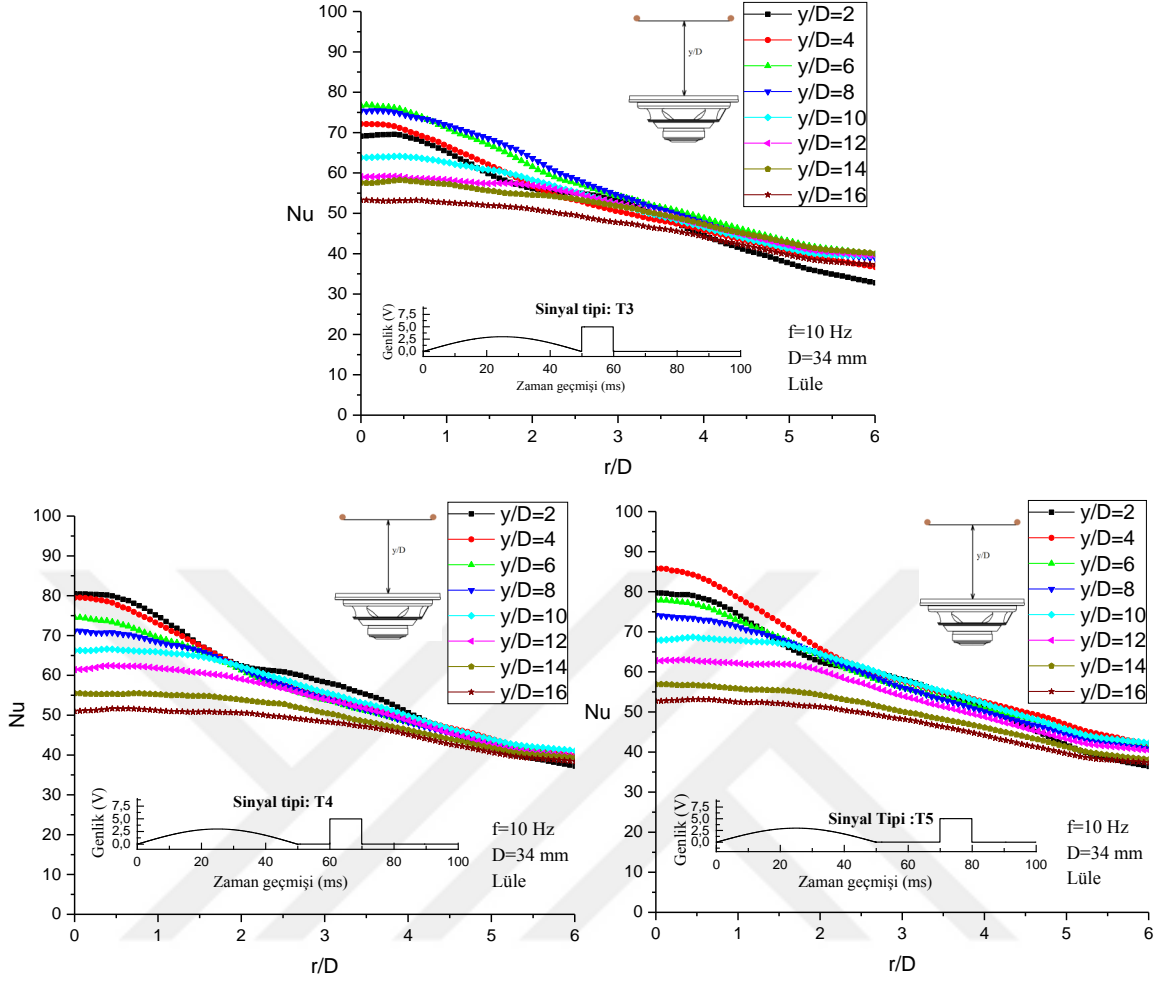


Şekil 37. T1 ve T2 sinyal tiplerine ait Nusselt sayısı dağılımlarının karşılaştırılması ($y/D=2, 10$ ve 16 konumlarında)

3.3.2. Yarım Sinüzoidal Sinyal ve Yarım Kare Sinyallerin Farklı Zaman Boşluklarındaki Isı Transferine Etkisi

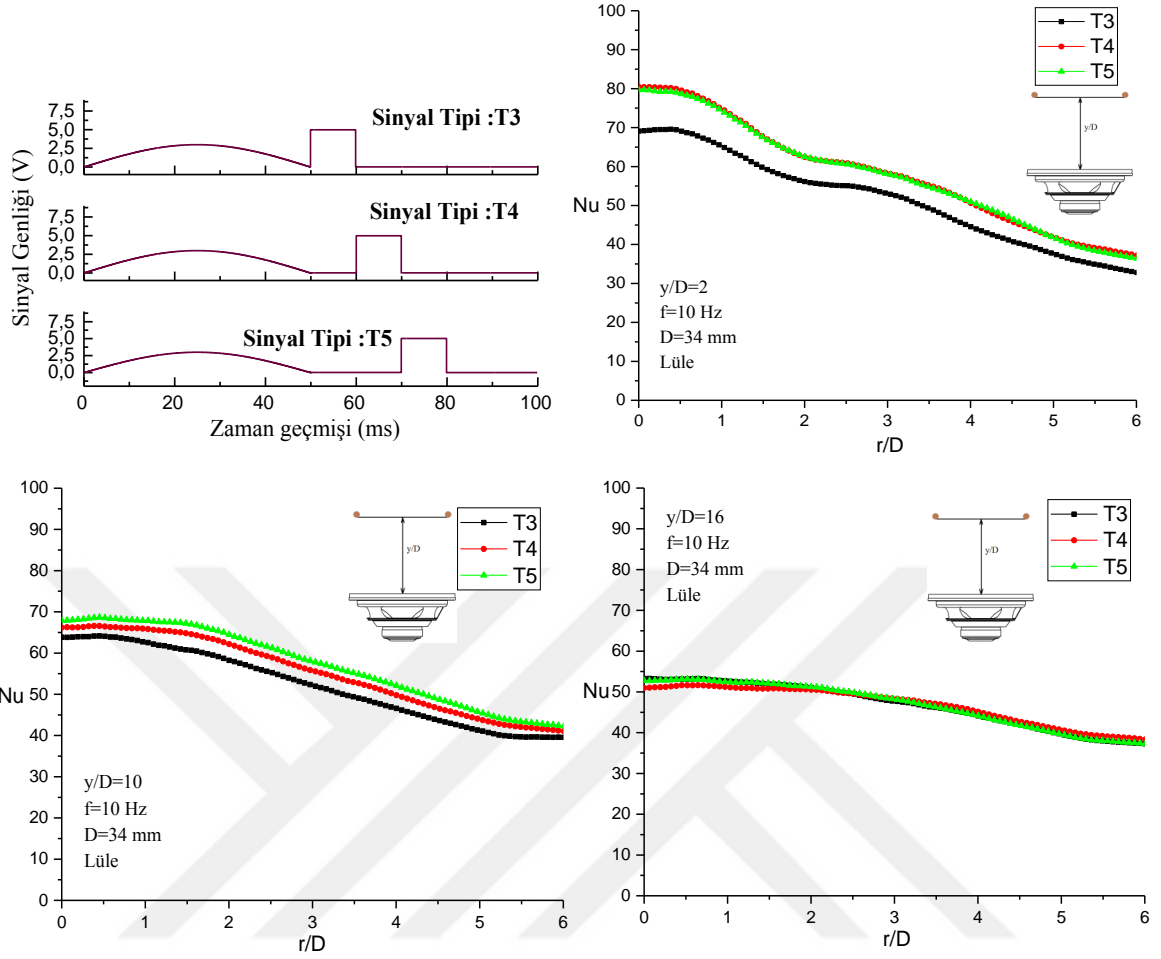
Bu kısımda farklı zaman boşluklarındaki yarım sinüzoidal sinyal ve yarım kare sinyal ile oluşturulan T3, T4 ve T5 sinyal yapılarından elde edilen Nusselt sayısı dağılımları $f=10$ Hz sabit frekansında ve farklı eksenel mesafelerdeki grafikler Şekil 38'de verilmiştir. Bütün sinyal tiplerinde ve eksenel mesafelerde merkez noktasında en yüksek Nusselt değeri elde edilmiş olup radyal yönde jetin yayılarak geniş bir bölgeye etkidiği görülmektedir.

Anlık hız grafikleri referans alınarak T3 sinyalinde elde edilen iki jetin birleşiminin $y/D=7-8$ olduğu konumda gerçekleştiği belirtilmiştir. Şekil 38'de verilen grafiklere bakıldığında T3 tipi için en yüksek Nusselt sayısı değerinin $y/D=6-8$ konumunda elde edildiği görülmektedir. Birleşmenin gerçekleşmediği ısı transfer dağılımı grafiklerinde en yüksek Nusselt değeri merkezden uzaklaştıkça yaklaşık $r/D=1-2$ konumlarına kadar hızlı bir azalma eğilimi sergilerken, birleşme görülen konumlarda radyal yöndeki bu hızlı azalma, yerini daha sakin azalmaya bırakmıştır. Bu iki jetin, birleşme etkisiyle daha geniş alanlarda ısı transferinin artmasına yardımcı olduğunu ortaya koymaktadır. Benzer durum T4 sinyalinde de görülmektedir. T5 sinyalinde ise zaman boşluğunun fazla olması ve birleşmenin daha uzak konumda ($y/D=11$) gerçekleşmesi ve bu konumda sentetik jetin yayılarak etkisini kaybetmeye başlamasından dolayı Nusselt sayısı değerlerinde belirgin bir fark elde edilememiştir.



Şekil 38. Farklı zaman boşuklu yarım sinüzoidal sinyal ve yarım kare sinyalin $f=10$ Hz frekansı için y/D mesafesine bağlı olarak yerel Nusselt sayısı dağılımları

T3, T4 ve T5 sinyal tiplerinin $y/D=2, 10$ ve 16 konumlarındaki karşılaştırılmaları şekil 39'da verilmiştir. Grafikler incelendiğinde aynı sinyal tipleri ile üretilen sentetik jetlerin tüm y/D mesafelerinde benzer Nusselt sayısı dağılımı elde edildiği görülmektedir. $y/D=2$ konumu için 10 ms ve 20 ms zaman boşluğuna sahip T4 ve T5 sinyalleri aynı Nusselt dağılımı oluştururken T3 tipi sinyalde benzer ancak daha düşük bir dağılım sergilemiştir. T3 sinyalinin diğer sinyallerden daha düşük Nusselt dağılımı ortaya koymasının sebebi gönderilen ilk sinüs sinyalinin ardından hoparlör membranının bekleme süresi olmadan ikinci sinyali göndermesidir. T3 sinyalinin birinci sinüs dalgası ile oluşturulan sentetik jetin ardından ikinci kare dalga ile oluşturulacak sentetik jet için kapalı hacim içerisine yeterince akışın girememesinden dolayı daha düşük Nusselt dağılımı oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 39. T3, T4 ve T5 sinyal tiplerine ait Nusselt sayısı dağılımlarının karşılaştırılması ($y/D=2, 10$ ve 16 konumlarında)

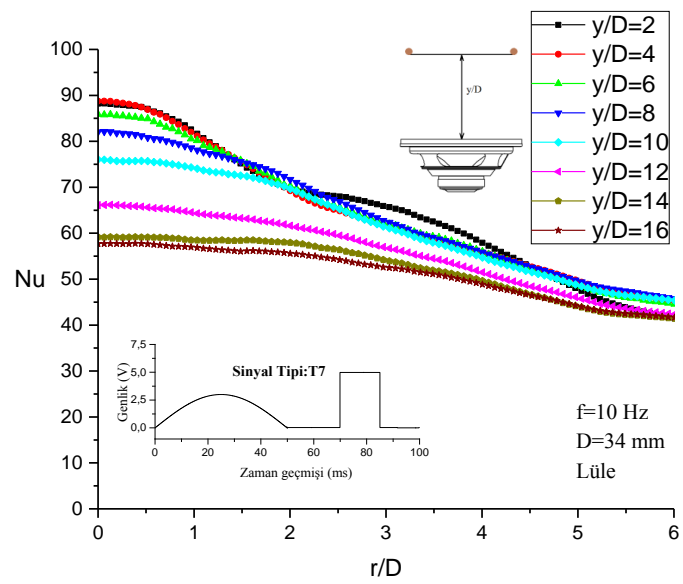
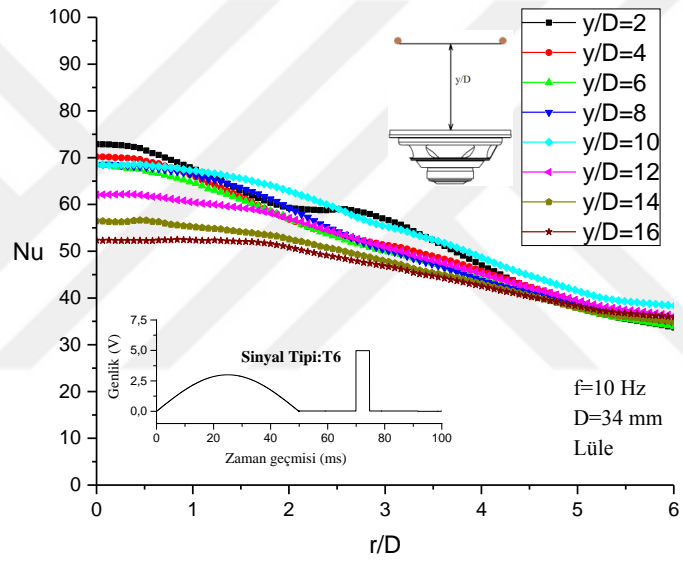
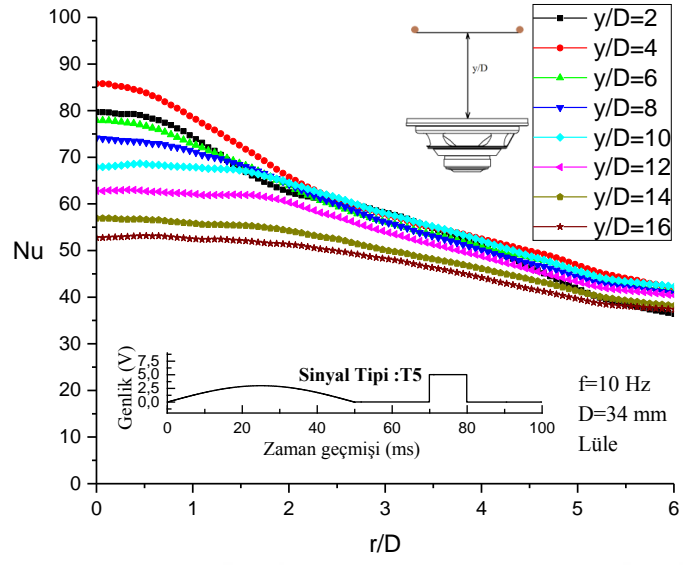
3.3.3. Yarım Sinüzoidal Sinyal ve Periyot Süresi Değiştirilen Yarım Kare Sinyallerin Isı Transferine Etkisi

T5 sinyali referans alınarak modifiye edilmiş T6 ve T7 sinyallerinin sabit $f=10$ Hz frekansında farklı aksel mesafelerde elde edilen Nusselt sayısı dağılımları Şekil 40'da sunulmuştur. Daha önce verilen anlık hız değerlerinden yola çıkarak ısı transfer katsayısı dağılımına bakılırsa orantılı değerler elde edilmiştir. En küçük jet hızı elde edilen T6 tipinde en düşük Nusselt sayısı dağılımı, en büyük jet hızı elde edilen T7 tipinde ise en yüksek Nusselt sayısı değerleri elde edilmiştir. T7 sinyalinde birleşmenin gerçekleştiği konum olan $y/D=10 - 12$ aralığında referans sinyal olan T5 tipi sinyale göre Nusselt sayısında artış belirgin bir şekilde görülmektedir.

Sentetik jet şiddetlerinin periyot süresiyle ilişkili olduğu görülmektedir. Sentetik jet oluşumunda membranın taradığı strok boyunca hava akışı jet deliğinden dışarı atılmaktadır.

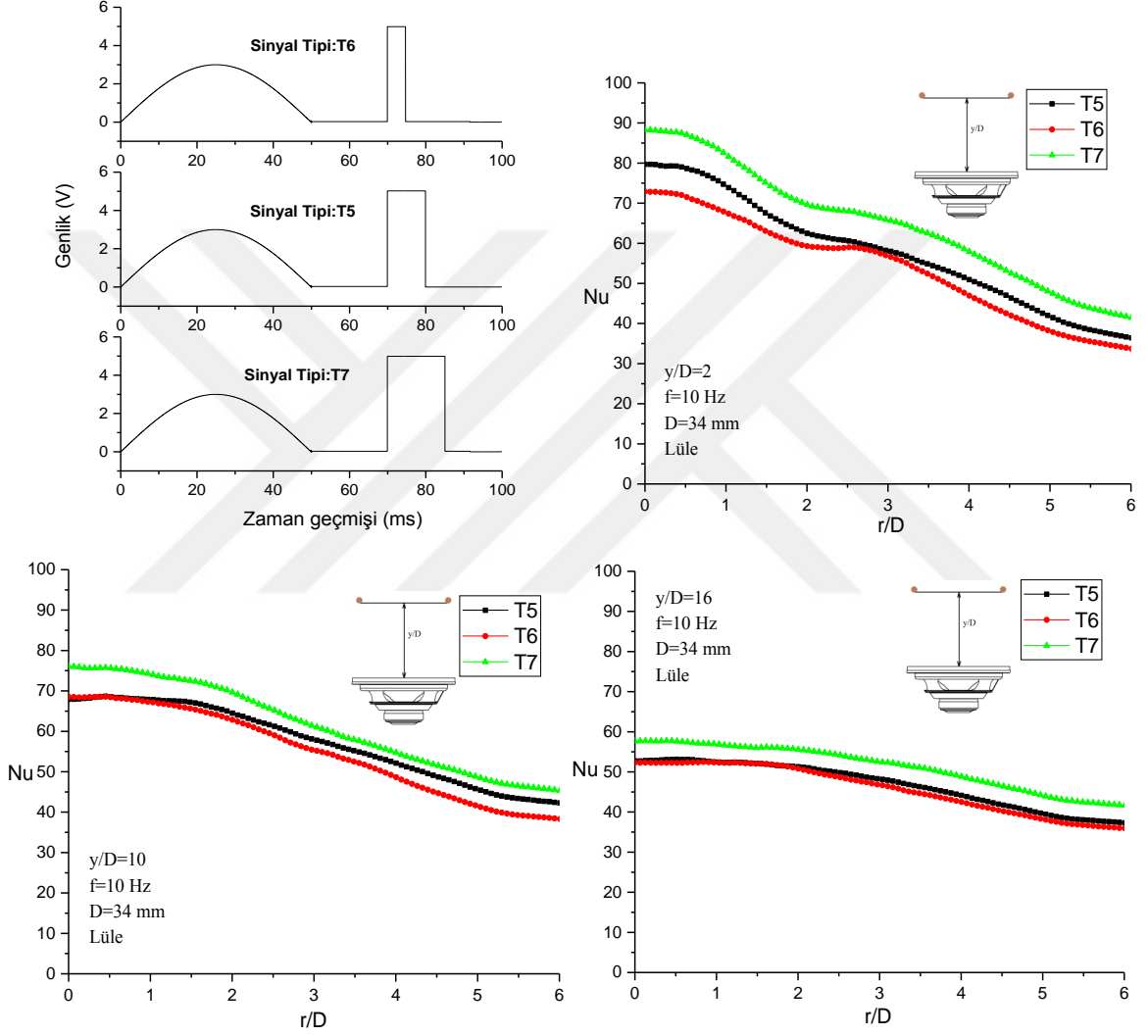
Membranın üst ölü noktada bekleme süresinin artması havanın dışarı atılabilmesi için yeterli süreyi sağlamaktadır. Kısa bekleme süresine sahip jetlerde, üfleme fazının ardından hemen emme fazına geçildiğinden, havanın dışarı çıkabilecek yeterli bekleme süresi bulamamaktadır. Bu durum daha düşük jet hızları elde edilmesine neden olmaktadır.





Şekil 40. Yarım sinüzoidal sinyal ve farklı periyot süreli yarım kare sinyalin $f=10$ Hz frekansı için y/D mesafesine bağlı olarak yerel Nusselt sayısı dağılımları

Şekil 41’de T5, T6 ve T7 sinyal tiplerinin Nusselt sayısı dağılımlarının karşılaştırılması verilmiştir. Grafikler incelendiğinde genliği en fazla olan T7 sinyali tüm y/D konumlarında en yüksek Nusselt sayısı dağılımı sergilemiştir. Sinyal tipleri benzer olduğu için Nusselt sayısı dağılımları tüm aksenal ve radyal mesafelerde benzer bir dağılım sergilemektedir.

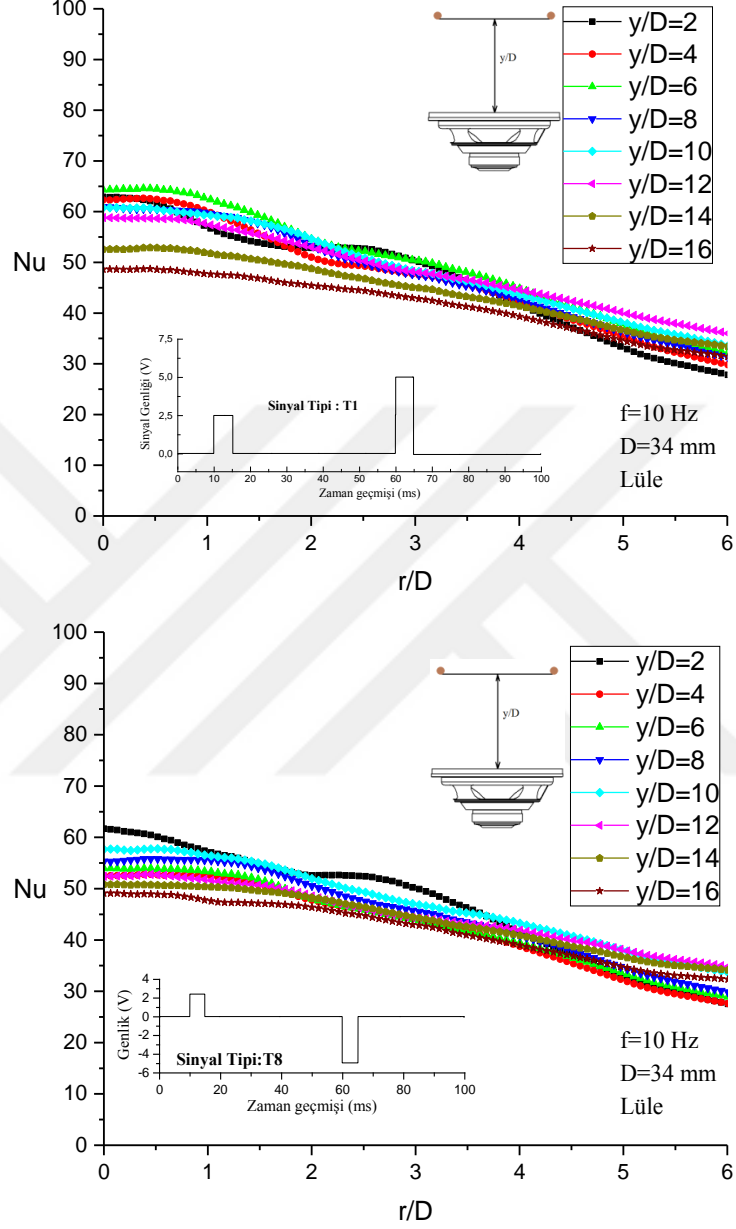


Şekil 41. T5, T6 ve T7 sinyal tiplerine ait Nusselt sayısı dağılımlarının karşılaştırılması ($y/D=2, 10$ ve 16 konumlarında)

3.3.4. Yarım Kare ve Negatif Yarım Kare Sinyalin Isı Transferine Etkisi

T1 tipi sinyal referans alınarak ikinci yarım kare sinyalin negatif olarak düzenlendiği T8 tipi sinyalin sabit $f=10$ Hz frekansında ve farklı y/D mesafelerindeki yerel Nusselt dağılımları Şekil 42’de verilmiştir. T1 sinyalinde en yüksek Nusselt değerleri $y/D=6$

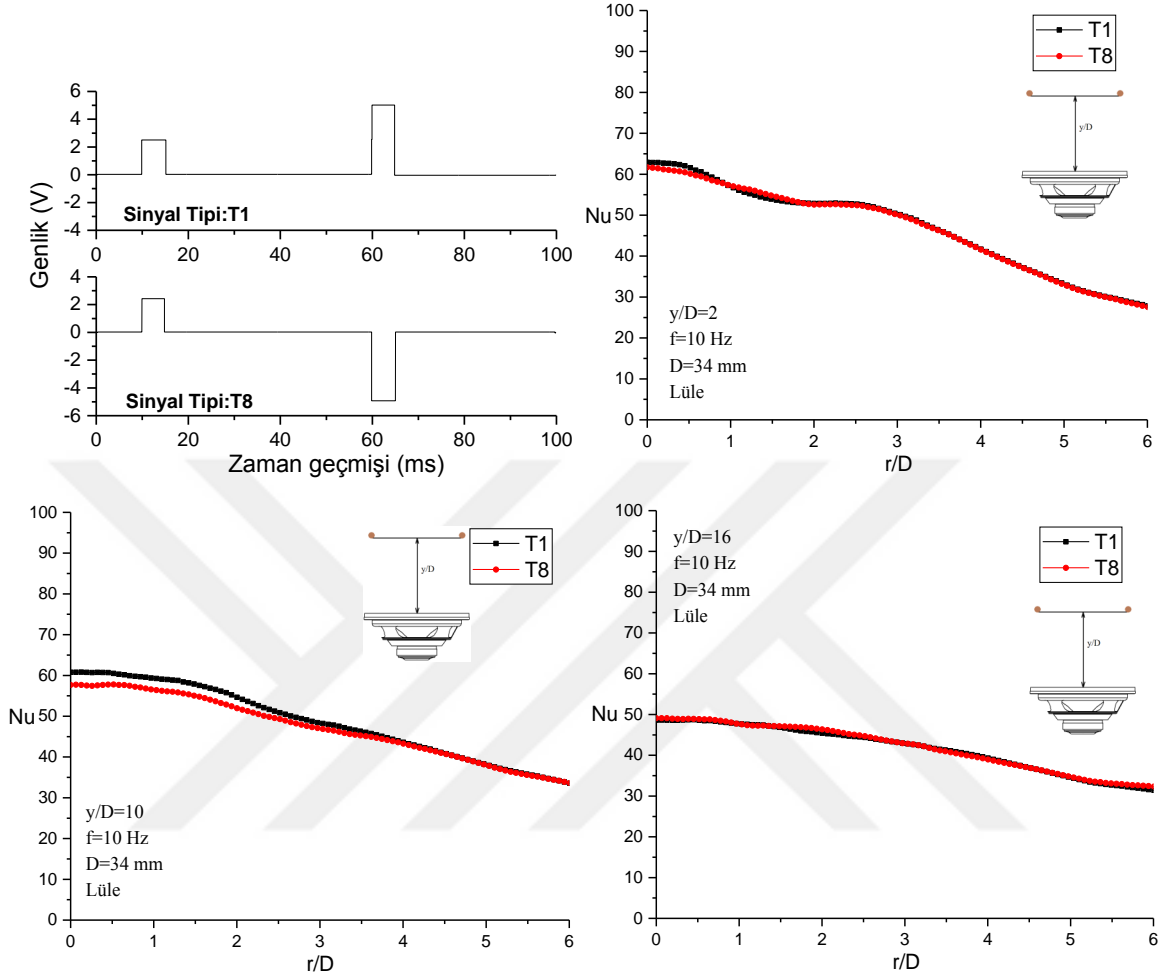
konumunda elde edilirken, negatif yarım kare sinyale sahip T8 sinyalinde $y/D=2$ konumunda ve ardından birleşmenin gerçekleştiği $y/D=10$ konumunda elde edilmiştir.



Şekil 42. T1 ve T8 sinyalin $f=10$ Hz frekansı için y/D mesafesine bağlı olarak yerel Nusselt sayısı-dağılımları

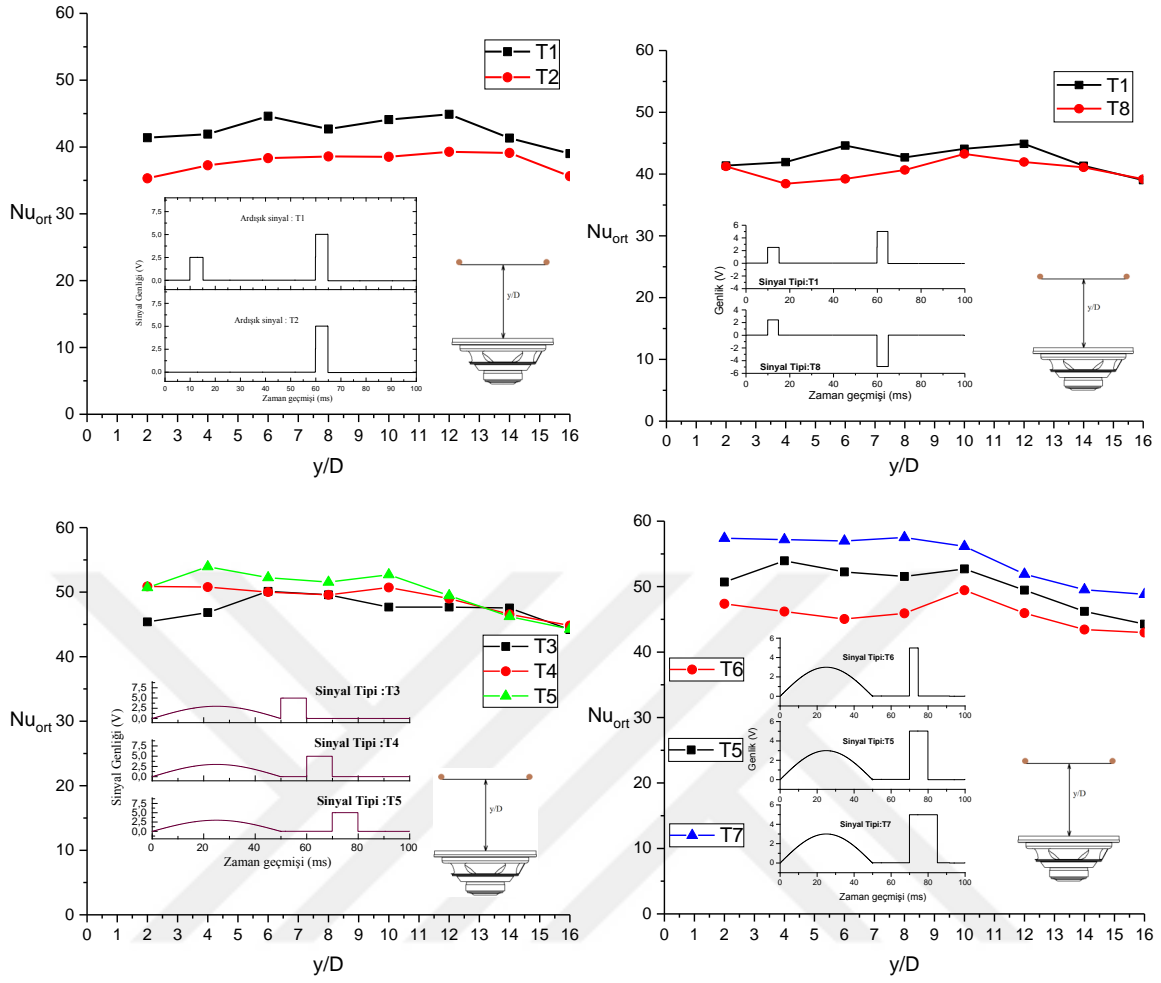
Şekil 43'te T1 ve T8 sinyallerini farklı y/D eksenel mesafelerindeki Nusellit sayısı dağılımlarının karşılaştırılmıştır. Sinyal tipleri arasındaki tek fark ikinci sentetik jeti oluşturmak için hoparlör membranının T1 sinyal tipinde, önce üfleme ardından emme işlemini yaparken, T8 tipi sinyalde önce emme ardından üfleme işlemi yapmaktadır.

Grafiklerde görüldüğü gibi emme ve üfleme sırasından bağımsız olarak aynı Nusselt sayısı dağılımı oluşmaktadır.



Şekil 43. T1 ve T8 sinyal tiplerine ait Nusselt sayısı dağılımlarının karşılaştırılması ($y/D=2$, 10 ve 16 konumlarında)

Ortalama Nusselt dağılımları Şekil 44'te tüm sinyal tipleri için verilmiştir. T1 ve T2 tipleri karşılaştırılacak olursa beklendiği gibi ardışık sentetik jet olan T1 tipinde daha yüksek değer elde edilmiştir. Bununla birlikte modifiye edilen T8 ile T1 tipleri karşılaştırıldığında T1 tipi sinyal negatif yarım kare dalgaya sahip olan T8'den daha yüksek ortalama Nusselt sayısı değerleri elde edilmiştir.



Şekil 44. Ortalama Nusselt sayısının y/D ile değişimi

Yarım sinüzoidal sinyal ve yarım kare sinyale sahip farklı zaman boşluklu T3, T4 ve T5 sinyalleri ortalama Nusselt değerleri çok az bir fark ile birbirlerine yakın çıkmıştır. İkinci dalga olan yarım kare dalganın periyot süresi değiştirilerek oluşturulan T6 ve T7 tipleri için ortalama Nusselt değerleri en fazla periyot süresine sahip T7 sinyalinde elde edilmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, bir hoparlör tipi aktüatör kullanılarak üretilen sentetik jetin akış alanı özellikleri ve bu sentetik jet akışı karşısına konulan homojen ısıtılmış levhaya çarptırılmasıyla oluşan çarpan jet sisteminin ısı transfer katsayısının dağılımları incelenmiştir. Aktüatör membranının salınım hareketi ile oluşturulan sentetik jetlerin ardışık olarak üretilmesi için farklı sinyal tipleri düzenlenmiştir. Bu sinyaller ardışık iki yarım kare; birincisi $2.5 V_{pp}$ ve ikincisi $5 V_{pp}$ genlikli ya da $3 V_{pp}$ genlikli yarım sinüzoidal ve $5 V_{pp}$ yarım kare dalgalardan oluşmaktadır. Sabit 10 Hz frekansında üretilen sentetik jetlerin jet çıkış deliği 34 mm çapında dairesel lüleden oluşmaktadır. Akış alanı ölçümleri için lüle ve hedef levha arasındaki boyutsuz aksenal mesafe $y/D=0-15$ aralığında iken ısı transferi deneylerinde ise $y/D=2, 4, 6, 8, 10, 12, 14$ ve 16 konumlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Sentetik jet akış alanı grafikleri referans alınarak Nusselt sayısı dağılımları araştırılmıştır.

Tekli sinyal yapısına sahip referans T2 sinyalinin akış yapısı incelendiğinde anlık hızların y/D mesafesinin artmasıyla birlikte şiddetinin azaldığı ancak jet yapısının bozulmadan formunu koruduğu görülmektedir. Ardışık T1 tipi sinyalde iki jet $y/D=14$ konumunda birleşmekte ve bu birleşmenin etkisiyle daha geniş ve daha fazla çalkantılı forma sahip jet oluşturdukları bulunmuştur.

Ardışık olarak üretilen sentetik jet sinyalleri arasındaki zaman boşluğu iki sentetik jet akışının birleşmesi için önemli bir parametredir. T3, T4 ve T5 tipi sinyallerinin birinci ve ikinci dalga arasındaki farklı zaman boşluğu etkisi araştırılmış ve zaman boşluğu az olan sinyal tipinde ardışık iki jetin birleşmesi daha erken bir aksenal mesafede meydana gelmektedir.

Sentetik jet oluşturmak için sürülen sinyallerin periyot süresi önemli bir diğer parametredir. T5, T6 ve T7 sinyallerinin ikinci kare dalgasının periyot süresi değiştirilerek jet yapısına etkisi incelenmiştir. Periyot süresinin arttırılmasıyla boşluk içerisindeki akışın hızı artmaktadır. Bu artışı boşluk içerisindeki akışkanın dışarıya atılması için yeterli sürenin sağlanmasından kaynaklanmaktadır.

Tekli kare sinyal yapısına sahip T2 ve ardışık iki kare sinyal yapısına sahip T1 sinyali karşılaştırıldığında, birleşmenin gerçekleştiği $y/D=14$ konumu için tekli T2 sinyaline göre ardışık T1 sinyali Nusselt sayısında %17,8'lik bir artış elde edilmiştir. İlk sinyalin sinüzoidal ikinci sinyalin kare sinyal olduğu ve iki sinyal arasındaki zaman boşluklarının farklı olduğu

T3, T4 ve T5 sinyalleri karşılaştırıldığında, T3 sinyal tipi için en yüksek Nusselt sayısı değeri birleşmenin gerçekleştiği $y/D=6-8$ konumunda elde edilmiştir. Birleşmenin gerçekleşmediği ısı transfer dağılımı grafiklerinde en yüksek Nusselt değeri merkezden radyal yönde uzaklaştıkça yaklaşık $r/D=1-2$ konumlarına kadar hızlı bir azalma eğilimi sergilerken, birleşme görülen konumlarda radyal yönlerdeki bu hızlı azalma yerini daha sakin azalmaya bırakmıştır.

Isı transferi grafikleri incelendiğinde iki sentetik jet sinyali arasındaki zaman boşluğunun ısı transferinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Ardışık sinyallerin arasındaki zaman boşluğu az olan T3 sinyalinin yerel Nusselt sayısı dağılımı, T4 ve T5 sinyallerine göre daha düşük değerlerde olduğu bulunmuştur. İki ardışık sinyal arasındaki bekleme süresinin artırılması, ısı transferi üzerinde olumlu katkı sağlamaktadır. Bunun sebebi, birinci sinyalin ardından ikinci sinyal sürülmeden boşluk içerisine yeterince akışın girmesine zaman tanınması, ikinci sinyal ile oluşturulacak sentetik jetin daha etkili olmasını sağlamasındandır. Benzer şekilde periyot süresi arttırıldığında yerel Nusselt sayısı değerleri artmaktadır.

5. ÖNERİLER

Bu çalışmada literatüre uygun olarak sentetik jet akışı çeşitli ardışık sinyaller ile ısı transferinde iyileştirmeler sağlanmıştır. Ardışık sinyallerin birleşiminin ısı transferindeki olumlu etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için birleşmenin daha erken eksenel mesfelerde gerçekleştirecek sinyal yapıları incelenmelidir. Ayrıca birleşme etkisinin akış görüntüleme yöntemleri kullanılarak fiziksel etkilerinin ortaya konması da ayrıca önemlidir. Bu konu üzerinde araştırma yapmak amacıyla, PIV akış görüntüleme gibi deneysel yöntemler ya da sayısal yöntemler kullanılarak akışın karakteristik yapısının incelenmesi daha etkili bir yöntem olabilir.

6. KAYNAKLAR

- Akansu, Y., E., Sariođlu, M., Yalçın, M., K., Seyhan, M., Bayat, M., Y., Akbıyık, H., ve Erdurcan., F., E., 2018. Farklı Genlik ve Frekansa Sahip Ardışık Olarak Üretilen Sentetik Jetlerin Etkileşiminin İncelenmesi, 1001 Tübitak Projesi, 215M920.
- Arik, M., Sharma R., Lustbader, J., ve He, X., 2013. Steady and Unsteady Air Impingement Heat Transfer for Electronics Cooling Applications, Journal of Heat Transfer 135, 11.
- Bhapkar, U. S., Srivastava, A., ve Agrawal, A., 2015. Proper cavity shape can mitigate confinement effect in synthetic jet impingement cooling, Experimental Thermal and Fluid Science, 68, 392-401.
- Bolat, S., 2010. Piston silindir mekanizmalı sentetik jet akışının deneysel incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Caliskan, S., Baskaya, Ş., ve Calisir, T., 2014. Experimental and numerical investigation of geometry effects on multiple impinging air jets, International Journal of Heat and Mass Transfer, 75, 685-703.
- Chaudhari, M., Puranik, B. ve Agrawal, A., 2010. Effect of orifice shape in synthetic jet based impingement cooling, Experimental Thermal and Fluid Science, 34, 2, 246-256.
- Chaudhari, M., Puranik, B. ve Agrawal, A., 2010. Heat transfer characteristics of synthetic jet impingement cooling, International Journal of Heat and Mass Transfer, 53, 1057-1069.
- Çengel, Y.A., ve Cimbala, J.M., 2008. “Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları” (çev. Engin. T, Öz. H.R, Küçük. H, ve Çeşmeci. Ş.), Güven Bilimsel Yayınları, 562-599.
- Feero, M. A., Lavoie, P. ve Sullivan, P. E., 2015. Influence of cavity shape on synthetic jet performance, Sensors and Actuators A., 223, 1-10.
- Ghaffari, O., Ikhlak, M., ve Arik, M., 2015. An Experimental Study of Impinging Synthetic Jets for Heat Transfer Augmentation, International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 23, 03, 11.
- Ghaffari, O., Solovitz, S. A., ve Arik, M. 2016. An Investigation into flow and heat transfer for a slot impinging synthetic jet, International Journal of Heat and Mass Transfer, 100, 634-645.

- Gillespie, M. B., Black, W. Z., Rinehart, C., ve Glazer, A. 2006. Local Convective Heat Transfer From a Constant Heat Flux Flat Plate Cooled by Synthetic Air Jets, Journal of Heat Transfer, 128, 990-1000.
- Glezer, A. and Amitay, M., 2002, Synthetic Jets, Annu. Rev. Fluid Mech., 34, 503-529.
- Greco, C. S., Ianiro, A., ve Cardone, G., 2014, Time and pahse average heat transfer in single and twin circular synthetic impinging air jets, International Journal of Heat and Mass Transfer, 73, 776-788.
- He, X., Lustbader, J. A., Arik, M., ve Sharma, R., 2015, Heat transfer characteristics of impinging steady and synthetic jets over vertical flat surface, International Journal of Heat and Mass Transfer, 80, 825-834.
- Kercher, D. S., Lee, J., Brand, O., ve Allen, M. G., 2003. Microjet Cooling Devices for Thermal Management of Electronics, IEEE Transactions on Components and Packaging Tecnologies, 26, 2, 359-366.
- Krishnan. G., ve Mohseni. K., 2010. An experimental study of a radial wall jet formed by the normal impingement of a round synthetic jet, European Journal of Mechanics B/Fluids, 29, 269-277.
- Kocabıyık O., 2018. Dairesel sentetik çarpan jetin ısı transferi karakteristiklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Lytle, D., ve Webb, B. D., 1994, Air jet impingement heat transfer at low nozzle plate spacings, International Journal of Heat and Mass Transfer, 37, 1687-1697.
- Lyu, Y., Zhang, J., Tan, J., ve Shan, Y., 2021, Impingement heat transfer on flat and concave surface by piston-driven synthetic jet from planar lobed orifice, International Journal of Heat and Mass Transfer, 167, 120832.
- Mangate, L. D., ve Chaudhari, M., 2015, Heat transfer and acoustic study of impinging synthetic jet using diamond and oval shape orifice, International Journal of Thermal Sciences, 89, 100-109.
- McGuinn, A., O'Donovan, T. S., ve Muray, D. B., 2007, Heat Transfer Measurements of Impinging Synthetic Air Jet, ASME-JSME Thermal Engineering Summer Heat Transfer Conference, Vancouver, British Columbia, CANADA.
- Pavlova, A., ve Amitay M., 2006, Electronic Cooling Using Synthetic Jet Impingement, Journal of Heat Transfer, 128, 897-907.
- Persoons, T., McGuinn, A., ve Murray, D. B., 2011, A general correlation for the stagnation point Nusselt number of an axisymmetric impinging synthetic jet, International Journal of Heat and Mass Transfer, 54, 3900-3908.

- Qayoum, A. Gupta, V., Panigrahi, P., K., Muralidhar, K., 2010. Influence of amplitude and frequency modulation on flow created by a synthetic jet actuator, Sensors and Actuators A: Physical, 162, 36-50.
- Smith, B. L. ve Swift G. W., 2003, A comparison between synthetic jets and continuous jets, Experiments in Fluids 34, 467-472.
- Tan, X., Zhang, J., Yong, S., ve Xie, G., 2015. An experimental investigation on comparison of synthetic and continuous jets impingement heat transfer, International Journal of Heat Transfer, 90, 227-238.
- Tan, X.-M. ve Zhang, J.-Z., 2013. Flow and heat transfer characteristics under synthetic jets impingement driven by piezoelectric actuator, Experimental Thermal and Fluid Science, 48, 134-146.
- Valiorgue, P., Persoons, T., McGuinn, A., ve Murray, D. B., 2009, Heat transfer mechanism in an impinging synthetic jet for a small jet-to-surface spacing, Experimental Thermal and Fluid Science, 33, 597-603.

7. EKLER

Ek 1. Belirsizlik Analizi

Bu çalışma kapsamında ölçülen ve hesaplanan parametrelerin belirsizlik değerlerini elde etmek için Coleman ve Steele (1998) tarafından önerilen hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Deneysel parametreleri (E.1)'de verilmiştir.

$$r = kX_1^a X_2^b X_3^c \dots \quad (\text{E.1})$$

Bu formdaki fonksiyonun belirsizlik ifadesi (E.2)'de ifade edilmiştir.

$$u_r = \frac{w_r}{r} = \left[a^2(u_{x_1})^2 + b^2(u_{x_2})^2 + c^2(u_{x_3})^2 + \dots \right]^{1/2} \quad (\text{E.2})$$

Bunun dışında Fox ve McDonald (1994) tarafından önerilen (E.3)'te verilen yöntem de hesaplamalarda kullanılmıştır.

$$\frac{\partial R}{R} = \left[\left(\frac{x_1}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial x_1}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{x_2}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial x_2} \cdot \frac{\partial x_2}{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial x_n} \cdot \frac{\partial x_n}{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{E.3})$$

Burada her bir alt değişkene ait belirsizlik $u_i = \frac{\partial x_i}{x_i}$ olarak yazıldığında, toplam belirsizlik,

$$u_R = \left[\left(\frac{x_1}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial x_1} \cdot u_1 \right)^2 + \left(\frac{x_2}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial x_2} \cdot u_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial x_n} \cdot u_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{E.4})$$

Bu çalışma kapsamında deneysel olarak hız, sıcaklık, akım, voltaj vb. parametreler ölçülmüş olup bu ölçüm sonuçları kullanılarak Nusselt sayısı, ısı taşınım katsayısı gibi hız ve sıcaklık ölçümlerine ait parametrelerin belirsizlik değerleri hesap edilmiştir.

Deneyde kullanılan parametrelerin belirsizliğinin tespiti:

Bu çalışmada deneyde kullanılmış olduğumuz değişkenlerin, ısıtılan levhanın herhangi bir konumdaki yüzey sıcaklığı (T_y), çevre sıcaklığı (T_c), sentetik jet sıcaklığı (T_j), lüle çapı (D), kinematik viskozite (ν), kızgın tel anemometresi ile ölçülen hız (V_0), ısıtılmış levhanın alt ve üst yüzey alanı (A_{alt} ve $A_{üst}$), ısıtıcının voltajı (E), ısıtıcının akımı (I), belirsizlik değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Burada bağımsız değişkenlere ait belirsizliklerin tespitinde kullanılan ölçüm cihazlarının kullanım klavuzları ve benzer belirsizlik analizlerini

Ek1'in devamı

çalışmalarında kullanan Jorgensen (2002), Akansu (2004), Şanlısoy (2013), Yeşildağ (2013), Akbıyık (2014) ve Kocabıyık (2018) çalışmalarından faydalanılmıştır.

Isı transferinde kullanılan bağımsız değişkenlere ait belirsizlikler:

• T_j ve $T_ç$ sıcaklık ölçümünde kullanılan BENETEC GM1312 model termokupl %1,5 olarak kullanım klavuzunda hata olabileceği belirtilmiştir.

$$\left(u_T = \frac{w_T}{T} \cong 0.015 = \%1.5\right)$$

• T_y sıcaklık ölçümünde kullanılan TESTO 885-2 termal kamera %2 olarak kullanım klavuzunda hata olabileceği belirtilmiştir.

$$\left(u_{T_y} = \frac{w_{T_y}}{T_y} \cong 0.02 = \%2\right)$$

•Film ısıtıcının voltaj ölçümünde kullanılan UT50C model multimetre %0,8 olarak kullanım klavuzunda hata olabileceği belirtilmiştir.

$$\left(u_E = \frac{w_E}{E} \cong 0.008 = \%0.8\right)$$

•Film ısıtıcıya uygulanan akım değerinde AMETEK XG30-50 model güç kaynağının %1 olarak hata olabileceğini kullanım klavuzunda belirtilmiştir.

$$\left(u_I = \frac{w_I}{I} \cong 0.01 = \%1\right)$$

•34 mm lüle çapının ölçümünden oluşan 0,05 mm'lik hata nedeniyle oluşan belirsizlik %0,25'tir.

$$\left(u_D = \frac{w_D}{D} \cong 0.0015 = \%0.15\right)$$

•375 mm ısıtılmış levha uzunluğunun ölçümünde oluşan 0,05 mm'lik hata nedeniyle oluşan belirsizlik %0,0133'tür.

$$\left(u_a = \frac{w_a}{a} \cong 0.000133 = \%0.0133\right)$$

•305 mm ısıtılmış levha genişliğinin ölçümünde oluşan 0,05 mm'lik hata nedeniyle oluşan belirsizlik %0,0163'tür.

$$\left(u_b = \frac{w_b}{b} \cong 0.000163 = \%0.0163\right)$$

•30°C sıcaklığındaki havanın 2°C değişimi ile kinematik viskozitesinde oluşan belirsizlik, %1,155'tir.

$$\left(u_v = \frac{w_v}{v} \cong 0.01155 = \%1.155\right)$$

• β değerinin 30°C sıcaklığındaki havanın 2°C değişimi ile oluşan belirsizlik, %3,125'tir.

Ek1'in devamı

$$\left(u_{\beta} = \frac{W_{\beta}}{\beta} \cong 0.03125 = \%3.125\right)$$

•30°C sıcaklığındaki havanın 2°C değişimi ile ısı difüzyonunda oluşan belirsizlik, %1,23'tür.

$$\left(u_{\alpha} = \frac{W_{\alpha}}{\alpha} \cong 0.0123 = \%1.23\right)$$

•0-1 aralığında olan ε için bulunan 0,61 değerinde 0,01 hata ile oluşan belirsizlik, %1,6'dır.

$$\left(u_{\varepsilon} = \frac{W_{\varepsilon}}{\varepsilon} \cong 0.016 = \%1.6\right)$$

•30°C sıcaklığındaki havanın 2°C değişimi ile ısı iletim katsayısında oluşan belirsizlik, %0,538'dir.

$$\left(u_k = \frac{W_k}{k} \cong 0.00538 = \%0.538\right)$$

• $A = a \cdot b$ olarak tanımlanan ısıtılmış plaka alanının değeri, genişliğine ve uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Alanın belirsizliği denklem (E.5)'te verilmiştir.

$$u_A = \frac{W_A}{A} = \left[\left(\frac{w_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{w_b}{b}\right)^2\right]^{1/2} \quad (E.5)$$

$$u_A = \frac{W_A}{A} = [(0.000133)^2 + (0.000163)^2]^{1/2} \cong 0.00021 = \%0.021$$

olarak sonuç elde edilmiştir.

Isı transferinde kullanılan bağımlı değişkenlere ait belirsizlikler:

Yerel ısı transfer katsayıları aşağıdaki enerjinin korunumu denklemi (E.6) ile hesaplanmaktadır (Caliskan vd., 2014). Buradaki belirsizlik değerlerinin hesaplanmasında sayısal değerler T1 sinyaline ait $y/D=2$ ve $f=10$ Hz deneyinde elde edilen ortalama sıcaklık ve ısı akısı değerleri kullanılmıştır. T_y değeri olarak 49°C ve T_{ϕ} sıcaklığı olarak 28°C alınmıştır.

$$q''_{\text{elektrik üretilen}} = q''_{\text{taşınım}} + q''_{\text{üst doğal taş}} + q''_{\text{radyasyon}} \quad (E.6)$$

$q''_{\text{elektrik üretilen}}$:

$q''_{\text{elektrik üretilen}} = \frac{E \cdot I}{A}$ olarak tanımlanan üretilen ısı akısı belirsizliğini (E.7) denklemi kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$u_{q''_{\text{elek.}}} = \frac{W_{q''_{\text{elek.}}}}{q''_{\text{elek.}}} = \left[\left(\frac{W_E}{E}\right)^2 + \left(\frac{W_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{W_A}{A}\right)^2\right]^{1/2} \quad (E.7)$$

$$u_{q''_{\text{elek.}}} = [(0.008)^2 + (0.01)^2 + (0.00021)^2]^{1/2} \cong 0.0128 = \%1.28$$

olarak sonuç elde edilmiştir.

$q''_{\text{üst yüzey doğal taşınım}}$:

Ek1'in devamı

q'' üst doğal taş = $h_{dt} \cdot (T_y - T_c)$ olarak tanımlı doğal taşınım ısı akısı belirsizliğini (E.12) denklemi kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bu ısı akısının bağımlı olduğu parametreler için belirsizlikler sırası ile aşağıda elde edilmiştir.

h_{dt} :

$h_{dt} = \frac{k \cdot Nu_L}{L}$ olarak tanımlanan doğal taşınım ısı transfer katsayısı (E.8) denklemi kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$u_{h_{dt}} = \frac{w_{h_{dt}}}{h_{dt}} = \left[\left(\frac{w_k}{k} \right)^2 + \left(\frac{w_{Nu_L}}{Nu_L} \right)^2 + \left(\frac{w_L}{L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (E.8)$$

$$u_{h_{dt}} = \frac{w_{h_{dt}}}{h_{dt}} = [(0.00538)^2 + (0.0434)^2 + (0.00021)^2]^{1/2} \cong 0.0437 = \%4.37$$

olarak sonuç elde edilmiştir. Buradaki h_{dt} 'nin bağımlı olduğu parametreler için belirsizlikler sırası ile aşağıda elde edilmiştir.

Nu_L :

$Nu_L = 0,27 \cdot Ra_L^{0,25}$ ($10^4 < Ra < 10^7$) olarak tanımlanmış ve (E.9) denklemi kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$u_{Nu_L} = \left[\left(\frac{w_{Ra_L}}{Ra_L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (E.9)$$

$$u_{Nu_L} = [(0.0434)^2]^{1/2} \cong 0.0434 = \%4.34$$

olarak sonuç elde edilmiştir.

$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_y - T_c) \cdot L^3}{\alpha \cdot \nu}$ olarak tanımlanmış ve (E.10) denklemi kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$u_{Ra_L} = \frac{w_{Ra_L}}{Ra_L} = \left[\left(\frac{w_\beta}{\beta} \right)^2 + \left(\frac{w_{T_y}}{T_y} \right)^2 + \left(\frac{w_{T_c}}{T_c} \right)^2 + 3^2 \left(\frac{w_L}{L} \right)^2 + \left(\frac{w_\alpha}{\alpha} \right)^2 + \left(\frac{w_\nu}{\nu} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (E.10)$$

$$u_{Ra_L} = \frac{w_{Ra_L}}{Ra_L} = [(0.03125)^2 + (0.02)^2 + (0.015)^2 + 3^2(0.00021)^2 + (0.0123)^2 + (0.01155)^2]^{1/2} \cong 0.043 = \%4.34 \text{ olarak sonuç elde edilmiştir.}$$

L :

$L = \frac{A_s}{P} = \frac{a \cdot b}{2(a+b)}$ olarak tanımlanmış ve (E.11) denklemi kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$u_L = \frac{w_L}{L} = [(0.000133)^2 + (0.000163)^2]^{1/2} \cong 0.00021 = \%0.021 \text{ olarak sonuç elde edilir.}$$

Yukarıda ifade edilen alt değişkenlerin belirsizlikleri elde edildikten sonra q'' üst yüzey doğal taşınım için belirsizlik ifadesi denklem (E.12) ile elde edilmektedir.

Ek1'in devamı

$$u_{q''_{dt}} = \left[\left(\frac{h_{dt}}{h_{dt} \cdot (T_y - T_c)} \cdot \frac{\partial h_{dt} \cdot (T_y - T_c)}{\partial h_{dt}} \cdot u_{h_{dt}} \right)^2 + \left(\frac{T_y}{h_{dt} \cdot (T_y - T_c)} \cdot \frac{\partial h_{dt} \cdot (T_y - T_c)}{\partial T_y} \cdot u_{T_y} \right)^2 + \left(\frac{T_c}{h_{dt} \cdot (T_y - T_c)} \cdot \frac{\partial h_{dt} \cdot (T_y - T_c)}{\partial T_c} \cdot u_{T_c} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (E.12)$$

$$u_{q''_{dt}} = \left[(u_{h_{dt}})^2 + \left(\frac{T_y}{(T_y - T_c)} \cdot u_{T_y} \right)^2 + \left(\frac{T_c}{(T_y - T_c)} \cdot u_{T_c} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{q''_{dt}} = \left[(0.0437)^2 + \left(\frac{49}{(49-28)} \cdot 0.02 \right)^2 + \left(\frac{30}{(49-28)} \cdot 0.015 \right)^2 \right]^{1/2} \cong 0.067 = \%6.7 \quad \text{olarak sonuç elde edilmiştir.}$$

q'' radyasyon:

q'' radyasyon = $\sigma \cdot \varepsilon \cdot 2 \cdot (T_y^4 - T_c^4)$ olarak tanımlı radyasyon ısı akısı belirsizliğini (E.13) denklemi kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$u_{q''_{radyasyon}} = \left[\left(\frac{\varepsilon}{\sigma \cdot \varepsilon \cdot 2 \cdot (T_y^4 - T_c^4)} \cdot \frac{\partial [\sigma \cdot \varepsilon \cdot 2 \cdot (T_y^4 - T_c^4)]}{\partial \varepsilon} \cdot u_{\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{T_y}{\sigma \cdot \varepsilon \cdot 2 \cdot (T_y^4 - T_c^4)} \cdot \frac{\partial [\sigma \cdot \varepsilon \cdot 2 \cdot (T_y^4 - T_c^4)]}{\partial T_y} \cdot u_{T_y} \right)^2 + \left(\frac{T_c}{\sigma \cdot \varepsilon \cdot 2 \cdot (T_y^4 - T_c^4)} \cdot \frac{\partial [\sigma \cdot \varepsilon \cdot 2 \cdot (T_y^4 - T_c^4)]}{\partial T_c} \cdot u_{T_c} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{q''_{radyasyon}} = \left[(u_{\varepsilon})^2 + \left(\frac{4 \cdot T_y^4}{(T_y^4 - T_c^4)} \cdot u_{T_y} \right)^2 + \left(\frac{4 \cdot T_c^4}{(T_y^4 - T_c^4)} \cdot u_{T_c} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{q''_{radyasyon}} = \left[(0.016)^2 + \left(\frac{4 \cdot 322^4}{(322^4 - 301^4)} \cdot \frac{2}{322} \right)^2 + \left(\frac{4 \cdot 301^4}{(322^4 - 301^4)} \cdot \frac{1.5}{301} \right)^2 \right]^{1/2} \cong 0.124 = \%12.4$$

olarak sonuç elde edilmiştir.

h_t:

$h_t = \frac{q''_{elek.} - q''_{dt} - q''_{rad}}{(T_y - T_j)}$ olarak tanımlanan taşınım ısı akısı katsayısı belirsizliğini (E.14) denklemi kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$u_{h_t} = \left[\left(\frac{q''_{elek.}}{h_t} \cdot \frac{\partial h_t}{\partial q''_{elek.}} \cdot u_{q''_{elek.}} \right)^2 + \left(\frac{q''_{dt}}{h_t} \cdot \frac{\partial h_t}{\partial q''_{dt}} \cdot u_{q''_{dt}} \right)^2 + \left(\frac{q''_{rad}}{h_t} \cdot \frac{\partial h_t}{\partial q''_{rad}} \cdot u_{q''_{rad}} \right)^2 + \left(\frac{T_y}{h_t} \cdot \frac{\partial h_t}{\partial T_y} \cdot u_{T_y} \right)^2 + \left(\frac{q''_j}{h_t} \cdot \frac{\partial h_t}{\partial T_j} \cdot u_{T_j} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (E.14)$$

$$\mathcal{U}_{h_t} = \left[\left(\frac{q''_{elek.}}{(T_y - T_j)} \cdot \frac{\partial^{q''_{elek.} - q''_{dt} - q''_{rad.}}}{\partial q''_{elek.}} \cdot \mathcal{U}_{q''_{elek.}} \right)^2 + \left(\frac{q''_{dt.}}{(T_y - T_j)} \cdot \frac{\partial^{q''_{elek.} - q''_{dt} - q''_{rad.}}}{\partial q''_{dt.}} \cdot \mathcal{U}_{q''_{dt.}} \right)^2 + \left(\frac{q''_{rad.}}{(T_y - T_j)} \cdot \frac{\partial^{q''_{elek.} - q''_{dt} - q''_{rad.}}}{\partial q''_{rad.}} \cdot \mathcal{U}_{q''_{rad.}} \right)^2 + \left(\frac{T_y}{(T_y - T_j)} \cdot \frac{\partial^{q''_{elek.} - q''_{dt} - q''_{rad.}}}{\partial T_y} \cdot \mathcal{U}_{T_y} \right)^2 + \left(\frac{q''_j}{(T_y - T_j)} \cdot \frac{\partial^{q''_{elek.} - q''_{dt} - q''_{rad.}}}{\partial T_j} \cdot \mathcal{U}_{T_j} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\mathcal{U}_{h_t} = \left[\left(\frac{q''_{elek.}}{q''_{elek.} - q''_{dt} - q''_{rad.}} \cdot \mathcal{U}_{q''_{elek.}} \right)^2 + \left(\frac{-q''_{dt.}}{q''_{elek.} - q''_{dt} - q''_{rad.}} \cdot \mathcal{U}_{q''_{dt.}} \right)^2 + \left(\frac{-q''_{rad.}}{q''_{elek.} - q''_{dt} - q''_{rad.}} \cdot \mathcal{U}_{q''_{rad.}} \right)^2 + \left(\frac{T_y}{(T_y - T_j)} \cdot \frac{-1}{(T_y - T_j)^2} \cdot \mathcal{U}_{T_y} \right)^2 + \left(\frac{q''_j}{(T_y - T_j)} \cdot \frac{1}{(T_y - T_j)^2} \cdot \mathcal{U}_{T_j} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\mathcal{U}_{h_t} = \left[\left(\frac{944}{944-16-101} \cdot 0,0128 \right)^2 + \left(\frac{-16}{944-16-101} \cdot 0,083 \right)^2 + \left(\frac{-101}{944-16-101} \cdot 0,196 \right)^2 + \left(\frac{49}{(49-28)} \cdot \frac{-1}{(49-28)^2} \cdot 0,02 \right)^2 + \left(\frac{28}{(49-28)} \cdot \frac{1}{(49-28)^2} \cdot 0,015 \right)^2 \right]^{1/2}$$

$\mathcal{U}_{h_t} = [(0,0146)^2 + (-0,00161)^2 + (0,023)^2 + (0,063)^2 + (0,032)^2]^{1/2} \cong 0,076 = \%7,6$ olarak sonuç elde edilmiştir.

Nusselt sayısı belirsizliğinin hesaplanması:

$Nu = \frac{h \cdot D}{k}$ olarak tanımlanan Nusselt sayısı için belirsizlik değeri akışkanın ısı iletim katsayısı, ısı transfer katsayısı ve lüle çapına bağlı olarak değişmektedir. Nusselt için belirsizlik aşağıdaki (E.15) denklemi yardımıyla hesaplanabilmektedir;

$$u_{Nu} = \frac{w_{Nu}}{Nu} = \left[(1)^2 \left(\frac{w_h}{h} \right) + (1)^2 \left(\frac{w_D}{D} \right) + (-1)^2 \left(\frac{w_k}{k} \right) \right]^{1/2} \quad (E.15)$$

$u_{Nu} = \frac{w_{Nu}}{Nu} = [(0,076)^2 + (0,0015)^2 + (0,00538)^2]^{1/2} \cong 0,0776 = \%7,76$ olarak sonuç elde edilir.

ÖZGEÇMİŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğrenimine başladı ve bölümü birinci olarak tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Lisans ve yüksek lisans öğrenimleri sırasında iki farklı TÜBİTAK projelerinde proje asistanı olarak görev aldı. İstanbul Arel Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

