

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

**KENDİ EKSENİ ETRAFINDA DÖNEN ISITILMIŞ SİLİNDİRİN ÇARPAN JET
İLE SOĞUTULMASI**

DOKTORA TEZİ

Göngür PUSAT

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Abdulmuttalip ŞAHİNASLAN

OCAK 2026

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

**KENDİ EKSENİ ETRAFINDA DÖNEN ISITILMIŞ SİLİNDİRİN ÇARPAN JET
İLE SOĞUTULMASI**

DOKTORA TEZİ

**Göngür PUSAT
(36173618031)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Abdulmuttalip ŞAHİNASLAN
Eş Danışman: Prof. Dr. Nevin ÇELİK**

OCAK 2026

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocam İnönü Üniversitesi'nden Sayın Dr. Öğretim Üyesi Abdulmuttalip ŞAHİNASLAN'a, Fırat Üniversitesi'nden ikinci danışman hocam Sayın Prof. Dr. Nevin ÇELİK'e teşekkür ederim ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışması süresince desteğini esirgemeyen tez izleme komitesi üyeleri hocamlarım; Sayın Prof. Dr. Mehmet YILMAZ'a, Prof. Dr. Adıgüzel Mehmet YÜCEER'e, doktora eğitimim süresince ders alma fırsatı bulduğum Sayın hocalarım; Doç. Dr. Tarkan KOCA'ya, Prof. Dr. Rasim BEHÇET'e, Doç. Dr. Erkan BAHÇE'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, çok büyük desteklerini gördüğüm Fırat Üniversitesi'nden dostum Sayın Dr. Öğr. Üyesi Celal KISTAK'a ve motivasyonumu sürekli yenileyen dostum Doç. Dr. Cenk YANEN'e teşekkür ederim.

Ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi doktora çalışmalarım süresince de bana her türlü desteklerini sunan annem Nahide Naile PUSAT'a, ve kardeşlerim Gürkan ve Gökçe'ye teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, İnönü Üniversitesi BAP birimi tarafından FDK-2021-2574 numaralı proje ile desteklenmiştir Katkılarından dolayı İnönü Üniversitesi BAP birimine teşekkürlerimi sunarım.

Bu doktora tez çalışması, rahmetli babam Hasan Hüseyin PUSAT'ın aziz hatırasına ve oğlum, can şenliğim Hasan Arın PUSAT'a ithaf edilmiştir.

Göngür PUSAT

Malatya, 2026

ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduğum “Kendi Eksenini Etrafında Dönen Isıtılmış Silindirin arpan Jet ile Soğutulması” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı dūřecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Göngür PUSAT



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	viii
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETİ	2
2.1 Çarpan Jetin Yapısı.....	2
2.2 Çarpan Jetlerde Isı Transferi.....	4
2.3 Hareketli Yüzeylere Çarpan Jetlerde Isı Transferi	5
2.4 Literatür Araştırması.....	6
2.4.1. Hareketli yüzeylere çarpan jetlerle ilgili çalışmalar	7
2.4.2. Farklı jet geometrisinin kullanıldığı çalışmalar	9
2.4.3. Dönen yüzeylere çarpan jetlerle ilgili çalışmalar	10
3. MATERYAL VE METOT	14
3.1 Deney Düzenegi.....	14
3.1.1. Jet akımının sağlanması.....	15
3.1.2. Hız ölçümü	16
3.1.3. Lüleler.....	17
3.1.4. Dönen silindir	17
3.1.5. Sıcaklık ölçümü	19
3.2 Deneylerin Yapılışı	20
3.3 Deneysel Verilerin Hesaplanması.....	21
3.4 Belirsizlik Analizi	23
3.5. Deneysel Tasarım	24
4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME.....	29
4.1. Deney Sonuçları.....	29
4.1.1 Deney 1 sonuçları	29
4.1.2 Deney 2 sonuçları	31
4.1.3 Deney 3 sonuçları	33
4.1.4 Deney 4 sonuçları	36

4.1.5 Deney 5 sonuçları	39
4.1.6 Deney 6 sonuçları	41
4.1.7 Deney 7 sonuçları	43
4.1.8 Deney 8 sonuçları	45
4.1.9 Deney 9 sonuçları	47
4.1.10 Deney 10 sonuçları	49
4.1.11 Deney 11 sonuçları	51
4.1.12 Deney 12 sonuçları	53
4.1.13 Deney 13 sonuçları	55
4.1.14 Deney 14 sonuçları	57
4.1.15 Deney 15 sonuçları	59
4.1.16 Deney 16 sonuçları	61
4.1.17 Deney 17 sonuçları	63
4.1.18 Deney 18 sonuçları	65
4.2. Kararlı Hal Koşullarında Ortalama Nusselt (Nu_{ort}) ve Durma Noktası Nusselt (Nu_d) Sayıları	67
4.3 Değişken Parametrelerin Isı Transferi Üzerindeki Etkisileri	69
4.3.1. Lüle geometrisi ve reynolds sayısının etkisi	69
4.3.2. Lüle-yüzey mesafesinin etkisi	70
4.3.3. Dönme hızının (devir) etkisi	71
4.3.4. Yüzey sıcaklığının etkisi	71
4.4 Varyans Analizi (Anova) Sonuçları	72
4.4.1. Varyans analizi (anova) ve parametre etkileri	73
4.3.2. Optimum çalışma koşulları	75
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	76
5.1. Sonuçlar	76
5.2. Öneriler	77
KAYNAKLAR	78
ÖZGEÇMİŞ	84

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Çarpan jetin çarpma bölgeleri [8].	3
Şekil 3.1: Deney düzeneğinin şematik gösterimi; a) önden görünüş, b) üstten görünüş	14
Şekil 3.2: Deney düzeneği fotoğrafları; a) hava jeti düzeneği, b) lüle-silindir düzeneği....	15
Şekil 3.3: Anemometre ile ölçüm yapılması.	16
Şekil 3.4: Lülelerin; a) önden ve b) üstten görünüşü.	17
Şekil 3.5: Hareket mekanizmasının; a) üstten ve b) önden görünüşü.	18
Şekil 3.6: Termal kamera	20
Şekil 3.7: Çarpma öncesi sabit sıcaklığın elde edildiği örnek termal kamera görüntüsü ...	21
Şekil 4.1: Deney 1 için zamana bağlı sıcaklık konturları.....	30
Şekil 4.2: Deney 1 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi	31
Şekil 4.3: Deney 2 için zamana bağlı sıcaklık konturları.....	32
Şekil 4.4: Deney 2 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi	33
Şekil 4.5: Deney 3 için zamana bağlı sıcaklık konturları.....	34
Şekil 4.6: Deney 3 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi	35
Şekil 4.7: Deney 4 için zamana bağlı sıcaklık konturları.....	37
Şekil 4.8: Deney 4 için yerel Nusselt sayısının silindir çevresi boyunca değişimi.....	38
Şekil 4.9: Deney 5 için zamana bağlı sıcaklık konturları.....	40
Şekil 4.10: Deney 5 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi	41
Şekil 4.11: Deney 6 için zamana bağlı sıcaklık konturları.....	42
Şekil 4.12: Deney 6 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi	43
Şekil 4.13: Deney 7 için zamana bağlı sıcaklık konturları.....	44
Şekil 4.14: Deney 7 için yerel Nusselt sayısının silindir çevresi boyunca değişimi	45
Şekil 4.15: Deney 8 için zamana bağlı sıcaklık konturları.....	46
Şekil 4.16: Deney 8 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi	47
Şekil 4.17: Deney 9 için zamana bağlı sıcaklık konturları.....	48
Şekil 4.18: Deney 9 için Yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi	49
Şekil 4.19: Deney 10 için zamana bağlı sıcaklık konturları.....	50
Şekil 4.20: Deney 10 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi	51
Şekil 4.21: Deney 11 için zamana bağlı sıcaklık konturları.....	52
Şekil 4.22: Deney 11 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi	53
Şekil 4.23: Deney 12 için zamana bağlı sıcaklık konturları.....	54
Şekil 4.24: Deney 12 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi	55
Şekil 4.25: Deney 13 için zamana bağlı sıcaklık konturları.....	56
Şekil 4.26: Deney 13 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi	57
Şekil 4.27: Deney 14 için zamana bağlı sıcaklık konturları.....	58
Şekil 4.28: Deney 14 için Yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi	59
Şekil 4.29: Deney 15 için zamana bağlı sıcaklık konturları.....	60
Şekil 4.30: Deney 15 için Yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi	61
Şekil 4.31: Deney 16 için zamana bağlı sıcaklık konturları.....	62
Şekil 4.32: Deney 16 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi	63
Şekil 4.33: Deney 17 için zamana bağlı sıcaklık konturları.....	64
Şekil 4.34: Deney 17 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi	65
Şekil 4.35: Deney 18 için zamana bağlı sıcaklık konturları.....	66
Şekil 4.36: Deney 18 için yerel Nusselt sayısının silindir çevresi boyunca değişimi.....	67
Şekil 4.37: Kararlı durumda ortalama ve durma noktası Nusselt sayıları.....	67
Şekil 4.38: Farklı lüleler için $Nu_{ort}-Re$ değişimi ($H/D_h = 6$, $U_{ds} = 60$ dev/dk , $T_s = 75^\circ\text{C}$).....	69

Şekil 4.39: Farklı H/D_h oranları için $Nu_{ort}-Re$ değişimi (Üçgen lüle, $U_{ds} = 60$ dev/dk , $T_s = 75^\circ\text{C}$).....	70
Şekil 4.40: Farklı dönme hızları için $Nu_{ort}-Re$ değişimi (Üçgen lüle, $H/D_h = 3, T_s = 75^\circ\text{C}$)	71
Şekil 4.41: Farklı yüzey sıcaklıkları için $Nu_{ort}-Re$ değişimi (Üçgen lüle, $H/D_h = 3, U_{ds} = 60$ dev/dk)	72
Şekil 4.42: Ortalama Nusselt sayıları için S/N değerleri	73
Şekil 4.43: Parametrelerin sonuca olan etkisi	74



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1: Belirsizlik analizi sonuçları	24
Çizelge 3.2: Kullanılan ortogonal dizin	26
Çizelge 3.3: Tasarım parametrelerinin değerleri	27
Çizelge 4.1: Nusselt sayıları için ortalama S/N değerleri	73
Çizelge 4.2: Ortalama Nusselt sayıları için ANOVA test sonuçları.	74
Çizelge 4.3: Optimum parametreler	75



SEMBOLLER VE KISALTMALAR

A_s	: Silindir alanı (m ²)
$C_{\square}$	: Özgül ısı kapasitesi (J/ kgK)
D	: Çap (m)
$D_{\square}$	: Hidrolik çap (m)
h	: Isı taşınım katsayısı (W/m ² K)
i, j	: x ve y koordinat sistemi notasyonları
k	: Isı iletim katsayısı (W/mK)
L_s	: Silindir uzunluğu (m)
n	: Serbestlik derecesi katsayısı
Nu_{ort}	: Ortalama Nusselt sayısı
Nu_x	: Yerel Nusselt sayısı
P	: Güç (W)
r	: Yarıçap (m)
R	: Hız oranı (Jet hızı/plaka hızı)
s/D_h	: Pürüzlülük çap oranı
S/N	: Sinyal gürültü oranı
SS_{factor}	: Çarpanın karelerin toplamı
SS_m	: Ortalama karelerin toplamı
SS_t	: Karelerin toplamı
t	: Zaman (s)
T_{ϕ}	: Çevre sıcaklığı (°C)
T_w	: Silindir yüzey sıcaklığı (°C)
T_y	:Yüzey sıcaklığı (°C)
T_j	: Jet sıcaklığı (°C)
u, U	: x yönündeki hız bileşeni (m/s)
v, V	: y yönündeki hız bileşeni (m/s)
V_{factor}	:Faktörün seviye sayısı
V_{jet}	: Jet hızı (m/s)
$V_{silindir}$	:Silindir hızı(m/s)
$\eta_{\square}$	:Toplam ortalama
ε	: Epsilon- ışıınım ısı transfer katsayısı
ν	:Kinematik viskozite (m ² /s)

Kısaltmalar

<i>.csv</i>	:comma-seperated value
<i>.dat</i>	:Generic data format
<i>Ke</i>	: Kinetik Enerji
<i>Nu</i>	: Nusselt Sayısı
<i>Pr</i>	:Prandtl Sayısı
<i>.ravi</i>	:Radiographic audio video interleave
<i>Re</i>	:Reynolds Sayısı



ÖZET

Doktora Tezi

KENDİ EKSENİ ETRAFINDA DÖNEN ISITILMIŞ SİLİNDİRİN ÇARPAN JET İLE SOĞUTULMASI

Göngür PUSAT

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

84+XI sayfa

2026

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Abdulmuttalip ŞAHİNASLAN

Bu tez çalışmasında dönen silindirik bir yüzeye jet çarpması deneysel olarak incelenmiştir. Çarpan jetlerde önemli olan; lüle geometrisi (dairesel, kare ve üçgen), jet-yüzey arası mesafesinin hidrolik çapa oranı ($H/D_h = 3, 6$ ve 9), Reynolds sayısı ($Re = 2000-7000$), silindirin dönme hızı ($U_{cr} = 20, 40, 60$ dev/dk) ve dönen silindirin sabit yüzey sıcaklıkları ($T_s = 45\text{ °C}, 60\text{ °C}$ ve 75 °C) gibi bazı parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışma Taguchi deneysel tasarım yöntemi ile tasarlanmıştır. Sonuç olarak, optimum çalışma koşullarının, en yüksek Reynolds sayısı, yüksek yüzey sıcaklığı ve yüksek dönme hızı kombinasyonunda sağlandığı görülmüştür. Doğrulama testleri, Taguchi tabanlı deneysel modelin tahminleri ile gerçek sonuçlar arasında yüksek bir uyum olduğunu kanıtlamış, bu da elde edilen bulguların dönen makine elemanlarının termal yönetim tasarımlarında güvenilir bir referans olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Çarpan jet, kendi ekseninde dönen ısıtılmış silindir, soğutma, lüle

ABSTRACT

Phd Thesis

COOLING OF A HEATED ROTATING CYLINDER BY IMPINGING JET

Göngür PUSAT

Inonu University

Graduate School of Nature and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

84+XI pages

2026

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Abdulmuttalip ŞAHİNASLAN

This thesis experimentally investigates the impact of a jet on a rotating cylindrical surface. The effects of several important parameters on heat transfer were investigated, including nozzle geometry (circular, square, and triangular), jet-to-surface distance to hydraulic diameter ratio ($H/D_h = 3, 6, \text{ and } 9$), Reynolds number ($Re = 2000\text{--}7000$), cylinder rotation speed ($U_{cr} = 20, 40, 60 \text{ dev/dk}$), and constant surface temperatures of the rotating cylinder ($T_s = 45^\circ\text{C}, 60^\circ\text{C}, \text{ and } 75^\circ\text{C}$). The experimental design was based on the Taguchi experimental design method. The results showed that optimum operating conditions were achieved with the highest Reynolds number, high surface temperature, and high rotation speed combination. Verification tests demonstrated a high agreement between the predictions of the Taguchi-based experimental model and the actual results, indicating that the findings can be used as a reliable reference in the thermal management design of rotating machine elements.

Keywords: Impinging jet, heated cylinder rotating around its own axis, cooling, nozzle,

1. GİRİŞ

Jet akışları, hem temel akışkanlar dinamiği hem de mühendislik uygulamaları açısından büyük bir öneme sahiptir. Özellikle soğutma, kurutma ve temizleme gibi endüstriyel süreçlerde yaygın olarak kullanılan bu akışlar, yüksek hızdaki akışkanın belirli bir yüzeye yönlendirilmesiyle çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu bağlamda, "çarpan jet" olayı, yüksek momentum etkisiyle öne çıkmakta ve hedef yüzeyde oluşan yoğun ısı transferi nedeniyle büyük bir ilgi görmektedir.

Çarpan jetlerin soğutma performansını artırmadaki rolü, yüksek yerel ısı taşınım katsayısı sağlamaları ve hedef yüzeyde homojen olmayan ancak etkili bir soğutma mekanizması sunmaları nedeniyle büyük bir öneme sahiptir. Geleneksel soğutma yöntemleri, özellikle yüksek sıcaklıklara maruz kalan yüzeylerde yeterli ısı transferini sağlayamayabilirken, çarpan jetler ısı sınır tabakasını incelterek daha etkin bir ısı transferi gerçekleştirmekte ve düşük sıcaklık farklarıyla yüksek soğutma kapasiteleri sunmaktadır.

Çarpan jet uygulamalarında ısı transferini etkileyen birçok faktör vardır. Jetin çarptırıldığı yüzey bunlardan en önemlisidir. Konuya dair yapılan araştırmalar genelde düz yüzeylere çarpmayı içerse de, yüzeyin düz olmaması durumu uygulamada sık karşılaşılan bir durumdur. Dönen tambur ve merdanelerin soğutulması, rulo şekilli kağıt, tekstil ve film kurutulması, ayrıca rulo şekilli metal yüzeylerin soğutulması bu uygulamalardan bazılarıdır.

Dönen yüzeylere çarpan jet akışları, yüzey hareketinin jet akış karakteristiği ve ısı transferi üzerindeki etkileri nedeniyle farklı bir dinamik sergilemektedir. Bu durum göz önüne alınarak bu tez çalışmasında, farklı lüle geometrileri (üçgen, dairesel, kare), Reynolds sayıları (2000-7000), lüle hidrolik çapı (0,008 m), lüle-silindir arası mesafe (3-6-9) ve silindir dönme hızları (20-40-60) gibi parametrelerin çarpan jet ile soğutma üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Bu tez beş ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde giriş kısmı yer almakta olup, çalışmanın kapsamı ve amacı ele alınmaktadır. İkinci bölümde, genel bilgiler ve literatür araştırması sunulmaktadır. Üçüncü bölümde, materyal ve metod ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Dördüncü bölümde, bulgular ve sonuçlar analiz edilerek tartışılmaktadır. Son olarak, beşinci bölümde genel bir değerlendirme yapılarak çalışma tamamlanmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Çarpan Jetin Yapısı

Çarpan jetler, etkili bir soğutma mekanizması sunmaları nedeniyle geniş uygulama alanına sahip yöntemlerdir. Bir lüle veya yarık (slot) aracılığıyla yüksek hızda püskürtülen akışkanın hedef bir yüzeye çarptırılmasıyla oluşan bu sistem, ısı transferini artırma potansiyeline sahiptir. Çarpan jetlerin temel çalışma prensibi, sınır tabakayı kaldırarak veya incelterek daha etkin bir ısı transferi sağlamaya dayanır. Bu durum, enerji verimliliğini artırabilir; çünkü yüksek ısı transfer katsayısı, daha hızlı ve daha etkili soğutma sürecini mümkün kılar.

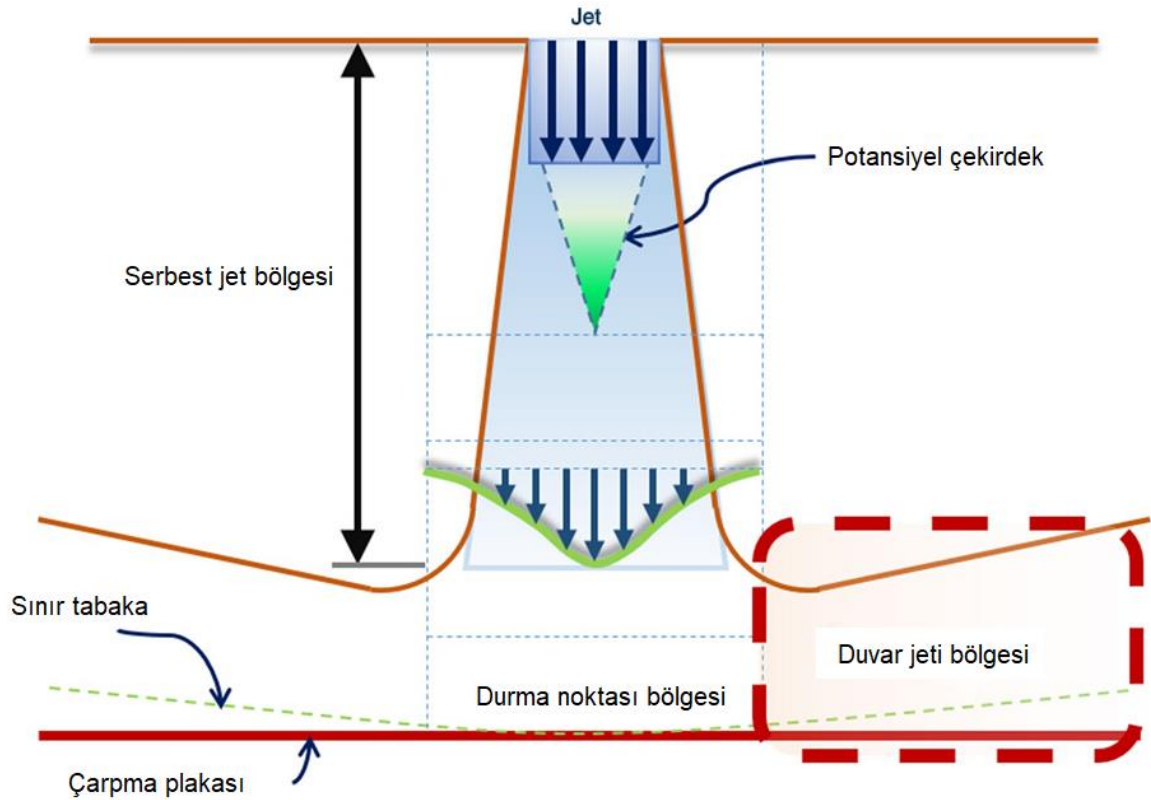
Çarpan jetler, genellikle türbülanslı bir akışın bir yüzeye yönlendirilmesiyle oluşturulur. Bu teknik, özellikle ısı ve madde transferini artırmak amacıyla tercih edilmektedir. Jetin türbülans seviyesi, hedef yüzeye olan mesafesi ve jet açısının optimizasyonu, maksimum ısı ve madde transferinin sağlanması açısından kritik parametrelerdir. Bu faktörlerin uygun şekilde belirlenmesi, çarpan jetlerin etkinliğini artırarak sistem performansını iyileştirebilir.

Tipik bir çarpan jetin yapısı Şekil 2.1’de gösterilmektedir. Bazı unsurlar, çarpan jetlerin uygulamalarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir ve sistem tasarımında dikkate alınması gereken önemli parametreler arasında yer almaktadır. Tipik bir çarpan jette şekilde de görüldüğü üzere üç temel bölge oluşur:

Serbest jet bölgesi (ilk karışım alanı): Jetin çıkışından itibaren, jet ve çevresi arasındaki momentum transferi nedeniyle jet sınırı genişlerken, hız çekirdeği daralır. Bu bölgede, jetin merkez hattındaki hız en yüksek seviyede olup, lüle çıkışından uzaklaştıkça azalır. Serbest jet alanı, çarpma yüzeyinden bağımsızdır ve akış burada serbest olarak gelişir. Bu bölgede, çevresel akışkan jet içerisine karışarak hız düşüşüne neden olur. Karışım veya sürtünme bölgesi olarak adlandırılan bu alan, jetin merkez hattındaki hızın lüle çıkış hızına eşit olduğu potansiyel çekirdek bölgesini içerir. Literatürde, hızın lüle çıkış hızının %95’ine düştüğü nokta potansiyel çekirdek bölgesinin sonu olarak kabul edilmektedir [1]. Gauntner ve ark. [2] tarafından yapılan çalışmalar, potansiyel çekirdek uzunluğunun lüle çapının altı katı kadar olduğunu ($L_{pc} = 6D$) göstermiştir. Bu bulgu, sonraki araştırmalar tarafından desteklenerek literatürde yaygın bir kabul görmüştür [3]. Schlichting [4] tarafından yapılan analizler, potansiyel çekirdek sonrası eksenel hız düşüşünün ve jet yarıçap genişlemesinin eksenel mesafe ile orantılı olduğunu göstermektedir.

Durma noktası (durgunluk) bölgesi (bozulma bölgesi): Çarpma plakasına yakın bölge genellikle "durgunluk bölgesi" olarak tanımlanır. Bu bölgede akış, hedef yüzeyin etkisiyle önce yavaşlar, ardından hızlanır. Eksenel hızda hızlı bir azalma görülürken, statik basınçta belirgin bir artış meydana gelir. Ancak, bu bölgenin akış dinamikleri üzerine yapılan teorik analizler sınırlı olup, mevcut deneysel çalışmalar da yeterli detay sağlamamaktadır. Tani ve Komatsu [5] ile Girald ve ark. [6] bu bölge hakkında bazı tespitlerde bulunmuş ve belirli temel özellikleri ortaya koymuştur.

Duvar jeti bölgesi: Çarpma bölgesindeki akış, momentumun sıfır olduğu akışkanın çevreden çekilmesi nedeniyle sürekli olarak hızlanamaz. Durma bölgesinde ivmelenen akış, duvar jeti bölgesine geçtiğinde tekrar yavaşlar. Bu nedenle, yüzeye paralel hız bileşenleri belirli bir noktaya kadar artarak maksimum seviyeye ulaşır, ardından tekrar azalır. Duvar jeti içinde hız profilleri incelendiğinde, çarpma noktasında ve serbest yüzeylerde hızın sıfıra ulaştığı görülmektedir. Eğer jet, ısıtılmış bir yüzeye yönlendirilerek soğutma sağlanıyorsa, ısı taşınımı hem durma bölgesinde hem de duvar jeti bölgesinde gerçekleşmektedir. Yapılan çalışmalar, duvar jetlerinin paralel akışlara kıyasla daha yüksek ısı transfer katsayısı sunduğunu göstermektedir [7].



Şekil 2.1: Çarpan jetin çarpma bölgeleri [8].

2.2 Çarpan Jetlerde Isı Transferi

Bu çalışmada, hava jetinin lüleden belirli bir hızı U_j ve sıcaklık T_j ile çıktığı kabul edilmektedir. Jetin, çevresiyle termal dengede olduğu varsayımıyla ($T_j = T_\infty$) olduğu öngörülmektedir. Çarpma yüzeyinde, sabit sıcaklık veya sabit yoğunluk koşulları altında ısı transferi gerçekleşebilir. Bu bağlamda, hedef yüzey üzerindeki ısı transfer mekanizmasının incelenmesinde Denklem (2.1) 'de verilen Newton'un soğuma yasası temel alınarak analizler yürütülecektir.

$$q = h(T_w - T_j) \quad (2.1)$$

Jetin lüle çıkışındaki türbülans seviyesinden etkilenmediği ve yüzeyin hareketsiz olduğu varsayılmaktadır. Ancak, jetin çarpma hızına kıyasla çok düşük hızlara sahip yüzeyler için bu kabul gevşetilebilir [9].

Jet akışının bir yüzeye çarpmasıyla meydana gelen taşınım katsayısı üzerine geniş kapsamlı bir çalışma Martin [10] tarafından gerçekleştirilmiştir. Karakteristik uzunluk, akış kesit alanının dört katının ıslak çevre uzunluğuna bölünmesiyle tanımlanan hidrolik çap ile ifade edilmektedir. Bu durumda, yuvarlak bir lüle için karakteristik uzunluk doğrudan çap olarak alınırken, $L \gg w$ kabulü altında yarıklı lülelerde karakteristik uzunluk genişliğin iki katı olarak belirlenmektedir [11]. Bu durumda, yuvarlak bir lüle için Nusselt sayısı:

$$Nu = h \times D_h / k_{hava} \quad (2.2a)$$

yarık bir lüle için ise:

$$Nu = h \times 2w / k_{hava} \quad (2.2b)$$

şeklinde ifade edilir. Lüle ve levha arasındaki mesafenin büyük olduğu durumlarda ($H/D_h \geq 5$), Nusselt sayısının dağılımı, durma noktasında maksimum değere ulaştıktan sonra azalan çan eğrisi şeklinde karakterize edilir.

Lüle-levha aralığının küçük olduğu ($H/D_h \leq 5$) durumlarda ise Nusselt sayısı iki tepe noktası ile tanımlanır. İkinci tepe noktasının büyüklüğü, jetin Reynolds sayısının artışıyla birlikte yükselir ve birinci tepe noktasını geçebilir. İki farklı dağılımı ayıran kritik aralık $H/D_h \leq 5$ olup, bu değer sabit hız çekirdeğinin uzunluğu ile ilişkilidir. İkinci tepe noktasının oluşumu, durma bölgesinde hızlanan akışın duvar jeti bölgesinde yavaşlamasıyla birlikte türbülans seviyesindeki keskin artışa dayandırılmaktadır [10]. Ayrıca, ek tepe noktalarının varlığı gözlemlenmiş olup, bu noktaların türbülanslı duvar jetine geçiş sırasında durma bölgesinde oluşan girdaplarla bağlantılı olduğu belirlenmiştir [11].

Ortalama Nu sayıları, yüzey alanı boyunca yerel değerlerin integrali alınarak bulunabilir. Tek lüleler için ısı geçiş bağıntıları:

$$Nu_{ort} = f \left(Re, Pr, \frac{x}{D_h} \text{ (veya } \frac{r}{D_h} \right), H/D_h \quad (2.3)$$

$$Re = \frac{U_j D_h}{\nu} \quad (2.4)$$

olup, hidrolik çap yuvarlak lüleler için D , yarıklı lüleler için $2W$ olarak tanımlanmıştır.

2.3 Hareketli Yüzeylere Çarpan Jetlerde Isı Transferi

Hareketli yüzeylere çarpan jetlerde ısı transferi, özellikle soğutma/ısıtma uygulamalarında önemli bir konudur (örneğin; şerit sac soğutma, türbin kanatları, dönen diskler). Bir akışkan jeti (hava, su vb.) bir yüzeye çarptığında jet, durgunluk noktasında hızını sıfıra yaklaştırır ve bu bölgede çok yüksek ısı transfer katsayısı (h) oluşur. Jet yüzey boyunca radyal olarak yayılır. Eğer yüzey hareketliyse (doğrusal ya da dönele), sınır tabaka yapısı değişir, kayma gerilmesi artar ve ısı transferi genellikle sabit yüzeye göre artar. Hareketli yüzeylere çarpan jetlerde genel eğilim yüzey hareketi arttıkça sınır tabakanın incilmesi, karışımın artması ve ısı transfer katsayısının yükselmesidir. Çok yüksek hızlarda ise akış ayrılması ve ısı transferinde düzensizlik görülebilir.

Hareketli yüzeyin etkisi parametrelere bağlı olarak değişir. Şöyle ki, doğrusal hareketli yüzeyde (konveyör bant üzerindeki sıcak levha gibi) yüzeyin hareket hızı sınır tabakayı inceltir, akış yeniden gelişir. Dolayısıyla Nusselt sayısı artar. Sonuç, daha yüksek konvektif ısı transferidir. Hareketli yüzeylere çarpan jetlerde ısı transferini etkileyen parametreler jet hızı, lüle çapı ve geometrisi (dolayısıyla akışın Re sayısı), jet-yüzey mesafesi, türbülans seviyesi, yüzeyin hareket hızı ($U_{\square}$), varsa dönme hızı (ω) (dolayısıyla yüzey hareketinin Re sayısı) yüzeyin pürüzlülüğü, ve yüzey sıcaklığı sayılabilir.

Hareket halindeki yüzeylere jet çarpması durumunda oluşacak olan durgunluk bölgesinin Nusselt sayısı için şu korelasyon önerilmiştir [12]:

$$Nu_0 = 0.042 Re_d^{0.565} Pr^{0.4} B^{3.41} \quad (2.7)$$

Denklem (2.7)'da verilen korelasyon, $2000 < Re_d < 55.000$ için geçerlidir; burada Re_d , lüle çapı D ve çıkış hızı U_j 'e dayalı Reynolds sayısıdır, Pr , Prandtl sayısıdır ve

$$B = 2 \frac{\partial u_r}{\partial r} \frac{D}{U_j} \quad (2.8)$$

Hareketli yüzeylerde, özellikle dönen sistemlerde iki tür Re sayısına ilave olarak Rossby sayısı (Ro) da hesaplanabilir. Ro sayısı, dönen sistemlerde akışkan hareketini tanımlamak için kullanılan boyutsuz bir sayıdır. Akışta atalet kuvvetlerinin, Coriolis kuvvetlerine göre ne kadar baskın olduğunu gösterir:

$$Ro = \frac{U_j}{2\Omega L} \quad (2.6)$$

burada Ω jet hızının plaka (yüzey) hızına oranıdır ($\Omega = U_j/U_s$) (birçok çalışmada Ω yerine bu oran R ile gösterilmiştir). L ise karakteristik uzunluktur.

Hareketli yüzeylere çarpan jetlerin önemli bir türü olan dönen bir silindire çarpan jet ile ısı transferi, akışkanlar mekaniği ve ısı transferinde sık çalışılan bir konudur. Bir akışkan jeti, eksenini etrafında dönen bir silindir yüzeyine dik ya da eğik olarak çarpar. Jetin oluşturduğu durma noktası ve silindirin çevresel hızı, yüzeydeki ısı transferini birlikte belirler. Silindirin dönmesi, klasik sabit silindir-jet problemine göre akışı önemli ölçüde değiştirir; örneğin durma noktası kayar (dönme yönüne doğru) ve sınır tabaka asimetrik hale gelir. Ayrıca yüzey kayma gerilmesi artar, türbülans seviyesi değişir, sonuç olarak ısı transferi, bazı koşullarda artar, bazı koşullarda azalır [13].

2.4 Literatür Araştırması

Literatür incelendiğinde, çarpan jet akışlarının farklı mühendislik uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanıldığı ve bu sistemlerin ısı transferi performansını artırmak amacıyla yoğun olarak araştırıldığı görülmektedir. Çalışmaların büyük bir bölümü, sabit yüzeylere yönlendirilen jetlerin akış karakteristiklerini, ısı transfer mekanizmalarını ve geometrik parametrelerin etkilerini incelemektedir. Bununla birlikte, hareketli ve dönen yüzeylere çarpan jet akışlarına yönelik araştırmaların sayıca daha sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle dönen silindirik yüzeyler üzerinde çarpan jet akışlarının oluşturduğu ısı transfer mekanizmaları üzerine yapılan çalışmalar, genellikle belirli sınırlamalar çerçevesinde ele alınmıştır. Literatürde, dönen yüzeylere çarpan jetlerin etkisini araştıran çalışmaların çoğu sayısal analizlere dayanmakta olup, deneysel çalışmaların sayıca az olduğu tespit edilmiştir. Sayısal çalışmalarda farklı jet parametreleri analiz edilmiş olsa da, deneysel araştırmalarda genellikle tekil jet konfigürasyonları incelenmiş ve bu çalışmaların çoğunda silindirin hareketiyle jet parametreleri arasındaki etkileşim detaylı olarak ele alınmamıştır. Ayrıca, mevcut çalışmaların büyük bir kısmı, çarpan jetlerin sabit veya hareketli yüzeyler üzerindeki etkisini incelerken, farklı geometrik konfigürasyonların ve akış parametrelerinin eş zamanlı etkisini ele alan kapsamlı deneysel araştırmalara yeterince yer verilmediği görülmektedir. Örneğin, literatürde sabit sıcaklıktaki dönen bir silindire çarpan farklı lüle geometrilerinin, değişen Reynolds sayılarının ve silindir dönme hızlarının kombine etkisini detaylı şekilde analiz eden deneysel çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bununla birlikte, dönen yüzeyin hareketinin jet akışıyla etkileşimi, çarpma bölgesindeki akış yapısını ve ısı transfer karakteristiğini önemli ölçüde değiştirdiğinden, bu eksikliğin giderilmesi mühendislik uygulamaları açısından büyük bir önem taşımaktadır. Bu tez çalışması, farklı lüle

konfigürasyonlarının, Reynolds sayılarının ve dönen silindir hızlarının çarpan jet soğutması üzerindeki etkilerini deneysel olarak analiz ederek literatürdeki bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Deneylerde, çarpan jetlerin dönen yüzey üzerindeki ısı transfer performansına etkisi detaylı bir şekilde incelenecek ve dönen yüzey ile jet akışı arasındaki etkileşimin türbülans yapısı üzerindeki etkileri araştırılacaktır. Ayrıca, dönen yüzeyin hareketinin, durma bölgesi ve duvar jeti bölgesindeki ısı transfer mekanizmalarına nasıl etki ettiği değerlendirilecektir. Çalışma kapsamında farklı lüle geometrileri kullanılarak, çarpan jet akışının yüzey üzerindeki ısı dağılımı ve taşınım katsayısı üzerindeki etkileri belirlenecek, böylece dönen yüzeylerde optimum soğutma parametrelerinin geliştirilmesine yönelik yeni bulgular elde edilecektir. Bu yönüyle çalışma, mevcut literatürde eksik kalan deneysel verileri sağlayarak, çarpan jet akışlarının dönen yüzeylerde nasıl optimize edilebileceğine dair yeni bir perspektif sunmaktadır. Özellikle endüstriyel uygulamalarda dönen silindirik yüzeylerin etkin bir şekilde soğutulmasını sağlamak amacıyla farklı jet parametrelerinin eş zamanlı analiz edilmesi, enerji verimliliği açısından önemli bir katkı sağlayacaktır. Bu bağlamda, tez çalışması, hem teorik hem de uygulamalı olarak çarpan jet akışlarının dönen yüzeylerle etkileşimini daha iyi anlamaya yönelik özgün bulgular sunarak, mühendislik uygulamalarına yönelik yenilikçi yaklaşımlar geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.

2.4.1. Hareketli yüzeylere çarpan jetlerle ilgili çalışmalar

Çarpan jetler üzerine yapılan araştırmalar literatürde geniş bir yer tutmaktadır. Bu alandaki çalışmalar, jet akışlarının hidrodinamik ve ısı transferi özelliklerini anlamaya yönelik önemli bulgular sunmuş ve sonraki araştırmalara temel teşkil etmiştir. Daha önceki alt başlıklarda belirtilen temel referanslar [1, 2, 6, 10, 11], çarpan jetlerin akış karakteristiği ve çarpma sonucu meydana gelen ısı transferi üzerine yapılan öncü ve önemli çalışmalardır.

Bu tez çalışması, sabit sıcaklıktaki dönen bir silindirin çarpan jetle soğutulmasını incelemektedir. Çalışmada, farklı lüle geometrileri, Reynolds sayıları ve silindir dönme hızlarının soğutma performansına etkileri deneysel olarak analiz edilmektedir. Literatürde çarpan jetler genellikle düz yüzeyler üzerinde incelenmiş olup, silindirik ve dönen yüzeylere çarpan jet akışları üzerine yapılan çalışmalar sınırlıdır. Dönen yüzeylerin hareketi, jetin çarpma bölgesindeki akış yapısını ve ısı transferi karakteristiğini önemli ölçüde değiştirdiğinden, bu çalışma mühendislik uygulamalarına yönelik yeni bulgular sunmayı amaçlamaktadır.

Hareketli plakaya çarpan jet üzerine yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu sayısal analizlere dayanmaktadır, ancak deneysel araştırmalar da literatürde yer almaktadır. Subba Raju ve Schlünder [14] tarafından yapılan öncü deneysel çalışmada, sürekli hareket eden ısıtılmış bir kayış üzerine tek bir hava jetinin çarpmasının ısı transferine etkisi incelenmiş ve hareketli yüzeye dik yönlendirilen jet akışının maksimum ısı transfer katsayısını, hareketsiz bir yüzeye kıyasla 1,5 ila 2 kat artırdığı tespit edilmiştir. Huang ve ark. [15], çapraz akışlı ve çapraz akışsız izotermal hareketli yüzeylere çarpan yarı kapalı yarık jetleri sayısal olarak analiz etmiş ve yüzey hareketinin jet akışına karşı olduğu bölgelerde Nusselt sayısının azaldığını, jet akışına paralel olduğu bölgelerde ise arttığını göstermiştir. Dinu ve ark. [16], hareketli bir yüzeye çarpan jetin ısı transferine etkisini hem üniform sıcaklık hem de üniform ısı akısı şartlarında incelemiştir. Çalışmada ısıtılmış yüzeyin hareket hızı ile jet çıkış hızı arasındaki oran $R = 0$ ile 1 arasında değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, ısı transferinin hem yüzey hızına hem de Reynolds sayısına duyarlı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, hareketli yüzeyde elde edilen Nusselt sayısının, hareketsiz yüzeye kıyasla daha homojen dağıldığı tespit edilmiştir. Achari ve Das [17], hareketli bir levhaya çarpan türbülanslı yarık jetlerde birleşik taşınım ve iletimle ısı transferini incelemiştir. Çalışmalarında, çarpma plakasının alt yüzeyinin, lüle çıkış sıcaklığından daha yüksek sabit bir sıcaklıkta tutulduğu ve yüzey hızı-jet hızı oranlarının $R = 0,25 - 1$ aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Yang ve Hao [18], sabit sıcaklıktaki sabit veya hareketli plakaya çarpan üç türbülanslı paralel yarık jetin sayısal analizini gerçekleştirmiştir. Sonuçlara göre, yüzey hareketinden kaynaklanan sürtünmenin, ısı transferine kıyasla daha fazla etkilendiği belirlenmiştir.

Chattopadhyay ve ark. [19] hareketli bir yüzeye çarpan yarık jet dizisinde türbülanslı akışı ve ısı transferini incelemiştir. Yüzey hızının artması genel ısı transferini azaltırken, Nusselt sayısının yüzey boyunca daha homojen dağıldığı tespit edilmiştir. Aynı sonuçlar, Chattopadhyay ve Saha [20] tarafından düşük Reynolds sayıları için de doğrulanmıştır. Chattopadhyay ve Saha [21] hareketli bir izoterm plakaya çarpan tek bir dik yarıklı jeti sayısal olarak modellemiş, Chattopadhyay [22] ise sabit sıcaklıkta hareketli bir plaka üzerine etki eden üç dairesel çarpan jeti incelemiştir. Kadiyala ve Chattopadhyay [23], laminar rejimde hareket eden bir plakaya çarpan yarık jetlerin en uygun konfigürasyonlarını incelemiş ve maksimum ısı transferi için jet çıkış yüksekliği ile yüzey hızının düşük olması gerektiğini belirlemiştir. Benzer şekilde, Kadiyala ve Chattopadhyay [24] tarafından hareketli bir izotermal plaka üzerinde çarpan yuvarlak jetler dizisi sayısal olarak analiz edilmiş ve hareketli yüzeyde ısı transferinin sabit yüzeye kıyasla daha fazla olduğu

bulunmuştur. Kadiyala ve Chattopadhyay [25], laminardan türbülanslı akışa geçişi inceleyerek, hareketli yüzeye çarpan yarık jetlerin ısı transferi üzerindeki etkisini değerlendirmiştir.

Zumbrunnen [26] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yüzey hareketinin jet düzlemine dik yönlendirildiği senaryoda sınır tabaka gelişiminin yavaşlamasının daha etkin bir ısı transferiyle sonuçlandığı tespit edilmiştir. Benmouhoub ve Mataoui [27], hareketli izotermal bir plakaya çarpan jetlerin eğim açısının ısı transferi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sonuçlar, jetin ters yönde eğilmesinin durma noktası bölgesinde ısı transferini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Benmouhoub ve Mataoui [28] eğimli bir düzlem türbülanslı jetin hareketli bir yatay izotermal sıcak duvar ile etkileşimini incelemiş, jet eğiminin durma noktası konumunu belirlemede önemli bir etkiye sahip olduğunu ve ısı transferinin jet ile hareketli plaka hızlarına büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir. Seraj ve Gadala [29], hareketli yüzeye çarpan su jetleri ile ilgili çalışmalarında, hareketli hedef yüzeyinin ıslatma bölgesi üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Barbosa ve ark. [30], hareket eden bir plakaya çarpan çoklu hava jetlerinin deneysel analizini yapmış ve bu tür jetlerin hedef yüzey ile etkileşiminin oldukça karmaşık bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Behera ve Rathore [31], düşük Reynolds sayılarında hareketli bir plaka üzerindeki türbülanslı düzlem ofset jet akışının sayısal simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Plaka hızının artmasıyla jet yayılmasının azaldığı gözlemlenmiştir. Baghel ve Lee [32], üniform olarak ısıtılmış hareketli bir yüzeye çarpan sıvı jet akışını incelemiş, $Re = 4000$ 'de yerçekiminin ara yüzey yapılarını önemli ölçüde etkilediğini ve yüzey hızı arttıkça ısı uzaklaştırma oranının da arttığını tespit etmiştir.

2.4.2. Farklı jet geometrisinin kullanıldığı çalışmalar

Literatürde yapılan çalışmalar göstermektedir ki, çarpan jet araştırmalarının büyük bir çoğunluğunda dairesel veya yarık jetler kullanılmıştır. Farklı geometrilere sahip jetlerin incelendiği çalışmalar ise sınırlı sayıdadır. Çelik [33] tarafından gerçekleştirilen deneysel bir araştırmada, üçgen, kare ve dairesel jetlerin pürüzlü yüzeylere çarpması incelenmiştir. Sonuçlar, kare jetin en yüksek ortalama Nusselt sayısını sağladığını, üçgen jetin ise en düşük ortalama Nusselt sayısını verdiğini ortaya koymuştur. Ancak, bu değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Vandsburger ve Ding [34] türbülanslı jetin eşkenar üçgenden çıkması durumunu inceleyerek, jetin azimut eksenel simetrik ve sarmal uyarma modları ile aktif kontrolünü sağlamış ve çıkış düzleminde 30 hidrolik çapa kadar jetin gelişimini takip etmiştir. Benzer şekilde, Quinn [35] türbülanslı jetin eşkenar üçgenden çıkışı üzerine yaptığı

çalışmada, ortalama hız vektörünün üç bileşeni, üç türbülanslı normal gerilme ve iki türbülanslı birincil kayma gerilmesi ile ilgili deneysel veriler sunmuştur. Shadow ve ark. [36] ise borulardan ve deliklerden çıkan eşkenar ve ikizkenar üçgen jetleri inceleyerek, farklı çıkış geometrilerinin akış yapısını nasıl etkilediğini analiz etmiştir.

Parham ve ark. [37] sabit ve değişken çıkış hızı oranlarına sahip ve farklı lüleler arası mesafeler içeren iki türbülanslı karşıt çarpan hava jetini sayısal olarak analiz etmiştir. Çalışmada, üçgen lülelerin diğer geometrilere kıyasla üç temel avantaja sahip olduğu belirlenmiştir. Öncelikle, üçgen lülelerin taban yapısı, iki akışı etkili bir şekilde karıştırarak yüksek türbülans yoğunluğuna sahip bölgeler oluşturmuştur. Bunun yanı sıra, dairesel ve dikdörtgen lülelerin, karıştırma uygulamalarında üçgen lülelere göre daha düşük verimlilik sunduğu belirlenmiştir. Son olarak, karşıt jetler tarafından oluşturulan radyal jetlerin, serbest jetlere bazı yönlerden benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Gao ve ark. [38] tarafından yapılan deneylerde, türbülanslı yuvarlak çarpan jetlerin çıkışına üçgen sekme dizileri eklenmiş ve bu yapının ısı transferi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Küçük lüle-levha mesafeleri için çarpma bölgesi etrafındaki yerel ısı transferinde %25'ten fazla bir artış gözlemlenmiştir. Akışın gelişimini değiştiren sekmelerin etkisini anlamak amacıyla yapılan hız alanı ölçümleri, sekme dizili serbest jetlerde akış özelliklerinin belirgin şekilde değiştiğini göstermiştir. Mi ve Nathan [39] tarafından yapılan çalışmada, farklı şekilli lülelerden çıkan dokuz hava jetinin türbülans istatistiksel özellikleri incelenmiş ve ikizkenar üçgen jetlerin yakın alan yapısının, düzgün kasılmadan en az etkilenen dairesel jetlere kıyasla üç boyutlu karakterinin daha belirgin olduğu bulunmuştur. Quinn [40] tarafından gerçekleştirilen deneysel araştırmada ise keskin kenarlı eşkenar üçgen bir delikten çıkan türbülanslı hava jetinin yakın alan ortalama akışı ve türbülans özellikleri incelenmiş, karşılaştırma amacıyla yuvarlak bir serbest hava jetine yönelik ölçümler de yapılmıştır.

2.4.3. Dönen yüzeylere çarpan jetlerle ilgili çalışmalar

Singh ve ark. [41] dairesel bir silindire çarpan jetlerin ısı transferi üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemektedir. Sonuçlar, dairesel silindirin durma noktası bölgesinde Nusselt sayısının, lüle çıkışına olan mesafe azaldıkça arttığını ortaya koymuştur. Jet çıkış hızı ve akış rejimi arasındaki etkileşimlerin, optimum soğutma verimliliğini sağlamak açısından kritik olduğu belirlenmiştir.

Havacılık motorlarında dönen bileşenlerin soğutulmasına yönelik dairesel ve üçgen kesitli çarpan jetler Lou ve ark. [42] tarafından incelenmiştir. Çalışmada, havacılık motorlarının yüksek sıcaklıklara maruz kalan parçalarının soğutulması amacıyla uygulanan

farklı jet geometrileri detaylandırılmıştır. Deneylerde, lüle çıkış açıları, jet çıkış hızları ve hedef yüzeyin hareketi gibi parametreler değiştirilerek, bu değişkenlerin yüzeyle etkileşimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Dairesel ve üçgen kesitli jetlerin yüzey üzerinde oluşturduğu basınç dağılımı, sıcaklık profilleri ve Nusselt sayısı değişimleri karşılaştırılmış, iki farklı geometri arasındaki temel farklılıklar ortaya konmuştur. Wae-hayee ve ark. [43] endüstriyel kurutma sistemlerinde dönen silindirik tamburların çarpan jetler kullanılarak soğutulmasını incelemiştir. Yüksek tambur dönüş hızlarında, çarpan jetlerin yüzey üzerindeki ısı dağılımını nasıl değiştirdiği gözlemlenmiş ve farklı jet sıcaklıkları altında ısı transfer performansı karşılaştırılmıştır. Hemmami ve Hammami [44] dönen silindirik frezeleme takımlarının çarpan jetler kullanılarak soğutulmasını inceleyerek, farklı lüle konfigürasyonlarının ısı transfer performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Deneysel analizlerde, çarpan jetlerin dönen frezeleme takımları üzerindeki ısı transferi artırma etkisi detaylandırılmış ve çift nozül sistemlerinin yüzey sıcaklık dağılımında daha homojen bir etki sağladığı belirlenmiştir. Yüksek dönüş hızlarında bile çarpan jetlerin etkili soğutma sağladığı, bu sayede takım aşınmasının önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir.

Sheng ve ark. [45] dönen silindirik yüzeylere eğik açılarla yönlendirilmiş çarpan jetlerin akış yapısı ve ısı transfer mekanizmaları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada, farklı Reynolds sayıları ve jet açılarının yüzey üzerindeki ısı transfer karakteristiklerini nasıl değiştirdiği detaylandırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, Reynolds sayısı ve jet açısına bağlı olarak üç farklı akış rejimi belirlenmiştir. İlk olarak, jet çekim rejimi olarak adlandırılan durumda, jetin doğrudan dönen silindirin yüzeyine çarptığı ve yüksek türbülanslı akış oluşturduğu gözlemlenmiştir. İkinci olarak, ortak yönetim rejiminde dönen silindir hareketi ve jet akışının aynı yönde ilerlemesi sayesinde daha homojen bir ısı transferi sağlandığı tespit edilmiştir. Üçüncü olarak, dönen çekim rejiminde jet akışının dönen yüzey hareketine ters yönde ilerlediği ve bu durumun yerel ısı transferi dağılımında belirgin değişimlere neden olduğu belirlenmiştir.

Selimefendil ve Öztop [46] dönen bir silindir üzerine yönlendirilen nanofluid çarpan jetlerin ısı transferi üzerindeki etkilerini inceleyerek, farklı parametrelerin soğutma performansı üzerindeki rolünü detaylandırmıştır. İncelenen temel değişkenler arasında nanofluid türü, jet çıkış hızı, silindir dönüş hızı ve akışkanın termofiziksel özellikleri yer almaktadır. Jet çıkış hızlarının, Reynolds sayısının ve dönen yüzey hareketinin, akışkanın termal iletkenliği ve viskozitesiyle nasıl etkileşime girdiği analiz edilmiştir. Çarpan jetlerin, yüzeye temas ettiği noktalardaki türbülanslı akış yapısının karakteristikleri belirlenmiş ve nanofluidlerin soğutma performansını nasıl değiştirdiği ortaya konmuştur.

Ma ve ark. [47] yüksek sıcaklıklarda çalışan dönen türbinlerin çarpan jetlerle soğutulmasını deneysel olarak inceleyerek, rotor yüzeyindeki sıcaklık dağılımlarını detaylı şekilde analiz etmiştir. Çalışmada, türbin rotorlarının soğutma performansını artırmak için çarpan jetlerin uygulama parametreleri değerlendirilmiş ve jet çıkış hızları, çarpma açısı ve türbin dönüş hızının soğutma mekanizmasına etkileri detaylandırılmıştır. Çalışmada, rotor yüzeyine çarpan jetlerin türbülanslı yapısının nasıl geliştiği, bu akışın yüzey sıcaklığı üzerindeki etkileri ve soğutma etkinliğini artıran parametreler değerlendirilmiştir. Ayrıca, rotor dönüş hızının artırılmasıyla birlikte çarpan jetlerin soğutma alanı üzerindeki genişleme etkisi incelenmiş ve yüzey sıcaklık dağılımlarının homojen hale gelmesi açısından farklı jet konfigürasyonları karşılaştırılmıştır. Deneylerde, jet çıkış hızları ve çarpma açılarının yanı sıra, rotor dönüş hızının yüzey sıcaklığını nasıl etkilediği detaylı olarak ele alınmıştır.

Lallave ve ark. [48] dönen bir disk üzerine yönlendirilen çarpan jetlerin ısı transferi üzerindeki etkilerini sayısal yöntemlerle inceleyerek, farklı akış parametrelerinin soğutma performansı üzerindeki rolünü detaylı bir şekilde analiz etmiştir. Çalışmada, özellikle Reynolds sayısı, jet çıkış hızı, çarpma açısı ve disk dönüş hızının ısı transferi üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve bu değişkenlerin akış yapısındaki etkileşimi sayısal modellemelerle incelenmiştir. Sayısal analizler kapsamında, çarpan jetlerin dönen disk yüzeyinde meydana getirdiği akış yapıları ve sekonder akımlar incelenmiştir. Çalışmada, yüksek Reynolds sayılarında çarpan jetlerin daha etkin bir soğutma sağladığı ve dönen yüzeylerin etkisiyle jet akışında türbülanslı yapıların daha karmaşık hale geldiği belirlenmiştir. Özellikle, dönen yüzeyin akış alanındaki sekonder akımları nasıl etkilediği ve bunun sonucunda ısı transfer katsayısının nasıl değiştiği sayısal yöntemlerle analiz edilmiştir.

Li ve Deng [49] dönen bir çarpan soğutma kanalında içbükey hedef yüzey üzerindeki ısı transferi mekanizmalarını detaylı olarak incelemiştir. Çalışmada, dönen sistemlerde çarpan jetlerin ısı transferini nasıl değiştirdiği analiz edilmiş ve özellikle Coriolis kuvvetinin etkisi değerlendirilmiştir. Dönen sistemlerde oluşan merkezkaç ve Coriolis kuvvetlerinin jet akışı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla, farklı dönüş hızlarında çarpan jetler kullanılmış ve bu akış yapılarının ısı transferi üzerindeki dinamikleri sayısal ve deneysel yöntemlerle araştırılmıştır. Yüksek dönüş hızlarında, jet akışının hedef yüzey üzerindeki hareketinde sapmaların meydana geldiği ve bu durumun ısı transferinde bölgesel değişimlere yol açtığı gözlemlenmiştir.

Dönen sistemlerde, özellikle türbin kanatları, motor milleri ve yüksek sıcaklığa maruz kalan bileşenlerin termal yönetimi için jet çarpması mekanizmalarının optimize

edilmesi büyük önem taşımaktadır. Jeng ve ark. [50] yaptıkları çalışmada, yanal bir hava jetinin dönen bir silindire çarpmasının ısı transferi üzerindeki etkilerini inceleyerek, farklı parametrelerin yüzeyde oluşan sıcaklık dağılımına ve ısı transfer verimliliğine olan etkilerini araştırmaktadır. Farklı dönüş hızlarında gerçekleştirilen testler ile jet akışının momentumunun dönen yüzey üzerindeki sıcaklık dağılımını nasıl değiştirdiği analiz edilmiştir. Özellikle, silindirin dönüşü ile jet akışının yönü değişmiş, bu durum da akışın yüzeyde ayrılma noktalarını ve sıcaklık dağılımını etkilemiştir.

Ma ve ark. [51] yatay konumlandırılmış dönen bir silindirin üzerine yönlendirilen çarpan jetlerin ısı ve kütle transferi üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemiştir. Deneysel çalışmada, silindir yüzeyinde oluşan kritik akış bölgeleri belirlenmiş ve ilk ve ikinci kritik Reynolds sayıları detaylı olarak analiz edilmiştir. İlk kritik nokta, çarpan jetlerin dönen yüzeye temas ettiği bölgedeki kütle transfer katsayısının artmaya başladığı noktayı ifade ederken, ikinci kritik nokta, dönme hızının artmasıyla birlikte kütle transfer etkinliğinin azalmaya başladığı eşiği göstermektedir. Yapılan analizler, yüksek dönen Reynolds sayılarında Coriolis ve merkezkaç kuvvetlerinin etkisiyle çarpan jetlerin akış yönünün sapmaya uğradığını ve bu durumun kütle transfer katsayısını değiştirdiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, farklı lüle açıklık oranları ve çıkış hızlarının, çarpan jetlerin yüzeye etki süresi ve akış yapıları üzerindeki etkileri detaylandırılmıştır.

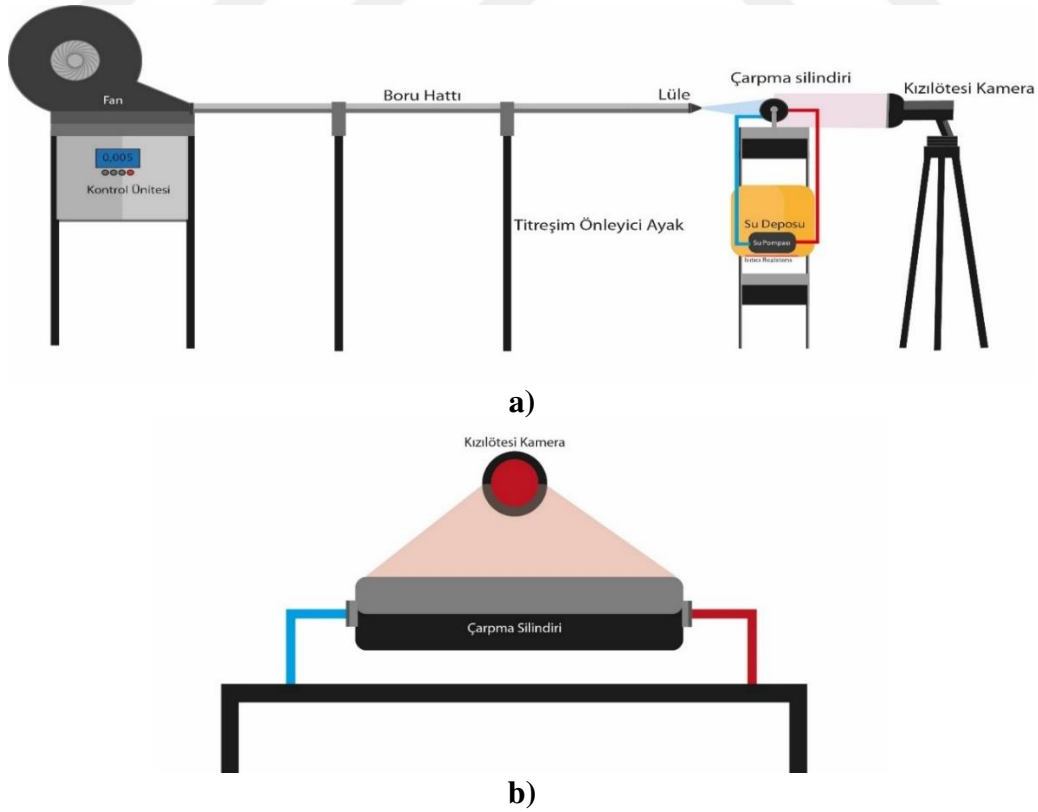
Ma ve ark. [52] başka bir çalışmalarında büyük çaplı yatay dönen silindirler etrafındaki dış karışık taşınım ısı transferi mekanizmalarını araştırmışlardır. Silindir yüzeyine farklı açılardan ve farklı dönüş hızlarında yönlendirilen hava akışları için sıcaklık dağılımı ölçülerek, yerel ve ortalama Nusselt sayılarının dönen Reynolds sayısı ile nasıl değiştiği incelenmiştir. Çalışmada, belirli bir kritik Reynolds sayısı olduğu ve bu değer aşıldıkça dönen yüzeyin ortalama Nusselt sayısı üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, kritik Reynolds sayısının üzerinde, dönme hareketinin ısı transferi üzerindeki etkisinin belirgin hale geldiği ve doğal taşınım ile zorlanmış taşınımın birlikte ısı transfer sürecini etkilediği belirlenmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

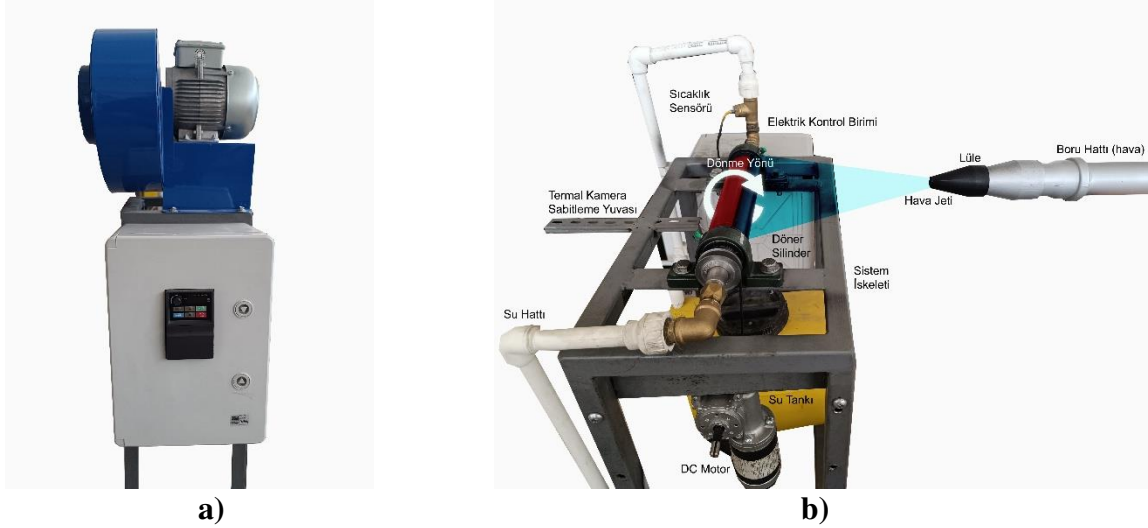
Bu çalışmada dönen silindire çarpan jet uygulamasında; Reynolds sayısının ($Re = 2000-7000$), silindirin dönme hızının ($U_{ds} = 20, 40$ ve 60 dev/dk), jet-yüzey arası mesafenin ($H/D_h = 3, 6$ ve 9), lüle geometrisinin (dairesel, kare ve üçgen) ve yüzey sıcaklığının ($T_s = 45$ °C, 60 °C ve 75 °C) ısı transferi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışma Taguchi deneysel tasarım yöntemi ile tasarlanmıştır. Deney düzeneği Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında kurulmuştur. Deney düzeneği için İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri destek biriminden, FBA-2025-4057 nolu proje kapsamında destek sağlanmıştır.

3.1 Deney Düzeneği

Çarpan jetle ısı transferi sağlamak amacıyla kurulan deney düzeneği, bir üfleyici fan, fanın akış hızını ayarlayan bir kontrol ünitesi, fandan çıkan havanın çeşitli geometrilerdeki lülelere iletilmesini sağlayan PVC boru hattı, sabit sıcaklıkta bir silindir ve silindire hareket sağlayan motor sisteminden oluşmaktadır. Deney düzeneğinin önden ve üstten şematik görünüşü Şekil 3.1’de, fotoğrafı ise Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.1: Deney düzeneğinin şematik gösterimi; a) önden görünüş, b) üstten görünüş



Şekil 3.2: Deney düzeneği fotoğrafları; a) hava jeti düzeneği, b) lüle-silindir düzeneği.

3.1.1. Jet akımının sağlanması

Bu çalışmada, jet akımının oluşturulması amacıyla kullanılan hava akış sistemi daha önce Kıstak [53, 54] tarafından kurulmuştur. Tasarlanan sistem, bir fan, bir elektronik kontrol birimi, boru hattı, lüleler ve yüksekliklik ayarlayıcı ayak gibi temel bileşenlerden oluşmaktadır. Sistemin tasarımında, hidrodinamik olarak tam gelişmiş akım elde edilmesi hedeflenmiş ve bu doğrultuda fan çıkışından lüle girişine kadar $32D_h$ uzunluğunda bir boru hattı kullanılmıştır. Bu uzunluk, akışın gelişimi için gerekli koşulları sağlayarak, giriş etkilerinin en aza indirildiği istikrarlı bir jet akımı oluşturulmasına katkıda bulunmaktadır.

Deney düzeneğinde kullanılan boru hattı, hafifliği ve düşük sürtünme kayıpları nedeniyle PVC malzemeden üretilmiştir. PVC boruların tercih edilmesi, hem sistemin toplam ağırlığını azaltarak taşınabilirliği artırmakta hem de sistem içindeki akışkanın sürtünme kaynaklı enerji kayıplarını minimize etmektedir.

Hava akışının sağlanması için kullanılan fan, 2850 dev/dak hızında çalışan bir üfleyici fanıdır. Fanın çıkış debisi ve hava hızının hassas bir şekilde kontrol edilebilmesi için hız kontrol ünitesi entegre edilmiştir. Bu kontrol mekanizması sayesinde, hava akışı belirli değerler arasında ayarlanabilir ve sistemin farklı deney koşullarında kullanılabilmesi sağlanmaktadır. Fan tarafından üretilen hava akımı ile Reynolds sayısı 2000 ile 6000 arasında değişen bir akış oluşturulabilmektedir.

Sistemin uzun boru hattı boyunca oluşabilecek titreşimlerin önüne geçilmesi ve lüle ile levha arasındaki mesafenin hassas bir şekilde ayarlanabilmesi için yükseklik ayarlayıcı ayak eklenmiştir. Bu bileşen, sistemin mekanik stabilitesini artırarak deneysel çalışmalar sırasında daha güvenilir verilerin elde edilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, farklı

deneysel senaryoların gerçekleştirilmesine imkân tanıyacak şekilde, lüle-levha mesafesinin değiştirilebilmesine olanak sağlamaktadır.

Sonuç olarak, sistemin temel bileşenleri, akışkan dinamiği prensiplerine uygun olarak seçilmiş ve sistemin istikrarlı çalışmasını destekleyen mekanik düzenlemeler yapılmıştır. Bu sayede, deneylerin güvenilirliği artırılarak, jet akımıyla ilgili hidrodinamik analizlerin daha hassas bir şekilde gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

3.1.2. Hız ölçümü

Deneysel çalışmalarda, lüle çıkışındaki hız değerleri ölçülerek jet akımının karakteristikleri belirlenmiştir. Hız ölçümleri, sıcak tel anemometresi prensibiyle çalışan CEM marka DT-8880 model hız ölçme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz, hassas hava hızı ölçümleri yapabilme özelliğine sahip olup, deneylerde güvenilir verilerin elde edilmesine olanak tanımaktadır.

Anemometrenin ölçüm aralığı 0,1 m/s ile 25 m/s arasında değişmekte olup, çözünürlüğü 0,1 m/s olarak üretici firma tarafından belirtilmiştir. Ölçüm sürecinde meydana gelebilecek hata payı göz önüne alındığında, cihazın maksimum belirsizlik değeri her bir okumada $\pm 2,55\%$ olarak belirlenmiştir. Bu değer, deneylerde elde edilen hız verilerinin güvenilirliğini değerlendirmede önemli bir parametre olarak dikkate alınmıştır. Cihaz, jet akımının sıcaklık değerlerini de eş zamanlı olarak ölçebilme özelliğine sahiptir. Üretici firma tarafından belirtilen sıcaklık ölçüm aralığı 0 °C ile 50 °C arasında olup, sıcaklık çözünürlüğü 0,1°C, sıcaklık ölçüm belirsizliği ise $\pm 1,6\%$ olarak verilmiştir. Bu sayede, jet akımının hem hız hem de sıcaklık değişimleri hassas bir şekilde takip edilebilmiştir. Deneylerde kullanılan anemometre cihazı ve teleskopik probun fiziksel görünüşü Şekil 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3.3: Anemometre ile ölçüm yapılması.

3.1.3. Lüleler

Tasarımın bir parçası olarak, fan çıkışına üçgen, dairesel ve kare kesitli olmak üzere üç farklı geometriye sahip lüleler monte edilmiştir. Bu lüleler, farklı kesit şekillerine sahip olmalarına rağmen, hidrolik çapları eşit olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede, farklı geometrik yapıların jet akımı üzerindeki etkileri karşılaştırılabilir hale getirilmiştir.

Lüleler, katmanlı üretim teknolojisi kullanılarak 3D yazıcı ile üretilmiş olup, üretim malzemesi olarak Polylactic Acid (PLA) tercih edilmiştir. PLA, düşük maliyetli, kolay işlenebilir ve çevre dostu bir polimer olması nedeniyle sistemin gereksinimlerine uygun bulunmuştur. Lülelerin tasarımında, akışkan direncini minimize etmek ve akışın düzgün bir şekilde yönlendirilmesini sağlamak amacıyla cidar kalınlığı mümkün olduğunca ince tutulmuştur. Böylece, hem ağırlık azaltılmış hem de üretim süresi optimize edilmiştir.

Bu lülelerin aerodinamik performanslarını ve akış üzerindeki etkilerini görsel olarak değerlendirebilmek için, ön ve üst görünüşlerinden alınmış fotoğraflar Şekil 3.4'te sunulmuştur. Bu görseller, lülelerin geometrik farklılıklarını ve üretim kalitesini net bir şekilde ortaya koyarak, deneysel çalışmaların anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 3.4: Lülelerin; a) önden ve b) üstten görünüşü.

3.1.4. Dönen silindir

Deney sisteminde, dönen silindirin istenilen hızlarda ve hassas bir şekilde çalıştırılmasını sağlayan bir hareket mekanizması tasarlanmıştır. Mekanizma, enkoderli step motor, motor sürücü, kayış-kasnak sistemi ve kontrol yazılımından oluşmakta olup, silindirin belirlenen devir aralığında dönmesini sağlamaktadır. Silindirin dönüş hızı, sistem kontrol ekranı üzerinden seçilerek, 0 ile 100 devir/dak (rpm) arasında hassas bir şekilde ayarlanabilmektedir.

Silindirin hareketi, kayış-kasnak mekanizması ile sağlanmaktadır. Step motor tarafından üretilen hareket, kayış-kasnak sistemi aracılığıyla silindire iletilerek, titreşimsiz ve kontrollü bir dönme hareketi elde edilmektedir. Bu sistem, motorun torkunu optimize ederek, silindirin belirlenen hız aralıklarında kararlı bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır.

Sistem, motor sürücü ve kontrol yazılımı ile entegre edilerek çalıştırılmaktadır. Motorun dönüş hareketi, önceden kalibre edilmiş adım sayıları ile belirlenmekte ve step motorun hassas hareketi sağlanmaktadır. Hız kontrolü, her bir devir arttırılacak şekilde kademeli olarak ayarlanabilmekte ve deney koşullarına uygun olarak değiştirilebilmektedir.

Hareket mekanizmasının istikrarlı ve güvenilir çalışmasını sağlamak amacıyla, mekanizma üzerine yatay x doğrultusunda sınırlayıcı limit anahtarlar yerleştirilmiştir. Bu sayede, sistemin belirlenen sınırların dışına çıkması önlenmiş ve güvenli çalışma sağlanmıştır. Sonuç olarak, bu hareket mekanizması ve kontrol sistemi, dönen silindirin jet akımı ile etkileşimini analiz etmek amacıyla geliştirilmiştir. Kayış-kasnak sistemi ile güç aktarımının sağlanması, hassas hız kontrolü, programlanabilir motor sürücüsü ve entegre kontrol yazılımı sayesinde, deneysel çalışmaların farklı hızlarda ve kontrollü koşullarda gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Hareket mekanizmasının Hareket mekanizmasının üstten ve önden görünüşü Şekil 3.5’de verilmiştir.

Şasi üzerinde iki tarafından yataklanan silindirin kayış sistemiyle dönmesi sağlanmaktadır. Sistem kontrolünde enkoder ile geri besleme bulunmaktadır. Motorun önceden yazılımla kalibre edilen devir/sinyal oranı program içerisinde belirlenerek silindirin istenilen devirde dönmesi sağlanmaktadır.



a)



b)

Şekil 3.5: Hareket mekanizmasının; a) üstten ve b) önden görünüşü.

3.1.5. Sıcaklık ölçümü

Deney sisteminde, silindirin hareketli olması nedeniyle sıcaklık ölçümlerinde yüksek hassasiyetli bir termal kamera kullanılmıştır. Termal kameranın yüksek çözünürlüklü video kayıt özelliği sayesinde, silindir yüzeyindeki sıcaklık dağılımı zamana bağlı olarak temassız bir şekilde kaydedilebilmektedir. Bu yöntem, hareketli bir sistemde noktasal ölçüm cihazlarının sınırlamalarını aşarak, yüzeydeki sıcaklık değişimlerinin daha detaylı bir şekilde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır.

Sistemde kullanılan termal kamera, Optris Xi 400 marka olup, uzaktan odaklanma özelliğine sahiptir. Kamera, 20°C ile 1500°C arasındaki sıcaklıkları ölçebilme kapasitesine sahip olup, 390:1 ölçüm noktası mesafe oranı ile hassas ölçümler gerçekleştirebilmektedir. Deneysel verilerin doğruluğunu artırmak için, termal kameranın sıcaklık ölçüm belirsizliği $\pm\%1,5$ olarak belirtilmiştir.

Deney düzeneğinde, termal kameranın silindire optimum odaklanma açısında yerleştirilmesi sağlanmış ve sıcaklık ölçümlerinin güvenilirliğini artırmak için silindir yüzeyi, termal kamera ölçümleri için özel geliştirilmiş mat siyah boya ile kaplanmıştır. Bu uygulama, yüzey yansımalarından kaynaklanan hataları minimize ederek, daha doğru sonuçlar elde edilmesine yardımcı olmaktadır.

Ölçümlerde kullanılan termal kameranın katalog resmi ve deney düzeneği üzerindeki yerleşimi Şekil 3.6'da verilmiştir. Bu yerleşim, termal kameranın optimal konumda çalışmasını sağlayarak, sıcaklık dağılımının en iyi şekilde analiz edilmesine katkıda bulunmaktadır.

Deneyler süresince, termal kamera ile alınan yüzey sıcaklık verileri, Optris yazılımı aracılığıyla kaydedilerek detaylı analizler için saklanmaktadır. Optris Xi 400 termal kamera, yüksek çözünürlüklü sıcaklık verilerini kaydetme kapasitesine sahip olup, deney koşullarına bağlı olarak yüzey sıcaklıklarının zamana bağlı değişimlerini incelemek için kullanılmaktadır.

Termal kamera yazılımı, ölçülen sıcaklık verilerini *.ravi* formatında saklayarak, video kayıtları içindeki sıcaklık değişimlerinin detaylı analizine olanak tanımaktadır. Bunun yanı sıra, video içerisinden alınan anlık görüntüler sıcaklık skalasına göre renklendirilmiş olarak elde edilebilmektedir. Bu yöntem, deney süresince farklı zaman dilimlerinde yüzey sıcaklıklarının nasıl değiştiğini görselleştirmek için kullanılır.

Termal kamera yazılımı, her bir piksel için sıcaklık verilerini kaydedebilme özelliğine sahiptir. Kullanıcı, video içerisinde belirli bir noktaya ait sıcaklık değerlerini

seçerek bu verileri. *.csv* formatında dışa aktarabilir. Bu format, sayısal verilerin analiz edilmesini ve diğerk hesaplamalar için kullanılmasını kolaylaştırmaktadır. Bunun yanı sıra, sabit noktalar ve belirlenen alanlar için sıcaklık zaman grafiği oluşturulabilmekte ve bu grafiğe ait sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişimi *.dat* formatında saklanabilmektedir. Böylece, belirli bir noktadaki veya yüzeyin belirli bir bölgesindeki sıcaklık değişimleri zamanla nasıl evrildiği detaylı bir şekilde incelenebilir.



şekil 3.6: Termal kamera

Deney koşullarının eksiksiz bir şekilde kayıt altına alınabilmesi için, ortam sıcaklığı, jet hızı, silindirin dönüş hızı, jet sıcaklığı gibi parametreler her deney için ayrı ayrı kaydedilmektedir. Bu veriler, deneyler için oluşturulan dosyaya her ölçüm öncesinde eklenerek deney sonuçlarının sistematik bir şekilde arşivlenmesi sağlanmaktadır.

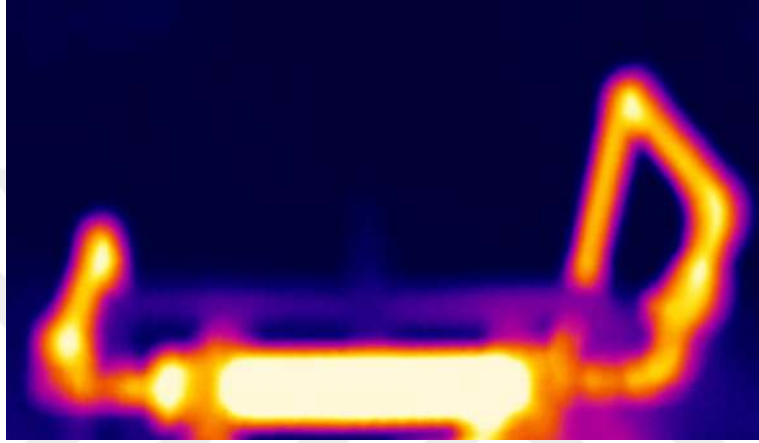
3.2 Deneylerin Yapılışı

Deneyler yapılırken aşağıdaki adımlar takip edilmiştir:

- ✓ Silindir istenen hızda döndürmeye başlatılır ($U_{ds} = 20, 40$ ve 60 dev/dk).
- ✓ Isıtıcılar çalıştırılır ve tanktaki su ısıtılır.
- ✓ Isıtma sırasında sıcaklık bir termostat ile kontrol edilir.
- ✓ Su sıcaklığı istenen sabit yüzey sıcaklığına ($T_s = 45$ °C, 60 °C ve 75 °C) ulaştığında ve kararlı duruma geldiğinde su pompalanır.
- ✓ Silindirin çıkışındaki suyun sıcaklığı istenen sabit yüzey sıcaklığına yaklaşık olarak ulaştığında, dış yüzey sıcaklığı termal kamera ile ölçülür.
- ✓ Sıcaklık konturlarından sabit yüzey sıcaklığının ($T_s = 45$ °C, 60 °C, 75 °C) elde edildiğini doğrularsa, jet akışı çarpma prosedürü başlar.

- ✓ Seçilen lüleden (dairesel, kare, üçgen) hava akışı, istenen akış hızında ($Re = 2000, 3000, 4000, 5000, 6000$ ve 7000) ve jet-yüzey mesafesinde ($H/D_h = 3, 6$ ve 9) fan çalıştırılarak gönderilir.
- ✓ Sıcaklık dağılımı kamera ile izlenir ve bilgisayara kaydedilir.

Şekil 3.7’de termal kameradan elde edilen sürekli rejime ulaşıldığını gösteren örnek bir fotoğraf verilmiştir. Görüldüğü gibi, renk tüm yüzey boyunca aynıdır ve sıcaklık sabittir.



Şekil 3.7: Çarpma öncesi sabit sıcaklığın elde edildiği örnek termal kamera görüntüsü

3.3 Deneysel Verilerin Hesaplanması

Deneylere silindiri ısıtmakla başlanmıştır. Isıtıcı çalıştırıldığında wattmetreden geçen elektrik gücü ölçülmüştür. Plaka üzerindeki sıcaklıklar sürekli rejime gelinceye kadar jet akımı gönderilmemiştir. Sürekli rejim şartları sağlandıktan sonra fan çalıştırılmış ve akım gönderilmiştir. Şekil 3.10’da da görüldüğü gibi plakanın alt yüzeyinin silikon rezistans ile kaplı olması ve plaka boyutlarına göre içi oyulmuş bir yalıtım levhası içerisine oturtulması sebebiyle, iletimle olan ısı kaybı ihmal edilmiştir. Ayrıca üst yüzeyinin mat siyah bir boya ile kaplanması ve deneylerin kapalı ve karanlık bir ortamda gerçekleşmesi hasebiyle ışınlama olan ısı kayıpları da ihmal edilmiştir. Plaka yüzeyinden termal kamerayla okunan sıcaklıklar referans alınarak yapılan hesaplamalarla Nusselt sayısı (Nu) ve Reynolds sayısı (Re) hesaplanmıştır.

Suyun oda sıcaklığından istenilen sıcaklığa ısıtılması sonucu oluşan ısı miktarı şu şekilde bulunur:

$$Q_{su} = \dot{m}_{su} C_p (T_2 - T_1) \quad (3.1)$$

burada Q_{su} silindire gönderilen suyun toplam giren ısıdır. Suyun debisi $\dot{m}_{su} = 0.02 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ dir. C_p suyun özgül ısı değeri (4180 J/kgK). T_1 ve T_2 sırasıyla şebekeden alınan ve silindire gönderilen suyun ilk sıcaklığı (oda sıcaklığına eşdeğer) ve ısıtılma sonucu silindirde suyun ulaştığı son sıcaklıktır (yaklaşık olarak silindir yüzeyinde ölçülen sıcaklığa eşdeğer).

Alüminyumdan üretilmiş olan silindirin iç ve dış tabaka kalınlığı arasındaki iletimle ısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$Q_{kond} = k_{Al} A_{ds} \frac{\Delta T_{ds}}{\Delta x} \quad (3.2)$$

burada k_{Al} alüminyumun ısı iletkenliğidir (237 W/m²K), A_{ds} dönen silindirin dış yüzey alanıdır (0.039 m²), Δx silindirin et kalınlığıdır (2 mm), ve ΔT_{ds} alüminyum silindirin iç ve dış yüzey sıcaklıkları arasındaki faktör ($\Delta T_{ds} = T_2 - T_1$). Burada iç yüzey sıcaklığının suyun ulaştığı son sıcaklığa eşit olduğunu hatırlatmak da fayda vardır.

İşinimla olan ısı transferi Stefan Boltzman kanunu yardımıyla şöyle hesaplanmıştır:

$$Q_{rad} = \sigma \epsilon A_{ds} (T_y^4 - T_\infty^4) \quad (3.3)$$

burada σ Stefan-Boltzmann sabitidir (5.67x10⁻⁸ W/m²K⁴), ϵ siyah mate ile boyanmış silindir dış yüzeyinin geçirgenliğidir (0.95), T_y silindirin sabit dış yüzey sıcaklığıdır, T_∞ ise oda sıcaklığıdır.

Net ısı toplam ısıdan iletimle ve işinimla olan ısıların çıkarılması şeklinde hesaplanır:

$$\frac{Q_{su} - Q_{kond} - Q_{rad}}{A_{ds}} = q_{net} \quad (3.4)$$

Jetten çıkan hava silindirin yüzeyine çarptığında ve zorlanmış taşınım sürecini başlattığında, silindirin yüzey sıcaklığında bir azalma meydana gelir. Silindire sağlanan toplam ısı öncelikle zorlanmış taşınım yoluyla, özellikle de jetin çarpması nedeniyle azalır. Bu nedenle şu sonuca varılabilir:

$$q_{net} = q_{konv} = h(T_x - T_j) \quad (3.5)$$

Görüldüğü üzere ısı transferi yerel sıcaklıklar (T_x) ile jet sıcaklığı (T_j) arasındaki fark nedeniyle oluşur. Boyutsuz ısı transferi olan Nusselt sayısı:

$$Nu_x = \frac{h D_h}{k_{hava}} \quad (3.6)$$

burada k_{hava} havanın ısı iletkenliğidir (0.02623 W/mK), ve D_h lülenin hidrolik çapıdır (0.008 m). Ortalama Nusselt sayısı (Nu_{ort}), yerel Nusselt sayılarının (Nu_x) aritmetik ortalamasıdır.

$$Nu_{ort} = \frac{\sum_{i=1}^n Nu_i}{n} \quad (3.7)$$

Reynolds sayısı (Re) ise hidrolik çapa ve jet çıkış hızına bağlı olarak şöyle bulunur:

$$Re = \frac{\rho U_j D_h}{\mu} \quad (3.8)$$

3.4 Belirsizlik Analizi

Deneysel bir çalışmada ortaya çıkan belirsizliğin değerlendirilmesi, zaman ve kaynak tasarrufu açısından önemli bir süreçtir. Bu çalışmada deneysel belirsizlik analizi konusunda önemli bir referans olan Kline ve McClintock [55] yöntemi esas alınmıştır. Çalışmanın önemli iki çıktısı olan ve deneysel ölçümlerle bulunan Nusselt sayısının ve Reynolds sayısının hesaplanması esnasında ortaya çıkan belirsizlikler bu yöntem vasıtasıyla ortaya çıkartılmıştır.

Bu yöntemle göre, sistemde ölçülmesi gereken büyüklük R , ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler ise $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ olsun. Bu durumda $R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ şeklinde yazılabilir. Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları $w_1, w_2 \dots, w_n$ ve R büyüklüğünün hata oranı w_R ise, belirsizlik şöyle hesaplanır:

$$w_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_{x_n}\right)^2} \quad (3.9)$$

Denklem (3.2) ve (3.3)'e göre Nusselt sayısı çeşitli parametrelere ($Q, A_p, D_h, T_p, T_j, k_h$) bağlı olarak şu şekilde yazılabilir:

$$Nu = \frac{Q_{su} D_h}{A_{ds} (T_x - T_j) k_{hava}} \quad (3.10)$$

Bu durumda önce Nusselt sayısının belirsizliği şu şekilde hesaplanır:

$$w_{Nu} = \sqrt{\left(\frac{\partial Nu}{\partial Q_{su}} w_{Q_{su}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial A_{ds}} w_{A_{ds}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial D_h} w_{D_h}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial T_x} w_{T_x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial T_j} w_{T_j}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial k_{hava}} w_{k_{hava}}\right)^2} \quad (3.11a)$$

Türevler denklikte yerine koyulduktan sonra denklemin her iki yanı Denklem (3.6) da verilen Nusselt sayısı ifadesine bölünürse denklem şu hale gelir:

$$\frac{w_{Nu}}{Nu} = \sqrt{\left(\frac{w_{Q_{su}}}{Q_{su}}\right)^2 + \left(-\frac{w_{A_{ds}}}{A_{ds}}\right)^2 + \left(\frac{w_{D_h}}{D_h}\right)^2 + \left(-\frac{w_{T_x}}{T_x}\right)^2 + \left(-\frac{w_{T_j}}{T_j}\right)^2 + \left(-\frac{w_{k_{hava}}}{k_{hava}}\right)^2} \quad (3.11b)$$

Görüldüğü gibi bu haliyle artık ölçülen değerleri ve belirsizliklerini yerine koyarak sonuç elde edilebilir. Nusselt sayısının bağımsız değişkenlerinin ($Q_{su}, A_{ds}, D_h, T_x, T_j, k_{hava}$) belirsizlikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Elektrik kaynağından sağlanan ısıнын ve termal kamera ile ölçülen yüzey ve jet sıcaklıklarının belirsizlikleri cihazların katalog bilgileri sayesinde belirlenirken, ısı iletim katsayısı, hidrolik çap ve alan gibi değişkenlerin belirsizliği için literatürde öngörülen değerler alınarak tespit edilir [56].

Şimdi Reynolds sayısında oluşan belirsizliklere bakalım. Reynolds sayısı Denklem (3.8)'de verilmişti. Yani Reynolds sayısı ρ, U_j, D_h, μ bağımsız değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Kline ve McClintock [55] yöntemine göre belirsizlik şöyle bulunur:

$$w_{Re} = \sqrt{\left(\frac{\partial Re}{\partial \rho} w_{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial U_j} w_{U_j}\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial D_h} w_{D_h}\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial \mu} w_{\mu}\right)^2} \quad (3.12a)$$

$$\frac{w_{Re}}{Re} = \sqrt{\left(\frac{w_{\rho}}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{w_{U_j}}{U_j}\right)^2 + \left(\frac{w_{D_h}}{D_h}\right)^2 + \left(-\frac{w_{\mu}}{\mu}\right)^2} \quad (3.12b)$$

Çizelge 3.1’de de görüldüğü gibi Nusselt sayısı ve Reynolds sayısı için hesaplanan belirsizlik değerleri $\pm\%3,33$ ve $\pm\%2,63$ ’dir. Nusselt sayısı hesaplanırken en büyük belirsizlik değeri yüzeydeki ısıнын ölçümünden, ikincil olarak ta yüzey ve jet sıcaklıklarının ölçümünden kaynaklanmıştır. Reynolds sayısı hesaplanırken belirsizliği oluşturan büyük etmen jet hızı olmuştur.

Çizelge 3.1: Belirsizlik analizi sonuçları

Bağımsız Değişkenler		
Sıcaklıklar, ω_{Tw} , ω_{Tj}	$\pm\%1,6$	
Net ısı, ω_Q	$\pm\%2,6$	
Silindir yüzey alanı, ω_{Arc}	$\pm\%0,2$	
Lülelerin hidrolik çapı, ω_{Dh}	$\pm\%0,15$	
Isı iletim katsayısı, ω_{kh}	$\pm\%0,15$	[56]
Jet ortalama hızı, ω_{Uj}	$\pm\%2,55$	
Dönme hızı, ω_{Urc}	$\pm\%0,15$	
Akışkan yoğunluğu, ω_{ρ}	$\pm\%0,15$	[56]
Akışkanın dinamik viskozitesi, ω_{μ}	$\pm\%0,15$	[56]
Bağımlı Değişkenler		
Nusselt sayısı, ω_{Nu}	$\pm\%3,33$	
Reynolds sayısı, ω_{Re}	$\pm\%2,63$	

3.5. Deneyel Tasarım

Bilimsel araştırma faaliyetlerinin önemli bir bölümünü deneyel analizler oluşturmaktadır. Doğru sonuçlara ulaşmak için iyi planlanmış bir deneyel tasarım gereklidir. İlk deneyel tasarım yöntemi, 1920’lerde istatistik alanının önde gelen bilim adamlarından biri olan İngiliz istatistikçi Ronald Fisher tarafından türetilmiş ve geliştirilmiştir [57].

Deney tasarımı, herhangi bir sürecin girdi değişkenlerine göre gerekli değişiklikleri gerçekleştirirken yanıt değişkenindeki herhangi bir değişikliğin izlenmesi, türetilmesi ve

yorumlanması olarak tanımlanabilir [58]. Burada süreç, kontrol edilebilen belirli değişkenleri içeren insan, yöntem ve makinelerin bir kombinasyonu olarak tanımlanır [59].

Deneysel tasarım teknikleri yalnızca istatistiksel bir yaklaşım olarak görülmemelidir. Her türlü araştırma ve geliştirme faaliyetlerinde kullanılan, bu sayede kaliteyi artıran, maliyetleri düşüren ve çok daha kısa sürede çok daha sağlıklı sonuçlar alınmasını sağlayan tekniklerdir.

Deneysel tasarım teknikleri, ilgili performansı artırmak için yeni bir süreç geliştirmede veya mevcut herhangi bir süreci düzeltmede büyük önem taşır. Bu çalışmada kullanılan sözde Taguchi yöntemi, Japon bilim adamı Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemin hedefi, sağlam bir süreç, yani değişkenliğin kaynağı olarak hareket eden bu faktörlerin etkisinin olduğu bir süreç geliştirmektir. Taguchi, deneylerin performansında ve değerlendirilmesinde verimliliği artıracak bir çözüm geliştirmiştir [60]. Hem zamandan hem de ilgili maliyetlerden önemli ölçüde tasarruf sağlanır.

Taguchi yönteminde sonuçları etkileyen süreç parametreleri kontrol faktörleri ve gürültü faktörleri olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Kontrol faktörleri, imalat sürecinin tasarımında kararlılık için en iyi koşulları seçmek için kullanılır; gürültü faktörleri ise varyasyona neden olan tüm faktörleri ifade etmektedir. Taguchi, karakteristik verileri ortogonal dizinler kullanarak elde etmeyi önermiştir ve optimum işlem parametrelerine karar vermek için ölçülen verilerden performansı analiz etmeyi amaçlamıştır.

Bu yöntemde, tüm parametre uzayını yalnızca az sayıda deneyle incelemek için özel bir ortogonal dizin tasarımı kullanılmaktadır. Deney planında kullanılan $L_{18}1^64^3$ şeklindeki ortogonal dizin Çizelge 3.2’de verilmiştir.

İstatistiksel olarak anlamlı parametrelerin Nusselt sayısı aracılığıyla ısı transferi üzerindeki yüzde katkısını belirlemek için ve parametrelerin varyans analizi kullanılmıştır. Taguchi yönteminde deneysel değer ile istenen değer arasındaki sapmayı hesaplamak için bir kayıp fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu kayıp fonksiyonu ayrıca bir sinyal/gürültü (S/N) oranına dönüştürülür. Özelliklerin türüne bağlı olarak birden fazla S/N oranı mevcuttur; daha düşük daha iyidir (LB), nominal en iyisidir (NB) ve daha yüksek daha iyidir (HB). Bu çalışmada, Nusselt sayısının optimum tasarım parametrelerini elde etmek için “ HB ” seçilmiştir. j ‘inci deneyde gözlemlenen i ‘inci performans karakteristiği η_{ij} , HB teriminin S/N oranının logaritmik değeri ile tanımlanabilir:

$$\eta_{ij} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (3.13)$$

burada Y , sonuç değerini ifade eder ve n gerçekleştirilen deneylerin sayısını belirtir.

Çizelge 3.2: Kullanılan ortogonal dizin

Deney no	A	B	C	D*	E
1	2000	3	20	d	45
2	2000	6	40	k	60
3	2000	9	60	ü	75
4	3000	3	20	k	60
5	3000	6	40	ü	75
6	3000	9	60	d	45
7	4000	3	40	d	75
8	4000	6	60	k	45
9	4000	9	20	ü	60
10	5000	3	60	ü	60
11	5000	6	20	d	75
12	5000	9	40	k	45
13	6000	3	40	ü	45
14	6000	6	60	d	60
15	6000	9	20	k	75
16	7000	3	60	k	75
17	7000	6	20	ü	45
18	7000	9	40	d	60

* d: dairesel, ü:üçgen, k:kare

Deneysel çalışmada ısı transferini etkileyeceği düşünülen değişken parametreler, A, B, C, D, E gibi harflerle gösterilmiştir bu harfler sırasıyla A→Reynolds sayısı, B→lüle silindir arası boyutsuz mesafe, C→silindirin dönme hızı (devir sayısı), D→lüle geometrisi, E→yüzey sıcaklığını sembolize etmektedir. Çizelge 3.2’de de görüldüğü gibi Reynolds sayısının 6, lüle levha arası mesafenin 3, devir sayısının 3, lüle geometrisinin 3, yüzey sıcaklığının 3 değişken değeri vardır. Taguchi analizinin kendine özel terminolojisinde A, B, C, D, E, harfleriyle ifade edilen bağımsız değişkenlere “kontrol faktörleri” veya “tasarım parametreleri” denir. Bu parametrelerin değerlerinin kaç kez değiştiğini gösteren rakamlara ise “seviye” denir. Her bir kontrol faktörü ve sahip olduğu seviyeler dikkate alındığında uşan $L_{18}1^64^3$ şeklindeki ortogonal dizin gösterimi ortaya çıkar. Çizelge 3.3’de seviye değerlerinin tam değer karşılıkları verilmiştir.

Çizelge 3.3: Tasarım parametrelerinin değerleri.

Seviyeler	A (Re)	B (H/D_h)	C (U_{ds})	D (geometri)	E (T_s)
1	2000	3	20 dev/dk	Dairesel	45 °C
2	3000	6	40 dev/dk	Kare	60 °C
3	4000	9	60 dev/dk	Üçgen	75 °C
4	5000				
5	6000				
6	7000				

Taguchi tasarımına göre belirlenen deneylerden elde edilen sonuçlar ANOVA testi denilen bir test yardımıyla değerlendirilmiştir. ANOVA analizi, bağımsız grupların ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı fark olup olmadığının test edilmesinde kullanılan bir araçtır. ANOVA testi parametrik bir testtir ve kullanılabilmesi için parametrik testlerin gerektirdiği koşulların karşılanması gerekmektedir. Uygun koşullar sağlanamadığında “Kruskal Wallis” ve “Welch F” testi gibi testlerin kullanılması tavsiye edilmektedir. ANOVA testleri sayesinde etki büyüklüğü hakkında da fikir sahibi olmak mümkün olmaktadır. Etki büyüklüğü bağımsız olan değişkenin bağımlı değişkendeki toplam varyansın ne kadarını açıkladığını göstermektedir. Bu durum 0,0 ve 1,00 arasında değişkenlik göstermektedir [59].

ANOVA yöntemi ile deneysel parametrelerin ortalama Nusselt sayısına etkisi belirlenmiştir. ANOVA, çeşitli faktörlerin etkisini anlamak için deneysel hataları ve anlamlılık testini değerlendiren bir yöntemdir. Yöntemin uygulanışında kullanılan temel denklemler aşağıda verilmiştir [61, 62].

$$SS_m = \frac{(\sum n_i)^2}{n} \quad (3.14)$$

$$SS_{factor} = \frac{\sum n^2_{factor-i}}{N} - SS_m \quad (3.15)$$

$$SS_T = \sum \eta_i^2 - SS_m \quad (3.16)$$

$$SS_e = SS_T - \sum SS_A \quad (3.17)$$

$$df_{total} = n - 1 \quad (3.18)$$

$$df_{factor} = k - 1 \quad (3.19)$$

$$V_{factor} = \frac{SS_{factor}}{df_{factor}} \quad (3.20)$$

$$F_{factor} = \frac{V_{factor}}{V_{error}} \quad (3.21)$$

Burada SS_T karelerin toplam toplamı, SS_m ortalamasının karelerinin toplamı, SS_{factor} çarpanın karelerinin toplamı, SS_e hatanın karelerinin toplamı, $\eta_{factor-i}$ i 'inci faktör seviyesinin toplamı, N , her bir faktör seviyesinin tekrar sayısı, df , serbestlik derecesi sayısı, n , deney sayısı, k , faktörün seviye sayısı, V_{factor} , faktörün varyansı, $L_{18}1^64^3$ ve test değeridir.

F testi, etkilerin niceliğine karar vermek için kullanılır, başka bir deyişle; bulunan analizlerin sonuçlarının büyüklüğü F testi ile değerlendirilir. Hesaplanan F değerleri, uygun standart güven çizelgesi ile karşılaştırılır. Söz konusu karşılaştırma sonucunda herhangi bir F değerinin çizelgedaki F değerinden yüksek çıkması durumunda, analizin varsayılan güven düzeyinde olduğu sonucuna varılır. ANOVA analizi ile elde edilen sonuçlar bir sonraki bölümde sunularak irdelenecektir.

Son olarak doğrulama testleri yapılarak ortogonal dizindeki deneylerin doğruluğu test edilir. Öngörülen S/N oranı şu şekilde hesaplanabilir:

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^k (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad (3.22)$$

burada η_m toplam ortalama S/N oranının, $\bar{\eta}_i$ optimum seviyedeki ortalama S/N oranının ve k performansı etkileyen ana tasarım parametrelerinin sayısıdır.

4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Yukarda tasarım, yöntem ve işlenişi detaylarıyla anlatılan deneysel çalışmanın sonuçları bu bölümde sunulacaktır. Bulguların sunumu üç ayrı alt başlık altında yapılmıştır. Birinci alt başlıkta Taguchi deneysel tasarım yöntemine göre oluşturulan ve Çizelge 4.1’de verilen deneylerin sonuçları, ikinci alt başlıkta, kararlı rejimde elde edilen ortalama ve durma noktası Nusselt sayıları kıyaslaması yapılmıştır. Üçüncü altbaşlıkta parametrelerin etkileri grafiklerle son alt başlıkta parametrelerin analizi ANOVA yöntemi değerlendirilmiştir.

4.1. Deney Sonuçları

Bu bölümde, Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılarak oluşturulan L18 ortogonal dizisine uygun olarak gerçekleştirilen 18 adet deneyin sonuçları sunulmaktadır. Her bir deney seti için elde edilen bulgular iki ana kategoride değerlendirilmiştir:

- (1) silindir yüzeyindeki sıcaklık dağılımının zamana bağlı değişimi (termal konturlar).
- (2) kararlı rejimde yerel Nusselt sayısının (Nu_x) silindir eksenine boyunca dağılımı.

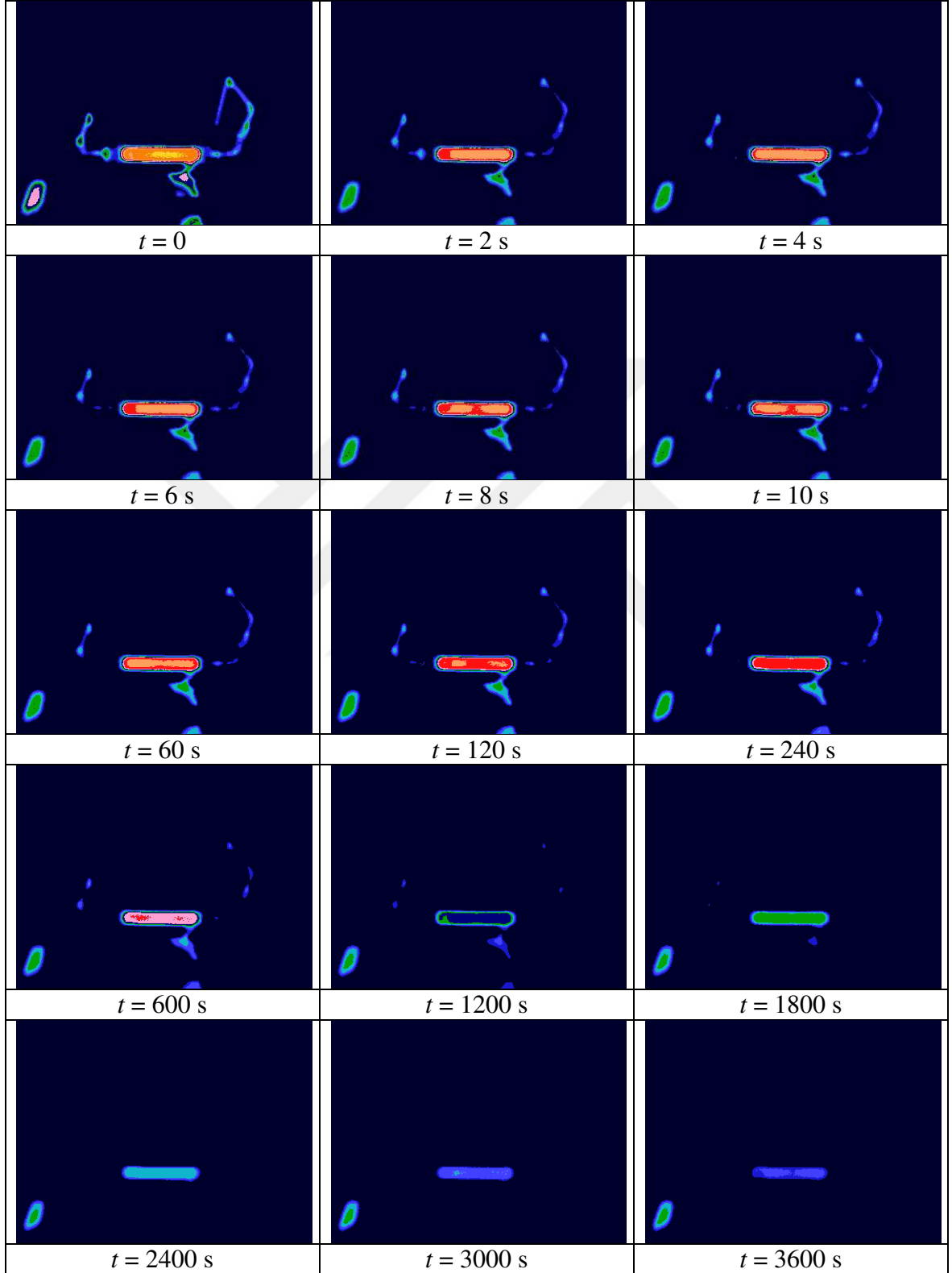
Sonuçlar sunulurken Reynolds sayısı (Re), lüle-plaka arası boyutsuz mesafe (H/D_h), silindir dönme hızı (dev/dk), lüle geometrisi ve yüzey sıcaklığı parametrelerinin etkileri dikkate alınmıştır. Elde edilen grafikler ve termal görüntüler, farklı işletme parametrelerinin ısı transferi performansı üzerindeki etkilerini görsel ve sayısal olarak ortaya koymaktadır.

4.1.1 Deney 1 sonuçları

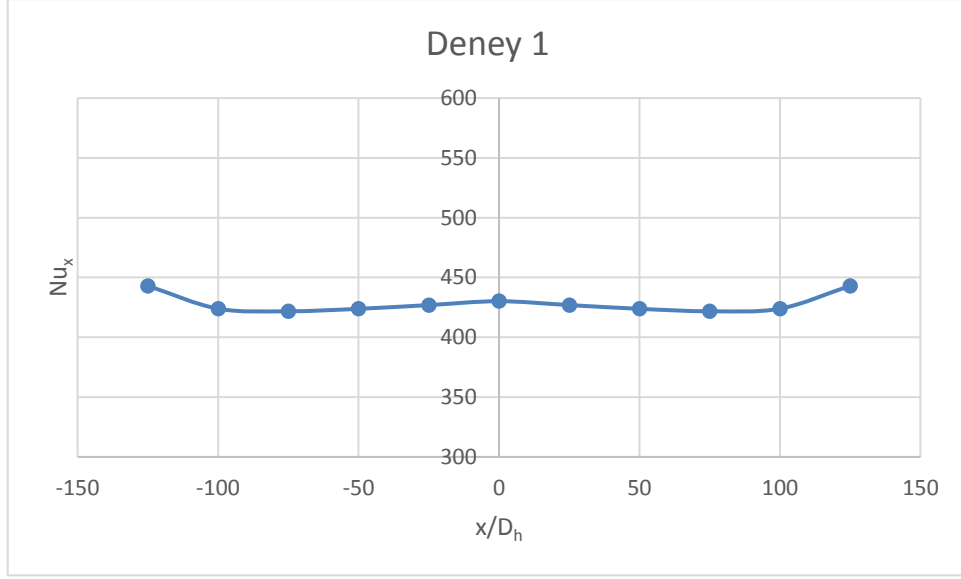
Bu bölümde, Reynolds sayısının en düşük seviyede ($Re = 2000$) ve lüle-silindir mesafesinin birbirine en yakın olduğu durum ($H/D_h = 3$) incelenmiştir. Dairesel lüle, düşük devir hızı ($U_{ds} = 20$ dev/dk) ve yüzey sıcaklığının $T_s = 45$ °C olduğu durumda gerçekleştirilen bu deneyde, Şekil 4.1’de verilen zamana bağlı sıcaklık konturları, Şekil 4.2’de ise silindir boyunca sürekli rejimde elde edilen yerel Nusselt sayıları gösterilmiştir. Burada şunu belirtmekte de fayda vardır; yerel Nusselt sayısı grafiklerinin hepsi genel aralık olan 300-600 aralığında gösterilmiştir ki, böylece bundan sonraki deneylerle kıyaslandığında grafiğin nasıl bir hal aldığı daha rahat anlaşılabilir.

Şekil 4.1’de, sürekli rejime erken ulaşıldığı görülmektedir. Şekil 4.3’de düşük dönme hızı sebebiyle simetriye yakın bir çan eğrisi profili gözlemlenmiş ve jetin doğrudan etki ettiği bölgede maksimum ısı transferinin olduğu görülmüştür. Ayrıca soğumanın jetin çarptığı durma noktasından başlayarak silindir yüzeyine yayıldığı görülmektedir. Jet hızının düşük olması nedeniyle soğuma hızı nispeten yavaştır, ancak H/D_h oranının küçüklüğü jetin

enerjisini kaybetmeden yüzeye ulaşmasını sağlamış ve durma noktasında belirgin bir ısı transferi gerçekleşmiştir.



Şekil 4.1: Deney 1 için zamana bağlı sıcaklık konturları



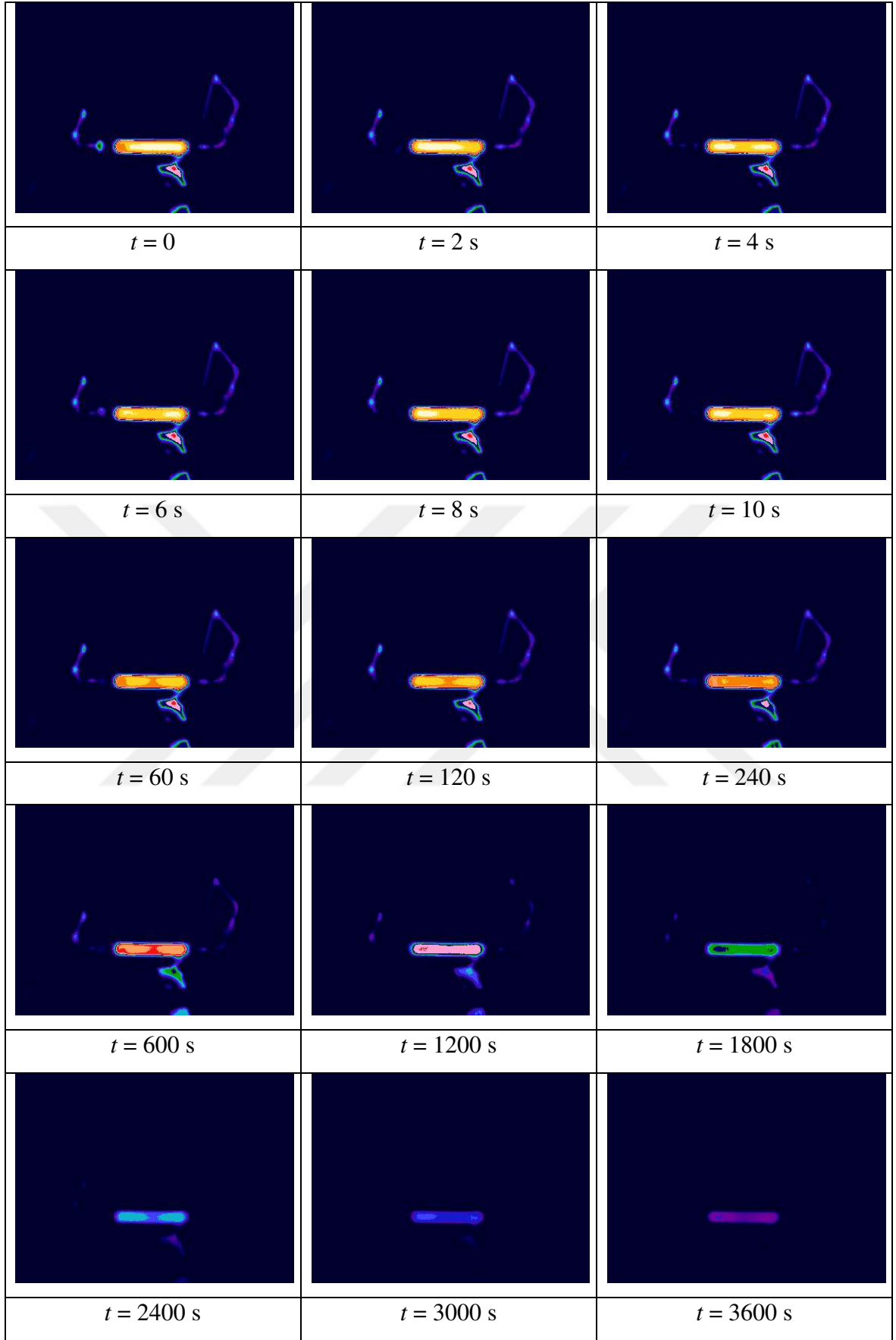
Şekil 4.2: Deney 1 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi

4.1.2 Deney 2 sonuçları

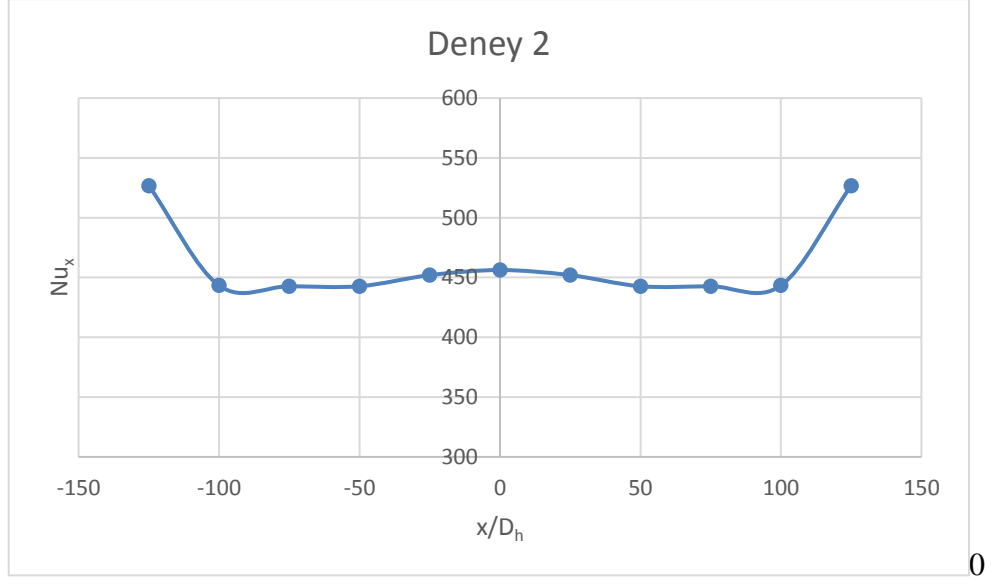
Deney 2’de $Re = 2000$ ’de $H/D_h = 6$ ve kare geometrili lüle kullanılmıştır. Yüzey sıcaklığı $T_s = 60^\circ\text{C}$ ’dir ve silindir dönme hızı $U_{ds} = 40$ dev/dk ’ dir. Şekil 4.3’de seçili zaman adımlarındaki sıcaklık konturları, Şekil 4.4’de sürekli rejimde elde edilen yerel Nusselt sayısı dağılımları verilmiştir.

Şekil 4.3’de gözlemlenen en önemli unsur; silindir devrinin 40 dev/dk ’e ve yüzey sıcaklığının yükseltilmesi, yüzeydeki sıcaklık dağılımının daha homojen hale gelmesine katkı sağlamıştır. Sıcaklık konturları, kare lülenin köşeli yapısının oluşturduğu türbülans etkilerini ve artan dönme hızının "süpürme" etkisini yansıtmaktadır. H/D_h oranının kısmen artmasıyla beraber serbest jet bölgesi uzamıştır. Bu durum eksenel hızın bir miktar düşmesine neden olsa da, kare geometrinin karıştırma etkisi ısı transferinin artışını desteklemiştir.

Şekil 4.4’de verilen yerel Nusselt sayıları dağılımı grafiğinde, artan dönme hızıyla birlikte durma noktasının biraz daha yayıldığını ve ısı transferinin çevreye daha dengeli dağıldığı görülmektedir.



Şekil 4.3: Deney 2 için zamana bağlı sıcaklık konturları



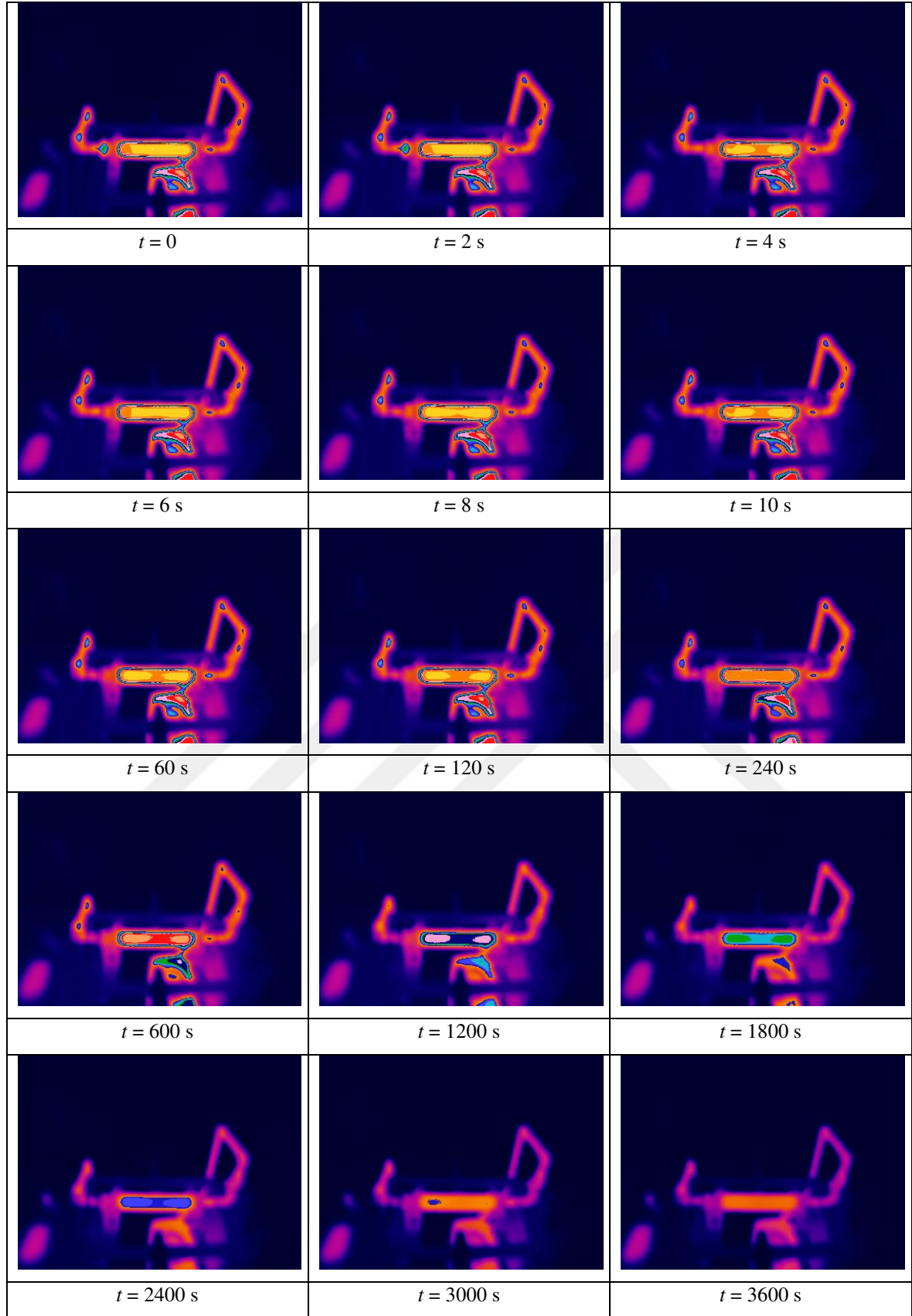
Şekil 4.4: Deney 2 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi

4.1.3 Deney 3 sonuçları

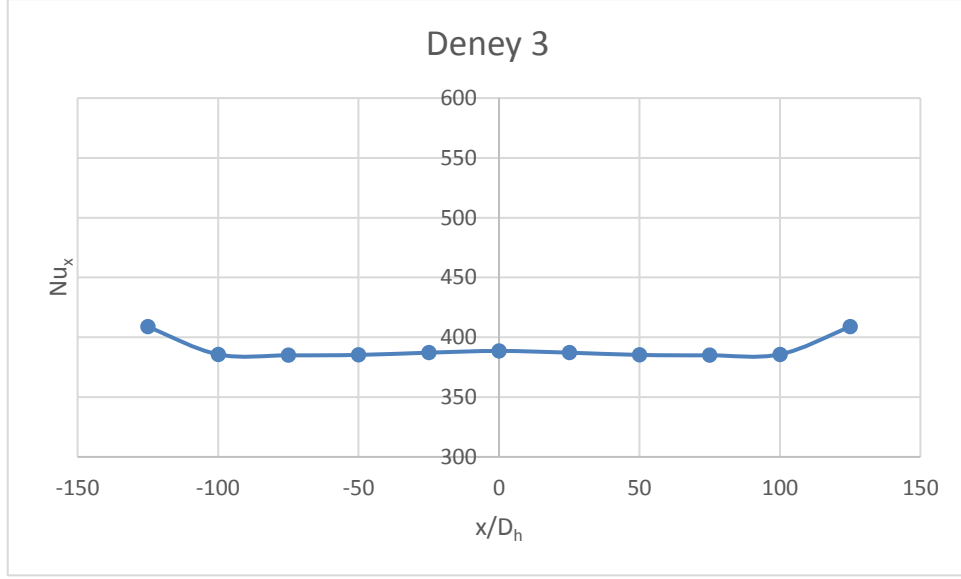
Bu deneyde en düşük Reynolds sayısı ($Re = 2000$) ile en uzak mesafe ($H/D_h = 9$), en yüksek dönme hızı ($U_{ds} = 60$ dev/dk) ve en yüksek yüzey sıcaklığı ($T_s = 75$ °C) şartları test edilmiştir. Üçgen lüle geometrisinin kullanıldığı bu konfigürasyonda, zamana bağlı sıcaklık konturları Şekil 4.5’de, kararlı rejimde elde edilen yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi Şekil 4.6’da verilmiştir.

Çarpan jetlerde lüle–levha arası mesafenin önemi, akış yapısını, ısı transferini ve basınç dağılımını doğrudan belirlediği için kritiktir. Bu deneydeki gibi büyük H/D_h oranlarında jet levhaya ulaşmadan önce yayılır, hız çekirdeği zayıflar. Çevre akışla karışma artar, jet enerjisinin bir kısmı kaybolur ve çarpma etkisi daha geniş alana yayılır ama yerel etki azalır [1, 2].

Çok büyük H/D_h oranlarında genelde jet zayıflar ve durma bölgesinde ısı transferi düşer. Literatürde çoğu uygulama için $H/D_h \approx 4-8$ aralığında maksimum veya yüksek ısı transferi elde edildiği gösterilmiştir (Re sayısına bağlı olarak değişir). Bu nedenle bu çalışmada test edilen en yüksek H/D_h oranında ısı transferi skaler olarak düşmüş ancak akış yüzeyin geneline yayıldığı için yüzey daha uniforma yakın düzeyde soğumuştur [1, 2]. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 beraber incelendiğinde $H/D_h = 9$ değerinde yayılan jetin daha düşük bir durma noktası etkisi yaptığı görülmektedir.



Şekil 4.5: Deney 3 için zamana bağlı sıcaklık konturları



Şekil 4.6: Deney 3 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi

Bu deneyde test edilen diğer önemli husus ise silindirin en yüksek dönme hızına sahip olduğu durumdur. Düşük dönme hızlarında jet davranışı sabit silindir durumuna çok benzer. Durma noktası jet ekseninde kalır ve akış, çarpma sonrası simetrik olarak yayılır. Orta dönme hızlarında durma noktası kayar (dönüş yönüne doğru) ve silindir yüzeyindeki sınır tabaka dönme yönünde inceler, ters yönde kalınlaşır. Dolayısıyla akış simetrisi bozulur, türbülans üretimi artabilir. Son olarak yüksek dönme hızlarında silindir hareketi jet etkisine baskın hale gelir ve jet yüzeye yapışma eğilimi gösterir (Coandă benzeri etki). Karşı yöndeki akış ayrılması artar ve jetin silindir üzerindeki etkin çarpma alanı azalabilir [51, 52, 43].

Bu açıklamalar eşliğinde Şekil 4.6 yeniden incelendiğinde durma noktasının jet ekseninde kaldığı söylenebilir. Yani ele alınan 60 dev/dk dönme hızı halen jetin sahip olduğu akış hızına göre düşük kalmaktadır. Bu da aynen beklenildiği üzere, akışın çarpma sonrası simetrik olarak yayılmasına neden olmuştur.

Bu arada şuna değinmekte de fayda vardır. Şu ana kadar üç farklı sabit yüzey sıcaklığı şartından bahsedildi (Deney 1’de $T_s = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$, Deney 2’de $T_s = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, Deney 3’de $T_s = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$). Yüzeyde çarpma öncesi sağlanan sabit yüzey sıcaklığı, çarpan jetin yerel ısı akısını ve termal sınır tabakası kalınlığını ayarlamasına neden olarak, özellikle durgunluk noktasında bir tepe noktası olmak üzere, ısı transferinde güçlü uzamsal değişimler üretir; ancak jetin akışkan mekaniği büyük ölçüde değişmeden kalır. Bu tezde uygulanan sabit yüzey sıcaklıkları ($T_s = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$, $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $74\text{ }^{\circ}\text{C}$) yüzeydeki ısı transferini etkilemiştir. Ancak parametrelerin hangisinin daha etkin olduğunu bu noktada tespit etmek zordur. İleriki

bölümde açıklanacak olan ANOVA analizleri hangi parametrenin etkileşim halinde ne kadar etkiyi sağladığını göstermek açısından faydalı olacaktır.

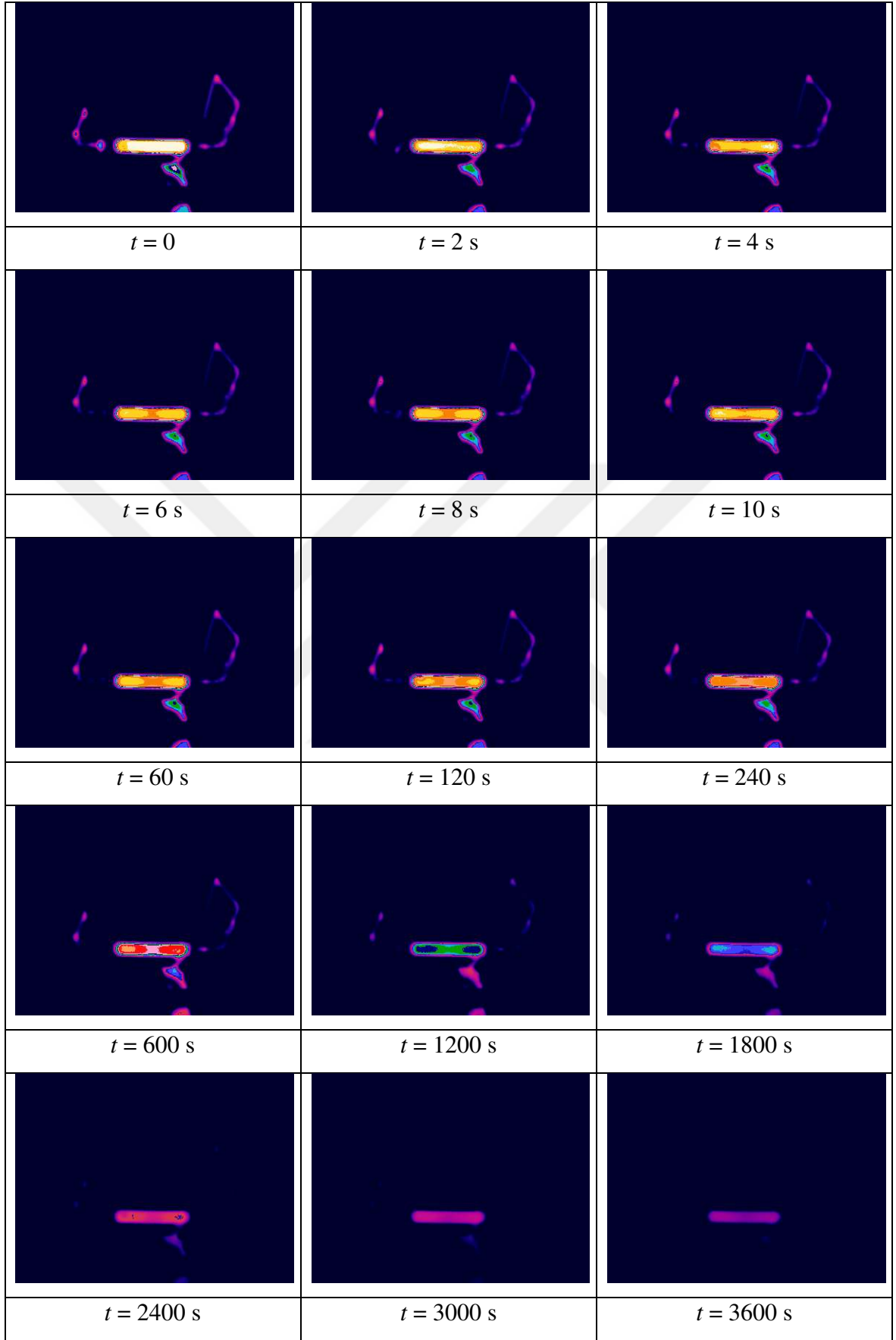
Şu ana kadar üç ayrı jet geometrisi kullanıldığından tam da bu aşamada biraz da jetin dönen bir silindire çarpması olayından bahsetmekte fayda olacaktır. Herşeyden önce, dönen silindire çarpan jet, jet momentumu, yüzey hareketi ve eğriliğin akışı ve ısı transferini birlikte kontrol ettiği, birleşik bir jet-dönme etkileşimi problemidir. Durgunluk bölgesinin modifikasyonu açısından bakıldığında, sabit bir silindir için, jet bir durgunluk çizgisi (dikdörtgen ve üçgen jet için) veya durgunluk noktası (dairesel jet için) oluşturur. Dönme, durgunluk bölgesini yüzey hareketi yönünde kaydırır ve eğikleştirir. Dönme hızının artması, ilerleyen taraftaki durgunluk basıncını zayıflatır ve geri çekilen taraftaki kaymayı güçlendirir. Sınır tabakası etkileşimi açısından bakıldığında ise silindirin dönüşü, yüzeyde teğetsel bir hız bileşeni oluşturur. Bu durum duvar kayma gerilimini, sınır tabakası kalınlığını, türbülansa geçişi etkililer. Yüzeye göre jet hızı azalır ve daha kalın sınır tabakası oluşur. Ayrıca dönme, asimetric sürüklenmeye neden olarak jeti bükür. Yüksek dönme hızları, normal çarpışmayı önleyerek akışı sıyırıcı bir jete dönüştürebilir.

Sabit bir silindire çarpan jette yerel Nusselt sayısı incelendiğinde durgunluğa yakın tepe Nusselt sayısı olduğu ve çevresel yönde monoton azalma olduğu görülür [49]. Dönen silindirde ise tepe, dönme yönünde kayar, karşıt yönde dönen tarafta daha yüksek ısı transferi, eş yönde dönen tarafta daha düşük ısı transferi oluşur.

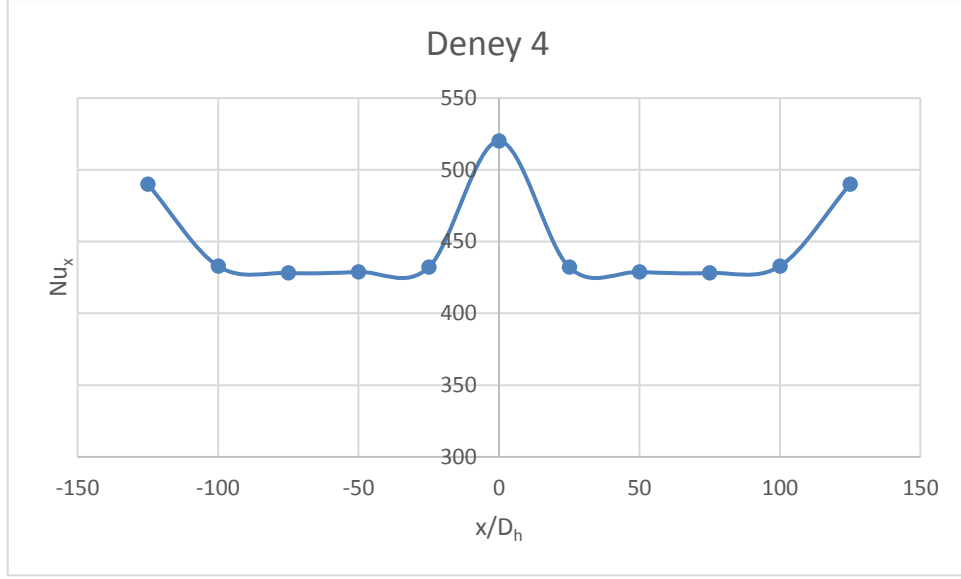
4.1.4 Deney 4 sonuçları

Deney 4’de $Re = 3000$, $H/D_h = 3$, kare lüle ve düşük dönme hızı ($U_{ds} = 20$ dev/dk) ve yüzey sıcaklığı $T_s = 60$ °C kullanılmıştır. Şekil 4.7 zaman adımlarına göre sıcaklık konturlarını, Şekil 4.8 yerel Nusselt sayılarını göstermektedir.

Deney 4’de Nusselt değerlerinde Reynolds sayısının artışına bağlı olarak, belirgin bir iyileşme gözlenmektedir. Yakın çarpma mesafesi ve kare lülenin türbülans artırıcı etkisi birleşerek durma noktasında yüksek bir yerel Nusselt sayısı değeri sağlamıştır. Düşük dönme hızı, jetin vurduğu bölgenin daha uzun süre soğuk kalmasına neden olmuş, bu da yerel ısı transfer grafiğinde keskin bir tepe noktası oluşumuyla kendini göstermiştir. Sıcaklık konturları, artan jet momentumu sayesinde soğumanın Deney 1’e göre daha hızlı gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 4.7: Deney 4 için zamana bağlı sıcaklık konturları



Şekil 4.8: Deney 4 için yerel Nusselt sayısının silindir çevresi boyunca değişimi

Burada lüle geometrisinin etkisi konusunda kısa bir açıklama yapmakta fayda olacaktır. Jetin hız profili, türbülans seviyesi, sürüklenme ve tutarlılığını doğrudan kontrol ettiği için nozul geometrisinin etkisi önemlidir; bu da çarpma yüzeyindeki ısı transferini, basıncı ve akış yapısını belirler.

Dairesel lüleler temelde en çok incelenen geometrilerdir ve akış özellikleri açısından aksel simetrik jet özelliği gösterirler, güçlü, iyi tanımlanmış durgunluk noktası vardır ve orta düzeyde başlangıç türbülansı (çıkış koşuluna bağlı) sağlarlar [1, 2, 33]. Isı transferi açısından durgunluk noktasında en yüksek tepe Nusselt sayısı sağlarlar ve ısı transferi radyal olarak dışa doğru monotonik olarak azalır. Ayrıca yüksek Reynolds sayılarında ikincil tepeler ortaya çıkabilir. Avantajlar; öngörülebilir davranış, yüksek durgunluk noktası ısı transferi, basit imalat ve modelleme olarak sayılabilirken ısı transferinin merkeze yakın bölgelerde oldukça yerel olması ve daha az homojen yüzey soğutması dezavantajlarıdır.

Dikdörtgen veya kare şeklindeki keskin köşeli (yarık veya slot jetler) iki boyutlu çarpan jet özelliği gösterirler ve akış özellikleri açısından jet tek yönde yayılır, dairesel jetlere kıyasla daha düşük sürüklenme ve daha büyük durgunluk bölgesine sahiptirler. Isı transferi açısından ise dairesel jetlere göre daha düşük tepe Nusselt sayıları ve daha homojen ısı dağılımı söz konusudur. Bu jetlerde yarık yönü boyunca ısı transferi oluşur ve çizgisel soğutma/ısıtma için uygundur. Uzun yüzeylerde homojen soğutma, daha basit akış yapısı avantajları olarak sayılabilirken, azaltılmış maksimum ısı transferi ve güçlü kenar etkileri dezavantajlarıdır [33, 52].

4.1.5 Deney 5 sonuçları

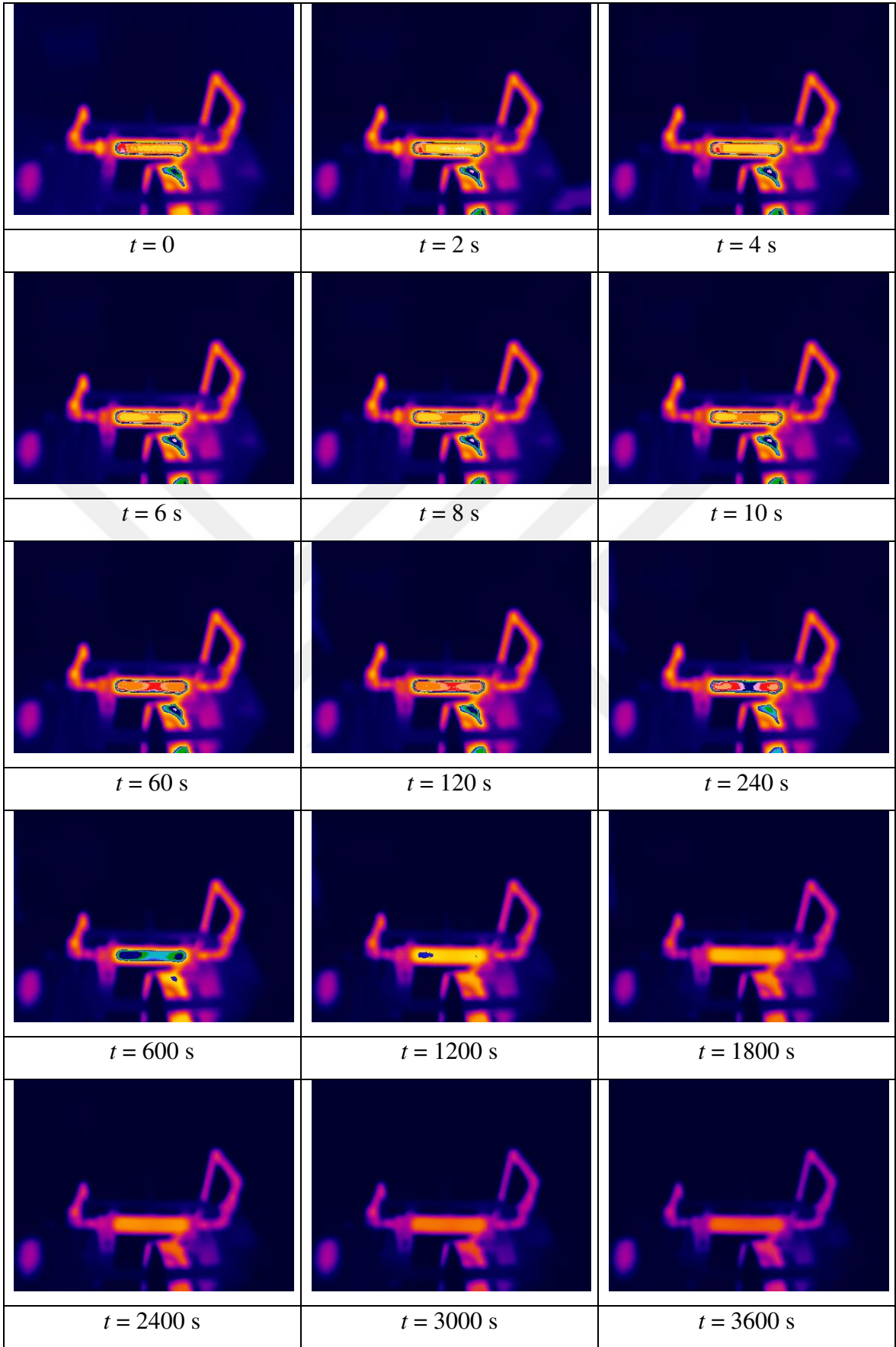
Bu deneyde üçgen lüle kullanılmıştır. Reynolds sayısı $Re = 3000$, lüle levha arası boyutsuz mesafe $H/D_h = 6$ alınmıştır. Silindirin dönme hızı $U_{ds} = 40$ dev/dk 'dır ve yüzey yüksek bir sabit sıcaklık olan $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ısıtılmıştır. Deney sonuçları diğer deney açıklamalarında olduğu gibi iki grafikla açıklanmıştır. Şekil 4.9'da belirli zaman adımlarındaki sıcaklık konturları, Şekil 4.10'da yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi, gösterilmiştir.

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 beraber incelendiği zaman görülmüştür ki, Deney 5'de geometrinin etkisi ön plana çıkmaktadır. Yerel Nusselt grafiğinde, üçgen lülenin karakteristik etkisiyle durma noktası civarında dalgalanmalar veya daha geniş bir etki alanı görülebilir. Genel değerlendirmede, hem türbülansın hem de yüzey hareketinin dengeli bir kombinasyonu ile verimli bir soğutma performansı elde edilmiştir. Üçgen lülenin akış yapısındaki kararsızlıkları artırarak sınır tabakayı daha etkin bozduğu sıcaklık haritalarından anlaşılmaktadır. Ayrıca $U_{ds} = 40$ dev/dk 'lık dönüş hızı, soğuk jet akışının yüzeye yayılmasını kolaylaştırmış ve sıcaklık gradyanlarını yumuşatmıştır.

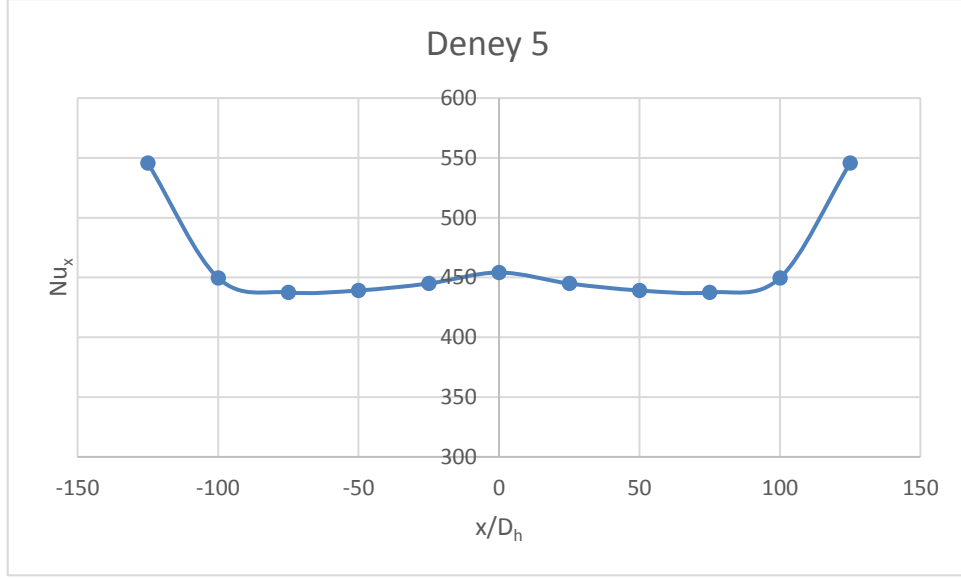
Sıcaklık gradyanları özel olarak mercek altına alındığında ise $t = 1800$ sn sonrasında yani jet çarptırılmaya başlandıktan yaklaşık yarım saat sonra dönen silindirin dış yüzeyinde sürekli rejim şartları elde edilmiştir.

Literatürden edinilen bilgiye göre urağan (stabil) bir yüzeye çarpan bir jetin kararlı duruma ulaşması için gereken süre ile hareketli (örneğin dönen veya öteleme yapan) bir yüzeye çarpan bir jetin kararlı duruma ulaşması için gereken süre karşılaştırıldığında, temel fark akış ve termal sınır katmanlarının ne kadar hızlı stabilize olduğunda yatmaktadır. Bu karşılaştırma, akış oluşum süresi ve termal tepki süresi açısından anlaşılabilir [35, 52].

Daha detaylı açıklayacak olursak, durağan bir yüzeye çarpan bir jet, akış ve termal alanlar bir kez stabilize olduğundan daha hızlı bir şekilde kararlı duruma ulaşır. Hareketli bir yüzey, sürekli bozulma ve sınır tabakası yenilenmesine neden olarak kararlı duruma ulaşmayı geciktirir; bu durum genellikle anlık olarak değil, zaman ortalamalı bir anlamda elde edilebilir [30, 33, 35].



Şekil 4.9: Deney 5 için zamana bağlı sıcaklık konturları



Şekil 4.10: Deney 5 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi

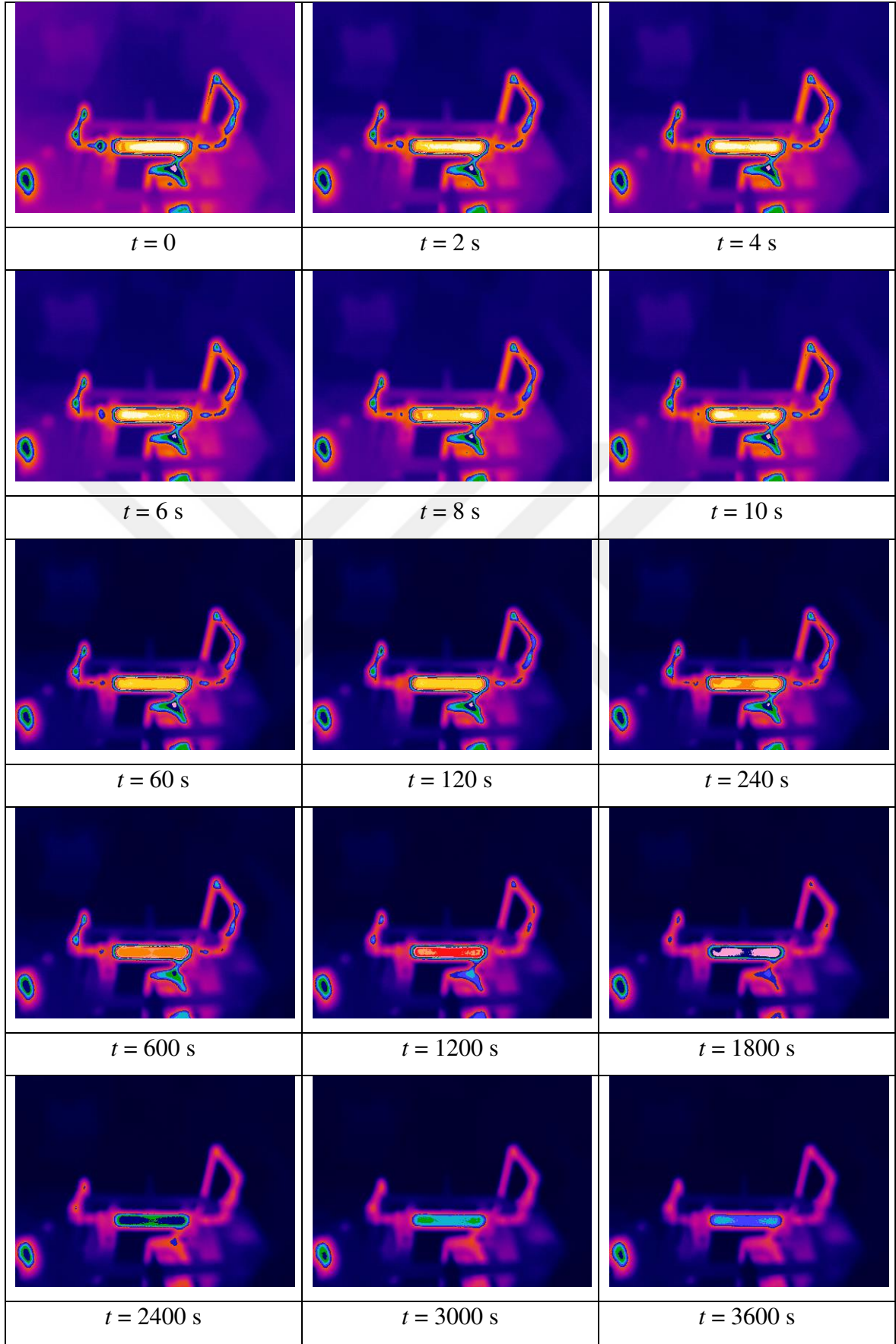
4.1.6 Deney 6 sonuçları

Bu bölümde $Re = 3000$ ve $H/D_h = 9$ parametreleri dairesel lüle ve yüksek silindir dönme hızı ($U_{ds} = 60$ dev/dk) ve düşük yüzey sıcaklığı ($T_s = 45$ °C) test edilmiştir. Bu deneyin sonuçları da diğer deneylerde olduğu gibi sıcaklık konturları (Şekil 4.11) ve yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi (Şekil 4.12) verilmiştir.

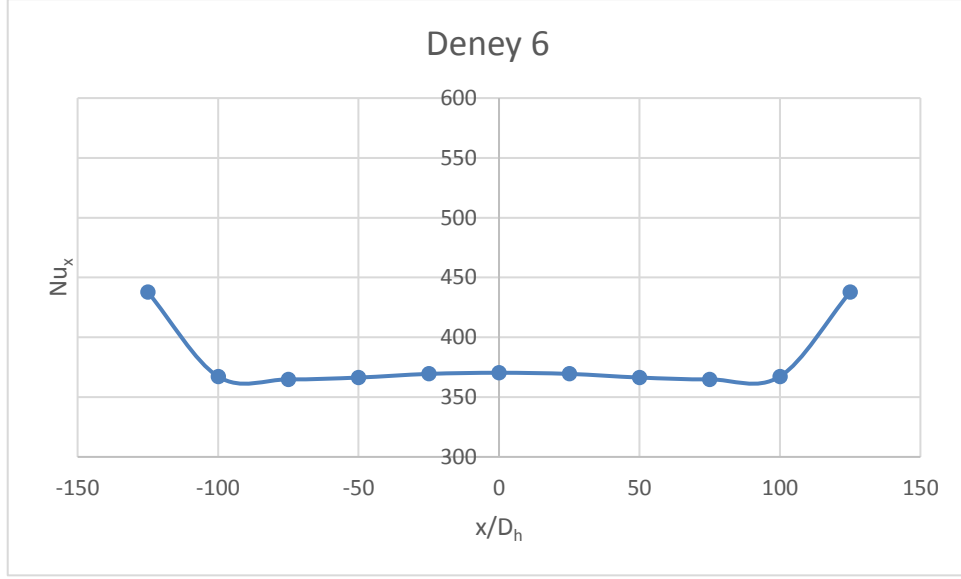
Bu deneyde mesafenin uzak olması jetin momentumunun sönümlenmesine yol açsa da, $U_{ds} = 60$ dev/dk 'lık yüksek silindir devri zorlanmış taşınım etkisini artırmıştır. Sıcaklık konturlarında yüzey sıcaklığının hızla düştüğü ancak bölgesel farkların az olduğu gözlemlenmektedir. Yerel Nusselt eğrisi, yüksek dönme hızı nedeniyle silindir çevresi boyunca daha düz bir çizgiye yaklaşmış, durma noktasındaki pik değer diğer deneylere göre daha basık bir form almıştır.

Daha önce Deney 3'de gözlemlenen benzer durum burada da gözlemlenmiştir. Zira Deney 3'de de aynı dönme hızı ve lüle-silindir arası mesafe test edilmişti. Sadece Reynolds sayısı ve lüle tipi farklı idi. Dolayısıyla kıyaslama lüle tipinin ve Reynolds sayısındaki artışın etkisini gösterir.

Deney 3'e göre ısı transferinin daha iyi olduğu görülmüştür -ki bu durum dairesel lülenin üçgen lüleye nazaran daha etkin soğutma sağladığını gösterir. Ayrıca Re sayısı Deney 3'de 2000 iken burda 3000 alınmıştır. Bu da muhtemel bir laminar-türbülans ayrımı demektir. Akış her ne kadar daha düşük Reynolds sayılarında test edilmemişse de Reynolds sayısının 2000 değeri lamşnar akım şartlarını oluşturur ve daha düşük momentum dolayısıyla daha düşük ısı transferi demektir.



Şekil 4.11: Deney 6 için zamana bağlı sıcaklık konturları

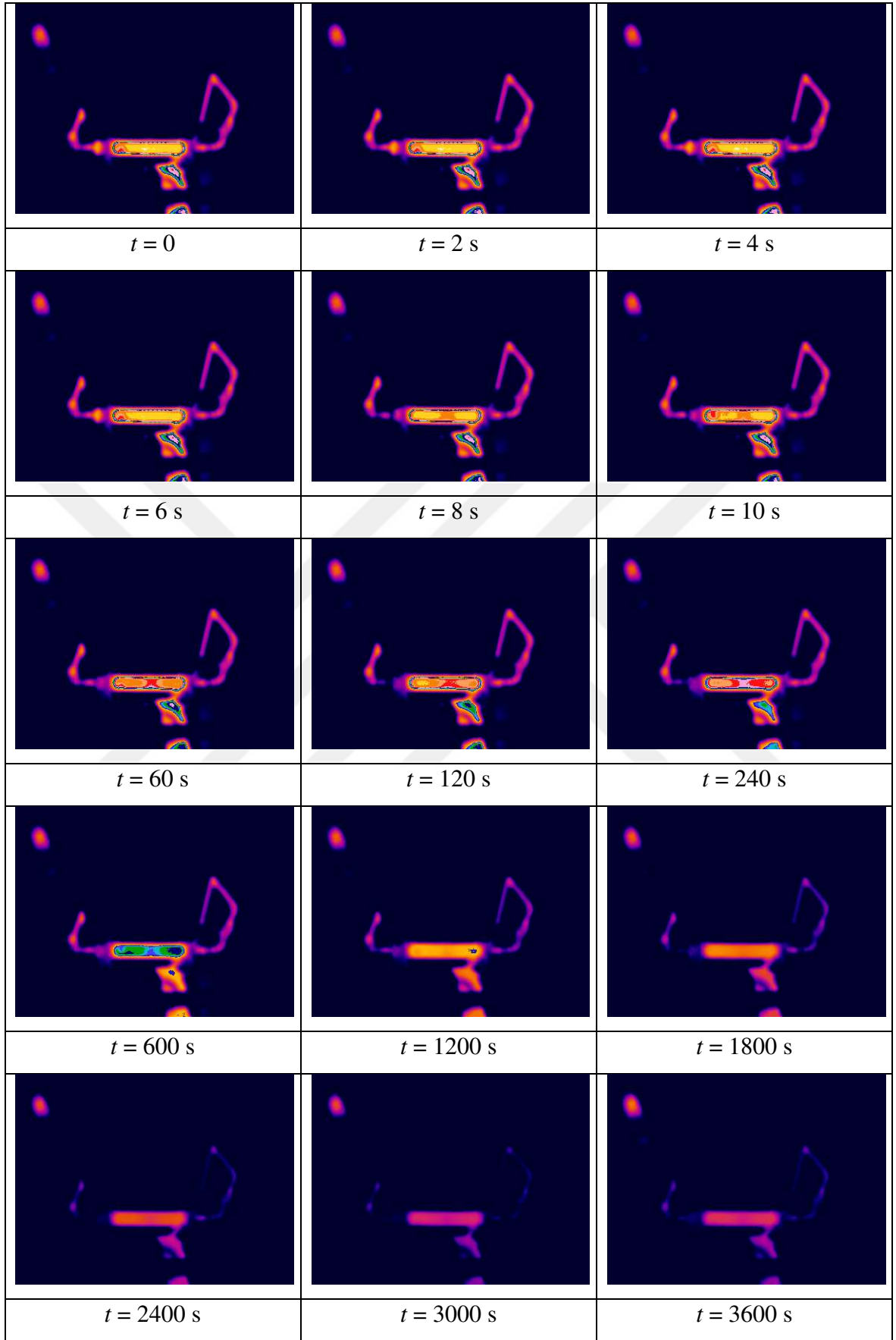


Şekil 4.12: Deney 6 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi

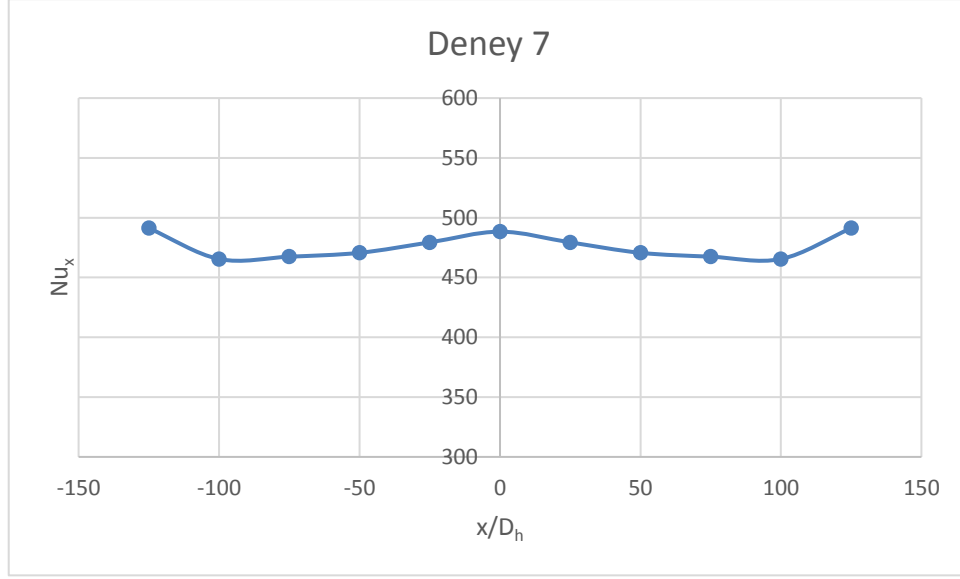
4.1.7 Deney 7 sonuçları

Reynolds sayısının 4000 olduğu ve $H/D_h = 3$ mesafesinde dairesel lüle ile çalışılan bu deneyde, $U_{ds} = 40$ dev/dk dönme hızı ve $T_s = 75$ °C yüzey sıcaklığı uygulanmıştır. Diğer tüm deney açıklamalarında olduğu gibi burada da Şekil 4.13’de zaman adımlarına bağlı sıcaklık konturları, Şekil 4.14’de silindir üzerinde hesaplanan yerel Nusselt sayısı dağılımı gösterilmiştir.

Sıcaklık konturları incelendiği zaman (Şekil 4.13), jetin çarptığı ilk nokta olan durgunluk noktasında, ani ve derin bir soğuma bölgesi görülmektedir. Benzer durum, Şekil 4.14’de verilen yerel Nusselt sayıları grafiği incelendiğinde de görülmektedir. Burada dairesel lülenin simetrik yapısı ve orta seviye dönme hızı ($U_{ds} = 40$ dev/dk) ile klasik çan eğrisine benzer ancak dönme yönüne doğru hafifçe kaymış veya yayılmış bir profil ortaya çıkmıştır. Jetin yüksek hızı ve kısa çarpma mesafesi, potansiyel çekirdeğin bozulmadan yüzeye ulaşmasını sağlamış, bu da durma noktasında çok etkin bir soğutma (dolayısıyla yüksek Nusselt sayısı) oluşturmuştur.



Şekil 4.13: Deney 7 için zamana bağlı sıcaklık konturları

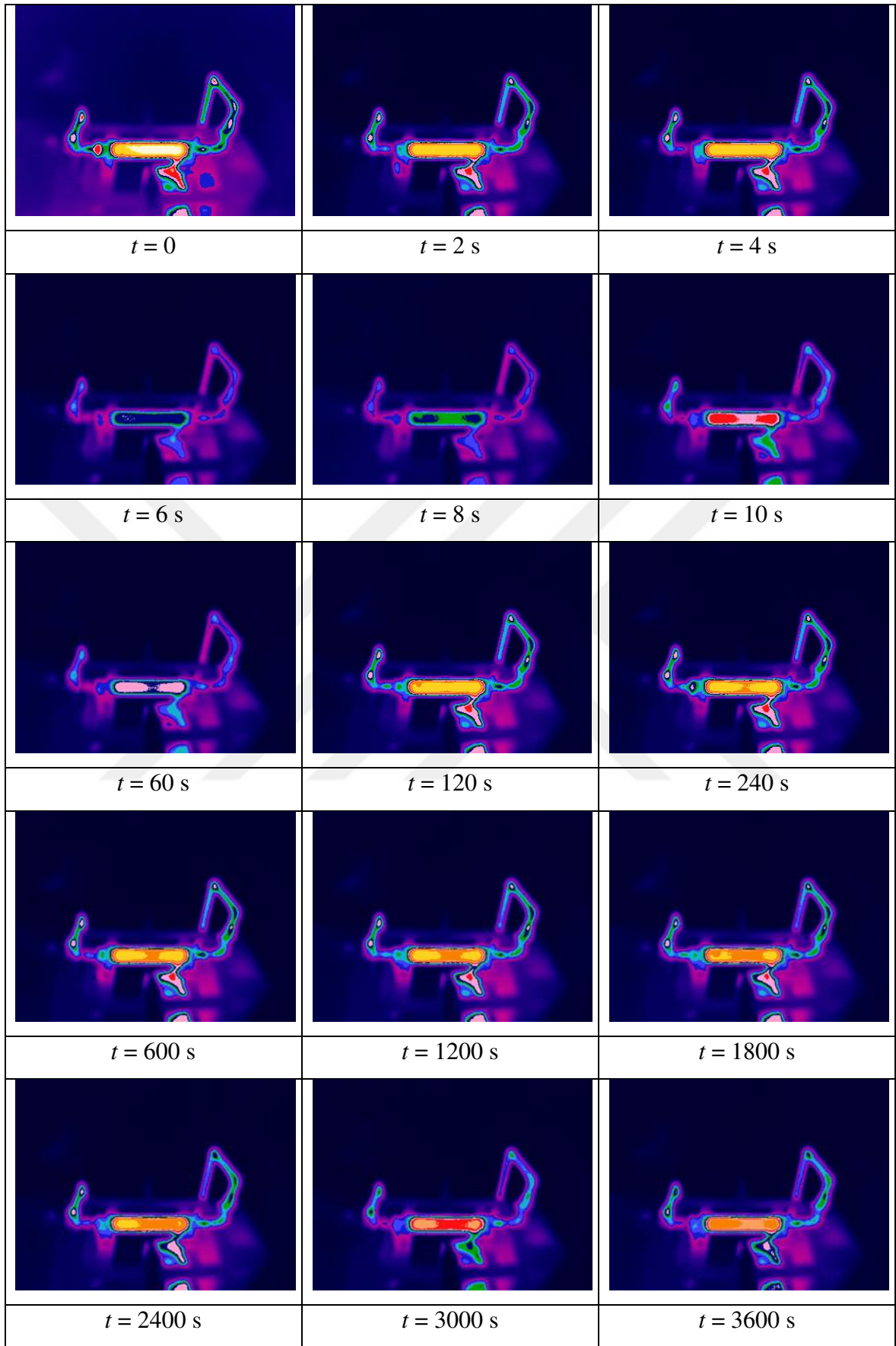


Şekil 4.14: Deney 7 için yerel Nusselt sayısının silindir çevresi boyunca değişimi

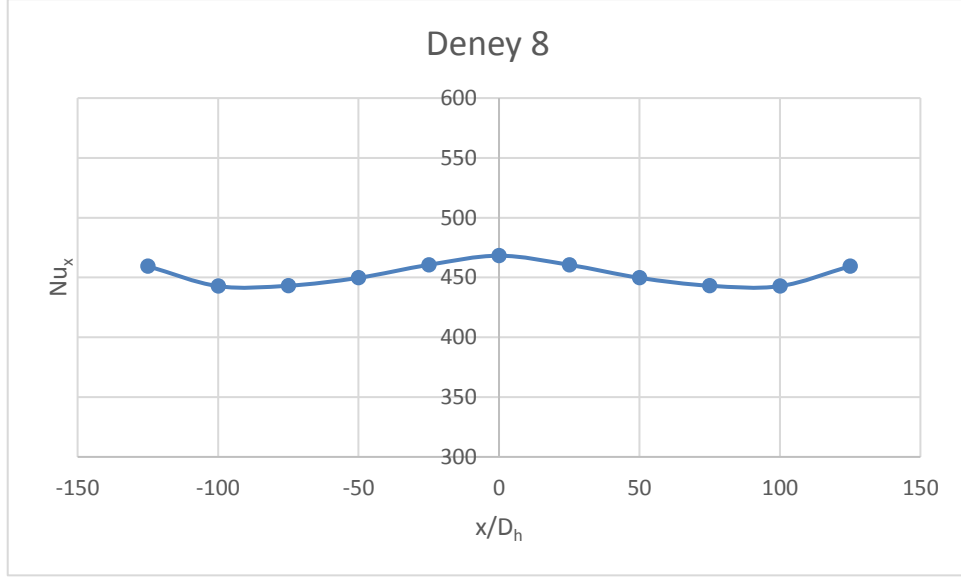
4.1.8 Deney 8 sonuçları

Bu deneyde kare geometrili lüle kullanılmıştır. Reynolds sayısı 4000 alınmıştır. Lüle ile dönen silindir arası boyutsuz mesafe $H/D_h = 6$ 'dır. Silindir en yüksek devirde ($U_{ds} = 60$ dev/dk) dönmektedir. Silindirin sabit yüzey sıcaklığı $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Şekil 4.15 zamana bağlı sıcaklık konturlarını, Şekil 4.16 sürekli rejimde elde edilmiş olan yerel Nusselt sayısı dağılımlarını göstermektedir.

Deney 8'de test edilen yüksek Reynolds sayısı ve silindirin yüksek dönme hızı, hem jetin çarpma gücünü hem de yüzeyin yenilenme hızını artırmıştır. Kare lülenin köşelerinden kaynaklanan vortekslerin, $H/D_h = 6$ mesafesinde yüzeye ulaşarak sınır tabakayı incelttiği düşünülmektedir. Yerel Nusselt sayılarının dağılımı incelendiğinde, elde edilen nispeten yüksek değerler silindirin yüksek devirde dönmesi nedeniyle özellikle arka bölgelerinde bile ısı transferinin devam ettiğini göstermektedir.



Şekil 4.15: Deney 8 için zamana bağlı sıcaklık konturları

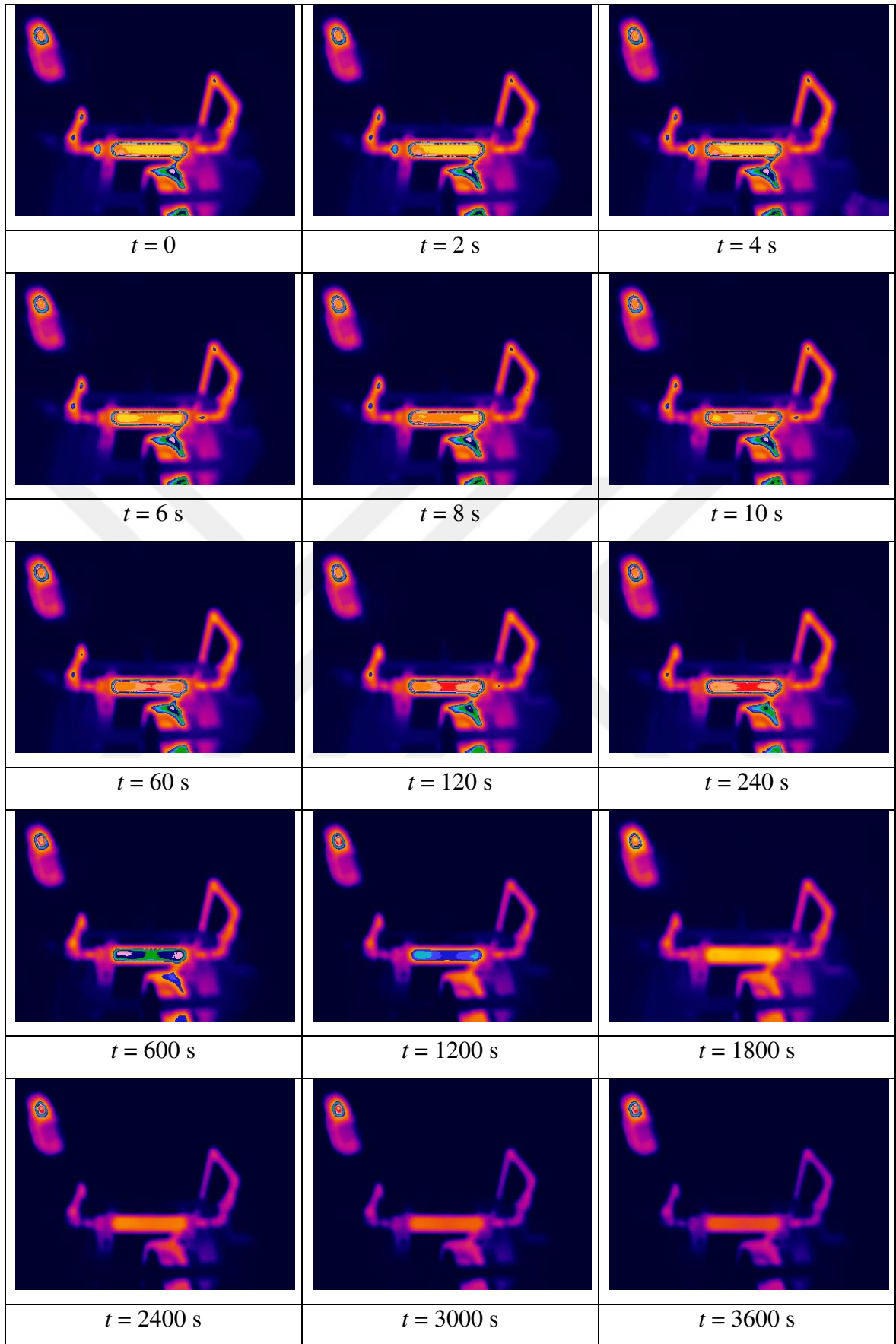


Şekil 4.16: Deney 8 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi

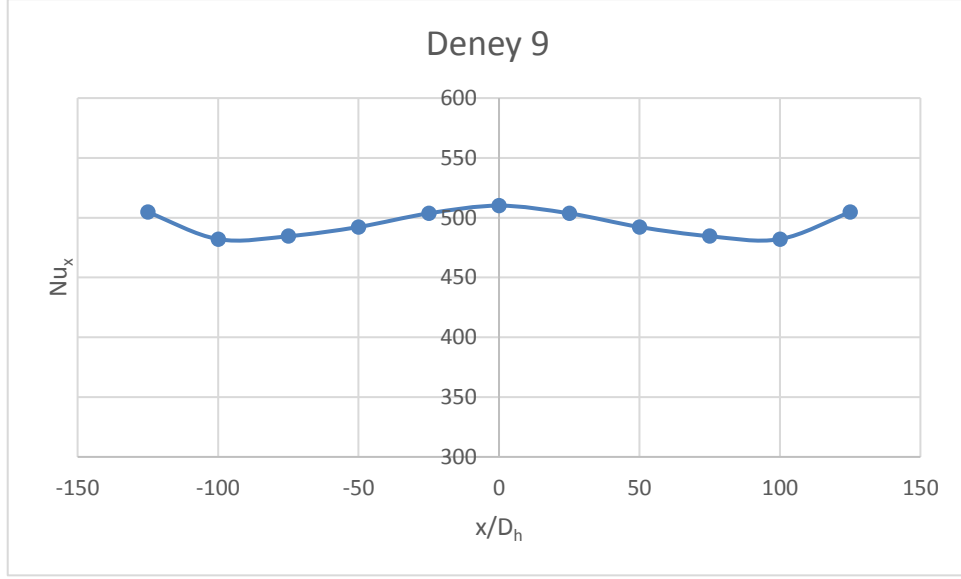
4.1.9 Deney 9 sonuçları

Bu deneyde Reynolds sayısı $Re = 4000$, lüle-silindir arası mesafe $H/D_h = 9$, silindirin dönme hızı $U_{ds} = 20$ dev/dk, yüzey sıcaklığı $T_s = 60$ °C alınmıştır. Üçgen geometrili lüle kullanılmıştır. Zamana bağlı sıcaklık konturları Şekil 4.17’de sürekli rejimde elde edilmiş yerel Nusselt sayıları Şekil 4.18’de verilmiştir.

Uzun lüle-silindir mesafesi jetin yayılmasına neden olmuş, ancak üçgen geometrinin sağladığı karışım bu dezavantajı kısmen dengelemiştir. Düşük devir sayısı, yüzeyin jet altında daha uzun süre kalmasına izin vererek yerel soğumayı artırmış ancak yüzey geneline yayılmasını kısıtlamıştır. Sıcaklık konturları incelendiğinde bölgesel soğuk noktalar daha belirgindir. Yerel Nusselt grafiğinde, durma noktasındaki ısı transferi piki belirgin olmakla birlikte, dönme hızının azlığı nedeniyle profilin kanatlarında hızlı düşüşler gözlemlenmiştir.



Şekil 4.17: Deney 9 için zamana bağlı sıcaklık konturları

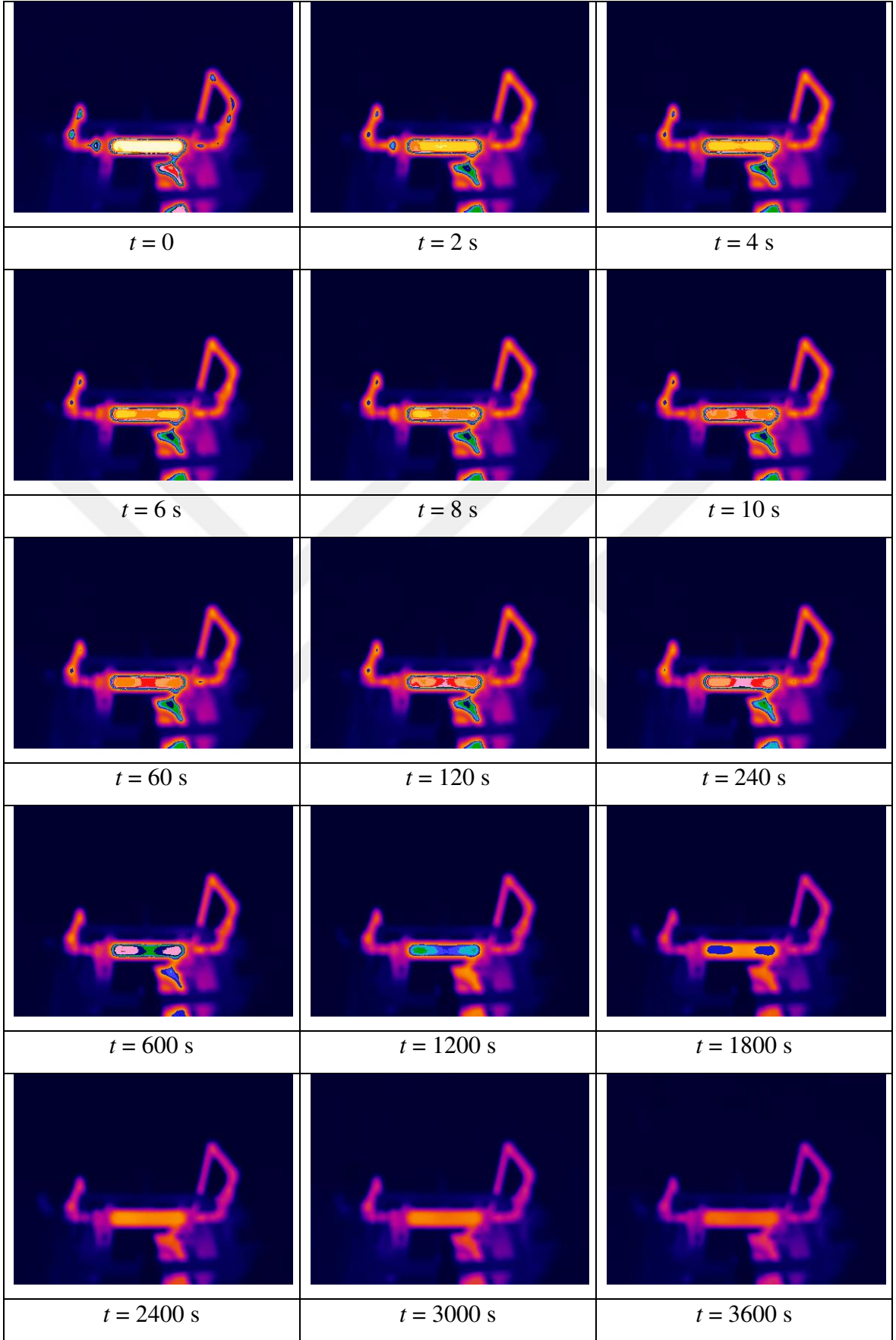


Şekil 4.18: Deney 9 için Yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi

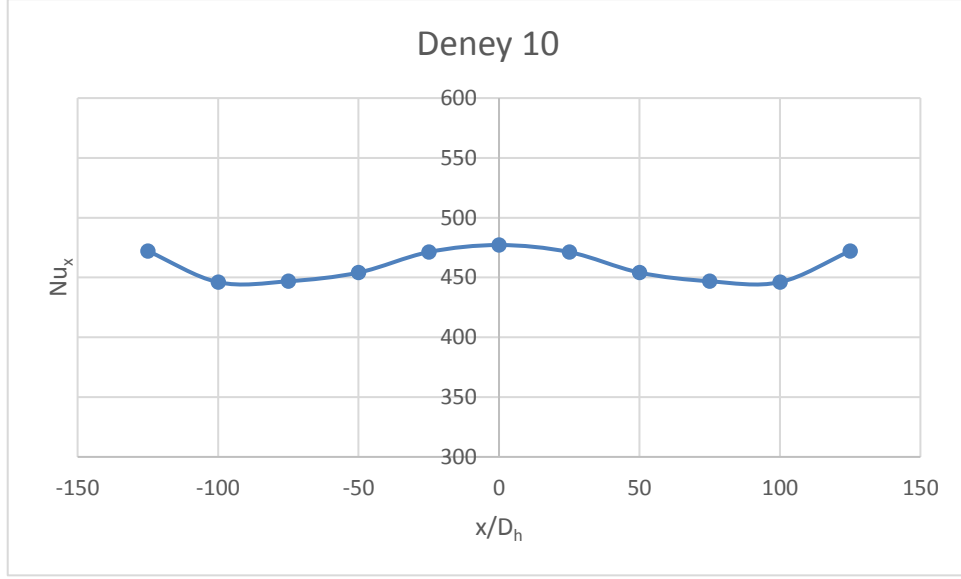
4.1.10 Deney 10 sonuçları

Reynolds sayısının 5000'e yükseldiği bu deneyde, $H/D_h=3$ 'tür. Silindirin dönme hızı $U_{ds} = 60$ dev/dk, yüzey sıcaklığı $T_s = 60^\circ\text{C}$ ve üçgen lüle kombinasyonu kullanılmıştır. Diğer tüm deney açıklamalarında olduğu gibi zamana bağlı sıcaklık konturları ve yerel Nusselt sayısı grafikleri elde edilmiştir (Şekil 4.19, Şekil 4.20).

Bu konfigürasyon, yüksek türbülans (Re sayısı ve üçgen geometri kullanımı) ve yüksek yüzey hareketini ($U_{ds} = 60$ dev/dk) bir araya getirmektedir. Bu deneyde sürekli rejime $t = 2400$ s civarında erişilmiştir. Yakın mesafe sayesinde jet, enerjisini kaybetmeden yüzeye çarpmış, üçgen yapının oluşturduğu girdaplar ısı transferini maksimize etmiştir. Silindir üzerinde oluşan yerel Nusselt sayılarının dağılımı, yüksek devir nedeniyle oldukça geniş bir tabana yayılmış ve yüksek bir ortalamaya sahip eğri oluşmuştur.



Şekil 4.19: Deney 10 için zamana bağlı sıcaklık konturları

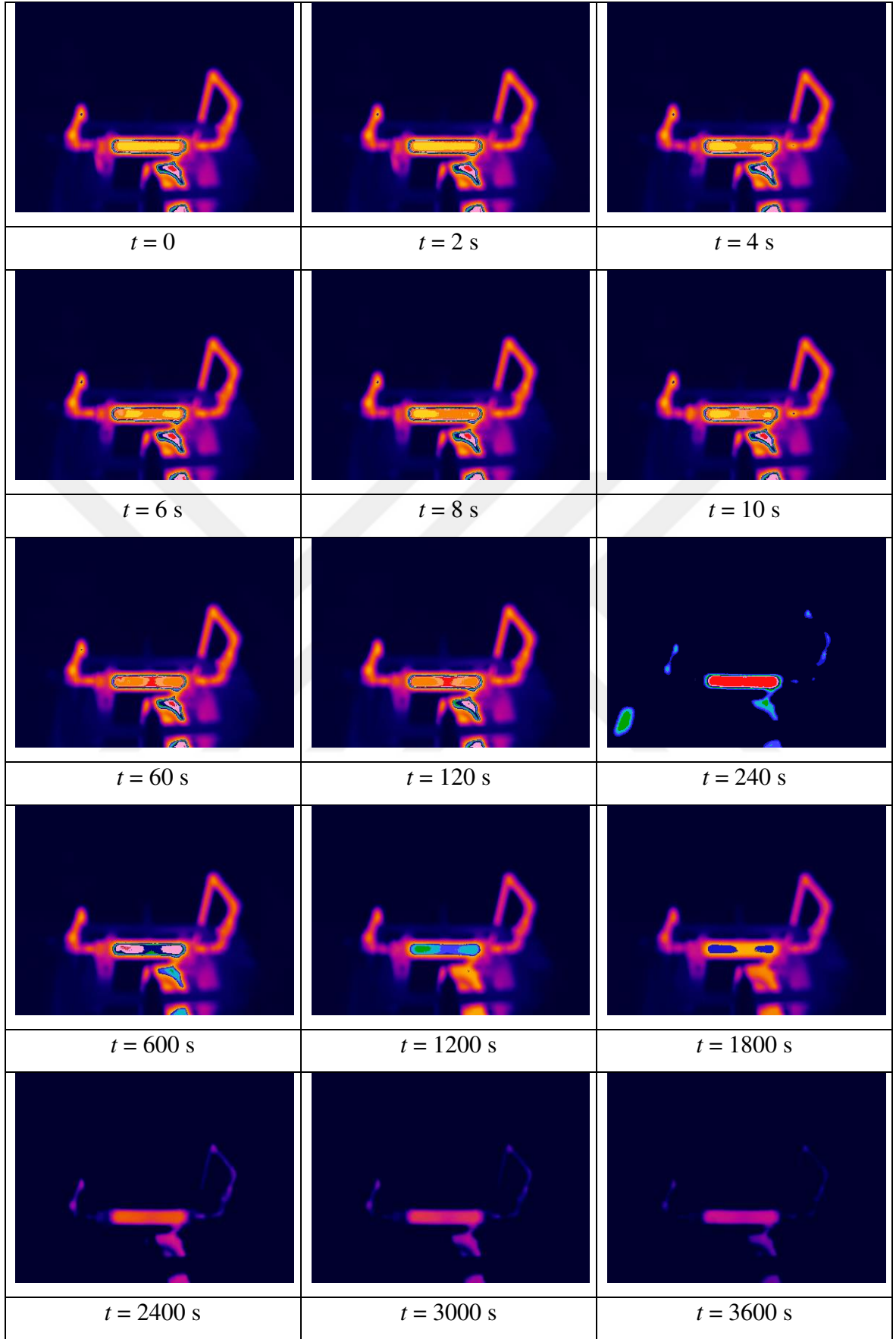


Şekil 4.20: Deney 10 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi

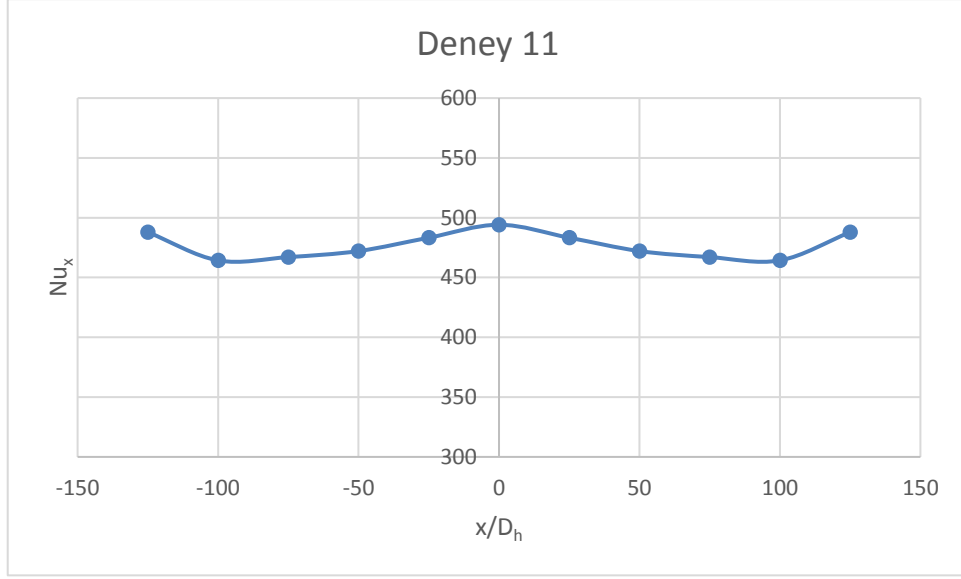
4.1.11 Deney 11 sonuçları

Deney 11’de Reynolds sayısı 5000 değerindedir. Lüle-silindir arası boyutsuz mesafe $H/D_h = 6$ ve silindirin dönme hızı $U_{ds} = 20$ dev/dk ve yüzey sıcaklığı $T_s = 75$ °C’dir. Şekil 4.21 zamana bağlı sıcaklık konturlarını Şekil 4.22 yerel Nusselt sayısı değişimini göstermek üzere çizilmiştir.

Dairesel lülenin kullanıldığı bu deney, klasik çarpan jet karakteristiği göstermektedir. Orta lüle-silindir mesafesi ve dairese geometri kullanılması akışın düzenli bir şekilde yüzeye ulaşmasını sağlamıştır. Ancak silindirin düşük dönme hızı ve yüksek olan başlangıçtaki sabit yüzey sıcaklığı, silindirin arka yüzeyindeki soğutma etkinliğini sınırlamıştır. Sıcaklık konturlarında jet eksenini etrafında konsantre bir soğuma halkası görülmektedir. Yerel Nusselt sayısı dağılım grafiğinde, durma noktasında belirgin bir maksimum değer (pik) oluşurken, açısal mesafe arttıkça ısı transfer katsayısında keskin bir düşüş gözlemlenmesi, dönme etkisinin yetersiz kaldığını işaret etmektedir.



Şekil 4.21: Deney 11 için zamana bağlı sıcaklık konturları



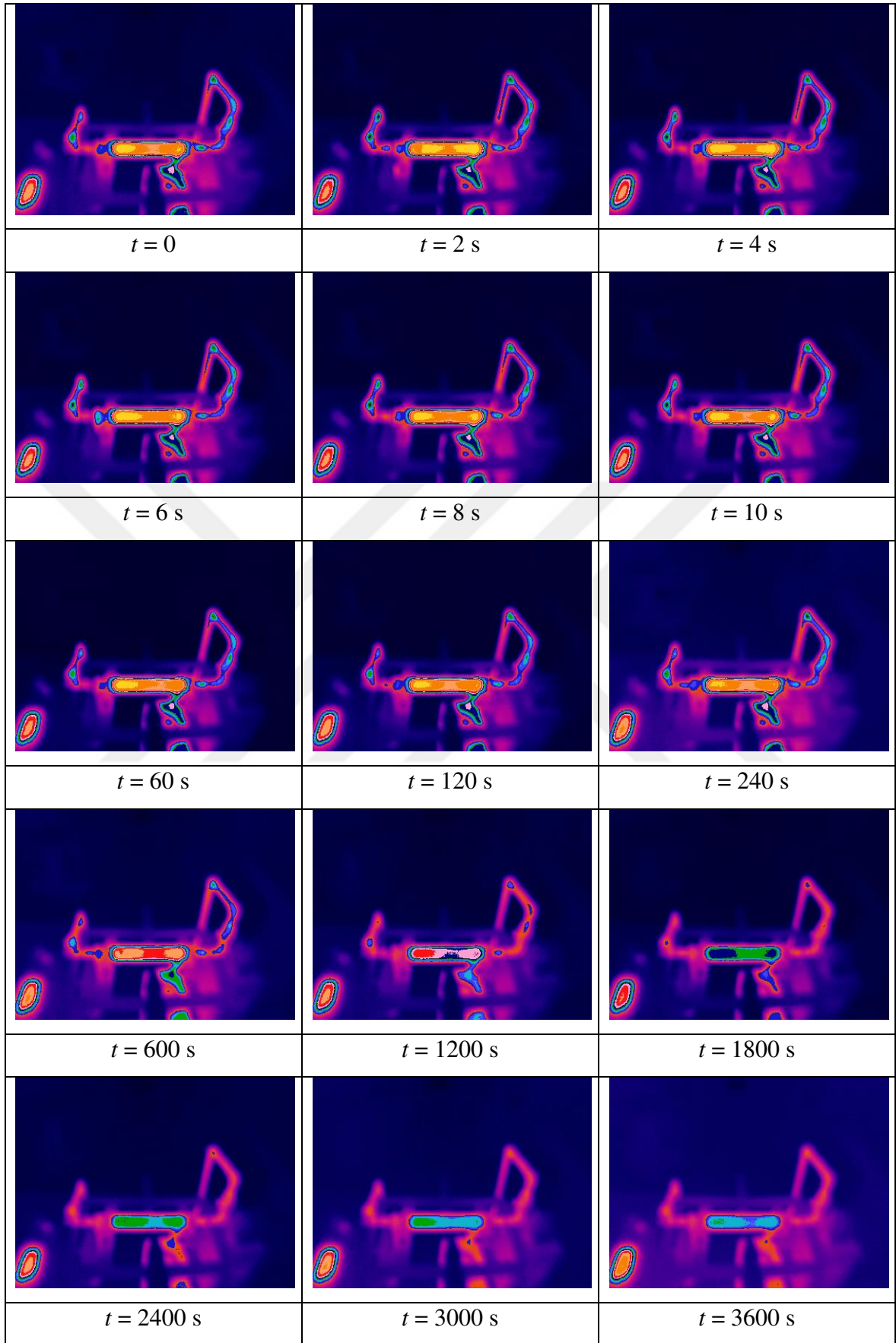
Şekil 4.22: Deney 11 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi

4.1.12 Deney 12 sonuçları

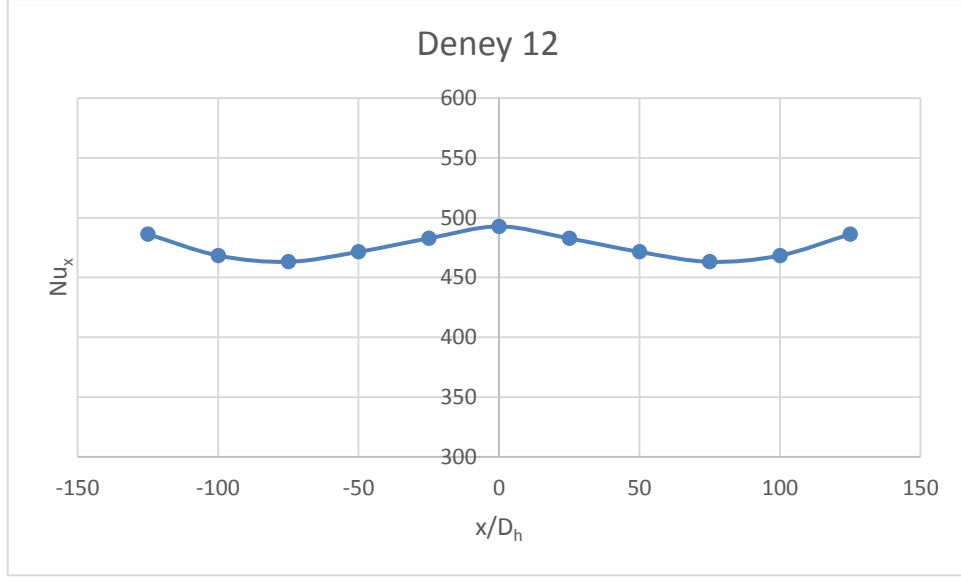
Bu deneyde $Re = 5000$, $H/D_h = 9$, $U_{ds} = 40$ dev/dk, $T_s = 45$ °C'dir ve kare lüle parametreleri test edilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'de gösterilmiştir.

Yüksek lüle-silindir mesafesi ($H/D_h = 9$) jetin hız profilinin yayılmasına neden olsa da, kare lülenin oluşturduğu türbülanslı yapılar uzak mesafelerde dahi etkisini sürdürebilmektedir. Silindirin $U_{ds} = 40$ dev/dk 'lık dönüşü, sıcaklık dağılımını dengeleyerek ortalama Nusselt sayısını iyileştirmiştir.

Grafikler incelendiğinde, kare lülenin etkisiyle yerel Nusselt sayısı eğrisinin tepesinde düzleşmeler veya çift tepe noktası benzeri anomaliler görülebilir. Ortalama ısı transferi açısından, mesafenin artışına rağmen tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.23: Deney 12 için zamana bağlı sıcaklık konturları

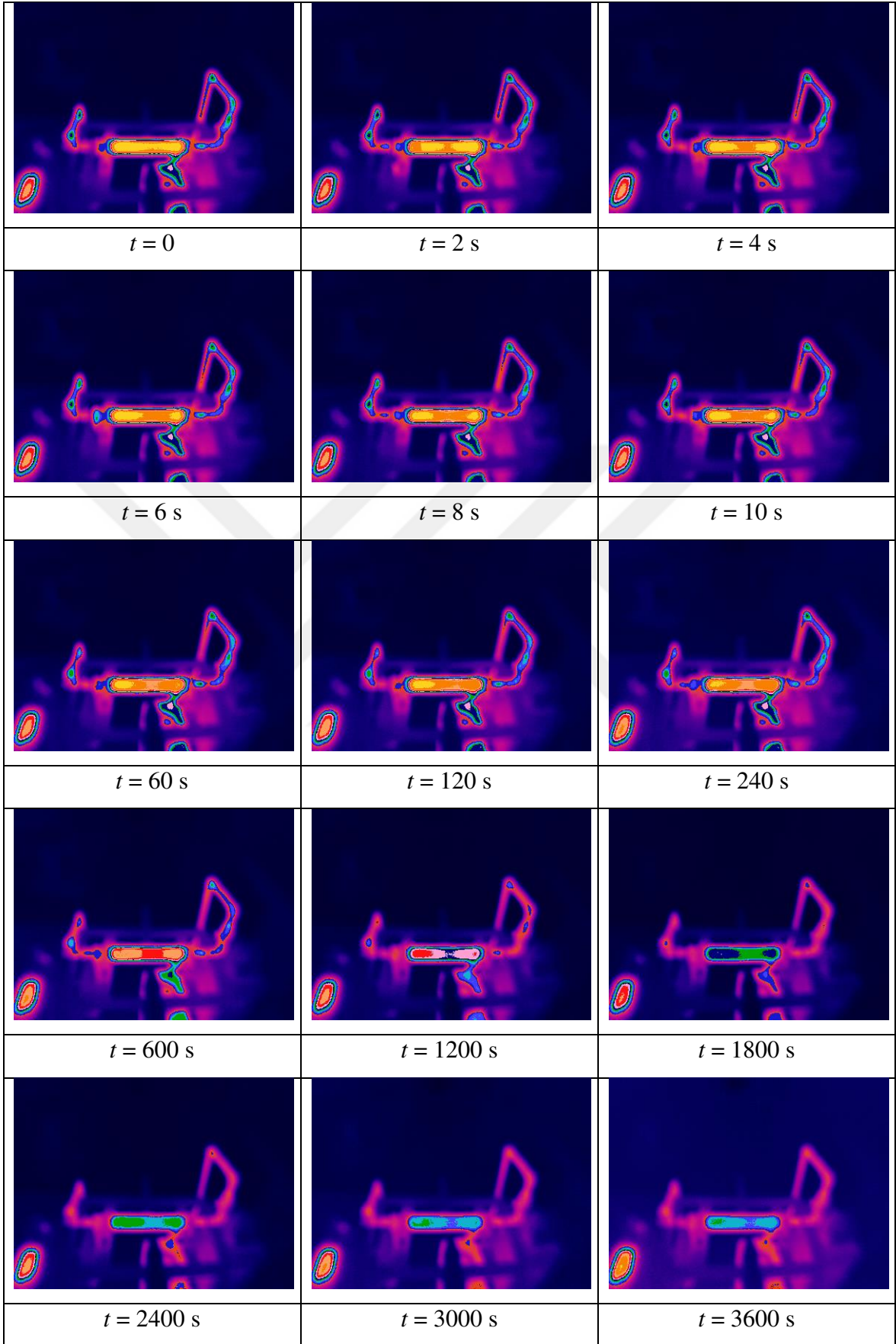


Şekil 4.24: Deney 12 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi

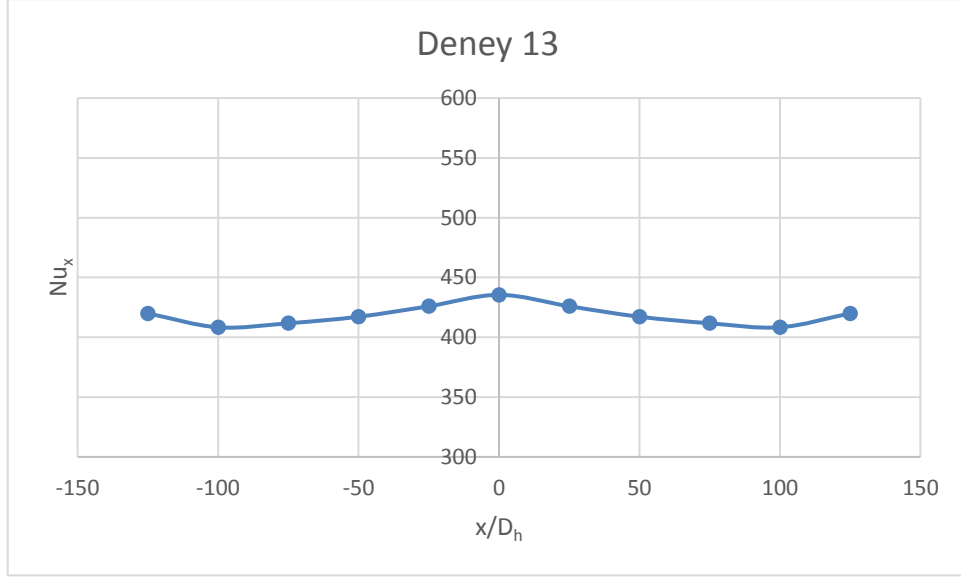
4.1.13 Deney 13 sonuçları

Deney 13’de Reynolds sayısı $Re = 6000$ ’dir. Lüle-silindir arası mesafe en yakın mesafe olan $H/D_h = 3$ ’dür. Silindirin $U_{ds} = 40$ dev/dk ’de döndüğü ve başlangıçta $T_s = 45$ °C sıcaklıkta olduğu durumda üçgen lüle ile jet akımı çarptırılmıştır. Sonuçlar tüm diğer deneylerde olduğu gibi zamana bağlı sıcaklık konturları (Şekil 4.25) ve yerel Nusselt sayısı dağılımı (Şekil 4.26) cinsinden değerlendirilmiştir.

Bu deneyde agresif bir soğutma rejimi oluşmuştur $H/D_h = 3$ mesafesi potansiyel çekirdek bölgesinin içinde kaldığından, jet maksimum hızıyla yüzeye çarpmıştır. Sıcaklık konturları, silindirin jet etkisindeki yüzeyinin hızla soğuduğunu göstermektedir. Üçgen geometrinin kenar etkileri sınır tabakayı bozarak Nusselt sayısını ortalamada artırmıştır. Yerel Nusselt grafiğinde çok yüksek bir tepe değeri ve $U_{ds} = 40$ dev/dk dönüş etkisiyle simetrisi hafif bozulmuş ancak geniş bir ısı transfer alanı gözlemlenmiştir. Yüzey sıcaklığının düşük olması ($T_s = 45$ °C) soğuma miktarını artırmıştır.



Şekil 4.25: Deney 13 için zamana bağlı sıcaklık konturları

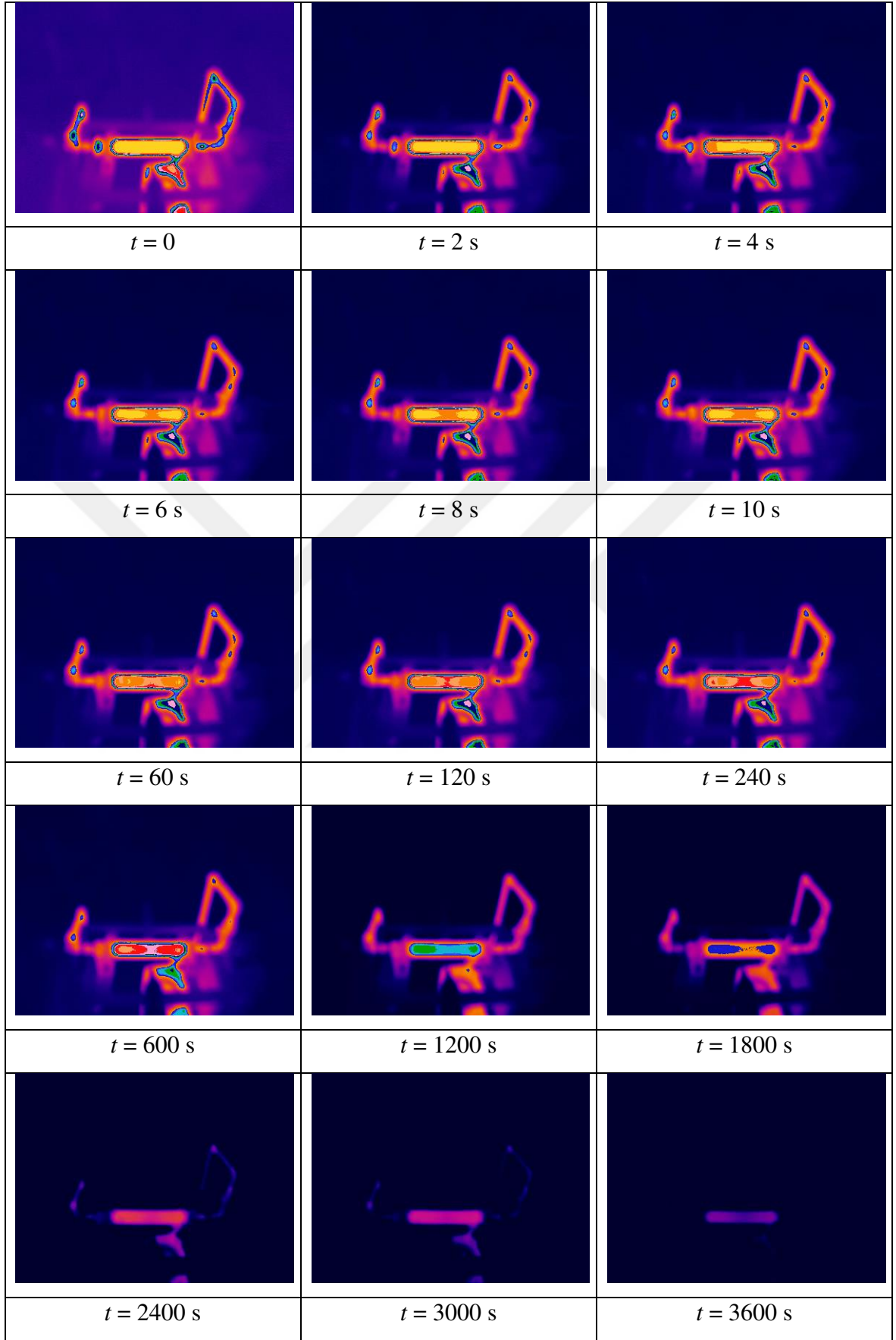


Şekil 4.26: Deney 13 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi

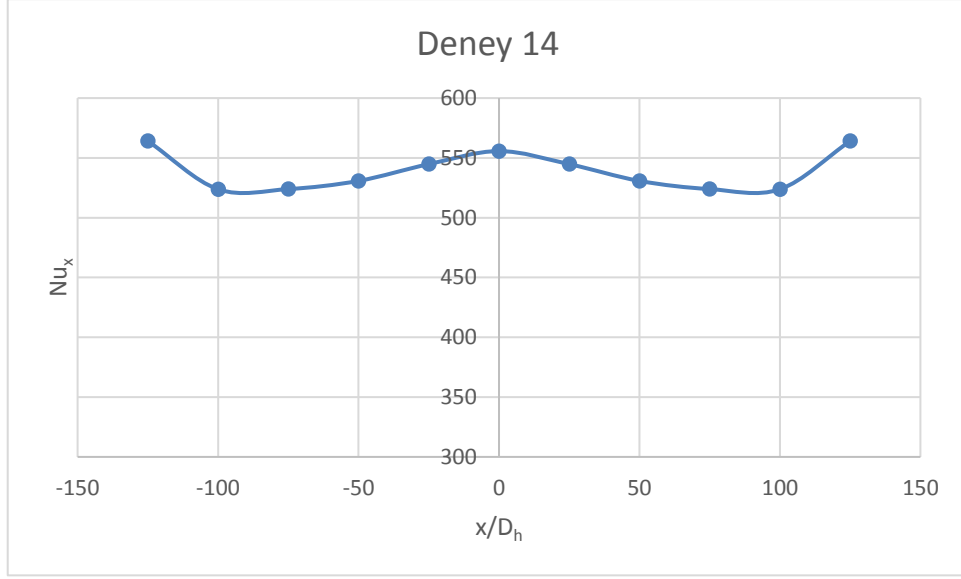
4.1.14 Deney 14 sonuçları

Deney 14’de tasarım parametrelerimiz sırasıyla $Re = 6000$, $H/D_h = 6$, $U_{ds} = 60$ dev/dk, $T_s = 60$ °C ve dairesel lüle koşullarında yapılan bu deneyde, yüksek debi ve yüksek devir sayısı ön plandadır. Şekil 4.27 ve Şekil 4.28 değerlendirme amaçlı çizilen kontur ve grafiktir.

Dairesel lülenin istikrarlı akışı, $U_{ds} = 60$ dev/dk ’lık silindir dönüşüyle birleştiğinde yüzey üzerinde oldukça homojen bir sıcaklık dağılımı (düşük termal stres) sağlamıştır. Sürekli rejime erken ulaşılmıştır. Yerel Nusselt eğrisi evvela yüksek Reynolds sayısının ve yüksek silindir dönmesinin etkisiyle artış göstermiştir.



Şekil 4.27: Deney 14 için zamana bağlı sıcaklık konturları

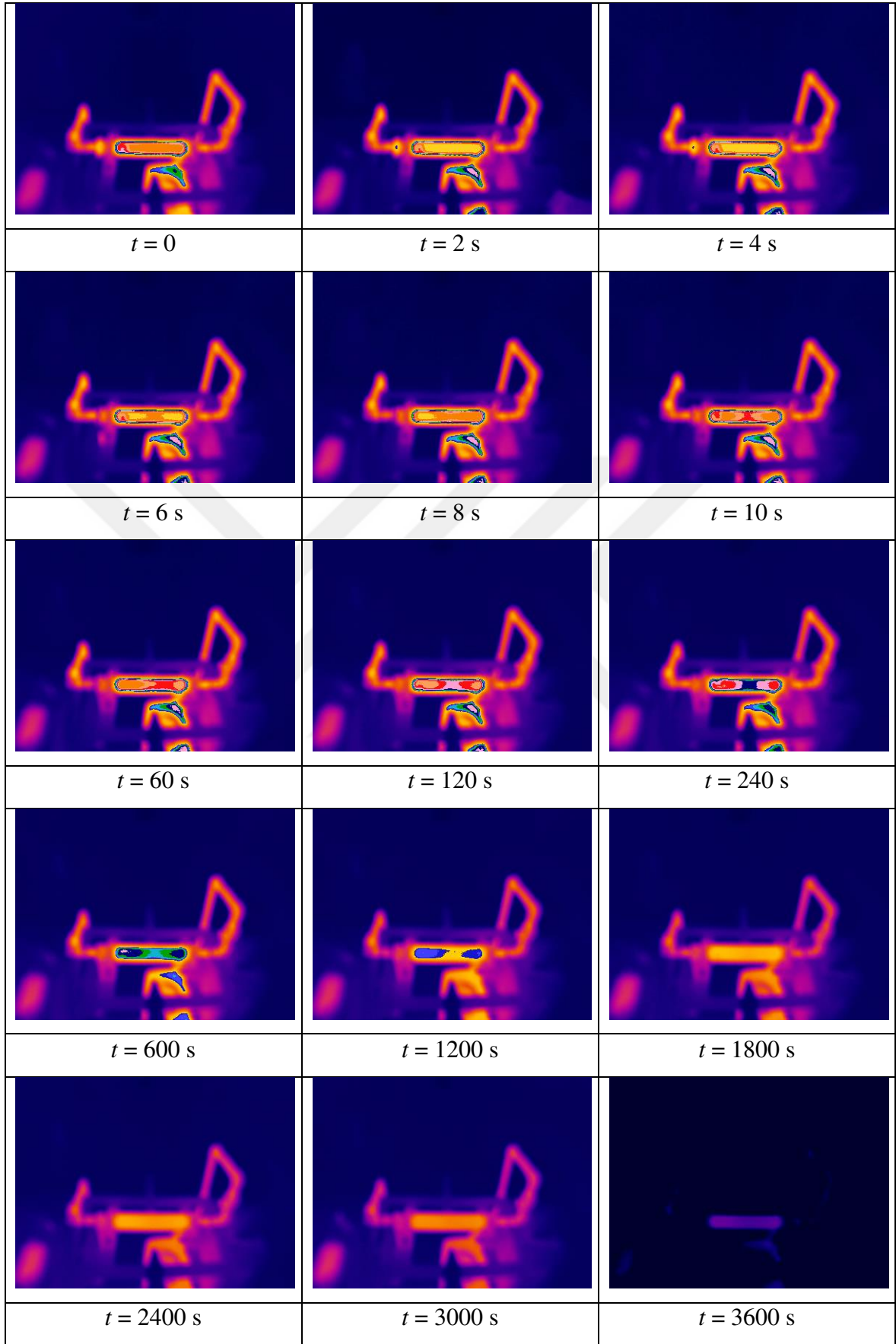


Şekil 4.28: Deney 14 için Yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi

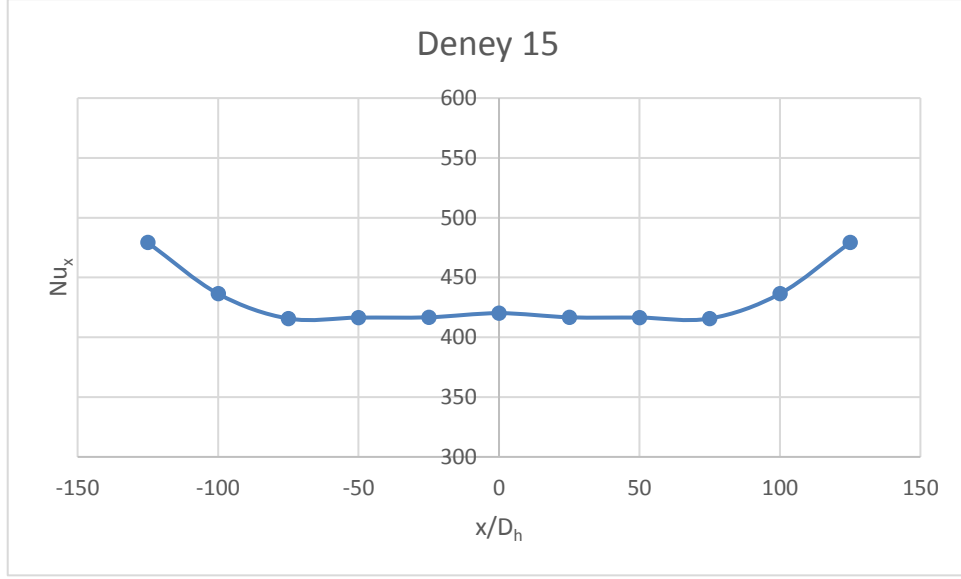
4.1.15 Deney 15 sonuçları

Bu deneyde $Re = 6000$, $H/D_h = 9$, $U_{ds} = 20$ dev/dk, $T_s = 75$ °C ve kare lüle ile jet çarpması test edilmiştir. Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da ısı transferi sonuçları değerlendirilmiştir.

Yüksek Reynolds sayısına rağmen, $H/D_h = 9$ mesafesi ve düşük devir, soğutma verimini belirli bir bölgeye hapsedmiştir. Kare lüle, uzak mesafede dairesel lüleye göre daha iyi karışım sağlasa da, silindirin yavaş dönmesi nedeniyle yüzey sıcaklık farkları yüksek kalmıştır. Sıcaklık konturları, jetin vurduğu noktanın çok soğuk, arka yüzeyin ise sıcak kaldığını göstermektedir. Yerel Nusselt sayısı dağılımı grafiği, durma noktasında sivri bir pik ve kenarlara doğru hızlı bir azalma karakteristiği sergilemektedir.



Şekil 4.29: Deney 15 için zamana bağlı sıcaklık konturları



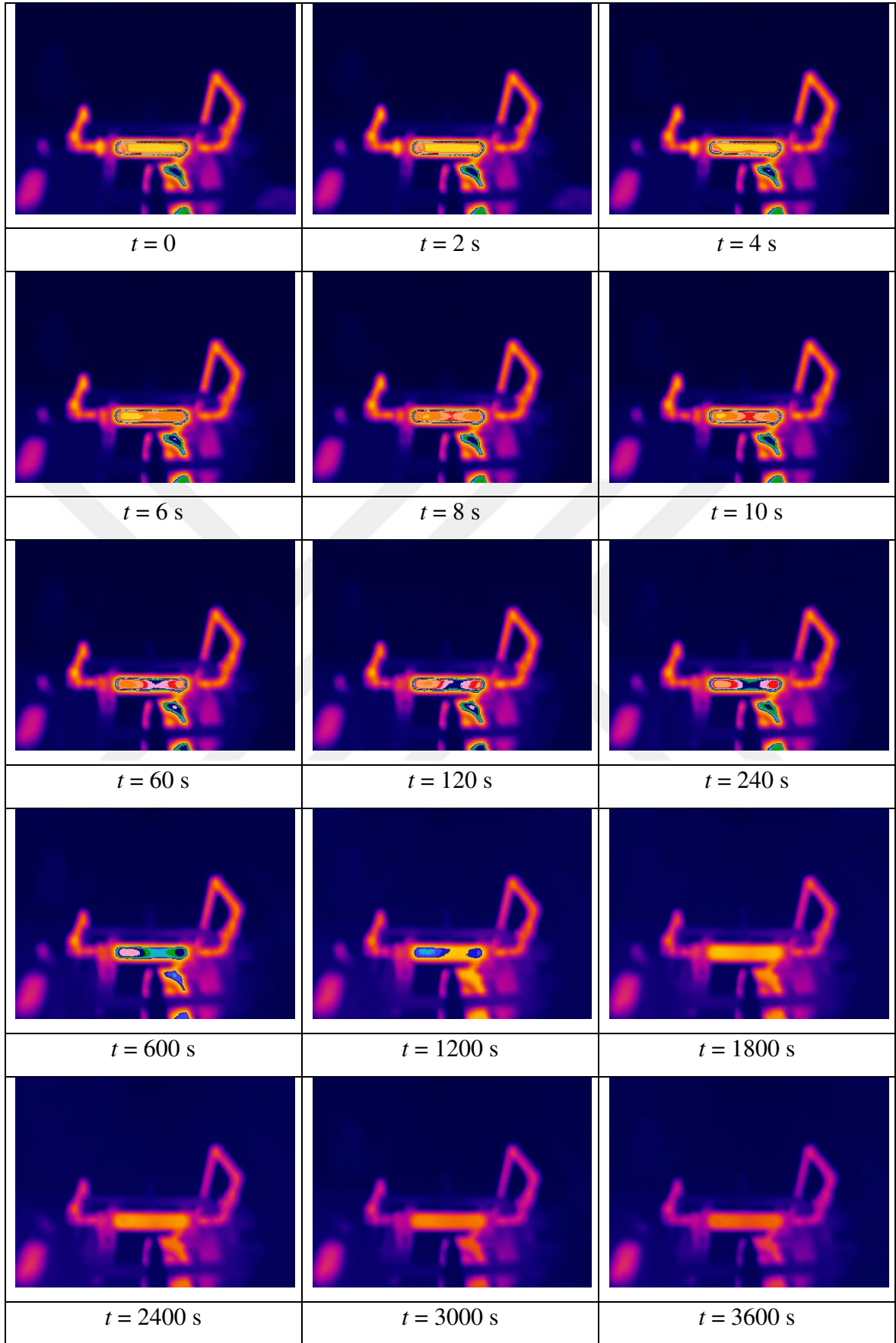
Şekil 4.30: Deney 15 için Yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi

4.1.16 Deney 16 sonuçları

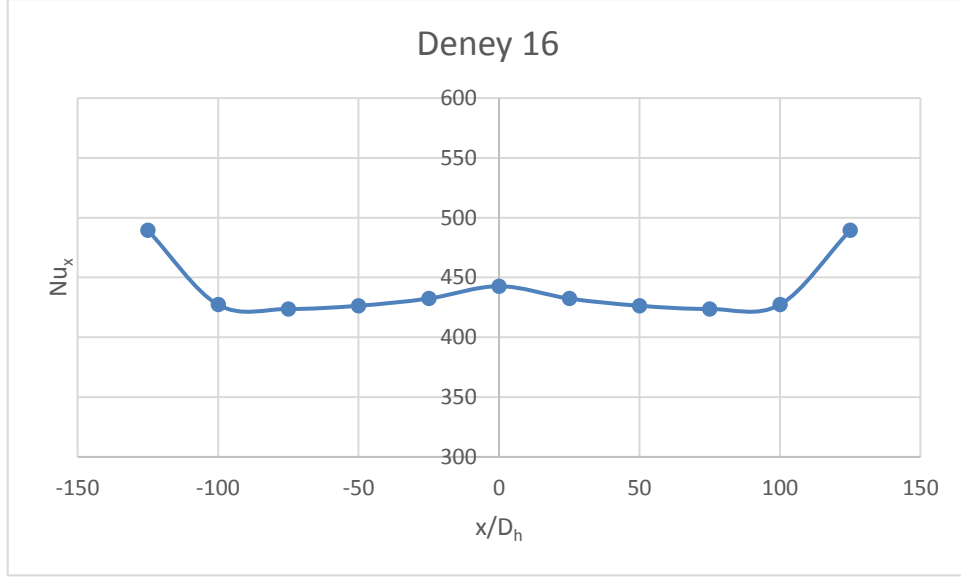
En yüksek Reynolds sayısı ($Re = 7000$), en yakın mesafe ($H/D_h = 3$) ve en yüksek devir ($U_{ds} = 60$ dev/dk) en yüksek yüzey sıcaklığı ($T_s = 75^\circ\text{C}$) ile kare lümenin kullanıldığı bu deney, yüksek ısı transfer katsayılarının beklendiği koşullardan biridir (Şekil 4.31, 4.32). Jetin yüksek momentumu ve kare geometrinin türbülansı, sınır tabakayı tamamen delerek yüzeye ulaşmıştır. 60 dev/dk dönüş ise bu yüksek soğutma etkisini tüm çevreye yaymıştır. Ortalama Nusselt grafiğinde en üst seviyelerde değerler görülmesi beklenir. Yerel Nusselt dağılımı, hem yüksek pik değeri hem de geniş tabanı ile en verimli soğutma profillerinden birini sunmaktadır.

Bu deneyde Reynolds sayısının artışının belirgin etkisi ortaya çıkmıştır. Tam da burada momentum etkisinden bahsetmekte fayda olacaktır. Momentumun etkisi tüm çarpan jet olaylarında neredeyse tüm değişken parametrelerden kat kat daha fazladır. Reynolds sayısı, atalet, viskoz ve türbülans etkileri arasındaki dengeyi kontrol ettiği için, çarpan jet akışında en etkili parametrelerden biridir. Reynolds sayısının etkisi akış yapısında, ısı transferinde, basınç alanında ve kararsızlıkta görülür [1-3].

Reynolds sayısı jet gelişimi ve türbülans şiddeti üzerinde etkilidir. Düşük Reynolds sayılarında jet daha uzun, ve kararlıdır, ayrıca potansiyel çekirdek belirgindir. Jet karışımı zayıf ve sürüklenme söz konusudur. Son olarak düzgün durgunluk bölgesi ortaya çıkar. Yüksek Reynolds sayılarında ise daha kısa potansiyel çekirdek ve daha güçlü kesme tabakası kararsızlıkları, gelişmiş sürüklenme ve karışım görülür [1-6].



Şekil 4.31: Deney 16 için zamana bağlı sıcaklık konturları

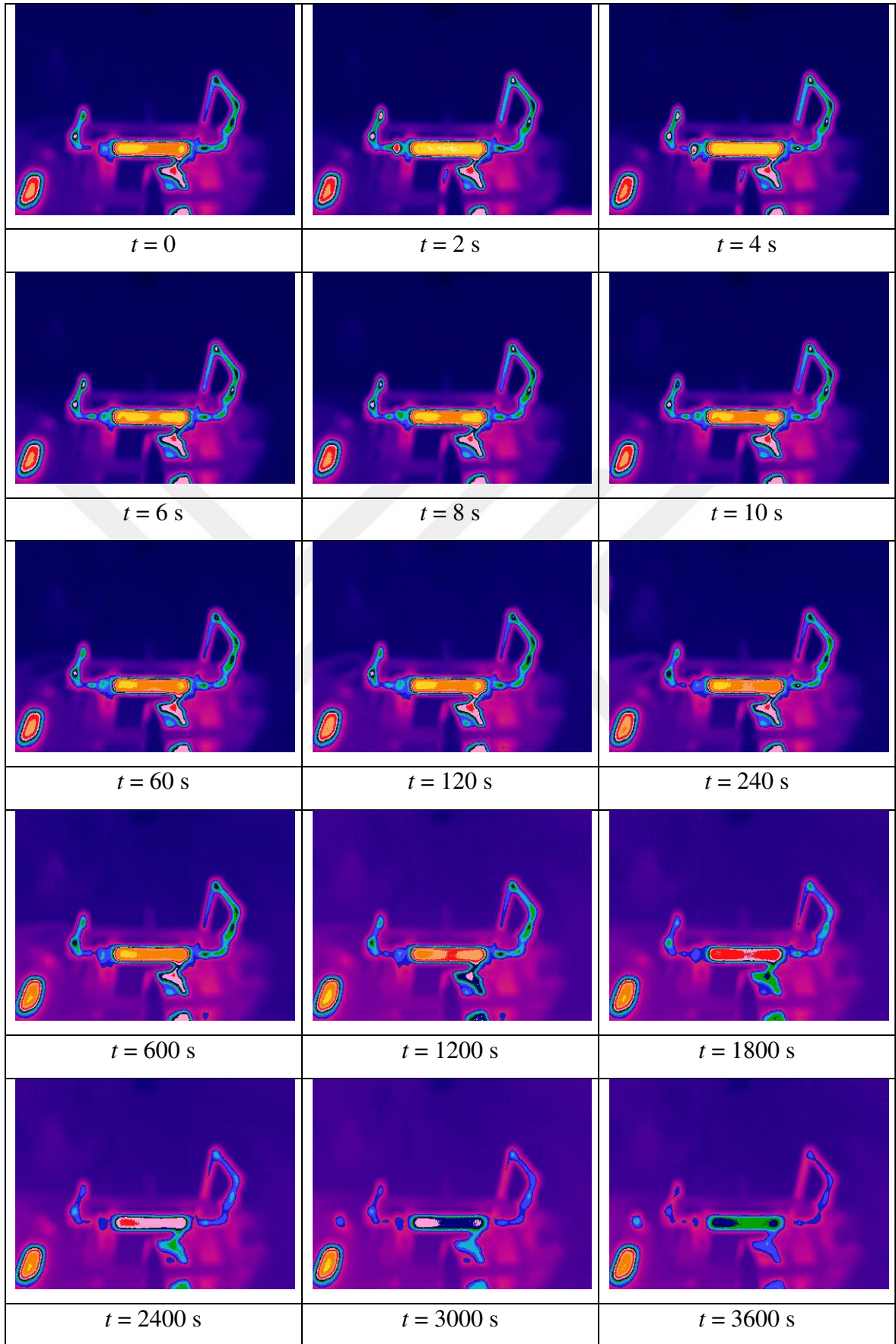


Şekil 4.32: Deney 16 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi

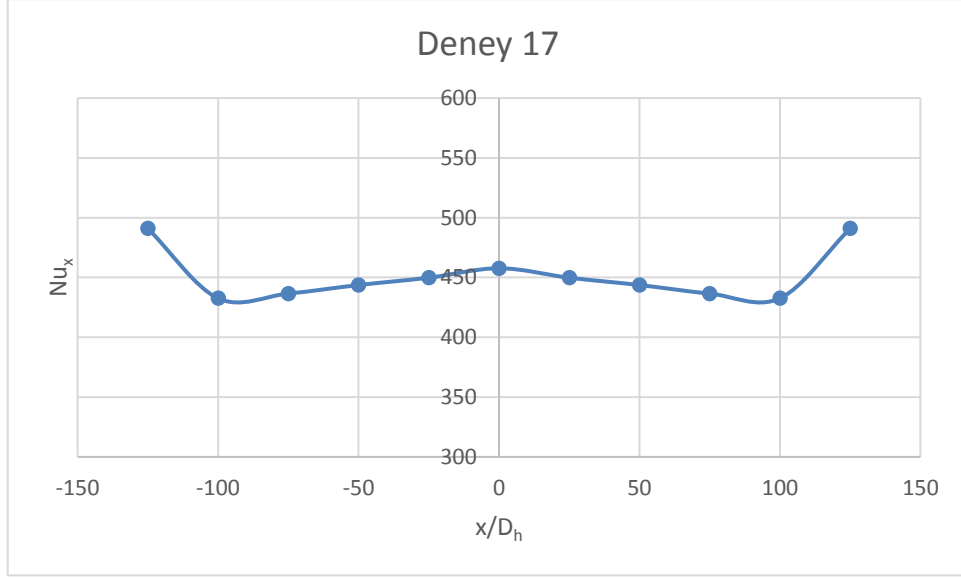
4.1.17 Deney 17 sonuçları

$Re = 7000$, $H/D_h = 6$ ve $U_{ds} = 20$ dev/dk, $T_s = 45$ °C koşullarında üçgen lüle ile gerçekleştirilen bu deneyde, yüksek akış hızı ve geometrik etkiler baskındır (Şekil 4.33, 4.34). Sürekli rejime ulaşma daha geç olmuştur. Üçgen lülenin oluşturduğu ikincil akışlar, $H/D_h = 6$ mesafesinde etkili bir ısı transferi sağlamıştır. Ancak $U_{ds} = 20$ dev/dk 'lık düşük dönüş hızı, bu etkinin yüzey boyunca homojenleşmesini engellemiştir. Sıcaklık konturlarında, üçgen jet izinin silindir yüzeyindeki termal imzası belirgin olabilir. Yerel Nusselt grafiğinde, durma noktasındaki ısı transferi çok yüksekken, silindirin dönüş yönünün tersinde kalan termal kameranın görmediği bölgelerde düşüşler gözlemlenmesi muhtemeldir.

Bu deneyde çıkan yüksek Nusselt sayıları büyük oranda artan momentumun yani Reynolds sayısının etkisiyle ilişkilidir. Deney 16'da da belirtildiği gibi çarpan bir jetin Reynolds sayısını artırmak jet momentumunu ve türbülanslı durgunluk noktasını ve ortalama ısı transferini yükseltir, potansiyel çekirdeği kısaltır. Ayrıca basınç yüklerini ve kararsızlığı artırır. Kısacası Reynolds sayısı öncelikle çarpışmanın yoğunluğunu ve verimliliğini belirler [1-6].



Şekil 4.33: Deney 17 için zamana bağlı sıcaklık konturları

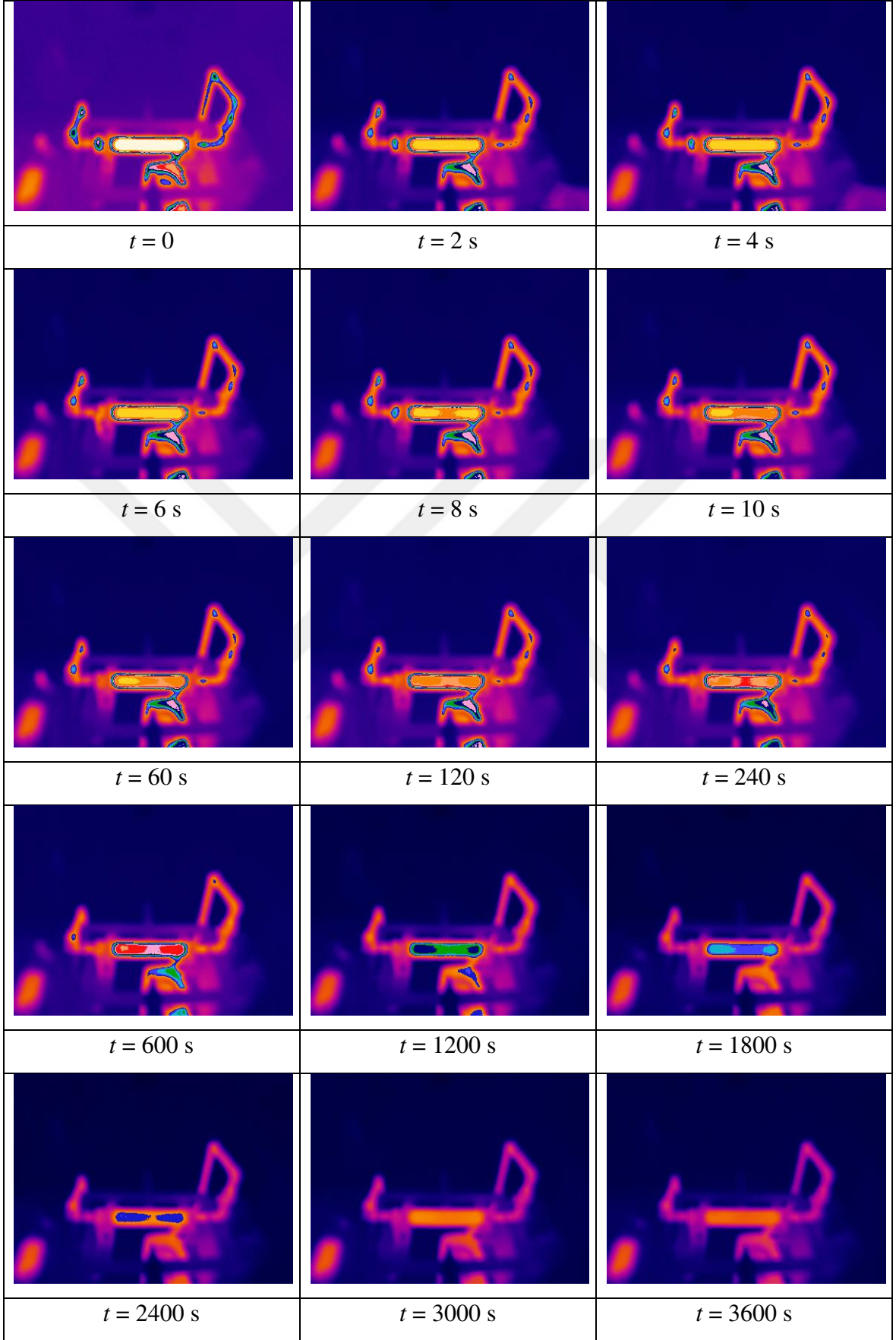


Şekil 4.34: Deney 17 için yerel Nusselt sayısının silindir boyunca değişimi

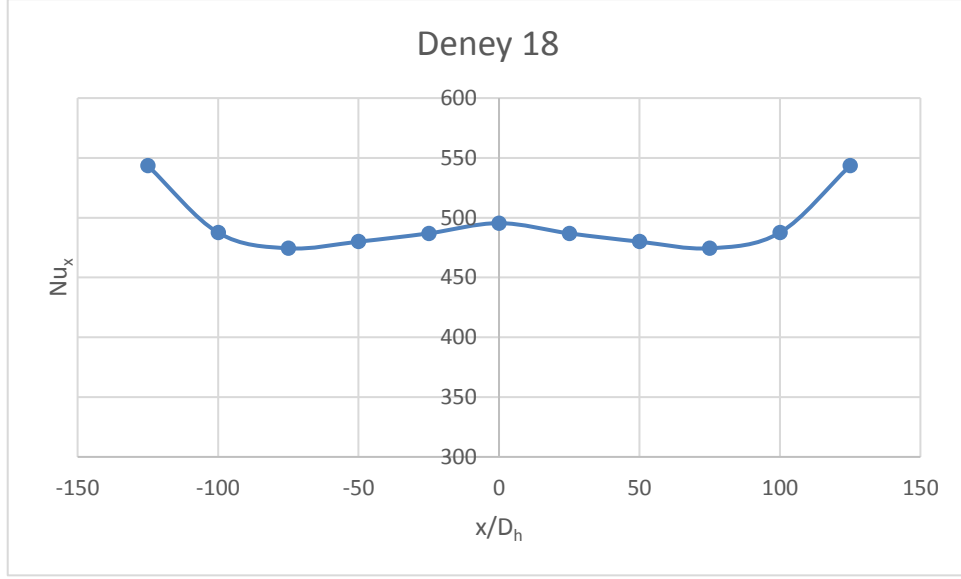
4.1.18 Deney 18 sonuçları

Son deneyde Reynolds sayısı $Re = 7000$, $H/D_h = 9$ ve $U_{ds} = 40$ dev/dk , $T_s = 60$ °C alınmıştır. Lüle geometrisi daireseldir. Sıcaklık konturları Şekil 4.35’de sürekli rejimdeki yerel Nu sayıları Şekil 4.36’da verilmiştir.

Test edilen en yüksek Reynolds sayısı, uzak mesafenin ($H/D_h = 9$) getirdiği hız düşüşünü büyük ölçüde kompanse etmiştir. Dairesel lüle, orta seviye yüzey sıcaklığı ($T_s = 60$ °C) ve orta seviye dönme hızı ($U_{ds} = 40$ dev/dk) kararlı ve öngörülebilir bir soğutma profili oluşturmuştur. Yerel Nusselt sayısı grafiği, yüksek Reynolds sayısı sayesinde genişlemiş bir etki alanı sunmakta ve $U_{ds} = 40$ dev/dk dönüş hızı ile durma noktası etrafında dengeli bir ısı dağılımı sergilemektedir.



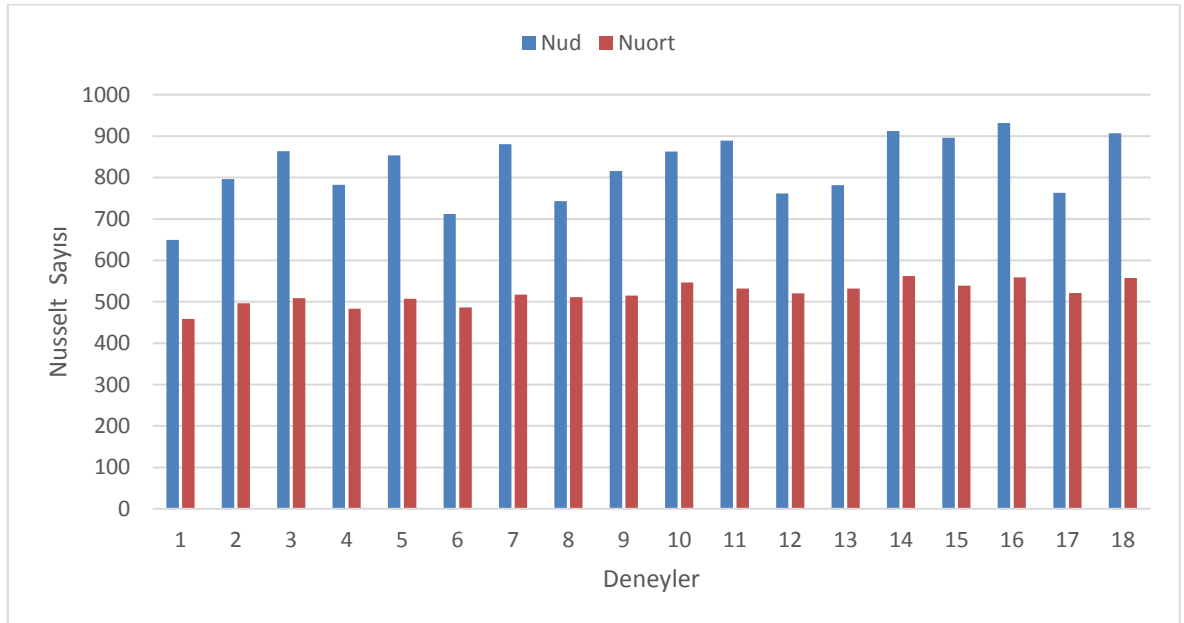
Şekil 4.35: Deney 18 için zamana bağlı sıcaklık konturları



Şekil 4.36: Deney 18 için yerel Nusselt sayısının silindir çevresi boyunca değişimi

4.2. Kararlı Hal Koşullarında Ortalama Nusselt (Nu_{ort}) ve Durma Noktası Nusselt (Nu_d) Sayıları

Bu bölümde, sistemin ısıl dengeye ulaşmasının ardından (kararlı hal) elde edilen durma noktası Nusselt sayısı ve silindir yüzeyi üzerindeki ortalama Nusselt sayısı değerleri tüm deneyler üzerinden ele alınmıştır. Şekil 4.37, Taguchi deney tasarımına göre belirlenen 18 farklı durum (Deney 1 - Deney 18) için hesaplanan bu değerleri sunmaktadır.



Şekil 4.37: Kararlı durumda ortalama ve durma noktası Nusselt sayıları

Grafiksel veriler detaylı incelendiğinde, en düşük durma noktası ve ortalama Nusselt değerlerinin Deney 1, 2 ve 3'te; en yüksek değerlerin ise Deney 16, 17 ve 18'de elde edildiği açıkça görülmektedir. Bu iki grup arasındaki belirgin performans farkının temel nedeni, akış rejimini ve konvektif ısı transferi mekanizmasını doğrudan kontrol eden Reynolds sayısının değişimidir. Düşük performans gösteren ilk üç durumda (Deney 1-3), Reynolds sayısı 2000 seviyesindedir ve akış laminar rejim karakteri sergilemektedir. Laminar akış koşullarında, akışkan tabakaları birbirleri üzerinde düzenli bir şekilde hareket eder ve tabakalar arası karışım minimum düzeyde kalır. Bu durum, ısı transferine karşı en büyük direnci oluşturan termal sınır tabakanın nispeten kalın kalmasına neden olur. Kalın sınır tabaka, yüzeyden akışkana olan ısı geçişini engelleyerek Nusselt sayısının düşük seviyelerde kalmasına yol açar [1-6, 33].

Buna karşılık, yüksek performans gösteren son üç durumda (Deney 16-18), Reynolds sayısı 7000 seviyesine yükselmiş ve akış türbülanslı rejime geçiş yapmıştır. Türbülanslı akışın doğası gereği oluşan kaotik dalgalanmalar ve yüksek enerjili girdaplar, akışkan içerisindeki momentum ve ısı taşınımını büyük ölçüde artırır. Yüksek kinetik enerjiye sahip jet akışı, yüzeye çarptığında termal sınır tabakayı daha etkili bir şekilde parçalar ve inceltir. Sınır tabakanın incilmesi ve yüzey yakınındaki akışkan yenilenme hızının artması, konvektif ısı transferi katsayısını ve dolayısıyla Nusselt sayısını dramatik bir şekilde yükseltir. Sonuç olarak, $Re = 7000$ koşulunda elde edilen yüksek ısı transferi değerleri, artan türbülans şiddeti ve incelen sınır tabaka mekanizmalarının doğrudan bir sonucudur.

Literatürdeki temel teorilere göre, silindir dönme hareketi durma noktası Nusselt sayısını iki ana mekanizma ile değiştirmektedir: (i) Duvar yüzeyindeki bağıl teğetsel hızı değiştirerek (ki bu durum kayma gerilmesini ve sınır tabaka kalınlığını etkiler) ve (ii) durma noktasının konumunu silindir üzerinde kaydırarak. Eğer yüzey, gelen jet akışıyla aynı yönde dönüyorsa (eş yönlü dönme), durma bölgesindeki yerel bağıl hız azalır ve bu da Nusselt sayısında düşüşe neden olur. Ters durumda, yani yüzey jete karşı yönde dönüyorsa (zıt yönlü dönme), duvardaki bağıl hız artar ve Nusselt sayısı yükselir. Ancak, yüzeyin teğetsel hızı jetin merkez hızından çok daha düşük olduğunda bu dönme etkisinin sınırlı kaldığı bilinmektedir [36, 52].

Jet akışlarında durma noktası ısı transferi genellikle $Nu_d Re^m$ şeklinde ölçeklenir (burada m üssü genellikle 0.5 ile 0.8 arasındadır). Şekil 4.37'deki veriler bu ilişkiyi doğrular niteliktedir; Reynolds sayısındaki artış, türbülans şiddetini artırarak hem yerel hem de uzaysal ortalama Nusselt sayılarını önemli ölçüde yükseltmiştir. Sonuç olarak, grafiksel veriler Reynolds sayısının ısı transferi üzerindeki baskın rolünü açıkça ortaya koymaktadır.

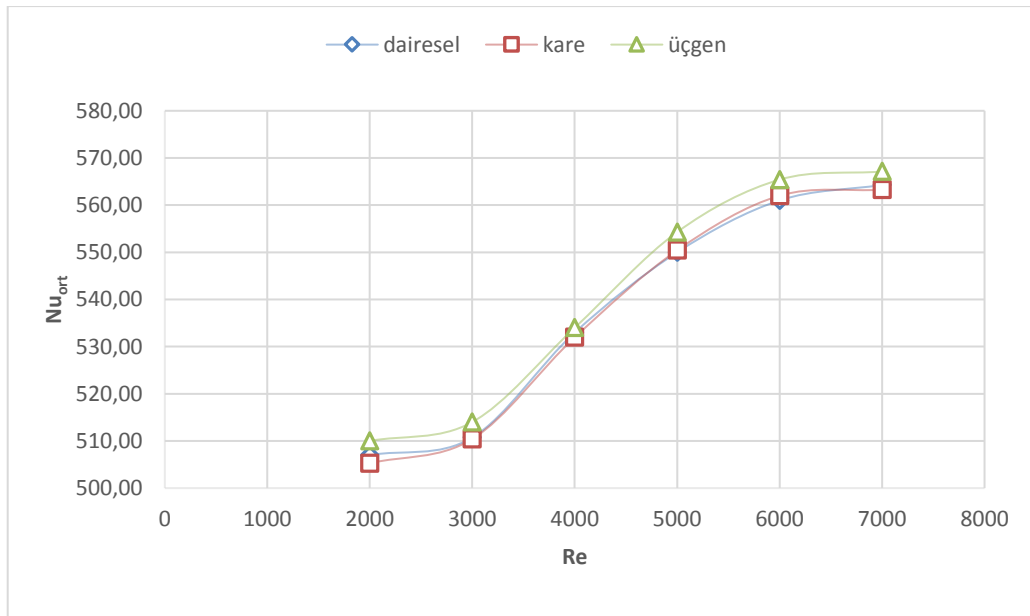
Bununla birlikte, aynı Reynolds sayısına sahip deney grupları (örneğin Deney 16, 17 ve 18) arasındaki küçük varyasyonlar, lüle geometrisi, yüzey sıcaklığı ve jet-yüzey mesafesi gibi diğer parametrelerin de ikincil düzeyde etkili olduğunu göstermektedir. Bu durum, ısı transferi sürecinin hem hidrodinamik (akış hızı) hem de geometrik parametrelere olan hassasiyetini vurgulamaktadır.

4.3 Değişken Parametrelerin Isı Transferi Üzerindeki Etkisileri

Bu bölümde test edilen değişkenlerin (lüle geometrisi, Reynolds sayısı, jet-yüzey mesafesi, dönme hızı ve yüzey sıcaklığı) Nusselt sayısı üzerindeki etkileri akış mekaniği, ısı sınır tabaka gelişimi ve çarpma jetlerinin karakteristik davranışları çerçevesinde detaylandırılmıştır.

4.3.1. Lüle geometrisi ve reynolds sayısının etkisi

Reynolds sayısının 2000'den 7000'e yükseltilmesi, incelenen tüm geometrik yapılarda Nusselt sayısında sürekli bir artış meydana getirmiştir. Bu durum, artan akış hızıyla birlikte yükselen eylemsizlik kuvvetlerinin, yüzeydeki yapışkanlık dirençlerini baskılayarak ısı sınır tabakasını inceltmesiyle açıklanmaktadır. Akış rejimindeki türbülans yoğunluğunun artışı, moleküler iletim yerine türbülanslı taşınımı baskın hale getirerek yüzeyden akışkana enerji geçişini en üst seviyeye çıkarmaktadır.

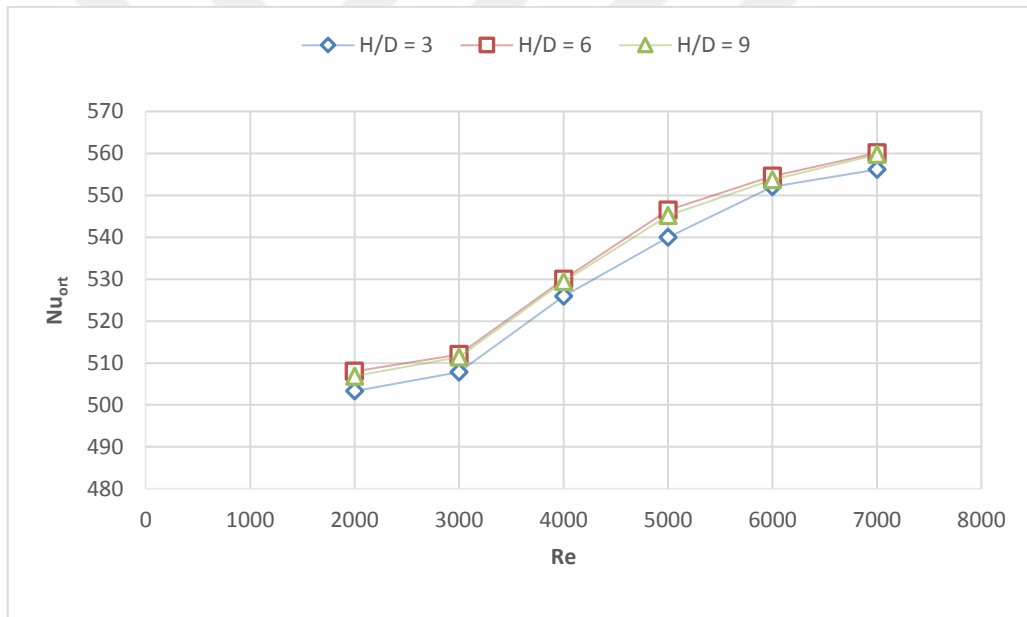


Şekil 4.38: Farklı lüleler için Nu_{ort} - Re değişimi ($H/D_h = 6$, $U_{ds} = 60$ dev/dk, $T_s = 75^\circ\text{C}$).

Lüle geometrileri arasında yapılan karşılaştırmada, üçgen geometrisinin en yüksek ısı performansını sunduğu tespit edilmiştir. Üçgen yapının keskin köşeleri, akışın lüle çıkışında dairesel ve dikdörtgen yapılara oranla daha şiddetli ikincil akışlar ve boyuna girdaplar üretmesine neden olmaktadır. Bu karmaşık akış yapısı, akışın yüzeye çarptığı bölgede türbülans kinetik enerjisini tetiklemekte ve yüzeye olan ısı etkileşim alanını etkin bir şekilde genişletmektedir.

4.3.2. Lüle-yüzey mesafesinin etkisi

Lüle ile çarpma yüzeyi arasındaki boyutsuz mesafe oranı (H/D_h), jetin yüzeye ulaşana kadar maruz kaldığı momentum değişimi ve çevre akışkanla olan etkileşimini doğrudan kontrol etmektedir. Analiz sonuçları, sistemin en yüksek ısı verimliliğe $H/D_h = 6$ oranında ulaştığını kanıtlamaktadır (Şekil 4.39).

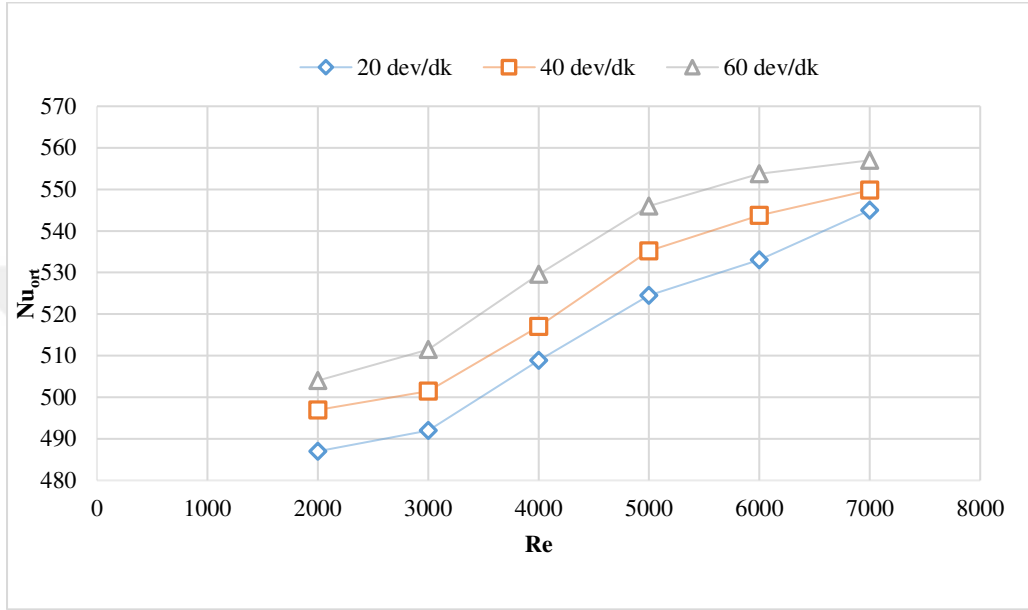


Şekil 4.39: Farklı H/D_h oranları için Nu_{ort} - Re değişimi (Üçgen lüle, $U_{ds} = 60$ dev/dk, $T_s = 75^\circ\text{C}$)

$H/D_h = 3$ gibi yakın mesafelerde akışın çekirdek bölgesinin yüzeye çok yakın olması akışın tam yayılmasına engel olurken; $H/D_h = 9$ gibi uzak mesafelerde jetin çevre akışkan ile etkileşimi sonucu hızında ve çarpma şiddetinde azalmalar meydana gelmektedir. $H/D_h = 6$ oranı, jet akışının yüzeye en yüksek momentum ve en uygun türbülanslı karışım açısıyla nüfuz ettiği optimum mesafe olarak saptanmıştır.

4.3.3. Dönme hızının (devir) etkisi

Sistemin dönme hızının (U_{ds}) 20 dev/dk 'den 60 dev/dk 'ye çıkarılması, ısı transferi üzerinde kuvvetli bir iyileştirici etki yaratmaktadır. Dönme hareketi, jetin yüzeyi tarama sıklığını artırarak, yüzeye bitişik durgun ısı sınır tabakasının sürekli olarak mekanik bozulmaya uğramasını sağlamaktadır (Şekil 4.40).

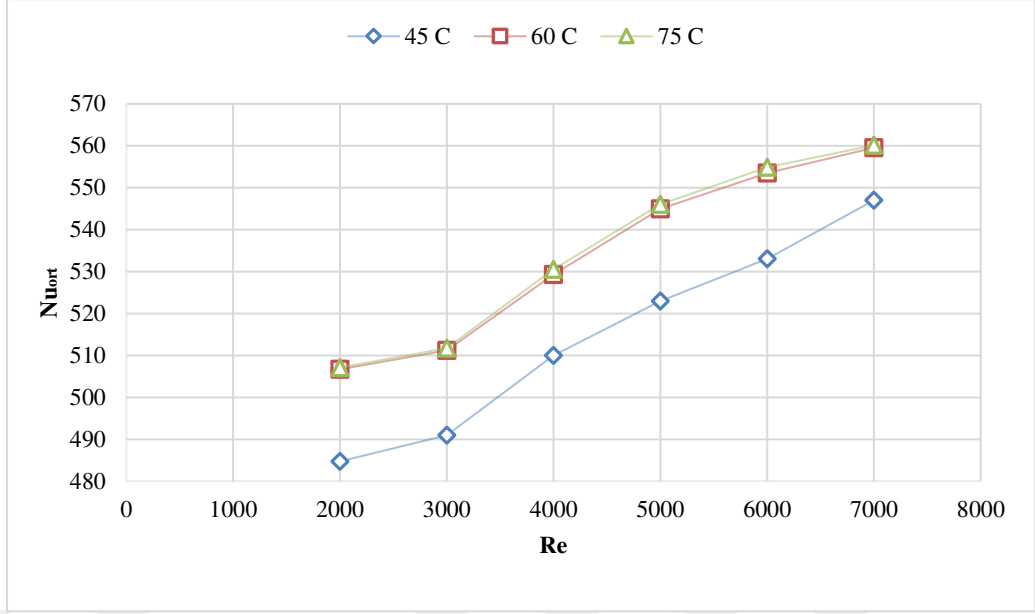


Şekil 4.40: Farklı dönme hızları için Nu_{ort} - Re değişimi (Üçgen lüle, $H/D_h = 3, T_s = 75^\circ\text{C}$)

Artan devir hızı, merkezkaç kuvvetlerin de katkısıyla yüzeydeki akışkanın ışınsal yönde ivmelenmesini sağlar. Bu dinamik süreç, jetin çarptığı durma noktasını periyodik olarak kaydırarak yüzey boyunca daha homojen bir ısı dağılımı oluşturmakta ve taşınım ile ısı transfer katsayısını belirgin şekilde yukarı çekmektedir. Özellikle yüksek Reynolds sayılarında dönme hızı, aktif bir ısı transferi iyileştirme yöntemi olarak kritik önem kazanmaktadır.

4.3.4. Yüzey sıcaklığının etkisi

Yüzey sıcaklığındaki artışın ($T_s = 45^\circ\text{C}$, 60°C ve 75°C) Nusselt sayısı üzerindeki etkisi, akışkanın fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişimlerle ilişkilendirilmektedir (Şekil 4.41). Sıcaklık artışı, akışkanın akışmazlığını (viskozite) düşürerek yüzeydeki akış direncini azaltmakta ve moleküler hareketliliği tetiklemektedir.



Şekil 4.41: Farklı yüzey sıcaklıkları için Nu_{ort} - Re değişimi (Üçgen lüle, $H/D_h = 3$, $U_{ds} = 60$ dev/dk)

Veriler incelendiğinde, $T_s = 45$ °C'den 60 °C'ye geçişte ısı performansında belirgin bir yükseliş gözlemlenirken, $T_s = 60$ °C'den $T_s = 75$ °C'ye geçişte bu artışın doygunluğa yaklaştığı görülmektedir. Bu durum, sıcaklık farkının yarattığı avantajın belirli bir eşikten sonra akışkanın taşınım kapasitesiyle sınırlanmasıyla açıklanabilir.

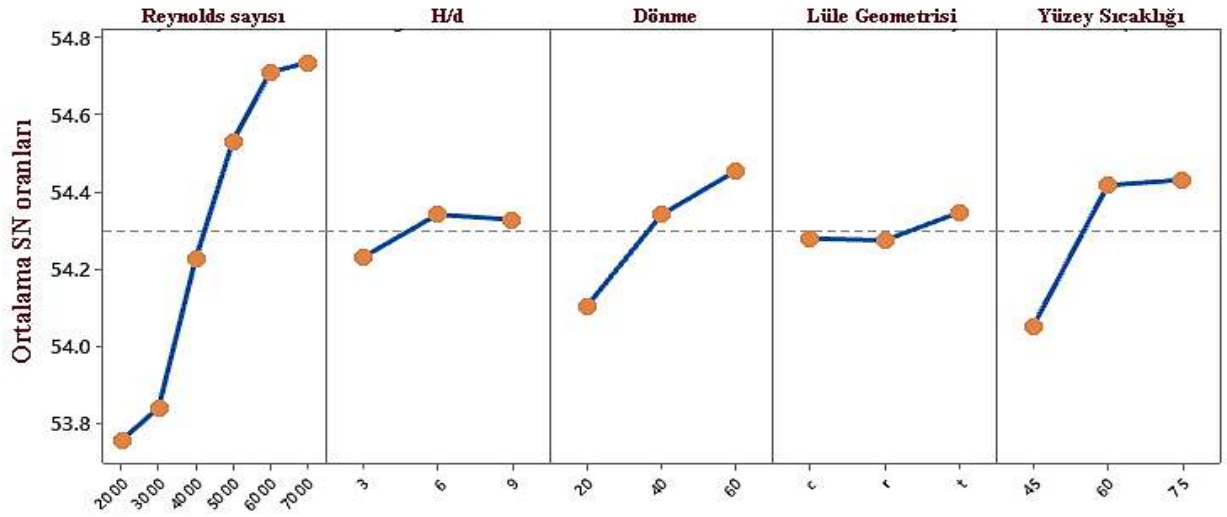
4.4 Varyans Analizi (Anova) Sonuçları

Deneysel çalışmada elde edilen sonuçların güvenilirliğini değerlendirmek ve optimum çalışma koşullarını belirlemek amacıyla Taguchi yöntemi kullanılmıştır. "Daha büyük daha iyidir" (HB) kriterine göre hesaplanan Sinyal/Gürültü (S/N) oranları, sistemin performans kararlılığını göstermektedir. Deney tasarımı sonucunda elde edilen ortalama S/N değerleri Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

Bu değerlerin parametre seviyelerine göre değişimini gösteren ana etki grafiği Şekil 4.42'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde, parametre seviyelerindeki değişimin sistem performansı üzerindeki etkileri açıkça görülmektedir. Optimum seviyeler, en yüksek S/N oranına sahip olan ve performansın maksimize edildiği noktaları temsil etmektedir.

Çizelge 4.1: Nusselt sayıları için ortalama S/N değerleri

Faktörler	Seviyeler					
	1	2	3	4	5	6
A	53,76	53,84	54,23			
B	54,23	54,34	54,33			
C	51,1	54,34	54,46	54,5	54,71	54,74
D	54,28	54,28	54,35			
E	54,05	54,42	54,43			



Şekil 4.42: Ortalama Nusselt sayıları için S/N değerleri

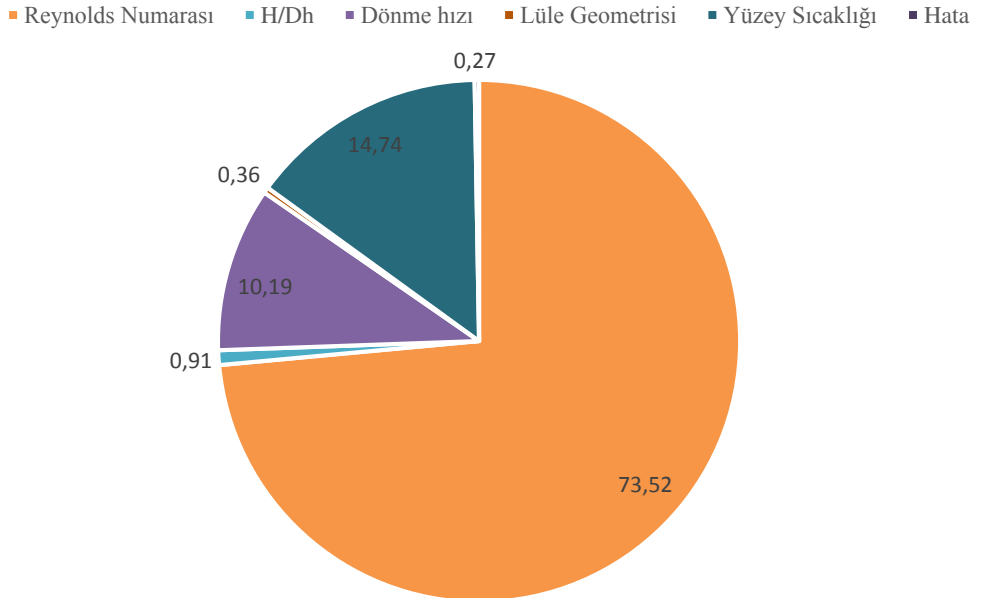
4.4.1. Varyans analizi (anova) ve parametre etkileri

Kontrol faktörlerinin ortalama Nusselt sayısı üzerindeki istatistiksel etkilerini ve katkı oranlarını belirlemek amacıyla Varyans Analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, parametrelerin sistem üzerindeki baskınlık derecelerini sayısal olarak ortaya koymaktadır (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2: Ortalama Nusselt sayıları için ANOVA test sonuçları.

Faktörler	DF	Seg SS	Katkı	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	p- Değeri
A	5	9747,6	73,52	9747,62	1949,52	216,25	0,0001
B	2	120,9	0,91	120,95	60,47	6,71	0,0053
C	2	1351,2	10,19	1351,21	675,6	74,94	0,0011
D	2	48,1	0,36	48,08	24,04	2,67	0,184
E	2	1954	14,74	1953,99	976,99	108,37	0,0004
Hata	4	36,1	0,27	36,06	9,01		
Toplam	17	12,357	100				

ANOVA sonuçlarına göre, ısı transferi performansını etkileyen en önemli faktör Reynolds sayısı olarak belirlenmiştir. Toplam varyasyonun %73,52'sini oluşturan Reynolds sayısı, akış dinamiği ve türbülans yoğunluğu üzerindeki doğrudan etkisiyle ısı transferini domine etmektedir. İkinci en etkili parametre %14,74 katkı oranı ile yüzey sıcaklığı olurken, dönme hızı %10,19'luk bir etkiye sahiptir. Buna karşılık, jet-yüzey mesafesi (%0,91) ve lüle geometrisi (%0,36) gibi geometrik parametrelerin etkileri oldukça sınırlı kalmıştır. Özellikle lüle geometrisinin etkisinin istatistiksel olarak anlamsız çıkması ($p > 0,05$), dönen yüzeyin yarattığı homojenizasyon etkisiyle açıklanmaktadır. Parametrelerin yüzdesel katkı dağılımları Şekil 4.43'de görselleştirilmiştir.



Şekil 4.43: Parametrelerin sonuca olan etkisi

4.3.2. Optimum çalışma koşulları

Taguchi analizi ve S/N oranları dikkate alınarak, ısı transferini maksimize eden optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre optimum konfigürasyon; en yüksek Reynolds sayısı, orta seviye jet-yüzey mesafesi, yüksek dönme hızı ve yüksek yüzey sıcaklığı koşullarında sağlanmaktadır. Belirlenen bu optimum parametreler Çizelge 4.3'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.3: Optimum parametreler

Parametreler	A (Re)	B (H/D_h)	C (U_{ds})	D (Lüle Geo.)	E (T_s)
Seviyeler	6	2	3	3	3

Optimum koşullar ($Re = 7000$, $H/D_h = 6$, $U_{ds} = 60$ dev/dk , $T_s = 75$ °C) altında gerçekleştirilen doğrulama testleri, Taguchi modelinin tahminleri ile deneysel sonuçların yüksek bir uyum içinde olduğunu göstermiştir. Bu durum, uygulanan optimizasyon yaklaşımının güvenilirliğini ve elde edilen bulguların doğruluğunu kanıtlamaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, dönen silindirik yüzeylerin hava jeti çarpması ile soğutulması sürecinde konvektif ısı transferi performansını belirleyen temel parametreler deneysel olarak incelenmiş ve Taguchi optimizasyon tekniği kullanılarak analiz edilmiştir. Reynolds sayısı, yüzey sıcaklığı, dönme hızı, lüle geometrisi ve jet-yüzey mesafesi gibi değişkenlerin sistem üzerindeki etkilerinin irdelendiği bu çalışmada, elde edilen veriler istatistiksel güvenilirlik sınırları içerisinde değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, incelenen parametreler arasında hiyerarşik bir etki düzeyinin varlığını ve ısı transferi mekanizmasının büyük oranda akış dinamiği tarafından kontrol edildiğini açıkça ortaya koymuştur.

Gerçekleştirilen Varyans Analizi sonucunda, ısı transferi performansını etkileyen en baskın faktörün Reynolds sayısı olduğu belirlenmiştir. Toplam varyasyon içerisindeki yüzde 73,52'lik katkı oranıyla sisteme hakim olan Reynolds sayısı, akış rejimini belirleyerek türbülans şiddetini ve sınır tabaka kalınlığını doğrudan kontrol etmektedir. Reynolds sayısındaki artışın, momentum taşınımını güçlendirerek termal sınır tabakayı incelttiği ve bu mekanizma sayesinde yüzeyden gerçekleşen ısı transferini dramatik ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. İstatistiksel analizler de bu etkinin güvenilirlik düzeyinin son derece yüksek olduğunu doğrulamaktadır.

Sistemi etkileyen ikinci önemli parametre ise yüzde 14,74'lük katkı oranı ile yüzey sıcaklığı olarak tespit edilmiştir. Newton'un Soğuma Yasası temelinde beklenen bu sonuç, jet akışkanı ile ısıtılmış yüzey arasındaki sıcaklık farkının artmasının, termal itici gücü yükselterek ısı akısını doğrudan artırdığını göstermektedir. Bununla birlikte, dönen silindir sistemlerine özgü bir parametre olan dönme hızının da yüzde 10,19 oranında bir katkı sağladığı görülmüştür. Silindirin dönme hareketi, yüzey üzerinde oluşturduğu süpürme etkisiyle akışkanın karışımını iyileştirmekte ve sınır tabakanın sürekli yenilenmesine olanak tanımaktadır. Bu çalışmada incelenen devir aralıklarında, dönme hareketinin jet akışını saptırıcı etkisinden ziyade, türbülanslı karışımı destekleyici etkisinin ön plana çıktığı ve ısı transferini olumlu yönde etkilediği anlaşılmıştır.

Çalışmanın literatüre sunduğu en dikkat çekici bulgulardan biri ise lüle geometrisinin etkisi üzerine olmuştur. Sabit yüzeyli çarpma jetlerinde önemli bir parametre olarak bilinen lüle geometrisinin, dönen silindir konfigürasyonunda istatistiksel olarak anlamlı bir fark yaratmadığı ve toplam varyasyona katkısının ihmal edilebilir düzeyde kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, silindirin dönme hareketinin yarattığı uzaysal ve zamansal ortalama alma etkisine

atfedilmektedir. Dönme hareketi, farklı geometrik şekillerin oluşturduğu yerel akış ve soğutma farklılıklarını yüzey üzerinde homojenize ederek geometrinin etkisini sönümlemektedir. Benzer şekilde, jet-yüzey mesafesinin de diğer baskın parametrelerin yanında sınırlı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, Sinyal/Gürültü analizleri ile belirlenen optimum çalışma koşullarının, en yüksek Reynolds sayısı, yüksek yüzey sıcaklığı ve yüksek dönme hızı kombinasyonunda sağlandığı görülmüştür. Doğrulama testleri, Taguchi tabanlı deneysel modelin tahminleri ile gerçek sonuçlar arasında yüksek bir uyum olduğunu kanıtlamış, bu da elde edilen bulguların dönen makine elemanlarının termal yönetim tasarımlarında güvenilir bir referans olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

5.2. Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen bulgular ve mevcut literatür ışığında, konuyla ilgili yapılacak gelecek çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

- **Parametre Aralıklarının Genişletilmesi:** Gelecek çalışmalarda, Reynolds sayısı ve lüle-silindir mesafesi aralıkları genişletilerek, bu parametrelerin ekstrem koşullardaki davranışları incelenmelidir.
- **Hız Etkileşimlerinin İncelenmesi:** Silindirin dönme hızı ile jet çıkış hızı arasındaki etkileşimin (hız oranı) ısı transferi üzerindeki etkilerini netleştirmek amacıyla daha detaylı araştırmalar yapılmalıdır.
- **Termal Gradyan Analizi:** Termal gradyan güdümlü iyileştirmeleri daha iyi anlamak için daha geniş bir yüzey sıcaklığı aralığı araştırılmalıdır.
- **Farklı Akışkanlar ve Çoklu Jetler:** Bu çalışmada benimsenen Taguchi tabanlı sistematik yaklaşım, nanoakışkanlar ve çoklu jet sistemlerini içeren gelecek çalışmalar için bir çerçeve olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M.A., Button, B.L.** A review of heat transfer data for single circular jet impingement, *International Journal of Heat and Fluid Flow*. vol.13 (2), pp.106-115, 1992.
- [2] **Gauntner, James W., Livingood, John N.B., Hrycak, P.** Survey of literature on flow characteristics of a single jet impinging on a flat plate. *NASA Technical Note*. (NASA TN D-5652), 1970.
- [3] **Wroblewski, D.E.** Applied fluid dynamics handbook: R. D. Blevins, Krieger Publishing Company, Florida, 1994.
- [4] **Schlichting, Hermann, J.K.** Boundary layer theory. McGraw-Hill, New York, 1961.
- [5] **Tani, I. ve Komatsu, Y.** Impingement of a round jet on a flat surface, *Applied Mechanics*, vol. 15, pp.672-676, 1966.
- [6] **Giralt, F., Chia, C.J., ve Trass, O.** Characterization of the impingement region in an axisymmetric turbulent jet. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*. vol. 16 (1), pp.21–28, 1977.
- [7] **Incropera, F.P., D.W.** Fundamental of heat and mass transfer, 8th.ed, Wiley, New York, 2001.
- [8] **Rasheed, A., Allauddin, U., Hafiz, M.A., Uzair, M., Verdin, P.G., Siddiqui, Y.H.** Heat transfer and fluid flow characteristics investigation using detached ribs in an axisymmetric impinging jet flow. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. vol. 147, pp. 14517–14537, 2022.
- [9] **Çelik, N.** Optimum lüle şeklinin çarpan jet üzerine etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [10] **Martin, H.** Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces, *Advances in Heat Transfer*, vol. 13, pp. 1–60, 1977.
- [11] **Popiel, C.O., Boguslawski, L.** Effect of flow structure on the heat or mass transfer on a flat plate in impinging round Jet. *Heat and Mass Transfer*. vol. 201 (88), pp. 663–685, 1988.
- [12] **Nasif, G., Barron, R.M., Balachandar, R.** Simulation of jet impingement heat transfer onto a moving disc. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. vol.

80, pp. 539-550, 2015.

- [13] **Shah, S., Kumar, V., Nigam, K.D.P.** Turbulent jet arrays impinging on moving surface: Effect of surface motion and wall confinement on heat transfer, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 204, 109213, 2024.
- [14] **Subba Raju, K. , and Schlünder, E. U.,** Heat transfer between an impinging jet and a continuously moving surface, *Heat and Mass Transfer*, vol.10, pp.131–136, 1977.
- [15] **Huang, P.G.** Numerical prediction of fluid flow and heat transfer under a turbulent impinging slot jet with surface motion and crossflow, *ASME Pap. 1984*, 84-WA/HT-vol. 33, pp.1–8, 1984.
- [16] **Dinu, C.A., Beasley, D.E., Liburdy, J.A.** Heat transfer from a moving plate to a confined impinging jet. *American Society of Mechanical Engineers, Heat Transfer Division, (Publication) HTD*. vol. 357 (4), pp.195-206, 1998.
- [17] **Achari, A.M., Das, M.K.** Conjugate heat transfer study of a turbulent slot jet impinging on a moving plate. *Heat and Mass Transfer*, vol.53(3), pp.1017-1035, 2017.
- [18] **Yang, Y.T. Hao, T.P.** Numerical studies of three turbulent slot jets with and without moving surface. *Acta Mechanica*. vol.136 (1), pp.17-27, 1999.
- [19] **Chattopadhyay, H., Biswas, G., Mitra, N.K.** Heat transfer from a moving surface due to impinging slot jets. *Journal of Heat Transfer*. vol.124 (3), pp.433-440, 2002.
- [20] **Chattopadhyay, H., Saha, S.K.** Simulation of laminar slot jets impinging on a moving surface. *Journal of Heat Transfer*. vol.124 (6), pp. 1049-1055, 2002.
- [21] **Chattopadhyay, H., Saha, S.K.** Turbulent flow and heat transfer from a slot jet impinging on a moving plate. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 24 (5), pp.685-697, 2003.
- [22] **Chattopadhyay, H.** Effect of surface motion on transport processes due to circular impinging jets - A numerical study. *Drying Technology*. vol.24(11), pp.1347-1351, 2006.
- [23] **Kadiyala, P.K., Chattopadhyay, H.** Neuro-genetic optimization of laminar slot jets impinging on a moving surface. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 59, pp.143-147, 2014.

- [24] **Kadiyala, P.K., Chattopadhyay, H.** Numerical simulation of transport phenomena due to array of round jets impinging on hot moving surface. *Drying Technology*, vol. 35 (14), pp.1742-1754, 2017.
- [25] **Kadiyala, P.K., Chattopadhyay, H.** Numerical analysis of heat transfer from a moving surface due to impingement of slot jets. *Heat Transfer Engineering*. vol.39 (2), pp.98-106, 2018.
- [26] **Zumbrunnen, D.A.** Convective heat and mass transfer in the stagnation region of a laminar planar jet impinging on a moving surface. *Journal of Heat Transfer*. vol.113 (3), pp.563-570, 1991.
- [27] **D. Benmouhoub and A. Mataoui,** Heat transfer control of an impinging inclined slot jets on a moving wall, *Heat Transfer-Asian Research*, vol. 44, no. 6, pp. 568–584, 2015.
- [28] **D. Benmouhoub and A. Mataoui,** Computation of heat transfer of a plane turbulent jet impinging a moving plate, *International Journal of Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, vol. 12, no. 1, pp. 16–29, 2011.
- [29] **Seraj, M. M., & Gadala, M. S.** Hydrodynamics of long jet impingement. In C. A. Brebbia, M. S. Gadala, & J. H. L. V. (Eds.), *Advances in Fluid Mechanics VII*, WIT Press. pp. 361–370, 2006.
- [30] **F. V. Barbosa, S. F. C. F. Teixeira, and J. C. F. Teixeira,** Convection from multiple air jet impingement - a review, *Applied Thermal Engineering*, vol. 218, p. 119307, 2023.
- [31] **Behera, V. ve Rathore, S.** Numerical investigation of turbulent offset jet flow over a moving flat plate using low-Reynolds number turbulence model. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. vol.13, pp.1–32, 2021.
- [32] **Baghel, K., Zahra, & Lee, J.** Free surface planar liquid jet impingement on a moving surface: interfacial flow and heat transfer characteristics. *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 36(11), pp. 5537–5549, 2022.
- [33] **N. Çelik,** Değişik geometrili sıcak cisimlere çarpan jetin iki boyutlu etüdü, Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği A.B.D., Fırat Üniv. Fen Bilimleri Enst., Elazığ, 2000.
- [34] **Vandsburger, U., Ding, C.** The spatial modulation of a forced triangular jet.

- Experiments in fluids*. vol.18 (4), pp. 239–248, 1995.
- [35] **Quinn, W.R.** Mean flow and turbulence measurements in a triangular turbulent free jet. *International journal of heat and fluid flow*. vol.11 (3), pp. 220–224, 1990.
 - [36] **Schadow, K. C., Gutmark, E., Parr, D. M., Wilson, K. J.** Selective control of flow coherence in triangular jets. *Experiments in Fluids*. vol.6 (2), pp.129–135, 1988.
 - [37] **Parham, K., Esmaeilzadeh, E., Atikol, U., Aldabbagh, L.B.Y.** A numerical study of turbulent opposed impinging jets issuing from triangular nozzles with different geometries. *Heat and Mass Transfer*. vol. 47. pp.427–437, 2011.
 - [38] **Gao, N., Sun, H., Ewing, D.** Heat transfer to impinging round jets with triangular tabs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. vol.46 (14). pp.2557–2569, 2003.
 - [39] **Mi, J., Nathan, G.J.** Statistical properties of turbulent free jets issuing from nine differently-shaped nozzles. *Flow, turbulence and combustion*. vol.84, pp.583–606, 2010.
 - [40] **Quinn, W.R.** Near field measurements in an equilateral triangular turbulent free jet. *AIAA journal*. vol.43 (12), pp. 2574–2585, 2005.
 - [41] **D. Singh, B. Premachandran, and S. Kohli,** Numerical simulation of the jet impingement cooling of a circular cylinder, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 64(2), pp. 153–185, 2013.
 - [42] **Y. Lou et al.,** Experimental and numerical investigations on jet impingement heat transfer with different nozzles and enhanced surfaces, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 61, pp. 104954, 2024.
 - [43] **M. Wae-hayee, K. Yeranee, I. Piya, Y. Rao, and C. Nuntadusit,** Heat transfer correlation of impinging jet array from pipe nozzle under fully developed flow, *Applied Thermal Engineering*, vol. 154, pp. 37–45, 2019.
 - [44] **Z. Hemmami and A. Hammami,** Improving a rotating steel milling tool cooling by an air jet impingement flow, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 83(5), pp. 467–477, 2023.
 - [45] **Sheng-Ju Wang, Zhe-Hang Shi, Tian-Liang Yao, Wei-Feng Li, Qing-Guo Lin;** Experimental and numerical study of liquid film by jet impingement: Based on

contact angle model. *Physics of Fluids*, vol.35 (8), 085104, 2023.

- [46] **F. Selimefendigil and H. F. Öztop**, Mixed convection of nanofluids in a three dimensional cavity with two adiabatic inner rotating cylinders, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 117, pp. 331–343, 2018.
- [47] **Ma, C., Zhang, X., Feng, Z., Ma, S., & Ma, H.** Transient experimental study on cooling performance of a radial turbine with impingement cooling in rotating state. *Aerospace Science and Technology*, vol.151, 109321, 2024.
- [48] **J. C. Lallave, M. M. Rahman, and A. Kumar**, Numerical analysis of heat transfer on a rotating disk surface under confined liquid jet impingement, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 28(4), pp. 720–734, 2007.
- [49] **H. Li and H. Deng**, Heat transfer in a rotating impingement cooling channel with concave target surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 216, p. 124559, 2023..
- [50] **T.-M. Jeng, S.-C. Tzeng, and R. Xu**, Heat transfer characteristics of a rotating cylinder with a lateral air impinging jet, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 70, pp. 235–249, 2014.
- [51] **H. Ma, D. Ma, and N. Yang**, Convective mass transfer from a horizontal rotating cylinder in a slot air jet flow, *Front. Energy Power Eng. China*, vol. 3(3), pp. 289–296, 2009.
- [52] **H. Ma et al.**, Convective mass transfer from a horizontal rotating large-diameter cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55, no. 5–6, pp. 1419–1422, 2012.
- [53] **Kıstak C.**, Pürüzlü ve hareketli ısıtılmış plakaya çarpan jetin deneysel incelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2023.
- [54] **Kıstak C., Taşkiran A., Çelik N.** Experimental analysis of transient and steady-state heat transfer from an impinging jet to a moving plate. *Heat and Mass Transfer*, vol.60, pp.1713 - 1729, 2024.
- [55] **Kline, S.J.** Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mech. Eng.* vol.75, pp.3–8, 1963.
- [56] **Peng, X.F., Peterson, G.P.** Convective heat transfer and flow friction for water flow

- in microchannel structures. *International journal of heat and mass transfer*. vol.39 (12), pp.2599–2608, 1996.
- [57] **Montgomery, D.C.** Design and analysis of experiments. 5th baskı Wiley, New York, 1997.
- [58] **Tosun, N., Cogun, C., Tosun, G.** A study on kerf and material removal rate in wire electrical discharge machining based on Taguchi method. *Journal of materials processing technology*. vol.152 (3), pp.316–322, 2004.
- [59] **Montgomery, D.C.** Design and analysis of experiments. 5th baskı Wiley, New York, 1997.
- [60] **Ross PJ** Taguchi techniques for quality engineering. 5th ed. McGraw-Hill, New York, 1996.
- [61] **Roy, R. ve St, C.** Design of experiments using the taguchi approach 16 steps to product and process improvement. Wiley, New York, 2022.
- [62] **Cirillo, F., Isopi, G.M.** Glass tempering heat transfer coefficient evaluation and air jets parameter optimization. *Applied Thermal Engineering*. vol. 29(5-6), pp.1173-1179, 2009.
- [63] **Ayadi, B., Selimefendigil, F., Alresheedi, F., Kolsi, L., Aich, W., Ben Said, L.,** Jet impingement cooling of a rotating hot circular cylinder with hybrid nanofluid under multiple magnetic field effects, *Mathematics*, vol. 9(21), pp. 2697, 2021.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : G ng r Pusat

  RENİM DURUMU:

- **Lisans :** 2011, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans :** 2016, Fırat Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Enerji Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2012- (devam ediyor) Türkiye'nin iç makineleri  reticisi, Hidromek firmasında Satış Sonrası Hizmetler yöneticisi olarak çalışmaktayım.