

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OPTİMUM LÜLE ŞEKLİNİN ÇARPAN JET ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Nevin ÇELİK

Tez Yöneticisi
Yrd. Doç. Dr. Haydar EREN

DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2006

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OPTİMUM LÜLE ŞEKLİNİN ÇARPAN JET ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Nevin ÇELİK

Doktora Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu tez, tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Haydar EREN

Üye: Prof.Dr. Yaşar BİÇER

Üye: Prof. Dr. Cengiz YILDIZ

Üye: Doç.Dr. Kadir BİLEN

Üye: Doç.Dr. Aydın DURMUŞ

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

2006

TEŞEKKÜR

Bu uzun ve emekli doktora çalışması süresince maddi manevi varlıklarıyla bana güç verip, katkıda bulunan insanlara teşekkürü borç bilirim. Başta; tez danışmanlığımı yaparak tez konumun belirlenmesi ve yürütülmesinde yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Haydar EREN'e, tez izleme jürimde yer alan Prof. Dr. Yaşar BİÇER'e ve Doç. Dr. Aydın DURMUŞ'a, bölümümüzün her türlü imkânlarından faydalanmamızı sağlayan Bölüm Başkanımız Prod. Dr. Cengiz YILDIZ'a ve Rektörlüğü döneminde üniversitemizin maddi kaynaklarından yararlanmamı sağlayan Prof. Dr. Ahmet Feyzi BİNGÖL'e teşekkür etmek istiyorum. Ayrıca tez çalışmam boyunca fikirlerine başvurduğum Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden Doç. Dr. Kadir BİLEN'e ve İTÜ Uçak Mühendisliği Bölümünden Yrd. Doç. Dr. Hayri ACAR'a teşekkür ediyorum.

Gerek deney düzeneğinin hazırlanması esnasında, gerek deneylerin yürütülmesinde ve değerlendirilmesinde hep yanımda olan Arş.Gör.Dr. İrfan KURTBAŞ'a ve Arş.Gör. Oğuz YAKUT'a, teşekkürler ediyorum. Doktora çalışmam boyunca tüm sıkıntılı anlarımda bana destek veren Filiz, Neslihan, Aynur, Figen, Şeyba ve Emre'ye ve de son olarak sevgili aileme çok ama çok teşekkür ediyorum.

Nevin ÇELİK

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER.....	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLolar LİSTESİ.....	XVII
EKLER LİSTESİ.....	XVIII
SİMGELER LİSTESİ.....	XXII
ÖZET.....	XXIV
ABSTRACT.....	XXVI
1. GİRİŞ.....	1
2. JETLERİN GENEL YAPISI VE LİTERATÜRDEKİ YERİ.....	3
2.1. Çarpan Jetlerin Hidrodinamik ve Geometrik Yapısı.....	3
2.1.1. Çarpan Jetle Soğutma Sistemlerinin Sınıflandırılması.....	4
2.1.2. Çarpan Yarık (Slot) Jet ve Jet Dizileri.....	7
2.1.3. Çarpan Jetlerde Isı ve/veya Kütle Geçişi.....	9
2.2. Çarpan Jetlerde Isı Transferi ve Akış Dinamiği Konusunun Literatürdeki Yeri.....	12
2.2.1. Düz Dairesel Jetler.....	12
2.3. Eş-Eksenli Jetler.....	19
2.3.1. Eş-Eksenli Jetlerin Hidrodinamik Yapısı.....	19
2.3.2. Çarpan Eş-Eksenli Jetin Yapısı.....	24
3. DENEYSEL ÇALIŞMANIN TANITILMASI.....	28
3.1. Deney Düzenekinin Tanıtılması.....	28
3.1.1. Kompresör te Debi Ölçme Sistemi.....	28
3.1.2. Lüleler.....	30
3.1.3. Hız Ölçüm Yöntemi: Sıcak-Tel Anemometresi.....	31
3.1.4. Hareket Mekanizması.....	32
3.1.5. Sıcaklık Ölçümü.....	34
3.1.6. Data Toplama ve Kaydetme.....	36
3.1.7. Çarpma Levhası.....	36
3.2. Deneysel Çalışmanın Yürütülmesi.....	36
4. DENEYSEL VERİLERİN HESAPLANMA YÖNTEMİ.....	38
4.1. Düz Dairesel Lülelerde Yerel Nu Sayısının Hesaplanması.....	38
4.1.1. Düşey Levhadan Yoğuşmayla Elde Edilen Isı Transferi Miktarı.....	38
4.1.2. Düşey Levhadan Doğal Taşınım ile Kaybedilen Isı Transferi Miktarı.....	40

4.1.3. Düşey Levhadan Radyasyonla Kaybedilen Isı Transferi Miktarı.....	42
4.1.4. Yerel Isı Transfer Katsayısının ve Yerel Nu Sayısının Bulunması.....	42
4.2. Düz Dairesel Lülelerde Ortalama Nusselt Sayısının Hesaplanması.....	43
4.3. Düz Dairesel Lülelerde Reynolds Sayısının Hesaplanması.....	43
4.4. Düz Dairesel Lülelerde Türbülans Şiddetinin Hesaplanması.....	43
4.5. Eş Eksenli Lülelerde Re ve Nu Sayılarının Hesaplanması.....	44
5. ÇARPAN DÜZ DAİRESEL JETLERDE ISI TRANSFERİ DENEY SONUÇLARI..	45
5.1. $d=13.8$ mm Çaplı Jetin Düz Yüzeye Çarpmasıyla Oluşan Isı Transferi Dağılımı.....	45
5.2. $d=7.9, 10.8$ ve 23.1 mm Çaplı Düz Dairesel Lülelerde Isı Transferi Dağılımı.....	59
6. DÜZ DAİRESEL LÜLELERE AİT AKIŞ DİNAMİĞİ DENEY SONUÇLARI.....	70
6.1. $d= 13.8$ mm için Serbest Jet Akışı.....	71
6.1.1. Ortalama Hızın Değişimi.....	71
6.1.2. Türbülans Şiddeti.....	74
6.2. $d=13.8$ mm Çaplı Lüle için Çarpma Levhasına Yakın Mesafe Ölçümleri.....	77
6.2.1. Ortalama Hız Değerleri.....	78
6.2.2. Levha Önünde Ölçülen Türbülans Şiddeti.....	83
6.3. Lüle Çapının Değiştirilmesinin Akış Dinamiği Üzerindeki Etkileri.....	87
6.3.1. Farklı Çaptaki Dairesel Lülelerde Serbest Jet Akışı.....	88
6.3.2. Farklı Çaptaki Dairesel Lülelerde Çarpma Levhası Önünde Akış Dinamiği.....	91
7. EŞ EKSENLİ JETLERDE ISI TRANSFERİ KARAKTERİSTİĞİ.....	96
7.1. $d/D=0.7$ Oranındaki Lülenin Nu Sayısı Dağılımı.....	96
7.2. $d/D=0.58$ Oranındaki Lülenin Nu Sayısı Dağılımı.....	109
7.3. $d/D=0.45$ Oranındaki Lülenin Nu Sayısı Dağılımı.....	121
8. EŞ-EKSENLİ JETLERDE AKIŞ DİNAMİĞİ.....	132
8.1. Eş Eksenli Jetlerde Ortalama Hız Değişimi.....	132
8.1.1. $d/D=0.7$ Çap Oranlı Jet.....	132
8.1.2. $d/D=0.58$ Çap Oranlı Jet.....	137
8.1.3. $d/D=0.45$ Çap Oranlı Jet.....	140
8.2. Türbülans Şiddeti Ölçümleri.....	145
8.2.1. $d/D=0.7$ Lüle Tipi için Türbülans Şiddeti Hesaplamaları.....	145
8.2.2. $d/D=0.58$ Lüle Tipi için Türbülans Şiddeti Hesaplamaları.....	149
8.2.3. $d/D=0.45$ Lüle Tipi için Türbülans Şiddeti Hesaplamaları.....	152
9. İSTATİSTİKSEL REGRESYON ve BELİRSİZLİK ANALİZİ.....	156
9.1. İstatistiksel Regresyon.....	156
9.2. DeneySEL Hatalar ve Belirsizlik Analizi.....	163

9.2.1. Belirsizlik Analizinin Tanımı ve Önemi.....	163
9.2.2. Bu Çalışmadaki Toplam Belirsizliklerin Tespiti.....	166
SONUÇLAR.....	172
KAYNAKLAR.....	175
ÖZÇEÇMİŞ.....	182
EK- A. DÜZ DAİRESEL LÜLELERDE YEREL NU SAYILARINA AİT GRAFİKLER	
EK-B. DÜZ DAİRESEL LÜLELERE AİT AKIM KARAKTERİSTİKLERİ	
B.1. Çarpma Bölgesinde Yapılan Akış Dinamiği Testleri	
B.2. Serbest Jetin Akış Dinamiği Testleri (Çarpma Levhası Yok)	
EK-C TRAVERS MEKANİZMASINI ÇALIŞTIRAN PROGRAM	
EK-D DENEY DÜZENEGİ FOTOĞRAFLARI	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No:

Şekil 2.1. Tek bir yuvarlak veya yarıklı gaz jetinin yüzeye çarpması.....	4
Şekil 2.2. a) Sınırsız serbest yüzey jeti, b) sınırsız dalmış jet	5
Şekil 2.3. Yarı sınırlandırılmış, daldırılmış jet.....	7
Şekil 2.4. Bir dizi yarıklı jetin yüzeye çarpması.....	8
Şekil 2.5. Jet tipleri.....	8
Şekil 2.6. Büyük-Küçük lüle-levha aralıkları için Nusselt ayısının genel dağılımı.....	9
Şekil 2.7. Yanma odalarında kullanılan eş-eksenli bir jetin genel görünüşü.....	19
Şekil 2.8. Eş-eksenli bir jette akımların karışımı.....	20
Şekil 2.9. Merkezi dairesel jetin olmaması durumunda annular jetin gösterilişi.....	21
Şekil 2.10. Annular jetle yapılmış bir çalışmada hız profilinin görünüşü.....	23
Şekil 3.1. Deney düzeneğinin genel görünüşü.....	29
Şekil 3.2. Lüle şekilleri ve ebatları.....	30
Şekil 3.3. Sıcak tel anemometre prensibiyle çalışan hız ölçer.....	31
Şekil 3.4. Anemometrenin problara bağlantısı ve ebatları.....	32
Şekil 3.5. Travers mekanizması ve bağlantıları.....	33
Şekil 3.6. Mekanizmayı çalıştıran elektronik kontrol devresi.....	33
Şekil 3.7. Mekanizmanın levha üzerinde izlediği yol ve koordinat düzlemi.....	34
Şekil 3.8. Düz dairesel jet deneylerinde sıcaklık ölçüm noktaları ve koordinat düzlemi..	35
Şekil 3.9. Eş-eksenli jet deneylerinde sıcaklık ölçüm noktaları ve koordinat düzlemi....	35
Şekil 5.1. $d=13.8$ mm, $h/d=4$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	45
Şekil 5.2. $d=13.8$ mm, $h/d=4$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	46
Şekil 5.3. $d=13.8$ mm, $h/d=4$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	46
Şekil 5.4. $d=13.8$ mm, $h/d=4$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	47
Şekil 5.5. $d=13.8$ mm, $h/d=4$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	47
Şekil 5.6. $d=13.8$ mm, $h/d=6$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	48
Şekil 5.7. $d=13.8$ mm, $h/d=6$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	48
Şekil 5.8. $d=13.8$ mm, $h/d=6$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	49
Şekil 5.9. $d=13.8$ mm, $h/d=6$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	49
Şekil 5.10. $d=13.8$ mm, $h/d=6$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	50
Şekil 5.11. $d=13.8$ mm, $h/d=8$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	50
Şekil 5.12. $d=13.8$ mm, $h/d=8$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	51
Şekil 5.13. $d=13.8$ mm, $h/d=8$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	51

Şekil 5.14. $d=13.8$ mm, $h/d=8$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	52
Şekil 5.15. $d=13.8$ mm, $h/d=8$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	52
Şekil 5.16. $d=13.8$ mm, $h/d=10$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	53
Şekil 5.17. $d=13.8$ mm, $h/d=10$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	53
Şekil 5.18. $d=13.8$ mm, $h/d=10$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	54
Şekil 5.19. $d=13.8$ mm, $h/d=10$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	54
Şekil 5.20. $d=13.8$ mm, $h/d=10$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	55
Şekil 5.21. $d=13.8$ mm, $h/d=12$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	55
Şekil 5.22. $d=13.8$ mm, $h/d=12$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	56
Şekil 5.23. $d=13.8$ mm, $h/d=12$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	56
Şekil 5.24. $d=13.8$ mm, $h/d=12$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	57
Şekil 5.25. $d=13.8$ mm, $h/d=12$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı.....	57
Şekil 5.26. $d=13.8$ mm için Re sayısı ile durma noktası Nu sayısı değişimi.....	58
Şekil 5.27. $d=13.8$ mm için Re sayısı ile ortalama Nu sayısı arasındaki değişim.....	59
Şekil 5.28. $d=7.9$ mm için Re sayısı ile durma noktası ve ortalama Nu sayısı arasındaki değişim.....	64
Şekil 5.29. $d=10.8$ mm düz dairesel lüle için Re sayısı ile durma noktası Nusselt sayısı arasındaki değişim.....	65
Şekil 5.30. $d=23.1$ mm düz dairesel lüle için Re sayısı ile durma noktası Nusselt sayısı arasındaki değişim.....	66
Şekil 5.31. $Re=5000$ 'de Re sayısı ile durma noktası ve ortalama Nu sayısının h/d ile değişimi.....	67
Şekil 5.32. $Re=10000$ 'de Re sayısı ile durma noktası ve ortalama Nu sayısının h/d ile değişimi.....	68
Şekil 5.33. $Re=15000$ 'de Re sayısı ile durma noktası ve ortalama Nu sayısının h/d ile değişimi.....	68
Şekil 5.34. $Re=20000$ 'de Re sayısı ile durma noktası ve ortalama Nu sayısının h/d ile değişimi.....	69
Şekil 5.35. $Re=25000$ 'de Re sayısı ile durma noktası ve ortalama Nu sayısının h/d ile değişimi.....	69
Şekil 6.1. Akış dinamiği deneylerinde kullanılan koordinat düzlemi.....	70
Şekil 6.2. $d=13.8$ mm çaplı lülede $Re=5000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi.....	71
Şekil 6.3. $d=13.8$ mm çaplı lülede $Re=10000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi.....	72
Şekil 6.4. $d=13.8$ mm çaplı lülede $Re=15000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi.....	72
Şekil 6.5. $d=13.8$ mm çaplı lülede $Re=20000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi.....	72

Şekil 6.6. $d=13.8$ mm çaplı lülede $Re=25000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi.....	73
Şekil 6.7. $d=13.8$ mm için serbest jette merkez hattı hızın jet çıkış hızına oranı.....	73
Şekil 6.8. $d=13.8$ mm çaplı lülede $Re=5000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi....	74
Şekil 6.9. $d=13.8$ mm çaplı lülede $Re=10000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi...	75
Şekil 6.10. $d=13.8$ mm çaplı lülede $Re=15000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi.	75
Şekil 6.11. $d=13.8$ mm çaplı lülede $Re=20000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi.	76
Şekil 6.12. $d=13.8$ mm çaplı lülede $Re=25000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi.	76
Şekil 6.13. $d=13.8$ mm için serbest jette türbülans şiddetinin jet çıkış hızına oranı.....	77
Şekil 6.14. $d=13.8$ mm, $Re=5000$ iken h/d ile ortalama hızın değişimi.....	79
Şekil 6.15. $d=13.8$ mm, $Re=10000$ iken h/d ile ortalama hızın değişimi.....	80
Şekil 6.16. $d=13.8$ mm, $Re=15000$ iken h/d ile ortalama hızın değişimi.....	81
Şekil 6.17. $d=13.8$ mm, $Re=20000$ iken h/d ile ortalama hızın değişimi.....	81
Şekil 6.18. $d=13.8$ mm, $Re=25000$ iken h/d ile ortalama hızın değişimi.....	82
Şekil 6.19. $d=13.8$ mm için durma noktasında merkez hattı hızın jet çıkış hızına oranı	83
Şekil 6.20. $d=13.8$ mm, $Re=5000$ iken h/d ile türbülans şiddetinin değişimi.....	84
Şekil 6.21. $d=13.8$ mm, $Re=10000$ iken h/d ile türbülans şiddetinin değişimi.....	85
Şekil 6.22. $d=13.8$ mm, $Re=15000$ iken h/d ile türbülans şiddetinin değişimi.....	85
Şekil 6.23. $d=13.8$ mm, $Re=20000$ iken h/d ile türbülans şiddetinin değişimi.....	86
Şekil 6.24. $d=13.8$ mm, $Re=25000$ iken h/d ile türbülans şiddetinin değişimi.....	86
Şekil 6.25. $d=13.8$ mm için durma noktasında ölçülen boyutsuz türbülans şiddetinin jet çıkış hızına oranı.....	87
Şekil 6.26. Tüm lüle çapları için serbest jet durumunda merkez hattı hızın jet çıkış hızına oranı.....	89
Şekil 6.27. Tüm lüle çapları için serbest jet durumunda türbülans şiddetinin jet çıkış hızına oranı.....	90
Şekil 6.28. Jet çıkışında $Re=25000$ 'de dört farklı çaptaki lülenin ortalama hız değişimi..	90
Şekil 6.29. $Z^*=8$ 'de, $Re=25000$ iken dört farklı çaptaki lülenin ortalama hız değişimi....	91
Şekil 6.30. $d=7.9$ mm için durma noktasında merkez hattı hızın jet çıkış hızına oranı.....	93
Şekil 6.31. $d=10.8$ mm için durma noktasında merkez hattı hızın jet çıkış hızına oranı...	93
Şekil 6.32. $d=23.1$ mm için durma noktasında merkez hattı hızın jet çıkış hızına oranı...	94
Şekil 6.33. $d=7.9$ mm için durma noktasında ölçülen boyutsuz türbülans şiddetinin jet çıkış hızına oranı.....	94
Şekil 6.34. $d=10.8$ mm için durma noktasında ölçülen boyutsuz türbülans şiddetinin jet çıkış hızına oranı.....	95

Şekil 6.35. $d=23.1$ mm için durma noktasında ölçülen boyutsuz türbülans şiddetinin jet çıkış hızına oranı.....	95
Şekil 7.1. $d/D=0.7$, $h/D=4$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	96
Şekil 7.2. $d/D=0.7$, $h/D=4$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	97
Şekil 7.3. $d/D=0.7$, $h/D=4$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	98
Şekil 7.4. $d/D=0.7$, $h/D=4$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	98
Şekil 7.5. $d/D=0.7$, $h/D=4$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	98
Şekil 7.6. $d/D=0.7$, $h/D=6$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	99
Şekil 7.7. $d/D=0.7$, $h/D=6$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	99
Şekil 7.8. $d/D=0.7$, $h/D=6$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	100
Şekil 7.9. $d/D=0.7$, $h/D=6$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	100
Şekil 7.10. $d/D=0.7$, $h/D=6$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	100
Şekil 7.11. $d/D=0.7$, $h/D=8$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	101
Şekil 7.12. $d/D=0.7$, $h/D=8$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	102
Şekil 7.13. $d/D=0.7$, $h/D=8$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	102
Şekil 7.14. $d/D=0.7$, $h/D=8$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	102
Şekil 7.15. $d/D=0.7$, $h/D=8$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	103
Şekil 7.16. $d/D=0.7$, $h/D=10$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	103

Şekil 7.17. $d/D=0.7$, $h/D=10$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	104
Şekil 7.18. $d/D=0.7$, $h/D=10$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	104
Şekil 7.19. $d/D=0.7$, $h/D=10$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı	104
Şekil 7.20. $d/D=0.7$, $h/D=10$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı	105
Şekil 7.21. $d/D=0.7$, $h/D=12$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı	105
Şekil 7.22. $d/D=0.7$, $h/D=12$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı	106
Şekil 7.23. $d/D=0.7$, $h/D=12$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı	106
Şekil 7.24. $d/D=0.7$, $h/D=12$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı	106
Şekil 7.25. $d/D=0.7$, $h/D=12$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı	107
Şekil 7.26. a) $d/D=0.7$, b) $D=13.8$ mm çaplı lülelerin her bir ölçüm noktasında hesaplanan Nu sayıları.....	108
Şekil 7.27. $d/D=0.7$ için durma noktası ve ortalama Nu sayılarının Re sayılarına göre değişimi.....	108
Şekil 7.28. $d/D=0.7$ nin düz lülenin ortalama ve durma noktası Nu sayıları ile kıyaslanması.....	109
Şekil 7.29. $d/D=0.58$, $h/D=4$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	110
Şekil 7.30. $d/D=0.58$, $h/D=4$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	111
Şekil 7.31. $d/D=0.58$, $h/D=4$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	111
Şekil 7.32. $d/D=0.58$, $h/D=4$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	111
Şekil 7.33. $d/D=0.58$, $h/D=4$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	112

Şekil 7.34. $d/D=0.58$, $h/D=6$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	112
Şekil 7.35. $d/D=0.58$, $h/D=6$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	112
Şekil 7.36. $d/D=0.58$, $h/D=6$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	113
Şekil 7.37. $d/D=0.58$, $h/D=6$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	113
Şekil 7.38. $d/D=0.58$, $h/D=6$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	113
Şekil 7.39. $d/D=0.58$, $h/D=8$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	114
Şekil 7.40. $d/D=0.58$, $h/D=8$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	114
Şekil 7.41. $d/D=0.58$, $h/D=8$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	114
Şekil 7.42. $d/D=0.58$, $h/D=8$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	115
Şekil 7.43. $d/D=0.58$, $h/D=8$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	115
Şekil 7.44. $d/D=0.58$, $h/D=10$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	115
Şekil 7.45. $d/D=0.58$, $h/D=10$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	116
Şekil 7.46. $d/D=0.58$, $h/D=10$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	116
Şekil 7.47. $d/D=0.58$, $h/D=10$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	116
Şekil 7.48. $d/D=0.58$, $h/D=10$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	117
Şekil 7.49. $d/D=0.58$, $h/D=12$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	117
Şekil 7.50. $d/D=0.58$, $h/D=12$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	117

Şekil 7.51. $d/D=0.58$, $h/D=12$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	118
Şekil 7.52. $d/D=0.58$, $h/D=12$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	118
Şekil 7.53. $d/D=0.58$, $h/D=12$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	118
Şekil 7.54. $d/D=0.58$ için durma noktası ile ortalama Nu sayılarının kıyası.....	119
Şekil 7.55. $d/D=0.58$ çap oranındaki lülenin düz dairesel lüleyle kıyaslanması.....	120
Şekil 7.56. $d/D=58$ ile $d/D=0.78$ tip lülelerin ortalama ve durma noktası Nu sayılarının kıyaslanması.....	120
Şekil 7.57. $d/D=0.45$, $h/D=4$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	122
Şekil 7.58. $d/D=0.45$, $h/D=4$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	122
Şekil 7.59. $d/D=0.45$, $h/D=4$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	122
Şekil 7.60. $d/D=0.45$, $h/D=4$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	123
Şekil 7.61. $d/D=0.45$, $h/D=4$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	123
Şekil 7.62. $d/D=0.45$, $h/D=6$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	123
Şekil 7.63. $d/D=0.45$, $h/D=6$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	124
Şekil 7.63. $d/D=0.45$, $h/D=6$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	124
Şekil 7.63. $d/D=0.45$, $h/D=6$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	124
Şekil 7.66. $d/D=0.45$, $h/D=6$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	125
Şekil 7.67. $d/D=0.45$, $h/D=8$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	125
Şekil 7.68. $d/D=0.45$, $h/D=8$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	125

Şekil 7.69. $d/D=0.45$, $h/D=8$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	126
Şekil 7.70. $d/D=0.45$, $h/D=8$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	126
Şekil 7.71. $d/D=0.45$, $h/D=8$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	126
Şekil 7.72. $d/D=0.45$, $h/D=10$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	127
Şekil 7.73. $d/D=0.45$, $h/D=10$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	127
Şekil 7.74. $d/D=0.45$, $h/D=10$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	127
Şekil 7.75. $d/D=0.45$, $h/D=10$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	128
Şekil 7.76. $d/D=0.45$, $h/D=10$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	128
Şekil 7.77. $d/D=0.45$, $h/D=12$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	128
Şekil 7.78. $d/D=0.45$, $h/D=12$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	129
Şekil 7.79. $d/D=0.45$, $h/D=12$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	129
Şekil 7.80. $d/D=0.45$, $h/D=12$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	129
Şekil 7.81. $d/D=0.45$, $h/D=12$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı.....	130
Şekil 7.82. $d/D=0.45$ için durma noktası ve ortalama Nu sayılarının kıyası.....	130
Şekil 7.83. Tüm lüle çeşitlerinin birbirleriyle kıyaslanması.....	131
Şekil 8.1. $d/D=0.7$ ve $Re=5000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi.....	132
Şekil 8.2. $d/D=0.7$ ve $Re=10000$ için Z^* ile ortalama hız değişimi.....	133
Şekil 8.3. $d/D=0.7$ ve $Re=15000$ için Z^* ile ortalama hız değişimi.....	134
Şekil 8.4. $d/D=0.7$ ve $Re=20000$ için Z^* ile ortalama hız değişimi.....	134
Şekil 8.5. $d/D=0.7$ ve $Re=25000$ için Z^* ile ortalama hız değişimi.....	135
Şekil 8.6. Düz dairesel lülenin ortalama hız değişimi, $Re=5000$	136
Şekil 8.7. $d/D=0.7$ çap oranlı eş eksenli lülenin ortalama hız değişimi, $Re=5000$	136

Şekil 8.8. $d/D=0.58$ ve Re 5000 için Z^* ile ortalama hızın değişimi.....	137
Şekil 8.9. $d/D=0.58$ ve Re 10000 için Z^* ile ortalama hızın değişimi.....	138
Şekil 8.10. $d/D=0.58$ ve Re 15000 için Z^* ile ortalama hızın değişimi.....	138
Şekil 8.11. $d/D=0.58$ ve Re 20000 için Z^* ile ortalama hızın değişimi.....	139
Şekil 8.12. $d/D=0.58$ ve Re 25000 için Z^* ile ortalama hızın değişimi.....	139
Şekil 8.13. $d/D=0.58$ çap oranlı eş eksenli lülenin ortalama hız değişimi, $Re=5000$	140
Şekil 8.14. $d/D=0.45$ ve Re 5000 için Z^* ile ortalama hızın değişimi.....	141
Şekil 8.15. $d/D=0.45$ ve Re 10000 için Z^* ile ortalama hızın değişimi.....	142
Şekil 8.16. $d/D=0.45$ ve Re 15000 için Z^* ile ortalama hızın değişimi.....	142
Şekil 8.17. $d/D=0.45$ ve Re 20000 için Z^* ile ortalama hızın değişimi.....	142
Şekil 8.18. $d/D=0.45$ ve Re 25000 için Z^* ile ortalama hızın değişimi.....	143
Şekil 8.19. $d/D=0.45$ çap oranlı eş eksenli lülenin ortalama hız değişimi, $Re=5000$	143
Şekil 8.20. Eksenel lülelerle düz dairesel lülenin kıyaslanması, $Re=5000$, $Z^*=0.23$	144
Şekil 8.21. Eksenel lülelerle düz dairesel lülenin kıyaslanması, $Re=5000$, $Z^*=8$	144
Şekil 8.22. $d/D=0.7$ ve Re 5000 için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi.....	146
Şekil 8.23. $d/D=0.7$ ve Re 10000 için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi.....	147
Şekil 8.24. $d/D=0.7$ ve Re 15000 için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi.....	147
Şekil 8.25. $d/D=0.7$ ve Re 20000 için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi.....	148
Şekil 8.26. $d/D=0.7$ ve Re 25000 için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi.....	148
Şekil 8.27. $d/D=0.7$ ile $D=13.8$ mm'lik lüle tiplerinin kıyaslanması, $Re=5000$, $Z^*=0.23$	149
Şekil 8.28. $d/D=0.58$ ve Re 5000 için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi.....	150
Şekil 8.29. $d/D=0.58$ ve Re 10000 için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi.....	150
Şekil 8.30. $d/D=0.58$ ve Re 15000 için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi.....	151
Şekil 8.31. $d/D=0.58$ ve Re 20000 için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi.....	151
Şekil 8.32. $d/D=0.58$ ve Re 25000 için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi.....	151
Şekil 8.33. $d/D=0.45$ ve Re 5000 için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi.....	152
Şekil 8.34. $d/D=0.45$ ve Re 10000 için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi.....	152
Şekil 8.35. $d/D=0.45$ ve Re 15000 için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi.....	153
Şekil 8.36. $d/D=0.45$ ve Re 20000 için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi.....	153
Şekil 8.37. $d/D=0.45$ ve Re 25000 için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi.....	153
Şekil 8.38. Tüm eş eksenli lülelerin ve düz dairesel lülenin birbiriyle kıyaslanması, $Re=5000$, $Z^*=0.23$	154
Şekil 8.39. Tüm eş eksenli lülelerin ve düz dairesel lülenin birbiriyle kıyaslanması, $Re=25000$, $Z^*=8$	155

Şekil 9.1. Yerel Nu sayısı regresyonunda kullanılan koordinatların tanımlanması.....	157
Şekil 9.2 $d=7.9$ mm için öngörülen Nu sayısı bağıntısı ile bulunan sonuçların deneysel sonuçlarla kıyası	158
Şekil 9.3. $d=10.8$ mm için öngörülen Nu sayısı bağıntısı ile bulunan sonuçların deneysel sonuçlarla kıyası.....	159
Şekil 9.4. $d=13.8$ mm için öngörülen Nu sayısı bağıntısı ile bulunan sonuçların deneysel sonuçlarla kıyası.....	159
Şekil 9.5. $d=23.1$ mm için öngörülen Nu sayısı bağıntısı ile bulunan sonuçların deneysel sonuçlarla kıyası.....	160
Şekil 9.6. $d/D=0.7$ için öngörülen Nu sayısı bağıntısı ile bulunan sonuçların deneysel sonuçlarla kıyası.....	162
Şekil 9.7. $d/D=0.58$ için öngörülen Nu sayısı bağıntısı ile bulunan sonuçların deneysel sonuçlarla kıyası.....	162
Şekil 9.8. $d/D=0.45$ için öngörülen Nu sayısı bağıntısı ile bulunan sonuçların deneysel sonuçlarla kıyası.....	163

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa No:

Tablo 1. Dairesel jetlerle ilgili olarak literatürde yapılan çalışmalar.....	18
Tablo 2. Eş-eksenli jetlerle ilgili olarak literatürde yapılan çalışmalar.....	27
Tablo 3. Tüm lülelerde hesaplanan durma noktası Nu sayıları	60
Tablo 4. Tüm lülelerde hesaplanan ortalama Nu sayıları	61
Tablo 5. Çeşitli lüle çapları için Re sayısının 5000'den sırasıyla 10000 15000 20000 ve 25000'e çıkartılmasıyla durma noktası Nusselt sayısında (Nu_0) görülen artış miktarı.....	62
Tablo 6. Çeşitli lüle çapları için durma noktasında hesaplanan Nusselt sayısı (Nu_0) ile en uç nokta arasında hesaplanan yerel Nusselt sayısı arasındaki azalma oranı	63
Tablo 7. $d=7.9$ mm çaplı lüle için h/d mesafesinin artışının durma noktasında ölçülen hıza etkisi.....	92
Tablo 8. Re sayısının 5000'den sırasıyla 10000 15000 20000 ve 25000'e çıkartılmasıyla durma noktası Nusselt sayısında (Nu_0) görülen artış miktarı.....	110
Tablo 9. Çeşitli lüle çapları için durma noktasında hesaplanan Nusselt sayısı (Nu_0) ile en uç nokta arasında hesaplanan yerel Nusselt sayısı arasındaki azalma oranı.....	110
Tablo 10. Re sayısının 5000'den sırasıyla 10000 15000 20000 ve 25000'e çıkartılmasıyla durma noktası Nusselt sayısında (Nu_0) görülen artış miktarı.....	121
Tablo 11. Çeşitli lüle çapları için durma noktasında hesaplanan Nusselt sayısı (Nu_0) ile en uç nokta arasında hesaplanan yerel Nusselt sayısı arasındaki azalma oranı.....	121
Tablo 12. $d/D=0.7$, $Re=5000$, için hesaplanan u/U_j değerlerinden bir kesit.....	133
Tablo 13. $d/D=0.58$, $Re=5000$ için hesaplanan u/U_j değerlerinden bir kesit.....	137
Tablo 14. $d/D=0.45$, $Re=5000$ için hesaplanan u/U_j değerlerinden bir kesit.....	141
Tablo 15. Düz dairesel lülelerin yerel, ortalama ve durma noktası Nu sayıları için bulunan korelasyon katsayıları.....	157
Tablo 16. Eş-eksenli lülelerin yerel, ortalama ve durma noktası Nu sayıları için bulunan korelasyon katsayıları.....	161

EKLER LİSTESİ

- Şekil A. 1.** $d=7.9$ mm, $h/d=4$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 2.** $d=7.9$ mm, $h/d=4$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 3.** $d=7.9$ mm, $h/d=4$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 4.** $d=7.9$ mm, $h/d=4$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 5.** $d=7.9$ mm, $h/d=4$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 6.** $d=7.9$ mm, $h/d=6$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 7.** $d=7.9$ mm, $h/d=6$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 8.** $d=7.9$ mm, $h/d=6$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 9.** $d=7.9$ mm, $h/d=6$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 10.** $d=7.9$ mm, $h/d=6$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 11.** $d=7.9$ mm, $h/d=8$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 12.** $d=7.9$ mm, $h/d=8$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 13.** $d=7.9$ mm, $h/d=8$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 14.** $d=7.9$ mm, $h/d=8$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 15.** $d=7.9$ mm, $h/d=8$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 16.** $d=7.9$ mm, $h/d=10$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 17.** $d=7.9$ mm, $h/d=10$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 18.** $d=7.9$ mm, $h/d=10$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 19.** $d=7.9$ mm, $h/d=10$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 20.** $d=7.9$ mm, $h/d=10$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 21.** $d=7.9$ mm, $h/d=10$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 22.** $d=7.9$ mm, $h/d=10$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 23.** $d=7.9$ mm, $h/d=10$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 24.** $d=7.9$ mm, $h/d=10$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 25.** $d=7.9$ mm, $h/d=10$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 26.** $d=10.8$ mm, $h/d=4$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 27.** $d=10.8$ mm, $h/d=4$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 28.** $d=10.8$ mm, $h/d=4$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 29.** $d=10.8$ mm, $h/d=4$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 30.** $d=10.8$ mm, $h/d=4$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 31.** $d=10.8$ mm, $h/d=6$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 32.** $d=10.8$ mm, $h/d=6$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 33.** $d=10.8$ mm, $h/d=6$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
- Şekil A. 34.** $d=10.8$ mm, $h/d=6$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

Şekil A. 35. $d=10.8$ mm, $h/d=6$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 36. $d=10.8$ mm, $h/d=8$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 37. $d=10.8$ mm, $h/d=8$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 38. $d=10.8$ mm, $h/d=8$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 39. $d=10.8$ mm, $h/d=8$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 40. $d=10.8$ mm, $h/d=8$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 41. $d=10.8$ mm, $h/d=10$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 42. $d=10.8$ mm, $h/d=10$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 43. $d=10.8$ mm, $h/d=10$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 44. $d=10.8$ mm, $h/d=10$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 45. $d=10.8$ mm, $h/d=10$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 46. $d=10.8$ mm, $h/d=12$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 47. $d=10.8$ mm, $h/d=12$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 48. $d=10.8$ mm, $h/d=12$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 49. $d=10.8$ mm, $h/d=12$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 50. $d=10.8$ mm, $h/d=12$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 51. $d=23.1$ mm, $h/d=4$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 52. $d=23.1$ mm, $h/d=4$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 53. $d=23.1$ mm, $h/d=4$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 54. $d=23.1$ mm, $h/d=4$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 55. $d=23.1$ mm, $h/d=4$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 56. $d=23.1$ mm, $h/d=6$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 57. $d=23.1$ mm, $h/d=6$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 58. $d=23.1$ mm, $h/d=6$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 59. $d=23.1$ mm, $h/d=6$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 60. $d=23.1$ mm, $h/d=6$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 61. $d=23.1$ mm, $h/d=8$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 62. $d=23.1$ mm, $h/d=8$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 63. $d=23.1$ mm, $h/d=8$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 64. $d=23.1$ mm, $h/d=8$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 65. $d=23.1$ mm, $h/d=8$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 66. $d=23.1$ mm, $h/d=10$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 67. $d=23.1$ mm, $h/d=10$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 68. $d=23.1$ mm, $h/d=10$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 69. $d=23.1$ mm, $h/d=10$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

Şekil A. 70. $d=23.1$ mm, $h/d=10$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 71. $d=23.1$ mm, $h/d=12$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 72. $d=23.1$ mm, $h/d=12$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 73. $d=23.1$ mm, $h/d=12$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 74. $d=23.1$ mm, $h/d=12$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil A. 75. $d=23.1$ mm, $h/d=12$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı
Şekil B.1. $d=7.9$ mm, $Re=5000$ iken h/d ile ortalama hızın değişimi
Şekil B. 2. $d=7.9$ mm, $Re=10000$ iken h/d ile ortalama hızın değişimi
Şekil B. 3. $d=7.9$ mm, $Re=15000$ iken h/d ile ortalama hızın değişimi
Şekil B. 4. $d=7.9$ mm, $Re=20000$ iken h/d ile ortalama hızın değişimi
Şekil B. 5. $d=7.9$ mm, $Re=25000$ iken h/d ile ortalama hızın değişimi
Şekil B. 6. $d=7.9$ mm, $Re=5000$ iken h/d ile türbülans şiddetinin değişimi
Şekil B. 7. $d=7.9$ mm, $Re=10000$ iken h/d ile türbülans şiddetinin değişimi
Şekil B. 8. $d=7.9$ mm, $Re=15000$ iken h/d ile türbülans şiddetinin değişimi
Şekil B. 9. $d=7.9$ mm, $Re=20000$ iken h/d ile türbülans şiddetinin değişimi
Şekil B. 10. $d=7.9$ mm, $Re=25000$ iken h/d ile türbülans şiddetinin değişimi
Şekil B. 11. $d=10.8$ mm, $Re=5000$ iken h/d ortalama hızın değişimi
Şekil B. 12. $d=10.8$ mm, $Re=10000$ iken h/d ortalama hızın değişimi
Şekil B. 13. $d=10.8$ mm, $Re=15000$ iken h/d ortalama hızın değişimi
Şekil B. 14. $d=10.8$ mm, $Re=20000$ iken h/d ortalama hızın değişimi
Şekil B. 15. $d=10.8$ mm, $Re=25000$ iken h/d ortalama hızın değişimi
Şekil B. 16. $d=10.8$ mm, $Re=5000$ iken h/d türbülans şiddetinin değişimi
Şekil B. 17. $d=10.8$ mm, $Re=10000$ iken h/d türbülans şiddetinin değişimi
Şekil B. 18. $d=10.8$ mm, $Re=15000$ iken h/d türbülans şiddetinin değişimi
Şekil B. 19. $d=10.8$ mm, $Re=20000$ iken h/d türbülans şiddetinin değişimi
Şekil B. 20. $d=10.8$ mm, $Re=25000$ iken h/d türbülans şiddetinin değişimi
Şekil B. 21. $d=23.1$ mm, $Re=5000$ iken h/d ortalama hızın değişimi
Şekil B.22. $d=23.1$ mm, $Re=10000$ iken h/d ortalama hızın değişimi
Şekil B. 23. $d=23.1$ mm, $Re=15000$ iken h/d ortalama hızın değişimi
Şekil B.24 $d=23.1$ mm, $Re=20000$ iken h/d ortalama hızın değişimi
Şekil B. 25. $d=23.1$ mm, $Re=25000$ iken h/d ortalama hızın değişimi
Şekil B. 26. $d=23.1$ mm, $Re=5000$ iken h/d türbülans şiddetinin değişimi
Şekil B.27. $d=23.1$ mm, $Re=10000$ iken h/d türbülans şiddeti değişimi
Şekil B. 28. $d=23.1$ mm, $Re=15000$ iken h/d türbülans şiddeti değişimi
Şekil B. 29. $d=23.1$ mm, $Re=20000$ iken h/d türbülans şiddeti değişimi

Şekil B. 30. $d=23.1$ mm, $Re=25000$ iken h/d türbülans şiddeti değişimi

Şekil B. 31. $d=7.9$ mm çaplı düz lülede $Re=5000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi/s

Şekil B. 32. $d=7.9$ mm çaplı düz lülede $Re=10000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi/s

Şekil B. 33. $d=7.9$ mm çaplı düz lülede $Re=15000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi

Şekil B. 34. $d=7.9$ mm çaplı düz lülede $Re=20000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi

Şekil B. 35. $d=7.9$ mm çaplı düz lülede $Re=25000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi

Şekil B. 36. $d=7.9$ mm çaplı düz lülede $Re=5000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi,

Şekil B.37. $d=7.9$ mm çaplı düz lülede $Re=10000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi

Şekil B.38. $d=7.9$ mm çaplı düz lülede $Re=15000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi

Şekil B. 39. $d=7.9$ mm çaplı düz lülede $Re=20000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi

Şekil B. 40. $d=7.9$ mm çaplı düz lülede $Re=25000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi

Şekil B. 41. $d=10.8$ mm çaplı düz lülede $Re=5000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi,

Şekil B. 42. $d=10.8$ mm çaplı düz lülede $Re=10000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi,

Şekil B. 43. $d=10.8$ mm çaplı düz lülede $Re=15000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi,

Şekil B.44. $d=10.8$ mm çaplı düz lülede $Re=20000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi,

Şekil B. 45. $d=10.8$ mm çaplı düz lülede $Re=25000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi,

Şekil B. 46. $d=10.8$ mm çaplı düz lülede $Re=5000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi,

Şekil B.47. $d=10.8$ mm çaplı düz lülede $Re=10000$ için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi,

Şekil B. 48. $d=10.8$ mm çaplı düz lülede $Re=15000$ için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi,

Şekil B. 49. $d=10.8$ mm çaplı düz lülede $Re=20000$ için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi,

Şekil B. 50. $d=10.8$ mm çaplı düz lülede $Re=25000$ için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi,

Şekil B. 51. $d=23.1$ mm çaplı düz lülede $Re=5000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi

Şekil B. 52. $d=23.1$ mm çaplı düz lülede $Re=10000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi

Şekil B.53. $d=23.1$ mm çaplı düz lülede $Re=15000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi

Şekil B. 54. $d=23.1$ mm çaplı düz lülede $Re=20000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi

Şekil B. 55. $d=23.1$ mm çaplı düz lülede $Re=25000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi

Şekil B. 56. $d=23.1$ mm çaplı düz lülede $Re=5000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi,

Şekil B. 57. $d=23.1$ mm çaplı düz lülede $Re=10000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi,

Şekil B. 58. $d=23.1$ mm çaplı düz lülede $Re=15000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi,

Şekil B. 59. $d=23.1$ mm çaplı düz lülede $Re=20000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi,

Şekil B. 60. $d=23.1$ mm çaplı düz lülede $Re=25000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi,

Resim D.1. Data toplayıcı ana ünitesi

Resim D.2. Data toplayıcıya bağlanan sıcaklık ölçüm noktaları

Resim D.3. Jet akımının kaynağı, kompresör

Resim D.4. Çarpma levhası, buhar kazanı, ve hareket mekanizması

SİMGELER LİSTESİ

A	Alan, (m ²)
C _p	Özgöl ısı, (J/kg°C)
d	Lüle çapı, (m)
D _i	Eş eksenli lülede dış borunun iç çapı, (mm)
d _d	Eş eksenli lülede iç borunun dış çapı, (mm)
d/D	Eş eksenli lülede çap oranı; d _d / D _i şeklinde hesaplanır. İndis yazımından kaçınmak için bu şekilde kullanılmıştır
g	Yerçekimi ivmesi, (m/s ²)
Gr	Grashof sayısı, (-)
h	Lüle levha arası mesafe, (m)
h _y	Yoğuşma sonucu elde edilen ortalama ısı transfer katsayısı, (W/m ² °C)
h _{yemel}	Taşınilma ısı transfer katsayısı, (W/m ² °C)
h _{fg}	Gizli buharlaşma ısısı, (J/kg)
Ja	Jacob sayısı, (-)
k _{hava}	Havanın ısı iletim katsayısı (W/m°C)
L	Levha yüksekliği, (m)
Nu	Yemel Nu sayısı, (-)
Nu _d	Doğal taşınilma elde edilen Nu sayısı, (-)
Nu ₀	Durma noktası Nu sayısı, (-)
Nu _{ort}	Ortalama Nu sayısı, (-)
Pr	Prandtl sayısı, (-)
Q _y	Yoğuşmayla elde edilen toplam ısı, (W)
Q _{net}	Net ısı miktarı, (W)
Q _{kay}	Kayıp ısı miktarı, (W)
Q _{rad}	Radyasyonla kaybedilen ısı miktarı, (W)
Ra	Rayleigh sayısı, (-)
Re	Reynolds sayısı, (-)
T _f	Film sıcaklığı, (°C)
T _{jet}	Jet çıkış sıcaklığı, (°C)
T _s	Yüzeyde yoğuşma sonucu ölçülen sabit sıcaklık, (°C)
T _{sat}	1 atm basınçta doymuş buhar sıcaklığı, (°C)
T _w	Yüzeyde her bir referans ölçüm noktasında ölçülen sıcaklık, (°C)
T _∞	Ortam sıcaklığı, (°C)

u	Her bir referans ölçüm noktasında ölçülen ortalama hız, (m/s)
u_a	Her bir referans ölçüm noktasında anlık olarak ölçülen hız, (m/s)
u'	Çalkantı miktarı, $(u_a - u)$ (m/s)
U_m	Merkez hattı hızı, (m/s)
U_j	Jet çıkış hızı, (m/s)
Tu	Boyutsuz türbülans miktarı, $Tu = \sqrt{u'^2} / U_j$, (m/s)
$\dot{V}$	Hacimsel debi, (m ³ /s)
w	Levha genişliği, (m)
X^*	Levha üzerinde yatay mesafede her bir hız ölçüm noktası arasında kalan mesafenin lüle çapına oranı, $X^* = x/d$
Y^*	Levha üzerinde düşey mesafede her bir hız ölçüm noktası arasında kalan mesafenin lüle çapına oranı, $Y^* = y/d$
Z^*	Lüle ile prob arasındaki mesafenin lüle çapına oranı, $Z^* = h/d$
α	Isıl difüzyon katsayısı, (m ² /s)
β	Isıl genleşme katsayısı, (1/K)
ε	Isı neşretme katsayısı, (-)
μ	Dinamik viskozite, (kg/ms)
ν	Kinematik viskozite (m ² /s)
ρ	Yoğunluk, (kg/m ³)
σ	Stefan-Boltzman sabiti (W/m ² K ⁴)
Üst indisler	
m_{1-2-3}	Ampirik bağıntıdaki Re sayısı üssü
n_{1-2-3}	Ampirik bağıntıdaki h/d üssü
k_1	Ampirik bağıntıdaki $(1+r/R+\cos\phi)$ üssü
Alt indisler	
a	Anlık
i	İçteki lüle
j	Jet
l	Sıvı hal
m	Merkez hattı
ort	Ortalama
∞	Ortam
0	Durma noktası ve annular halka

ÖZET

Doktora Tezi

OPTİMUM LÜLE ŞEKLİNİN ÇARPAN JET ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Nevin ÇELİK

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

2006, Sayfa: 182

Bu tezde, çarpan jetlerde optimum lüle (nozül) şeklini belirlemek amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada lüle şekli olarak farklı çaplarda düz dairesel tip lüleler ve eş eksenli lüleler kullanılmıştır. Düz dairesel lüleler iç çapları $d=7.9, 10.8, 13.8$ ve 23.1 mm olan düz dikişsiz alüminyum borulardır. Eş eksenli lüle tipinde; dışta 13.8 mm iç çapındaki düz dairesel boru mevcuttur, içte ise dış çapı $9.8, 8$ ve 6.2 mm olan dairesel borular ana borunun merkeziyle çakışacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu yedi farklı lülenin her biri, ısıtılmış düz bir plakaya çarptırıldığında oluşan ısı transferi, boyutsuz Nusselt sayısı cinsinden elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan çarpma levhası, içerisinden buhar geçirilen ince bir kanalın ön yüzeyidir. Böylece sabit sıcaklık sınır şartı sağlanmıştır.

Bu lülelerin çarpma olmadan, yani serbest jet ortamındaki akış karakteristiği (ortalama hız ve türbülans şiddeti) hassas ölçümlü bir sıcak tel anemometre ile tespit edilmiştir. Ayrıca düz dairesel lülelerin levhaya çarpma olması durumunda, çarpma levhasına yakın alanda hız ve türbülans şiddeti değerleri tespit edilerek çarpma bölgesi akımı incelenmiştir (yalnızca dört dairesel lüle kullanılmıştır, eş-eksenliler değil). Hem hız değerleri hem de sıcaklık değerleri bilgisayar kontrolü bir data toplayıcısıyla ölçülmüş ve kaydedilmiştir.

Çalışmada elde edilen dataların belirsizlik analizi yapıldığı gibi, bu datalardan istatistiksel regresyon analiziyle ampirik bağıntılar elde edilmiştir.

Lüle çapının çarpan jetle soğutma olayında çok önemli bir parametre olduğu görülmüştür. Aynı Re sayısı değerinde, lüle çapını değiştirmek hız ve türbülans değerini etkilediğinden levha yüzeyi üzerindeki soğuma karakterini de değiştirmiştir.

Özellikle eş-merkezli jetlerin bir yüzeye çarpmasında yüzeyin mevcut durumunda ölçüm zorlukları nedeniyle yüzey üzerinde akış karakteristiği ölçümü ilgili literatürde pek rastlanılmamıştır. Bu çalışma ilgili alanda söz konusu eksikliği doldurmaya yöneliktir. Eş-eksenli lülelerde, iç içe geçen iki borunun iç/dış çap oranının, dolayısıyla da bu kesitlerden geçen akış hızı oranlarının soğuma üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: çarpan jet, eş eksenli jet, dairesel jet, ısı transferi, akış dinamiği

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF OPTIMUM NOZZLE TYPE ON THE IMPINGING JETS

Nevin ÇELİK

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

2006, Page: 182

In this thesis, an experimental work is performed in order to determine optimum nozzle type in impinging jets. As nozzle type, circular nozzles with various diameters and coaxial nozzles are used. The circular nozzles are the circular aluminum pipes having 7.9, 10.8, 13.8 and 23.1 mm inner diameter value. And as the co-axial jet; outer of the jet there is a pipe of 13.8 mm inner diameter, and the pipes which have 9.8, 8 and 6.2 mm are located through the centerline of this principal pipe. The gained heat transfer, after each of these 7 different nozzles had been impinged to a heated flat plate, and calculated in the term of dimensionless Nusselt number. The impingement plate is the front side of a channel, in which water vapor is passed. Hence, a constant temperature boundary condition is supplied.

The flow characteristic of these jets (mean flow and turbulent intensity) without impinging, namely free jet, is obtained by a highly sensitive hot-wire anemometer. And also the mean flow and turbulent intensity on near field of impingement plate is obtained while only the circular jet flow is impinging on the target plate (four circular nozzles are used, not the co axial ones). Both the velocities and temperatures are measured and recorded by a computer aided data logger device.

Not only the uncertainty analysis of the measured data is performed, but also the empirical correlations are obtained by the help of statistical regression analysis. And finally, the founded correlations are compared to literature, and the validity of them is discussed.

At the result it has been seen that, the diameter of the nozzle is an important parameter at the cooling pheromone of impinging jets. For all nozzle types, at the same Re value, due to

changing the diameter of the nozzle would cause an effect on velocity and turbulent intensity, the cooling characteristic was affected. Especially it is difficult to make accurate measurements on the heated plate subjected to a co-axial jet flow; there hasn't been more detailed paper in the literature. Hence, the results of this work will assist to fill this cavity. In this work it has been seen that, the velocity ratio of co-axial flow has a great important effect on cooling.

Key Words: impinging jet, co axial jet, circular or round jet, heat transfer, flow dynamics

1. GİRİŞ

Değişen geometriler, dizayn parametreleri ve termal sınır şartları beraberinde değişik soğutma tekniklerini gündeme getirmiştir. Bu parametrelerin etraflıca değerlendirilerek birbirleriyle olan ilişkilerinin incelenmesi ve nihayetinde optimum soğutma tekniğinin belirlenmesi kuşkusuz önemli bir mühendislik konusudur. Endüstride yüksek soğutma oranı sağlayan optimum ısı yönetim tekniklerinin başında jetle soğutma tekniği gelir. Bu yöntemde katı yüzeyler akışkan jetleri vasıtası ile soğutulur. Böylece, minimum akış miktarı ile çok yüksek oranlarda ısı transferi gerçekleştirilebilir. Jetle soğutma sistemleri gaz türbinlerinde uzun zamandır kullanılan ve kabul görmüş bir sistem olup, jet motorlu modern uçaklarda yüksek sıcaklıklara sahip yanma gazlarının ısıttığı türbin kanatlarının soğutulması, ayrıca cam levhaların temperlenmesi, tekstil ve kâğıt ürünlerinin boyanması ve kurutulması, elektronik devrelerin soğutulması gibi birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır.

Bir yüzeye dik olarak çarpan bir gaz jeti veya böyle bir jet dizisi, taşınım ile ısıtma, soğutma veya kurutma katsayılarının artırılması için kullanılabilir. Jet çarpması akışkan ile yüzey arasında yüksek yerel ısı transfer katsayısı elde edilmesinde kullanılmakta olup, ısı transferinde önemli derecede artışlar elde edildiğinden enerji tasarrufu da sağlamaktadır.

Çarpan jet, bir lüleden çıkan akışkanın yüzeye çarptırılması ile elde edilir ve ısı/kütle transferinin artırılması için genellikle türbülanslı jet çarpmaları kullanılır. Maksimum değerde ısı/kütle transferi için çarpan jetin türbülans seviyesinin ne olacağı, lülenin yüzey merkezinden hangi uzaklığa yerleştirileceği, lüle açısının ne olacağı önemli problemlerdir. Ayrıca çarpan jetler oluşturulurken lülelerin şekli (tek, çok sıralı, uzun, dar, yarı, iki boyutlu vs..) boyutu, yüksekliği, lüleler arası mesafe, çarptırılan akışkanın hızı, sıcaklığı, yoğunluğu, yüzey üzerine çarpma şekli (dönerli, açılı, eğik, dik, vs...) transfer olayını etkileyen parametrelerdir.

Bu çalışmada çarpan jetlerin ısı transferi etkileri ve akış dinamiği deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada dairesel düz tip ve eş eksenli jetler kullanılmıştır. Bu jetlerle düz bir ısıtılmış yüzeye akım gönderilmesi halinde oluşan konvektif ısı transferi araştırılmıştır. Ayrıca jetlerin serbest halde ve çarpma bölgesinde oluşan akış dinamiği karakteri, ortalama hızların ve türbülans şiddeti değerlerinin ölçülmesiyle tespit edilmiştir.

Çalışma 10 bölüm şeklinde sunulmuştur. Birinci giriş bölümünden sonra Bölüm 2’de; genel olarak çarpan jetlerin yapısı ve ısı transferi karakteristikleri, dairesel jetlerin akış dinamiği ve ısı transferi davranışı, eş eksenli jetlerin hidrodinamik yapıları ve ısı transferi karakteristikleri hakkında genel teorik bilgiler, literatür araştırmaları eşliğinde sunulmuştur.

Bölüm 3’te, deneysel çalışmanın ve deney düzeneğinin tanıtılması, Bölüm 4’te ise deneysel verilerin hesaplanma yöntemleri verilmiştir.

Bölüm 5’de dört farklı çaptaki düz dairesel jetlerle çarpma ile ısı transferi deney sonuçları ve değerlendirilmesi sunulmuştur. Bölüm 6’da aynı jetlerin akış dinamiği incelemeleri yapılmıştır.

Bölüm 7 ve 8, sırasıyla eş-eksenli jetlerin ısı transferi ve akış dinamiği deney sonuçlarını ve değerlendirmelerini içermektedir.

Bölüm 9’da, tüm çalışmaya dair belirsizlik analizi ve istatistiksel regresyon kısımları mevcuttur.

Son olarak genel değerlendirme ve sonuçlar yer almıştır. Çalışmada metin içerisinde yerleştirilmeyen bazı grafik, resim ve programlar Ek şeklinde sunulmuştur.

2. JETLERİN GENEL YAPISI VE LİTERATÜRDEKİ YERİ

2.1. Çarpan Jetlerin Hidrodinamik ve Geometrik Yapısı

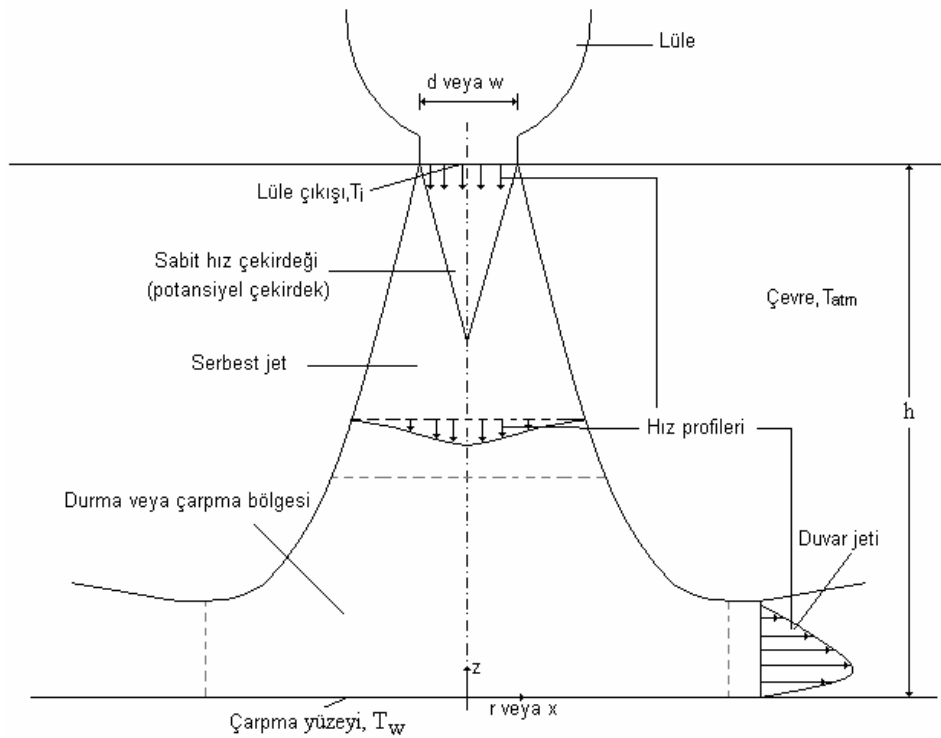
Şekil (2.1)' de gösterildiği gibi, gaz jetleri tipik olarak d çapındaki dairesel veya w genişliğindeki dikdörtgen lüleden durgun çevreye püskürtülür. Çarpan jetler genellikle türbülanslıdır ve lüle çıkışında sabit hız dağılımına sahiptir [1].

Düz bir yüzeye dik olarak çarpan jette akış genel olarak dört bölgeye ayrılır:

- 1) **Serbest jet (başlangıç karışım bölgesi):** Jet çıkışından başlayarak uzaklık arttıkça, jet ile çevre arasındaki momentum aktarımı, jetin serbest sınırının genişlemesine ve sabit hız çekirdeğinin daralmasına yol açar. Çekirdeğin aşağısında, hız profili tüm jet kesiti boyunca sabit değildir ve en yüksek hız (orta noktada), lüle çıkışından itibaren uzaklık arttıkça azalır. Bu akış bölgesi *serbest jet* olarak tanımlanmakta olup, bu bölge boyunca koşullar, çarpma (hedef) yüzeyinden etkilenmez. Serbest jette çevredeki akışkanın jete karıştığı ve böylece jet hızının lüle çıkışından itibaren azalma eğilimi gösterdiği akış bölgesi mevcuttur. Bu karışım bölgesi veya sürtünmeli (kayma gerilmesine maruz kalmış) bölge, çekirdeği (kor) oluşturur. Bu çekirdek bölgesinde lüle merkez hattında akış hızı (U_m) her zaman lüle çıkış hızına (U_j) eşittir. Çekirdek bölgesi genelde akışkan viskozitesiz kabul edildiği için *potansiyel çekirdek* olarak adlandırılır. Literatürde $U_m=0.95U_j$ olduğu noktanın potansiyel çekirdek bölgesinin bitiş yeri olduğu konusunda genel bir tanımlama mevcuttur [1]. Gauntner ve arkadaşları [2] tarafından türbülanslı Reynolds sayılarına bağlı olarak yapılan çalışmalarda, potansiyel çekirdek bölgesinin uzunluğunun lüle çapının altı katı kadar mesafede olduğu ($L_{pc}=6d$) belirtilmiştir. Daha sonraki yıllarda bu tespit diğer araştırmacılar tarafından desteklenerek genel kabul görmüş ve konuyla ilgili birçok ders kitabında da bu şekilde yer almıştır [3].
- 2) **Gelişen jet bölgesi:** Büyük lüle-levha mesafelerinde lüle çıkışından itibaren mesafe arttıkça eksenel hızlar düşer. Schlichting [4] tarafından yapılan bir analizde, merkez hattı hızının ve jet yarı genişliği düşüşünün, potansiyel çekirdeğin sonundan itibaren eksenel mesafeyle orantılı olduğu bulunmuştur.
- 3) **Durma veya Çarpma bölgesi (bozulma bölgesi):** Çarpma levhasına yakın bölge genel olarak “bozulma bölgesi” olarak adlandırılır. Durma veya çarpma bölgesi içerisinde akış, hedef yüzeyden etkilenmekte olup, dik (z) ve çapraz (r veya x) yönlerde sırasıyla,

önce yavaşlar ve sonra hızlanır. Bu bölgede eksenel hızda hızlı bir düşüş olurken buna bağlı olarak statik basınçta hızlı bir artış görülür. Bu bölgeyle ilgili teorik analizler akış dinamiği hakkında çok az bilgi vermektedir. Yapılan deneysel çalışmalar da yeterli detaylandırmaya sahip değildir. Tani ve Komatsu [5] ve Giraldo ve arkadaşları [6] bu bölge ile ilgili tespitler de bulunmuştur.

- 4) **Duvar jeti bölgesi:** Çarpma bölgesinde eksenel ve düşey mesafede önce yavaşlayan sonra da hızlanan akış, momentumu sıfır olan akışkanı çevreden çekmeye devam ettiği için yatay hızlanma süresiz olarak devam edemez ve durma bölgesinde ivmelenen akış, duvar jeti bölgesinde yavaşlar. Bundan ötürü r veya x arttıkça, yüzeye paralel hız bileşenleri sıfırdan en yüksek değere ulaşır ve sonradan sıfıra düşer. Duvar jeti içerisindeki hız profilleri çarpma ve serbest yüzeylerin her ikisinde de sıfır hıza sahiptir. Eğer, ısıtılmış bir yüzeyin jetle soğutulması işlemi yerine getiriliyorsa ve $T_s \neq T_e$ (ve/veya $C_{A,s} \neq C_{A,e}$) ise taşınım ile ısı ve/veya kütle geçişi, durma ve duvar jeti bölgelerinin her ikisinde de oluşur. Duvar jeti içerisindeki hız profili göstermiştir ki yerel hız cidara yakın yerlerde hızla maksimuma doğru artış göstermekte daha sonra cidardan uzak mesafelerde düşmektedir. Duvar jetleri paralel akışlara göre daha fazla ısı transferi meydana getirirler. Bunun sebebi; duvar jeti ile ortam havası arasındaki kayma gerilmesinden doğan türbülansın ısı transfer yüzey alanında sınır tabakaya iletilmesidir.



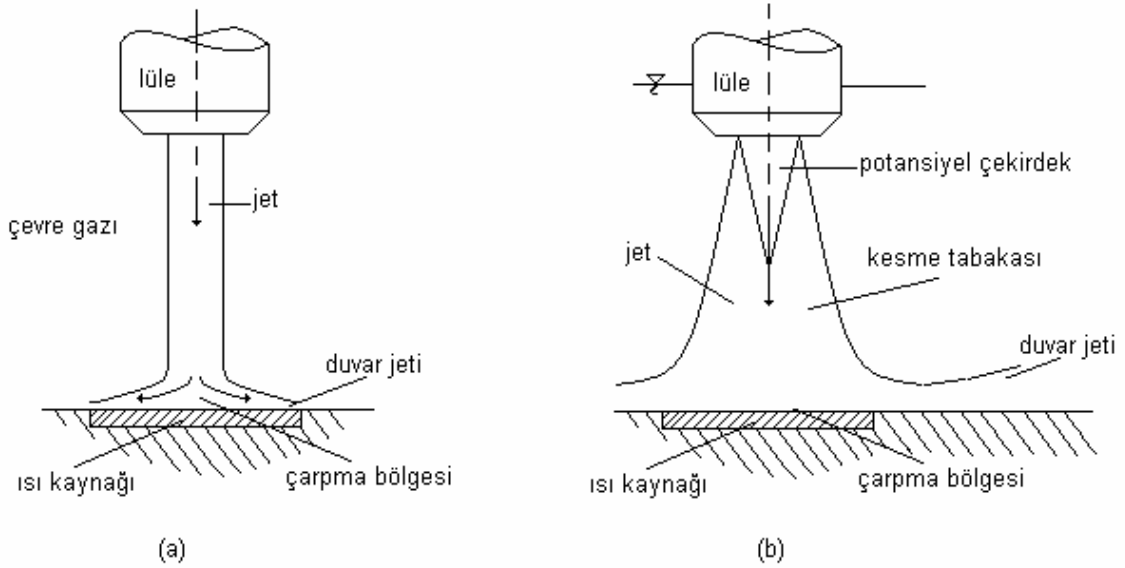
Şekil 2.1. Tek bir yuvarlak veya yarıklı gaz jetinin yüzeye çarpması [7].

2.1.1. Çarpan Jetle Soğutma Sistemlerinin Sınıflandırılması

Jetle soğutma sistemleri başlıca şöyle sınıflandırılabilir:

- Sınırsız veya sınırlandırılmış jetler,
- Tek veya çoklu jetler (çoklu jetlerde jetler arası etkileşim sebebiyle çapraz akış etkili jetler ön plana çıkar)
- Dairesel veya yarık tipli jetler,
- Serbest yüzeyli veya daldırılmış jetler,
- Lüle tip ve geometrisine bağlı olarak değişen jetler (eş eksenli, dönen jetler, v.s)

a) Sınırsız Serbest Yüzey Jetleri: Serbest yüzey jetinin ayırt edici bir özelliği, sıvı-gaz ara fazındaki ihmal edilebilecek mertebede olan kesme gerilmesidir. Böylece jet ana hız profili lüleden çarpma yüzeyine ilerlerken yer çekiminden etkilenmeden korunur. Eğer jet yer çekimi merkezine doğru yönlendirilmişse yerçekimi ivmesi sebebiyle jet hızı, lüle çıkış hızını geçecektir. Hali hazırdaki soğutma koşulları için bu etki ihmal edilebilirse de duvar sürtünme etkilerine, hız profilleri ve türbülans seviyesine bağlı olarak jet lüleden ayrılırken bazı değişiklikler gösterir [8].



Şekil 2.2. a) Sınırsız serbest yüzey jeti, b) sınırsız dalmış jet [9]

Jet çarpma yüzeyine yaklaşırken, yüzeye normal yönde yavaşlayıp paralel yönde hızlanır. Bu değişiklikler yüzeye paralel, güçlü bir basınç dağılımının karakterize ettiği çarpma

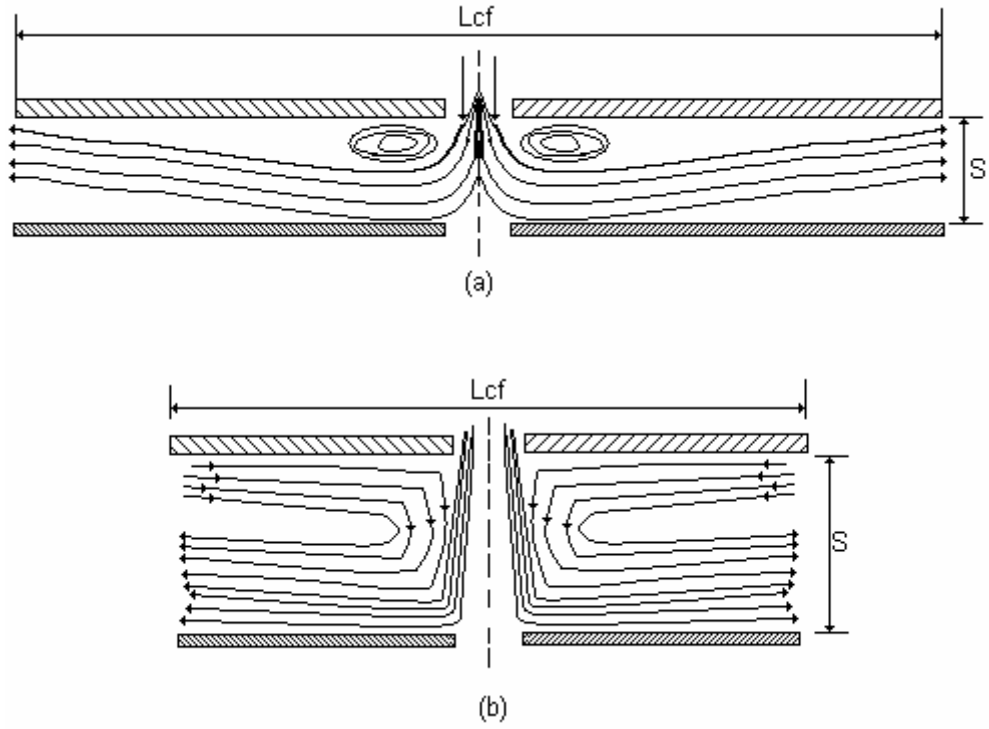
bölgesinde meydana gelir. Eğer jet türbülanslı ise basınç dağılımı çarpma bölgesinde akışı laminarlaştırma yönünde etkili olacaktır. Bununla birlikte basınç dağılımı sıfıra düşerek akış yönündeki duvar jet bölgesinde türbülansa geçişe sebep olur. Dairesel ve serbest yüzey jeti Şekil (2.2.a)'da gösterilmiştir.

b) Sınırsız Dalmış Jetler: Şekil (2.2.b)'de görüldüğü gibi sınırsız, dalmış ve asimetric püskürtmeli bir jet; serbest jet, çarpma bölgesi ve duvar jeti olmak üzere üç ana bölgeye ayrılır. Serbest jet lüle çıkışında akış yönünde gelişen çevre akışkanının kesit tabakasında yanıl yayılımı ile karakterize edilmiştir. Lüleden uzaklaştıkça kesit tabakası genişler ve içinde akışkan hızının kesit tabakasından etkilenmediği potansiyel çekirdek büzülerek kaybolur. Potansiyel çekirdeğin ucunda jetin eksenindeki hız, bir yandan hız profili çan eğrisi şekline gelirken azalır. Potansiyel çekirdeğin uzunluğu Re sayısı ve lüle çapına bağılı olarak değişir. Lüle-levha arası mesafe h/d' ye bağılı olarak ve özellikle çarpma yüzeyi potansiyel çekirdeğin altında ise, daldırılmış jet püskürtmeli sistemlerde ısı transferi serbest yüzeyli jetlere göre daha hassastır. Akış çarpma bölgesini terk ederken türbülansa bir miktar artış gözlenir. Duvar jeti bölgesinde ise jet ile çevre akışkan arasında gerçekleşen momentum iletimi neticesinde yavaşlama meydana gelir.

c) Yarı Sınırlandırılmış Dalmış Jetler: Modern elektronik cihazlar daha çok küçük yapıda dizayn edildikleri için küçük hacimlere sığdırmak zorunluluğu vardır. Bu durum akış üzerinde sınırlandırma etkisi oluşturmaktadır. Yarı sınırlandırılmış kare kesitli slot (yarık) jetlerde jetin püskürtme düzleminde ve soğutma yüzeyine paralel olarak bir duvar yerleştirilmiştir. Bu duvar nihayetinde iki plaka arasındaki paralel akışı sınırlandıracaktır. Eğer sınırlama yüzeyinin genişliği, lüle genişliği ve plaka mesafesine göre büyükse akış girişi jetin her iki tarafından da sirkülasyona sebep olacaktır.

Lüle-levha mesafesi arttıkça akış, sınırlandırılma duvarı dışından etkilenerek sınırlandırma duvarının akıştaki etkisi ve jet altında ısı transferine etkisi azalacaktır. Bu eğilim mesafe arttıkça devam ederek sistem sınırlandırılmamış jetlerdeki gibi davranmaya başlayacaktır (Şekil 2.3).

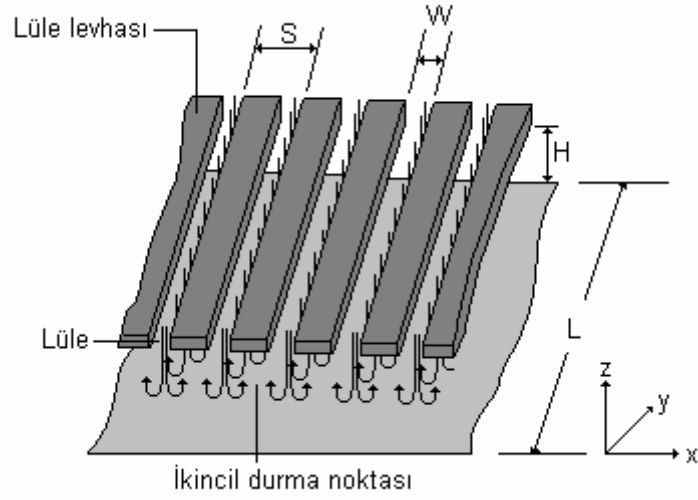
Sınırlandırılmamış jetler için çarpma levhası boyunca basınç dağılımı çan eğrisi şeklindedir. Bununla birlikte potansiyel çekirdek boyunun lüle-levha mesafesinden büyük olduğu durumlarda, sirkülasyon sebebiyle akışın büzülmesi durağan noktanın her iki yanındaki basıncı çevre basıncının altına düşürür. Bu ise duvar boyunca güçlü bir ivmelenmeye sebep olur. Basınç daha sonra akış yönünde türbülansa geçişi veya sınır tabaka ayırımını sağlayan ters bir değişim ile eski değerine yani çevre basıncına yükselir.



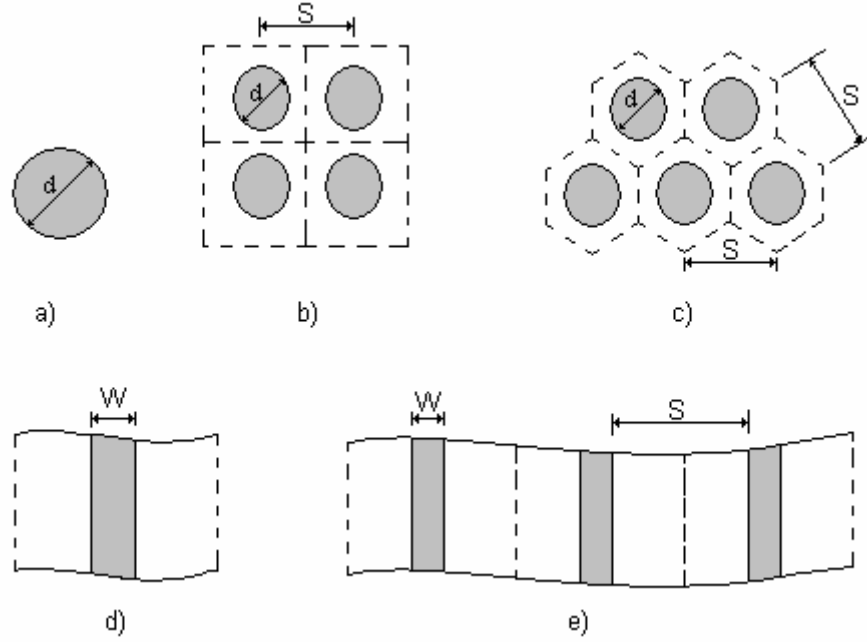
Şekil 2.3. Yarı sınırlandırılmış, daldırılmış jet,
a) kısa lüle-levha mesafesi, b) uzun lüle-levha mesafesi

2.1.2. Çarpan Yarı (Slot) Jet ve Jet Dizileri

Birçok çarpma ile ısı transferi düzenekleri Şekil (2.4) 'de gösterildiği gibi yarıklı jet dizilerinden oluşur. Her bir lüleden püskürtülen ve serbest jet, durma ve duvar jeti bölgelerini içeren akışa ek olarak, bitişik duvar jetleri arasındaki etkileşimin bir sonucu olarak, ikincil durma bölgeleri oluşur. Bu tür düzeneklerin birçoğunda jetler hedef levha ile lüle levhası arasındaki sınırlı hacme püskürtülür. Toplam ısı veya kütle geçişi sıcaklığı (veya madde yoğunluğu) lüle çıkışı ile hedef levhadaki değerler arasında olan kullanılmış gazın, sistemden kolayca atılabilmesi ile yakından ilişkilidir. Şekil (2.4) 'de gösterilen düzenekte kullanılmış gaz yukarı akarak lülelerden dışarı çıkamayacağı için simetrik olarak $\pm y$ yönünde akacaktır. Kullanılmış gazın sıcaklığı (yüzey soğutuluyorsa) veya madde yoğunluğu (yüzeyden buharlaşma) oluyorsa y yönünde artacağı için, yüzey gaz sıcaklık (yoğunluk) farkı ve buna bağlı olarak ısı veya kütle akıları azalır. Bu sorunu gidermek için kullanılmış gazın yukarı akarak lülelerin arasından yeniden çevreye atılması düşünülebilir.



Şekil 2.4. Bir dizi yarıklı jetin yüzeye çarpması [7]



Şekil 2.5. Jet tipleri a) Tek yuvarlak jet, b) yuvarlak jetlerin kare dizilişi, c) yuvarlak jetlerin üçgen dizilişi, d) tek yarıklı jet, e) yarıklı jet [7]

Tek, yuvarlak ve yarıklı lülenin, ayrıca yuvarlak ve yarıklı lüle dizilerinin üstten görünüşü Şekil (2.5)'de gösterilmiştir. Tek lüleler için (Şekil 2.5.a ve d) yerel ve ortalama taşınım katsayıları herhangi bir $r > 0$ ve $x > 0$ ile ilişkilidir. Diziler için yerel ve ortalama değerler simetri nedeniyle, kesik çizgilerle sınırları tanımlanan hücreler için verilen eşdeğer büyüklüklerdir. Kare (Şekil 2.5.b) veya üçgen (Şekil 2.5.c) dizilişi yuvarlak jetler için çıkış kesit alanının hücre yüzey alanına oranı ($A_r = A_c / A_{\text{cell}}$) olarak tanımlanan, bağlı lüle alanıdır. Her iki

geometri için S, diziliş adımını, başka bir deyişle lüle eksenleri arasındaki uzaklığı göstermektedir.

2.1.3. Çarpın Jetlerde Isı ve/veya Kütle Geçişİ

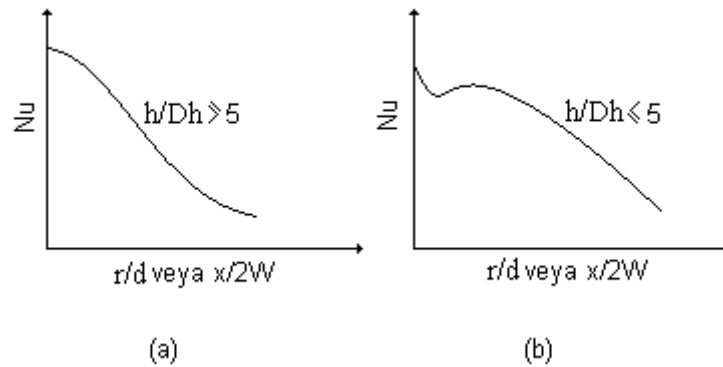
Aşağıdaki çözümlemede gaz jetinin lüleden çıkarken U_j sabit hızında, T_j sıcaklığında ve $C_{A,j}$ madde derişikliğinde olduğı varsayılacaktır. Lüleden çıkan jetin çevre ile ısı ve maddesel dengede olduğı kabul edilmiştir ($T_j=T_\infty$, $C_{A,j}=C_{A,\infty}$). Hedef levhada (çarpma yüzeyinde) sabit sıcaklıkta veya derişiklikte ısı/kütle geçişİ olabilir. Bu durumda Newton'un Soğuma Yasası ve kütle geçişİ için benzeri:

$$q'' = h(T_s - T_j) \quad (2.1)$$

$$N_A'' = h_m(C_{A,s} - C_{A,j}) \quad (2.2)$$

biçiminde yazılabilir.

Akışın lüle çıkışındaki türbülans düzeyinden etkilenmediğı ve yüzeyin hareketsiz olduğı varsayılmaktadır. Ancak bu varsayım jetin çarpma hızından çok daha küçük olan yüzeyleri için hafifletilebilir.



Şekil 2.6. a) Büyük $h/D_h \geq 5$, b) Küçük ($h/D_h \leq 5$) lüle-levha aralıkları için Nu sayısının genel dağılımı [7]

Bir yüzeye çarpın jet akımı için taşınım katsayısı verilerinin geniş kapsamlı bir incelemesi Martin [10] tarafından yapılmıştır. Tek bir yuvarlak lüle veya yarıklı lüle için, yerel Nusselt sayısının dağılımı Şekil (2.6)'da gösterilmiştir. Karakteristik uzunluk, kesit alanının dört katının ıslak çevreye bölünmesi şeklinde tanımlanan hidrolik çaptır ($D_h=4A_c/S$). Böylece

yuvarlak bir lüle için karakteristik uzunluk çaptır ve $L \gg W$ alınır, yarıklı bir lüle için genişliğin iki katıdır. Bu durumda yuvarlak bir lüle için $Nu = h_x d / k$, yarıklı bir lüle için $Nu = h_x (2W / k)$ elde edilir. Şekil (2.6.a)'da gösterilen büyük lüle-levha aralıkları $h/D_h \geq 5$ için dağılım, Nu sayısının durma noktasında aldığı en üst değerden giderek azalan bir çan eğrisi ile tanımlanır.

Şekil (2.6.b)'de gösterilen küçük aralıklar için dağılım iki tepe nokta ile tanımlanır. İkinci üst noktanın Nu değeri jetin Reynolds sayısı ile artar ve birinci üst noktayı aşabilir. İki farklı dağılımı ayıran $h/D_h \approx 5$ aralığı sabit hız çekirdeğinin uzunluğu ile ilişkilidir (Şekil 2.1). İkinci tepe noktanın oluşumu, hızlanan durma bölgesi akışından yavaşlayan duvar jetine geçişte türbülans düzeyindeki keskin artışa dayandırılır [10]. Ek tepe noktalar gözlenmiş olup türbülanslı duvar jetine geçişle birlikte durma bölgesinde girdapların oluşumuna bağlanmaktadır [11].

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

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

biçiminde yazılabilir. Burada;

$$Nu_{ort} = \frac{\bar{h} D_h}{k} \quad (2.4)$$

$$Re = \frac{V \cdot D_h}{\nu} \quad (2.5)$$

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

Birkaç kaynaktan elde edilen veriyi değerlendirdikten sonra, Martin [10] tek bir yuvarlak lüle için aşağıdaki bağıntıyı önermiştir:

$$\frac{Nu_{ort}}{Pr^{0.42}} = G\left(\frac{r}{d}, \frac{h}{d}\right) F_1(Re) \quad (2.6)$$

burada F_1 ve G sırasıyla;

$$F1 = 2 \text{Re}^{1/2} \left(1 + 0.005 \text{Re}^{0.55} \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

$$G = \frac{d}{r} \frac{1 - 1.1(d/r)}{1 + 0.1(h/d - 6)(d/r)} \quad (2.8.a)$$

olmaktadır. d/r yerine $2A_r^{1/2}$ koyarak:

$$G = 2A_r^{1/2} \frac{1 - 2.2A_r^{1/2}}{1 + 0.2(h/d - 6)A_r^{1/2}} \quad (2.8.b)$$

elde edilir. Bu bağıntıların geçerlilik aralıkları ise:

$$\left[\begin{array}{l} 2000 \leq \text{Re} \leq 400000 \\ 2 \leq \frac{h}{d} \leq 12 \\ 2.5 \leq \frac{r}{d} \leq 7.5 \\ 0.04 \leq A_r \leq 0.004 \end{array} \right] \quad (2.9)$$

olmaktadır. Tek bir yarıklı lüle için önerilen bağıntı ise:

$$\frac{Nu_{ort}}{\text{Pr}^{0.42}} = \frac{3.06}{(x/h) + (h/W) + 2.78} \text{Re}^m \quad (2.10)$$

biçimindedir. Burada m üssü;

$$m = 0.695 - \left[\left(\frac{x}{2W} \right) + \left(\frac{h}{2W} \right)^{1.33} + 3.06 \right]^{-1} \quad (2.11)$$

olup, geçerlilik alanı şöyledir:

$$\left[\begin{array}{l} 3000 \leq Re \leq 90000 \\ 2 \leq \frac{h}{W} \leq 10 \\ 4 \leq \frac{x}{W} \leq 20 \end{array} \right] \quad (2.12)$$

2.1. Çarpan Jetlerde Isı Transferi ve Akış Dinamiği Konusunun Literatürdeki Yeri

Jetle soğutma sistemlerinin yapısını anlayabilmek için ısı transferini etkileyen parametrelerin bilinmesi gerekir. Bir jetten yüzeye aktarılan çarpma ile ısı transferi birçok parametreye bağlı kompleks bir yapıdır. Nusselt sayısı (Nu), Reynolds sayısı (Re), Prandtl sayısı (Pr), boyutsuz lüle levha mesafesi (h/d) ve boyutsuz durma noktası ile ölçüm alınan referans nokta arası mesafe (x/d veya r/d) bunların başlıcalarıdır. Ayrıca, lüle geometrisi, türbülans şiddeti, iyileştirme faktörü ve jet sıcaklığının yok edilmesi gibi ikincil faktörleri saymakta fayda vardır.

Literatürde çarpan jetlerle ısı transferinde yukarıda sayılan parametrelerin bir veya birkaçına ait değişimleri araştıran deneysel ve sayısal çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu bölümde tezin içeriğine uygun olarak; (i) geleneksel boru tipi dairesel lüleden çıkan jetin düz yüzeye normal doğrultuda çarptırılmasıyla oluşan ısı transferini, (ii) aynı tip boruların akış karakteristiğini, (iii) eş eksenli (merkezi jet ve annular jet) lülelerle çarpma gerçekleştirildiğinde oluşan ısı transferini ve (iv) bu tip lülelerin akış karakteristiğini inceleyen yayınlar seçilmiştir.

2.2.1. Düz Dairesel Jetler

Bu konuyla ilgili yapılan ilk çalışmalar, dış ortama boşalan serbest jetin akış rejim bölgelerinin tespiti, akım karakteristikleri ve çarpan jetlerin levha üzerinde meydana getirdiği statik basınç ölçümleri ile ilgilidir. 1970 yılından bugüne kadar ölçme teknikleri ve bilgisayar teknolojisinin gelişmesine bağlı olarak çarpan jetin hız alanlarının ve türbülans şiddetinin ölçülmesi ve hesaplanması ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilmiştir [12]. Günümüzde gerçekleştirilen çalışmalarda ısı transferi, akış rejimi ve türbülans büyüklüğü gibi etkin parametreler bir arada ele alınarak, birbirleriyle olan etkileşimleri daha detaylı incelenmeye başlanmıştır.

Çarpan jetlerde akış karakteristiği ile soğuma karakteri arasında yapılan önemli bir analitik inceleme [13], laminar akışta durma noktasında ısı transferi için Nusselt sayısı ile merkez hattı hızı arasında:

$$Nu \propto U_m^{1/2} \quad (2.13)$$

şeklinde bir bağıntı olduğunu göstermiştir. Bu bağıntı Nusselt sayısının potansiyel kor bölgesinde sabit kaldığını ardından azalmaya başladığını öngörmektedir.

Gordon ve Akfırat [14], slot jetin sınırlandırılmamış bir ortama yayılması durumunda hızın eksenel değişimini ve türbülans şiddetini araştırmışlardır. Sonuçlar serbest jette lüleden 8d mesafe uzaklıkta türbülans şiddetinin lüle çıkış hızının %30 una ulaşabildiğini göstermiştir. Lüleden eksenel mesafede maksimum türbülans şiddetinin olduğu nokta, maksimum ısı transferinin olduğu durma noktasıdır. Dairesel lüleler kullanılarak yapılan ölçümlerde de benzer sonuçlar görülmüştür. Schlunder ve Gnielinski [15] maksimum türbülansın ve maksimum ısı transferinin $h/d=7.5$ 'de olduğunu göstermişlerdir. Gordon ve Akfırat [14] jet merkez hattı hızının düşmeye devam ettiği potansiyel çekirdek bölgesinin dışında bile türbülans şiddetini artırmanın durma noktasındaki ısı transferini arttıracak bulmuşlardır. Türbülanstaki artış, jet hızındaki düşüşü karşılamadığı zaman ısı transferindeki artış kesilir.

Gardon ve Akfırat [14], yerel maksimum ısı transferinin düşük lüle-levha mesafelerinde oluşacağını belirtmişlerdir ($h/d < 6$). Çarpan dairesel jetler için küçük h/d mesafelerinde ısı transfer katsayılarının durma noktası ile $x/d=0.5$ noktası arasında yaklaşık olarak arttığı görülmüştür. Dairesel jetler için ikinci bir maksimum nokta $x/d=2$ 'de oluşur. Gardon ve Carbonpue [16] düşük Re sayılarında durma noktasından itibaren $0.5d$, $1.4d$ ve $2.5d$ mesafelerinde üç maksimum nokta görülebileceğini göstermişlerdir. Reynolds sayısı 20000'in üzerine çıktığı zaman iki maksimum sıçrama görülür.

Peki, ısı transferinin radyal dağılımında görülen bu piklerin sebebi nedir? Literatürde yapılan çeşitli çalışmalarda iki veya üç pik nokta görülmesinin sebebi şöyle açıklanabilir:

- a) $x/d=0.5$ 'deki pik değer durma noktasındaki yer değiştirme ile radyal hızda değişiklik olması şeklinde yorumlanır. Radyal hız jetin bozulma bölgesinde yükselir, ancak daha büyük çaplarda jetin yayılımı radyal hızı düşürür.
- b) Gardon ve Akfırat [14], $1 \leq (x/d) \leq 2$ aralığında ısı transferinde oluşan artışın laminardan türbülanslı sınır tabaka akışına geçişle açıklanabileceğini iddia etmişlerdir. Durma noktasından itibaren büyük radyal mesafelerde ısı transferinde düşüş gözükür. Bunun

sebebi radyal yöndeki akış hızının dönmesidir. Bu mekanizma durma noktasında türbülanslı sınır tabaka ile sonuçlanan tam gelişmiş çarpan jetlere ya da yüksek lüle-levha arası mesafelerdeki çarpan jetlere uygulanmaz. Çarpan bir jetin sınır tabakası içerisinde hız ölçümleri $h/d=2$ için durma noktasında türbülans oluşacağını göstermiştir.

- c) $x/d=2$ 'deki maksimum pik jet çevresinde kayma gerilmesi bölgesinde şekillenen vortekslerin oluştuğu nokta ile yaklaşık olarak çıkarılır. Popiel ve Trass [17, 18] $h/d=1.2$ ve 2'de bu vorteksleri akım görüntüleme teknikleri ile izlemiş ve pikin oluşmasını vortekslerin oluşması ile açıklamışlardır.

Çarpan bir jette ısı transferini ve akışı etkileyen en önemli parametrelerden biri de lüle geometrisidir. Obot ve arkadaşları yaptıkları bir dizi çalışmada [19-22] türbülans derecesinin farklı lüle tasarımlarıyla değişeceğini, bunun sonucunda ısı transferinin de değişeceğini göstermişlerdir. Görünüş oranı (l/d ; yükseklik/çap) 1'e eşit olan keskin köşeli bir orifis kullanılması durumunda $h/d=4$ 'de, $Re=29485$ için durma noktasında maksimum Nusselt sayısı 155 olurken, yuvarlatılmış ağızlı bir orifis kullanılması durumunda aynı Re sayısı ve görünüş oranında $h/d=8$ 'de $Nu=125$ olmuştur.

Popiel ve Boguslawski [11] $h/d=4$, $Re=20000$ ve $x/d=1$ için ortalama ısı transfer alanının yuvarlatılmış ağza sahip bir lülede, ASME standartlarındaki keskin köşeli bir lüleye nazaran %25 daha az olduğunu savunmuşlardır. Bu çalışmalarında yazarlar, düz bir yüzey üzerine çarpan dairesel jetin oluşturduğu ısı/kütle aktarımına ait akım şekillerini incelemişlerdir. Radyal yönde oluşan kütle transfer katsayısı naftalin süblimleşme tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Çalışma sonucu akım karakteristikleri kütle transferinin radyal dağılımı, durma noktasındaki kütle transfer ölçümleri ve sonuçlara ait ampirik bağıntılar verilmiştir. Çalışmada özellikle durma noktasında lüle geometrisinin ısı transferi üzerindeki etkisi daha da net görülmüştür.

Gundappa ve arkadaşları [23] tarafından yapılan bir çalışmada orifis jetlerle boru tipi jetler ($l/d=10$) kıyaslanmıştır. Boru tipi dairesel lülede eksenel hız bozulmasının daha yavaş olduğu görülmüştür. Bu durum $h/d=7.8$ ' de bile tüm radyal mesafelerde Nu sayısının yüksek değerlerde çıkmasına sebep olmuştur. Lüle geometrisi lüle çıkışındaki hız profilini de etkiler. Bu da; jet çevresinde oluşan vortekslerin ve kayma gerilmesi olan bölgedeki türbülans derecesinin etkileneceğini gösterir. Neticede türbülans derecesi de ısı transferini etkileyeceğinden optimum lüle geometrisi oldukça önemlidir.

Çarpan jetler konusunda araştırmacıların ele aldığı diğer bir husus düşük değerli türbülanstır. Hoogendorn [24] lüle çıkışındaki türbülans derecesinin durma noktasındaki ısı

transferinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Örneğin $Re=60000$ ve $h/d=2$ 'de eksenel yönde türbülans şiddeti %0.5'den %3.2'ye çıktığında, durma noktası Nusselt sayısı 180'den 215'lere çıkar. Gardon ve Akfırat [14] $h/d>6$ mesafesinde türbülans derecesinin ısı transferi üzerindeki etkisinin nispeten azalacağını göstermişlerdir.

Mohanty ve Tawfek [25], 3, 5 ve 7 mm çaplarındaki dairesel lülelerden izotermal olarak ısıtılmış bir levhaya jet çaptırılmasını deneysel olarak araştırmıştır. Deneylerde lüle-levha arası boyutsuz mesafesi 4-58, lüle çıkışı Reynolds sayısı 4860-34500 arasında seçilmiştir. Üç telli diferansiyel ısı-çift ısı akısı sensörü kullanılarak yerel ısı transfer katsayıları direkt ölçülmüştür. Çarpma noktasında oluşan en yüksek ısı transfer değeri genişleyen radyal mesafeyle birlikte bozulma gösterir. Bu bozulma Mohanty ve Tawfek'e göre üsteldir (eksponansiyeldir) ve en etkili ısı transfer alanının, boyutsuz ısı transfer oranı olarak tanımladıkları $(\bar{H})$ 'ın, 1'den e^{-1} 'e düştüğü zaman oluşacağını savunmuşlardır.

Mohanty ve Tawfek, durma noktası Nu sayısı için farklı lüle çapları kullanmaları durumunda üç ayrı bağıntı elde etmişlerdir.

$$\begin{aligned} d=3 \text{ mm ve } 10 \leq h/d \leq 16.7 \text{ için: } \quad Nu_0 &= 0.17 Re^{0.701} (h/d)^{-0.182} \\ d=5 \text{ mm ve } 6 \leq h/d \leq 58 \text{ için: } \quad Nu_0 &= 0.388 Re^{0.696} (h/d)^{-0.345} \\ d=7 \text{ mm ve } 9 \leq h/d \leq 41.4 \text{ için: } \quad Nu_0 &= 0.615 Re^{0.670} (h/d)^{-0.380} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Bu bağıntılarda; lüle çapının artmasıyla birlikte Re sayısının etkisinin azaldığı, lüle-levha arası mesafenin etkisinin ise arttığı görülmüştür.

Çarpan jetlerle ısı transferini artırmaya yönelik başka bir çalışmayı ise Hrycak [26], yuvarlak bir jeti ısıtılmış düzlem levhaya çaptırarak gerçekleştirmiştir. Deneyler Reynolds sayısının 14000~67000 değerleri arasında ve lüle çapının $d=3.18\sim 12.7$ mm alındığı şartlarda yapılmıştır. Durma noktasına ait deneysel veriler özellikle dikkate alınmış ve ortalama ısı transferiyle beraber boyutsuz analiz anlamında korelasyonu yapılmıştır. $h/d<0.9$ için durma noktası Nusselt sayısı;

$$Nu_0 = 1.53 Pr^{0.34} Re^{0.5} (h/d)^{-0.2} \quad (2.15)$$

şeklindeki yaklaşımla sunulmuştur.

Huang ve El-Genk [27], düz bir yüzeye çarpan dairesel jetin ısı transferini, yerel ve ortalama Nusselt sayısını bulmak amacıyla bir çalışma yaptılar. Yüksek Reynolds sayısında ($6.1 \times 10^4 \leq Re \leq 1.24 \times 10^5$) ve $h/d = 8$ ’de ortalama Nu sayısı için şu şekilde bir bağıntı elde ettiler:

$$Nu_{ort} = Re^{0.76} Pr^{0.42} (a + bh + ch^2) \quad (2.16)$$

Wang [28], dairesel jetin katı yüzeye çarpmasıyla uniform olmayan sıcaklık ve cidar ısı akısı değerlerini araştırmıştır. Donaldson ve Snedeker [29], çarpan jetlerin davranışını deneysel olarak incelemiş, serbest jet ile ilgili olarak basınç dağılımını ölçmüş, serbest jet dağılımı ve hız profillerini tespit etmiştir. Ayrıca lüleden çıkan jetin silindir ve düz bir levha üzerine çarptırılması ile ortaya çıkan akım karakteristikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Donaldson ve arkadaşları [30], serbest jet türbülans yapısının ve jet çarpmasının ısı transfer boyutunu incelemişlerdir. Reynolds sayısı 8000 ile 20000, $h/d = 6$ ile 20 arasında seçilerek parametre etkileri değerlendirilmiştir.

Çarpan jetlerle ilgili olarak ülkemizde farklı konfigürasyonlarda çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bunlardan bazıları şöyledir: Bilen [12] türbülanslı tam gelişmiş yuvarlak hava jetini dik ve eğik açılarda ısıtılmış düz bir levhaya çarptırarak, yüzeydeki konvektif ısı transfer katsayısı dağılımını incelemiştir. Sıvı kristal tekniği kullanarak gerçekleştirdiği çalışmada dik çarpan jetle eğik çarpan jet arasında durma noktasının açıyla birlikte yer değiştirdiğini tespit etmiştir. Dik çarpan jetlerde yüzey akım alanı ve ısı transfer katsayıları için X ve Y eksenlerine göre simetrik durumun varlığı gözlenmiştir. Durma noktasından itibaren X mesafesi arttıkça Nu sayısında logaritmik bir azalmanın olduğu gözlenmiştir. Ayrıca Nu sayısı ile Re sayısı arasında $Nu \propto Re^{0.78}$ şeklinde bir bağıntı bulunmuştur.

Kızılırmak [31] tarafından gerçekleştirilen deneysel bir çalışmada Reynolds sayısının 5842, 8763 ve 11684 değerlerinde lüle-levha yerleşimi $h/d = 2, 4$ ve 6 değerlerinde iken sıcak yüzeye çarptırılan jetin soğutma etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Kompresörden gelen sıkıştırılmış hava lüle yardımıyla, ısıtılmış bakır levhaya çarptırılmıştır. Sonuç olarak levhanın derinliğine nüfuz eden soğuma etkisi yerel ve ortalama Nusselt sayıları, Reynolds sayısı ve lüle-levha mesafesi cinsinden tanımlanmıştır.

Acar [32], dik ve açılı çarpan slot jetlerin akış karakteristiklerini sıcak-tel anemometre kullanarak tespit etmiştir. Can [9] istatistiksel regresyon yöntemiyle elektronik devrelerin soğutulmasında çarpan jetlerin kullanımını araştırmıştır. Son olarak yine ülkemizde gerçekleştirilen bir çalışmada Feralan ve arkadaşları [33], ince mürekkep filmlerinin kurutulma işlemini göz önüne alarak çarpan hava jetlerinin oluşturduğu yüksek ısı transferi sebebiyle, kurutma işlemi üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Hava hızı ve sıcaklığı, lüle-yüzey aralığının

ısı transferi üzerine olan etkisi incelenmiş, toplam kurutma süresi hesaplanmıştır. Lüle-yüzey arası uzaklığın ısı transferi üzerindeki etkisi incelenmiş ve boyutsuz lüle yüzey aralığı $H/D=6, 8$ bölgesinde yerel ısı transferi katsayısının maksimum değerleri elde edilmiştir. İlk durma noktası için:

$$Nu_0=0.178 Re^{0.58} Pr^{1/3} \quad (2.17)$$

korelasyonu verilmiştir.

Çarpan dairesel jetlerle ilgili literatürde bugüne kadar yapılan çalışmalarda görülmüştür ki, jetle ve soğutulması istenen yüzeyle ilgili tüm teknik ve fiziksel parametreler elde edilen ölçüm sonuçlarında az ya da çok etkili olmuştur. Soğutulması istenen hedef yüzeyin ısıtılma şekli (sabit sıcaklık veya sabit ısı akısı sınır şartı gibi) ve imal edildiği malzeme, lüle malzemesi, lülenin hedefe çarptırılma konumu (dik veya açılı), hedefin şekli (düz, yarı-silindirik, içbükey, dışbükey v.s), ölçüm cihazları ve tekniği v.s. ısı transferini etkileyen önemli parametrelerdir. Ortak yönleri jet tipi olarak dairesel lüleleri kullanan bazı araştırmacıların yaptıkları çalışmalar Tablo 1’de özetlenmiştir. Tabloda çalışmaların gerçekleştirildiği Re sayısı aralıkları, lüle çapı ve ölçüm tekniği ve çalışma sonucunda elde edilen temel datalar özetle sunulmuştur.

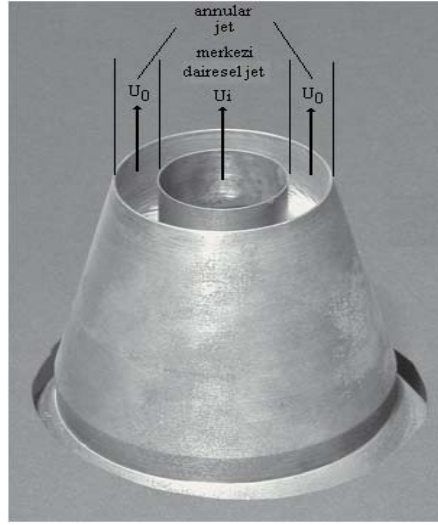
Tablo 1. Dairesel jetlerle ilgili olarak literatürde yapılan çalışmalar

Yazarlar	Lüle geometrisi	Lüle çapı (mm)	Re sayısı	h/d	Ölçülen Data ve Teknik
Mohanty ve Tawfek [25]	$l/d=12.3, 7.4, 5.28$	3, 5, 7	4860-34500	4-58	Yerel Nu, durma noktası Nu,
Huang ve El-Genk [27]	$l/d=25.8$	6.2	6000	1	Yerel Nu, ortalama Nu,
Baughn ve Shimizu [34]	Uzun boru, $l/d=72$	25	23750	2-14	Nu, sıvı kristal
Baughn v.d. [35]	Uzun boru, $l/d=72$	25	233300-55000	2-10	Nu ve verimlilik, sıvı kristal
Goldstein ve Behbahani [36]	Boru, $l/d=17$	12.7	35200-121000	6	Nu ve geri dönüş faktörü
Gundappa v.d. [23]	Boru, $l/d=10$	15.9	34000	2.6, 5.2 7.8	Nu ve türbülans
Obot v.d. [19-22]	$l/d=1-50$	19.05	15000-54000	2-12	Nu ve türbülans
Schlunder ve Gnielinski [15]	Uzun boru, belirsiz	20, 50	34000, 124000	1.25, 2.5, 5, 10	Yerel Sh ve türbülans
Vikers [37]	Kısa boru, belirsiz	Belirsiz	250-950	8-20	Yerel Nu
Smirnov v.d. [38]	Uzun boru, 80	2.5, 6.4, 10.7, 21.3, 30, 36.6	31000-50000	0.5-10	Ortalama ısı transfer katsayısı
Bouchez ve Goldstein [39]	Boru, 6; orifis 12	12.7	35000, 125000	6, 12	Yerel Nu
Halworth ve Bowley [40]	Lüle, 10	3.18-12.7	25000-190000	3.5-14	Yerel
Bilen [12]	Boru	15	10000-40000	6-14	Yerel Nu, durma noktası Nu, sıvı kristal
Hoogendorn [24]	Uzun boru	57	20000-90000	2-10	Yerel, sıvı kristal
Yokobori v.d. [41]	Lüle	40	1000-67000	2-12	Yerel Nu, durma noktası Nu
Kataoka et.al [42]	Lüle	28	4000-15000	2-10	Yerel Sh

2.2. Eş-Eksenli Jetler

2.3.1. Eş-Eksenli Jetlerin Hidrodinamik Yapısı

Farklı akımların karışımını içeren eş-eksenli jetler, mühendislik çalışmalarında önemli bir yer işgal ederler. İtici güç sistemlerinin ve güç üreten gaz türbini sistemlerinin yanma odalarında, yakıtla havanın karışımını sağlamada kullanıldıkları gibi, atık yakıtların yanma sistemlerinde de kullanılırlar. İyi tasarlanmış bir jet, ortalama yanma parametrelerinin üstünde bir performans sağlayarak hava ile yakıtı karıştırma başarısını sağlar.



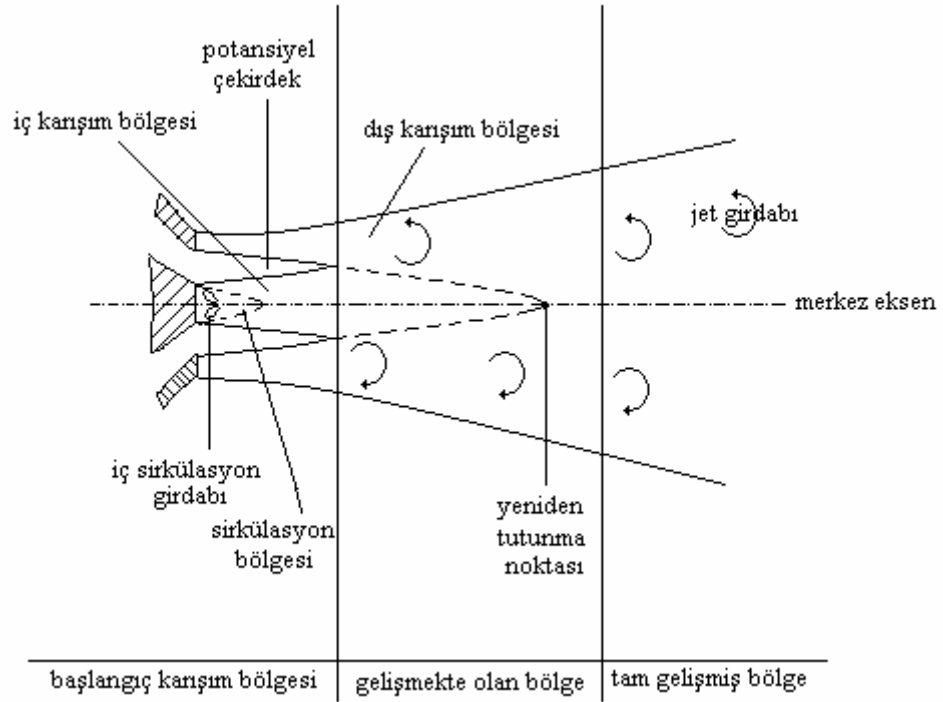
Şekil 2.7. Yanma odalarında kullanılan eş-eksenli bir jetin genel görünüşü

Eş-eksenli türbülanslı jetler türbülans (Reynolds)gerilmesine sahip akışların karışımı veya kesişmesini ihtiva etmesinden dolayı yanma odaları dışında jet pompalarında, iticilerde çoğaltıcılarda, karışım tanklarında, atık gazlarda, petrol esaslı yangınlarda, soğutma sistemlerinde, ön-karıştırıcı odalarda kullanılmaktadır. Ayrıca, bu jetlerin son yıllarda özellikle yanma dışında aerodinamik endüstrisinde, iklimlendirme sanayinde de sık kullanılmaya başlaması akış dinamiği ve ısı transferi karakteristiğini ilginç bir konu haline getirmiştir.

Eş-eksenli jetlerde hız oranı ve çap oranı gibi parametreler akışı en fazla etkileyen faktörlerin başında gelir. Yani:

$$\lambda = \frac{U_i}{U_0} \quad (2.18)$$

bölgelerinin uzunluğu değişiklik gösterecektir. İster akım sadece annular boşluktan geçsin, isterse hem içteki hem de dıştaki lüleden akım geçsin, eş eksenli bir jette jet çıkışından itibaren akım üç ana bölgeye ayrılır. Bunlar başlangıç bölgesi, gelişmekte olan bölge ve tam gelişmiş akış bölgeleridir (Şekil 2.9). Jet konfigürasyonlarına, hız oranlarına ve çap oranlarına bağlı olarak bu bölgelerin uzunluğu değişiklik gösterir. Ancak genel kanı jet tipi fark etmeksizin başlangıç bölgesinin lüle çıkışından itibaren dış lüle çapının iki katı 2 ila 3 katı kadar bir mesafeye yayıldığı yönündedir [44]. Gelişmekte olan bölge yüksek hızdaki akışların karıştığı alanı içermektedir ve başlangıç bölgesinden itibaren dış lüle çapının 3 katı (3D) kadar bir mesafede oluşur. Akabinde oluşan tam gelişmiş bölge akışın tamamen karıştığı ve tek bir jet gibi davrandığı birleşik jet bölgesidir. Başlangıç bölgesinde jet tiplerinin türbülans şiddeti ve ortalama hız üzerinde farklılık oluşturduğu ancak gelişmekte olan akış bölgesi ve tam gelişmiş akış bölgesinde üç tipin de birbirlerine benzer sonuçlara sahip olduğu görülmüştür [44-46].



Şekil 2.9. Merkezi dairesel jetin olmaması durumunda bir annular jetin şematik gösterilişi [44, 46]

Eş eksenli jetlerin, uygulamalı mühendislikte kullanılmasının dışında, bunların akış karakteristiğinin her halükarda incelenmesi hususu orijinal bir konudur. Farklı akış şartlarında başlayan iki ayrı akımın karışım olayı [47-49], yüksek skalalı uygun yapıları ihtiva etmesi [50, 51] ve türbülans karışımı [52] konunun bugüne kadar çeşitli araştırmacılar tarafından ele alınan kısımlarıdır.

Forstall ve Shapiro [53] dairesel bir eş-eksenli jette, hız oranının (λ) akış şeklini belirleyen en önemli parametre olduğunu savunmuşlardır. Forstall ve Shapiro, çalışmalarında eşit yoğunluk ve sıcaklıkta fakat farklı başlangıç hızlarında iki ayrı akımı iç ve dış lüleden göndererek, lüleden çıkıştan itibaren eksenel mesafede akış dinamiğini incelemişlerdir. Potansiyel çekirdeğin dışına çıkıldığında akışın tek bir jet gibi davrandığını ve λ 'nın etkisini yitirdiğini görmüşlerdir.

Durao ve Whitelaw [54], bir Pitot tüpü, bir Preston tüpü ve 45° açılı sıcak tel anemometre probu kullanarak lüle çıkışından itibaren $h/D_i=17$ (D_i : dış lülenin iç çapı) mesafesine kadar bir alanda eş-eksenli jete araştırmışlardır. Ölçümler $\lambda=0.62, 0.23$ ve 0.0 değerlerinde alınmıştır. Sonuçta asimetrik tek bir dairesel jete nazaran, eş-eksenli jette akımın kendisini toparlaması ve tamamen gelişmesi daha hızlı gerçekleşmiştir. Tam gelişmiş konuma ulaşma λ nın bir fonksiyonudur ve sıfır hız oranı (içteki merkezi lüleden akım geçmemesi, yalnızca annular jetin olması durumu) en hızlı gelişmeyi tamamlamıştır.

Warda ve ekibinin [55] uç kısma doğru daralarak lüle şeklini alan iç içe iki dairesel boruyla oluşturdukları jet sisteminde ($d_d/D_i=0.66$), merkezi yuvarlak jette bulunan sonuçlar literatürle uyum sağlarken, annular jetteki sonuçlar literatüre göre daha yüksek bir türbülans şiddeti nedeniyle farklılık göstermiştir. Warda ve arkadaşları merkezi jette:

- potansiyel çekirdek bölgesi uzunluğunun, akımın türbülans şiddetinin yanı sıra ortalama hız profiline de bağlı olduğunu,
- maksimum türbülans şiddetinin ortalama hız profillerinin bozulmaya başladığı noktalarda görüleceğini,
- jet çıkış hızını arttırmanın jet büyüme oranını azaltacağını bulmuşlardır.

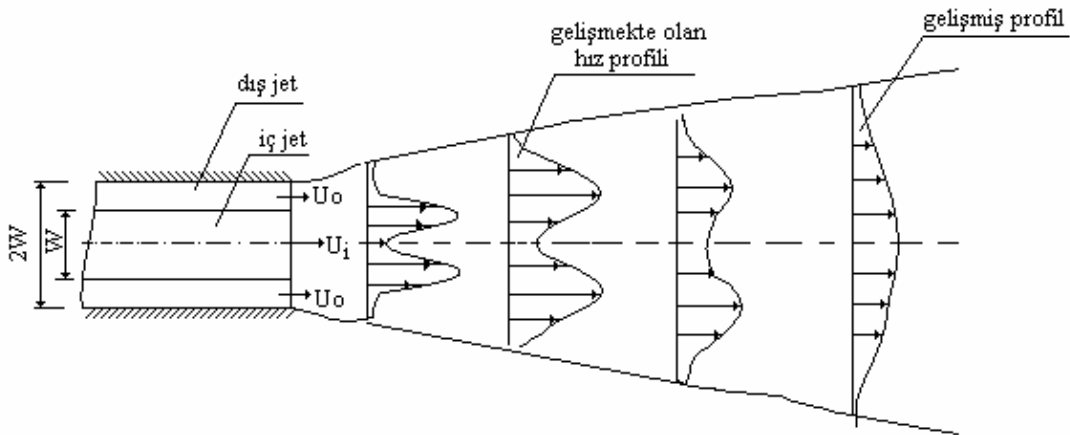
Öte yandan annular jette:

- yeniden tutunma mesafesinin $x/D_i=3$ noktasında gerçekleştiğini,
- yeniden tutunma noktasından sonra jetin sanki tek bir yuvarlak jet gibi davranış göstereceğini,
- hem tek jet hem de eş-eksenli çift jet durumlarında merkez hattında ölçülen ortalama hızın potansiyel çekirdek içerisinde jet çıkış hızına eşit olacağını bildirmişlerdir,

Warda nın bu tespitlerine ilave olarak Aly ve Rashed 'in [56] deneysel çalışmasında annular jette tek jete nispeten akımın daha hızlı geliştiği vurgulanmıştır. Çalışmalarında:

- annular jette yeniden tutunma mesafesinin $x/D_i=1.18$ olduğunu,
- tamamen iç içe karışmış bölgede ortalama hızın benzer olduğunu ve literatürdeki diğer annular ve tek jet çalışmalarındaki değerlere yakın bir değer olduğunu ($L_{PC}=3.24d_d$),
- gelişmekte olan bölgede hız profilinde ve türbülans şiddetinde benzerlik görüldüğünü, ancak bulunan değerlerin tek bir jetin değerlerine uymadığını, ayrıca bu uyumsuzluğa yakın jet mesafelerinin ve ani kesit daralmasının sebep olduğunu savunmuşlardır.

Eş eksenli jetlerle ilgili sayısal ve deneysel incelemeyi bir arada ihtiva eden detaylı bir çalışmada Mostafa ve arkadaşları [57] dikdörtgen şeklindeki bir kanaldan çıkan tam gelişmiş akışı ara eleman kullanarak bölmüşlerdir. Böylece hem iç hem de dış halkalarda ayrı hızlarda akış olması durumunda akış profilinin Şekil (2.10)'deki gibi olacağını belirtmişlerdir.



Şekil 2.10. Annular bir jette yapılmış bir çalışmada hız profilinin görünüşü ($U_o=20$ m/s, $U_i=2$ m/s) [57]

Mostafa ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada deneysel ölçümleri sıcak-tel anemometre ile gerçekleştirirken, sayısal kısmında sonlu farklar metodunu esas alan bir bilgisayar programı kullanmışlardır. Ölçülen değerlerden ortalama akım hızı, türbülanslı kinetik enerji ve kayma gerilmesi değerleri sayısal hesaplama sonucunda bulunan değerlerle kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonucunda görülen uyum, bu tür jet akışlarında matematiksel modelin akışı ne kadar iyi temsil edebileceğini ispatlanmıştır.

Ko ve Kwan [58] $\lambda=3.3$, 2 ve 1.43 gibi büyük değerlerde, lüle çıkışından itibaren 7 lüle çapı kadar bir mesafeye yayılmış alanda, eş-eksenli bir jetin basınç ve türbülans çalkantılarını ölçmüşlerdir. Akışı diğer araştırmacılar gibi üç bölgeye ayırmışlardır birinci bölgede merkezi

jetin potansiyel çekirdek bölgesi bitmesine rağmen annular jetlerin kor uzunluğu devam etmektedir. Bunu takip eden ikinci bölge gelişmekte olan bölgedir ve yaklaşık olarak iki veya üç lüle çapı (içteki lülenin çapı) kadar bir mesafeye yayılmıştır. Son bölge ise tam gelişmiş akım bölgesidir.

Eş-eksenli jetlerde içteki merkezi lüleden akış olmaması durumunda, yani yalnızca annular halkadan akış geçmesi durumunda içteki engelin çıkış geometrisi de akışı etkileyen önemli bir parametredir. Bu tip annular jetlerle ilgili deneysel çalışmalar Ko ve Chan tarafından [44-46] gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların ilkinde [44] üç tip annular jetin başlangıç bölgesindeki akışı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Jetlerden birinde akış halkadan geçirilmektedir ve ortadaki engelin çıkış ağzı düzdür. Diğer iki jetten birinde ortadaki engelin çıkış ağzı konik mermi şeklinde, diğerinde eliptik şekildedir. Diğer araştırmacılar gibi Ko ve Chan 'de jeti başlangıç bölgesi, gelişmekte olan akış bölgesi ve tam gelişmiş bölgelere ayırmışlardır. Jet tipi fark etmeksizin başlangıç bölgesinin lüle çıkışından itibaren dış lüle çapının iki katı ($2D_i$) kadar mesafede olduğu görülmüştür. Annular potansiyel bölgesi de bu bölge içerisinde gözlemlenmiştir.

Ko ve Chan [45] diğer ortak çalışmalarında bir önceki çalışmalarını ilerleterek ve ilave yaparak basınçtaki çalkantıları da tespit etmişlerdir. Neticede; başlangıç karışım bölgesinde konik engelin varlığı iç kısımda oluşan sirkülasyon bölgesinin ve girdapların yok olmasını sağlamıştır.

Bahsedilen bu üç tip annular jetin dış karışım bölgesinin incelendiği çalışmalar da yapılmıştır. Bu çalışmalardan birinde Chan ve Ko [46], bu jetlerin dış akış bölgesindeki ortalama basınç dağılımını ölçmüşlerdir. Dış karışım bölgesi tek bir jetin ortam havasıyla kesilmesi sonucu oluşan bölge gibi düşünülebilir. Elipsoidal ve konik tıkaçların olduğu annular jette gelişmekte olan akış bölgesinde sirkülasyonlar elimine edildiğinden ortalama basınç ölçümleri tek bir jetin ölçümleriyle çok iyi uyum sağlamaktadır. Ayrıca Ko ve Lam [59], basit bir annular jette iç ve dış karışım bölgesi akışlarını kıyasladıkları zaman, içteki engelin çıkış geometrisinin önemini ortaya çıkarmışlardır.

Bunların dışında Ko ve arkadaşları [60] akustik uyarma verdikleri annular jetin girişim dinamiğini inceleyen deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Champagne ve Wygnanski [61] de eş-eksenli bir jetin türbülans karakteristiğini deneysel olarak incelemişlerdir.

2.3.2. Çarpan Eş-Eksenli Jetin Yapısı

Önceki bölümde mühendislik uygulamalarında çarpan jetlerin önemi anlatıldı. Çalışmaların çoğunda lüle şekli olarak ağzı belli oranda daraltılmış dairesel lüleler ya da düz

dairesel borular kullanılmıştır. Hemen hemen söz konusu tüm çarpan jet uygulamalarında verimliliği arttırmak için düzenek boyutlarının azaltılması gerekir. Ancak bugüne kadar lüle ile çarpma yüzeyi arasında dar bir alanda lüle şeklinin etkisini araştırmak üzere ciddi deneyler yapılmamıştır.

Son yıllarda yapılan lüle şeklinin etkilerini çeşitli yollarla araştıran çalışmalar mevcuttur. Mesela Popiel ve Boguslawski [11] keskin köşeli orifis, Garimella ve Nenoydykin [62] çeşitli görünüş oranlarında ve çaplarda dairesel lüleler, Colucci ve Viskanta [63] iki farklı sınırlı hiperbolik lüle kullanarak lüle şeklinin çarpan jet üzerindeki etkisini araştırmışlardır.

Ancak bu çalışmalar içerisinde annular tip jete ilk kez Maki ve arkadaşlarının [64-66] bir çalışmada rastlanmaktadır. Bir annular çarpan jetin karakteristiği, çap oranına bağlıdır (d/D). Burada d içteki borunun dış çapı, D ise dıştaki borunun iç çapıdır. d/D oranı sıfıra yaklaştığında dairesel lüle, 1'e yaklaştığında ise slit tip lüle adını alır. Araştırmacılar; lüle-levha arasında oluşan akım karakteristiğinin annular jetlerin farklı d/D oranlarına ve yerleşme şekline göre değiştiğini bulmuşlardır.

Görüldüğü gibi farklı annular jetlerin akış dinamiği benzer şartlarda olmasa da araştırmacıların bugüne kadar çok da uzak olmadıkları bir çalışma alanı. Ancak annular jetlerin ısıtılmış yüzeye çarptırılarak ısı transferinin incelenmesi konusu şu ana kadar literatürde fazlaca yer alamamıştır. Konuyla ilgili bu eksikliği gidermek amacıyla annular türbülanslı jetlere ait yerel ısı transfer katsayısını iki boyutlu inceleyen bir çalışma Ichimiya [67] tarafından hazırlanmıştır. Ichimiya, sınırlandırılmış cidarda annular türbülanslı jetin ısı transfer karakteristiğini incelemiştir. Çarpan yüzey üzerinde yerel sıcaklık dağılımı sıcaklıkla renk değiştiren sıvı kristal malzemesi ile ölçülmüştür. Çarpma yüzeyi üzerinde sıcaklık ve Nu sayısı dağılımları iki boyutlu renk haritalarıyla gösterilmiştir. Annular d/D çap oranının, lüle-levha mesafesinin ve Reynolds sayısının radyal yönde değişen yerel Nu sayısı üzerine etkileri araştırılmıştır. Yerel Nu sayılarının deneysel bağıntıları bulunmuştur.

Sentetik annular jetin bir levhaya çarptırılması ve çarptırılmaması durumlarını inceleyen çalışmalar Travnicek ve Tesar [68,69] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çarpan annular jet durumunda yüzeyde naftalin süblimleşme tekniği kullanılarak kütle transferi hesaplamaları yapılmış, ayrıca akım görüntülüne tekniği uygulanmıştır.

Konuyla ilgili nümerik bir yaklaşım ise Chattopadhyay [70] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada annular jetin dairesel bir jete göre 20% oranda düşük bir ısı transferi oluşturacağı tespit edilmiştir. Nu sayısının, $Re^{0.55}$ ile orantılı bir dağılımı olduğu da bulunan sonuçlar arasındadır. Okajima [71] ise eş eksenli jetlerin kontrolü üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir.

Ülkemizde bu konudaki eksikliği gidermek amacıyla yapılan bir çalışmada Erdem [72] iki slot jetin arasına ara eleman yerleştirerek ikiz jet adını verdiği iki çıkış ağızlı jet oluşturmuş ve bu jetin akış karakteristiğini ve düz yüzeye çarpması halini incelemiştir. Lüle-levha mesafesinin 2, 4 ve 8 değerlerinde ikiz jetin düz plakaya çarpması durumunda jet yüzeye yaklaştığında levhanın etkisiyle jet hızında düşme görülmüştür. Yüzeye jet merkez hattının kesişim bölgesinde durma noktası oluşmuştur. Maksimum hızlar çarpma bölgesinde hızlanmış, duvar jeti bölgesinde azalma göstermiştir.

Literatürde çarpan eş-eksenli jetler için yüzeyde ısı transferi çalışmalarına rastlandığı gibi yalnızca annular halkadan akış olması hali incelenmiştir. Literatürde içteki merkezi lüleden akış geçmesi durumlarında akış dinamiği çalışmaları mevcut olmasına rağmen ısı transferi araştırmalarına pek rastlanılmamıştır. Hazırlanan bu çalışmanın, bu konudaki eksikliği gidermek adına önemli bir işleve sahip olacağı düşünülmektedir.

Tablo 2. Eş-eksenli jetlerle ilgili olarak literatürde yapılan çalışmalar

Yazarlar	Akış türü	Çap Oranı, d/D	Hız Oranı, λ	Ölçülen Data ve Kullanılan Deneysel Teknik
Warda ve arkadaşları [55]	Annular akış ve merkezi akış ayrı ayrı incelenmiş	0.66	0 ve ∞	Türblans şiddeti ve ortalama hız, Laser Doppler
Mostafa et.al. [57]	İkiz jet, ortada akım var	¹ Merkezi jet AR= 4 Annular AR= 8	0.1	Türblans şiddeti ve ortalama hız, Hot-wire anemometre
Aly ve Rashed [56]	Hem içte hem dışta akış	0.02	0.34	Türblans şiddeti ve ortalama hız, Hot-wire anemometre
Ko ve Kwan [58]	Hem içte hem dışta akış	0.45	3.3, 2 ve 1.43	Basınç ve türbülans çalkantıları, Hot-wire anemometre
Durao ve Whitelaw [54]	Hem içte hem dışta akış Yalnızca annular jet	Belli değil	0.62, 0.23 ve 0	Türblans şiddeti ve ortalama hız, Pitot tüpü, Preston tüpü Hot-wire anemometre
Ko ve Chan [44,45]	Annular akış iç bölgesi	0.45	0	Türblans şiddeti ve ortalama hız, Hot-wire anemometre
Chan ve Ko [46]	Annular akış dış bölgesi	0.45	0	Türblans şiddeti ve ortalama hız, Hot-wire anemometre
Erdem [72]	İkiz jet, ortada akım yok Offset jet	--	0	Türblans şiddeti, basınç ve ortalama hız, Hot-wire anemometre
Ichimiya [67]	Sadece annular jet	0.51, 0.7, 0.8, 0.9	0	Nu sayısı, sıvı kristal tekniği
Travnicek ve Tesar [68,69]	Sadece Annular jet	0.95	0	Sh sayısı, naftalin süblimleşme tekniği ve sis yöntemiyle akım görüntüleme
Murakami ve Papamoschou, [43]	Hem iç hem dış akış var	0.71, 0.58, 0.5	2	Basınç, debi ve hız, Pitot probu
Maki [64]	Sadece Annular jet	0.8, 0.87, 0.94, 0.98, 0.84, 0.9	0	Sh sayısı, naftalin süblimleşme tekniği

¹ AR: Görünüş oranı

3. DENEYSEL ÇALIŞMANIN TANITILMASI

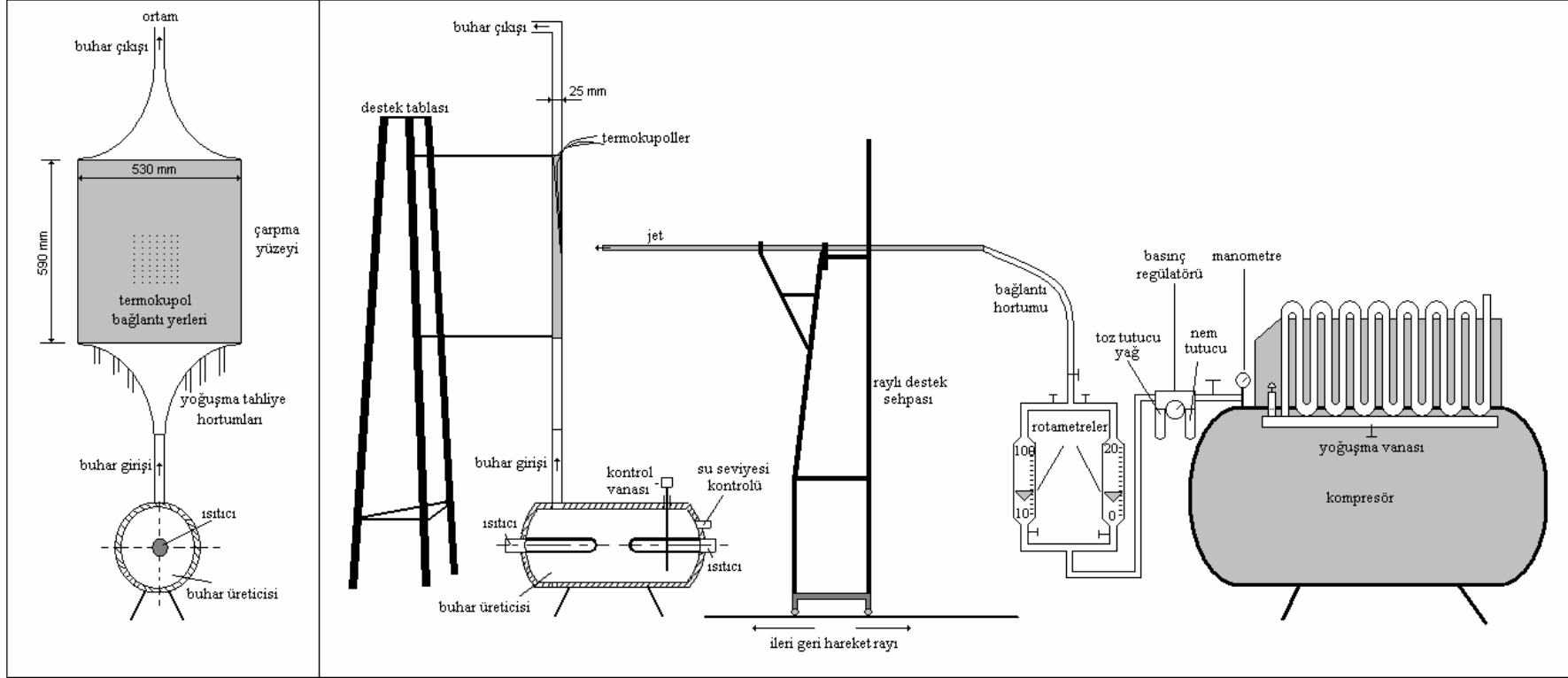
Bu çalışmada değişik çapta düz dairesel ve eş eksenli lüleler kullanılmış, akımın düz bir yüzeye çarptırılmasıyla optimum lüle tipi tespit edilmeye çalışılmıştır. Bir buhar kazanından elde edilen su buharının ince bir kanaldan geçirilmesiyle yüzeyde sabit sıcaklık sınır şartı elde edilmiştir. Deney düzeneğinin önden ve yandan görünüşü Şekil (3.1)'de verilmiştir. Ayrıca EK-D'de deney düzeneğinin çeşitli açılardan fotoğrafları verilmiştir.

3.1. Deney Düzeneğinin Tanıtılması

3.1.1. Kompresör ve Debi Ölçme Sistemi

Jet akımını sağlamak üzere 12 bar basınca kadar hava depolayabilen yeni bir kompresör imal edilmiştir. Kompresör 500 lt kapasiteli tanka sahip olup, 10 bar basıncın altında otomatik açılıp kapanan, 7.5 kW gücünde elektrik motoruyla çalışmaktadır (EK-D, Resim D.3.). Kompresörün hemen önünde tankta biriken havanın basıncını gösteren bir manometre bulunmaktadır. Manometrenin yanında bir çıkış vanası ve vanaya bağlı bir şartlandırıcı kullanılmaktadır. Şartlandırıcı üzerindeki basınç regülâtörü yardımıyla rotametrelerce istenen basınçta hava akımı gönderilebilmiştir. Şartlandırıcı kompresörden çıkan havanın nem, toz ve kirini tutan bir filtrasyon bölümüne sahiptir. Kompresör imal edilirken, yüksek basınçta sıkıştırılan havanın ortam sıcaklığına kadar soğutulabilmesi için havanın geçtiği borulara tırtıklı kanatçıklar takılarak soğutma yapılmıştır. Deneme deneylerinde kompresör çıkışına yerleştirilen ısı çiftleriyle havanın sıcaklığı ölçülmüş, ortam sıcaklığıyla uyumlu olduğu izlenmiştir.

Jet çıkış hızını belirlemede kompresör çıkışına takılan farklı ölçme aralığına sahip iki adet rotametre kullanılmıştır. Rotametrelerden biri 0-20 m³/h, diğeri aynı marka 10-100 m³/h ölçüm aralığına sahiptir. Rotametreler kompresör ve lüle arasında birbirine paralel bağlanmıştır. Kompresörlerden rotametrelerce geçiş Şekil (3.1)'de gösterilmiştir.



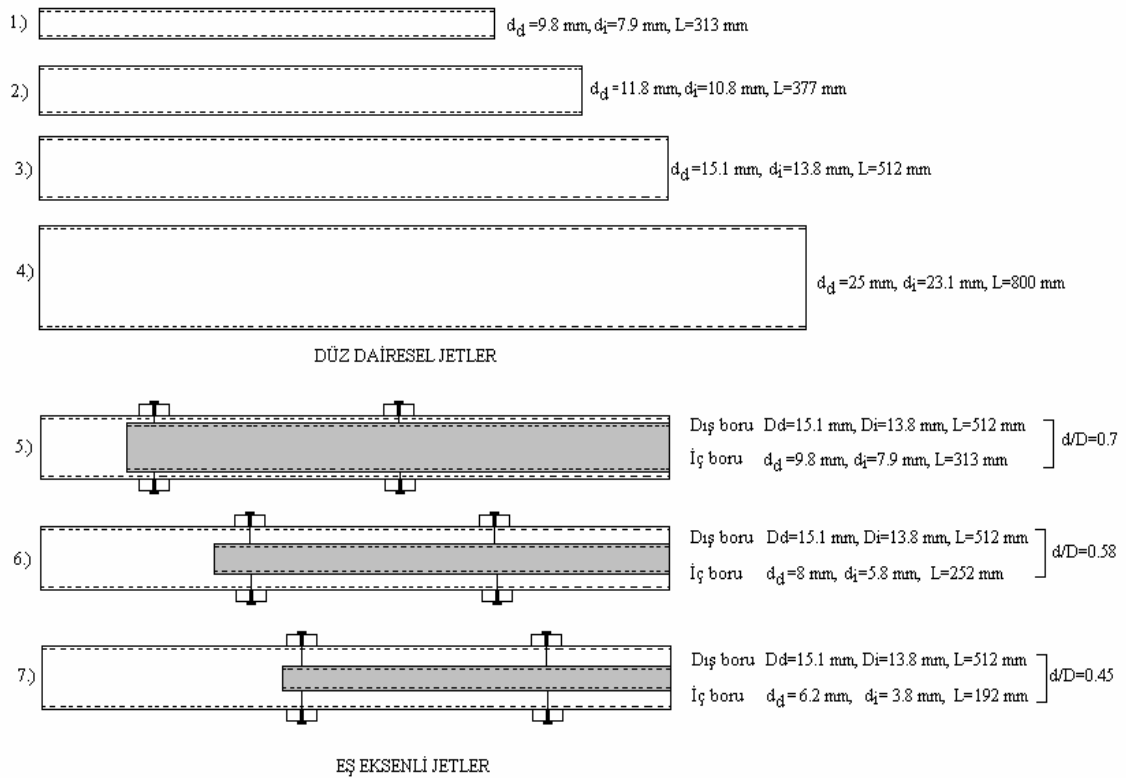
ÇARPMA LEVHASININ
ÖNDEN GÖRÜNÜŞÜ

DENEY DÜZENEGİNİN YANDAN GÖRÜNÜŞÜ

Şekil 3.1. Deney düzeneğinin genel görünüşü

3.1.2.Lüleler

Deneylerde lüle olarak düz dairesel borular kullanılmıştır. Bunlardan dördü farklı çaplarda düz boru, üçü iç içe halka boru şeklindedir. Borular dikişsiz, pürüzsüz alüminyum malzemelerden imal edilmiştir. Lüleler rotametre çıkışından itibaren 2 metre uzunluğunda düz hortumlarla bağlanmıştır. Lüle uzunluğu tespit edilirken, dairesel akışta tam gelişmiş akımın elde edilebileceği 32D uzunluğu esas alınmıştır. Boru çapları ve uzunlukları şematik olarak Şekil (3.2)'de verilmiştir.

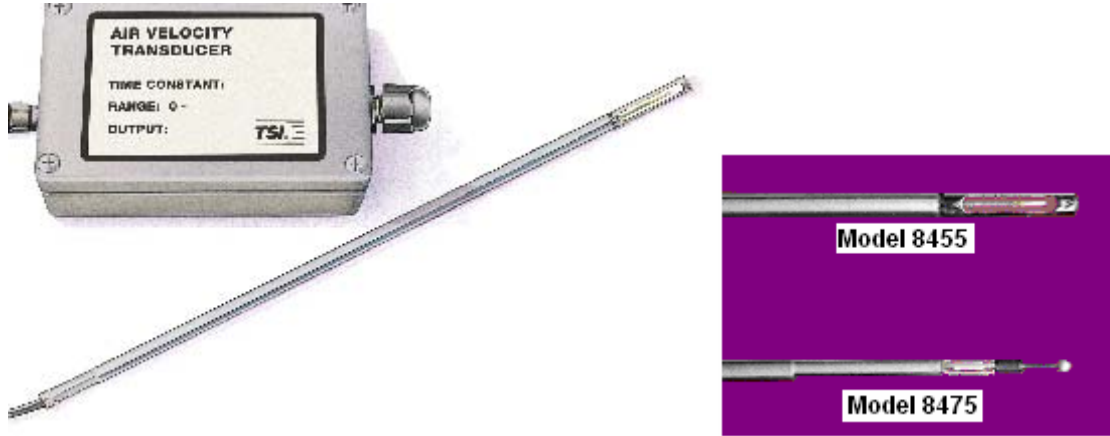


Şekil 3.2. Lüle şekilleri ve ebatları

Eş eksenli jetlerde içteki merkezi jetle beraber annular jetin de olması durumunda deneyler yapılmıştır. Lüleler iç içe geçirilirken dıştaki boruya etrafından bir bronz bilezik geçirilmiş, bilezik üzerinden 3 ayrı noktadan cıvatalar geçirilerek içteki lüle orta ekseninde sabit tutulmuştur. Cıvataların lülenin içinde kalan kısmının, akımı bozmaması için 1 mm kalınlığında olması sağlanmıştır.

3.1.3. Hız Ölçüm Yöntemi: Sıcak-Tel Anemometresi

Deneylerde ortalama hız ve türbülans şiddeti ölçümü için sıcak tel anemometre prensibiyle çalışan (hot-wire anemometre) TSI marka 8455, ve 8475 Model hız ölçme problemleri kullanılmıştır (Şekil 3.3).

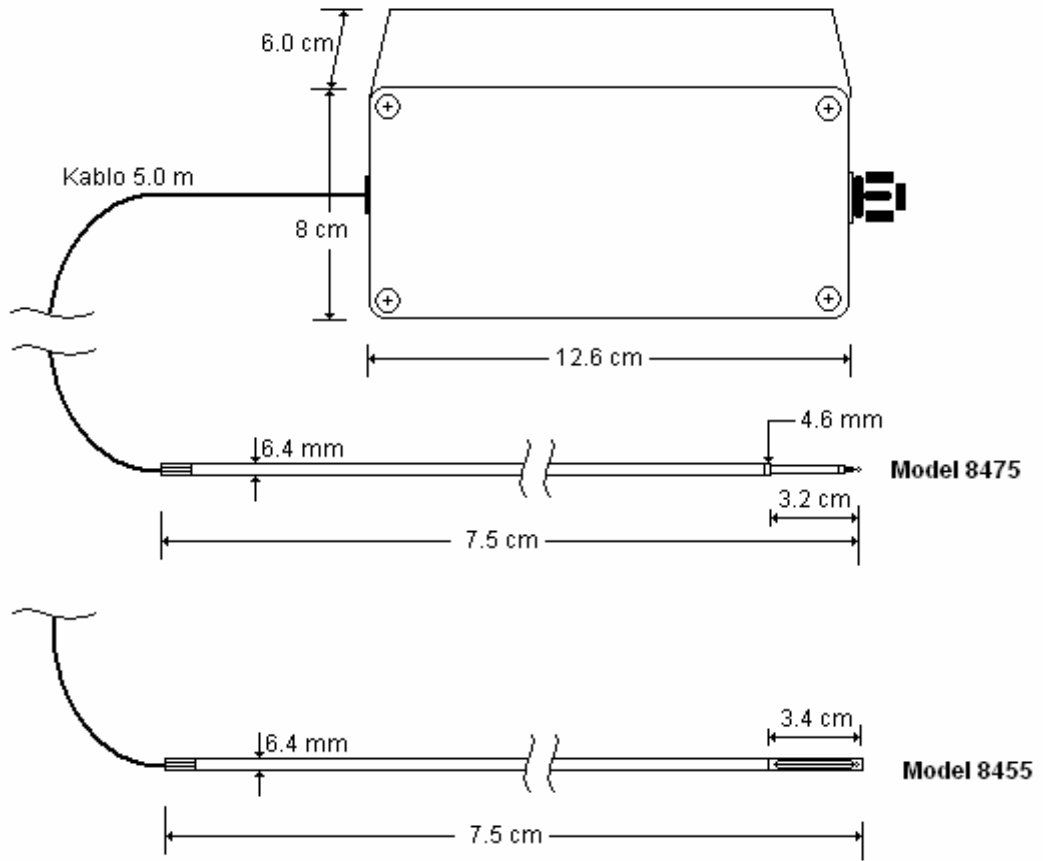


Şekil 3.3. Sıcak tel anemometre prensibiyle çalışan hız ölçer

TSI hava hızölçerleri sıcak-tel anemometre prensibiyle hızları ölçer. Aynı tipteki sensörler geniş dinamik alanda hassas ölçüm yapabilmek için kolaylık sağlamaktadır. Uzun ömürlü pratik kullanımlı **Model 8455**, genel amaçlı prob olup, yüksek hassasiyet ve hızlı tepki verme özelliklerine sahip olması sebebiyle çok çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Prob, koruma kılıflı olup sağlam bir seramik sensöre sahiptir.

Çok yönlü hareket edebilen **Model 8475**, düşük hızlarda ve bilinmeyen veya değişken olan akım yönlerinde ideal bir probdur. Her iki prob da genel mühendislik alanlarında birçok uygulamada kullanılabilir (yeşil ev uygulamaları, iklimlendirme uygulamaları, çevre faktörüyle ilgili çalışmalar v.s).

Deneylerde düşük hızlarda **Model 8475** orta ve yüksek hızlarda **Model 8455** kullanılmıştır. **Model 8455** için ölçüm aralığı: 0.125 m/s' den 50.0 m/s' ye kadardır. **Model 8475** için ölçüm aralığı ise 0.05 m/s' den 2.5 m/s' ye kadardır. Üretici firma tarafından anemometreden gelebilecek maksimum belirsizlik değeri her bir okumada $\pm 2\%$, seçilmiş tüm alanda ise $\pm 0.5\%$ olarak verilmektedir. Probun genel görünüşü Şekil (3.3)' de verilmiştir. Şekil (3.4)' de ise anemometrenin, kablo ve proba bağlantısı ile anemometrenin, probun ve kablunun ebatları verilmiştir.



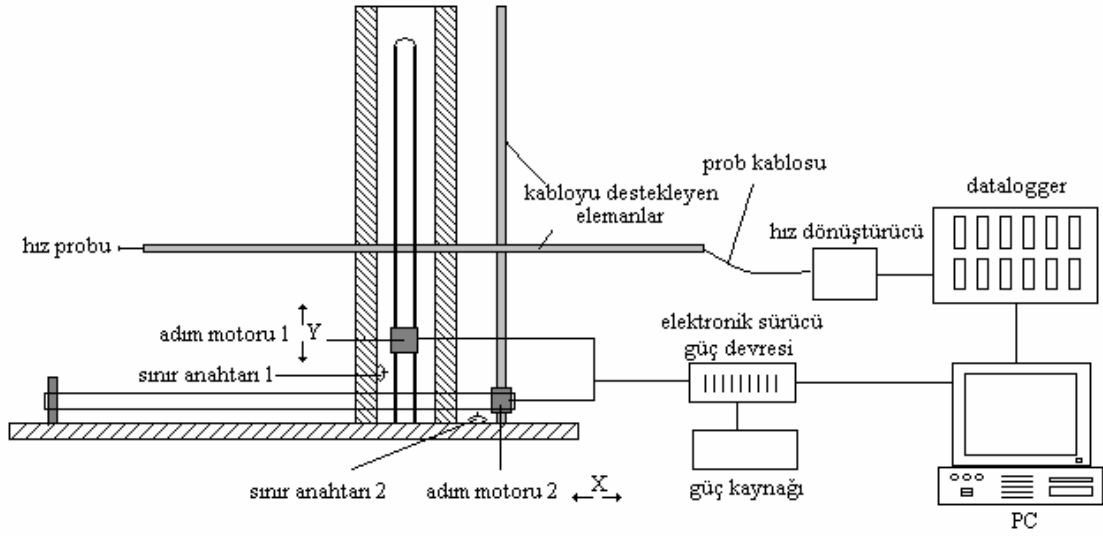
Şekil 3.4. Anemometrenin problara bağlantısı ve ebatları

3.1.4. Hareket Mekanizması

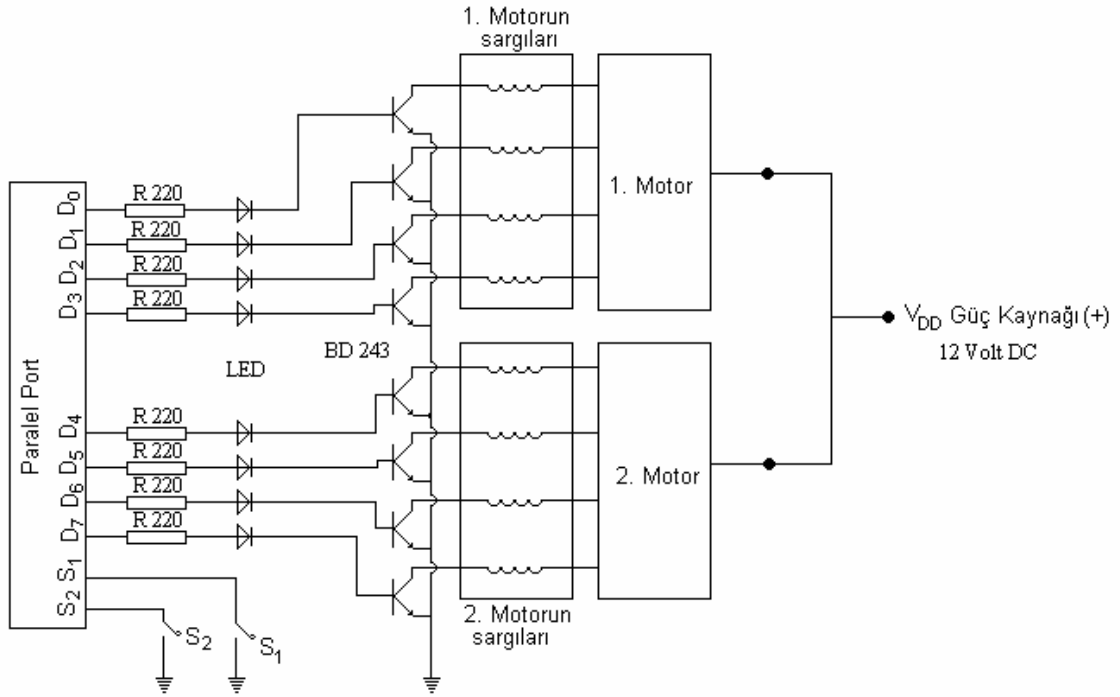
Çarpma levhasının üstünde ve değişken lüle-levha mesafelerinde anemometreyi elle kontrol ederek hareket ettirmek çok büyük deneysel hatalara neden olacaktır. Bu nedenle probu taşıması ve istenilen yönlerde hareket ettirebilmesi için iki yönlü harekete sahip bir hareket mekanizması tasarlanmıştır.

Mekanizmanın genel görünüşü Şekil (3.5)'de verilmiştir. Mekanizma, bilgisayar kontrollü olarak MATLAB 6.5 versiyonunun m-file dosya editöründe hazırlanan bir programla çalıştırılmaktadır. Yatayda ileri-geri (X) düşeyde yukarı-aşağı (Y) yönlerdeki hareketi, besleme gerilimi 12 volt olan her biri dört uyarımlı iki adet adım motoru sağlamaktadır. Yataydaki adım motorunun her bir adımında prob ucu X doğrultusunda 0.2777 mm mesafe kat etmektedir. Düşeydeki adım motorunun her bir adımında prob ucu Y doğrultusunda 0.6666 mm mesafe kat etmektedir. Hem X hem Y yönünde toplam strok boyu 300 mm' dir. Her bir motor BD243 serili transistor gruplarından oluşmuş bir sürücü devresi ile sürülmektedir. Bu sürücü devresini tetikleyen adım ve yönü tayin eden tetikleyici sinyaller paralel porttan alınmaktadır. Paralel

porttaki sinyaller 5V seviyesindedir. Şekil (3.6)'da Mekanizmanın elektronik devre şeması verilmiştir.



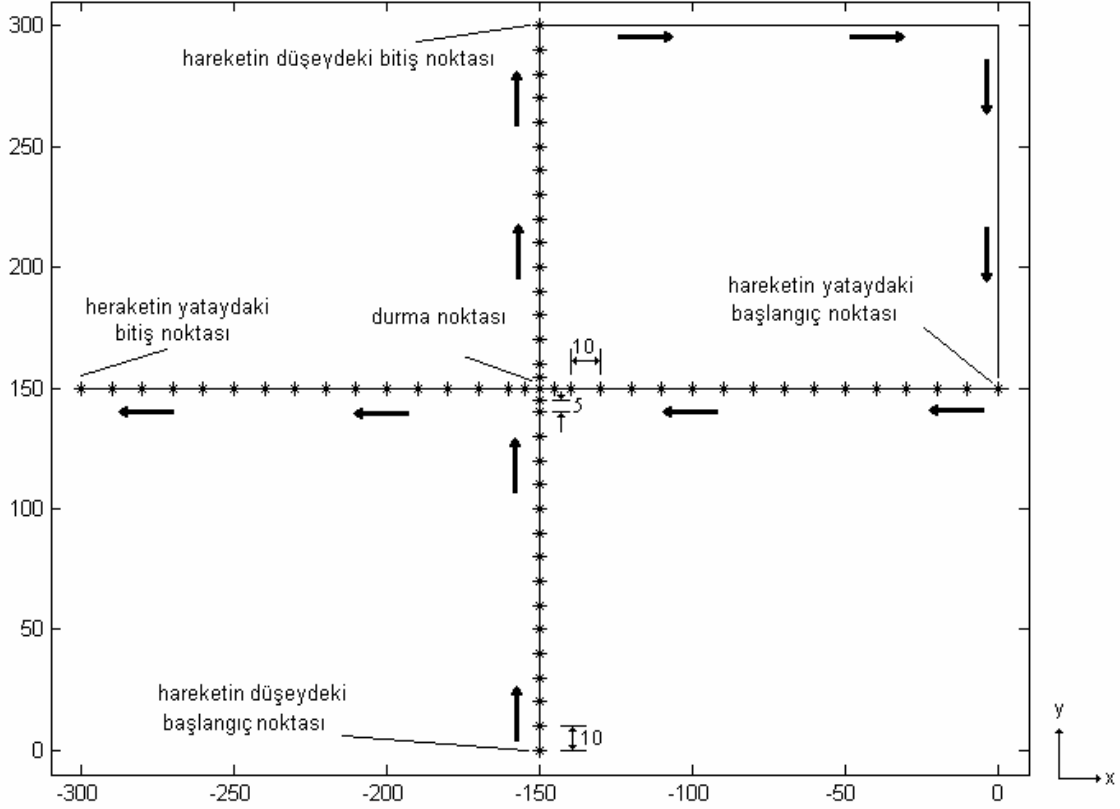
Şekil 3.5. Travers mekanizması ve bağlantıları



Şekil 3.6. Mekanizmayı çalıştıran elektronik kontrol devresi

MATLAB 6.5'de hazırlanmış program içerisinde, DAQ (Data Acquisition Toolbox) alt programından yararlanarak gerekli paralel port konfigürasyonları istenildiği gibi ayarlanabilir.

Mekanizma üzerinde X ve Y doğrultularında sınırlayıcı anahtarlar yerleştirilmiştir. Sistem üzerinde geri besleme yoktur. Motorların adım sayısı program içerisinde saydırılarak istenen koordinata ulaşılmaktadır. Mekanizmanın levha üzerinde izlediği yol ve koordinat düzlemi Şekil (3.7)'de verilmiştir. Programın tamamı EK-C dosyasında verilmiştir.

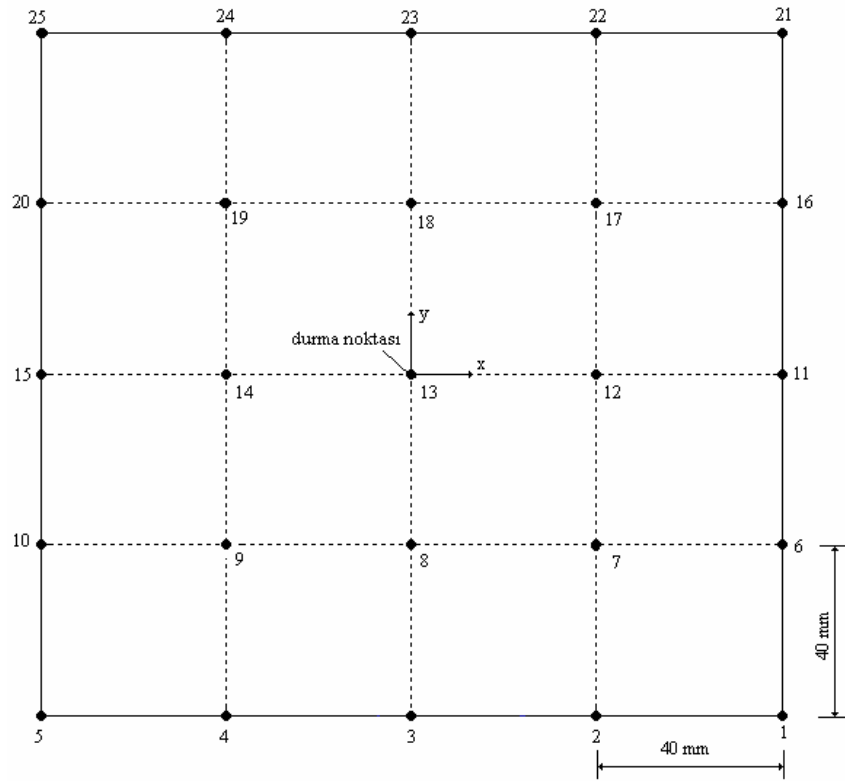


Şekil 3.7. Mekanizmanın levha üzerinde izlediği yol ve koordinat düzlemi

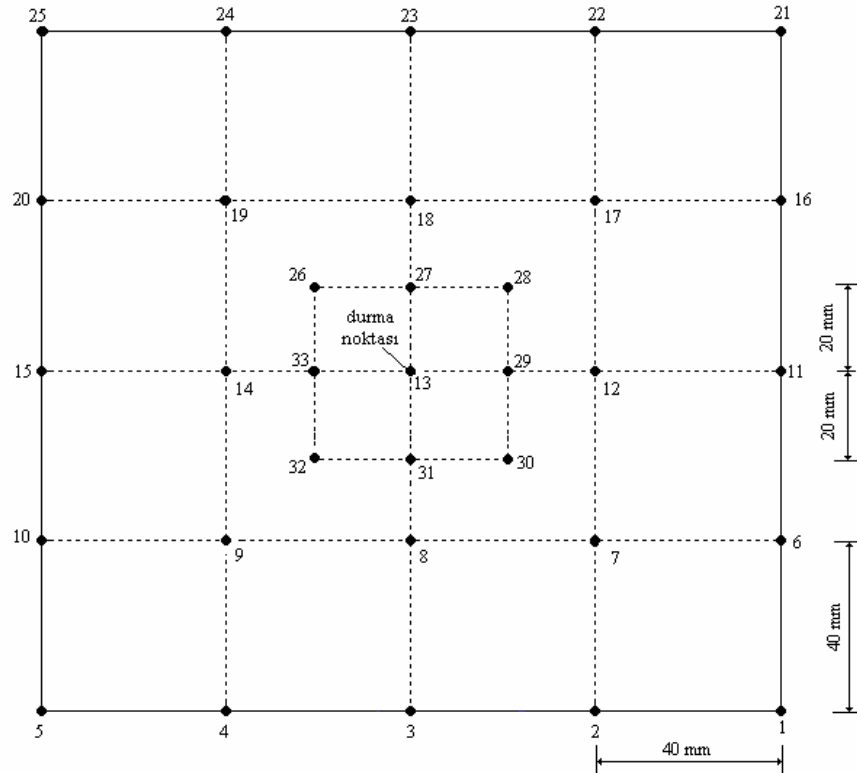
3.1.5. Sıcaklık Ölçümü

Deneylerde sıcaklık ölçümleri 0.5 mm kalınlıklı teflon izoleli T tipi Cu-Cons (bakır-konstant) ısı çiftleriyle yapılmıştır. Isıl çiftlerin bir ucu çarpma levhasının arkasında açılan 0.3 mm derinlikli çukurlara ısıya ve suya dayanıklı epoxy-metal yapıştırıcı ile yapıştırılmış, diğer ucunun data toplayıcıya bağlantısı yapılmıştır. Sıcaklık ölçümleri levha üzerinde 25 noktada alınmış, ayrıca jet çıkış sıcaklığı ve ortam sıcaklığı sürekli kaydedilmiştir. Levha üzerinde sıcaklık ölçümünün yapıldığı noktalar Şekil (3.8.)'de şematik olarak verilmiştir.

Eş eksenli jet deneylerinde özellikle durma noktası etrafındaki yakın halkanın ısı transferi özelliğini detaylı inceleyebilmek için ölçüm noktaları değiştirilmiştir. Şekil (3.9)'da eş-eksenli jet deneylerinde levha üzerinde ölçüm alınan noktalar gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Düz dairesel jet deneylerinde sıcaklık ölçüm noktaları ve koordinat düzlemi



Şekil 3.9. Eş-eksenli jet deneylerinde sıcaklık ölçüm noktaları ve koordinat düzlemi

3.1.6. Data Toplama ve Kaydetme

Her iki probun ölçtüğü hız değerleri ve ısı çiftleriyle ölçülen sıcaklık değerleri data toplayıcı (datalogger) bağlantısıyla direkt bilgisayara kaydedilebilmektedir. Data toplayıcısı CAMPBELL marka CR10 X modeldir. Data toplayıcı tamamen programlanabilir ve kontrol edilebilir bir yapıya sahiptir. Özellikle zaman ayarının yapılabilmesi ve hızlı tepki verme süresine sahip olması esnek bir programı olması ve de program üzerinde değişiklik yaparken bilgisayar veya elektronik mühendisliği bilgisi gerektirmeyen genel kodlamaların yapılmış olması cihazın kullanılmasında büyük avantajlar sağlamıştır. EK-D, Resim D.1’de datalogger ana ünitesinin resmi, Şekil D.2’de ısı çiftlerin bağlandığı ünitenin (multiplexier) resmi verilmiştir.

3.1.7. Çarpma Levhası

Çarpma levhası olarak; 0.5 mm kalınlığında Cr-Ni paslanmaz sacdan 53 cm genişliğinde 59 cm yüksekliğinde, 2.5 cm kalınlığında düşey konumda ayakta duran bir kanal imal edilmiştir. Kanalin ön yüzeyi çarpma yüzeyi olarak teste tabii tutulmuştur. Bir buhar kazanından elde edilen su buharı kanala aşağıdan yukarıya doğru gönderilerek sabit sıcaklık sınır şartı sağlanmıştır. Buhar kazanı her biri 2000 W değerinde iki ısıtıcı yardımıyla 1.5 mm kalınlıklı galvanizli sacdan imal edilmiştir. Tüm deneylerde 96 °C sabit sıcaklık ölçülmüştür. Sacın yüzeylerini yalayarak geçen buhar bir bacayla dışarıya ortam sıcaklığına atılmıştır. Yüzey üzerinde çarpma bölgesinde akımı bozmaması için ısı çiftler sacın arkasına yapıştırılmıştır. Jetin çarptırıldığı paslanmaz saca 0.3 mm derinliğinde delikler açılarak ısı çift uçları epoksi-metal metal-epoksi karışımlı yapıştırıcı ile arka yüzeye yapıştırılmıştır. Isı çiftlerin diğer uçlarının data toplayıcısına bağlantısı yapılmış, sıcaklıklar bilgisayar kontrolünde kaydedilmiştir.

3.2. Deneysel Çalışmanın Yürütülmesi

Bu çalışmanın tüm aşamaları aşağıdaki sıralamaya göre gerçekleştirilmiştir:

- *$d=7.9, 10.8, 13.8$ ve 23.1 mm çaptaki düz borularla sıcaklık ölçüm deneyleri yapılmıştır.*

Her bir lüleyle $h/d=4-12$ arasında değiştirilmiştir Her bir h/d mesafesinde $Re=5000-25000$ olması durumunda toplam 25 deney yapılmıştır. Bir deneyde toplam 25 sıcaklık datası ölçülmüştür. Tüm deneylerde **2500** data ölçülmüştür.

- $d=7.9, 10.8, 13.8$ ve 23.1 çaptaki düz borularla, prob levhanın önündeyken hız ölçüm (serbest jet) deneyleri yapılmıştır.

Her bir lüleyle $h/d=4-12$ arasında değiştirilmiştir Her bir h/d mesafesinde $Re=5000-25000$ değerlerinde test edilmiştir. Levha üzerinde yatayda 30 düşeyde 30 olmak üzere toplam 60 noktada hız ölçülmüştür. Her bir noktada prob 60 saniye bekletilmiş her 2 saniyede bir ölçüm alınmıştır. Böylece her bir deneyde 1800 data ölçülmüştür. Tüm deneylerde **180000** data ölçülmüştür.

- $d=7.9, 10.8, 13.8$ ve 23.1 çaptaki düz borularla, çarpma levhası olmaması durumunda hız ölçüm deneyleri yapılmıştır.

Çarpma levhası olmaması durumunda serbest jette her bir lüleyle; prob lülenin çıkış ağzından itibaren $z/d=0-8$ arasındaki mesafelerde $Re=5000-25000$ arasındaki değerlerde hız ölçülmüştür. Her bir deneyde 1800 data ölçülmüştür. Tüm deneylerde **180000** data ölçülmüştür.

- $d/D=0.7, 0.58$ ve 0.45 iç/dış çap oranlarındaki eş eksenli lüleyle sıcaklık ölçümleri yapılmıştır.

Her bir lüleyle $h/d=4-12$, $Re=5000-25000$ olması durumunda deneyler yapılmıştır. Bir deneyde toplam 25 sıcaklık datası ölçülmüştür. Tüm deneylerde **1875** data ölçülmüştür.

- $d/D=0.7, 0.58$ ve 0.45 iç/dış çap oranlarındaki eş-eksenli lüleyle çarpma levhası olmaması durumunda (serbest jet) hız ölçüm deneyleri yapılmıştır.

Deneyler yalnızca x ekseninde yapılmıştır. $z/d=0.8$ aralığında $Re=5000-25000$ seçilmiştir. Böylece her bir deneyde 900 data, toplamda **67500** data ölçülmüştür.

Böylece tüm deneylerde 431875 data ölçülmüştür.

- STATISTICA programında istatistiksel regresyon analizi yapılarak ölçülen dataların birbirleriyle ilgisini gösteren amprik bağıntılar bulunmuştur.
- MATHEMATICA 4.2 programı kullanılarak elde edilen dataların belirsizlik analizi yapılmıştır.

Çalışmanın yazılması esnasında da bu sıralama esas alınmıştır.

4. DENEYSEL VERİLERİN HESAPLANMA YÖNTEMİ

Sıcaklık ölçümü sürekli rejimde gerçekleştirilmiştir. Levhanın iletimle olan ısı kaybı ihmal edilerek arka yüzeyde okunan sıcaklıklardan gidilerek ısı transfer miktarı yani Nu sayısı hesaplanmıştır. Lüleden gönderilen havanın yüzeyi zorlanmış konveksiyonla soğutacağı aşîkârdır. O halde çarpma yüzeyindeki net ısı bulunur ve taşınım ile ısı transferine eşitlenirse, h ısı transfer katsayısı bulunacaktır. Levha, arkasından geçirilen buhar yardımıyla sabit sıcaklığa getirildiği için levhanın arka yüzeyinde yoğuşma neticesinde oluşan toplam ısıyı bulmak gerekir. Daha sonra düşey konumdaki levhanın doğal taşınım ve radyasyonla oluşan kayıp ısı miktarlarını hesaplamak ve yoğuşmayla kazanılan ısıdan çıkarmak gerekir. Böylece kalan net ısı, zorlanmış taşınım ile olan ısı miktarına eşitlenirse ısı transfer katsayısı bulunur. Aşağıda $d=7.9$ mm, $h/d=4$, $Re=25000$ şartlarında yapılan bir deneydeki veriler kullanılarak, yerel Nu sayısının hesabı detaylı olarak gösterilmiştir.

4.1. Düz Dairesel Lülelerde Yerel Nu Sayısının Hesaplanması

4.1.1. Düşey Levhadan Yoğuşmayla Elde Edilen Isı Transferi Miktarı

Film yoğuşması birçok karmaşık olayı birlikte içerebilir. Film levhanın üst ucunda oluşur ve yer çekiminin etkisi altında aşağıya doğru akar. $T_{sat} < T_s$ sıcaklığındaki yüzeye film üzerinden ısı geçişi vardır. Film yoğuşmasındaki karmaşıklıklar bir tarafa bırakılacak olursa, Nusselt sayısının bir çözümlemesinden türeyen kabullerin yapılmasıyla uygulamaya dönük sonuçlar elde edilebilir [7]. Bu kabuller:

- a.) Sıvı filmi için laminar akış ve sabit özellikler kabul edilir.
- b.) Gazın, saf bir buhar olduğu ve T_{sat} sıcaklığına eşit sabit bir sıcaklıkta bulunduğu kabul edilir. Buharın içinde bir sıcaklık gradyanı olmayınca, sıvı-buhar ara yüzeyine ısı geçişi, sadece yoğuşma ile olabilir; buhardan iletimle ısı geçmez.
- c.) Sıvı-buhar ara yüzeyindeki kayma gerilmesi ihmal edilir, buna bağlı olarak $\partial u / \partial y|_{y=\delta} = 0$ olduğu varsayılır. Bu kabul ve daha önceki sabit buhar sıcaklığı kabulü ile buhara ait hız ve sıcaklık sınır tabakalarının göz önüne alınması gereksiz olur.
- d.) Sıvı filmi içinde, kütle taşınımı ile momentum ve enerji aktarımlarının göz ardı edilebilir olduğu kabul edilir. Bu kabul, film içindeki düşük hızlardan dolayı gerçekçidir. Buna göre film üzerinden ısı geçişi yalnızca iletim ile gerçekleşir ve bu durumda da sıvı içindeki sıcaklık dağılımı doğrusaldır [7].

Bu kabuller altında film yoğuşması ile aktarılan ısı transferi için ampirik bir bağıntı geliştirilmiştir.

$$Q_y = h_y \cdot A \cdot (T_{sat} - T_s) \quad (4.1)$$

$$h_y = 0.943 \left[\frac{g \rho_L (\rho_L - \rho_v) k_L^3 h'_{fg}}{\mu_L (T_{sat} - T_s) L} \right]^{1/4} \quad (4.2)$$

burada gizli buharlaşma ısısı (h_{fg}) yerine ve Rohsenow tarafından geliştirilen Jakob sayısı cinsinden h'_{fg} ifadesi kullanılır [7]:

$$h'_{fg} = h_{fg} (1 + 0.68 Ja) \quad (4.3)$$

burada Jacob (Ja) sayısı yoğuşmayla ısı transferinde kullanılan boyutsuz bir sayıdır:

$$Ja = Cp_L \frac{\Delta T}{h_{fg}} = Cp_L \frac{(T_{sat} - T_s)}{h_{fg}} \quad (4.4)$$

Bu hesaplamaları yapmak için önce formüllerde geçen termo fiziksel özellikler bulunur. h_{fg} için T_{sat} değerine bağlı olarak diğer tüm özellikler için ise film sıcaklığına bağlı olarak tablolardan şu değerler bulunmuştur:

T_{sat} = 1 atm basınçta doymuş buhar sıcaklığı, 100°C

T_s = Yüzeyde yoğuşma neticesinde ölçülen sabit sıcaklık değerleri, 96°C

$$\text{Buna göre: } T_f = \frac{T_{sat} + T_s}{2} = \frac{100 + 96}{2} = 98^\circ\text{C} \text{ bulunur.}$$

$T_f=98^\circ\text{C}$ için özellikler:

$$Cp_L=4215 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$k_L=0.6782 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\rho_L=960.06 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_v=0.56048 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_L=0.291 \times 10^{-3} \text{ kgm/sn}$$

$$h_{fg}=2.257 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

buna göre:

$$Ja = Cp_L \frac{(T_{sat} - T_s)}{h_{fg}} = 4215 \frac{100 - 96}{2.257 \times 10^6} = 7.47 \times 10^{-3}$$

$$h'_{fg} = h_{fg} (1 + 0.68Ja) = 2.257 \times 10^6 (1 + 0.68 \times 7.47 \times 10^{-3}) = 2.268 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

$$h_y = 0.943 \left[\frac{g \rho_L (\rho_L - \rho_v) k_L^3 h'_{fg}}{\mu_L (T_{sat} - T_s) L} \right]^{1/4}$$

$$h_y = 0.943 \left[\frac{9.81 \times 960.06 (960.06 - 0.56048) (0.6782)^3 2.268 \times 10^6}{0.291 \times 10^{-3} (100 - 96) 0.59} \right]$$

$$h_y = 9263 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Q_y = h_y \cdot A \cdot (T_{sat} - T_s)$$

$$Q_y = 9263 (0.59 \times 0.53) (100 - 96)$$

$$Q_y = 11586 \text{ W} = 11.586 \text{ kW}$$

Yoğuşmayla ısı transferini hesaplamada kullanılan (4.2) nolu bağıntının geçerliliği bilim adamları tarafından incelenmiştir. Düşey bir levha üzerindeki film yoğuşması için denklem (4.2)'den yola çıkılarak daha ayrıntılı bir sınır tabaka çözümlemesi Sparrow ve Gregg [79] tarafından gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Chen tarafından [80] doğrulanan bu sonuç, denklem (4.2)'nin kullanılmasından doğan hataların $Ja \leq 0.1$ ve $1 \leq Pr \leq 100$ için %3'den az olduğunu göstermektedir.

4.1.2. Düşey Levhadan Doğal Taşınım ile Kaybedilen Isı Transferi Miktarı

$$Nu_d = 0.68 + \left[\frac{0.67 Ra_l^{1/4}}{[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}]^{4/9}} \right] \quad (4.5)$$

denklemden geçen termofiziksel özellikler film sıcaklığına göre tablolardan bulunur. Ortam sıcaklığının 20°C olduğu bir deney için:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{96 + 20}{2} = 58^\circ\text{C}$$

$T_f=58^\circ\text{C}$ için özellikler:

$$\nu=1.86 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\alpha=2.64 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\beta=(1/T_f)=1/331=3.02 \times 10^{-3} \text{ 1/K}$$

$$Ra_l = Gr_l \cdot Pr$$

$$Gr_l = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

$$Ra_l = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} = \frac{9.81 \times 3.02 \times 10^{-3} (96 - 20) 0.59^3}{1.86 \times 10^{-5} 2.64 \times 10^{-5}} = 942092984$$

$$Nu_d = 0.68 + \left[\frac{0.67 Ra_l^{1/4}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16} \right]^{4/9}} \right]$$

$$Nu_d = 0.68 + \left[\frac{0.67 (942082984)^{1/4}}{\left[1 + (0.492 / 0708)^{9/16} \right]^{4/9}} \right]$$

$$Nu_d = 90.74$$

$$Nu_d = \frac{h_d L}{k_{air}} \Rightarrow h_d = \frac{Nu_d k_{air}}{L} = \frac{90.74 \times 0.0275}{0.59} = 4.22 \text{ W / m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q_d = h_d A (T_s - T_\infty)$$

$$Q_d = 4.22(0.59 \times 0.53)(96 - 20)$$

$$Q_d = 100.5 \text{ W}$$

4.1.3. Düşey Levhadan Radyasyonla Kaybedilen Isı Transferi Miktarı

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (4.6)$$

$$Q_{rad} = 0.235 \times 5.67 \times 10^{-8} (0.59 \times 0.53) \times [(96 + 273)^4 - (20 + 273)^4]$$

$$Q_{rad} = 41.63 \text{ W}$$

4.1.4. Yerel Isı Transfer Katsayısının ve Yerel Nu Sayısının Bulunması

$$Q_{top} = Q_y$$

$$Q_{net} = Q_{top} - Q_{kay}$$

$$Q_{net} = Q_y - (Q_d + Q_{rad}) \quad (4.7)$$

$$Q_{net} = 11586 - (100.5 + 41.63) = 11443.86 \text{ Watt}$$

Q_{net} çarpma levhasında oluşan net ısı miktarıdır. Lüleden havanın çarptırılmasıyla oluşan zorlanmış taşınım ile ısı transferi miktarına eşitlenirse:

$$Q_{net} = Q_{conv} = h_{yerel} \cdot A \cdot (T_w - T_{jet}) \quad (4.8)$$

burada $T_{w,x}$ yüzey üzerinde okunan yerel sıcaklıklardır. T_{jet} jet çıkışında ölçülen sıcaklık değeridir. Böylece buradan gidilerek bulunacak yerel ısı transfer katsayısı (h_{yerel}) bulunur.

$T_w = 89^\circ \text{C}$ $T_{jet} = 20^\circ \text{C}$ olan herhangi bir deneyin herhangi bir referans ölçüm noktasında yerel ısı transfer katsayısı ve Nu sayısı şöyle çıkar:

$$h_{yerel} = \frac{Q_{net}}{A(T_w - T_j)} \quad (4.9)$$

$$h_{yerel} = \frac{Q_{conv}}{A(T_w - T_{jet})} = \frac{11443.86}{(0.59 \times 0.53)(89 - 20)} = 530 W / m^{\circ}C$$

$$Nu = \frac{hd}{k} \quad (4.10)$$

$$Nu = \frac{h_{yerel} D}{k_{air}} = \frac{530.7.9 \times 10^{-3}}{0.0275} = 152$$

4.2. Düz Dairesel Lülelerde Ortalama Nusselt Sayısının Hesaplanması

Düz dairesel lülelerde ortalama Nusselt sayısı levha üzerindeki tüm değerlerin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanır.

$$Nu_{ort} = \frac{\sum_{i=1}^n Nu_i}{n} \quad (4.11)$$

4.3. Düz Dairesel Lülelerde Reynolds Sayısının Hesaplanması

Düz borularda Reynolds sayısının hesaplanmasında rotametreden ölçülen hava debisi, karakteristik uzunluk olarak da lüle çapı esas alınmıştır.

$$Re = \frac{4\dot{V}}{\pi d v} \quad (4.12)$$

4.4. Düz Dairesel Lülelerde Türbülans Şiddetinin Hesaplanması

Türbülans şiddetinin belirlenebilmesi için literatürde genellikle ileri teknolojiye sahip sıcak tel anemometreleri kullanılmıştır. Bu anemometrelerin en gelişmiş modelleri hızın üç boyutlu bileşenlerini ölçebiliyorlar. Ancak bu ileri teknoloji aynı zamanda yüksek bir maliyet gerektirmektedir. Bu çalışmada Bölüm (3.1.3)' de belirtilen özelliklere sahip bir anemometre

kullanılmıştır. Bu anemometre ile istenilen noktada yüksek hassasiyette hız ölçümü alınmakla beraber ne yazık ki hızın bileşenleri tespit edilememektedir.

Deneylerde her bir referans ölçüm noktasında anlık olarak ölçülen her bir hız u_a , bu anlık hızların zaman ortalaması u ise; çalkantı değeri bu iki değer arasındaki fark olarak hesaplanacaktır:

$$u' = u_a - u \quad (4.13)$$

Referans ölçüm noktasındaki toplam türbülans şiddeti çalkantı değerlerinin kareleri toplamının karekökü alınarak bulunur.

$$\text{Türbülans şiddeti: } Tu = \sqrt{u'^2} \quad (4.14)$$

Normalizasyon işlemi esnasında bu değer jet çıkış hızına bölünür. Grafiklerde verilen Tu ifadesi bölünerek boyutsuzlaştırılmış olan ifadedir.

4.5. Eş Eksenli Lülelerde Re ve Nu Sayılarının Hesaplanması

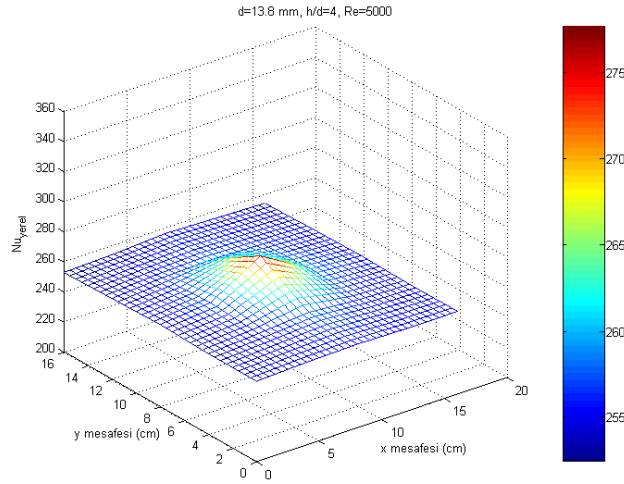
Eş eksenli jetlerde hem iç hem dış halkadan akış geçmesi halinde Reynolds sayısı ve Nusselt sayısı hesaplanırken karakteristik uzunluk olarak dış borunun iç çapı seçilmiştir. Reynolds sayısı için denklem (4.12), yerel Nusselt sayısı için (4.10) ve ortalama Nu sayısı için (4.11) denklemleri aynen kullanılır.

5. ÇARPAN DÜZ DAİRESEL JETLERDE ISI TRANSFERİ DENEY SONUÇLARI

Dairesel düz lüleler kullanılması durumunda sıcak levha ile jet havası arasında oluşan konvektif ısı transferi boyutsuz Nusselt sayısı ile verilmiştir. Lüle ile levha arasındaki boyutsuz mesafelerde ($h/d=4, 6, 8, 10$ ve 12) Re sayısının $5000-25000$ aralığındaki değerleri için, levha üzerinde yerel olarak hesaplanan Nusselt sayıları (Nu), levhanın geometrik orta noktasında (durma noktasında) hesaplanan Nusselt sayısı (Nu_0) ve ortalama Nusselt sayıları (Nu_{ort}) grafiksel olarak verilmiştir. Değerlendirme esnasında okuyucuya kolaylık olması açısından $d=13.8$ mm çaplı lüleye ait tüm değerlendirme grafikleri ve $d=7.9, 10.8$ ve 23.1 mm çaptaki lülelere ait durma noktası ve ortalama Nusselt sayısı grafikleri bu bölümde tamamıyla verilirken diğer lülelerin yerel Nu sayılarını gösteren grafikler EK-A’da sunulmuştur.

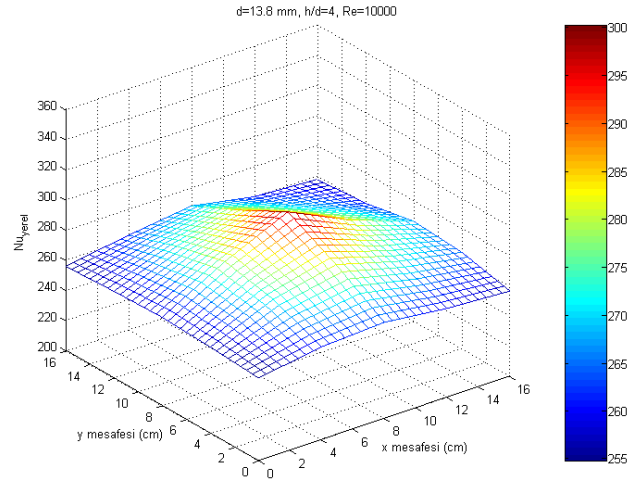
Ölçümlerin alınması ve kaydedilmesinde kullanılan dataloggırın sınırlı sıcaklık ölçme girişi olması hasebiyle levha üzerinde çok yakın aralıklarda ölçüm alınamamıştır (Şekil 3.8). Ancak levha üzerindeki yerel Nusselt dağılımı gösterilirken ara değerler bilgisayardan enterpolasyon yaptırılarak çizilmiştir.

5.1. $d=13.8$ mm Çaplı Jetin Düz Yüzeye Çarpmasıyla Oluşan Isı Transferi Dağılımı



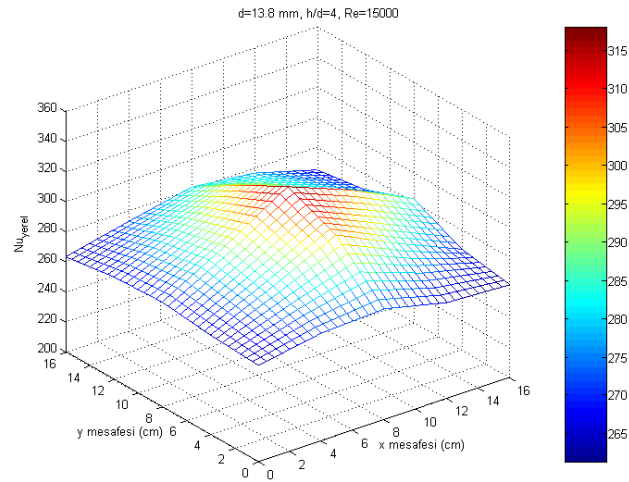
Şekil 5.1. $d=13.8$ mm, $h/d=4$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

Şekil (5.1)-(5.5) arasındaki grafikler, lüle-levha arası mesafenin en yakın olduğu $h/d=4$ değerinde, Re sayısının 5000 ile 25000 arasındaki değerlerinde yerel Nu sayılarının levha üzerindeki değişimini vermektedir. Re sayısı 5000 'den 25000 'e yükselirken momentum transferi arttığından ısı transferinde de artış görülmüştür.

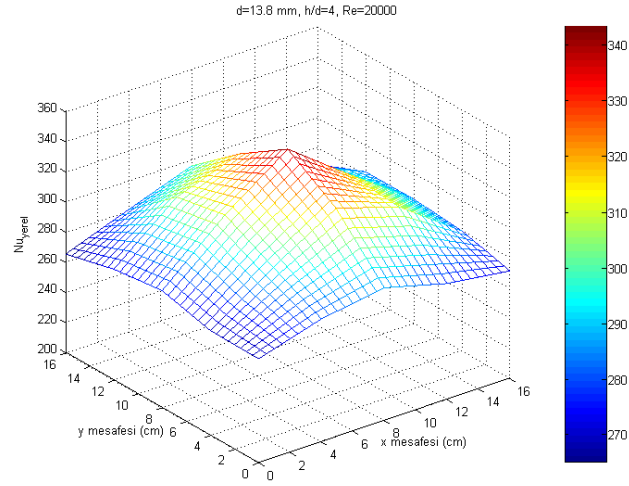


Şekil 5.2. $d=13.8$ mm, $h/d=4$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

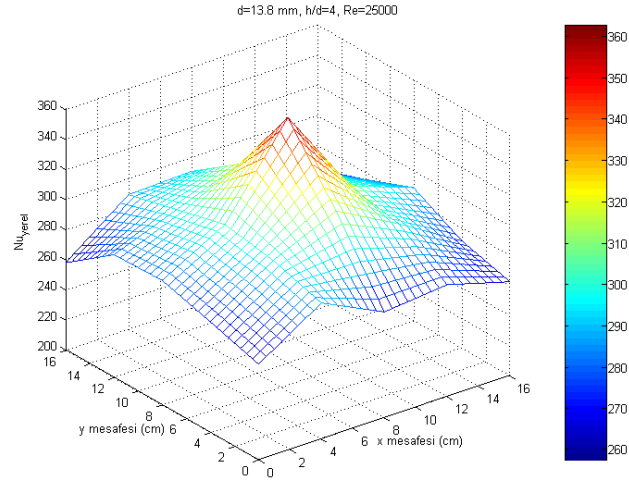
Lüle üzerinde en yüksek Nu sayısı tüm deneylerde durma noktasında oluşmuştur. Re sayısını arttırmak durma noktası Nusselt sayısını (Nu_0) ciddi oranda arttırmıştır. $Re=5000$ 'de $Nu_0=277.5$ iken; $Re=10000$ 'e yükseltildiğinde $Re=5000$ 'e nazaran %8.1'lik bir artışla $Nu_0=300.2$ değerine çıkmıştır. Aynı şekilde Re sayısının 15000'e yükseltilmesiyle yine $Re=5000$ 'e göre %15.6'lık artışla $Nu_0=320.9$ değerine, $Re=20000$ 'de %23.5'lik artışla $Nu_0=343.1$ ve son olarak $Re=25000$ 'de %30.5' lik artışla $Nu_0=362.5$ değerine ulaşmıştır. Bu oranların bu kadar yüksek çıkmasında şüphesiz lüle-levha arasındaki yakın mesafenin de etkisi vardır.



Şekil 5.3. $d=13.8$ mm, $h/d=4$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



Şekil 5.4. $d=13.8$ mm, $h/d=4$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

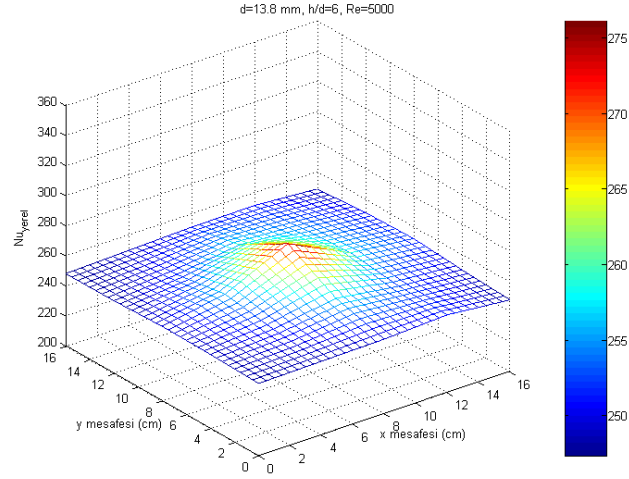


Şekil 5.5. $d=13.8$ mm, $h/d=4$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

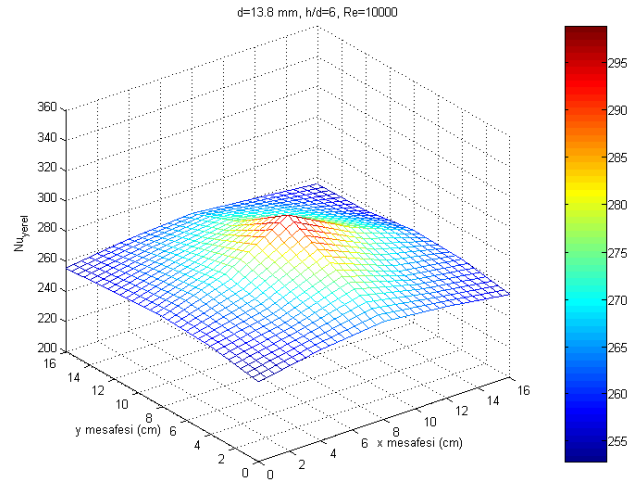
Grafiklerde göze çarpan bir diğer husus ise Re sayısının arttırılmasıyla birlikte yerel Nu sayılarının durma noktasından itibaren (radyal yönde) yüzey üzerinde artmasıdır. Re sayısı 5000 iken durma noktasında (13 nolu ölçüm noktası, Şekil 3.8 bakınız) hesaplanan Nusselt sayısı ile durma noktasına en uzak noktada (25 nolu ölçüm noktası, Şekil 3.8 bakınız) ölçülen Nusselt sayısı arasında yaklaşık %8.69' luk bir azalma görülmektedir. Bir başka deyişle yerel Nu sayıları levha üzerinde orta noktadan en uzak noktaya %8.69'luk bir farkla dağılmıştır. Re sayısının arttırılması bu azalma oranını daha da arttırmıştır. Şöyle ki: $Re=10000$ 'de %15.11, $Re=15000$ 'de %17.77, $Re=20000$ 'de %21.63 ve son olarak $Re=25000$ 'de %27.32 oranında bir azalma görülmüştür.

$h/d=4$ boyutsuz mesafesinde ortalama Nusselt sayısının değeri de önemlidir. Ortalama Nusselt sayısı (Nu_{ort}) Re sayısının 5000 ile 25000 aralığında sırasıyla $Nu_{ort}=256.9$, 267, 278.6,

301.9 ve 305.7 çıkmıştır. Değerlerden de anlaşılacağı gibi Re sayısının artması ortalama Nusselt sayılarını arttırmıştır.

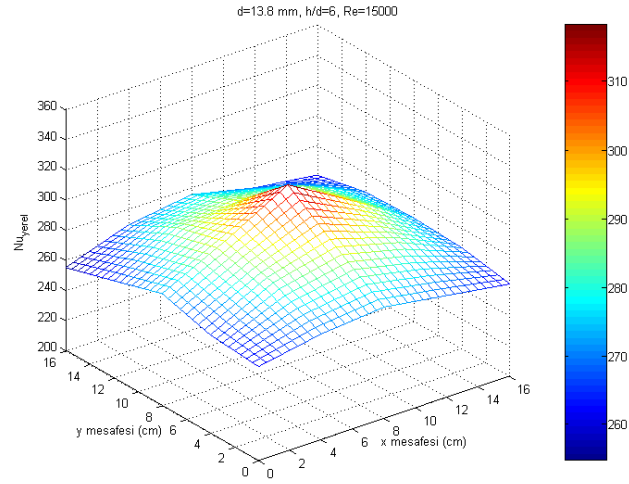


Şekil 5.6. $d=13.8$ mm, $h/d=6$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



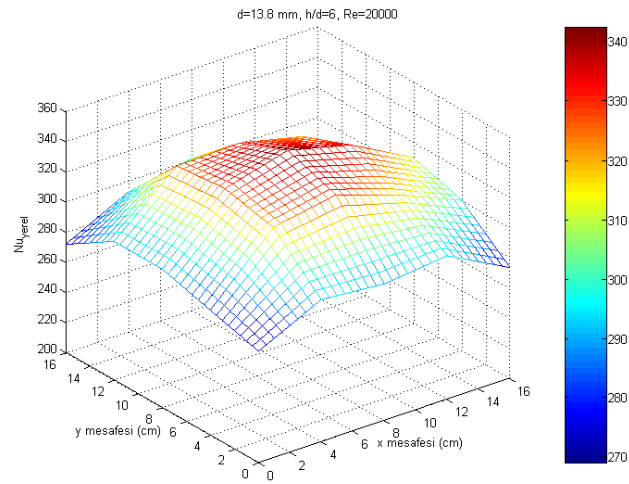
Şekil 5.7. $d=13.8$ mm, $h/d=6$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

$h/d=6$ iken Re sayısının artmasıyla birlikte $h/d=4$ 'de olduğu gibi yerel ve durma noktası Nusselt sayılarında artış gözlenmiştir. Durma noktasındaki artış Re sayısının 5000'den 10000, 15000, 20000 ve 25000 değerlerine çıkartılmasıyla birlikte ilk değer olan $Re=5000$ 'e nispeten Nu_0 değerinde sırasıyla %8.2, %15.2, %23.5 ve %29.8 artış gözlenmiştir (Şekil 5.6-5.10).



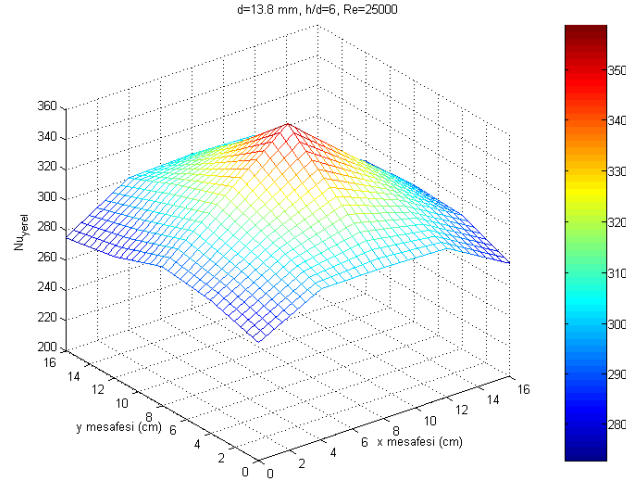
Şekil 5.8. $d=13.8$ mm, $h/d=6$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

Öte yandan lüle levha mesafesinin 4’den 6’ya çıkartılarak artırılması durma noktası Nu sayısını düşük denilebilecek oranlarda azaltmıştır. Re sayının 5000 değerinde h/d ’nin 4’den 6’ya yükseltilmesi durma noktası Nu sayısını %0.54 oranında azaltmıştır. $Re=10000$ ’de %0.48’lik, $Re=15000$ ’de %0.89’luk, $Re=20000$ ’de %0.92’lik ve son olarak Re sayısının 25000 değerinde %1.07’lik bir azalma görülmüştür.



Şekil 5.9. $d=13.8$ mm, $h/d=6$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

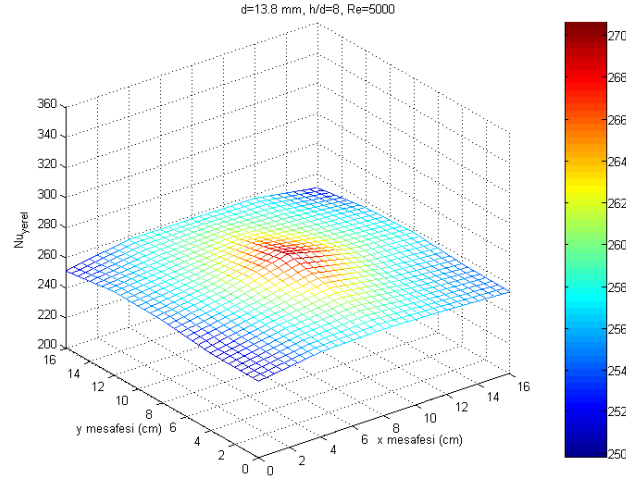
Görüldüğü gibi $h/d=4$ ile $h/d=6$ değerleri arasında en fazla % 1 civarında bir artış oluşmuştur. Bu da jet çıkışından itibaren Nu sayısının yaklaşık olarak sabit kaldığını gösterir; ki bu da sabit bölge potansiyel çekirdek bölgesidir.



Şekil 5.10. $d=13.8$ mm, $h/d=6$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

Yerel Nu sayılarını gösteren grafikler dikkate alındığında göze çarpan bir diğer husus levha üzerindeki radyal yönde yayılımdır. Re sayısının 5000 ile 25000 arasındaki değerleri için $h/d=6$ da levha üzerinde orta nokta ile en uç nokta arasında Nu sayısı sırasıyla %10.35, %15.35, %17.52, %19.51 ve %22.41’lik bir azalma göstermiştir.

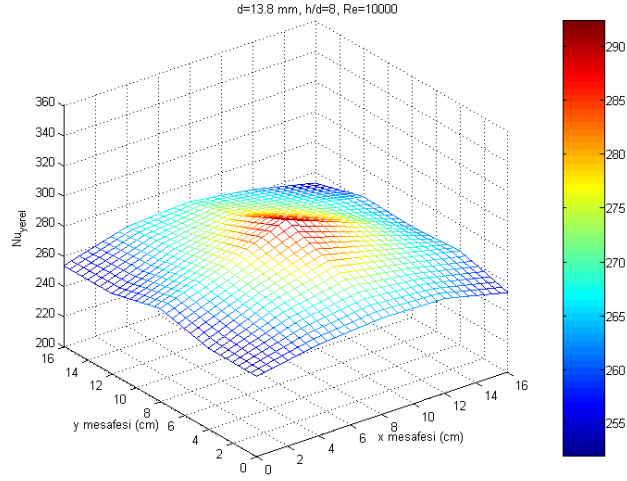
Aynı Re aralığında ortalama Nusselt sayısı sırasıyla $Nu_{ort}=256, 266.9, 275.7, 290.6, 301.5$ ’dir.



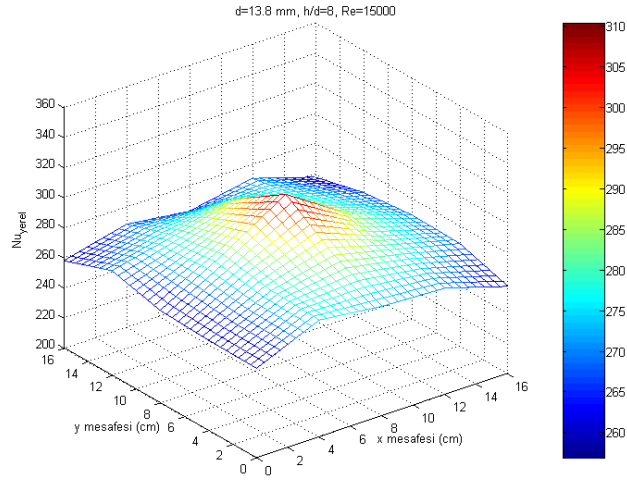
Şekil 5.11. $d=13.8$ mm, $h/d=8$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

Şekil (5.11)-(5.15) arasında $h/d=8$ için Re 5000 ile 25000 arasında, yerel Nu sayısının levha üzerindeki dağılımı verilmiştir. Bu grafiklerde lüle-levha arası mesafenin artırılmasının durma noktası üzerindeki soğumayı azalttığı, öte yandan lüleden uzaklaştıkça levha üzerinde durma noktasından uzaklara doğru daha etkin bir soğuma olduğu görülüyor. Durma noktasındaki Nusselt sayısı Re sayısının artmasıyla artış göstermiştir. Bu artış oranı Re sayısı

5000'den 10000' çıkartıldığında %8, 15000'e çıkartıldığında %14.6, 20000'de %20.3 ve 25000'de %29.5 civarındadır. Bundan önceki $h/d=4$ ve $h/d=6$ mesafelerine nazaran belirgin bir değişim olmadığı görülmektedir. Bu bir anlamda Re sayısının durma noktası Nu sayısı üzerindeki etkisinin lüle-levha mesafesi ile değişmeyeceğini göstermektedir.

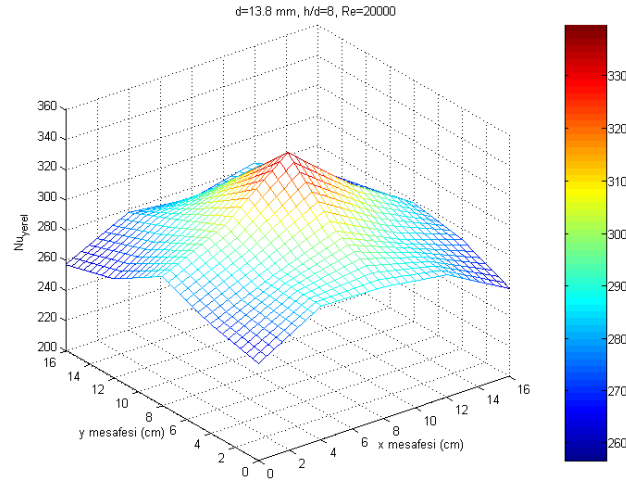


Şekil 5.12. $d=13.8$ mm, $h/d=8$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



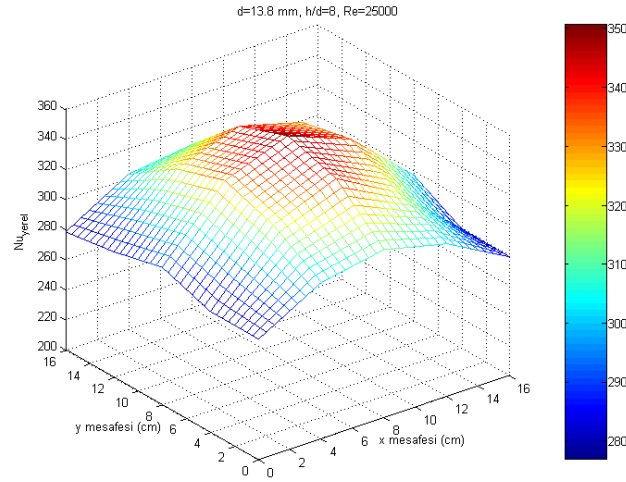
Şekil 5.13. $d=13.8$ mm, $h/d=8$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

$h/d=8$ mesafesinde durma noktası Nu_0 sayısının belirgin bir şekilde azalmaya başladığı görülmüştür. $Re=5000$ ile 25000 aralığındaki tüm değerler için $h/d=4$ 'e göre sırasıyla azalma oranları %2.52, 2.62, 3.33, 3.37, ve %3.39'dur. bu ise $h/d=6$ 'dan sonra potansiyel çekirdek bölgesinin dışına çıkıldığını göstermektedir.



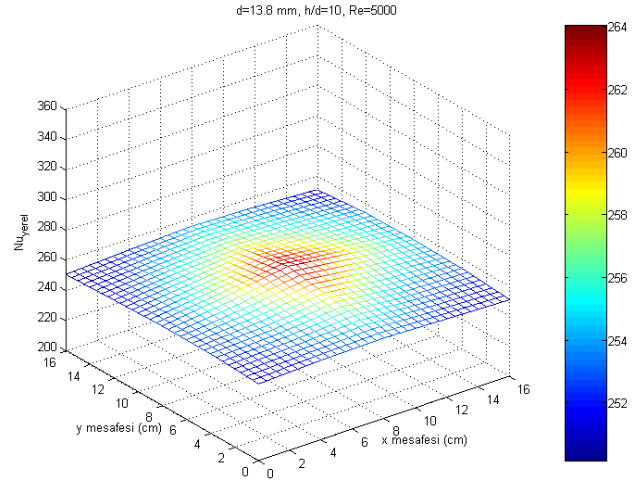
Şekil 5.14. $d=13.8$ mm, $h/d=8$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

$h/d=8$ için durma noktası ile uç ölçüm noktası arasındaki fark, Re 5000 ile 25000 aralığı için sırasıyla %7.2, %13.3, %16.3, %20.2 ve son olarak %20'dir. h/d 'nin 8'e çıkmasıyla birlikte jetin merkezden çevreye doğru daha fazla yayıldığı görülmektedir. Böylece durma noktası Nu sayısı ile en uç noktadaki Nu sayısı arasındaki değişim oranı azalmaktadır.



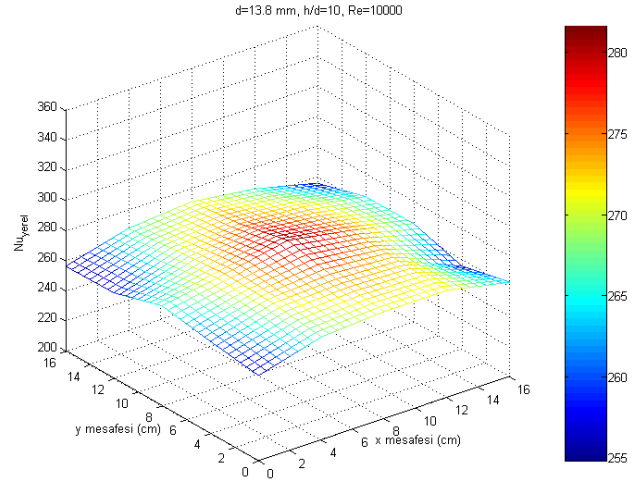
Şekil 5.15. $d=13.8$ mm, $h/d=8$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

Son olarak $h/d=8$ değerinde ortalama Nu sayıları, aynı Reynolds aralığında sırasıyla; $Nu_{ort}=254, 264.9, 272.9, 284.2, 291.7$ olarak hesaplanmıştır.

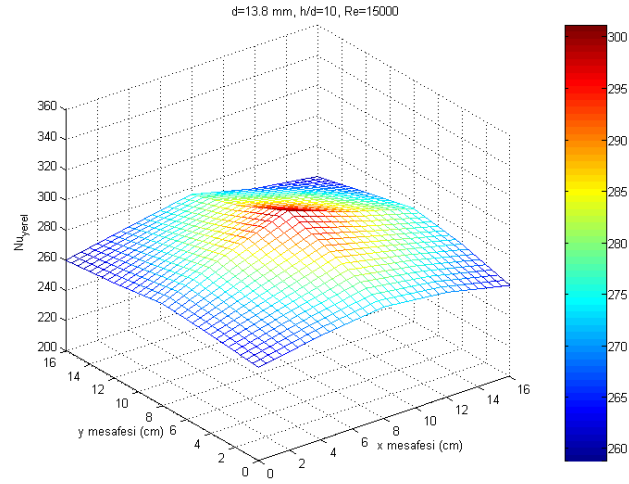


Şekil 5.16. $d=13.8$ mm, $h/d=10$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

Şekil (5.16)-(5.21) arasındaki grafiklerde lüle-levha arası mesafe $h/d=10$ 'a çıkartılmıştır. $h/d=10$ 'da yerel ve durma noktası Nusselt sayılarının azalmaya devam ettiği görülmektedir.

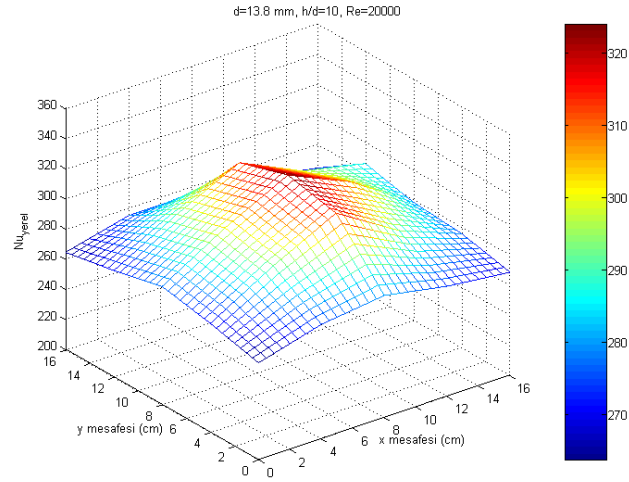


Şekil 5.17. $d=13.8$ mm, $h/d=10$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

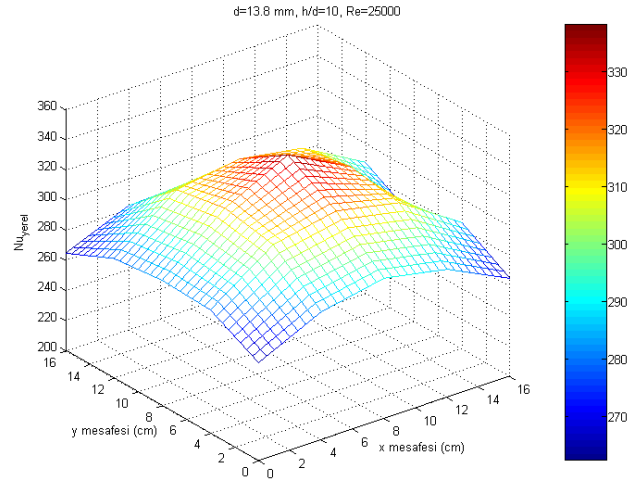


Şekil 5.18. $d=13.8$ mm, $h/d=10$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

Re sayısının değişiminin durma noktası Nu sayısı üzerindeki etkisi ise Re 5000'e nazaran 10000'de %6.6, 15000'de %14, 20000'de %22.6 ve $Re=25000$ 'de %27.9'dur. Durma noktasından uç noktaya doğru Nusselt sayısının yayılımındaki değişim oranlarına gelince: $Re=5000$ -25000 arasındaki değerler için sırasıyla %4.9, %8.8, %13, %18.4 ve %21.5'dir.

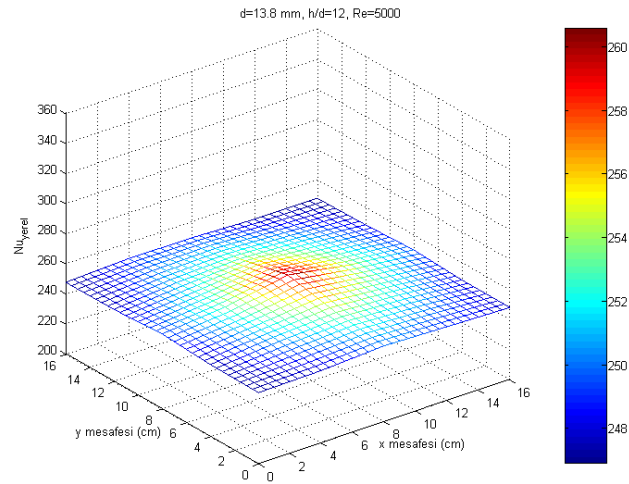


Şekil 5.19. $d=13.8$ mm, $h/d=10$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



Şekil 5.20. $d=13.8$ mm, $h/d=10$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

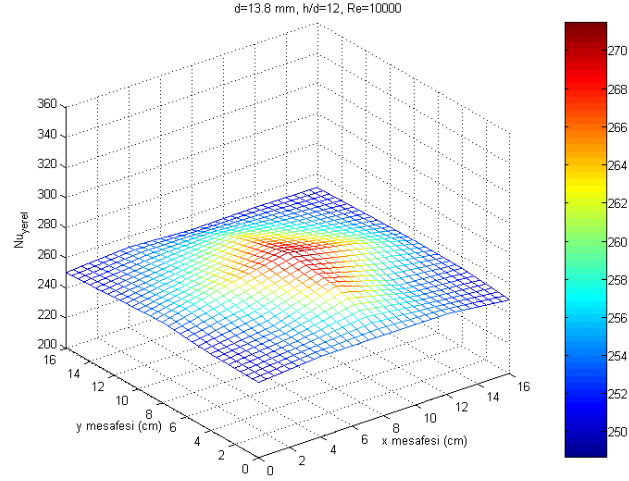
Ortalama Nusselt sayılarına gelince; $Re=5000-25000$ arasında sırasıyla $Nu_{ort}=251.9$, 264.3, 272.3, 283.5, 284.3 değerleri hesaplanmıştır. Diğer tüm boyutsuz mesafelerde olduğu gibi burada da Re sayısı artınca ortalama Nusselt sayısında belirgin bir artış görülmüştür. Ancak lüle-levha mesafesinin arttırılması ortalama Nusselt sayılarında belli bir azalmaya neden olmuştur. Bundan önce incelenen h/d mesafeleriyle kıyaslanırsa burada $h/d=4$ 'e göre daha belirgin bir azalma olduğu görülecektir. Bir sonraki adım olan $h/d=12$ 'de bu değerler bariz bir şekilde azalma gösterecektir.



Şekil 5.21. $d=13.8$ mm, $h/d=12$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

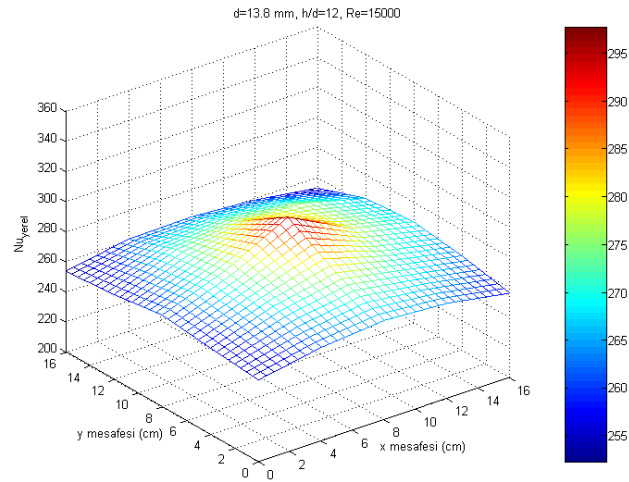
Deneylerde test edilen son boyutsuz lüle-levha mesafesi $h/d=12$ 'dir (Şekil 5.21-5.25). Bu mesafede Re sayısının durma noktası Nu sayısı üzerindeki etkisi $Re=5000$ 'e göre 10000'de %4.1, 15000'de %14.2, 20000'de %22.9 ve 25000'de %26.9'dur. Ayrıca, $h/d=12$ 'de ölçülen durma noktası Nu sayısı en yakın lüle levha mesafesi olan $h/d=4$ 'te ölçülen durma noktası Nu

sayısına oranlandığında; %93.8, %90.4, %92.7, %93.3 ve %90.9'luk değişimlerin olduğu görülür.

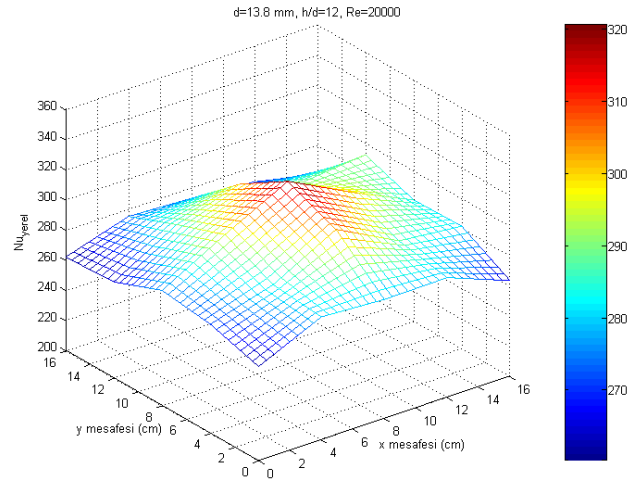


Şekil 5.22. $d=13.8$ mm, $h/d=12$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

Durma noktasından en uç ölçüm noktasına doğru yayılım miktarını görebilmek için iki nokta arasındaki Nu sayısı azalma oranlarını hesapladığımızda en az değişimin bu mesafede gerçekleştiği görülür. Re değerleri için sırasıyla %5.1, %7.8, %14.5, %18.1 ve %21.3'dür. Buradan çıkarılacak diğer bir önemli husus; Re sayısının artmasıyla birlikte jet yayılımının da artış göstermesidir-ki tüm mesafelerde bu artış net görülmüştür.

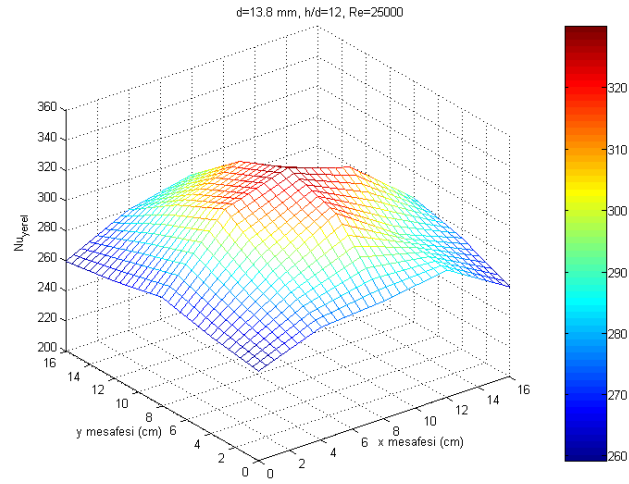


Şekil 5.23. $d=13.8$ mm, $h/d=12$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



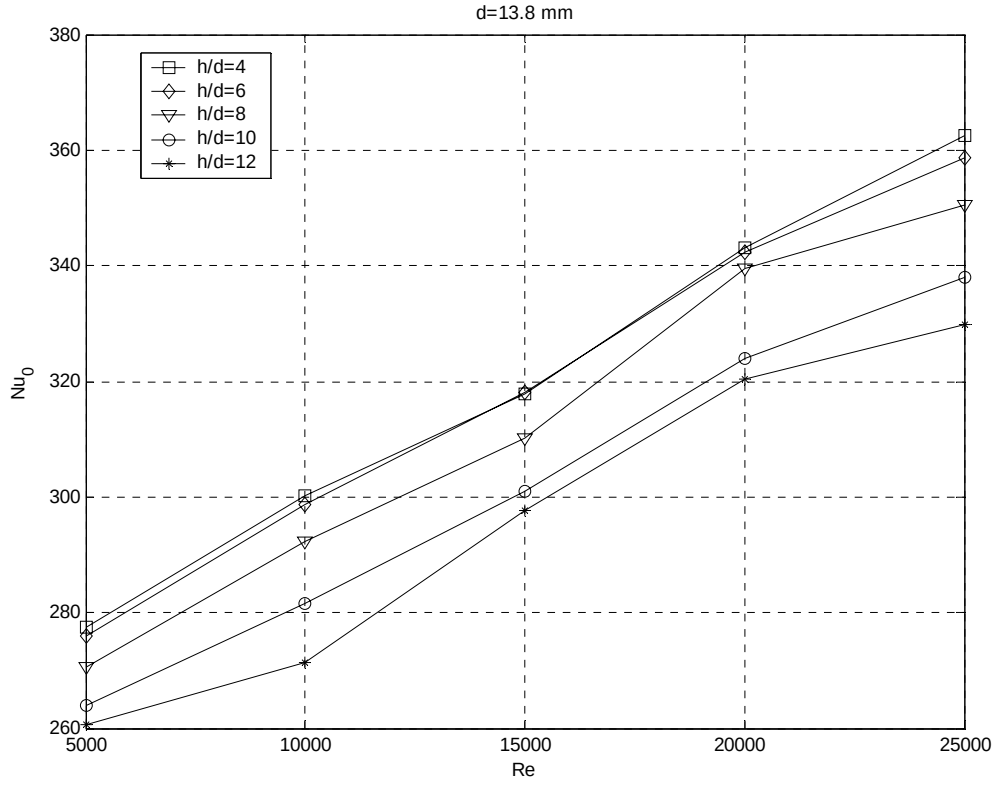
Şekil 5.24. $d=13.8$ mm, $h/d=12$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

Son olarak ortalama Nusselt sayılarının değişimine bakılacak olursa Re sayısının test edilen değerlerinde ortalama Nusselt sayısı sırasıyla $Nu_{ort}=249.9, 254.8, 265.8, 281.4$ ve 288.2 değerlerinde hesaplanmıştır. h/d mesafesinin durma noktası Nusselt sayıları üzerindeki etkisi ortalama Nusselt sayılarına nazaran düşük çıkmıştır. Bunun en önemli nedeni durma noktasından uzaklaştıkça kenarlarda daha yüksek Nu sayılarının hesaplanmasıdır.



Şekil 5.25 $d=13.8$ mm, $h/d=12$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

Şu ana kadar $d=13.8$ mm çaplı lüle için yerel, durma noktası ve ortalama Nusselt sayılarının değerlendirilmesi yapıldı. Şekil (5.26)'da durma noktası Nu sayısının bu lülede nasıl bir değişim gösterdiği daha açık bir şekilde görülmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi lüle-levha mesafesi arttıkça Nu sayısı azalmıştır. Re sayısı arttıkça momentum transferi artacağından Nu sayısı da artmıştır.

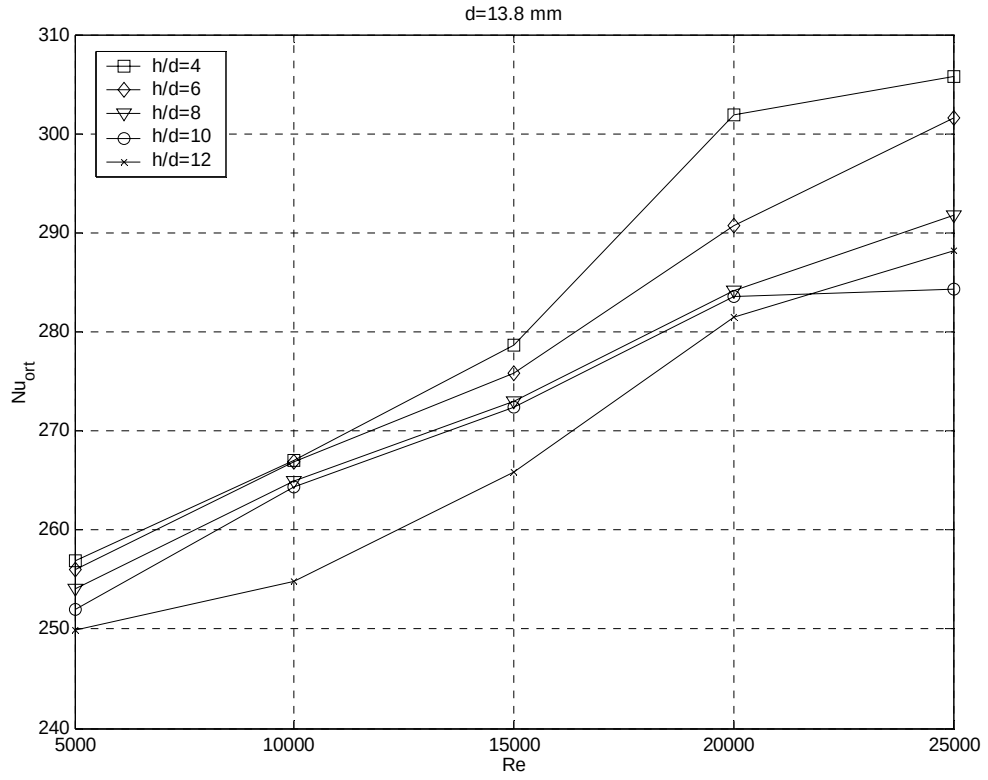


Şekil 5.26. $d=13.8$ mm düz dairesel lüle için Re sayısı ile durma noktası Nusselt sayısı (Nu_0) değişimi.

Dik çarpan $d=13.8$ mm çaplı yuvarlak jette yüzey akım alanı ve ısı transfer katsayıları X ve Y eksenlerine göre simetriktir. Maksimum ısı transfer noktasından (durma noktasında) levha kenarlarına doğru X ve Y mesafesi arttıkça Nusselt sayısında bir azalma görülmüştür. Tüm lüle-levha aralıkları ve tüm Reynolds sayıları için maksimum Nusselt sayısı (Nu_0), geometrik çarpma noktasında meydana gelmiştir. Lüle-levha mesafesi arttıkça durma noktası Nusselt sayısı da azalmıştır.

Ortalama Nu sayıları levha üzerindeki tüm ölçüm istasyonlarında hesaplanan yerel Nusselt sayılarının aritmetik ortalaması ile bulunur (Denklem 4.9). $d=13.8$ mm çaplı yuvarlak lüle için ortalama Nusselt sayıları $h/d=4-12$ arasında genel olarak azalma eğilimi gösterir (Şekil 5.27).

Tüm lülelerde hesaplanan durma noktası ve ortamla Nusselt sayıları değerleri Tablo 3 ve 4’de verilmiştir.



Şekil 5.27. $d=13.8$ mm düz dairesel lüle için Re sayısı ile ortalama Nu sayısı (Nu_{ort}) arasındaki değişim.

5.2. $d=7.9, 10.8$ ve 23.1 mm Çaplı Düz Dairesel Lülelerde Isı Transferi Dağılımı

$d=13.8$ mm lüle çapı için yapılan istatistiki değerlendirmeler benzer şekilde diğer lülelere de yapılabilir. Okumada rahatlık olması ve benzer ifadelerin mükerrerlik teşkil etmemesi amacıyla bu değerlendirmeler özetlenerek Tablo 5 ve 6'da verilmiştir. Ayrıca ileride kıyas yapılabilmesi için yukarıda açıklanan $d=13.8$ mm' nin değerlendirmeleri de tabloya dâhil edilmiştir.

Tablo 3. Tüm lülelerde hesaplanan durma noktası Nu sayıları (Nu_0)

d=7.9 mm					
Re	h/d=4	h/d=6	h/d=8	h/d=10	h/d=12
5000	160.046	159.0772	157.579	155.5388	151.2219
10000	172.8251	172.5294	170.9539	170.6272	169.6755
15000	185.9477	184.4767	182.031	180.8183	178.1786
20000	200.4683	194.9874	192.1682	189.1783	188.8227
25000	212.3058	208.3271	208.3084	199.3018	194.1484

d=10.8 mm					
Re	h/d=4	h/d=6	h/d=8	h/d=10	h/d=12
5000	210.4364	209.7623	208.2966	204.7999	202.5678
10000	225.378	225.2488	223.8996	217.956	216.2944
15000	242.6223	242.1287	237.6053	236.1726	230.6592
20000	260.0848	256.85	251.3596	250.9611	237.8781
25000	282.2047	280.8876	269.7891	260.9311	251.1152

d=13.8 mm					
Re	h/d=4	h/d=6	h/d=8	h/d=10	h/d=12
5000	277.5815	276.071	270.5544	264.0227	260.5325
10000	300.175	298.7222	292.2969	281.5891	271.3994
15000	317.9464	318.0854	310.2281	301.0614	297.6665
20000	343.0853	342.279	339.5179	323.8578	320.4319
25000	362.508	358.5989	350.427	337.9061	329.8659

d=23.1 mm					
Re	h/d=4	h/d=6	h/d=8	h/d=10	h/d=12
5000	466.5908	459.2415	455.9057	455.1078	450.4963
10000	500.0868	495.556	487.3421	484.1321	481.445
15000	552.502	551.0923	545.8654	523.6412	520.747
20000	588.4892	562.0555	560.5753	560.5341	551.0342
25000	620.1612	598.1439	591.1833	590.4996	584.2368

Tablo 4. Tüm lülelerde hesaplanan ortalama Nu sayıları (Nu_{ort})

d=7.9 mm					
Re	h/d=4	h/d=6	h/d=8	h/d=10	h/d=12
5000	145.9615	145.4753	144.4746	143.8148	142.1449
10000	153.6542	150.5124	149.6692	147.8512	146.4313
15000	157.6163	153.6614	153.2338	152.9588	152.1444
20000	164.4118	164.1367	161.0813	158.7356	158.5125
25000	170.6125	170.333	165.9935	165.2802	160.9815

d=10.8 mm					
Re	h/d=4	h/d=6	h/d=8	h/d=10	h/d=12
5000	198.1918	198.0532	195.6985	194.5154	190.7524
10000	204.6344	203.9745	202.7174	200.5691	195.8153
15000	214.188	209.6309	209.2152	206.3849	203.5146
20000	228.2884	222.6614	218.2253	214.6877	210.8815
25000	233.3617	232.0537	228.0367	219.93	214.8442

d=13.8 mm					
Re	h/d=4	h/d=6	h/d=8	h/d=10	h/d=12
5000	256.9431	256.0081	254.055	251.9845	249.9489
10000	267.0136	266.9475	264.9197	264.3278	254.8553
15000	278.6371	275.7632	272.9315	272.383	265.8413
20000	301.9307	290.6591	284.2247	283.5581	281.4783
25000	305.7508	301.5914	291.7347	284.3677	288.1927

d=23.1 mm					
Re	h/d=4	h/d=6	h/d=8	h/d=10	h/d=12
5000	433.0536	428.2677	428.085	427.1843	426.8855
10000	455.3498	452.2202	450.4256	443.2165	440.2382
15000	483.0998	479.5366	479.1655	462.6677	460.9989
20000	501.4475	497.4621	492.6316	489.1603	478.237
25000	531.6663	528.228	516.1293	509.2912	502.3751

Tablo 5. Çeşitli lüle çapları için Re sayısının 5000’den sırasıyla 10000 15000 20000 ve 25000’e çıkartılmasıyla durma noktası Nusselt sayısında (Nu_0) görülen artış miktarı

$$(\% \text{ artış} = \frac{Nu_{0(Re=x)} - Nu_{0(Re=5000)}}{Nu_{0(Re=5000)}} \times 100)$$

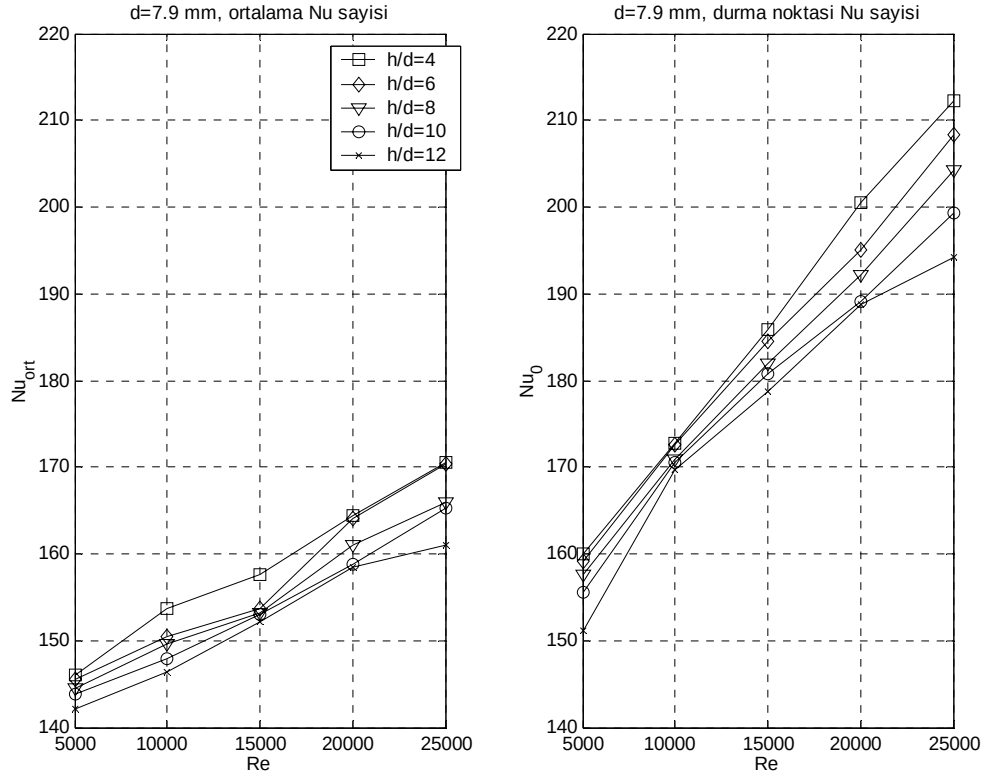
d=7.9 mm				
	5000⇒10000	5000⇒15000	5000⇒ 20000	5000⇒25000
h/d=4	7.98	16.18	25.25	32.65
h/d=6	8.45	15.96	22.5	30.95
h/d=8	8.48	15.51	21.95	32.19
h/d=10	9.7	16.25	21.62	28.13
h/d=12	12.202	18.22	24.86	28.38
d=10.8 mm				
	5000⇒10000	5000⇒15000	5000⇒ 20000	5000⇒25000
h/d=4	7.1	15.29	23.59	34.104
h/d=6	7.38	15.43	22.44	33.9
h/d=8	7.49	14.07	20.67	29.52
h/d=10	6.42	15.31	22.53	27.4
h/d=12	6.77	13.86	17.43	23.96
d=13.8 mm				
	5000⇒10000	5000⇒15000	5000⇒ 20000	5000⇒25000
h/d=4	8.13	14.54	23.59	30.59
h/d=6	8.2	15.21	23.58	29.89
h/d=8	8.03	14.66	20.31	29.52
h/d=10	6.65	14.02	22.66	27.98
h/d=12	4.17	14.25	22.99	26.91
d=23.1 mm				
	5000⇒10000	5000⇒15000	5000⇒ 20000	5000⇒25000
h/d=4	7.17	18.41	26.12	32.91
h/d=6	7.9	20	22.38	30.24
h/d=8	6.89	19.73	22.95	29.67
h/d=10	6.37	15.05	23.16	29.74
h/d=12	6.84	15.56	22.28	29.65

Tablo 6. Çeşitli lüle çapları için durma noktasında hesaplanan Nusselt sayısı (Nu_0) ile en uç nokta arasında hesaplanan yerel Nusselt sayısı arasındaki azalma oranı

$$(\% \text{ azalma} = \frac{Nu_0 - Nu_{r/d=xx}}{Nu_0} \times 100)$$

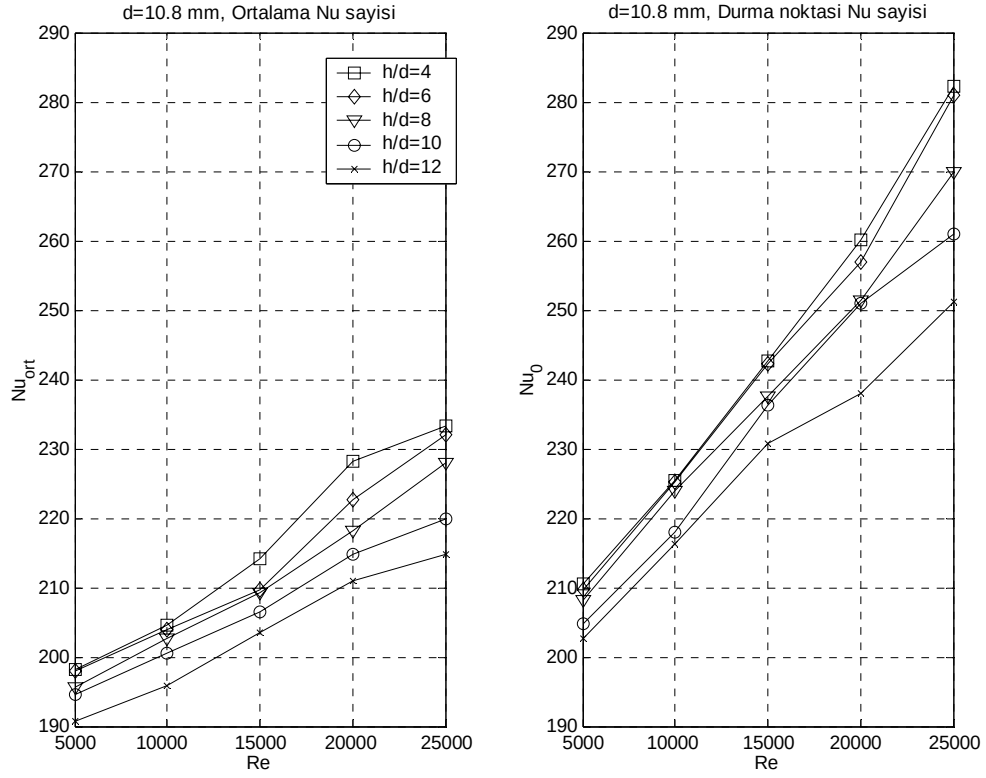
d=7.9 mm					
	h/d=4	h/d=6	h/d=8	h/d=10	h/d=12
Re 5000	10.41	10.55	9.58	9.29	6.83
Re 10000	16.21	14.3	13.38	15.66	13.06
Re 15000	21.03	21.22	20.26	19.08	18.04
Re 20000	25.91	25.65	22.28	21.92	21.27
Re 25000	27.44	28.53	27.82	26.59	20.27
d=10.8 mm					
	h/d=4	h/d=6	h/d=8	h/d=10	h/d=12
Re 5000	11.36	9.25	5.73	4.15	5.24
Re 10000	16.15	14.91	11.66	9.3	9.02
Re 15000	20.98	19.6	15.24	14.15	14.65
Re 20000	24.8	19.04	18.14	18.38	15.99
Re 25000	28.81	26.08	22.53	18.96	20.102
d=13.8 mm					
	h/d=4	h/d=6	h/d=8	h/d=10	h/d=12
Re 5000	8.69	10.17	7.29	4.99	5.11
Re 10000	15.11	15.35	13.36	8.88	7.89
Re 15000	17.77	17.52	16.38	13.05	14.56
Re 20000	21.63	19.51	20.24	18.44	18.11
Re 25000	27.32	22.41	20.06	21.59	21.32
d=23.1 mm					
	h/d=4	h/d=6	h/d=8	h/d=10	h/d=12
Re 5000	11.07	7.97	7.33	7.9	6.47
Re 10000	14.71	12.44	12.67	10.92	11.68
Re 15000	19.29	18.46	18.38	16.85	16.06
Re 20000	22.32	19.79	19.28	16.31	18.66
Re 25000	25.71	21.44	17.3	18.38	22.16

Tablo 3’de durma noktası, Tablo 4’de ortalama Nusselt sayıları verilmiştir. Tablo 5’de Re sayısını arttırmanın etkisi irdelenmiştir. Buradan da görülen Re sayısını arttırmak lüle çapı ne olursa olsun her bir lülede benzer etkiyi yaratmaktadır. Tablo 6’da levha üzerinde durma noktası ile en uç nokta arasındaki soğuma farkı her bir lüle çapı için verilmiştir.



Şekil 5.28. d=7.9 mm düz dairesel lüle için Re sayısı ile durma noktası Nu sayısı ve ortalama Nu sayısı arasındaki değişim.

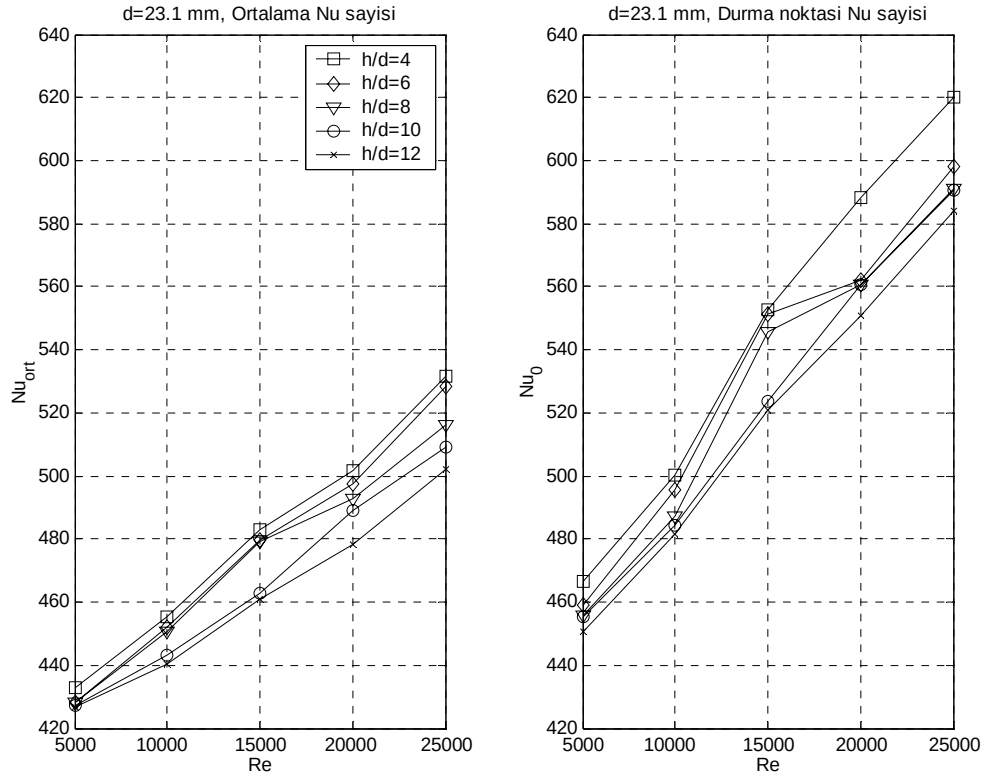
Şekil (5.28)-(5.30) arasında d=7.9, 10.8 ve 23.1 mm iç çapındaki lülelerin durma noktası ve ortalama Nusselt sayılarının her bir h/d için Re sayısına göre değişimleri verilmiştir. Tüm lülelerde Nu_0 sayısı artan Re sayısı ile birlikte artış göstermiştir. Ayrıca ortalama Nusselt sayısı değeri durma noktası Nusselt sayısına göre oldukça düşük çıkmıştır.



Şekil 5.29. $d=10.8$ mm düz dairesel lüle için Re sayısı ile durma noktası Nu sayısı arasındaki değişim.

Benzer sonuç diğer iki lüle için de aynen geçerlidir. Şekil (5.29)'da $d=10.8$ mm çaplı lülede de durma noktası Nu sayılarının ortalamadan hayli yüksek olduğu görülür. Ancak bu fark $d=7.9$ mm deki farka göre nispeten daha düşüktür.

Şekil (5.30)'da en büyük lüle çapı olan $d=23.1$ mm'ye bakılacak olursa ortalama Nusselt sayısı ile durma noktası Nusselt sayısı arasındaki fark diğer düşük çaplı lülelere nispeten daha azalmıştır. Ancak her halükarda iki değer arasında ciddi bir fark mevcuttur. Ortalama değerler ile durma noktası değerleri arasındaki farkın büyük olmasının en önemli sebebi düşük çaplı bir lülede noktasal soğumanın etkin olmasıdır. Böylece bu çalışmada, noktasal soğumanın istenildiği durumlarda çarpan dairesel jetlerin ne kadar etkili olduğu bir kez daha teyit edilmiştir.



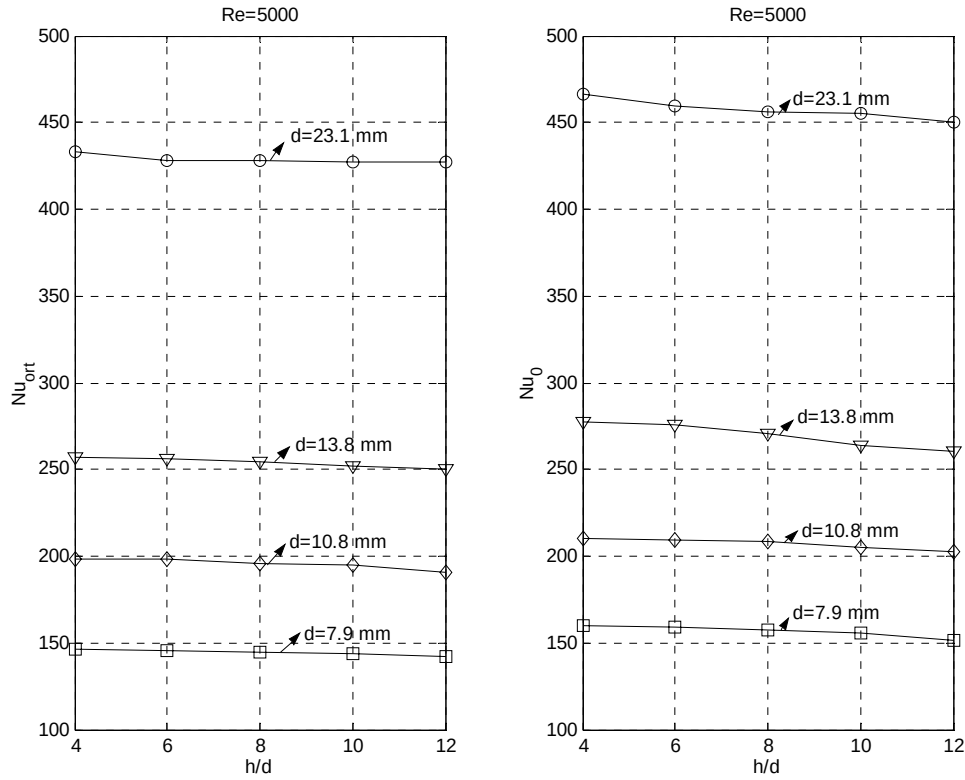
Şekil 5.30. $d=23.1$ mm düz dairesel lüle için Re sayısı ile durma noktası Nu sayısı arasındaki değişim.

Tüm lüle çaplarının denenmesi sonucunda lüle çapını arttırmanın yerel Nu sayılarını ciddi oranda etkilediği görülmüştür. Nusselt sayısının hesaplanmasında karakteristik uzunluk olarak lüle çapının alınması bu artıştaki en önemli etkindir.

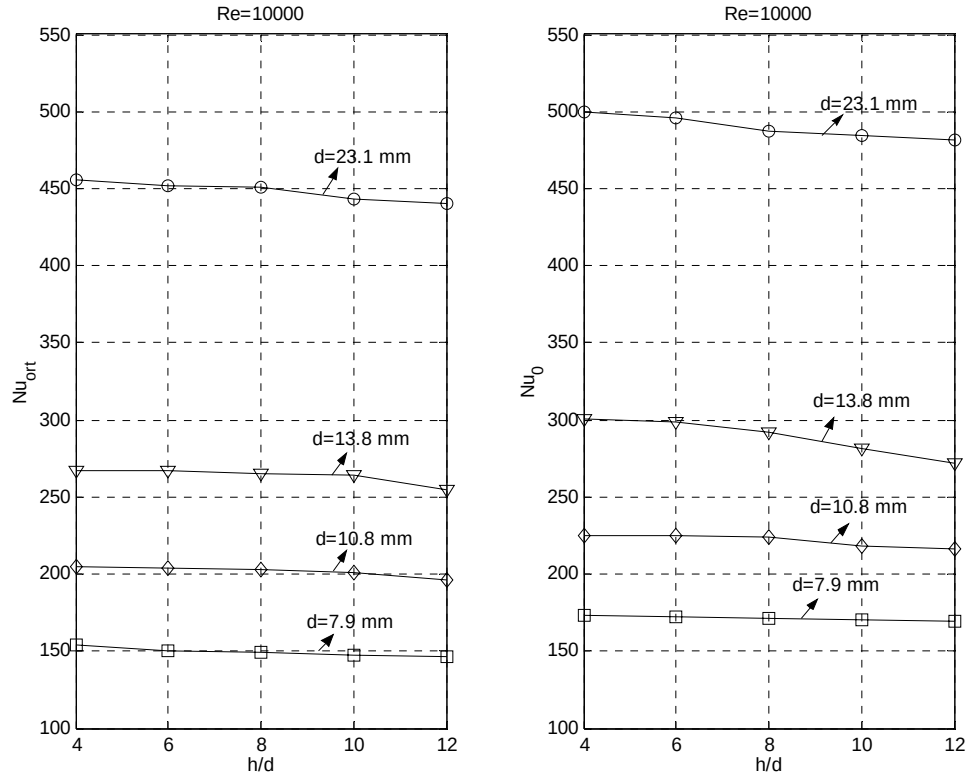
Şimdi lüle çapını arttırmanın durma noktası ve ortalama Nusselt sayısı üzerinde nasıl bir etki yaptığını başka bir bakış açısıyla bakalım; Şekil (5.31)'de Re sayısının 5000 değerinde lülelerde hesaplanan durma noktası ve ortalama Nusselt sayılarının her bir h/d 'de nasıl değiştiği yan yana grafiklerle verilmiştir. Takip eden diğer şekillerde (5.32-5.35) sırasıyla Re sayısının 10000, 15000, 20000 ve 25000 değerlerindeki lüle çapına göre durma noktası ve ortalama Nu sayısı değişimlerini göstermektedir.

Şekillerde ilk göze çarpan unsur ortalama Nu sayısının tüm Re sayılarında ve tüm lüle çaplarında durma noktası Nu sayısından düşük çıkmasıdır. Diğer önemli bir husus ise karakteristik uzunluğun yani lüle çapının Nu sayısı üzerindeki dominant etkisidir. Nu sayısını hesaplamada bu tür dairesel yuvarlak lülelerde karakteristik uzunluk olarak lüle çapını almanın birincil nedeni akımın çapın şekliyle yayıldığıнын varsayılmasıdır. Zira yakın lüle-levha mesafesi deneylerinde görülmüştür ki levhaya çarpan hava akımı yüzey üzerinde lüle çapı kadar bir etki alanı oluşturur. Lüle-levha mesafesi arttıkça etkime alanı da genişleyen bir çemberi andırır.

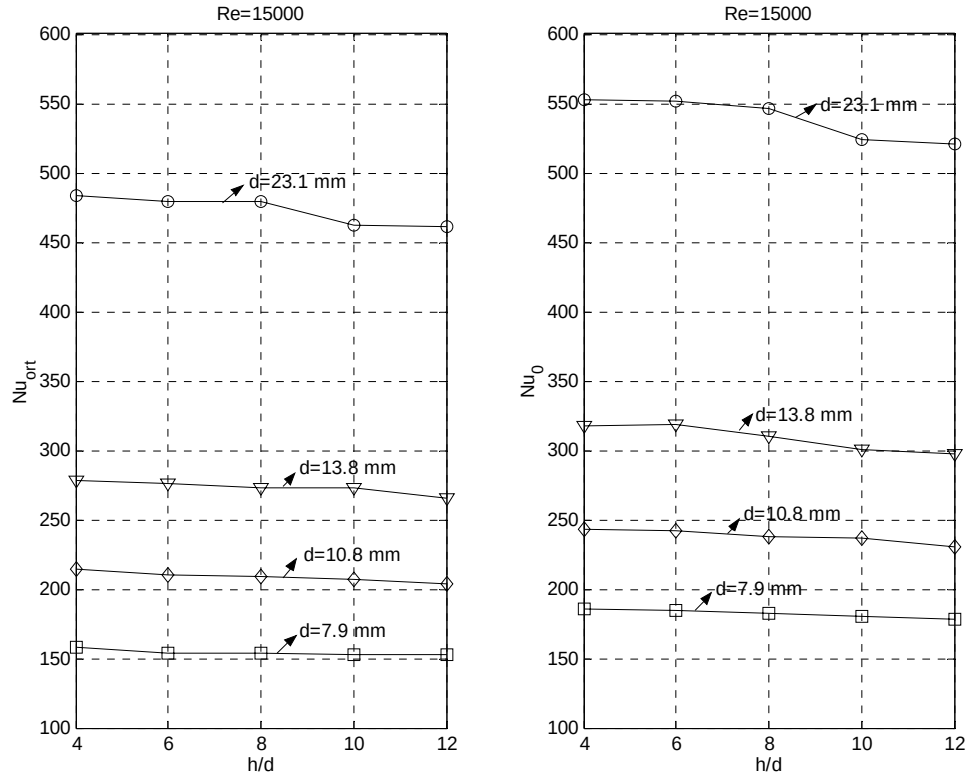
Görüldüğü gibi; $d=7.9$ mm'lik jet çapında yaklaşık 160-150 civarında seyreden durma noktası Nusselt sayısı, çap arttıkça $d=10.8$ mm'de 200-220, $d=13.8$ mm'de 250-280, $d=23.1$ mm'de 450-470 civarında bir değer aralığına çıkmıştır. Tüm ölçümlerde jet akışının debisi eşit Re sayısına getirilmiştir. Böylece lüle çapı arttıkça hız azalmıştır. $d=23.1$ mm çaplı lüle, akışın en düşük hızda gönderildiği lüledir. Bu lüle çapında durma noktasında ölçülen sıcaklıklar diğer lüle çaplarındaki sıcaklıklara göre daha yüksektir. Şöyle ki; $d=7.9$ mm çaplı lülede durma noktası sıcaklığı, $Re=25000$ 'de $h/d=4$ 'te sabit $T_s=96$ °C sıcaklıktan $T_0=69.95$ °C değerine kadar düşerken, $d=10.8$ mm'de $T_0=75.4$ °C, $d=13.8$ mm'de $T_0=77.13$, $d=23.1$ mm'de $T_0=80.7$ °C 'ye düşmüştür. Ancak, düşük sıcaklık farkına rağmen en yüksek Nu sayısı değerleri $d=23.1$ mm' de görülmüştür.



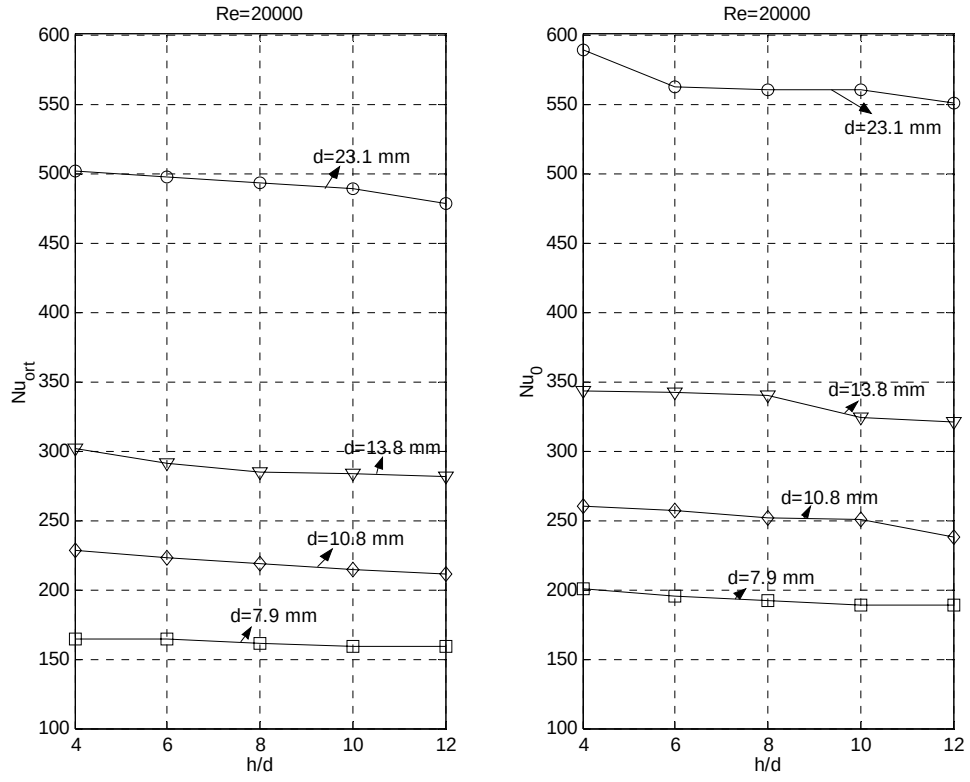
Şekil 5.31. $Re=5000$ 'de Re sayısı ile a) durma noktası ve b) ortalama Nu sayısının h/d ile değişimi.



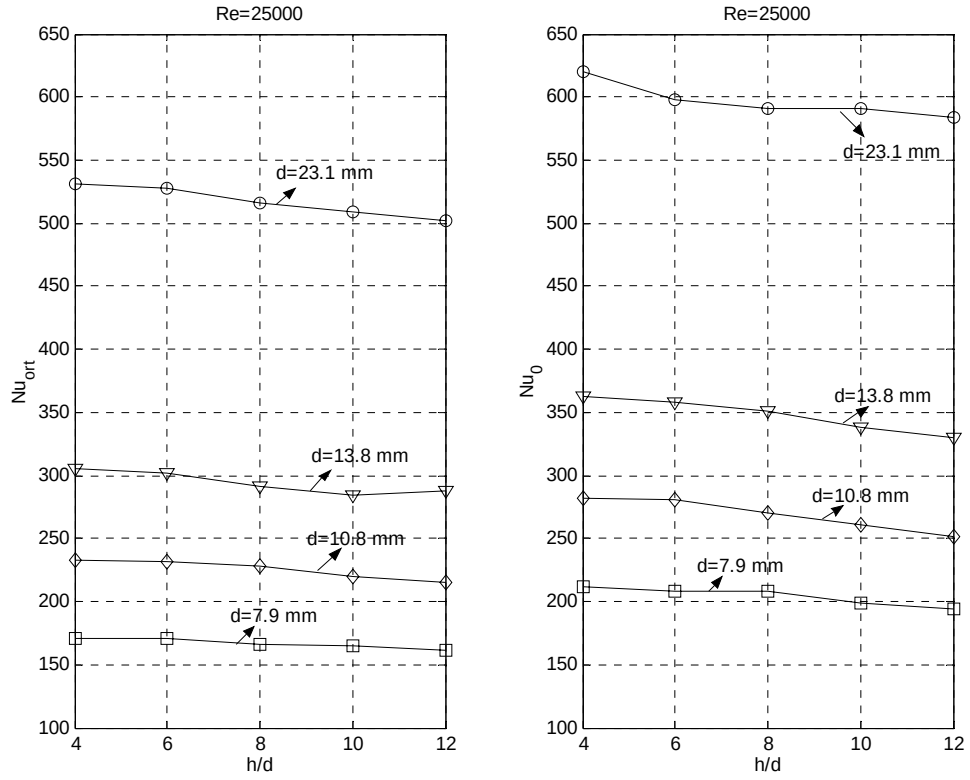
Şekil 5.32. $Re=10000$ 'de Re sayısı ile a) durma noktası ve b) ortalama Nu sayısının h/d ile değişimi.



Şekil 5.33. $Re=15000$ 'de Re sayısı ile a) durma noktası ve b) ortalama Nu sayısının h/d ile değişimi.



Şekil 5.34. Re=20000'de Re sayısı ile a) durma noktası ve b) ortalama Nu sayısının h/d ile değişimi.



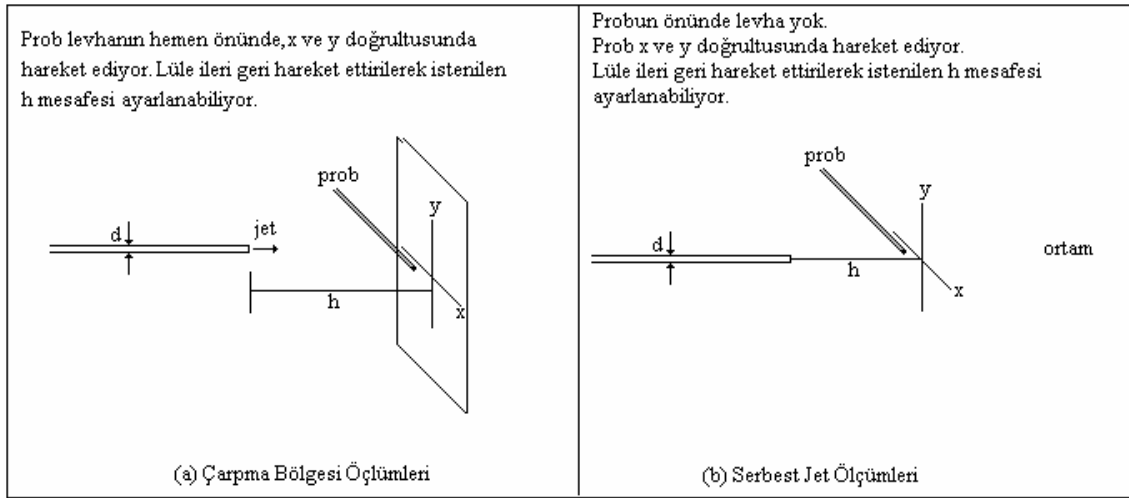
Şekil 5.35. Re=25000'de Re sayısı ile a) durma noktası ve b) ortalama Nu sayısının h/d ile değişimi.

6. DÜZ DAİRESEL LÜLELERE AİT AKIŞ DİNAMİĞİ DENEY SONUÇLARI

Çalışmanın bu bölümünde düz dairesel jetlerin ortalama hız ve türbülans şiddeti ölçümleri grafiksel olarak sunulmuştur. Test edilen dört farklı lüle çapından özellikle $d=13.8$ mm çaptaki lüle değerlendirmeleri bu bölüm içerisinde, diğer lülelerin grafikleri ise EK-B’de verilmiştir. Bu tercihe, bir sonraki bölümde yer alan eş eksenli jet çalışmalarında dış lüle çapının benzer şekilde 13.8 mm alınması neden olmuştur.

Ortalama hız ve türbülans şiddeti ölçümleri yapılırken başlangıçta hedeflenen nokta; evvela çarpma olmaması durumunda serbest jet halinde iken akım bölgesi içerisindeki akış dinamiğini gözlemlemek ve akabinde çarpma olması durumunda levhaya yakın bölgede akış karakteristiğini tespit etmektir. Özellikle jet çarpması gerçekleştiği esnada prob levha üzerine yakın mesafede bulundurularak duvar jeti bölgesi ve çarpma (veya durma) bölgesi incelenmek istenmiştir. Ancak probun kablo kalınlığı ve kabloyu taşıyan cam çubukların kalınlığı prob ucunun levhaya tam temasını engellemiştir (prob-levha arası mesafe tüm deneylerde yaklaşık 3.2 mm’dir). Bu durumda sınır tabaka kalınlığını da içeren duvar jeti bölgesi incelenememiştir. Alınan ölçümler ancak levhaya yakın mesafedeki çarpma bölgesi ölçümleri olarak sınırlanmıştır.

Şekil (6.1)’de çalışma içerisinde adı geçen koordinat eksenleri ve ölçüm mekanizması her iki durum için verilmiştir. Çalışma h/d boyutsuz mesafesinin 4, 6, 8, 10 ve 12 değerleri ve Z^* boyutsuz mesafesinin 0.23, 2, 4, 6, ve 8 değerlerinde, Re sayısının 5000, 10000, 15000, 20000 ve 25000 değerlerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.1. Akış dinamiği deneylerinde kullanılan koordinat düzlemi

6.1. Serbest Jet Akışı (d= 13.8 mm için)

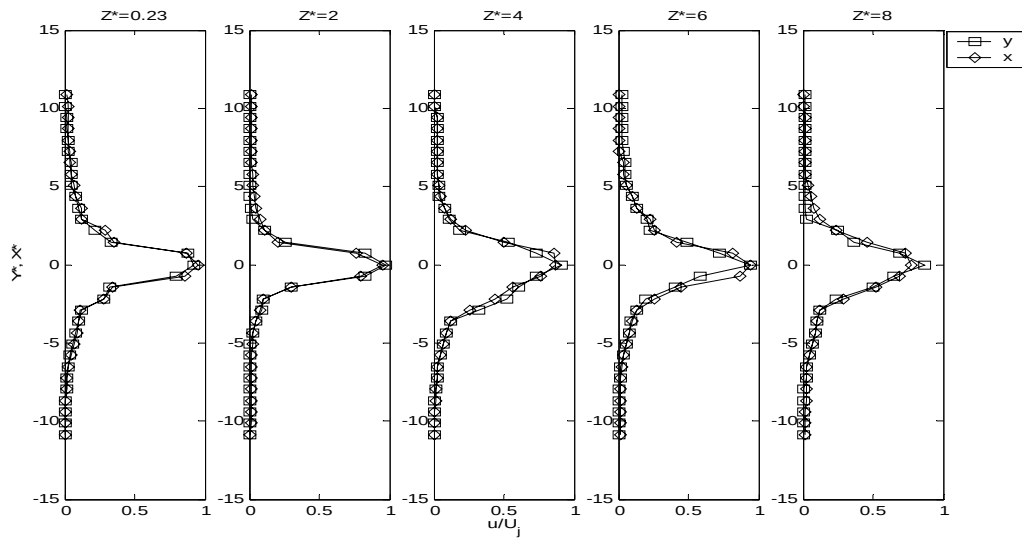
6.1.1. Ortalama Hızın Değişimi

Serbest jetlerin en önemli özelliği aşırı derecede kararsız olmalarıdır. Bir jetin kararlılığı maksimum hız ve aralık genişliği ile ifade edilen Reynolds sayısı ile karakterize edilir. Reynolds sayısı 10 ve yaklaşık 50 arasında jette periyodik hız değişimleri bulunur. Bu hız değişimleri düzensiz hale dönüşmeden akım yönünde gidildikçe yok olurlar. Reynolds sayısı yaklaşık olarak 50'yi geçtiği zaman periyodik değişimler düzensiz türbülanslı değişimlere dönüşürler. Periyodik değişimlerin frekansı kabaca jet hızının karesi ile orantılıdır.

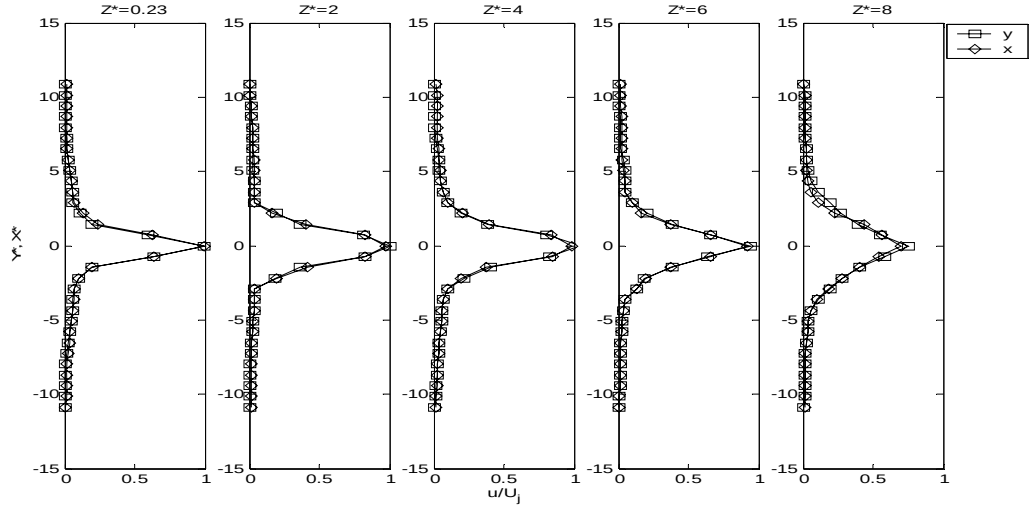
Araştırmalar çarpma olmaması durumunda durgun ortama yayılan düzlemsel bir jetin akış alanının üç ana bölgeye ayrılabilceğini göstermiştir. Bunlar; PC (potansiyel çekirdek) bölgesi, CD (karakteristik bozulma) bölgesi, AD (asimetrik bozulma bölgesidir) [73-75]. Araştırmacılar noktasal eksen üzerindeki hız profilinin jet kesitindeki yayılımına bağlı olarak yönünü bulmuşlardır.

Schlichting [4] ve diğer bazı araştırmacılar jet yarı genişliğinin düzlemsel jet halinde laminar ve türbülanslı akım için sırasıyla $(h/d)^{2/3}$ ve x ile orantılı olarak değiştiğini, merkez hattı hızının ise laminar akım halinde $x^{-1/3}$ ile, türbülanslı jette ise $x^{-1/2}$ ile orantılı değiştiğini savunmuşlardır. Yine Schlichting [4] ve birçok araştırmacıya göre [1, 3] dairesel bir serbest jette potansiyel çekirdek bölgesi türbülanslı akımda, jet çıkış yarı genişliğinin 12 katı kadar yani jet çapının 6 katı kadarlık bir mesafedir.

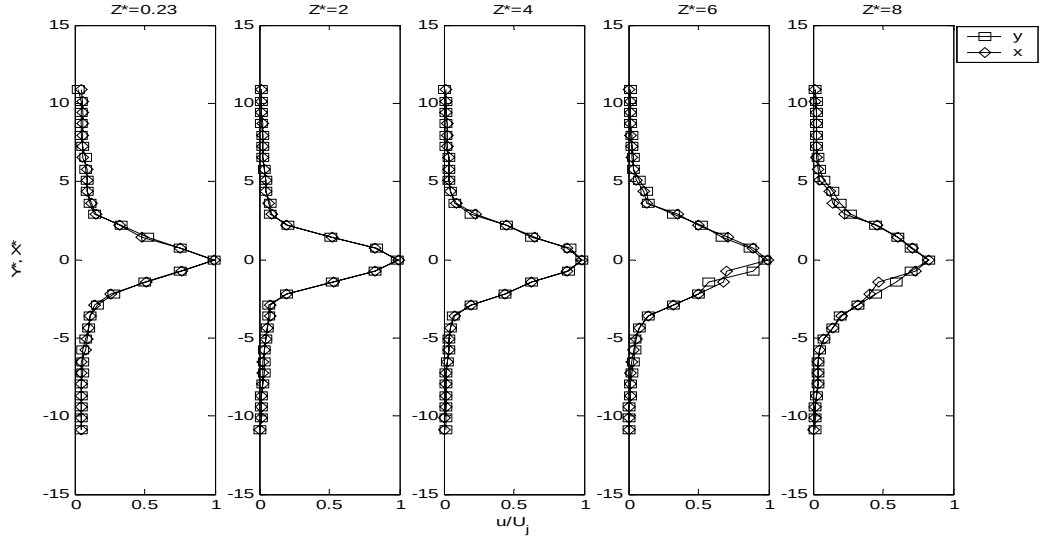
Bu bilgiler ışığında deneysel çalışmada elde edilen verilerin değerlendirmesine gelemiz: d=13.8 mm'lik lüle çapındaki yuvarlak jet için, Re=5000–25000 aralığında jetin serbest yayılımını gösteren grafikler Şekil (6.2)–(6.6) arasında verilmiştir.



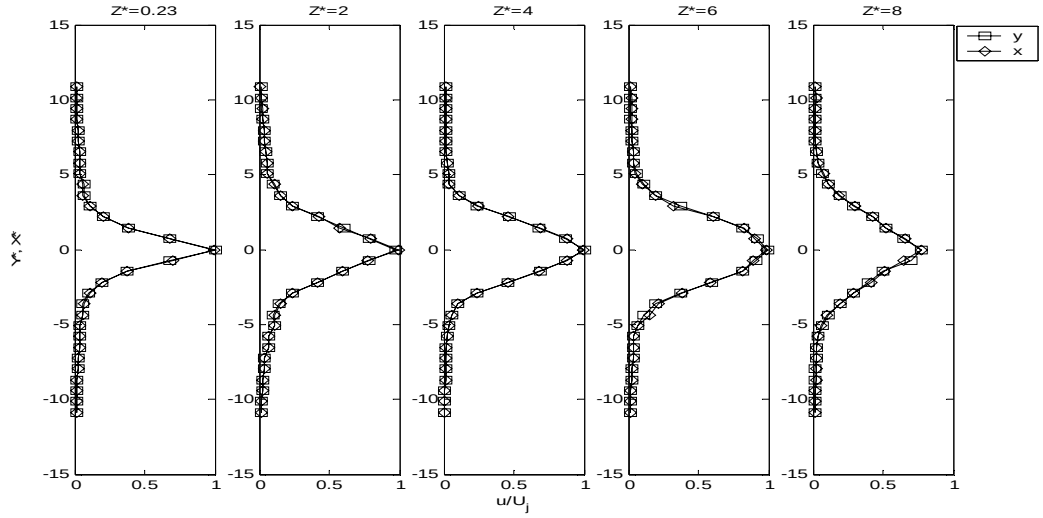
Şekil 6.2. d=13.8 mm çaplı düz lülede Re=5000 için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=5.5$ m/s



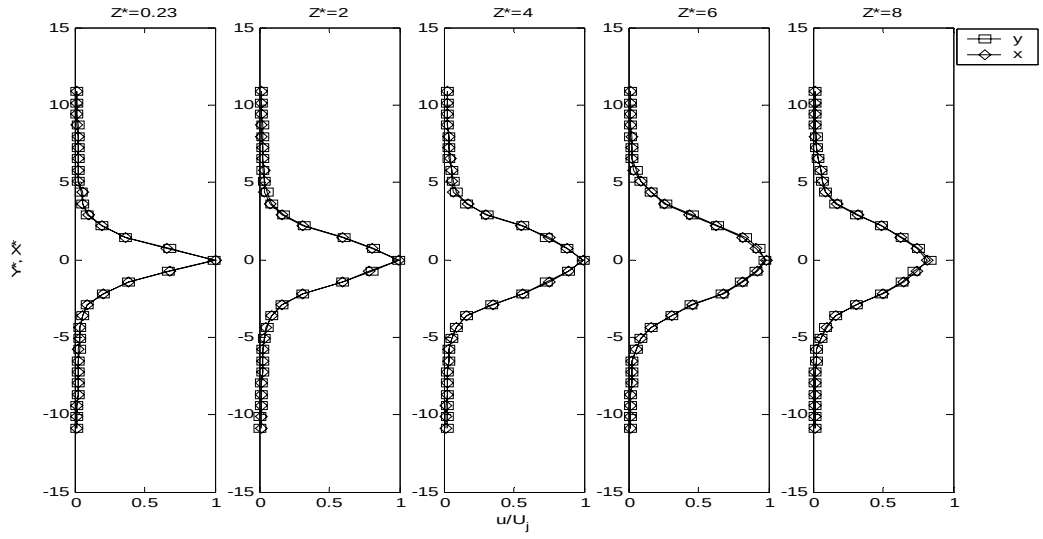
Şekil 6.3. $d=13.8$ mm çaplı düz lülede $Re=10000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi $U_j=11.35$ m/s



Şekil 6.4. $d=13.8$ mm çaplı düz lülede $Re=15000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi $U_j=16.5$ m/s

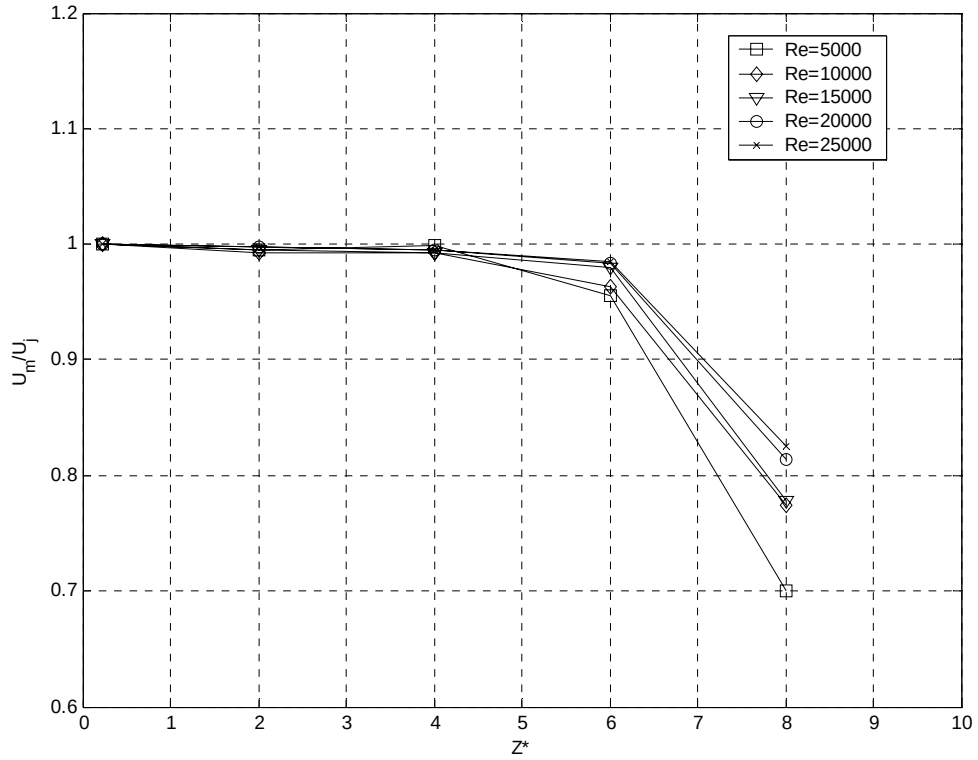


Şekil 6.5. $d=13.8$ mm çaplı düz lülede $Re=20000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi $U_j=22.5$ m/s



Şekil 6.6. $d=13.8$ mm çaplı düz lülede $Re=25000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi $U_j=27.5$ m/s

Şekillerden $Z^*=h/d=6$ 'ya kadar merkez hattı hızın yaklaşık olarak sabit kaldığı görülüyor. Akım biraz daha ilerlediğinde ve $Z^*=8$ 'e ulaştığında merkez hattı hızı yaklaşık %22.19 oranında düşmektedir. Bu da dairesel jette potansiyel çekirdek bölgesinden sonra hızla gerçekleşen bir yavaşlama olduğunu göstermektedir.



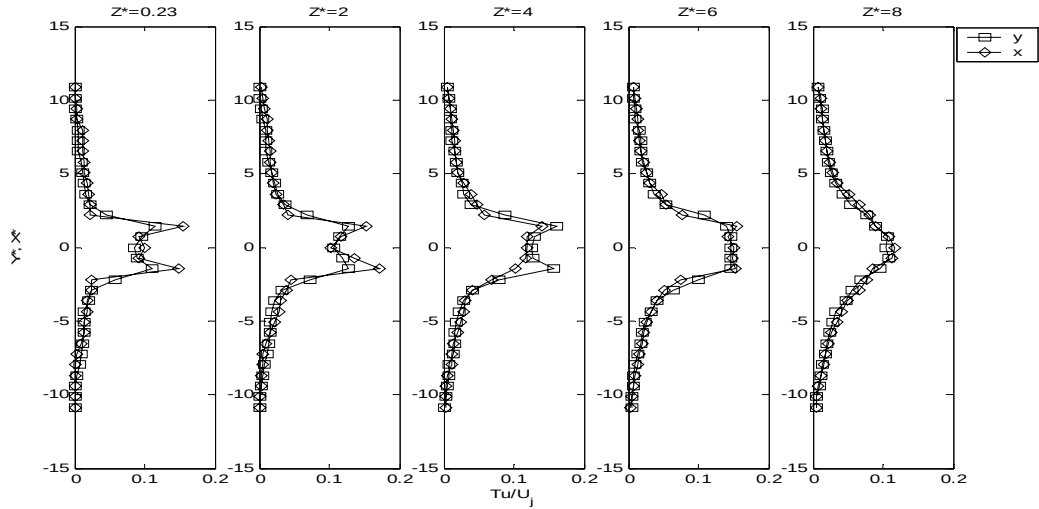
Şekil 6.7. $d=13.8$ mm için serbest jet durumunda merkez hattı hızın jet çıkış hızına oranı

Şekil (6.7)'de merkez hattı hızlarının her bir eksenel mesafeye göre değişimi her bir Re sayısı için ayrıca verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi potansiyel çekirdek bölgesi $Z^*=6$ 'ya çok yakın bir değer çıkmaktadır.

Dairesel bir jet akımında diğer bir önemli özellik klasik çan eğrisi şeklindeki hız profilleridir. Jet çıkış ağzına ve görünüş oranına bağlı olarak değişiklik göstermekle beraber jet akımlarının genelinde çan eğrisi profili görülür. Eğrinin tepesindeki en yüksek değer ile en uç noktada ölçülen değer arasındaki fark, hızın ortam içerisindeki enine ve boyuna dağılımının boyutlarını verir.

6.1.2. Türbülans Şiddeti

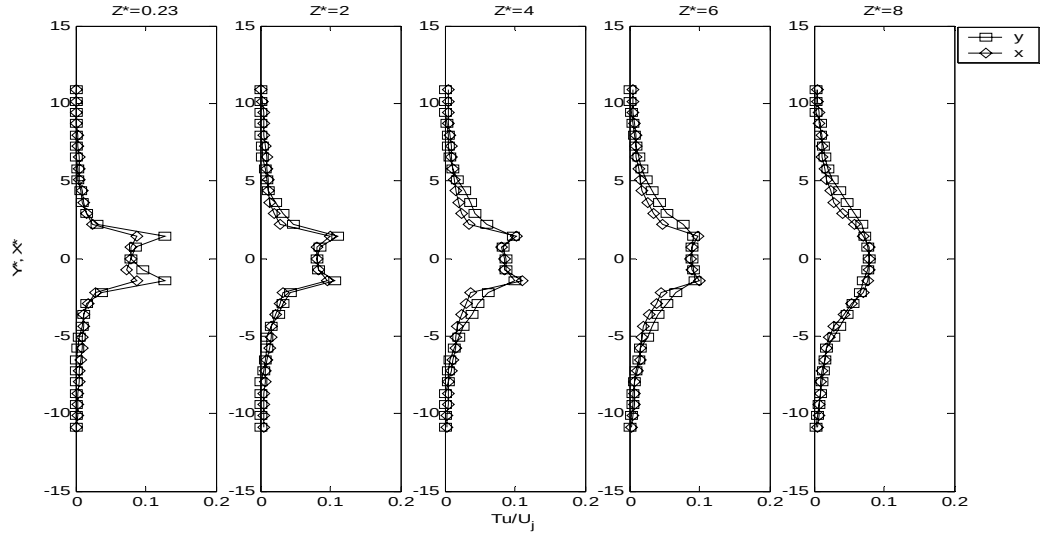
$d=13.8$ mm çaplı düz dairesel lülenin serbest jet şeklinde durgun ortama yayılması esnasında oluşan türbülans şiddeti değerleri boyutsuzlaştırılarak Şekil (6.8)-(6.12) arasındaki grafiklerle gösterilmiştir. Grafikler bir önceki bölümde olduğu gibi Re sayısının 5000-25000 aralığındaki değerlerine göre çizilmiştir.



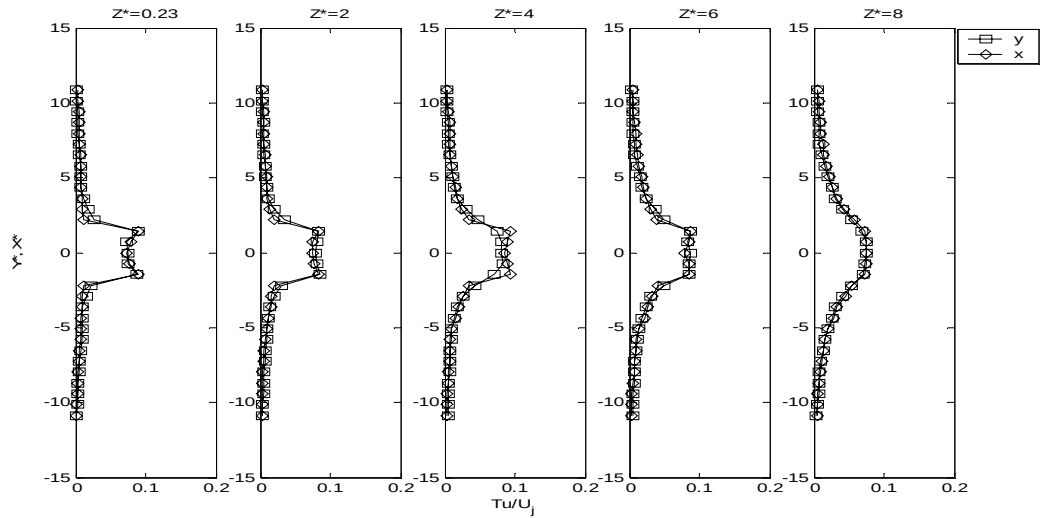
Şekil 6.8. $d=13.8$ mm çaplı düz lülede $Re=5000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi $U_j=5.5$ m/s

Türbülans şiddeti ölçümlerinde karşımıza çıkan ilk önemli özellik sırtı çukur profil (saddle-backed) denilen eğri profilleridir. Bu profil, merkez hattında maksimum hız değerine sahip olan jetin merkezin yakın alanı içerisinde ani pikler yapmasıyla oluşur. Daha önce teorik bilgi faslında da belirtildiği gibi bu pikler şu nedenlerle oluşabilir: ya laminardan türbülanslı sınır tabaka akışına geçiş söz konusudur [14], ya da maksimum pik, jet çevresinde kayma gerilmesi bölgesinde şekillenen vortekslerin olduğu nokta ile yaklaşık olarak çakışmaktadır [17, 18]. Araştırmacılar bu iki sebebin üzerinde ayrı ayrı durmuşlardır. Bizim için burada

önemli olan elde ettiğimiz bu akımın ısı transferini ne yönde etkilediğidir. Piklerin oluşma sebepleri ve mekanizmaları derinlemesine incelenmesi gereken ayrı bir araştırma konusudur.

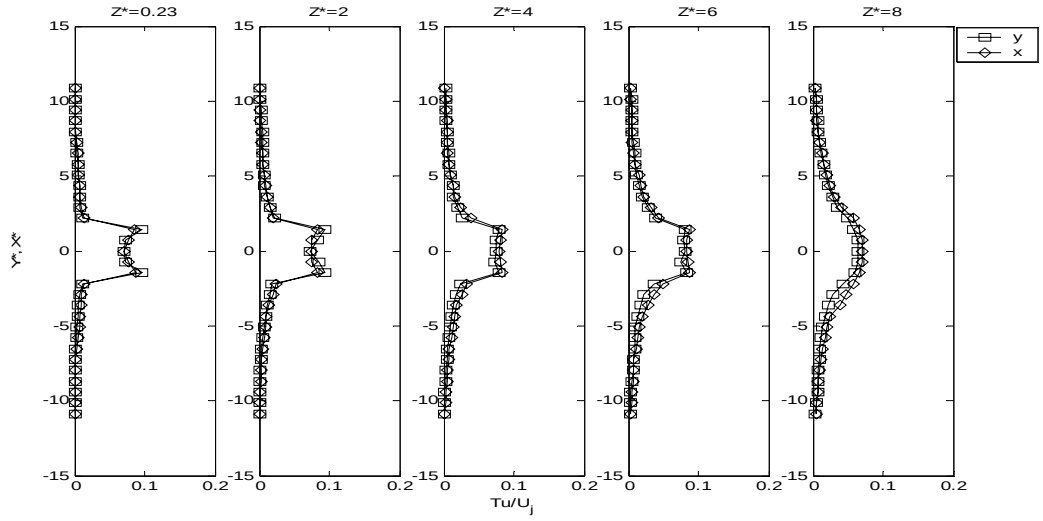


Şekil 6.9. $d=13.8$ mm çaplı düz lülede $Re=10000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi $U_j=11.35$ m/s

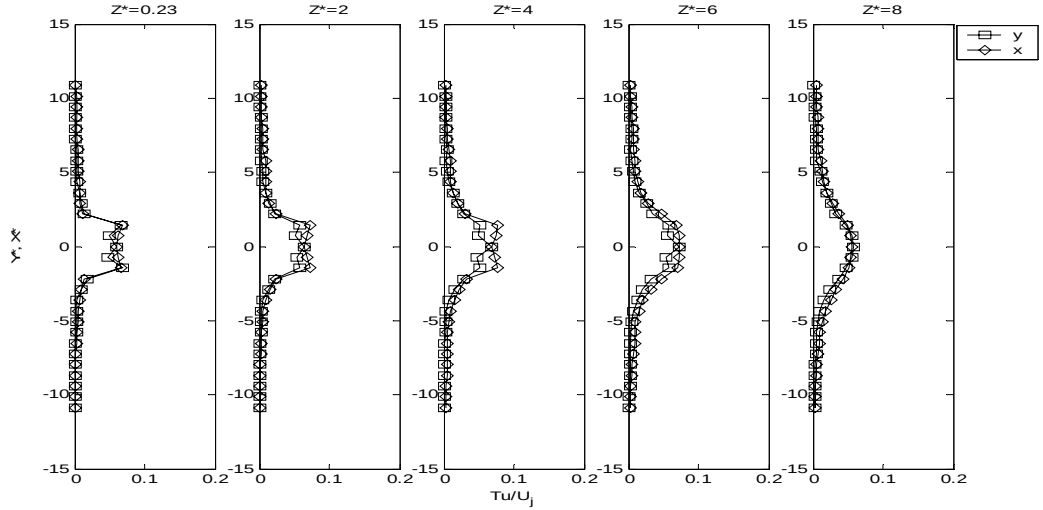


Şekil 6.10. $d=13.8$ mm çaplı düz lülede $Re=15000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi $U_j=16.5$ m/s

Şekil (6.8)-(6-12) arasındaki tüm grafiklerde türbülans şiddeti değerlerinin aksenal mesafeyle birlikte önce artış gösterdiği, sonra azaldığı izlenmiştir. Artma olan kısım deneylerin genelinde $Z^*=6$ mesafesine kadardır. $Z^*=8$ 'de hafif bir düşüş başlar. Re sayısı 5000'de bu artış miktarı $Z^*=0.23$ 'den $Z^*=2$ 'ye ulaştığında %23.99 oranındadır. $Z^*=0.23$ 'den $Z^*=4$ 'e çıkmasıyla %46.00, $Z^*=0.23$ 'den $Z^*=6$ 'ya çıkmasıyla %69.01 artış olmakta ve $Z^*=0.23$ 'den $Z^*=8$ 'e çıkmasıyla %21.61 oranında düşüş gerçekleşmiştir. Görüldüğü gibi $Z^*=6$ 'ya kadar türbülans şiddeti yüksek oranlarda artış göstererek ilerlerken, $Z^*=8$ 'den itibaren yüzde miktarında düşüş başlamıştır.

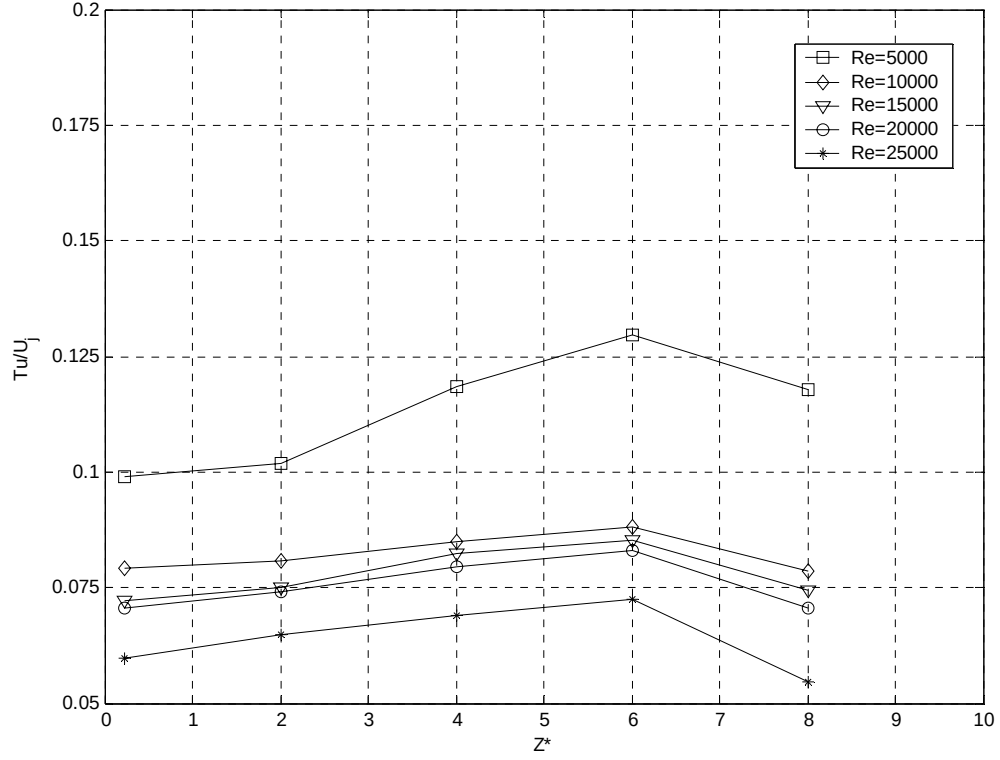


Şekil 6.11. $d=13.8$ mm çaplı düz lülede $Re=20000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi $U_j=22.5$ m/s



Şekil 6.12. $d=13.8$ mm çaplı düz lülede $Re=25000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi $U_j=27.5$ m/s

Literatürde serbest jette türbülans şiddeti ölçümleri yapan araştırmacılar; jetin durgun havaya karışarak çalkantı hızının azalmaya başladığı alanı lüle çapının 8-10 katı bir mesafe olarak göstermişlerdir. Örneğin Lee ve arkadaşlarının [76], 13 mm çapındaki düz dairesel boru tipi lüle ile bu çalışmadakine yakın aralıktaki Re sayılarında yaptıkları deneylerde, $h/d=8$ dolaylarında iken türbülans şiddetinde azalma eğilimi başlayacağı görülmüştür. Bu çalışmada test edilen $d=13.8$ mm çapındaki lülede de türbülans şiddeti değerleri $6d$ mesafesine kadar artış gösterirken bu mesafeden sonra azalma eğilimindedir. Şekil (6.13), merkez hattından itibaren ölçülen türbülans şiddeti değerlerini göstermektedir.



Şekil 6.13. $d=13.8$ mm için serbest jet durumunda türbülans şiddetinin jet çıkış hızına oranı

6.2. $d=13.8$ mm Çaplı Lüle için Çarpma Levhasına Yakın Mesafe Ölçümleri

Jet akımlarının serbest halde akış dinamiği çalışmaları şu ana kadar gelişen teknolojiyle birlikte artarak devam etmektedir. Ancak giriş kısmında da belirtildiği gibi çarpma bölgesi üzerinde yapılan çalışmaların yetersizliği söz konusu. Çarpma bölgesinin teorik analizi oldukça zordur ve bu kısımda akışkanlar mekaniğinde yeterli bilgi mevcut değildir. Çünkü Navier-Stokes denklemleri ile iki boyutlu sürekli rejimde çarpma akışı ile ilgili problem için çözüme ulaşma ihtimali varken, türbülanslı akışta tanımlanamadığı için kullanılamaz [1,9].

Bu çalışmada kullanılan sıcak-tel anemometre, tek bir noktada anlık ölçüm alabilen, ancak hızın vektörel değişimini incelemeye kullanılamayan bir cihazdır. İçerisinde sınır tabaka akışını ihtiva eden, son derece hassas bir bölgenin incelenmesinde yeterli olamayacağı da açıktır. Bu gerçekten yola çıkılarak, çarpma esnasında oluşan hız ve türbülansın detaylarının tespitinden daha ziyade çarpma noktasına yakın alanda lüle-levha arası mesafenin değiştirilmesinin nasıl bir etki yarattığının incelenmesi daha mantıklı bulunmuştur. İkinci olarak bizi bu seçime sevk eden unsur şöyle açıklanabilir: lüleden çıkan jetin levhaya çarptırılması esnasında oluşan ısı transferi incelenirken, ısı transferi üzerinde etkili olduğu görülen iki parametrenin yani lüle-levha arası mesafe değişikliğinin ve Re sayısının, hız ve türbülansı nasıl

etkilediğini görmek. Böylece çarpma esnasında yüksek oranda bir soğutma sağlayan bu iki parametrenin nasıl bir akım etkisi yarattığını incelemek doğru olacaktır diye düşünülmüştür. Son olarak bu şekil bir incelemenin literatürde geniş çapta yer bulmamış olması bu seçimdeki üçüncü ana faktördür.

Dairesel tam gelişmiş yuvarlak jetlerde akış dinamiği, literatür araştırması faslında da anlatıldığı gibi dört ana bölgeye ayrılır: serbest jet, gelişen jet, durma veya çarpma bölgesi ve duvar jeti. Çarpma bölgesi içerisinde akış, hedef yüzeyden etkilenmekte olup, düşeyde de yatayda da sırasıyla, önce yavaşlar sonra hızlanır. Tani ve Komatsu [5] bu bölgenin çarpma yüzeyinden itibaren yaklaşık olarak lüle çapının iki katı kadar mesafeye ($L_{dz}=2d$) uzayabileceğini göstermişlerdir. Girald ve arkadaşları [6] bozulma bölgesinin yüksekliğinin lüle çapının 1.2 katı kadar mesafede olduğunu bildirmişlerdir. Lüle ile levha arası mesafenin artmasıyla veya azalmasıyla birlikte çarpma bölgesinde nasıl bir etki olacağı ise şu ana kadar literatürde fazlaca incelenmiş değildir.

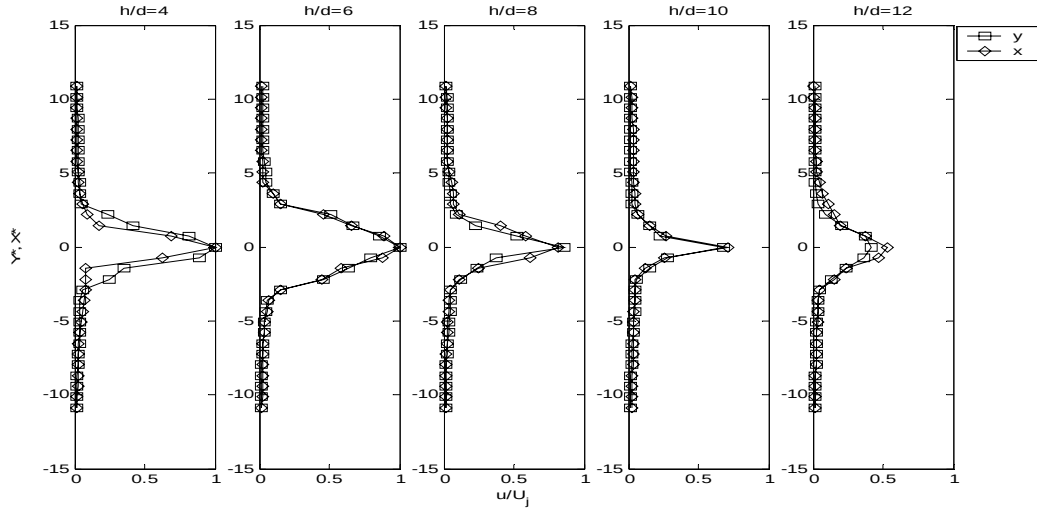
Levhaya yakın mesafedeki hız ve türbülans şiddeti değerleri hem düşey hem de yatay doğrultuda (Y^* , X^*) ölçülmüştür. Ölçümler farklı lüle-levha mesafelerinde ($h/d=4, 6, 8, 10$ ve 12) alınmıştır. Düz dairesel jetlerle yapılan toplam 100 deneyin 92'sinde X^* ve Y^* eksenlerinde durma noktasının alt-üst ve sağ-sol kısımlarında ölçülen değerlerin birbirilerine olan farklılıkları binde birlik oranlarla ifade edilecek kadar düşüktür. Geri kalan deneylerde gözlenen sapmalar ise deneysel hatalardan kaynaklanmaktadır. İlk deneylerden sonra yarı-simetri şartının sağlandığı görülmeye rağmen belirsizlik analizinin tam tespit edilebilmesi ve uygun korelasyonların türetilmesi için deneylere her iki ekseninde ölçümler alınarak devam edilmiştir. Ancak bu deneylerde elde edilen sonuçlar bir sonraki bölümde sunulacak olan eş-eksenli jetlerin akış dinamiği testlerinde ölçümlerin yalnızca X^* veya Y^* eksenlerinden birinden alınabileceğinin teyidi olmuştur.

6.2.1. Ortalama Hız Değerleri

Jet çıkışından başlayarak uzaklık arttıkça, jet ile çevre arasındaki momentum aktarımı, jetin serbest sınırının genişlemesine ve sabit hız çekirdeğinin daralmasına yol açar. Çekirdeğin aşağısında, hız profili tüm jet kesiti boyunca sabit değildir ve en yüksek hız (orta noktada), lüle çıkışından itibaren uzaklık arttıkça azalır. Şekil (6.14)-(6.19)'da görüldüğü gibi $h/d=4$ ve $h/d=6$ değerinde tüm Re sayılarında $u/U_j=1$ 'dir. Daha açık bir ifadeyle; prob levhaya 3.2 mm uzaklıkta iken levhaya çarptırılan hava jetinin hızı lüle ile levha arasındaki mesafe $6d$ oluncaya kadar eşit olarak ölçülmüştür. Bu bölge çevredeki akışkanın jete karıştığı ve böylece jet hızının lüle çıkışından itibaren azalma eğilimi gösterdiği akış bölgesidir. Lüle-levha arası mesafe

arttırıldıkça (8d, 10d ve 12d) levhanın geometrik orta noktasında ölçülen hız da düşüş göstermiştir. Levhanın geometrik orta noktası, ısı transferi deneylerinde de hatırlanacağı gibi aynı zamanda durgunluk noktası (durma noktası) ile çakışmaktadır.

Lüle-levha arası mesafe dışında çarpma bölgesinde jete etkiyen diğer bir parametre ise Re sayısıdır. Tüm deneylerde kıyas yapılabilmesi için Re sayısı 5000-25000 aralığında seçilmiştir.



Şekil 6.14. $d=13.8$ mm, $Re=5000$ iken h/d ile ortalama hızın değişimi; $U_j=5.5$ m/s

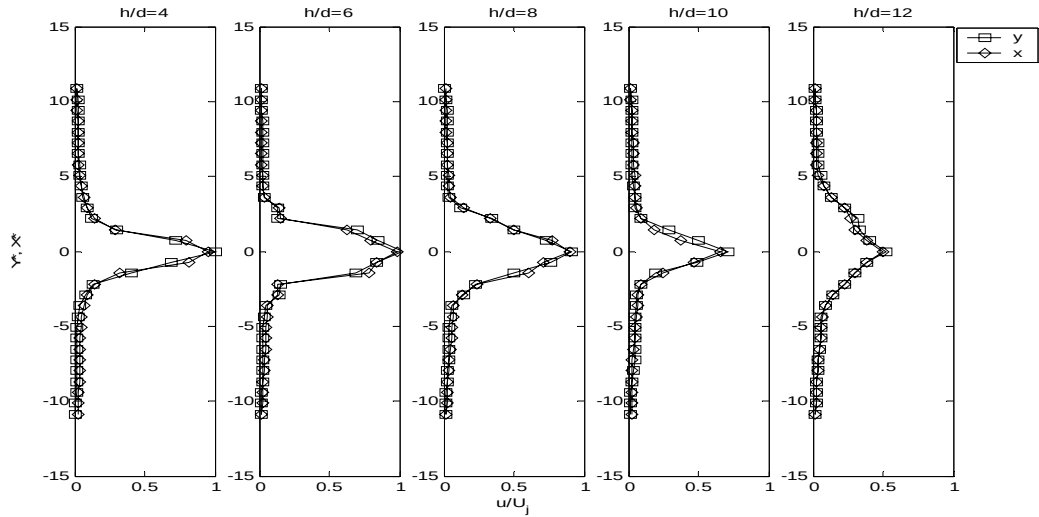
Şekil (6.14)'de Re sayısının 5000 değerinde çeşitli lüle-levha mesafelerinde çarpma bölgesinde ölçülen hız değerleri boyutsuzlaştırılarak verilmiştir. $Re=5000$ iken düşeyde (Y^*) lüle-levha arası mesafe serbest jetin dışına çıkınca ortalama hız jet çıkış hızına oranla $h/d=8, 10$ ve 12 'de sırasıyla %85, 67 ve 41 kadar azalmıştır. Yatayda (X^*) benzer şekilde azalma oranı %81, 71 ve 53'tür. Jetin etki alanı da Re sayısının düşük değerinde kısa mesafelerdedir.

Re sayısının 5000 değerinde, lülenin geometrik orta noktasında ($X^*=Y^*=0$) ölçülen hızın, lüle-levha mesafesinin çapın altı katı olması durumuna kadar jet çıkış hızına eşit olduğu görülmüştür. Bu alan potansiyel çekirdek bölgesidir ($L_{pc}=6d$) ve potansiyel çekirdeğin dışına çıkıldıkça geometrik orta nokta üzerinde ölçülen hava hızında azalma olduğu görülmüştür. Bu azalma $h/d=8$ 'de $h/d=6$ 'ya göre %18.08, $h/d=10$ 'da $h/d=6$ 'ya göre %28.71 ve $h/d=12$ 'de $h/d=6$ 'ya göre %46.47 oranındadır.

Şekil (6.14)'de orta noktadan uzaklaştıkça hem X^* hem de Y^* yönlerinde hızın çok büyük bir düşüş gösterdiği açıkça görülmektedir. Bu düşüşler yüzde olarak $h/d=4$ 'de %98.9, $h/d=6$ 'da %98.76, $h/d=8$ 'de %97.89, $h/d=10$ 'da %97.64 ve son olarak $h/d=12$ 'de %96.83 olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi lüle levha mesafesi arttıkça azalma oranlarında düşüş olmuştur. Yani uçtaki değerler orta noktadaki değerlere daha yakındır. Akımın geniş lüle-levha aralığında

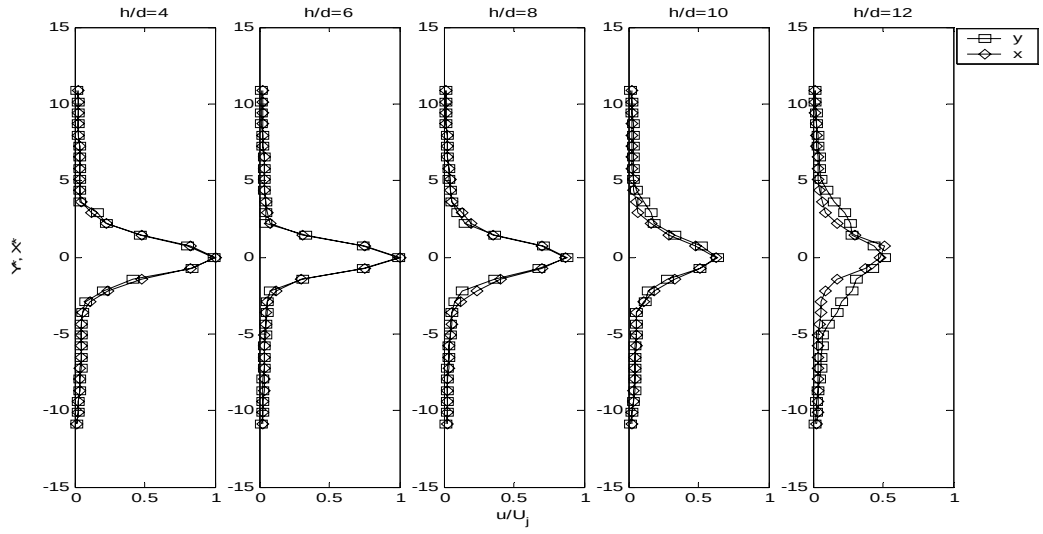
daha geniş alana yayılması jetin beklenen karakteristik özelliğidir. Lüle çapının küçük olması dolayısıyla azalma oranları görüldüğü gibi %90'lar seviyesinde, yani oldukça yüksektir.

Şekil (6.15) Re sayısının 10000 değerinde jet çıkış hızının 11.35 m/s olması durumunda boyutsuz hız dağılımını göstermektedir. Re sayısını arttırmak noktasal olarak her ölçüm noktasındaki hız değerini doğrudan arttırmaktadır. Ancak boyutsuz hız oranlarına bakıldığında u/U_j Re sayısı artışıyla önemli bir değişiklik göstermez. u/U_j boyutsuz sayısı daha ziyade jetin nasıl yayıldığını göstermektedir. Re sayısının 10000 değerinde de $h/d=6$ mesafesine kadar orta noktada ölçülen hızın sabit kaldığı görülüyor. Bu sabit hız alanı bölgesinin dışında hızlar şu şekilde bir azalma gösteriyor: $h/d=8$ 'de $h/d=6$ 'ya nazaran orta noktada ölçülen boyutsuz hız değeri %10.19, $h/d=10$ 'da yine $h/d=6$ 'ya göre %34.5, son olarak $h/d=12$ 'de $h/d=6$ 'ya göre %49.92 oranında bir azalma görülmüştür.



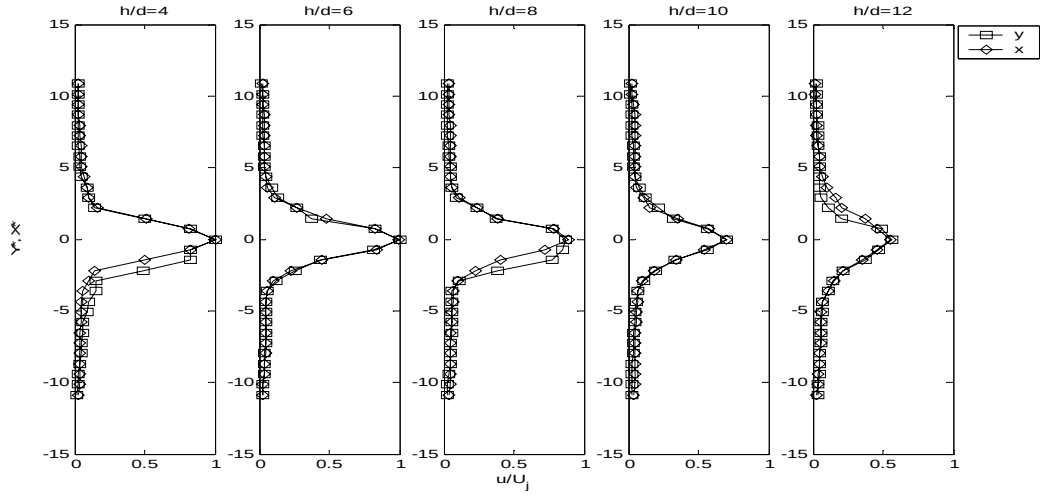
Şekil 6.15. $d=13.8$ mm, $Re=10000$ iken h/d ile ortalama hızın değişimi; $U_j=11.35$ m/s

Orta noktadan itibaren -ki bu noktanın levha üzerindeki durma noktası olduğunu tekrar hatırlatmakta fayda var- X^* ve Y^* eksenlerinin uç noktalarına doğru uzaklaştıkça hız değerinde ciddi bir düşüş söz konusu. Bu azalma miktarları $h/d=4$ 'te %98.84, $h/d=6$ 'da %98.56, $h/d=8$ 'de %98, $h/d=10$ 'da %96.94, $h/d=12$ 'de %96.29 oranlarındadır.



Şekil 6.16. $d=13.8$ mm, $Re=15000$ iken h/d ile ortalama hızın değişimi; $U_j=16.35$ m/s

Şekil (6.16)'da Re sayısı 15000'e çıkartılmıştır. Re sayısının artırılması potansiyel çekirdeğin dışında yine hızın düşmesine neden olmuştur. Şöyle ki: $h/d=8$ 'de $h/d=6$ 'ya göre boyutsuz hız oranı (u/U_j); %13.202, $h/d=10$ 'da $h/d=6$ 'ya göre %37.39 ve son olarak $h/d=12$ 'de yine $h/d=6$ 'ya göre %51.68 oranlarında azalmalar olmuştur. Orta noktadan uzaklaşmayla birlikte hız oranında görülen azalmalar ise $h/d=4$ 'de %98.11, $h/d=6$ 'da %98.15, $h/d=8$ 'de %97.36, $h/d=10$ 'da %96.6 ve son olarak $h/d=12$ 'de %95.88'dir.

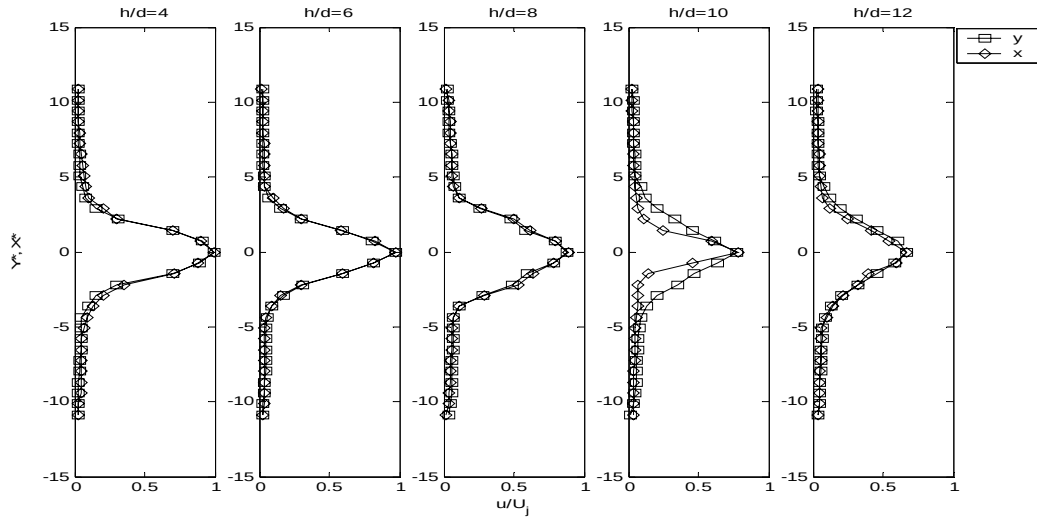


Şekil 6.17. $d=13.8$ mm, $Re=20000$ iken h/d ile ortalama hızın değişimi; $U_j=22.5$ m/s

Şekil (6.17), Re sayısının 20000 değerindeki çarpma bölgesi hız dağılımlarını vermektedir. Grafikten lüle-levha mesafesini arttırmanın, levhanın durma noktasına nüfuz eden hız değerini nasıl değiştirdiğini görmek mümkün. Ancak rakamlarla ifade edilecek olursa;

potansiyel çekirdeğin dışında hızın potansiyel çekirdek bölgesindeki hıza göre ($h/d=6$) $h/d=8$ 'de %11.10, $h/d=10$ 'da %30.16 ve $h/d=12$ 'de %45.04 olduğu görülür.

$0 \leq x/d \leq 10$ aralığında hızda yüksek oranlı düşüşler kaydedilmiştir. $h/d=4$ 'te %97.76, $h/d=6$ 'da %97.92, $h/d=8$ 'de %96.34, $h/d=10$ 'da %96.6 ve $h/d=12$ 'de %95.5 oranlarında azalma hesaplanmıştır.

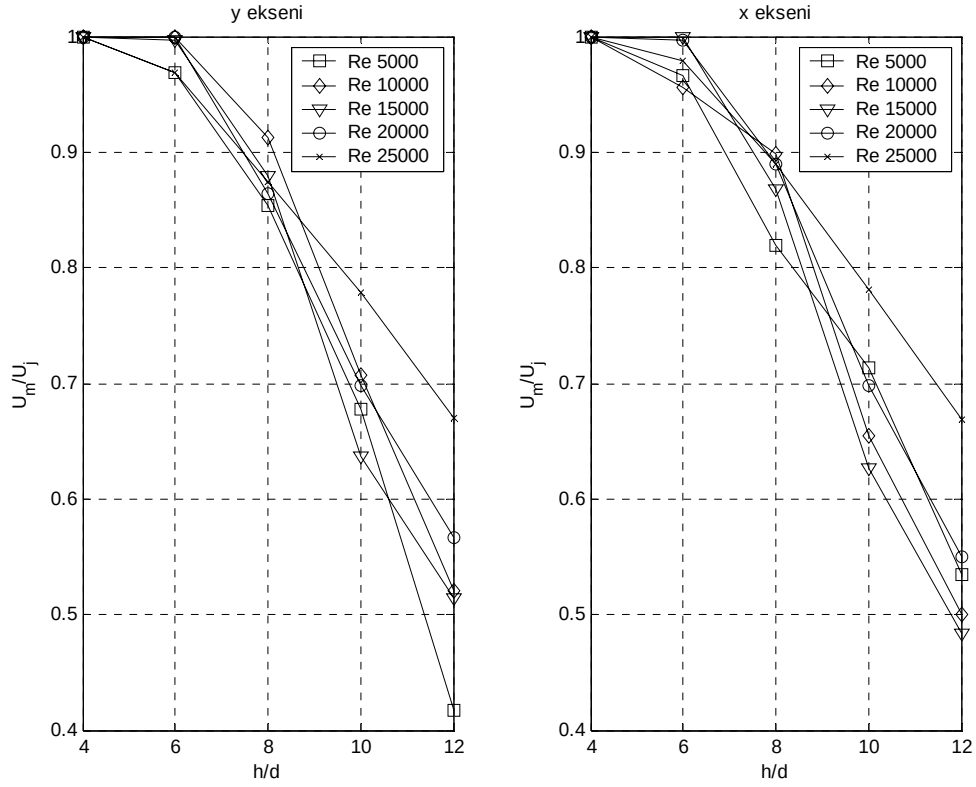


Şekil 6.18. $d=13.8$ mm, $Re=25000$ iken h/d ile ortalama hızın değişimi; $U_j=27.5$ m/s

Re sayısının test edilen en büyük değeri 25000'de $h/d=6$ 'ya göre $h/d=8$ 'de %11.06, $h/d=10$ 'da %21.87 ve $h/d=12$ 'de % 33.06 oranlarında azalma mevcuttur. Durma noktasından en uzak ölçüm noktasına göre $h/d=4$ mesafesinde %97.47, $h/d=6$ 'da %97.55, $h/d=8$ 'de %97.71, $h/d=10$ 'da %96.34 ve son olarak $h/d=12$ 'de %95.32 oranlarında azalma söz konusudur (Şekil 6.18).

Verilen tüm Re sayısı değerlerinde görülen en önemli özelliklerden biri de; hızın özellikle durma noktası etrafında küçük bir alanda yüksek değerlerde olduğu daha sonra çok hızlı bir düşüş gösterdiği. Öyle ki tüm deneyler için hesaplanan yüzde değerlerine bakılacak olursa; durma noktası ile en uzak x/d mesafesi arasında %95~98 civarında bir azalma olduğu görülür. En yüksek hız değerleri $1.45 \leq x/d \leq 1.17$ arasında görülür. Klasik çan eğrisi hız profili h/d mesafesi arttıkça ucu yassılaşıp kenarlara doğru artış gösteren bir yapı almaktadır.

Durma noktasının önünde ölçülen hız değerlerinin lüle-levha mesafesine göre değişimi X^* ve Y^* eksenlerine göre ayrı ayrı Şekil (6.19)'da verilmiştir.



Şekil 6.19. $d=13.8$ mm için durma noktasında merkez hattı hızın jet çıkış hızına oranı

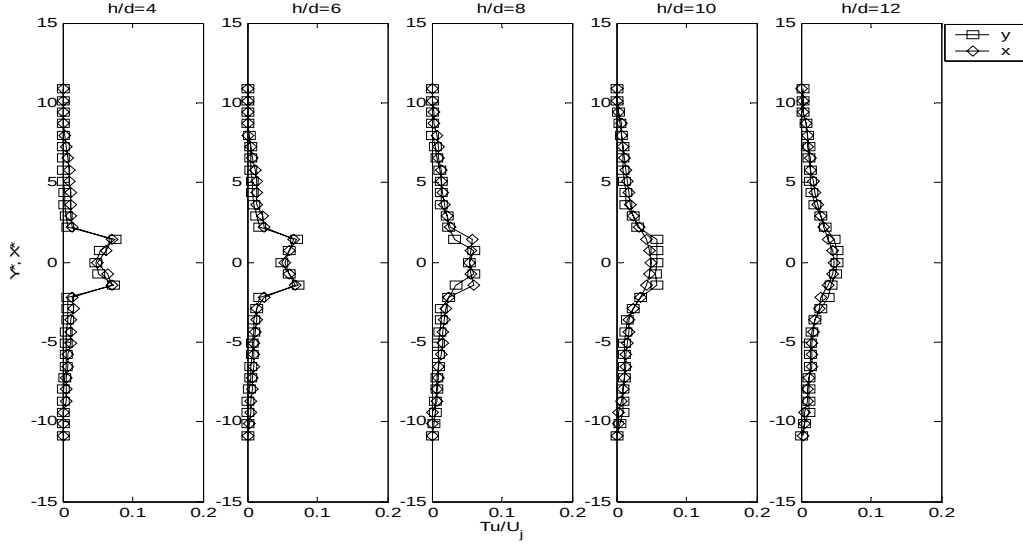
Özetle tüm Re sayılarında, farklı lüle-levha mesafelerinde çarpma bölgesinde ortalama hız profillerinden çıkartılan sonuçlar şöyle sıralanabilir.

- Jet eksen çizgisinin yüzeyde gösterdiği nokta geometrik çarpma noktasıdır ve maksimum hız bu noktada meydana gelir. Bu nokta aynı zamanda tüm deneylerimizde durgunluk noktası ile çakışmaktadır.
- Akımın çarpma levhasından ne kadar etkilendiği, aynı boyutsuz mesafelerde levhanın olmaması durumlarında, yani serbest jet deneylerinde ortaya çıkmıştır. Çarpma levhası olması durumunda çarpma levhası olmaması durumuna kıyasla geometrik orta noktada ölçülen hızlar, istisnasız tüm Re sayısı değerlerinde daha yüksektir.
- Re sayısını artırmak momentum transferini ve ortalama jet hızını doğrudan arttırmıştır. Ancak jetin yayılımını aynı derecede arttırdığından bahsedilemez.

6.2.2. Levha Önünde Ölçülen Türbülans Şiddeti

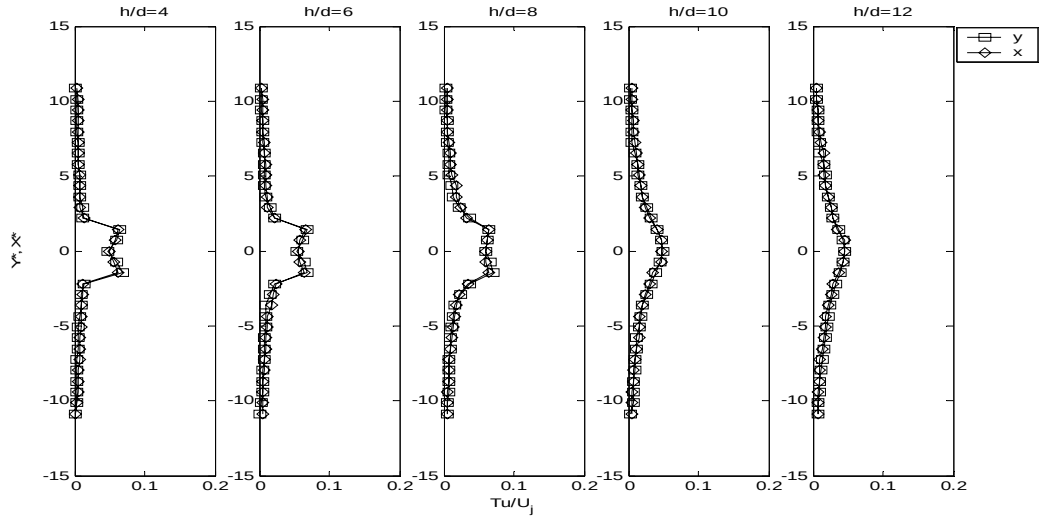
$d=13.8$ mm'lik lüle tipinde lüle-levha arası mesafenin kısa olduğu durumlarda ölçülen türbülans şiddeti değerlerinin durma noktasının yakınında pik değerler yaptığı gözlemlenmiştir.

Çarpma olmaması durumunda serbest jet konumunda iken lüleden itibaren en fazla 4d mesafesine kadar pik değerler oluşmasına rağmen, çarpma olması durumunda levha önünde 6d uzaklıktan çarpan jetin dahi ikinci maksimumlar yaptığı görülebiliyor. Levhanın varlığı durma noktası üzerinde ikinci hatta zaman zaman üçüncü piklerin oluşmasına sebebiyet verebiliyor.



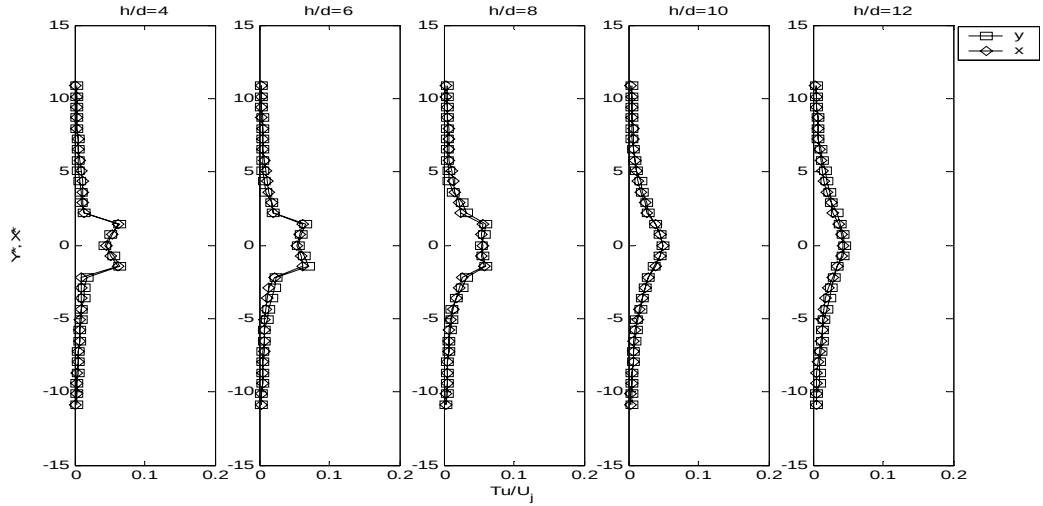
Şekil 6.20. $d=13.8$ mm, $Re=5000$ iken h/d ile türbülans şiddetinin değişimi; $U_j=5.5$ m/s

Şekil (6.20)'de lülenin levhaya çarpma mesafesinin arttırılmasının, levha orta noktası üzerindeki türbülans şiddeti değerini belli bir orana kadar arttırdığı, sonra düşürdüğü gözleniyor. $h/d=4$ 'den $h/d=6$ 'ya çıktığında türbülans değeri %7.76 oranında artış göstermiş. $h/d=4$ ile 8 arasında ise %9.77 civarında bir artış var. $h/d=4$ 'den $h/d=10$ 'a kadar =3.64 oranında düşük de olsa bir artış kaydedilmiş. Oysa $h/d=4$ 'den 12'ye çıktığında orta noktada ölçülen türbülans şiddeti %4.8 oranında azalma eğilimi göstermiş. Bu demek oluyor ki; lüle ile levha arasındaki mesafenin açılması levha üzerindeki türbülans şiddeti değerini $h/d=10$ 'a kadar arttırabiliyor. Bu da Lee v.d.'nin [76] serbest jet halinde ve çarpma halinde türbülans değerlerinde buldukları “8-10d mesafesine kadar türbülans artışı olacağı, daha sonra azalacağı” şeklindeki ifadelerine uyum gösteriyor.



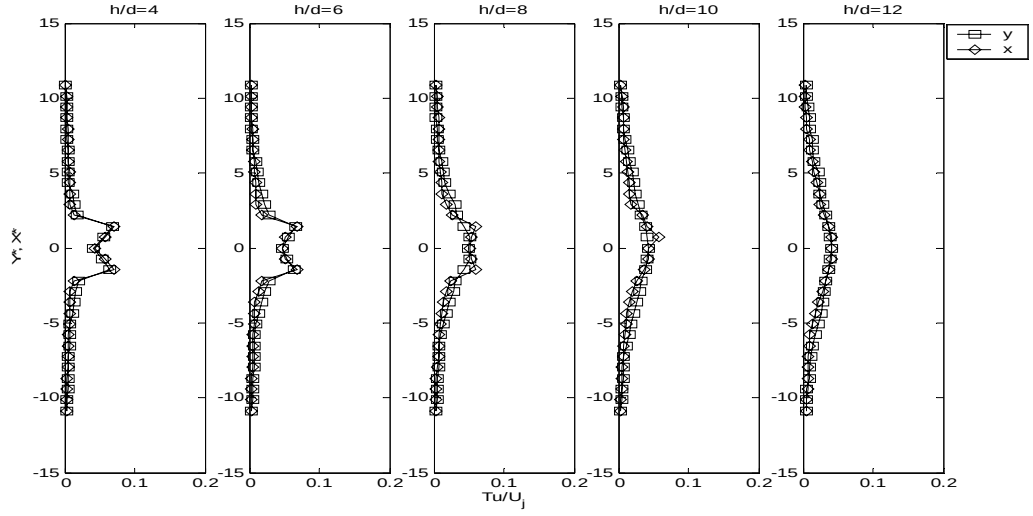
Şekil 6.21. $d=13.8$ mm, $Re=10000$ iken h/d ile türbülans şiddetinin değişimi; $U_j=11.35$ m/s

Re sayısının 10000 değerinde lüle-levha mesafesini arttırmanın çarpma olayı üzerindeki etkisi irdelenirken yukarıdaki hesaplamaya benzer bir değerlendirme yapıldığında şu sonuç çıkmaktadır: $h/d=4$ en yakın lüle mesafesine göre $h/d=6$ mesafesinde türbülans şiddeti levha üzerinde %10.51 oranında artış göstermiştir. Benzer şekilde $h/d=4$ baz alındığında, $h/d=8$ 'de %18.37, $h/d=10$ 'da %5.61 oranlarında artış gözlenirken $h/d=12$ 'de %9.63 oranında azalma tespit edilmiştir (Şekil 6.21).



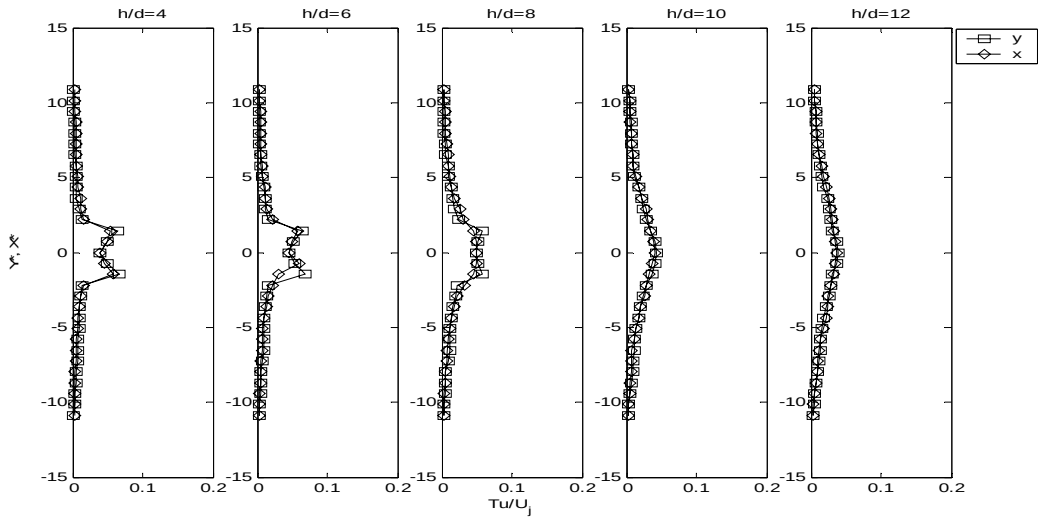
Şekil 6.22. $d=13.8$ mm, $Re=15000$ iken h/d ile türbülans şiddetinin değişimi; $U_j=16.5$ m/s

Şekil (6.22) ile gösterilen Re sayısının 15000 değerinde, $h/d=4$ 'e göre $h/d=6$ 'daki artış %11.53 gibi bir rakama ulaşmıştır. $h/d=8$ 'de artış oranı %16.15, $h/d=10$ 'da %8.71'dir. $h/d=12$ 'de %4.77 oranında azalma söz konusudur.



Şekil 6.23. $d=13.8$ mm, $Re=20000$ iken h/d ile türbülans şiddetinin değişimi; $U_j=22.5$ m/s

Şekil (6.23)'de yani $Re=20000$ 'de $h/d=4$ 'e göre sırasıyla $h/d=6-10$ arasındaki artış oranları %11.46, %21.48, %0.44 olarak hesaplanmıştır. $h/d=12$ 'de $h/d=4$ ' nispeten oluşan azalma oranı %2.97 civarındadır.



Şekil 6.24. $d=13.8$ mm, $Re=25000$ iken h/d ile türbülans şiddetinin değişimi; $U_j=27.5$ m/s

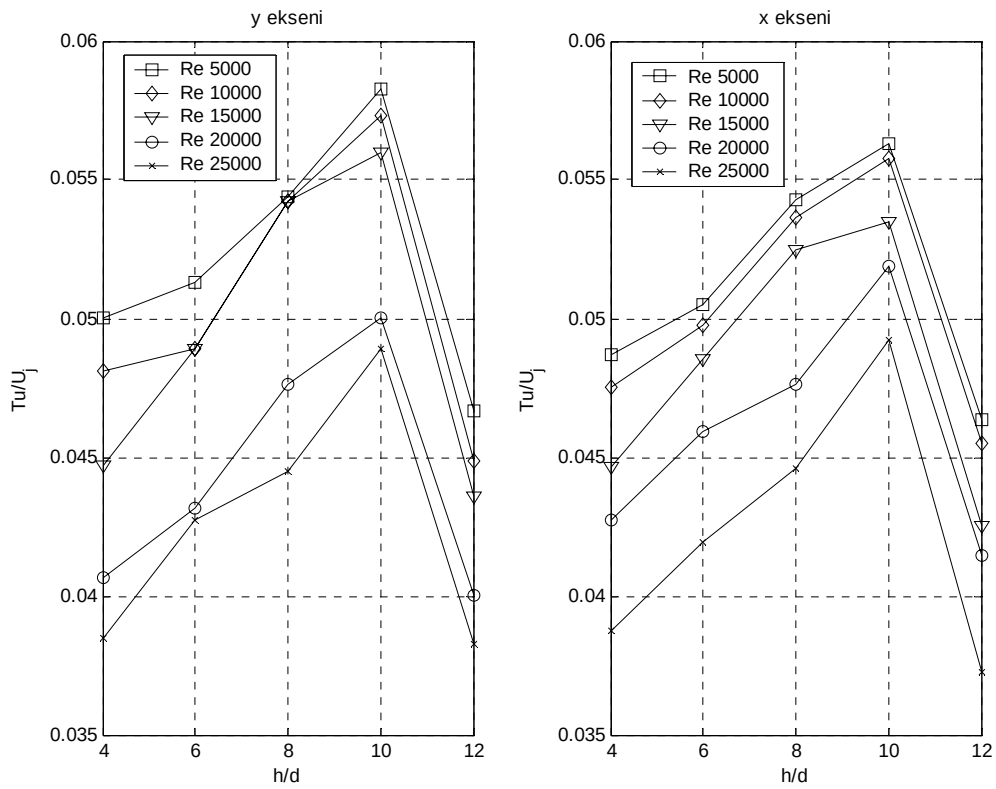
Son olarak Re sayısı 25000 iken (Şekil 6.24), lüle-levha mesafesinin arttırılması çarpma üzerinde nasıl bir etki yapıyor diye araştırıldığında; h/d 'nin 6'ya çıkarılması $h/d=4$ 'teki değerlere göre %15.16, $h/d=8$ 'e çıkarılması %27.102, ve $h/d=10$ 'a çıkarılması %8.26 artış sebep olmuştur. Akabinde $h/d=12$ 'de %3.78 oranında azalma olduğu tespit edilmiştir.

Şu ana kadar yapılan değerlendirmelerde elde edilen % değerleri tam bir sistematik sıralama göstermiyor. Bu değerlere bakarak Re sayısının arttırılmasının h/d mesafesinin

arttırılması ile ilişkisinin olup olmadığını vurgulamak zor. Ancak yine de artan Re sayısı (arada sapmalar olsa da) yüzde artış oranlarını nispeten arttırmıştır şeklinde bir yorum yapmak çok da yanlış olmasa gerek.

Şekil (6.20)-(6.24) arasında çizilen türbülans eğrilerinde görülen genel özelliklerden biri de $h/d > 8$ mesafelerinde çarpma levhası önünde ölçülen türbülansın neredeyse serbest jet halindeki bir türbülans profili gibi çıkmasıdır. Aradaki tek fark burada değerlerin daha yüksek çıkmasıdır. Ancak profiller büyük oranda benzerlik göstermektedirler.

Son olarak şekil (6.25)'de merkezde ölçülen türbülans değerlerinin h/d ve Re sayısına göre değişimi X* ve Y* eksenlerinde ayrı ayrı verilmiştir.



Şekil 6.25. $d=13.8$ mm için durma noktasında ölçülen boyutsuz türbülans şiddetinin jet çıkış hızına oranı

6.3. Lüle Çapının Değiştirilmesinin Akış Dinamiği Üzerindeki Etkileri

Bu çalışmada kullanılan dört farklı çapta düz dairesel lülenin akış dinamiği aynı yukarıda $d=13.8$ mm deneylerinde olduğu gibi yürütülmüştür. Önce tüm lüle tiplerinin serbest akış halindeki hız ve türbülans değişimleri incelenmiş, sonra da çarpma levhasının hemen önünde çeşitli lüle-levha mesafelerinde hız ve türbülans değişimi test edilmiştir. Deneylerin tamamında Re sayısı 5000-25000 aralığında değiştirilmiştir. Elde edilen hız ve türbülans şiddeti değerleri yukarıda verilen grafiklere benzer şekilde grafiklerle gösterilmiştir. Bütün bu deney

sonuçlarını içeren grafikler EK-B' de sırasıyla $d=7.9$, 10.8 ve 23.1 mm için önce serbest jet sonra da çarpma bölgesi incelemeleri adı altında sunulmuştur.

Lüle çapını arttırmak veya azaltmak Nu sayısını doğrudan etkileyici faktör yaratacağından ısı transferi hususunda oldukça önem taşımaktadır. Ancak jetle çarpmada genellikle küçük lüle çaplarıyla yüksek hızlar altında çarpma olması istenir. Soğutulması istenen bölgenin alanı büyütüldüğü zaman jetin yayılım alanını artırıcı çarelere başvurulur. Jet çıkış ağzını değiştirmek ya da jet çapını arttırmak gibi yöntemlerle jetin etki alanı artırılabilir. Tam tersi bir durumda yani, yüksek bir soğutma etkisinin noktasal bir alanda yapılması istenildiği durumlarda da yine jet çapını küçültmek en basit yöntemdir.

Optimum dairesel lüle tipinin belirlenmesini amaçlayan bu çalışmada, farklı çaplardaki dairesel lülelerin hız ve türbülans değişimleri mercek altına alınmıştır.

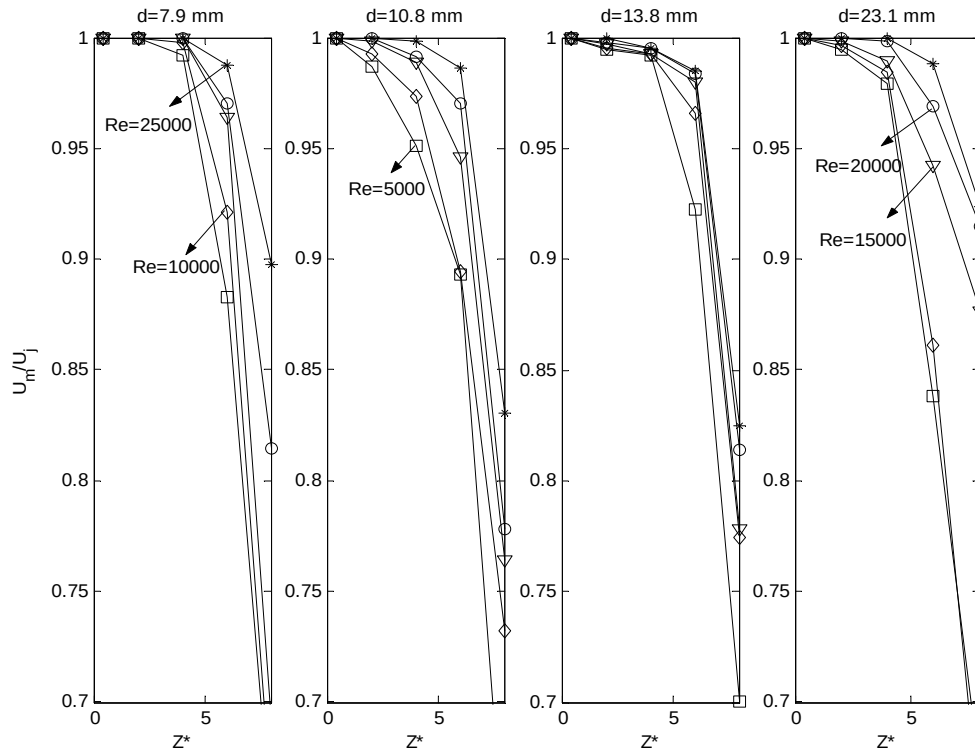
6.3.1. Farklı Çaptaki Dairesel Lülelerde Serbest Jet Akışı

Tüm lülelerle yapılan hız ölçümlerinde ortaya çıkan genel sonuçlar şöyle sıralanabilir:

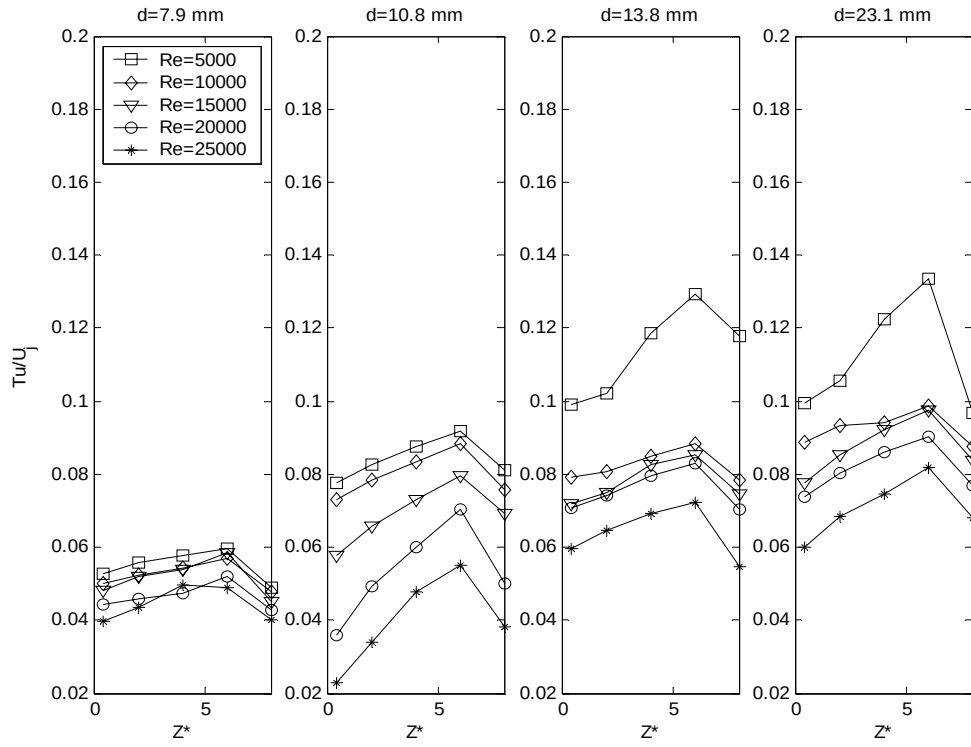
- Tüm lüle çaplarında $Z^*=4-6$ arasındaki mesafede jet çıkış hızı merkez hattı hızının %95 seviyelerine ulaşmaktadır. Bu da dairesel jetlerin hepsinde ortalama potansiyel çekirdek bölgesinin bu aralıkta olduğunu göstermektedir (Şekil 6.26).
- Tüm lülelerle aynı x ve y koordinat düzleminde ölçüm alınmıştır. Ancak merkezden uzaklaştıkça lüle çapına göre bazen sıfıra kadar ulaşıldığı bazılarında ulaşılmadan belli bir değerde kaldığı görülmüştür. Özellikle $d=7.9$ mm çaplı lülede alınan ölçüm mesafesi jetin etki alanından büyük olduğu için tüm eğriler uçlara doğru sıfıra ulaşmıştır. Jet çapı arttıkça etki alanı da arttığından $d=23.1$ mm çaplı lülede ölçüm alınan en uzak noktada bile belirgin bir büyük değer tespit edilmiştir.
- Türbülans şiddeti hesaplamalarında özellikle bundan önceki bölümde detaylandırılarak anlatılan $d=13.8$ mm'lik lülede görülen sırtı çukur türbülans profili $d=10.8$ mm'lik lülede ve $d=23.1$ mm çaplı lülede de görülmüştür. Ancak lüle çapı en düşük olan $d=7.9$ mm'lik lülede herhangi bir pik değeri ölçülememiştir. Travers mekanizmasının en fazla 5 mm aralıklarla ölçüm alıyor olması bunun en önemli sebebidir. Şöyle ki: $d=7.9$ mm çaplı lülenin tam merkezinde $X^*=0$ 'da alınan ölçümden hemen sonra 5 mm mesafeyle $X^*=0.63$ 'de ikinci ölçüm alınmıştır. 5 mm mesafe bu kadar düşük bir çap için büyük bir aralıktır ve aradaki değerlerin hassas

olarak ölçülmesini engellemiştir. Mekanizmanın ileride çok küçük mesafelerde ölçüm alabilecek hassasiyete getirilerek geliştirilmesi gerekmektedir.

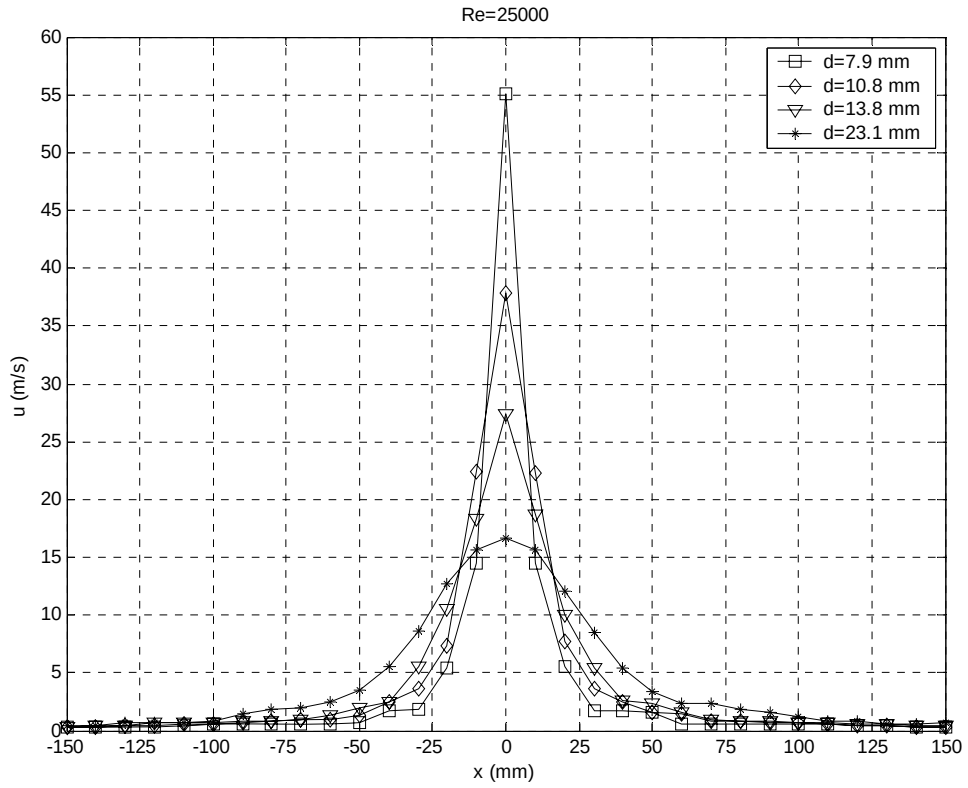
- Tüm lüleler aynı Re sayısında test edildikleri için lüle çapı arttıkça doğal olarak hız azalmıştır. hızın düşük olduğu büyük çaplı lülelerde özellikle $d=23.1$ mm'lik lülede ölçülen türbülans şiddeti minimumdur. $Tu = \sqrt{u'^2}$ türbülans şiddeti değerleri yani çalkantıların toplamalarının karesinin karekökü en düşük $d=23.1$ mm'de çıkmıştır. Ancak normalizasyon işlemi esnasında türbülans ifadesi jet çıkış hızına bölüldüğünden ve jet çıkış hızı en düşük $d=23.1$ mm'lik lülede ölçüldüğünden boyutsuz ifade en yüksek değer olarak karşımıza çıkmaktadır (Şekil 6.27).



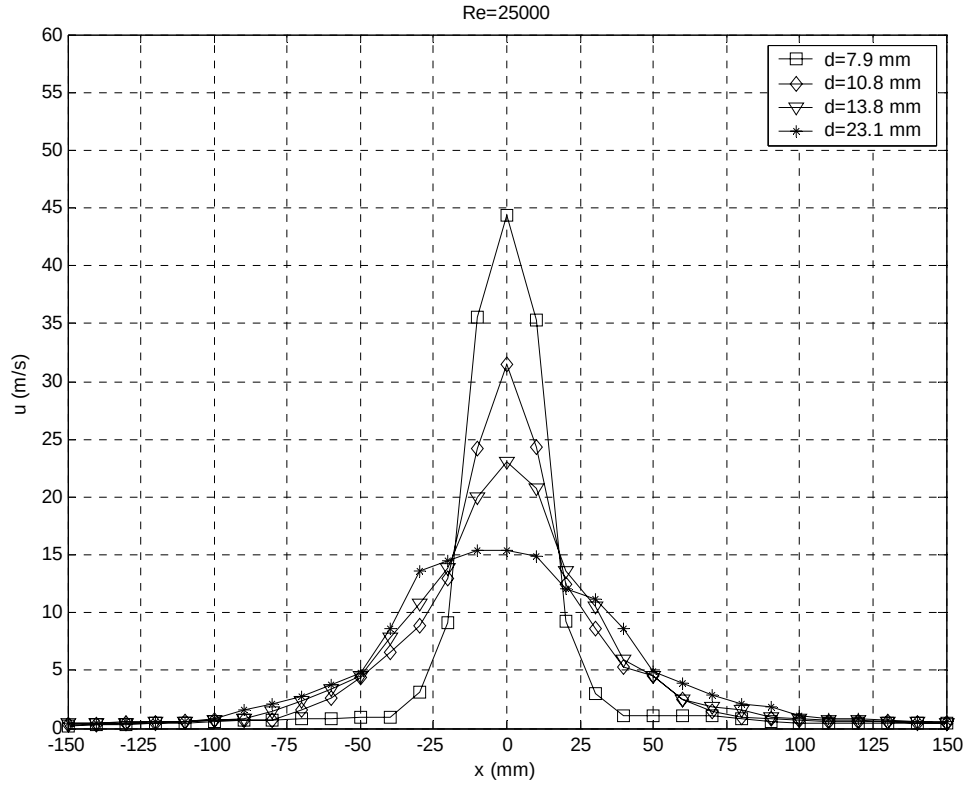
Şekil 6.26. Tüm lüle çapları için serbest jet durumunda merkez hattı hızın jet çıkış hızına oranı (Z^* ölçümleri esas alınmıştır)



Şekil 6.27. Tüm lüle çapları için serbest jet durumunda türbülans şiddetinin jet çıkış hızına oranı



Şekil 6.28. Jet çıkışında $Re=25000$ iken dört farklı çaptaki lülenin ortalama hız değişimi



Şekil 6.29. $Z^*=8$ 'de, $Re=25000$ iken dört farklı çaptaki lülenin ortalama hız değişimi

Şekil (6.28) ve (6.29) her bir lüledeki hız dağılımlarının daha net görülebilmesi için birimleri birlikte verilmiştir. Şekil (6.28)'de probun lülenin hemen önüne koyulduğu durumda x eksenini boyunca ölçülen değerler, Şekil (6.29)'da ise lüle levha mesafesinin en uzak seçildiği noktada yani her bir lüle için $8d$ uzaklıkta ölçülen değerler verilmiştir. Şekillerden şu sonuçlar çıkarılmıştır:

- Aynı Re sayısında düşük çaplı lülede büyük çaplıya nazaran, merkezde hız çok yüksek olmasına rağmen, kenarlarda çok hızlı bir düşüş göstermektedir.
- Çap arttıkça merkezdeki hızda azalma görülmektedir.
- Çap arttıkça hız merkezden kenarlara doğru yüksek değerlerde yayılmaktadır.
- Lüle-levha arası mesafe arttıkça tüm lüle tiplerinde de kenarlara doğru yayılma artmıştır.

6.3.2. Farklı Çaptaki Dairesel Lülelerde Çarpma Levhası Önünde Akış Dinamiği

Çarpma levhasına yakın mesafede hız ve türbülans şiddeti ölçümlerinde lülelerin birbirinden farklı ve kararsız özellikler gösterdiği ortaya çıkmıştır. Bu nedenle grafikleri tek tek

vermekte fayda görülmüştür. Şekil (6.30)-(6.32)'de sırasıyla d=7.9, 10.8 ve 23.1 mm için lüle-levha mesafesiyle ortalama hızların değişimi verilmiştir. Verilen grafiklerde genelde 6d mesafesine kadar lüleden levhaya çarptırılan akımın merkezdeki değerini koruduğu görülmüyor. Ancak bazı düşük Re sayılarında bu genellemenin istisnai bir şekilde bozulduğu görülmüştür. Örneğin d=10.8 mm çaplı lülede Re sayısının 5000 değerinde h/d=4'te $U_m/U_j=1$ iken h/d=6'da ciddi bir düşüş izlenmiştir. Ardından diğer mesafelerde de bu düşüş belirgin şekilde fark edilmiştir. Bunun dışındaki diğer noktalarda eğriler genellikle birbirlerine yakın değişimler göstermiştir.

Lüle-levha mesafesinin jete etkisinin araştırıldığı bu bölümde, d=7.9 mm çaplı lülede Re sayısının h/d mesafesiyle birlikte çok fazla değişmediği görülmüyor, eğrilerin birbiri üzerine çakışma durumu diğer lülelere göre çok daha belirgin (Şekil 6.30). Oysa lüle çapı arttıkça d=10.8 ve 23.1 mm'de Re sayısının etkisi kendisini daha fazla hissettiriyor (Şekil 6.31 ve 6.32). bunu rakamlarla ifade etmek gerekirse; en küçük lüle çapında lüle-levha mesafesinin, levhanın durma noktasında oluşan hıza ne kadar etkidiğini ele alalım:

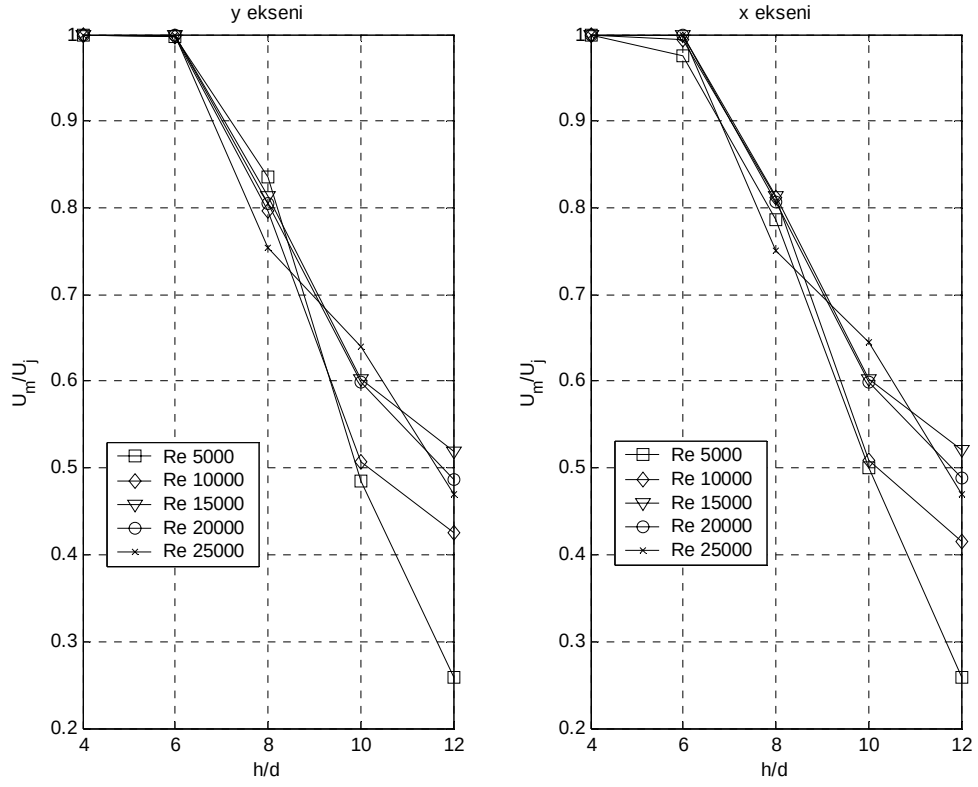
Tablo 7. d=7.9 mm çaplı lüle için h/d mesafesinin artışının durma noktasında ölçülen hıza etkisi

$$(\% \text{azalma}) = \frac{\left(\frac{u}{U_j} \right)_{h/d=6} - \left(\frac{u}{U_j} \right)_{h/d=xxx}}{\left(\frac{u}{U_j} \right)_{h/d=6}} \times 100$$

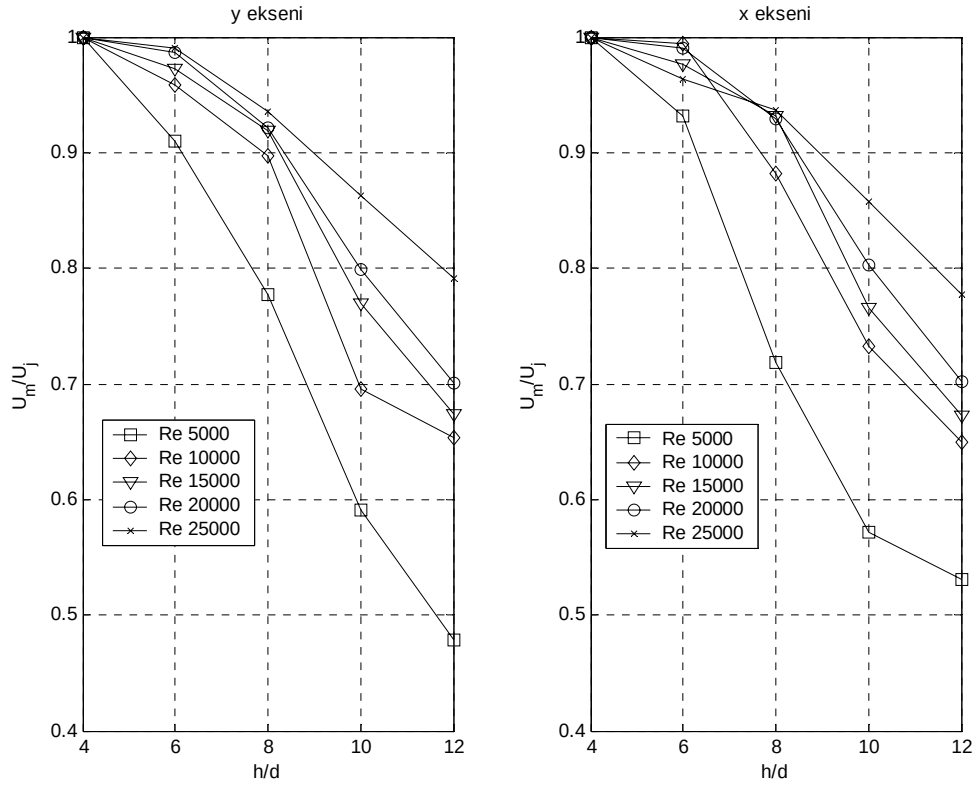
	Re 5000	Re 10000	Re 15000	Re 20000	Re 25000
h/d=6'dan 8'e	16.49	20.38	18.02	19.5	24.58
h/d=6'dan 10'a	51.14	49.25	39.72	40.11	36.05
h/d=6'dan 12'ye	74.09	57.37	48.09	51.13	52.95

Tablo 7'de Re sayısının artmasıyla birlikte h/d nin artışı arasındaki ilişki daha net anlaşıyor.

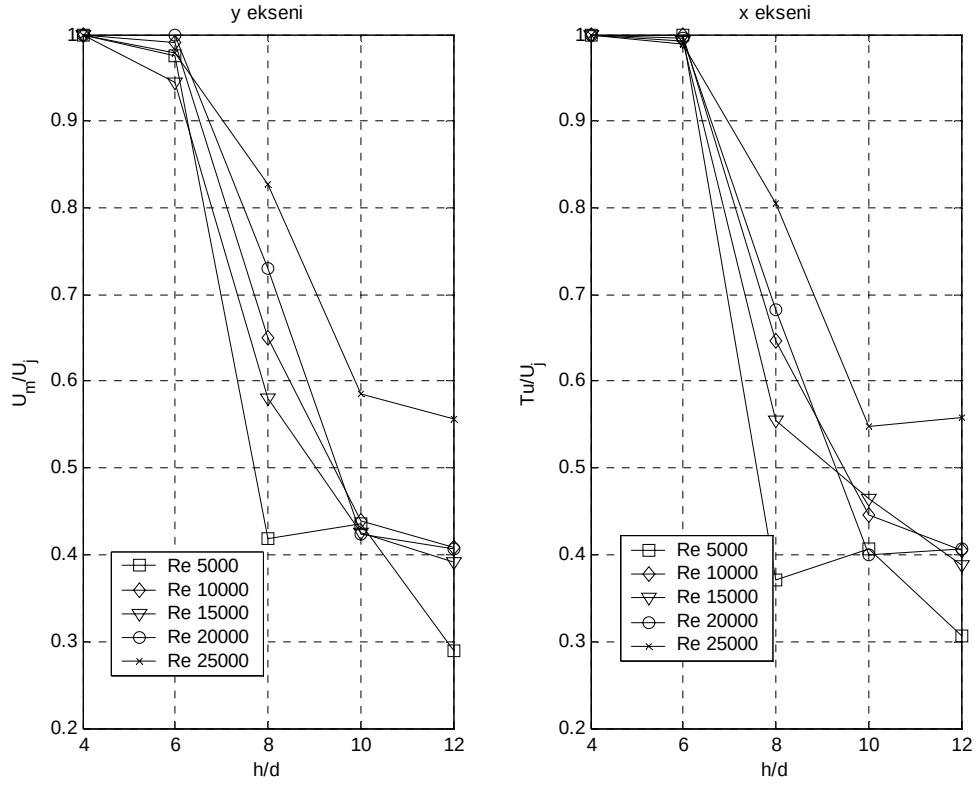
Deneysel çalışmanın genelinde d=7.9 mm ve 10.8 mm çaplı lülede zaman zaman izlenen hız ve türbülans profillerindeki farklılıklar, kompresörden gelen akımın bu hafif ve küçük olan lülelerde daha fazla titreşime sebep olması ihtimalini ortaya çıkarmaktadır. Lülelerin dış faktörlerden etkilenmesi alınan ölçümlerin birkaçında deneysel hata olarak ortaya çıkmıştır. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde yapılacak belirsizlik analizi tespiti jet optimizasyonunda daha doğru karar verilmesini sağlayacaktır.



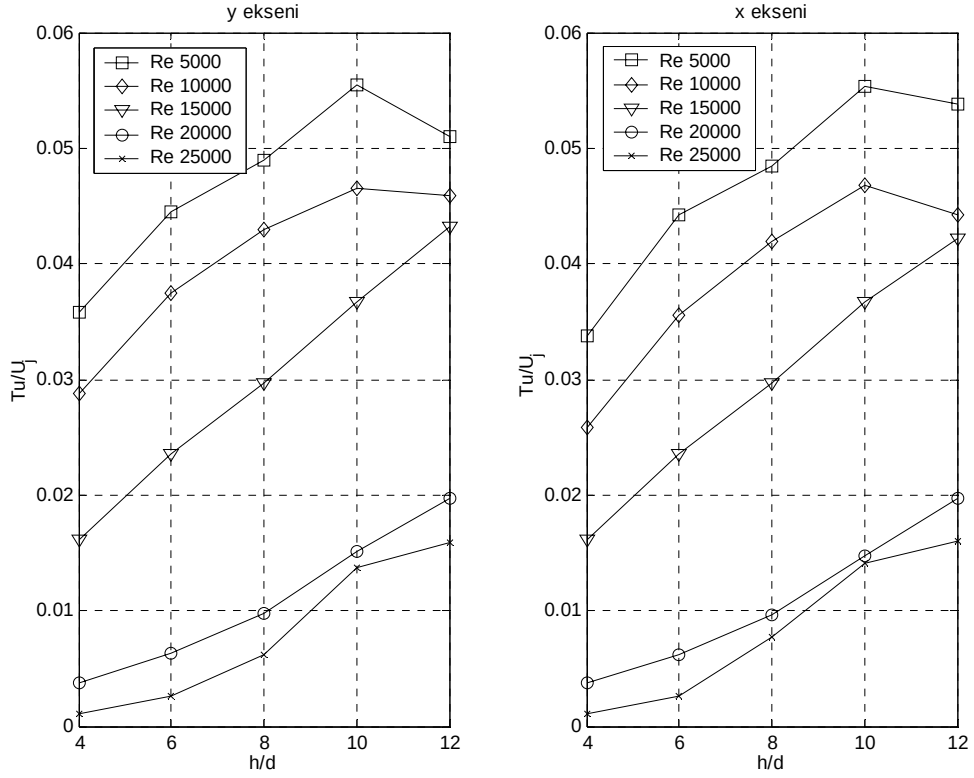
Şekil 6.30. $d=7.9$ mm için durma noktasında merkez hattı hızın jet çıkış hızına oranı



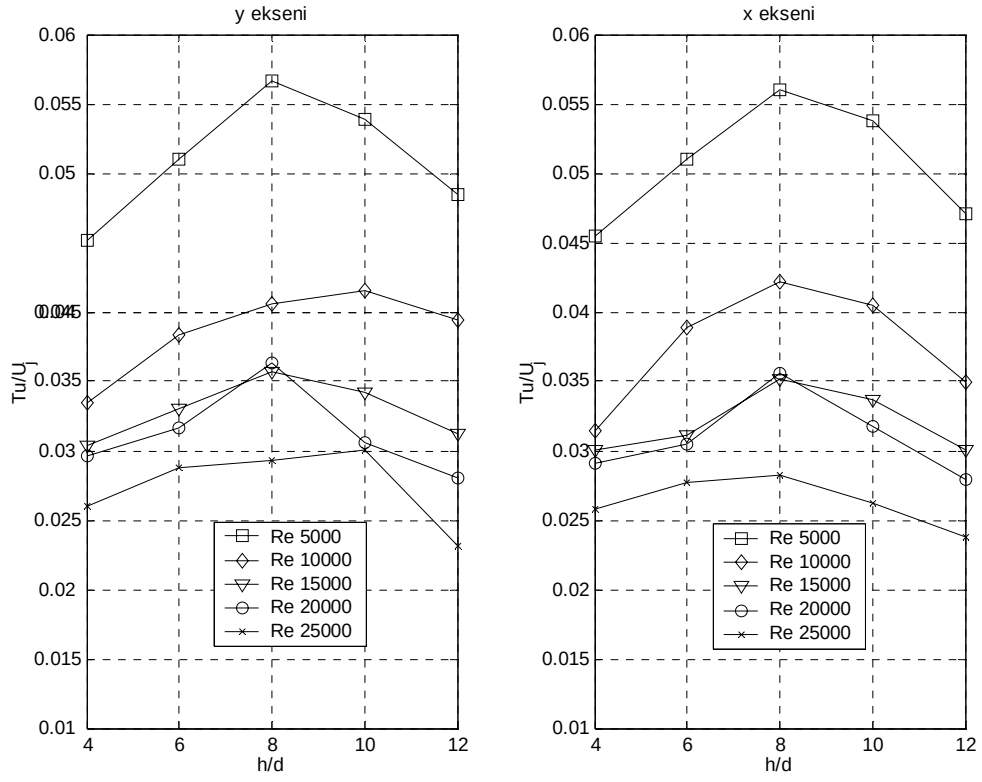
Şekil 6.31. $d=10.8$ mm için durma noktasında merkez hattı hızın jet çıkış hızına oranı



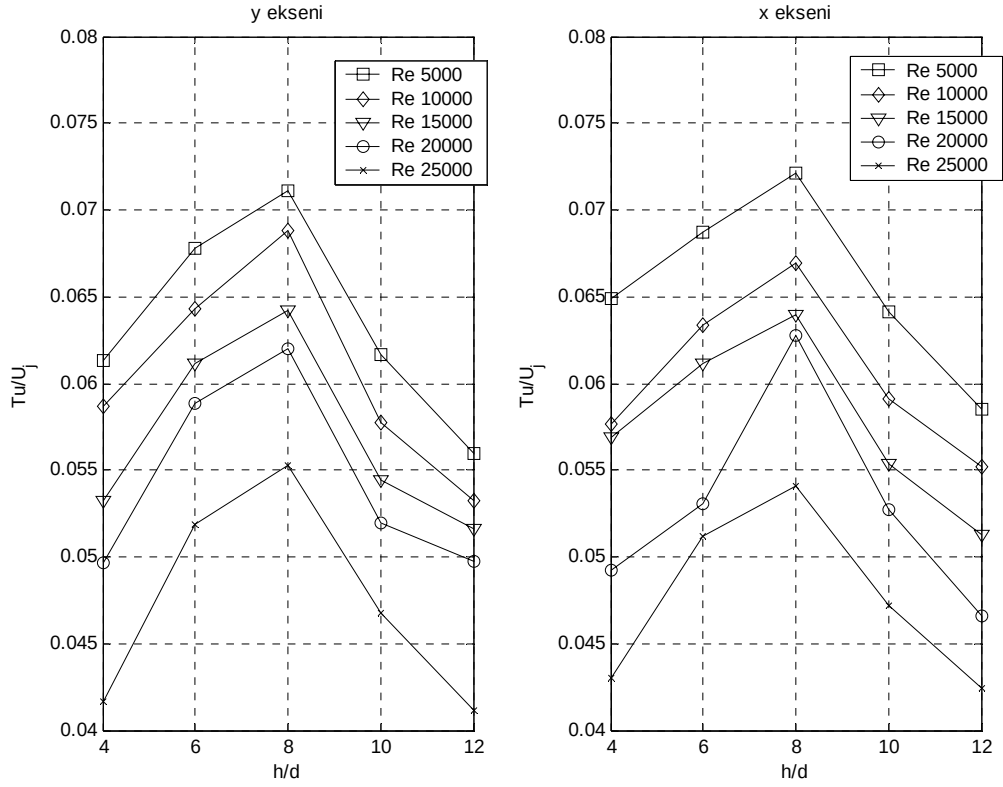
Şekil 6.32. $d=23.1$ mm için durma noktasında merkez hattı hızın jet çıkış hızına oranı



Şekil 6.33. $d=7.9$ mm için durma noktasında ölçülen boyutsuz türbülans şiddetinin jet çıkış hızına oranı



Şekil 6.34. $d=10.8$ mm için durma noktasında ölçülen boyutsuz türbülans şiddetinin jet çıkış hızına oranı



Şekil 6.35. $d=23.1$ mm için durma noktasında ölçülen boyutsuz türbülans şiddetinin jet çıkış hızına oranı

7.EŞ EKSENLİ JETLERDE ISI TRANSFERİ KARAKTERİSTİĞİ

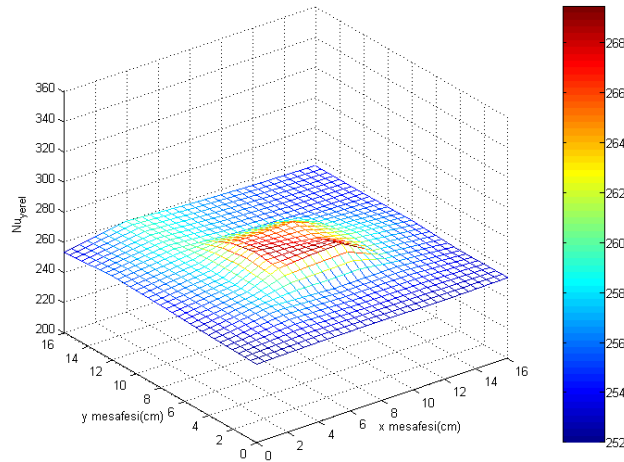
Çalışmanın bu aşamasında lüle çıkış şeklinin önemli bir çeşidi olan eş eksenli jet akışları denenmiştir. Çalışmada lülelerin çap oranları cinsinden üç ayrı tipte jetle deneyler yapılmıştır. Oranlar dış lülenin iç çapının, iç lülenin dış çapına oranı olarak belirlenmiştir. Buna göre seçilen lüle oranları Şekil (3.2)'de verildiği gibi $d/D=0.7$, 0.58 ve 0.45'tir. Deneylerde hem merkezi yuvarlak jetin hem de annular halkadan akış olması durumu incelenmiştir.

Eş eksenli lülelerin akış karakterini incelemeye yönelik literatürde çokça yayına rastlanmamasına rağmen bu akış türünün çarpma jette oluşturduğu ısı transferi konusu bir iki sınırlı çalışmayla kalmıştır. Bu çalışmanın ileride yapılacak detaylı araştırmalara ışık tutması ümit edilmiştir.

7.1. $d/D=0.7$ Oranındaki Lülenin Nu Sayısı Dağılımı

Birden fazla akımın karışması sonucu yüksek hızlarda çarpma sağlayan eş eksenli lülelerle daha etkili soğuma elde edilmektedir. Deneylerde iç/dış lüle çap oranları 0.7, 0.58 ve 0.45 alınmıştır. Bunlardan ilk değerlendirilecek olanı $d/D=0.7$ çap oranındaki konsantrik tip borudur. Seçilen lülenin dış halkasını oluşturan boru düz dairesel jet olarak kullanılan 13.8 mm çaplı borudur. İçi de yine düz dairesel deneylerde kullanılan $d=7.9$ mm iç çapındaki borudur.

Şekil (7.1)-(7.25) arasında verilen grafiklerle $d/D=0.7$ çap oranındaki eş-eksenli lülenin yerel ısı transfer dağılımı gösterilmiştir.

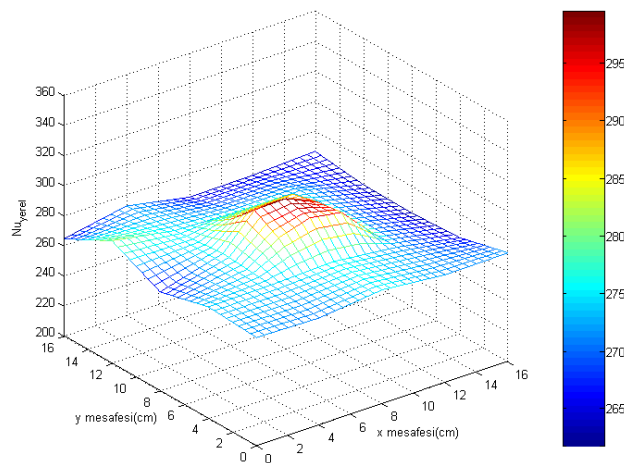


Şekil 7.1. $d/D=0.7$, $h/D=4$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı

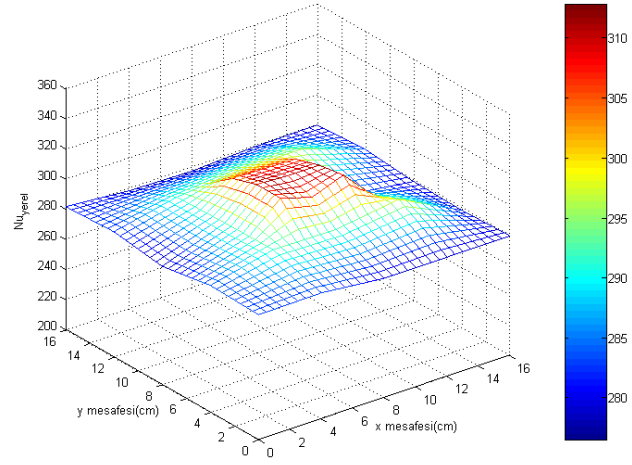
Şekil (7.1)-(7.5) arasındaki grafiklerde lüle-levha mesafesi $h/d=4$ alınmıştır. Bu deneylerde Re sayısının artırılmasının jetin soğuma etkisini arttırdığı gözlenmiştir. Bu mesafede Nu sayısının Re ile değişimini ve levha üzerinde merkezden uçlara doğru dağılımını hesaplarla inceleyelim: Re sayısı 5000 değerinden 10000'e çıkartıldığında durma noktası üzerinde %12.1 oranında bir artış görülüyor. $Re=15000$ 'de ölçülen Nu_0 değerinin $Re=5000$ 'deki Nu_0 değerine göre artış oranı ise % 16.1. $Re=20000$ 'de bu nispi oran %27.4' ye, $Re=25000$ 'de ise % 31'e kadar yükselmiş. Görülüyor ki; Re sayısı artışı bu h/d mesafesinde soğuma üzerinde oldukça etkili. Bunun en açık nedeni lüle-levha mesafesinin $4d$ olduğu alanın potansiyel çekirdek bölgesi olmasıdır. Zira bu bölgede hız değişimleri ısı transferini doğrudan etkilemektedir.

$h/d=4$ 'de levha üzerinde oluşan ısı transferi farkına gelince: durma noktasında ölçülen Nu sayısı ile bu noktaya en uzak ölçüm noktasındaki Nu sayısı arasında $Re=5000-25000$ için sırasıyla % 5.6, %9.2, %8.8, %13.7, %14.9 oranlarında azalma olduğu görülmüştür.

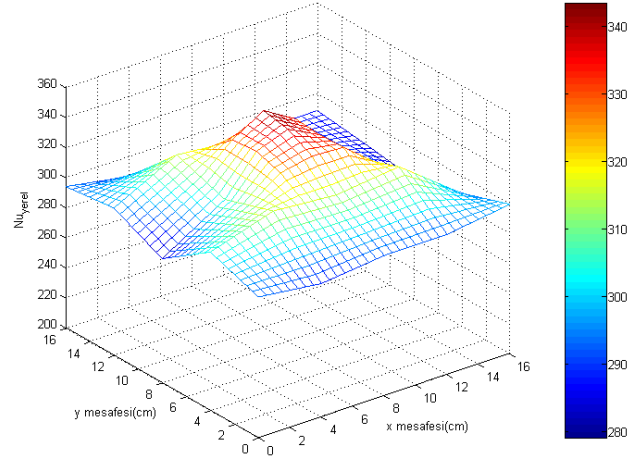
$h/d=4$ 'deki durma noktası Nu sayıları ise $Re=5000-25000$ için sırasıyla $Nu_0=266.9$, 299.4, 310.1, 340.1 ve 349.8 olarak ölçülmüştür. $h/d=4$ 'de ortalama Nu sayıları ise şu şekilde oluşmuş: $Re=5000-25000$ aralığında sırasıyla $Nu_{ort}=258.3$, 276.1, 290.9, 307 ve 318.1 olarak hesaplanmıştır. En yakın lüle-levha mesafesinde yüksek ortalama Nu sayılarının çıkması beklenen bir sonuçtur. Ancak dikkat çeken en önemli unsur durma noktası Nu sayılarıyla ortalama Nu sayıları arasındaki farkın az olmasıdır. Hatırlanacağı üzere, aynı dış lüle çapına sahip düz dairesel lülede ($d=13.8$ mm) durma noktası ile ortalama Nu sayıları arasında ciddi bir fark vardır.



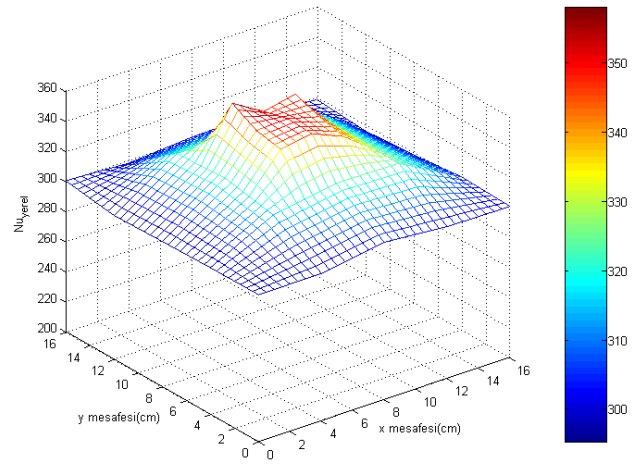
Şekil 7.2. $d/D=0.7$, $h/D=4$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



Şekil 7.3. $d/D=0.7$, $h/D=4$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



Şekil 7.4. $d/D=0.7$, $h/D=4$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı

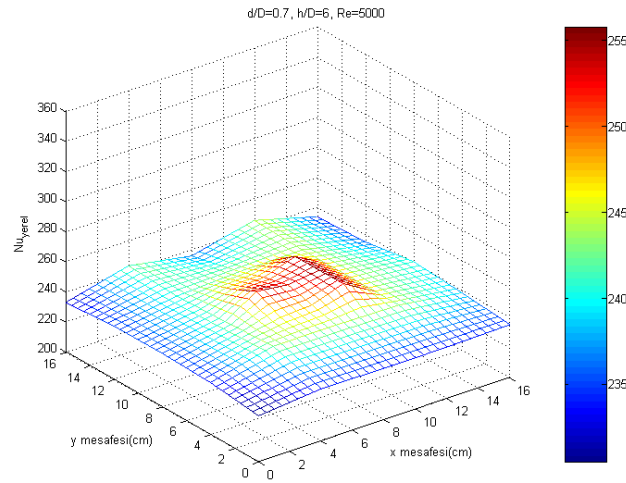


Şekil 7.5. $d/D=0.7$, $h/D=4$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı

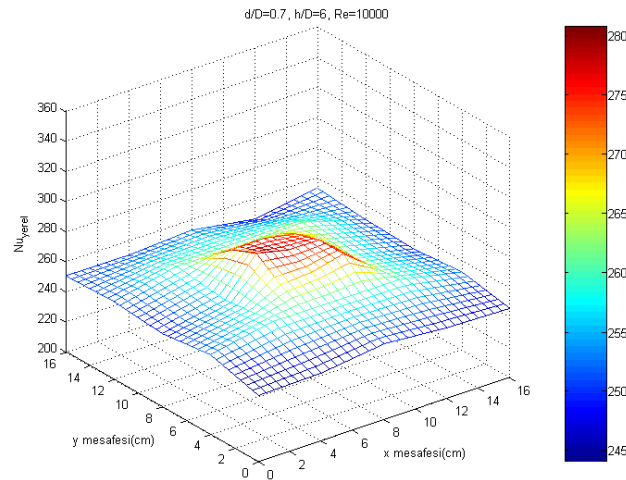
Şekil (7.6)-(7.11) ile gösterilen $h/d=6$ mesafesindeki yerel Nu sayısı dağılımlarında, Re sayısını arttırmanın ısı transferi üzerindeki etkisi hesaplanmıştır. Re sayısını 5000'den 10000'e çıkarmak durma noktası Nu sayısı üzerinde %9.1, 5000'den 15000'e çıkarmak %14.9, 20000'e çıkarmak %23.6 ve 25000'e çıkarmak %27.2 oranında bir artış sağlamıştır.

Ayrıca bu deneylerde ölçülen datalarla levha üzerinde sıcaklığın orta noktadan uçlara doğru nasıl bir oranla yayıldığı hesaplanmıştır. Durma noktasında hesaplanan Nu sayısı ile 25 nolu referans ölçüm noktası arasındaki azalma oranı $Re=5000$ 'de %8.8, $Re=10000$ 'de %11.5, $Re=15000$ 'de %12.1, $Re=20000$ 'de %16.2, son olarak $Re=25000$ 'de %17.1 oranındadır.

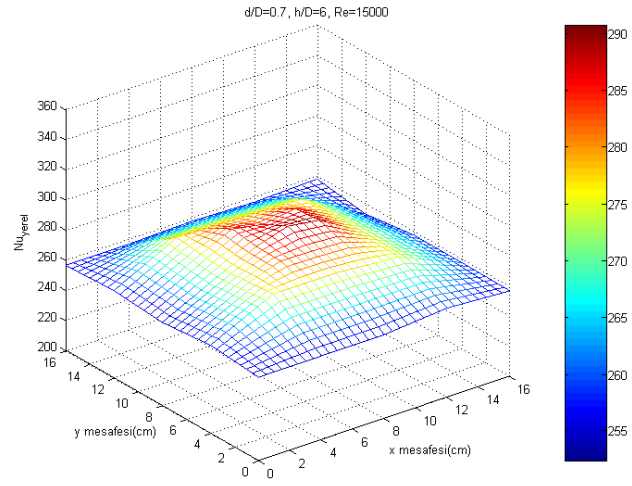
Bu mesafede elde edilen durma noktası Nu sayıları (Nu_0), $Re=5000-25000$ için sırasıyla; 252.7, 275.9, 290.6, 312.5 ve 321.6'dır. Ortalama Nu sayıları (Nu_{ort}) ise 242, 258.4, 269.1, 285.7 ve 286.2 şeklindedir.



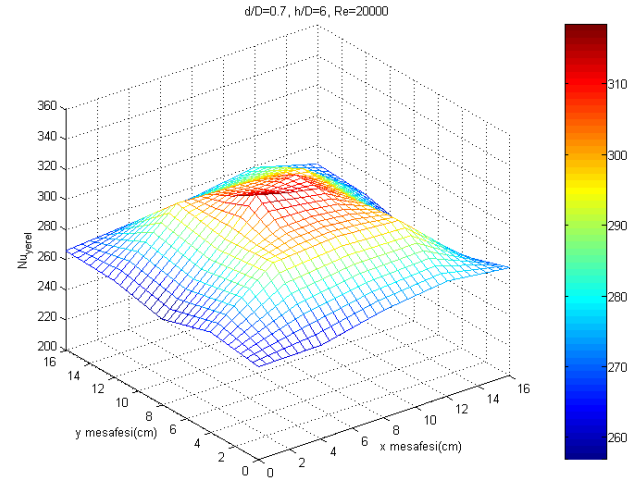
Şekil 7.6. $d/D=0.7$, $h/D=6$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



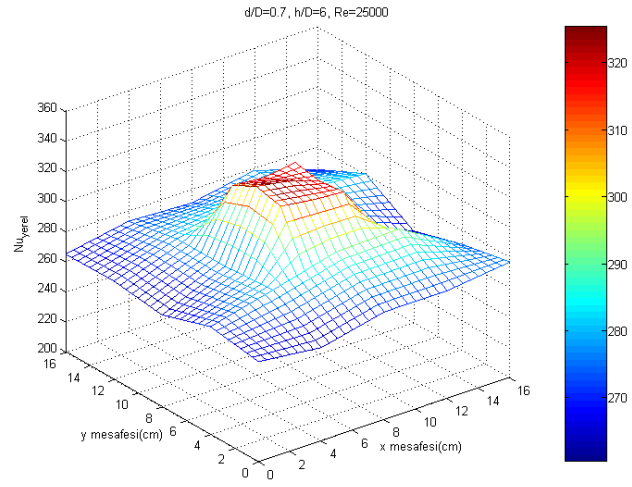
Şekil 7.7. $d/D=0.7$, $h/D=6$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



Şekil 7.8. $d/D=0.7$, $h/D=6$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



Şekil 7.9. $d/D=0.7$, $h/D=6$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı

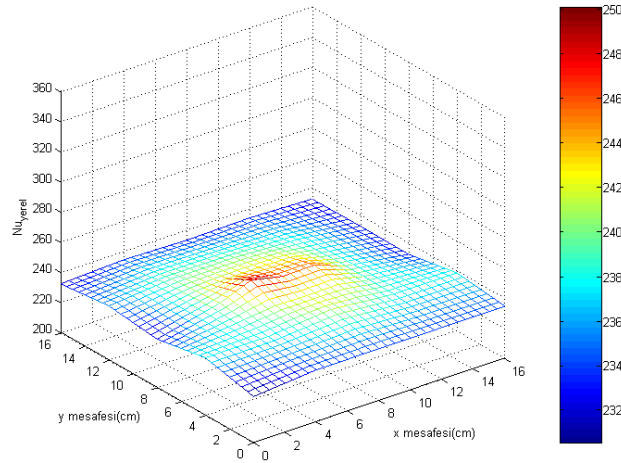


Şekil 7.10. $d/D=0.7$, $h/D=6$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı

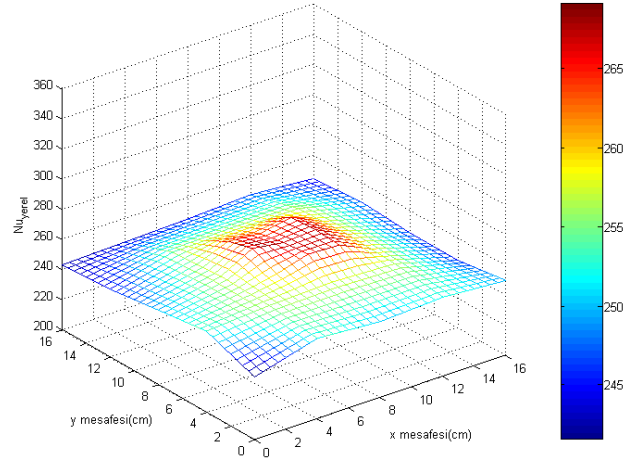
Şekil (7.11)-(7.15), $h/d=8$ için yerel Nu sayısı dağılımlarını göstermektedir. Re sayısının 5000 değerinden 10000'e çıkartılmasıyla durma noktasında ölçülen Nu sayısında %8.3 oranında yükselme olmuştur. Re sayısı 15000'e yükseltildiğinde $Re=5000$ 'e nispeten %15.8 oranında artış gerçekleşmiştir. Aynı şekilde Re sayısının 20000 değerindeki durma noktası Nu sayısı %23.8, Re sayısı 25000'de iken hesaplanan durma noktası Nu sayısı %32.1 civarında bir artış göstermiştir.

Yine bu deneylerde jetin levha üzerindeki dağılımı araştırılmıştır. Bunun için levhanın geometrik orta noktası ile en uçta kalan referans ölçüm noktası arasındaki Nu sayısı değerleri arasındaki azalma oranları hesaplanmıştır. Sonuçta; $Re=5000$ 'de iki değer arasındaki azalma oranı %6, $Re=10000$ 'de %9.1, $Re=15000$ 'de %10.2, $Re=20000$ 'de %15.1 ve $Re=25000$ 'de %19.8 oranında hesaplanmıştır. Burada da jetin levha üzerindeki radyal dağılımında Re sayısının artmasının etkili olduğu gözlemlenmiştir.

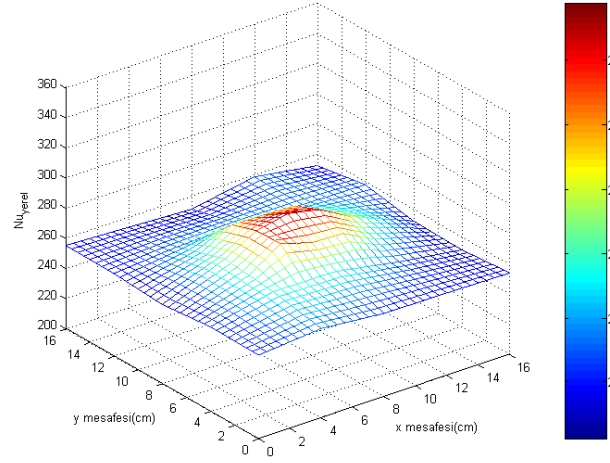
$h/d=8$ mesafesinde ölçülen durma noktası Nu sayıları $Re=5000$ -25000 için sırasıyla 237.7, 254.3, 262.4, 280.1 ve 285.8 olarak ölçülürken, ortalama Nu sayıları ise Nu_{ort} $Re=5000$ 'de 237.7, $Re=10000$ 'de 254.3, $Re=15000$ 'de 262.4, $Re=20000$ 'de 280.1 ve $Re=25000$ 'de 285.8 olarak hesaplanmıştır.



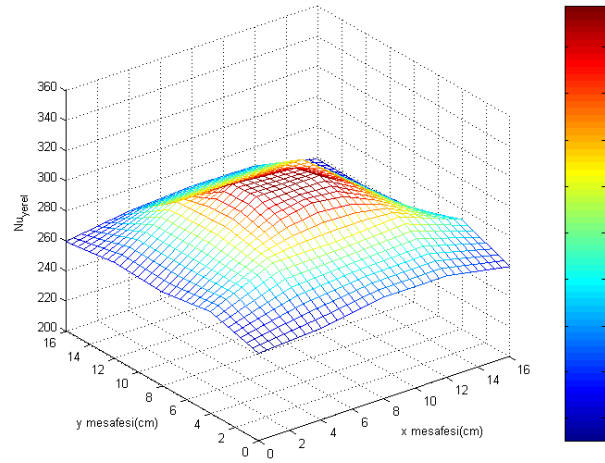
Şekil 7.11. $d/D=0.7$, $h/D=8$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



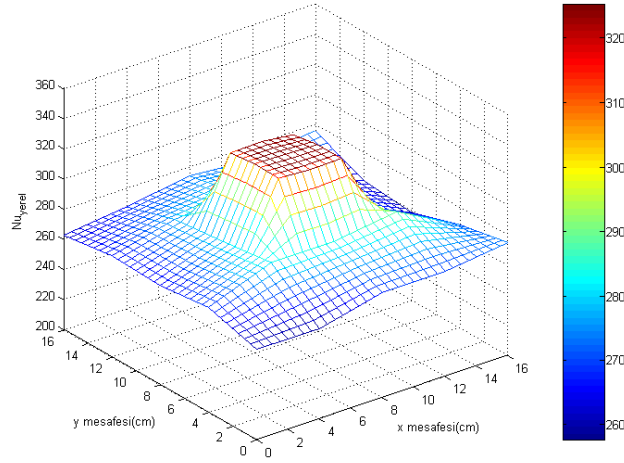
Şekil 7.12. $d/D=0.7$, $h/D=8$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



Şekil 7.13. $d/D=0.7$, $h/D=8$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



Şekil 7.14. $d/D=0.7$, $h/D=8$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı

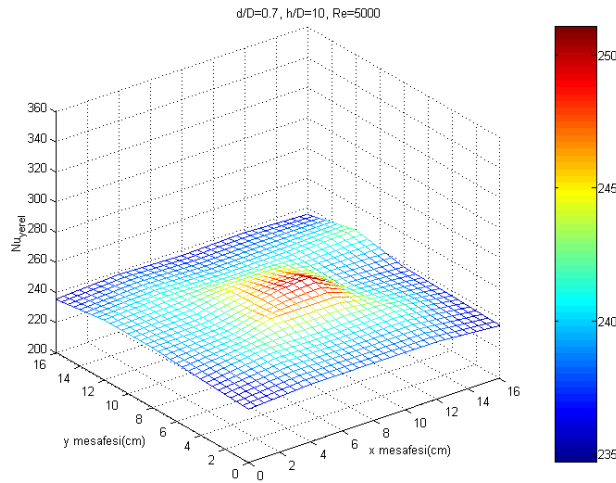


Şekil 7.15. $d/D=0.7$, $h/D=8$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı

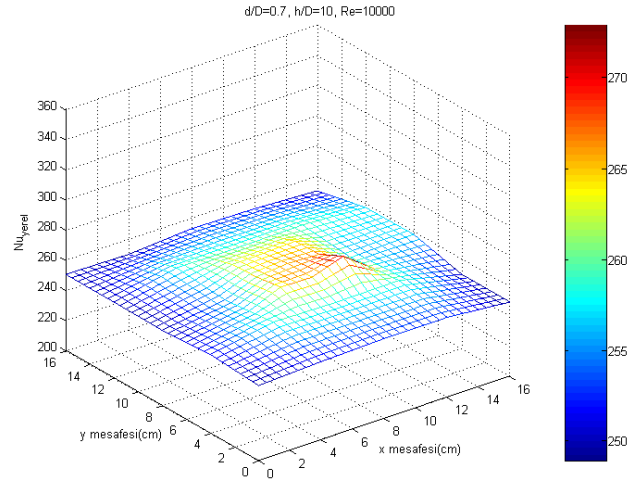
Şekil (7.16)-(7.20) arasındaki yerel Nu sayısı grafikleri $h/d=10$ mesafesinde sırasıyla $Re=5000-25000$ sayılarında elde edilmiştir. Şu ana kadar yapılan değerlendirmelere devam edilecek olursa: Re sayısının artırılmasıyla Nu sayısı değerlerinde artışın bu mesafede de devam ettiği görülür. Re sayısı 5000'den 10000'e çıktığında %6.6, 15000'e çıktığında %11.4, 20000'e çıktığında %16 ve 25000'e çıktığında %24.9 oranında artış hesaplanmıştır.

Durma noktasındaki Nu sayısı değeriyle levha ucunda ölçülen değer arasındaki fark ise; $Re=5000$ 'de %5.9, $Re=10000$ 'de %6, $Re=15000$ 'de %8.2, $Re=20000$ 'de %10.6, $Re=25000$ 'de %13.9 oranında azalma tespit edilmiştir.

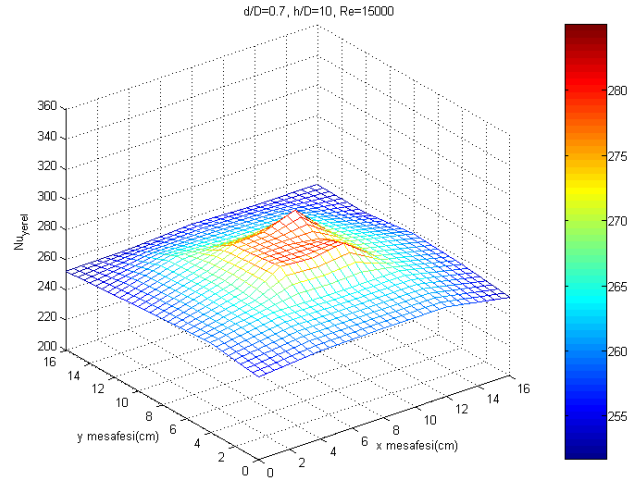
Durma noktası ve ortalama Nu sayılarına gelince $Nu_0= 249.3, 265.9, 277.9, 289.4$ ve 311.4 olarak hesaplanırken ortalama değerler; $Nu_{ort}=240.7, 256.9, 264.1, 271.8$ ve 283.8 şeklinde hesaplanmıştır.



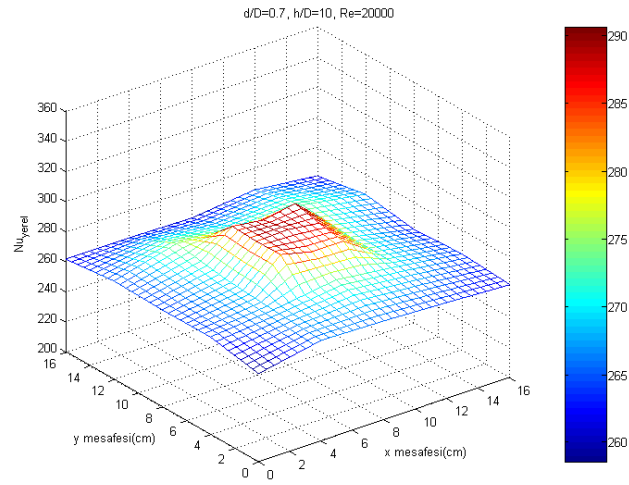
Şekil 7.16. $d/D=0.7$, $h/D=10$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



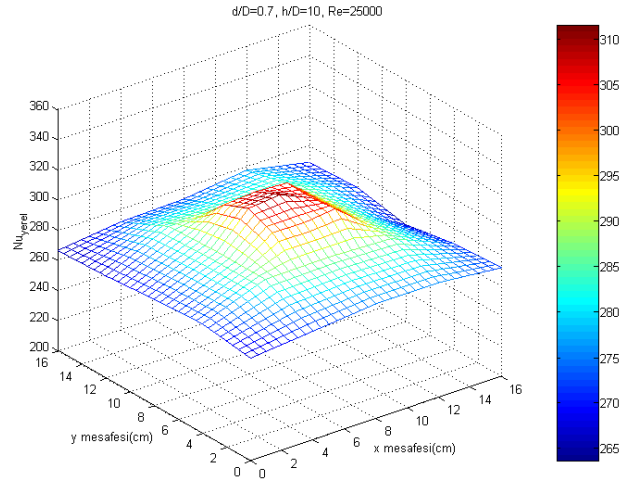
Şekil 7.17. $d/D=0.7$, $h/D=10$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



Şekil 7.18. $d/D=0.7$, $h/D=10$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



Şekil 7.19. $d/D=0.7$, $h/D=10$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı

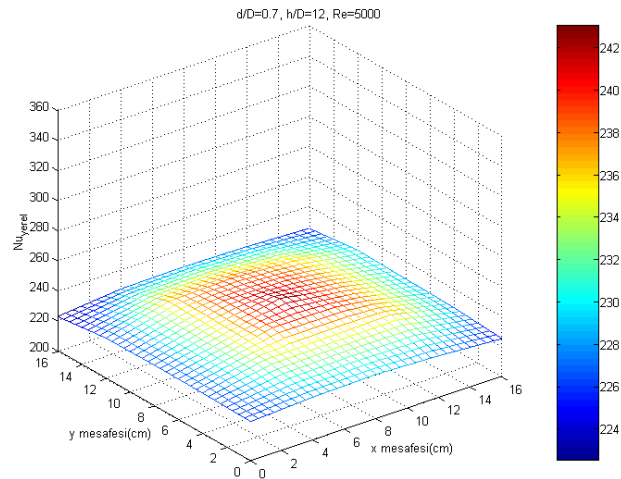


Şekil 7.20. $d/D=0.7$, $h/D=10$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı

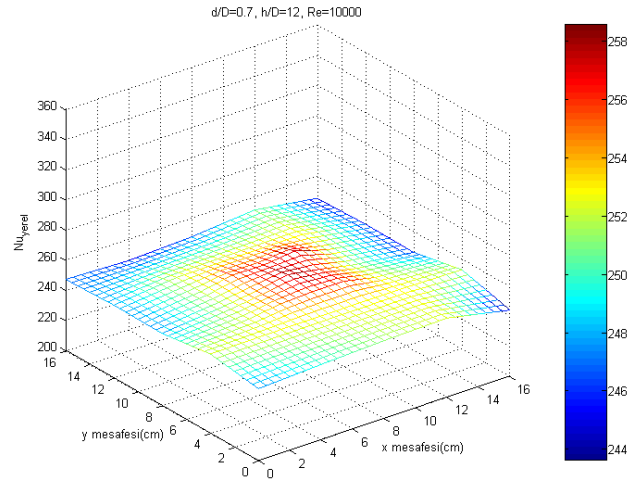
Şekil (7.21-7.25) arasındaki grafikler h/d 'nin en uzak mesafesinde; 12'de test edilen değerlerdir. Bu deneylerde Re sayısının artırılması 5000'e göre 10000'de %6.3, 15000'e göre %13.7, 20000'e göre %15.7 ve 25000'e göre %26.1'dir.

Levha üzerindeki merkezden kenarlara doğru ısı transferi yayılımında burada ölçüle değerler: $Re=5000$ için %4.19, $Re=10000$ için %11.09, $Re=15000$ için %7.2, $Re=20000$ için %5.91 ve son olarak $Re=25000$ için %12.9'dur.

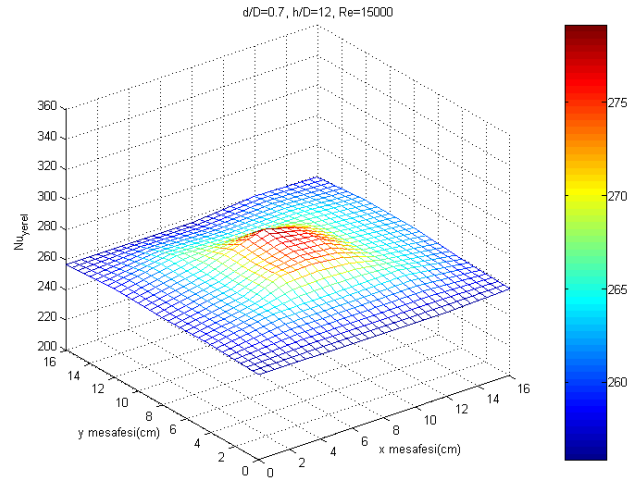
Durma noktasında hesaplanan Nu sayısı değerleri 242.9, 258.5, 276.4, 281.1 ve 306.2'dir. Ortalama Nu sayıları $Re=5000$ -25000 için sırasıyla; $Nu_{ort}=232.6$, 251.3, 264, 272.7, 284.2 olarak hesaplanmıştır.



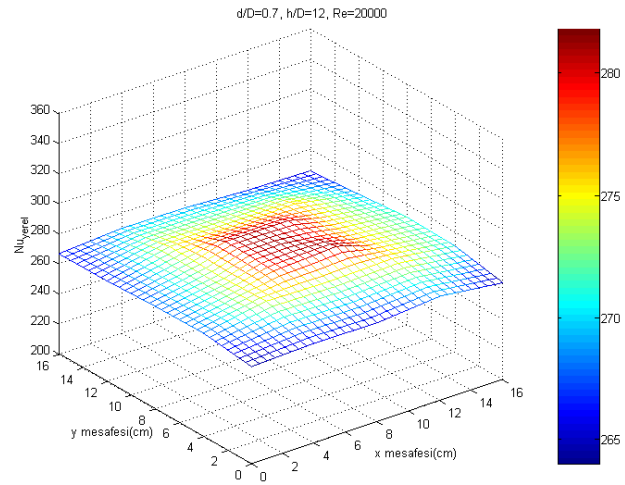
Şekil 7.21. $d/D=0.7$, $h/D=12$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



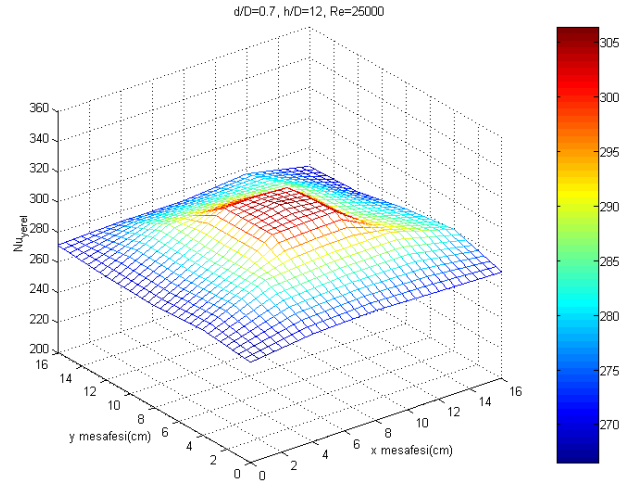
Şekil 7.22. $d/D=0.7$, $h/D=12$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



Şekil 7.23. $d/D=0.7$, $h/D=12$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı

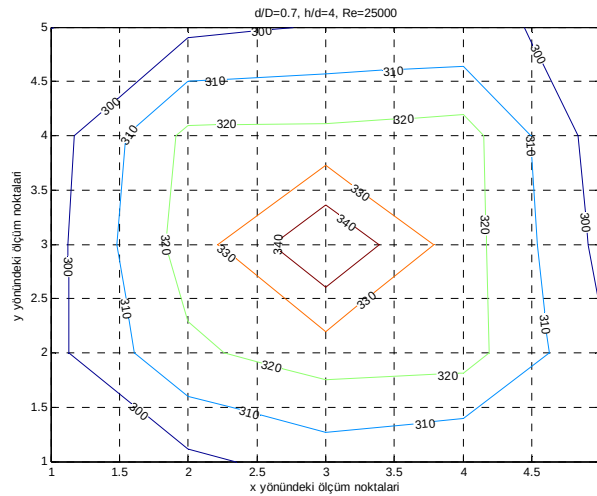


Şekil 7.24. $d/D=0.7$, $h/D=12$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı

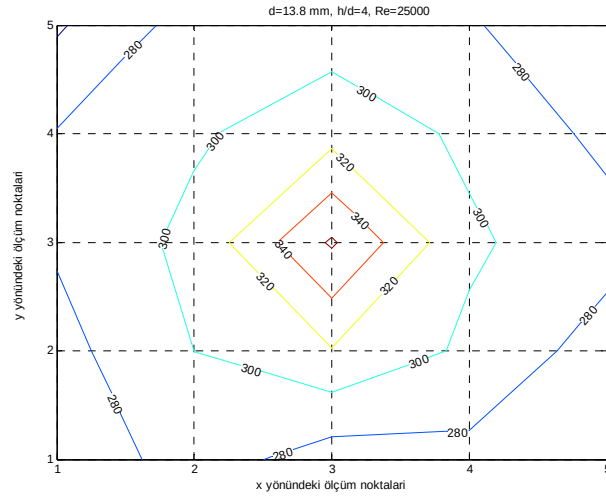


Şekil 7.25. $d/D=0.7$, $h/D=12$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı

Şu ana kadar $d/D=0.7$ 'lik lüleyle yapılan ısı transferi çalışmalarında düz bir dairesel lüleden farklı olarak ortaya çıkan iki durum var: birincisi durma noktasının etrafında oluşan geniş soğuma alanı, ikincisi ise durma noktası ile uç noktalar arasında azalan Nu sayısı farkı. Eş eksenli lülelerde oluşan geniş soğuma alanı, durma noktası etrafında daha geniş bir alanın yüksek Nu sayısına ulaşmasıyla ölçülebilir. Grafiklerin geneli incelendiğinde orta noktadaki renk dağılımının merkezden itibaren 20 mm x 20 mm lik bir alanda etkili olduğu görülmüştür. Oysa $d=13$ mm'lik lüleyle yapılan deneylerde, durma noktasında hesaplanan değer çok daha yüksek olmasına rağmen, kenarlara doğru yayılım mesafesi çok daha kısadır. Aşağıdaki şekilde aynı Re sayısı ve h/d mesafesinde kontör eğrileri şeklinde çizilmiş iki grafikte düz lüleyle eş eksenli lülenin kıyası yapılmıştır.

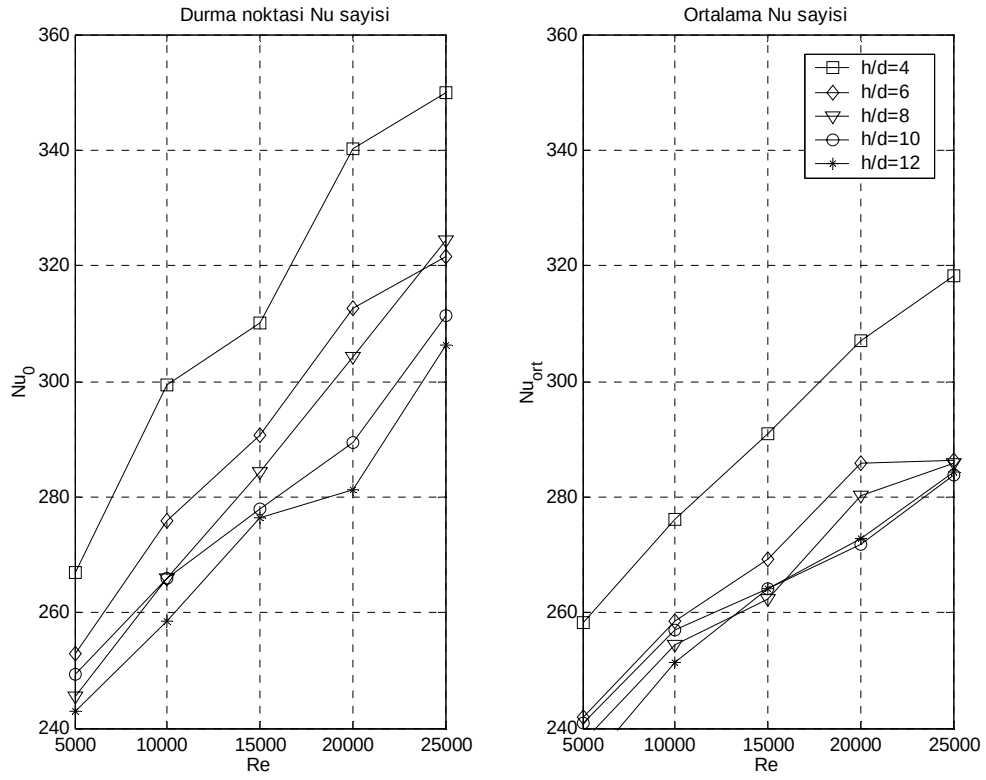


(a)



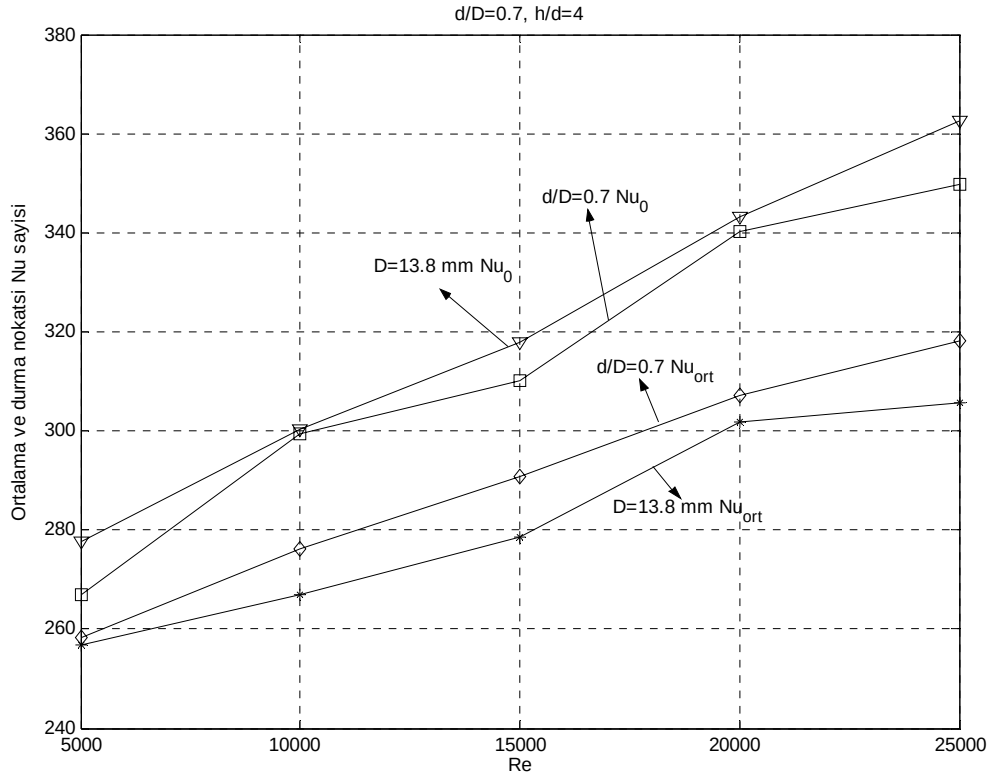
b)

Şekil 7.26. a) $d/D=0.7$ ve b) $D=13.8$ mm çaplı lülelerin her bir ölçüm noktasında hesaplanan Nu sayıları



Şekil 7.27. $d/D=0.7$ için durma noktası ve ortalama Nu sayılarının Re sayılarına göre değişimi

Şekil (7.27)'de de görüldüğü gibi Ortalama Nu sayıları ile durma noktası Nu sayıları arasındaki fark oldukça düşüktür. Düz dairesel lüleyle kıyaslandığında ise Şekil (7.28)'deki gibi bir durum ortaya çıkmaktadır.



Şekil 7.28. $d/D=0.7$ nin düz lülenin ortalama ve durma noktası Nu sayılarıyla kıyaslanması

Şekil (7.28)'de ortalama ve durma noktası Nu sayıları düz ve eş eksenli jet için aynı anda verilmiştir. Görüldüğü gibi durma noktası Nu sayıları açısından düz dairesel lülede tüm h/d değerlerinde daha yüksek Nu sayısı elde edilmesine rağmen, ortalamalar açısından bakıldığında eş eksenli lülede düz dairesel jete göre yüksek değerler tespit edilmiştir. Bu da yüzeyin genelinde bu jet tipinde iyi bir soğutma sağlandığını gösterir.

7.2. $d/D=0.58$ Oranındaki Lülenin Nu Sayısı Dağılımı

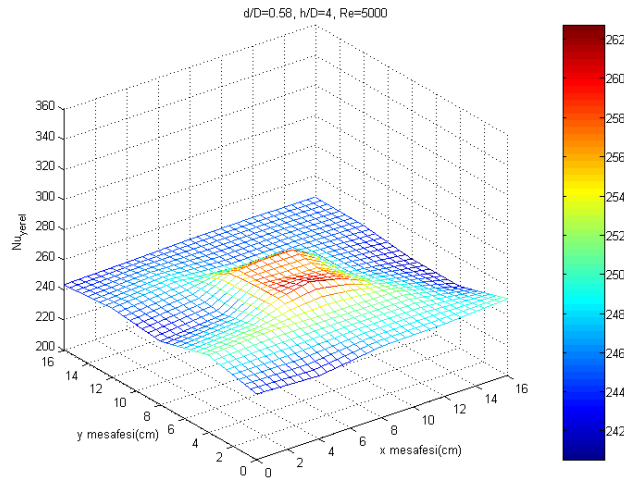
Çalışmanın bu bölümünde $d/D=0.58$ çap oranlı lüle tipi kullanılmıştır. Bu lüleyle yapılan deneyler de yukarıda bahsedilen $d/D=0.7$ çap oranlı lüleyle aynı sıralamayla gerçekleştirilmiştir. Yukarıda $d/D=0.7$ için yapılan yorumlar, okuma kolaylığı sağlamak amacıyla burada ve bir sonraki d/D çaplı lülede tablolarla gösterilmiştir. Şekil (7.29) ile (7.33) arasındaki değerler $h/d=4$ mesafesinde $Re=5000-25000$ aralığında gerçekleştirilen deneylerin yerel Nu sayısı dağılımlarını vermektedir. Bu grafiklerdeki değerlerden özetle aşağıda Tablo 11 ve 12 ile verilen değerlendirmeler yapılmıştır:

Tablo 8. Re sayısının 5000'den sırasıyla 10000 15000 20000 ve 25000'e çıkartılmasıyla durma noktası Nusselt sayısında (Nu_0) görülen artış miktarı

d/D=0.58				
	5000⇒10000	5000⇒15000	5000⇒ 20000	5000⇒25000
h/d=4	%5.27	%8.63	%18.65	%22.94
h/d=6	%4.11	%6.79	%21.26	%23.57
h/d=8	%5.58	%10.39	%20.72	%26.52
h/d=10	%4.92	%10.58	%14.28	%18.08
h/d=12	%5.83	%9.21	%11.52	%14.83

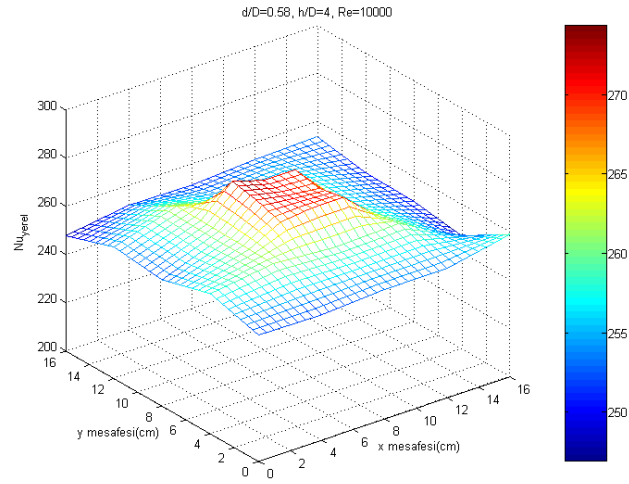
Tablo 9. Çeşitli lüle çapları için durma noktasında hesaplanan Nusselt sayısı (Nu_0) ile en uç nokta arasında hesaplanan yerel Nusselt sayısı arasındaki azalma oranı

d/D=0.58					
	h/d=4	h/d=6	h/d=8	h/d=10	h/d=12
Re 5000	%4.92	%5.67	%4.25	%4.64	%3.32
Re 10000	%6.46	%6.98	%6.19	%6.32	%4.85
Re 15000	%8.1	%8.4	%6.77	%8.45	%5.16
Re 20000	%11.27	%14.43	%10.97	%8.57	%5.44
Re 25000	%14.51	%14.67	%10.94	%11.13	%5.94

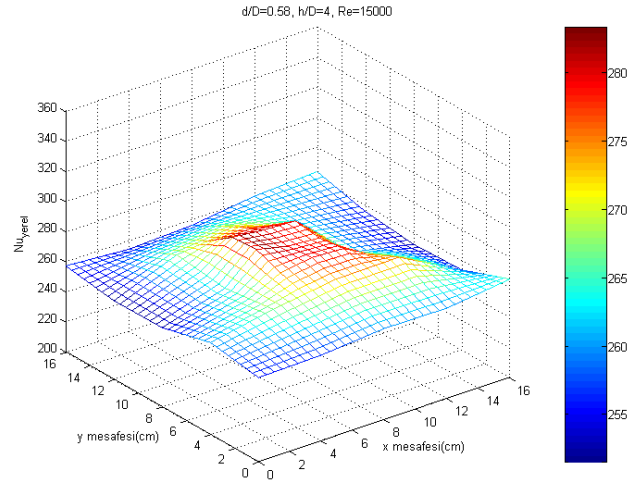


Şekil 7.29. d/D=0.58, h/D=4, Re=5000 için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı

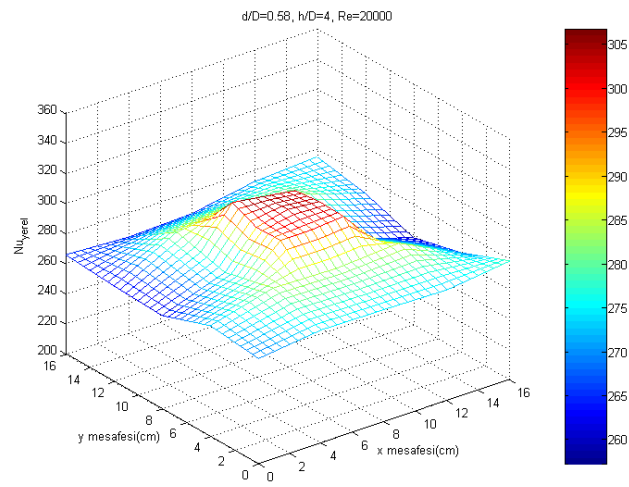
Tablo 8 ve 9'daki değerler Re sayısının artışının Nu sayısı üzerindeki etkisini bir kez daha kanıtlamaktadır. Öte yandan lüle-levha arası mesafenin artmasıyla soğuma etkisinin azalacağı ve lülenin geometrik orta noktasından uçlara doğru etkin bir soğumayla soğutulacağı da tablolardaki değerlerden anlaşılabilir.



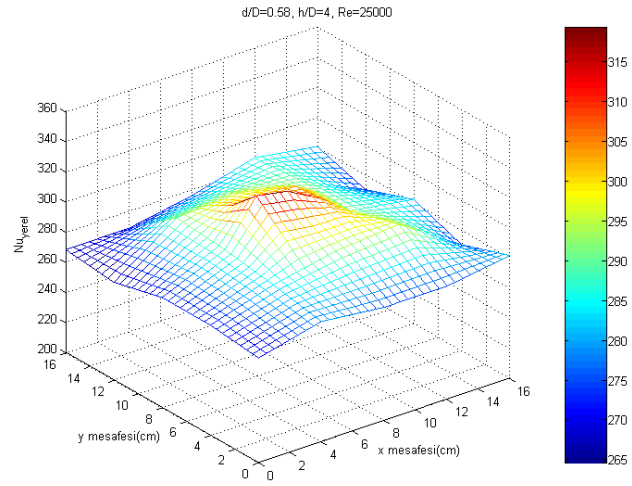
Şekil 7.30. $d/D=0.58$, $h/D=4$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



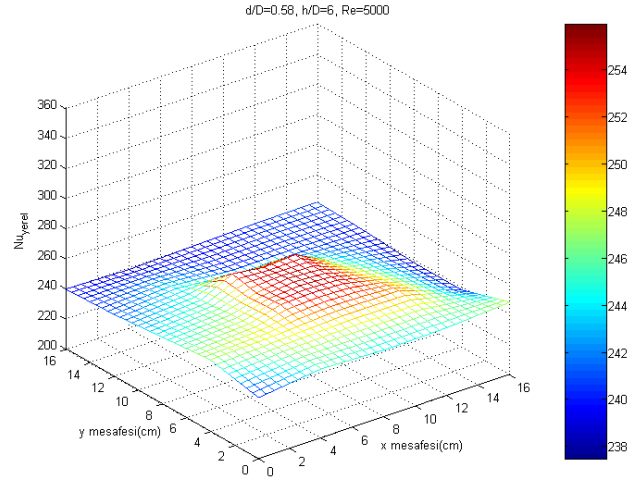
Şekil 7.31. $d/D=0.58$, $h/D=4$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



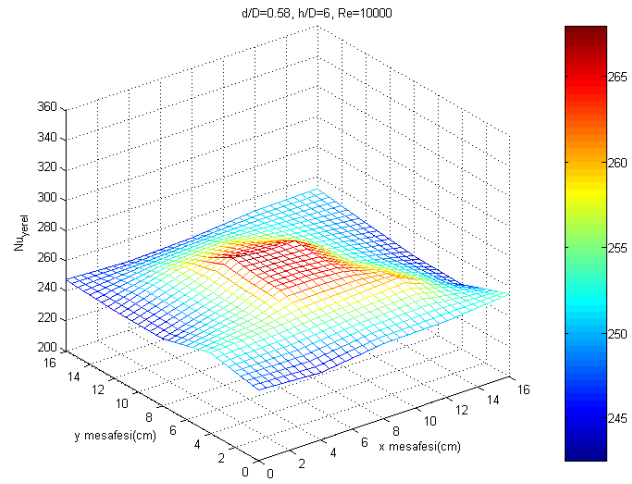
Şekil 7.32. $d/D=0.58$, $h/D=4$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



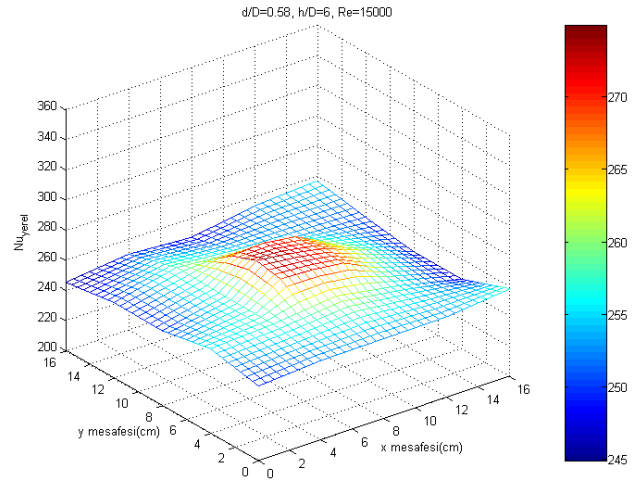
Şekil 7.33. $d/D=0.58$, $h/D=4$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



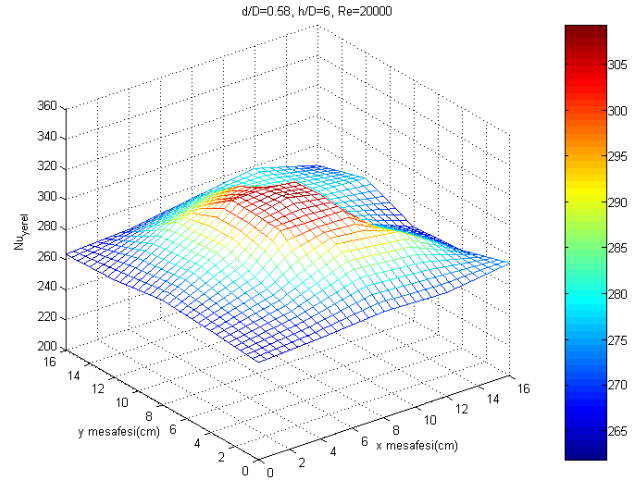
Şekil 7.34. $d/D=0.58$, $h/D=6$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



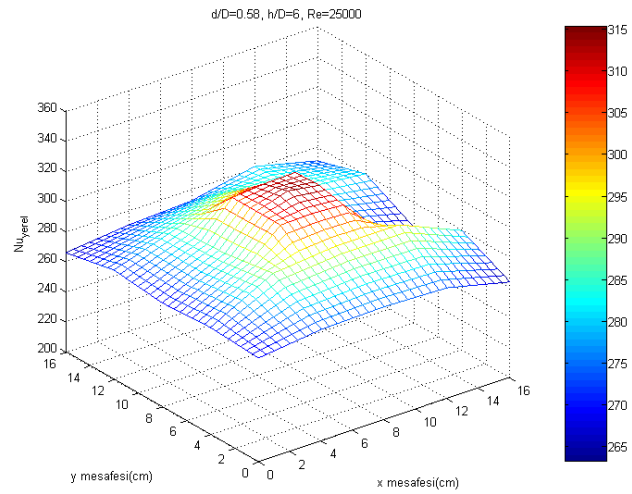
Şekil 7.35. $d/D=0.58$, $h/D=6$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



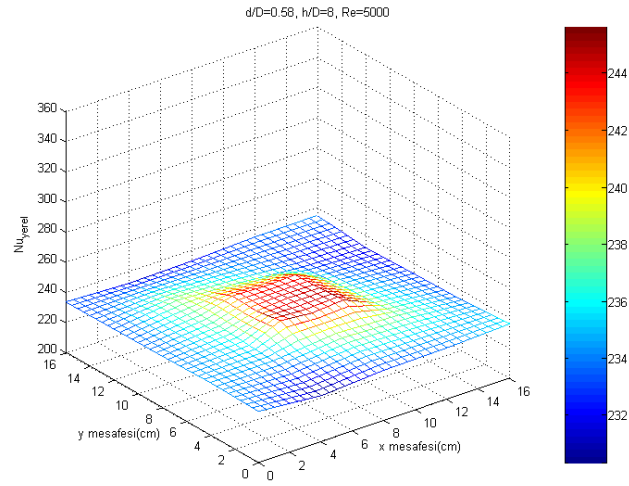
Şekil 7.36. $d/D=0.58$, $h/D=6$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



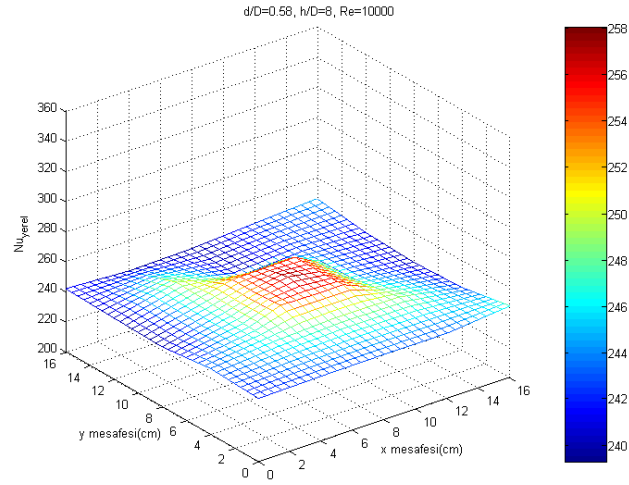
Şekil 7.37. $d/D=0.58$, $h/D=6$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



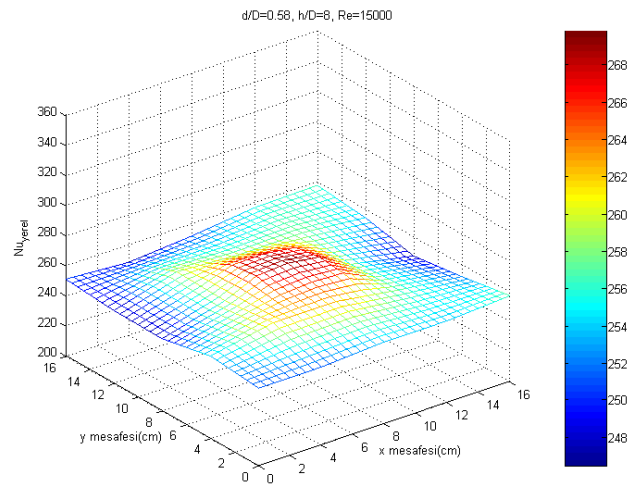
Şekil 7.38. $d/D=0.58$, $h/D=6$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



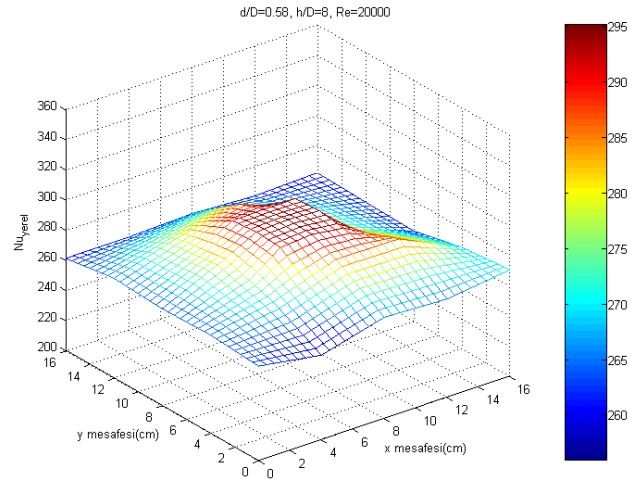
Şekil 7.39. $d/D=0.58$, $h/D=8$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



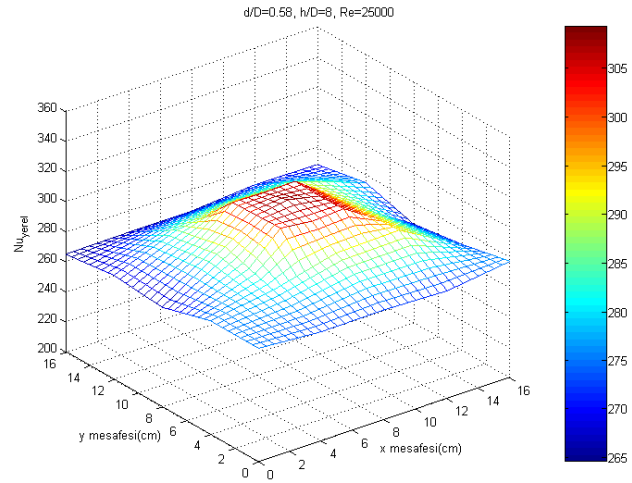
Şekil 7.40. $d/D=0.58$, $h/D=8$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



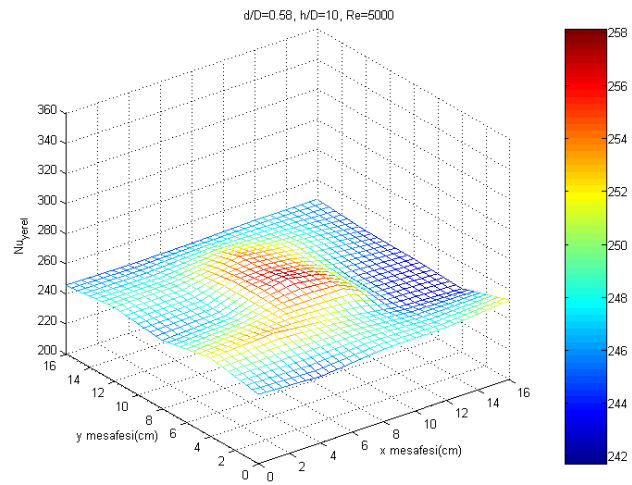
Şekil 7.41. $d/D=0.58$, $h/D=8$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



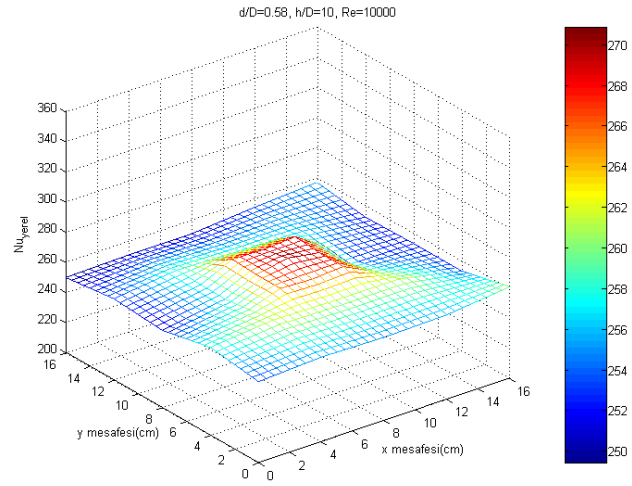
Şekil 7.42. $d/D=0.58$, $h/D=8$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



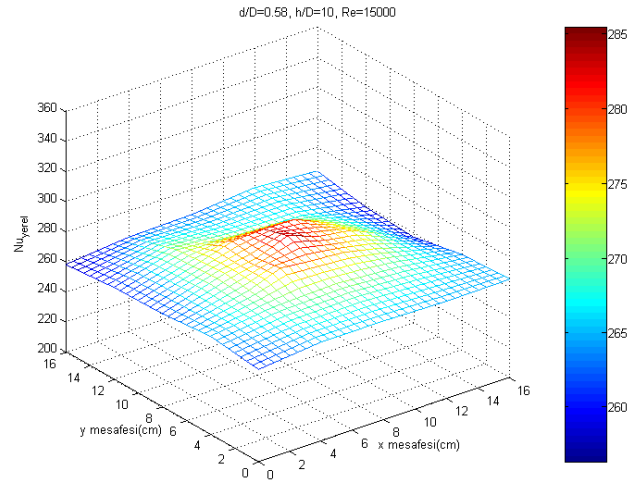
Şekil 7.43. $d/D=0.58$, $h/D=8$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



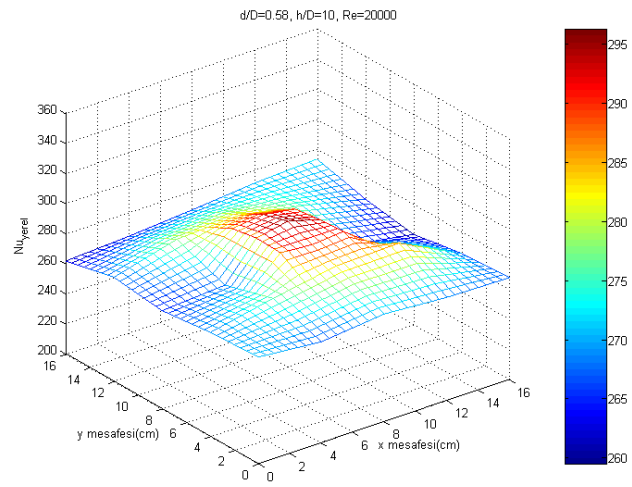
Şekil 7.44. $d/D=0.58$, $h/D=10$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



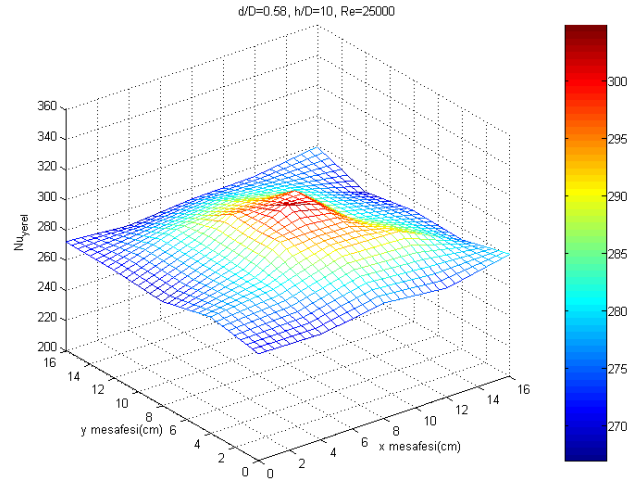
Şekil 7.45. $d/D=0.58$, $h/D=10$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



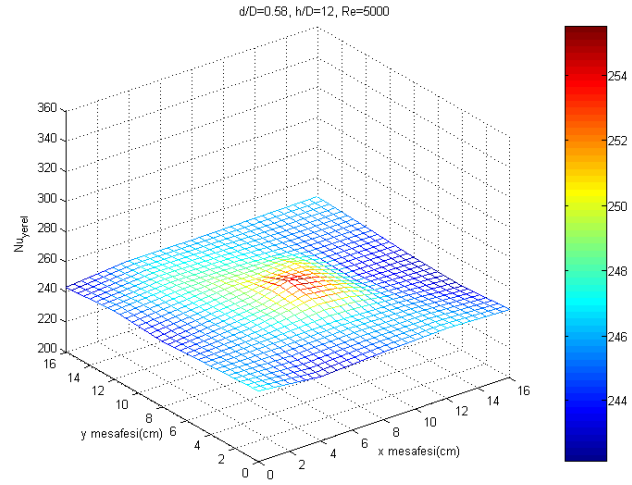
Şekil 7.46. $d/D=0.58$, $h/D=10$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



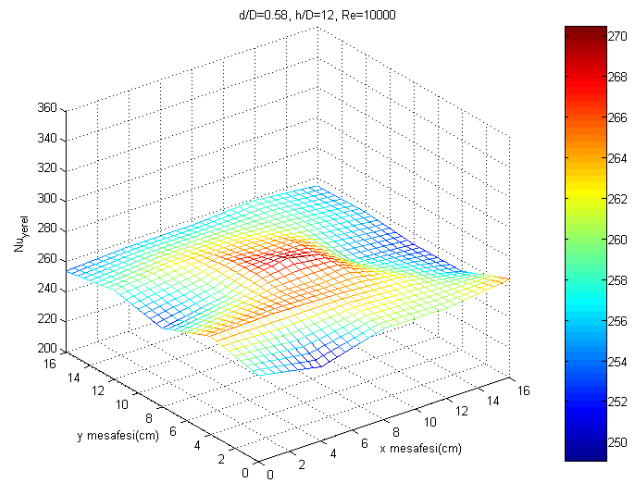
Şekil 7.47. $d/D=0.58$, $h/D=10$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



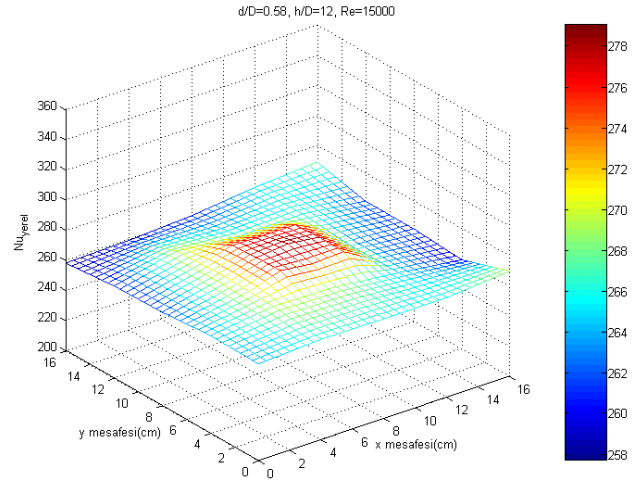
Şekil 7.48. $d/D=0.58$, $h/D=10$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



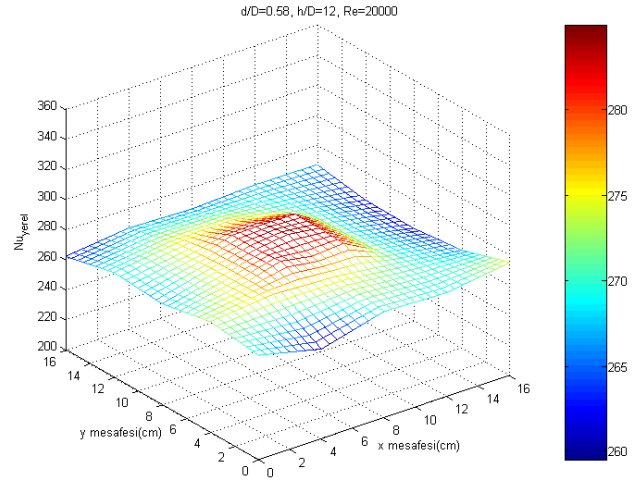
Şekil 7.49. $d/D=0.58$, $h/D=12$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



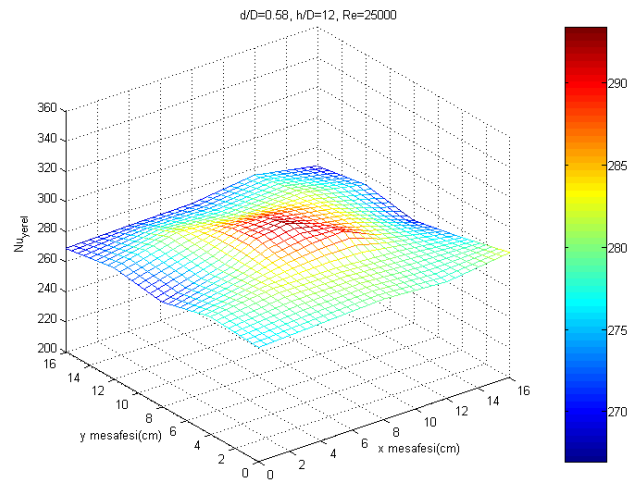
Şekil 7.50. $d/D=0.58$, $h/D=12$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



Şekil 7.51. $d/D=0.58$, $h/D=12$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



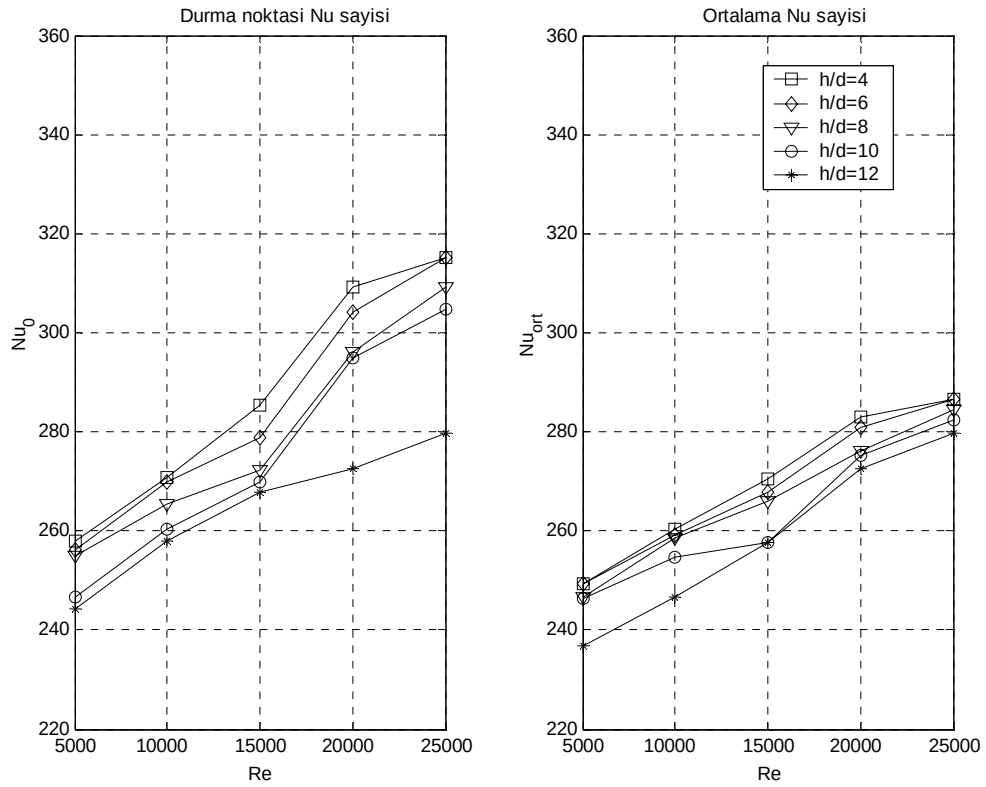
Şekil 7.52. $d/D=0.58$, $h/D=12$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



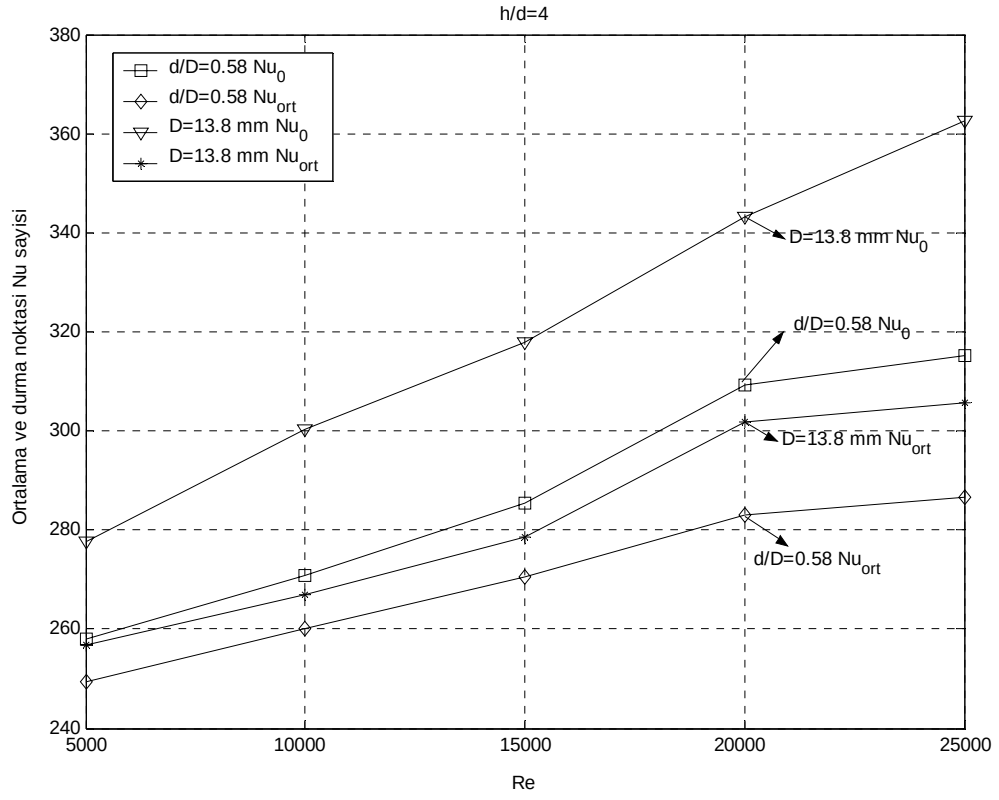
Şekil 7.53. $d/D=0.58$, $h/D=12$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı

Şu ana kadar $d/D=0.58$ çap oranındaki jetle yapılan deneylerde dikkati çeken önemli sonuçlar şunlardır:

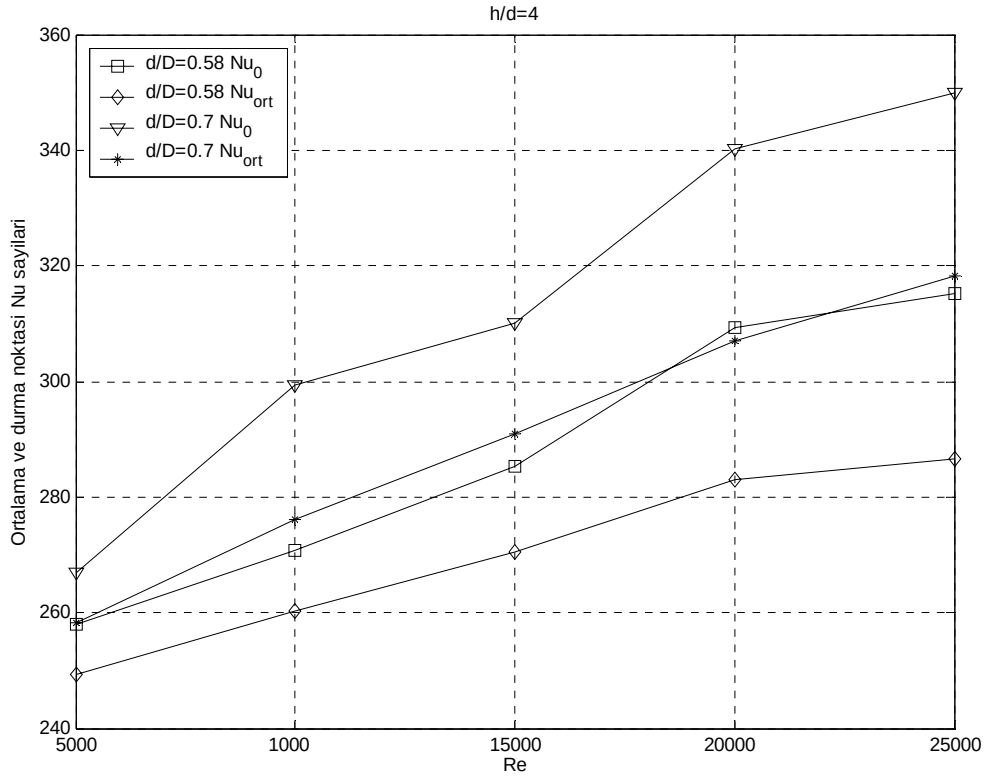
- $d/D=0.58$ 'de ortalama Nu sayıları ile durma noktası Nu sayıları arasında yüksek bir fark gözlenmemiştir (Şekil 7.54).
- $d/D=0.58$ 'de ölçülen ortalama ve durma noktası Nu sayıları düz dairesel lüleyle ölçülen ortalama ve durma noktası Nu sayılarına göre daha düşük çıkmıştır (Şekil 7.55).
- $d/D=0.58$ 'de yapılan deneyler aynı şartlarda gerçekleştirilen $d/D=0.7$ deki deneylerdeki ortalama ve durma noktası Nu sayılarına nazaran daha düşük çıkmıştır (Şekil 7.56).



Şekil 7.54. $d/D=0.58$ için durma noktası ile ortalama Nu sayılarının kıyası



Şekil 7.55. $d/D=0.58$ çap oranındaki lülenin düz dairesel lüleyle kıyaslanması



Şekil 7.56. $d/D=0.58$ ile $d/D=0.78$ tip lülelerin ortalama ve durma noktası Nu sayılarının kıyaslanması

7.3. $d/D=0.45$ Oranındaki Lülenin Nu Sayısı Dağılımı

Test edilen son lüle tipi $d/D=0.45$ oranındaki eş eksenli jettir. Bu lüle, merkezi yuvarlak jet kesitinin annular jet kesitine göre en düşük olduğu jet tipidir. Bu lüleyle yapılan deneylerde durma noktasında ölçülen değerler düz dairesel lülelerdeki gibi daha pik değerlerdedir ve diğer iki eş-eksenli tipteki jete nazaran ortalama değerler daha düşüktür.

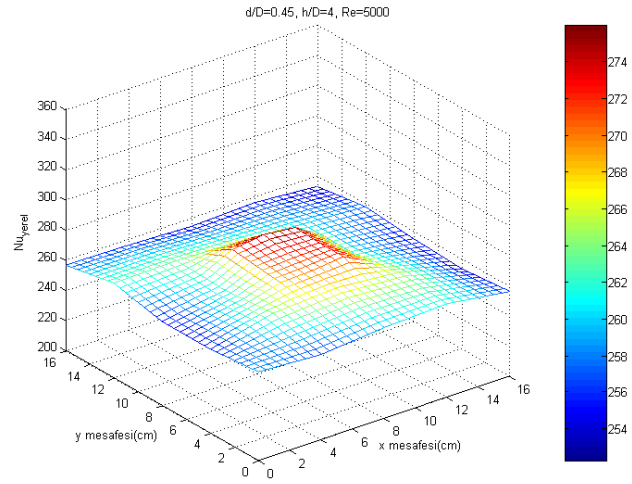
Yapılan deneyler neticesinde elde edilen yerel Nu sayıları Şekil (7.57) ila (7.81) arasında verilmiştir. Elde edilen değerlerden gidilerek; her bir h/d mesafesinde Re sayısını adım adım arttırmanın durma noktası Nu sayısı üzerindeki etkisi, lüle-levha mesafesini arttırmanın durma noktası üzerindeki etkisi ve lüle-levha mesafesinin ve Re sayısının durma noktasından itibaren jetin levha üzerindeki yayılımına etkisi incelenmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 13 ve 14’de verilmiştir.

Tablo 10. Re sayısının 5000’den sırasıyla 10000 15000 20000 ve 25000’e çıkartılmasıyla durma noktası Nusselt sayısında (Nu_0) görülen artış miktarı

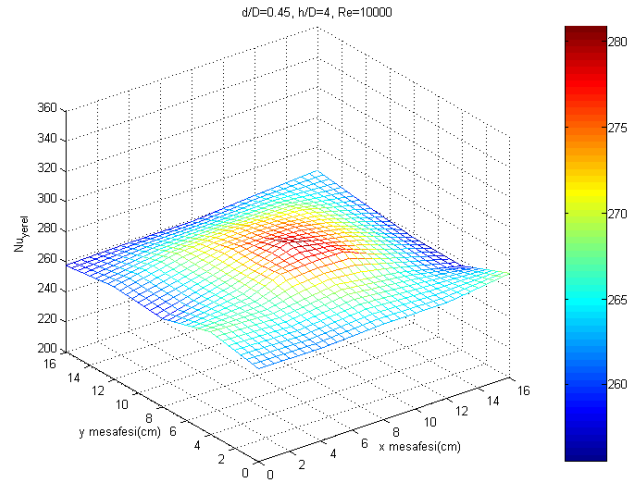
$d/D=0.45$				
	5000⇒10000	5000⇒15000	5000⇒20000	5000⇒25000
$h/d=4$	%2.99	%6.98	%20	%23.84
$h/d=6$	%6.35	%9.32	%16.96	%30.52
$h/d=8$	%2.73	%8.25	%11.87	%18.48
$h/d=10$	%5.48	%10.78	%20.64	%31.55
$h/d=12$	%3.6	%5.7	%17.36	%17.94

Tablo 11. Çeşitli lüle çapları için durma noktasında hesaplanan Nusselt sayısı (Nu_0) ile en uç nokta arasında hesaplanan yerel Nusselt sayısı arasındaki azalma oranı

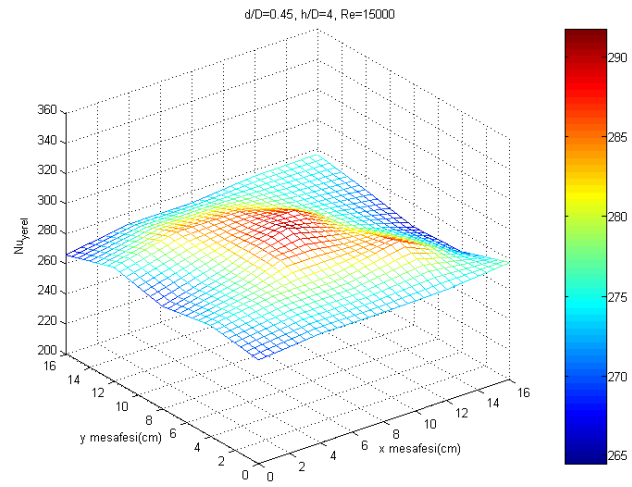
$d/D=0.45$					
	$h/d=4$	$h/d=6$	$h/d=8$	$h/d=10$	$h/d=12$
Re 5000	%5.07	%4.4	%5.05	%3.86	%5.42
Re 10000	%6.76	%7.5	%5.017	%3.57	%4.95
Re 15000	%7.79	%9.45	%8.91	%5.43	%3.03
Re 20000	%14.76	%12.56	%9.47	%7.3	%5.22
Re 25000	%14.54	%17.31	%12.01	%15.14	%6.87



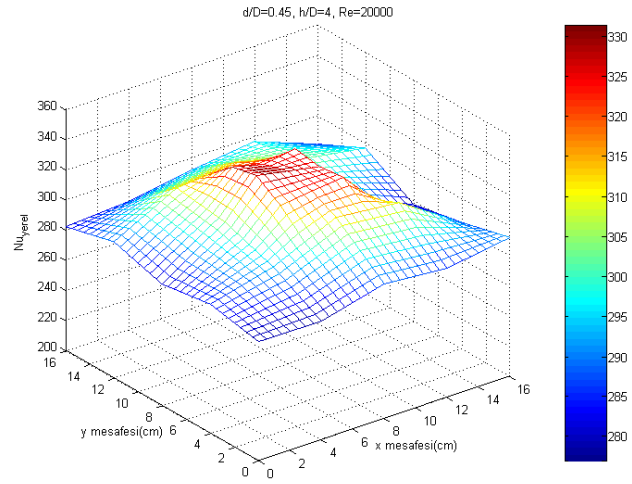
Şekil 7.57. $d/D=0.45$, $h/D=4$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



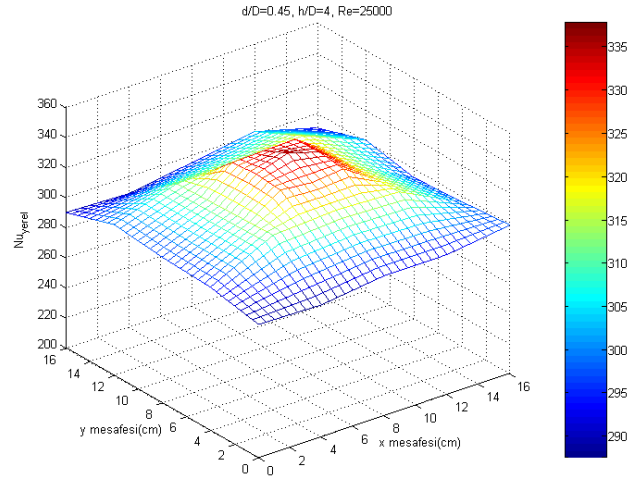
Şekil 7.58. $d/D=0.45$, $h/D=4$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



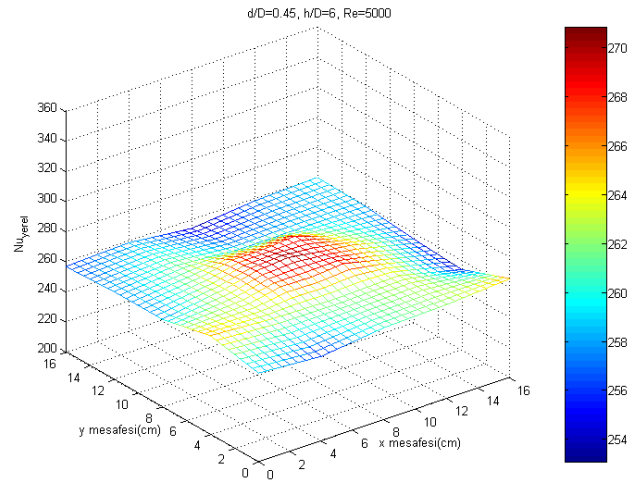
Şekil 7.59. $d/D=0.45$, $h/D=4$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



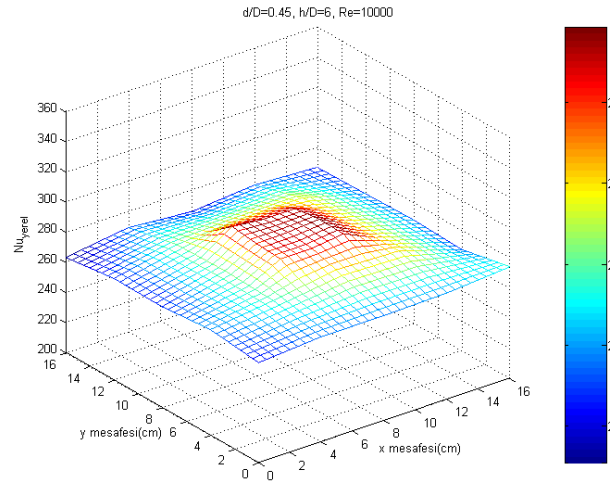
Şekil 7.60. $d/D=0.45$, $h/D=4$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



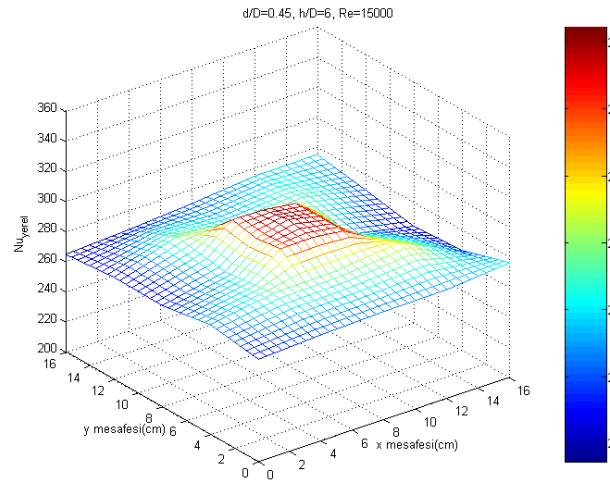
Şekil 7.61. $d/D=0.45$, $h/D=4$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



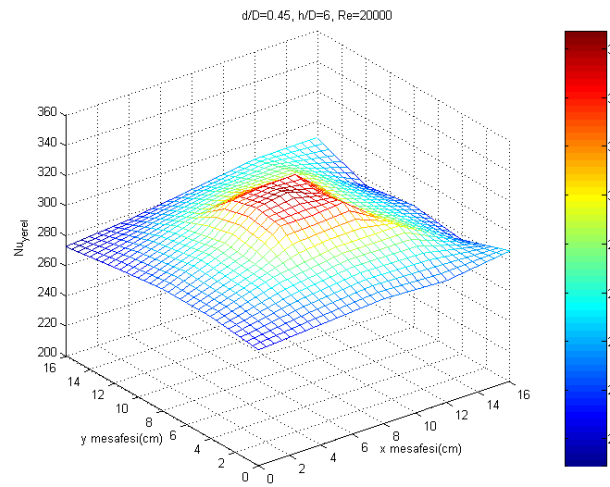
Şekil 7.62. $d/D=0.45$, $h/D=6$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



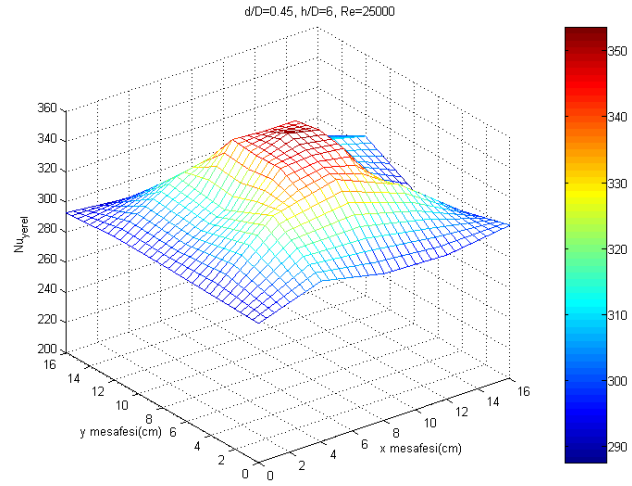
Şekil 7.63. $d/D=0.45$, $h/D=6$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



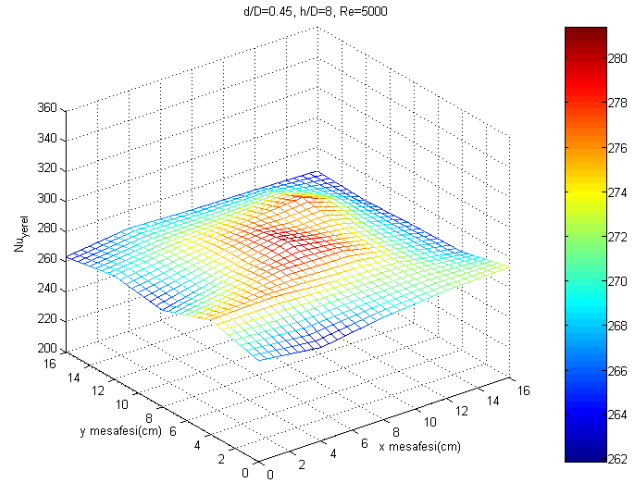
Şekil 7.64. $d/D=0.45$, $h/D=6$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



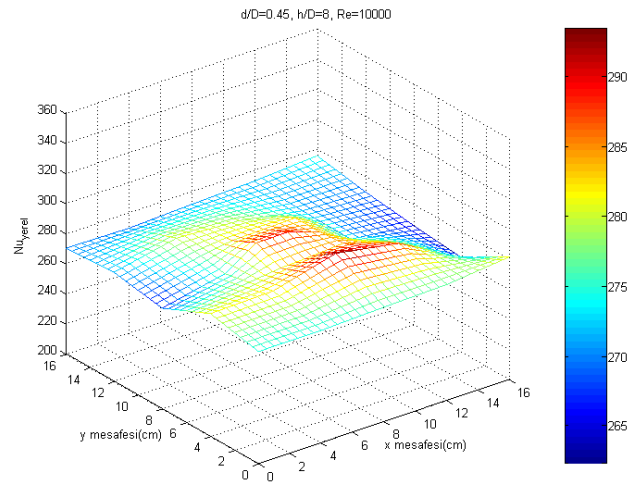
Şekil 7.65. $d/D=0.45$, $h/D=6$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



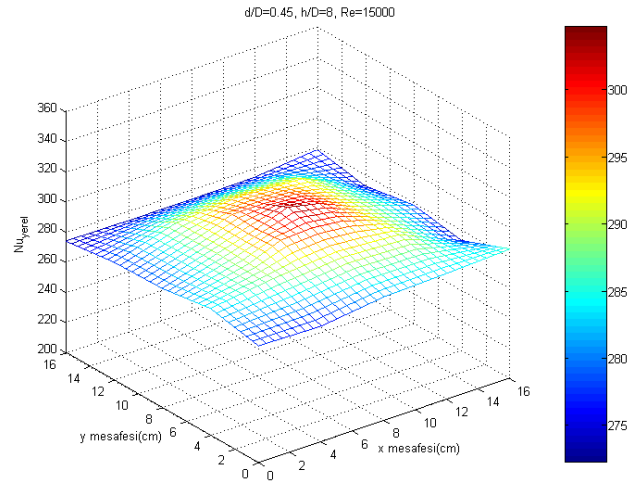
Şekil 7.66. $d/D=0.45$, $h/D=6$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



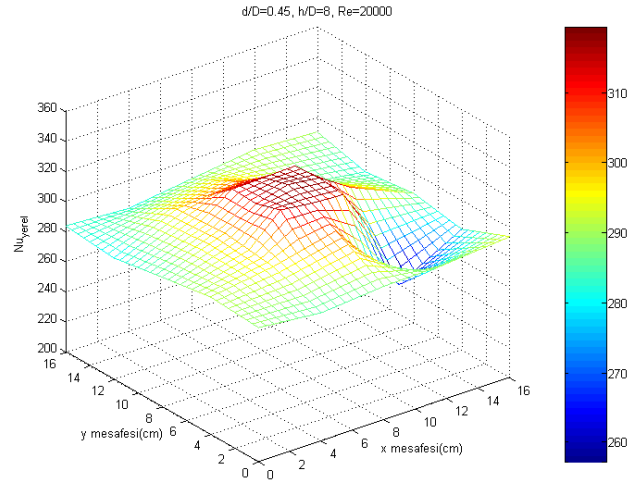
Şekil 7.67. $d/D=0.45$, $h/D=8$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



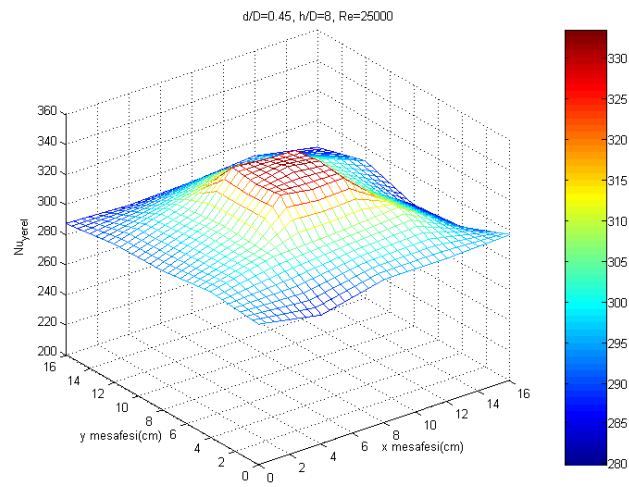
Şekil 7.68. $d/D=0.45$, $h/D=8$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



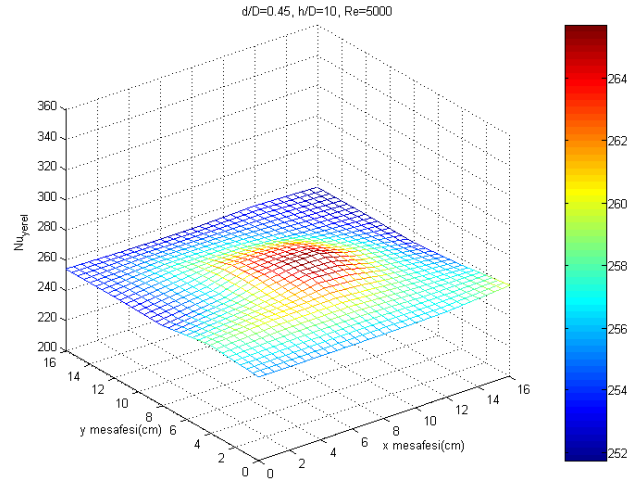
Şekil 7.69. $d/D=0.45$, $h/D=8$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



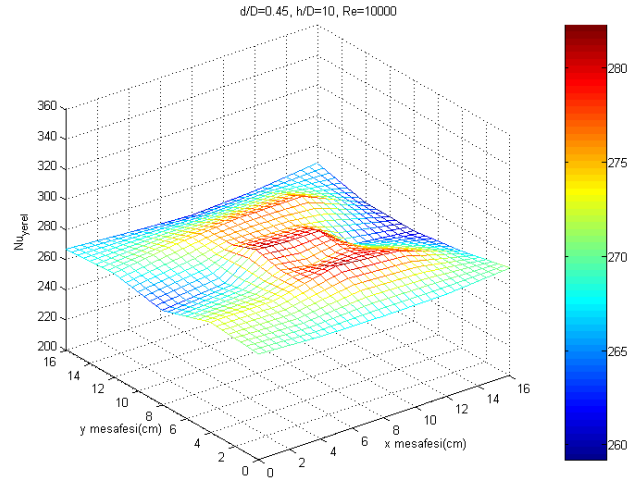
Şekil 7.70. $d/D=0.45$, $h/D=8$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



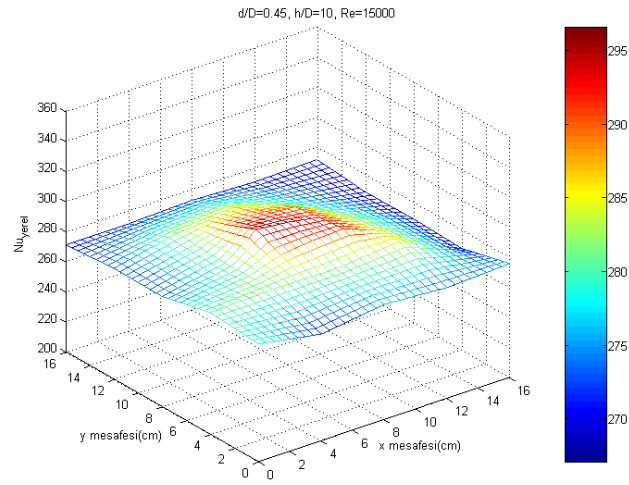
Şekil 7.71. $d/D=0.45$, $h/D=8$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



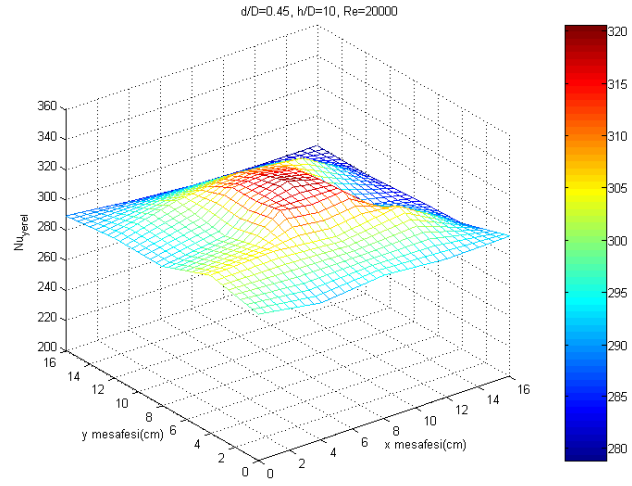
Şekil 7.72. $d/D=0.45$, $h/D=10$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



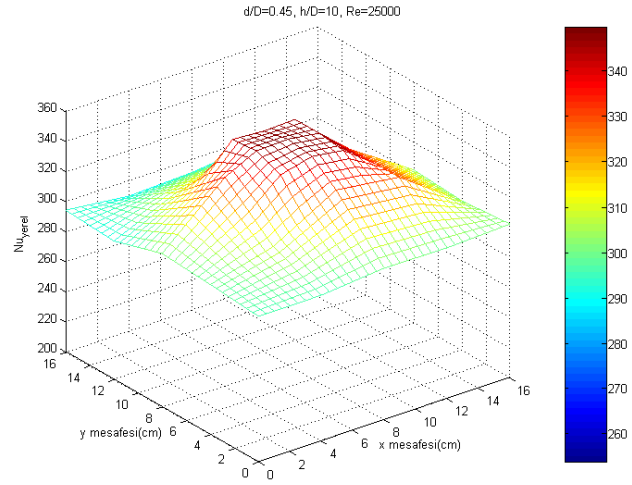
Şekil 7.73. $d/D=0.45$, $h/D=10$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



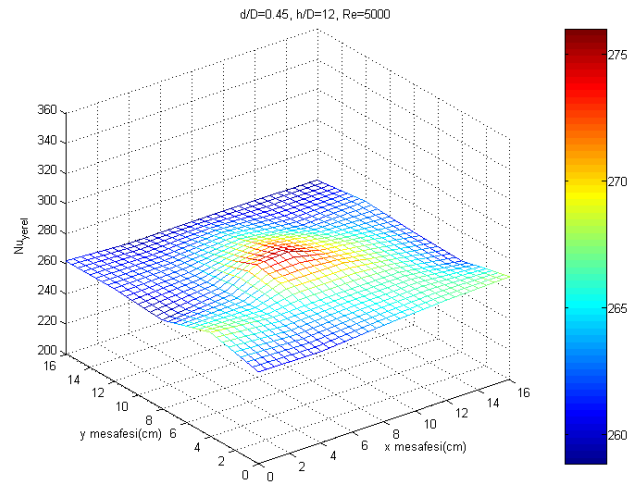
Şekil 7.74. $d/D=0.45$, $h/D=10$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



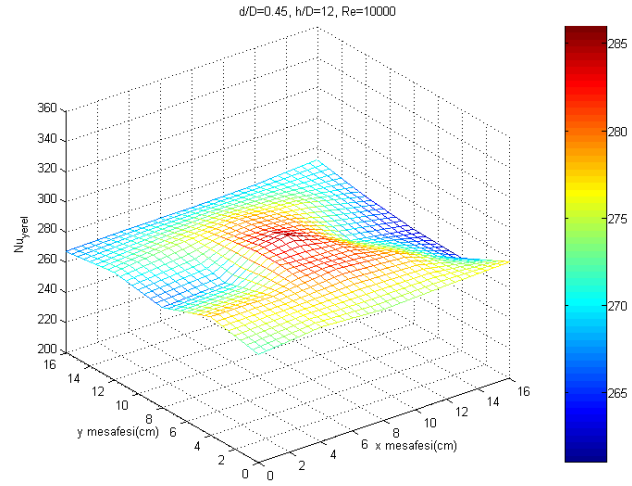
Şekil 7.75. $d/D=0.45$, $h/D=10$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



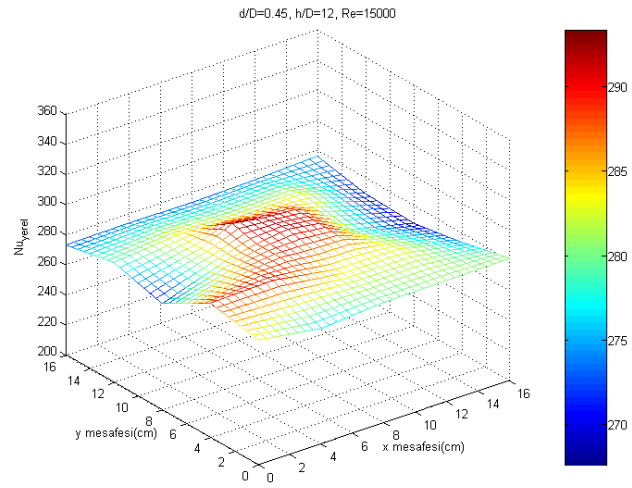
Şekil 7.76. $d/D=0.45$, $h/D=10$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



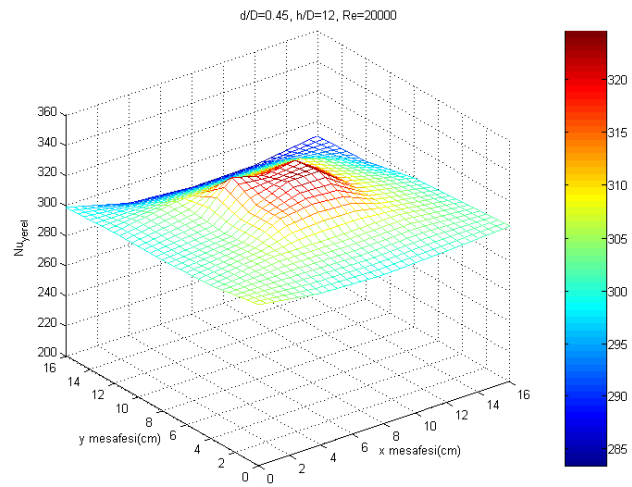
Şekil 7.77. $d/D=0.45$, $h/D=12$, $Re=5000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



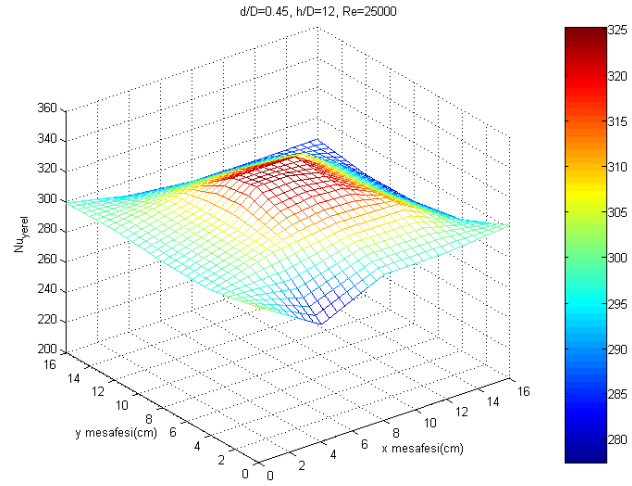
Şekil 7.78. $d/D=0.45$, $h/D=12$, $Re=10000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



Şekil 7.79 $d/D=0.45$, $h/D=12$, $Re=15000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı

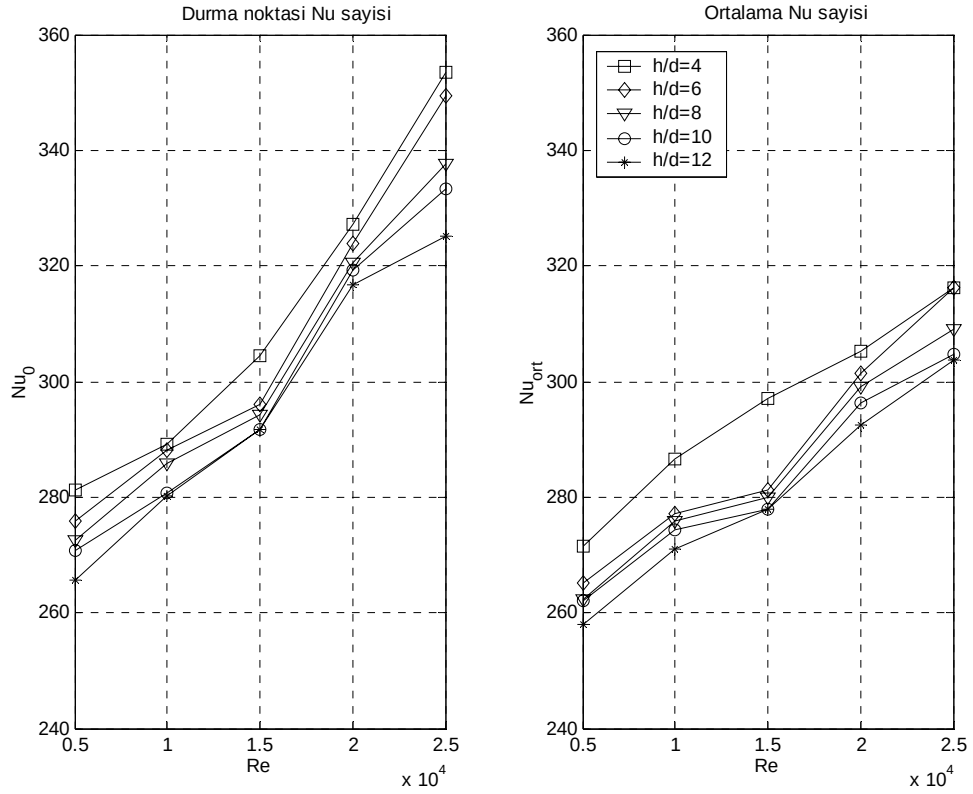


Şekil 7.80. $d/D=0.45$, $h/D=12$, $Re=20000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı



Şekil 7.81. $d/D=0.45$, $h/D=12$, $Re=25000$ için çarpma levhası üzerindeki yerel Nu sayısı dağılımı

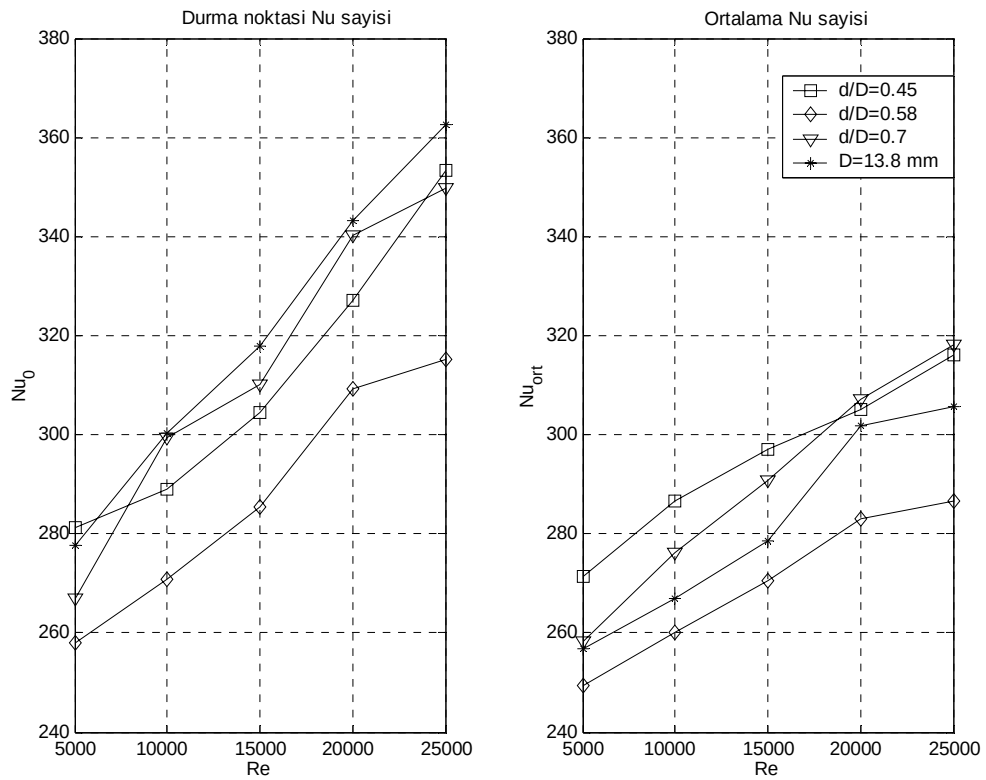
Şu ana kadar çizilen yerel Nu sayısı grafikleri ısı transferi hakkında genel bir görüş sağlanmasına yetecek seviyededir. Şekil (7.82)'de $d/D=0.45$ tip lüleye ait durma noktası ve ortalama ısı transferi sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 7.82. $d/D=0.45$ için durma noktası ve ortalama Nu sayılarının kıyası

Şekil (7.83)'de şu ana kadar incelenen üç eş eksenli lüle ve düz dairesel lüle birlikte ele alınmıştır. Neticede:

- En yüksek ortalama Nu sayısı değeri $d/D=0.45$ 'de ölçülmüştür. Ardından $d/D=0.7$ ve düz dairesel boru gelmektedir. Nihayetinde en düşük değerler $d/D=0.58$ 'deki değerlerdir.
- En yüksek durma noktası Nu sayısı düz dairesel lülede oluşmuştur. Arkasından $d/D=0.7$ ve $d/D=0.45$ gelmektedir. Burada da en düşük değerler ortalama olduğu gibi $d/D=0.58$ 'de ölçülmüştür.



Şekil 7.83. Tüm lüle çeşitlerinin birbirleriyle kıyaslanması

Çıkan bu sonuçların gerekçesini eş-eksenli tipteki lülelerin akış karakteri daha net açıklayacaktır. Ancak çok kısaca bir yorumla,

- dış lülenin içerisine başka bir lülenin yerleştirilmesinin her durum ve şartta ısı transferini artırıcı özelliği olmayacağı,
- iç içe geçirilen lülelerin iç/dış çap oranlarının akışı doğrudan etkileyeceği, hatta çok düşük oranlarda bile olsa yapılan değişikliğin akışa birebir yansıtacağı
- bu nedenle çap oranlarının optimizasyonunun çok önemli olduğu ortaya çıkmıştır.

8. EŞ-EKSENLİ JETLERDE AKIŞ DİNAMİĞİ

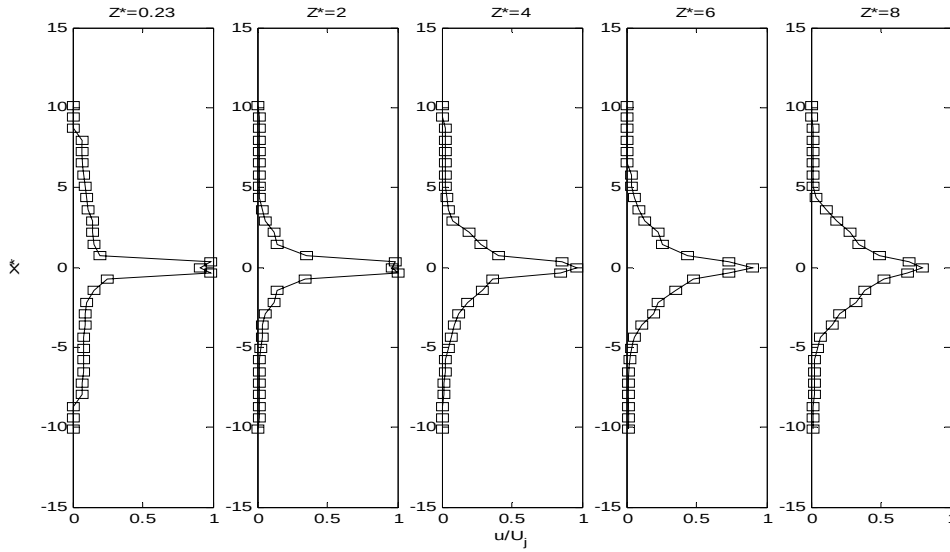
Bu bölümde bir önceki bölümde çarpma ile ısı transferi incelenen eş-eksenli jetlerin serbest haldeki türbülans akış dinamiği test sonuçları sunulmuştur. Testler diğer düz dairesel lülelerdeki gibi aynı Re sayısı aralığında gerçekleştirilmiştir. Daha önceki deneylerde simetri şartının sağlandığının görülmesi üzerine deneyler yalnızca X^* eksenini boyunca yürütülmüştür.

8.1. Eş Eksenli Jetlerde Ortalama Hız Değişimi

8.1.1. $d/D=0.7$ Çap Oranlı Jet

Eş eksenli jetlerde en önemli parametre çap ve hız oranlarıdır (λ). Çap oranları bu çalışmada $d/D=0.7$, 0.58 ve 0.45 alınmıştır. Sonuçların değerlendirilmesi en büyük çap oranından başlayarak yapılacaktır.

$d/D=0.7$ için elde edilen hız profilleri Şekil (8.1)-(8.5) arasında sırasıyla Re sayısının 5000-25000 aralığındaki değerler için grafiksel olarak sunulmuştur.



Şekil 8.1. $d/D=0.7$ ve Re 5000 için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=5.5$ m/s

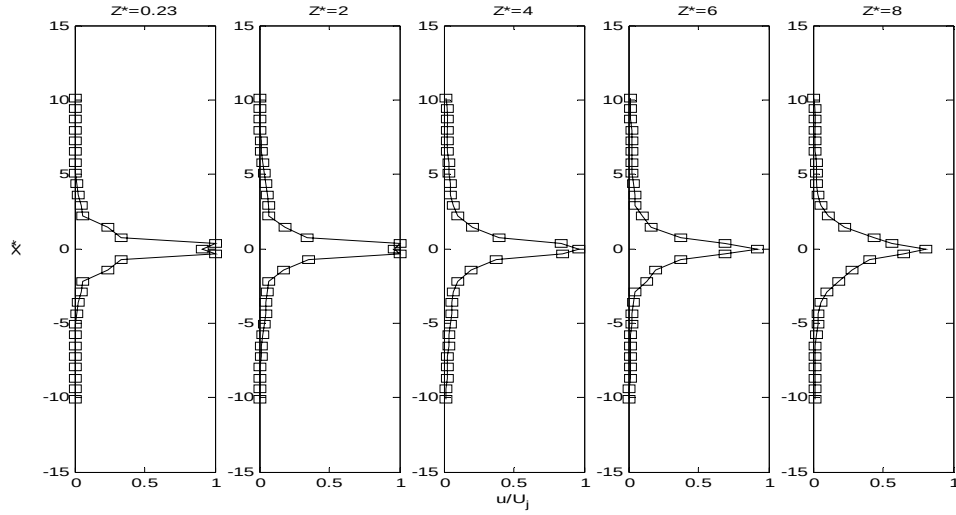
$d/D=0.7$ çap oranlı lülenin hız profilinde görülen en önemli husus; $Z^*=0.23$ ve $Z^*=2$ için prob lülenin tam merkezindeyken ($X^*=0$), ölçülen hızın halkasal kesitteki jet hızından düşük çıkmış olmasıdır. İlerleyen eksenel mesafeyle birlikte merkez hattı hızında $Z^*=2$ 'ye kadar artış söz konusudur. $Z^*=4$ 'den sonra merkez hattı hızı azalmaya başlamıştır. Halkasal

kesitteki hız azalması merkez hattı hızına oranla daha fazladır. Dolayısıyla $Z^*=4$ 'den sonra hız profili tek lüleye benzer çıkmıştır.

Konunun daha net anlaşılabilmesi için Tablo 12'de örnek olarak $d/D=0.7$, $Re=5000$, $Z^*=0.23$ için merkezde ve merkezin sağ ve sol taraflarında alınan ölçümlerden birkaç tanesi verilmiştir.

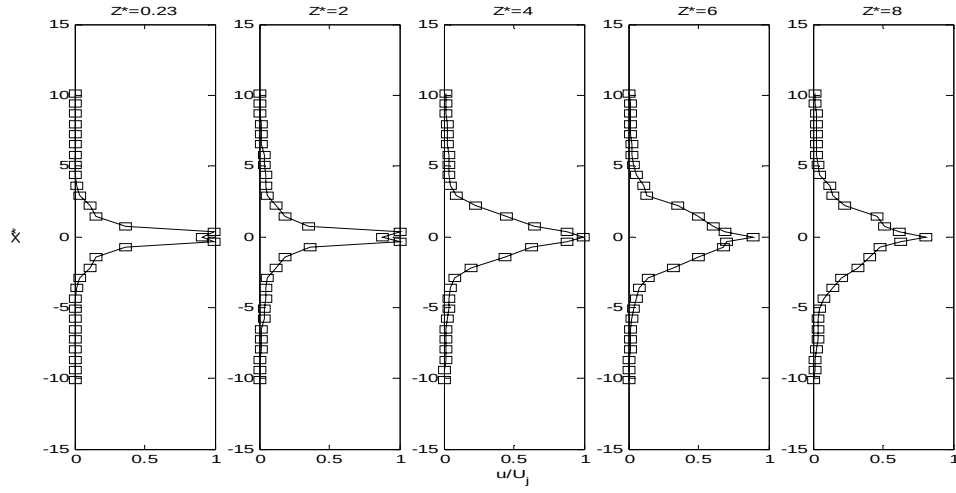
Tablo 12. $d/D=0.7$, $Re=5000$, için hesaplanan u/U_j değerlerinden bir kesit

u/U_j					
X^*	$Z^*=0.23$	$Z^*=2$	$Z^*=4$	$Z^*=6$	$Z^*=8$
-0.724	0.244848	0.346327	0.362885	0.482158	0.517752
-0.362	0.987897	0.98921	0.85091	0.729091	0.686436
0	0.927394	0.959656	0.959333	0.89939	0.798097
0.362	0.986424	0.986303	0.852936	0.726424	0.700218
0.724	0.195152	0.348442	0.409048	0.437485	0.492564

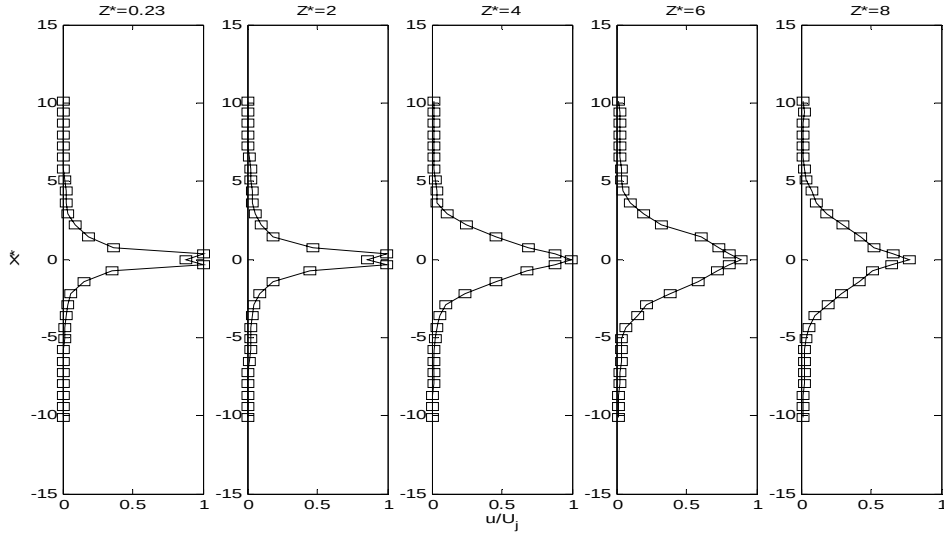


Şekil 8.2. $d/D=0.7$ ve Re 10000 için Z^* ile ortalama hız değişimi, $U_j=11.35$ m/s

Şekil (8.1)'de elde edilen hız profili, takip eden grafiklerde de [Şekil (8.2)-(8.5)] benzer şekilde çıkmıştır.

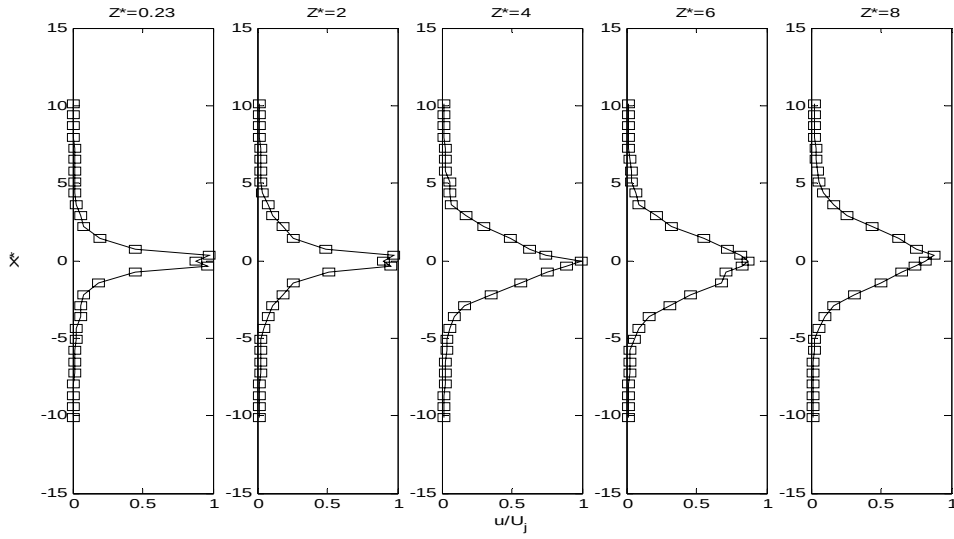


Şekil 8.3. $d/D=0.7$ ve Re 15000 için Z^* ile ortalama hız değişimi, $U_j=16.5$ m/s



Şekil 8.4. $d/D=0.7$ ve Re 20000 için Z^* ile ortalama hız değişimi, $U_j=22.5$ m/s

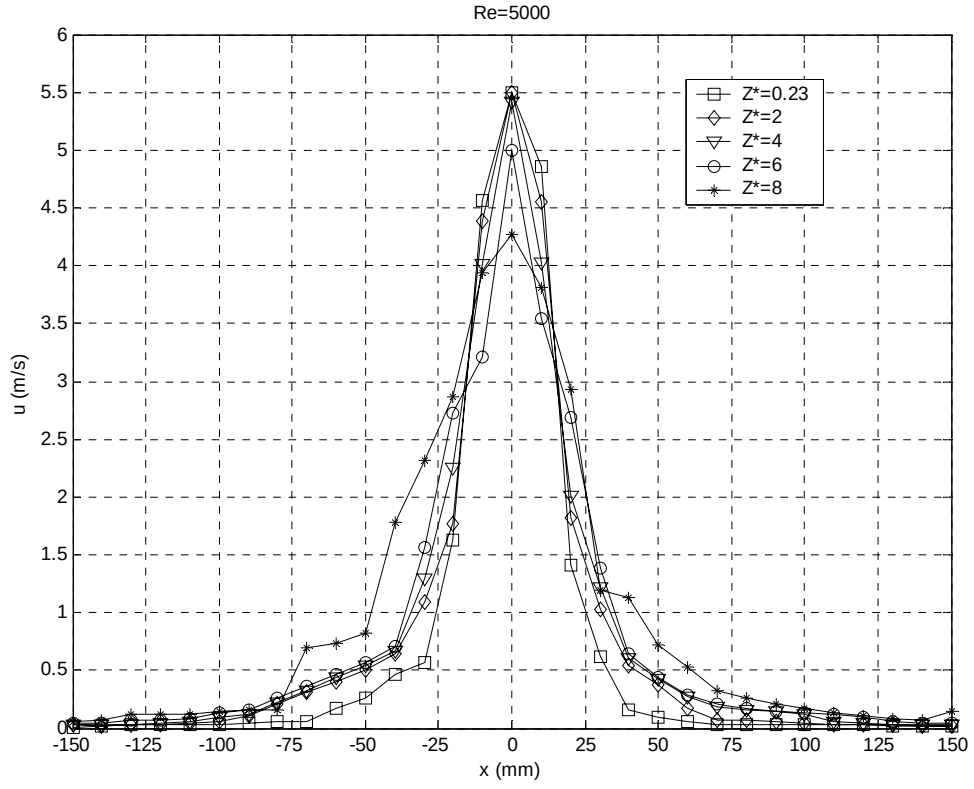
Lüle-levha mesafesinin artması aynı zamanda jetin etki alanını da etkilemiştir. $Z^*=0.23$ 'de jet çıkışından itibaren yüksek hızın etkili olduğu mesafe $X^*=0.362$ 'lerdedir ve bu mesafenin dışına çıkıldıkça hız oranında çok büyük bir düşüş vardır.



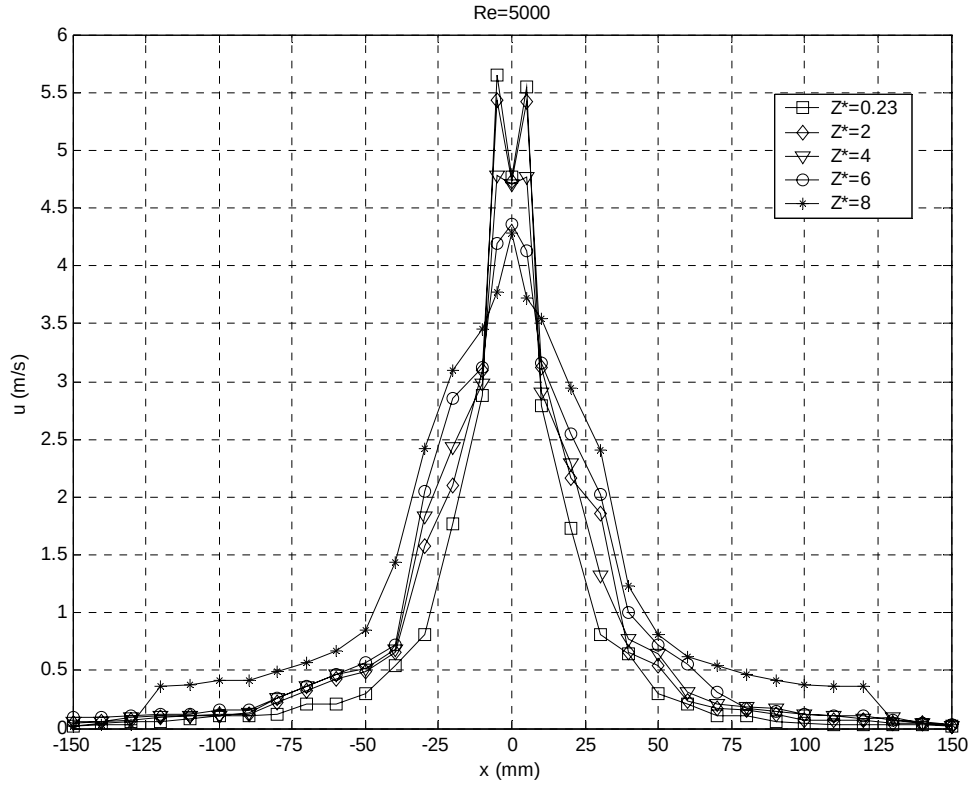
Şekil 8.5. $d/D=0.7$ ve Re 25000 için Z^* ile ortalama hız değişimi, $U_j=27.5$ m/s

Potansiyel çekirdeğin merkez hattı hızının jet çıkış hızının %95'ine kadar düştüğü alan olduğu kabulü hatırlanacak olursa; annular halkada ikincil potansiyel çekirdek mesafesinin $Z^*=2$ ye kadar uzadığı görülür. Birincil çekirdek ise $Z^*=4$ 'e kadar uzamaktadır. Yine jet çıkışında ilk etapta merkezdeki hızdan daha yüksek olan annular jetin $Z^*=4$ 'te tek bir dairesel jet gibi davranmaya başladığı görülüyor. Bunun en önemli nedeni annular halkadaki hızın, merkezi lüleden çıkan jet hızına nazaran büyük olmasıdır. Başka bir deyişle büyük d/D oranları merkezi jetin hızını keserek halkadaki hızın artmasına neden olmaktadır. $X^*=0$ 'da ölçülen hızın merkezi yuvarlağın hızı olduğunu, $X^*=0.362$ 'de ölçülen hızın da annular lülenin hızı olduğunu varsayarsak, hız oranı $\lambda=0.93$ civarındadır.

Eş-eksenli lüleleri kullanmanın düz bir dairesel jet kullanmaya göre avantajı veya dezavantajı var mıdır? Bu sorunun yanıtı Şekil (8.6) ve (8.7) incelenerek verilebilir. Şekil (8.6)'da Re sayısının en küçük değerinde iç çapı 13.8 mm olan düz dairesel tip lülenin, Şekil (8.7)'de $d/D=0.7$ olan eş eksenli bir lülenin ortalama hız profilleri verilmiştir. Özellikle $X^*=0$ 'da yani tam merkezdeki profillere dikkat edilecek olursa; aradaki fark daha net anlaşılacaktır. Düz dairesel lülede merkezde hız maksimumdur ve hızla yavaşlayan bir eğilim gösterir. Oysa $d/D=0.7$ lik lülede merkezde hızın yüksek olduğu alan biraz daha geniştir. Özellikle noktasal çarpma dışında daha geniş bir alan soğutulmak istenildiği zamanlarda bu tür bir jetin tercih edileceği açıktır.



Şekil 8.6. $D=13.8$ mm çaplı düz dairesel lülenin ortalama hız değişimi, $Re=5000$



Şekil 8.7. $d/D=0.7$ çap oranlı eş eksenli lülenin ortalama hız değişimi, $Re=5000$

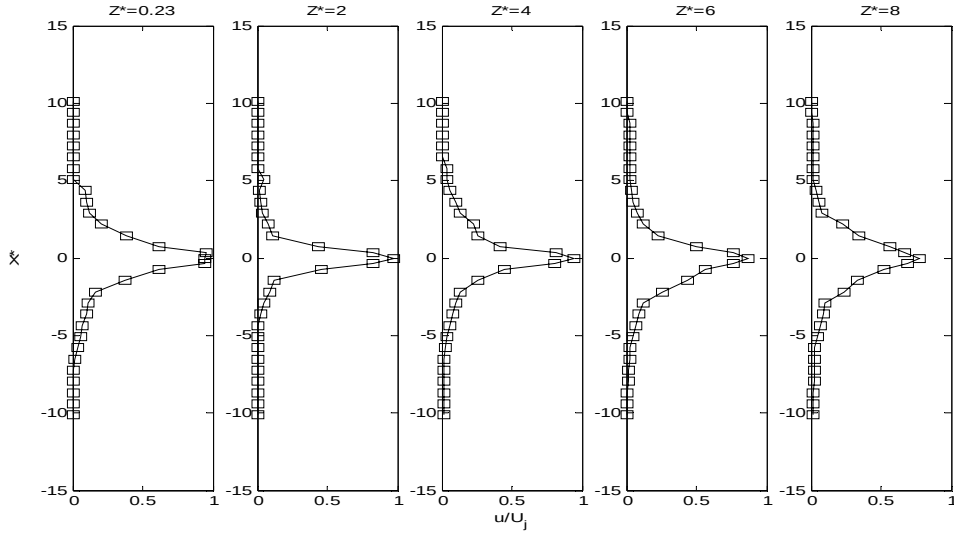
8.1.2. $d/D=0.58$ Çap Oranlı Jet

Lüle çap oranının değiştirilmesi eş eksenli bir jetin hız oranını (λ) doğrudan değiştireceğinden önem arz etmektedir. Çalışmanın test edilen ikinci lüle tipi $d/D=0.58$ çap oranlı eş-eksenli lüledir. Şekil (8.8)-(8.12) arasındaki grafikler, Re sayısının 5000-25000 aralığındaki değerlerinde eksenel mesafelerde hesaplanan ortalama hız değişimlerini göstermektedir.

$d/D=0.7$ 'de aynı Re sayısında merkezin sağ ve solunda annular halkanın karşısında ölçülen değerler merkezdekinden yüksek çıkmış olmasına rağmen, $d/D=0.58$ 'de, merkezdeki değere çok yakın hatta zaman zaman eşit değerlerin çıkmış olması hususu göze çarpıyor ($\lambda \approx 1$).

Tablo 13. $d/D=0.58$, $Re=5000$ için hesaplanan u/U_j değerlerinden bir kesit

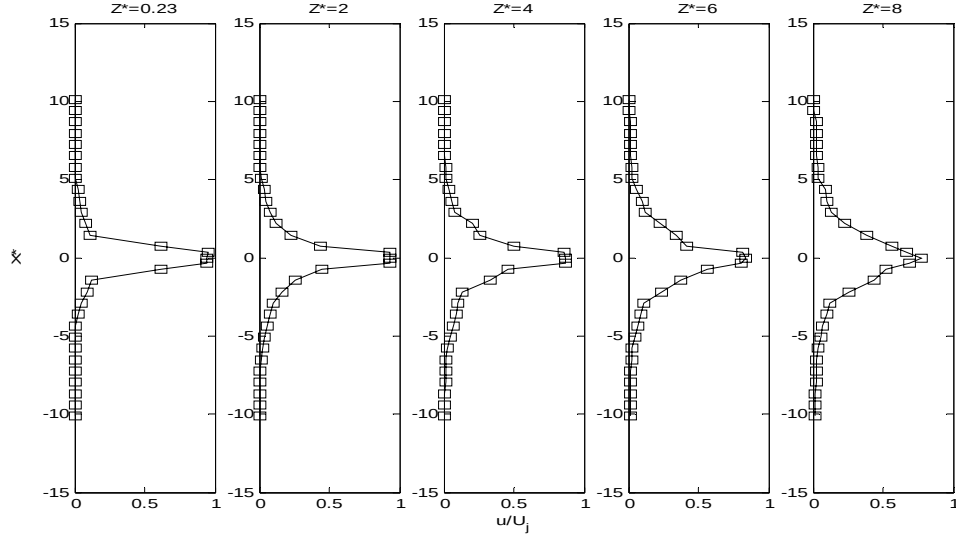
u/U_j					
X^*	$Z^*=0.23$	$Z^*=2$	$Z^*=4$	$Z^*=6$	$Z^*=8$
-0.724	0.442158	0.453079	0.517752	0.562885	0.619048
-0.362	0.98909	0.9829855	0.863509	0.809091	0.686436
0	0.984745	0.983018	0.955576	0.837994	0.778097
0.362	0.987776	0.98406	0.859436	0.812642	0.671818
0.724	0.417485	0.437588	0.499048	0.562564	0.619745



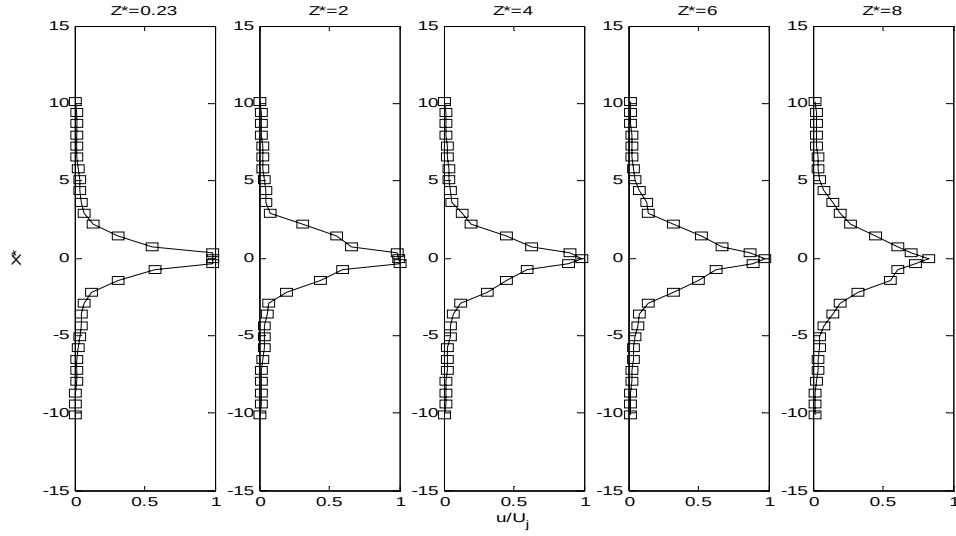
Şekil 8.8. $d/D=0.58$ ve $Re 5000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=5.5$ m/s

Re sayısının 5000 değerinde jet çıkışından uzaklaştıkça merkez hattı hızında düşüş ölçülmüştür. $Z^*=0.23$ 'den $Z^*=2$ 'ye kadarki mesafede merkez hattında ortalama hız %0.17 oranında düşüş göstermiştir. $Z^*=0.23$ 'den $Z^*=4$ 'e kadarki mesafede ise %2.96 oranında düşüş söz konusudur. $Z^*=0.23$ ile $Z^*=6$ arasındaki azalma oranı artarak %14.9'a çıkmıştır. En uzak

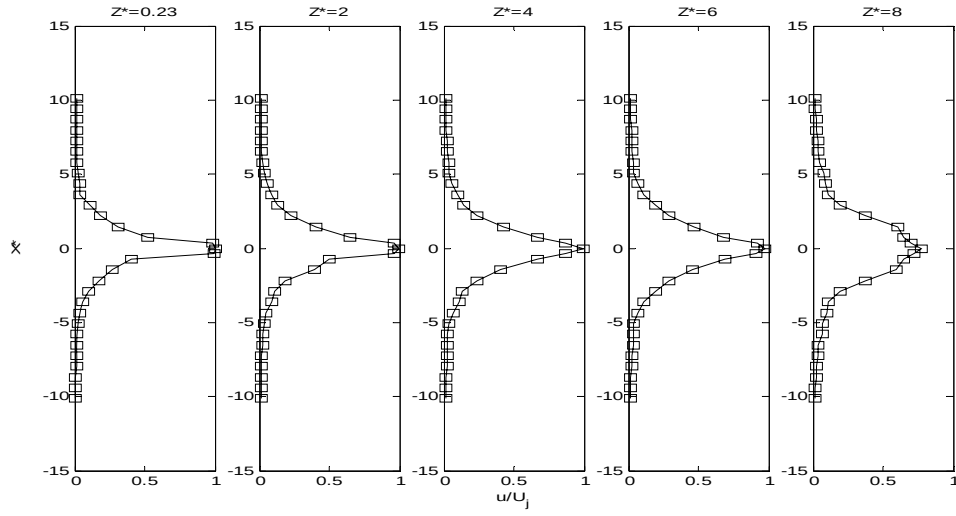
eksenel mesafede $Z^*=8$ 'de $Z^*=0.23$ 'e göre %20.66 oranında bir düşüş görülmektedir. Bu azalma oranları aynı zamanda potansiyel çekirdeğin uzunluğu hakkında da bilgi vermektedir.



Şekil 8.9. $d/D=0.58$ ve Re 10000 için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=11.35$ m/s

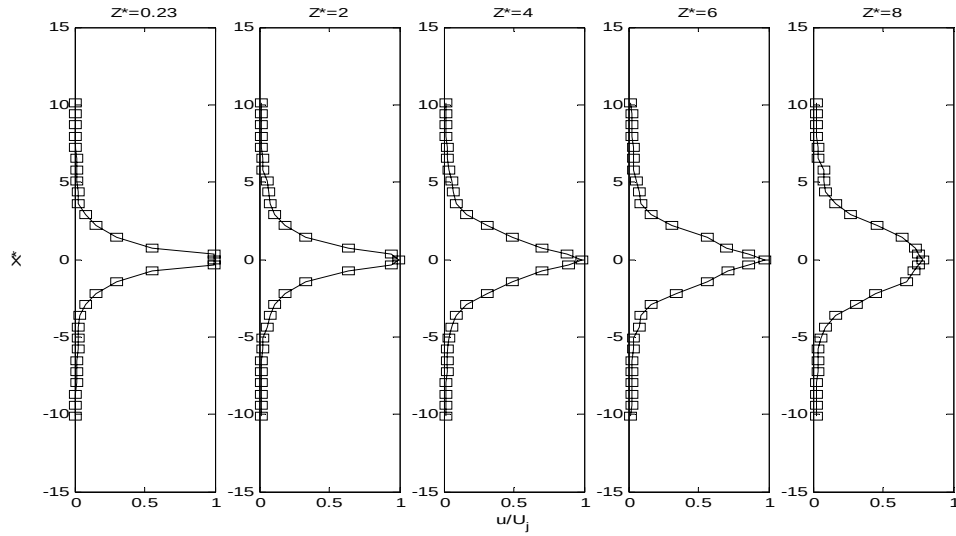


Şekil 8.10. $d/D=0.58$ ve Re 15000 için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=16.5$ m/s



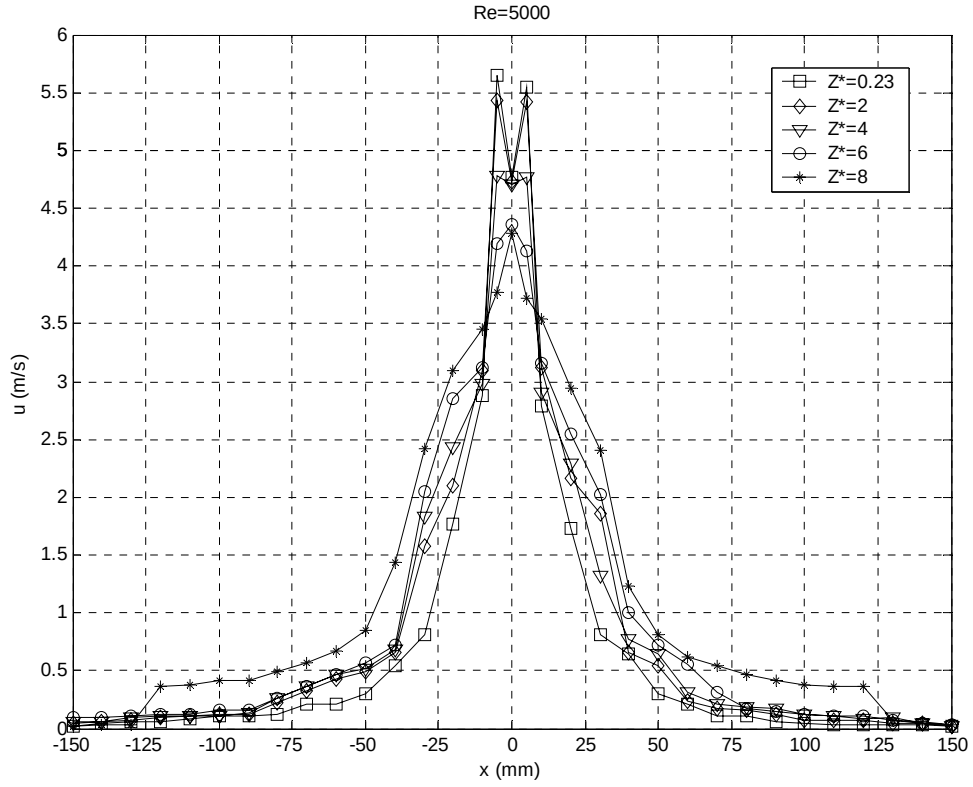
Şekil 8.11. $d/D=0.58$ ve Re 20000 için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=22.5$ m/s

Şekil (8.9)-(8.12) arasındaki hız profilleri Şekil (8.8)'da görülen profile benzer özellikler taşımaktadır. Bu jet tipindeki hemen hemen tüm Re sayılarında jetin etki mesafesinin $d/D=0.7$ 'ye göre bir miktar arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 8.12. $d/D=0.58$ ve Re 25000 için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=27.5$ m/s

Şekil (8.13)'de tüm eksenel mesafeler tek bir grafikte gösterilerek, $d/D=0.58$ çap oranlı eş eksenli lümenin ortalama hız değişimi verilmiştir. Bu grafikte Şekil (8.7) kıyaslanarak düz dairesel lüle tipiyle $d/D=0.58$ çaplı eş-eksenli lüle tipi arasındaki farklar görülebilir.



Şekil 8.13. $d/D=0.58$ çap oranlı eş eksenli lülenin ortalama hız değişimi, $Re=5000$

Bu jet tipinde hız oranının yaklaşık $\lambda=1$ çıkması sanki düz dairesel lüle gibi bir özellik göstermesine neden olmuştur. Akım tiplerinde farklılık, daha ziyade yakın Z^* mesafelerinde görülmüştür. Jetten uzaklaştıkça akım tamamen tek jet gibi davranmıştır.

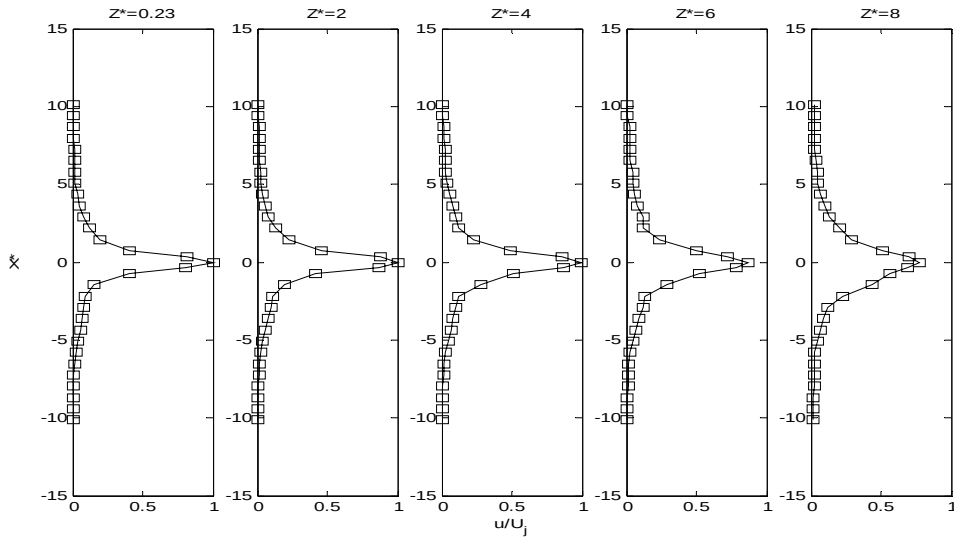
8.1.3. $d/D=0.45$ Çap Oranlı Jet

Deneylerde test edilen son eş-eksenli lüle tipi $d/D=0.45$ çap oranlı lüledir. Şekil (8.14)-(8.18) arasında, test edilen tüm Re sayısı değerlerindeki ortalama hız değişimleri verilmiştir. Daha önceki değerlendirmelerde olduğu gibi, burada da Re sayısının 5000 değerindeki değişimler incelenerek genel kanıya varılacaktır. Evvela jet merkezinden çıkıştan itibaren yuvarlak jette ve annular halkalarda ölçülen hız değerlerinin nasıl bir değişim gösterdiğini anlamak için hesaplanan değerlerden birkaçını görmek gerekir.

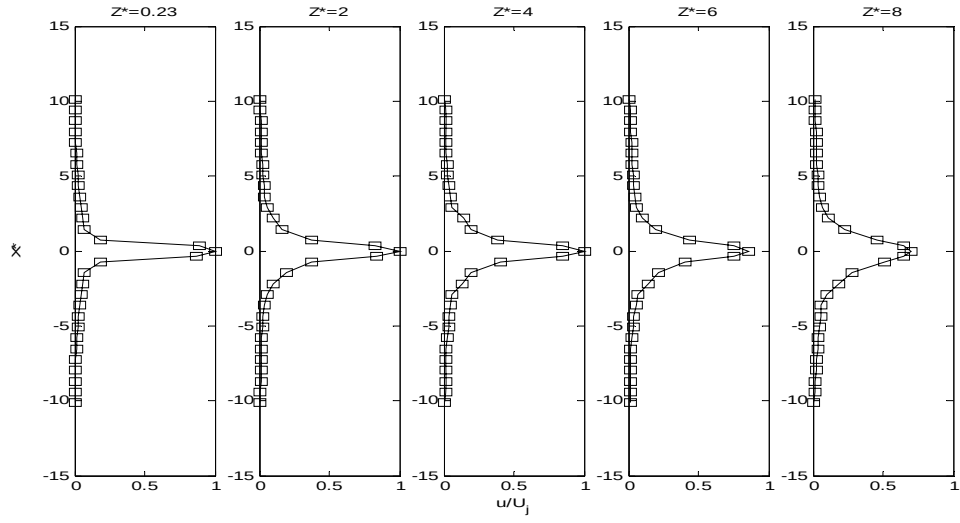
Tablo 14. $d/D=0.45$, $Re=5000$ için hesaplanan u/U_j değerlerinden bir kesit

u/U_j					
X^*	$Z^*=0$	$Z^*=2$	$Z^*=4$	$Z^*=6$	$Z^*=8$
-0.724	0.409588	0.411085	0.509994	0.517752	0.562885
-0.362	0.801297	0.824485	0.863509	0.79891	0.70436
0	0.99898	0.987555	0.976364	0.865576	0.778097
0.362	0.813394	0.83091	0.859436	0.796333	0.702182
0.724	0.406624	0.462564	0.487582	0.499048	0.513552

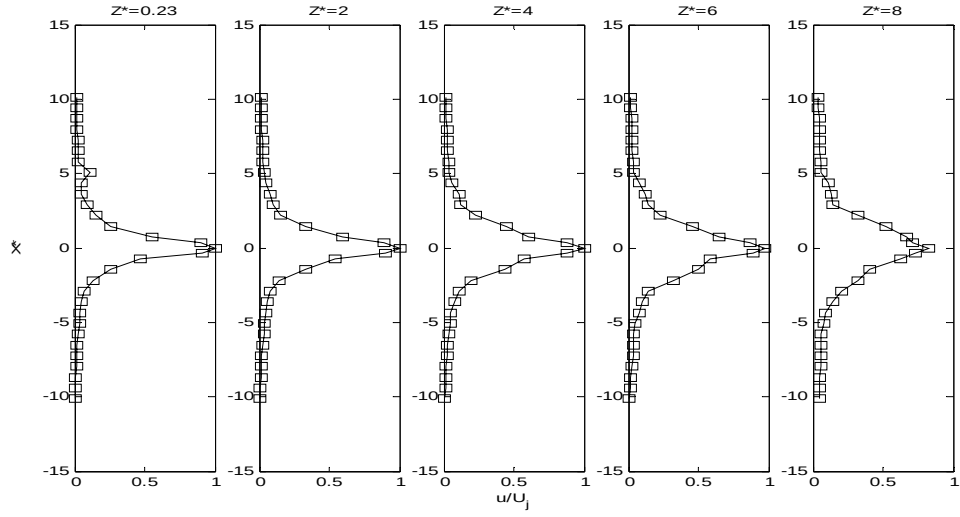
Görüldüğü gibi annular boşluktaki boyutsuz hız değeri merkezdekine göre ciddi bir düşüş göstermiştir ($\lambda=1.246$). Eksenel mesafenin artışıyla birlikte hız da görülen azalmalara gelince $Z^*=0.23$ 'den $Z^*=2$ 'ye doğru uzayınca merkez hattı hızında %1.14, $Z^*=4$ 'e kadar uzunlukta %2.26, $Z^*=6$ 'ya kadarki mesafede %13.35 ve $Z^*=8$ 'e kadar %22.01 oranında bir düşüş gerçekleşmiştir. Burada potansiyel çekirdek bölgesini içteki merkezi yuvarlak jetin oluşturduğunu söyleyebiliriz. Bu bölgenin uzunluğu ise diğer çalışmalarda olduğu gibi $L_{pc}=4d$ kadardır.



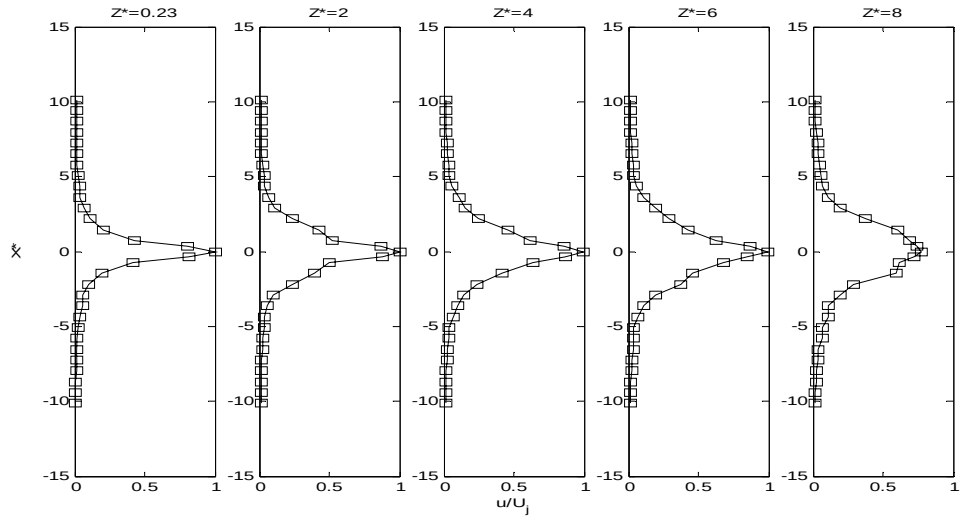
Şekil 8.14. $d/D=0.45$ ve Re 5000 için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=5.5$ m/s



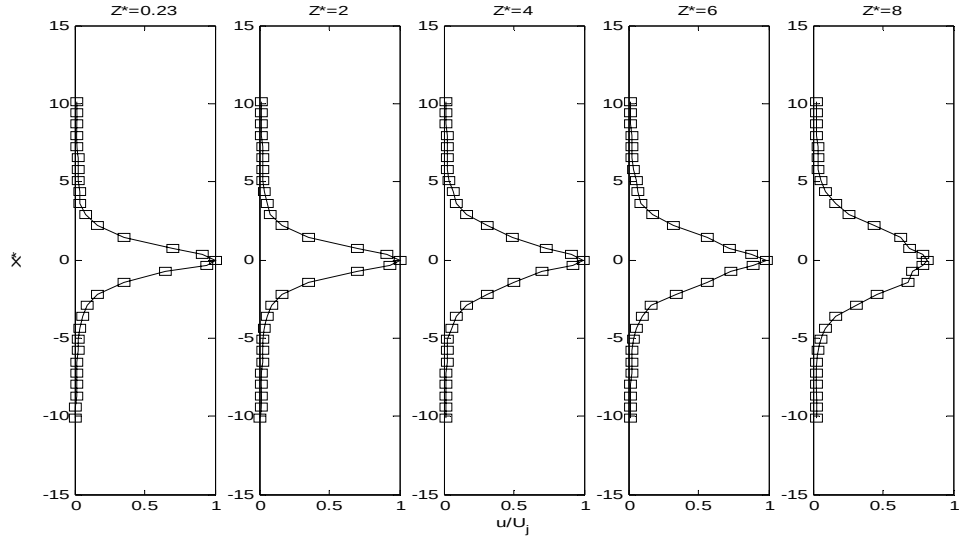
Şekil 8.15. $d/D=0.45$ ve Re 10000 için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=11.35$ m/s



Şekil 8.16. $d/D=0.45$ ve Re 15000 için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=16.5$ m/s

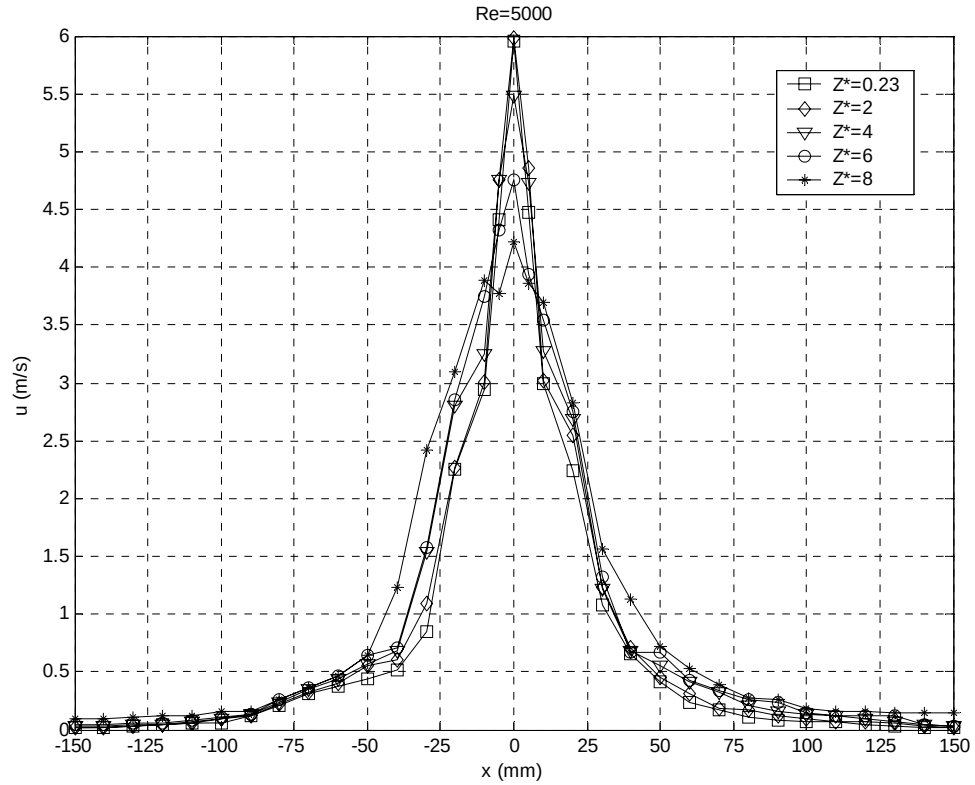


Şekil 8.17. $d/D=0.45$ ve Re 20000 için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=22.5$ m/s

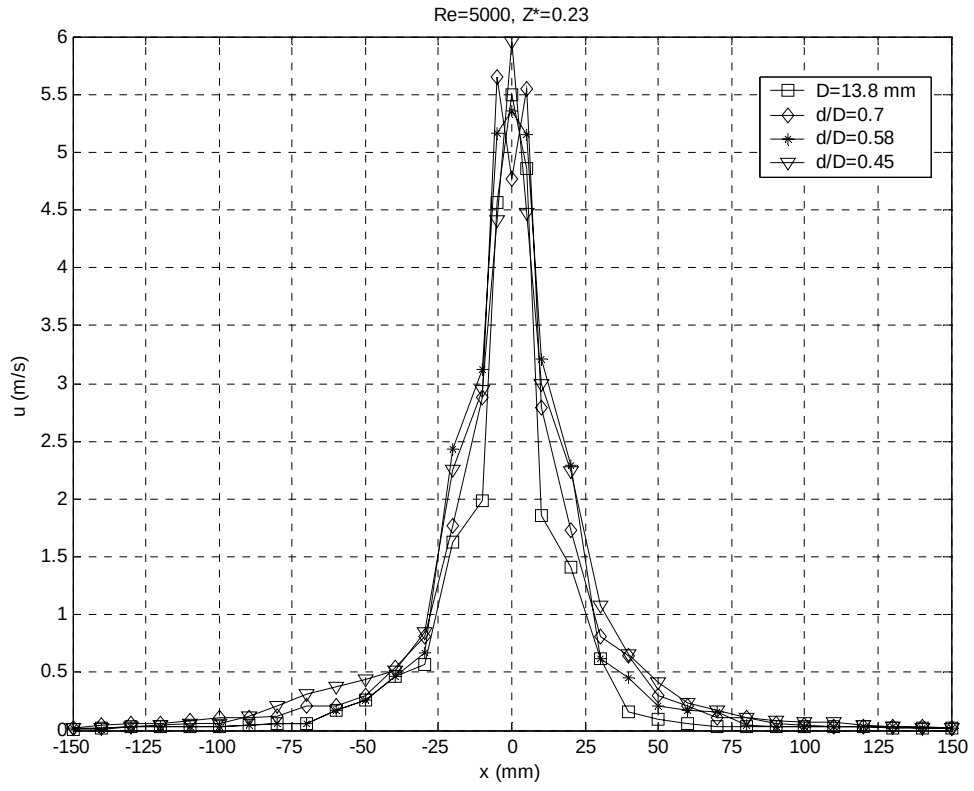


Şekil 8.18. $d/D=0.45$ ve $Re=25000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=27.5$ m/s

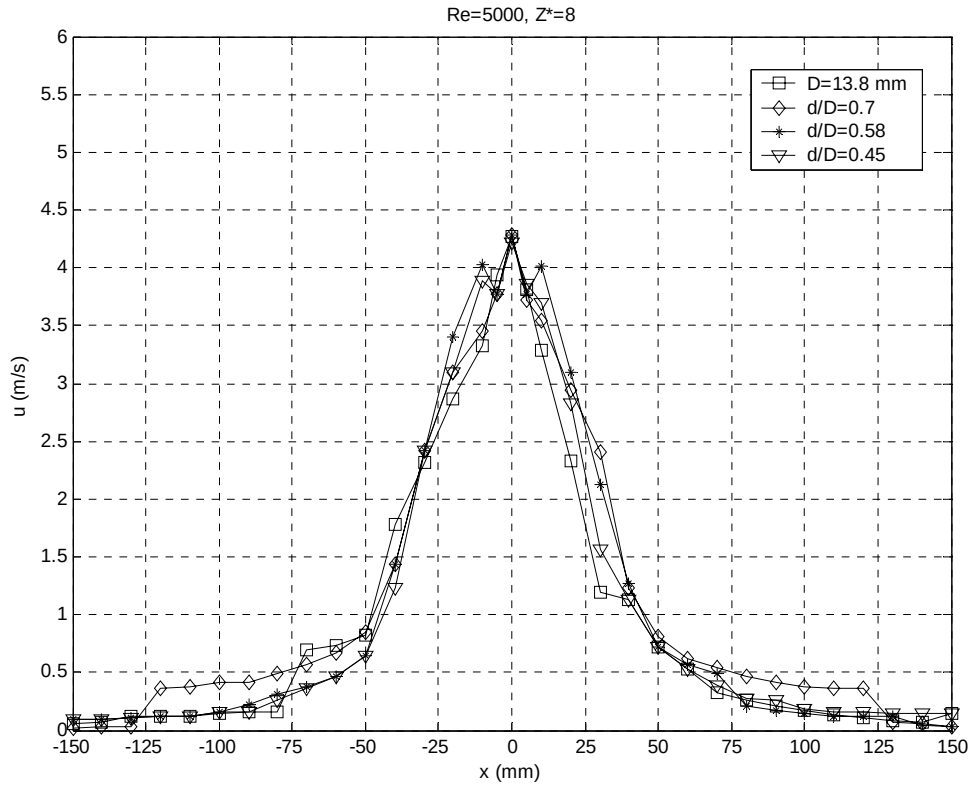
Görüldüğü gibi bu çap oranının en belirgin özelliği merkezi yuvarlaktaki jet hızının annular halkadaki jet hızına oranla artma göstermesidir. Çap oranının düşmesi, yani içteki lülenin dıştaki lüleye nazaran daha küçük çapta olması içteki akımın yüksek hızlı olmasına neden olmuştur. Böylece uca doğru sivrilen bir hız profili görüntüsü çıkmıştır (Şekil 8.19).



Şekil 8.19. $d/D=0.45$ çap oranlı eş eksenli lülenin ortalama hız değişimi, $Re=5000$



Şekil 8.20. Eksenel lülelerle düz dairesel lülenin kıyaslanması, $Re=5000, Z^*=0.23$



Şekil 8.21. Eksenel lülelerle düz dairesel lülenin kıyaslanması, $Re=5000, Z^*=8$

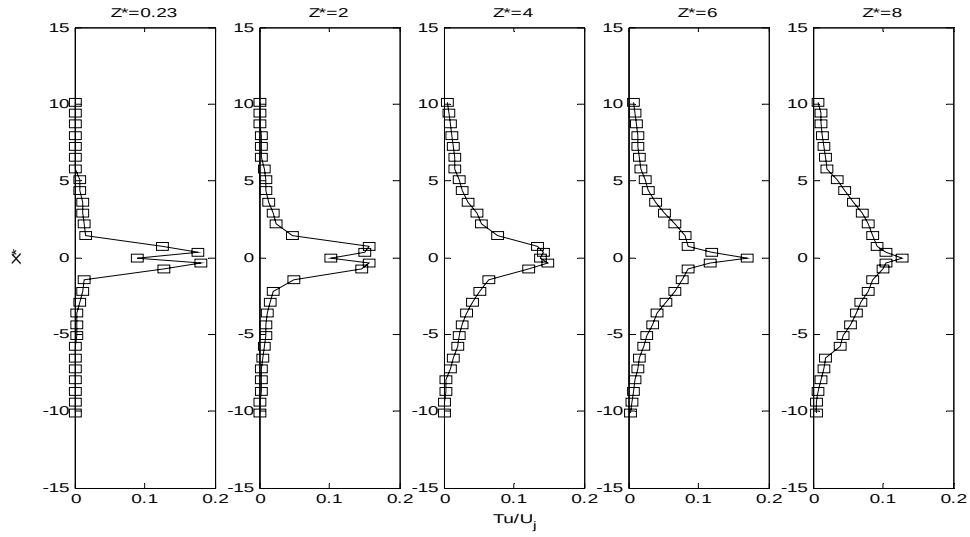
Şu ana kadar ortalama hız değerleri verilen üç jet tipinin birbirleriyle ve düz dairesel lüleyle kıyaslanmasını, en yakın ve en uzak jet çıkış mesafelerine göre tek bir Re sayısında veren grafikler Şekil (8.20) ve (8.21)'dedir. Hız değerleri ve ölçüm noktaları boyutsuzlaştırılmadan birimleriyle birlikte verilerek aynı ölçüm noktasındaki birebir hız değişimi gösterilmiştir.

8.2. Türbülans Şiddeti Ölçümleri

Çalışmanın bu bölümünde X^* eksen boyunca çeşitli Z^* eksenel mesafelerinde ölçülen türbülans şiddeti değerleri yer almaktadır. Lüle çıkışında tek bir kesit olması yerine iki ayrı jet çıkışı olması başlı başına türbülans şiddetini artırıcı bir etken olmuştur. Özellikle jet çıkışındaki yakın alanda geri dönen akımların oluşu, annular halkadan çıkan jet akımıyla merkezi yuvarlak jet akımının karışmasından doğan türbülans farkı ısı transferi deneylerinden de hatırlanacağı üzere çarpan jetin etkisini arttırmıştır. Çalışmada hesaplanan türbülans değerleri hemen hemen tüm çalışmada düz dairesel lüleye nispeten artış göstermiştir. Artışın en fazla ve etkili olduğu alan jet çıkışı ve yakın çevresidir. Düz dairesel lülelerle yapılan serbest jet akımı deneylerinde karşımıza çıkan ikincil pik değerler bu tip jetlerde daha bariz bir farkla ortaya çıkmıştır.

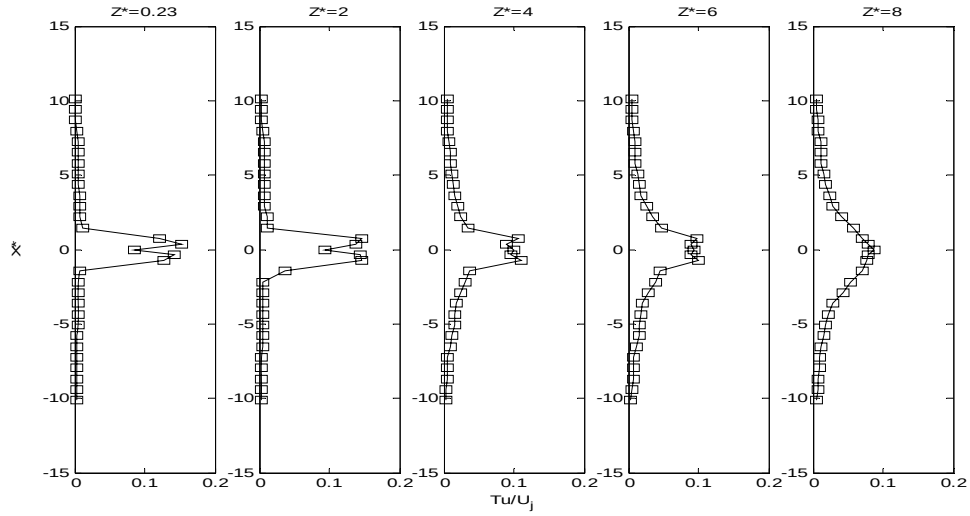
8.2.1. $d/D=0.7$ Lüle Tipi için Türbülans Şiddeti Hesaplamaları

$d/D=0.7$ lüle tipi için ($\lambda=0.93$) jet çıkışına en yakın mesafede hesaplanan boyutsuz türbülans şiddeti değeri maksimumdur. $Z^*=0.23$ 'de ve $X^*=0.362$ 'de hesaplanan değer, hemen hemen annular halkanın tam karşısında ölçülen değer mahiyetindedir ve bu değer merkeze göre arttığı görülmüştür. $Z^*=2$ 'de ve $Z^*=4$ 'de maksimum türbülansın etkili olduğu bölgenin genişlediği görülmektedir.



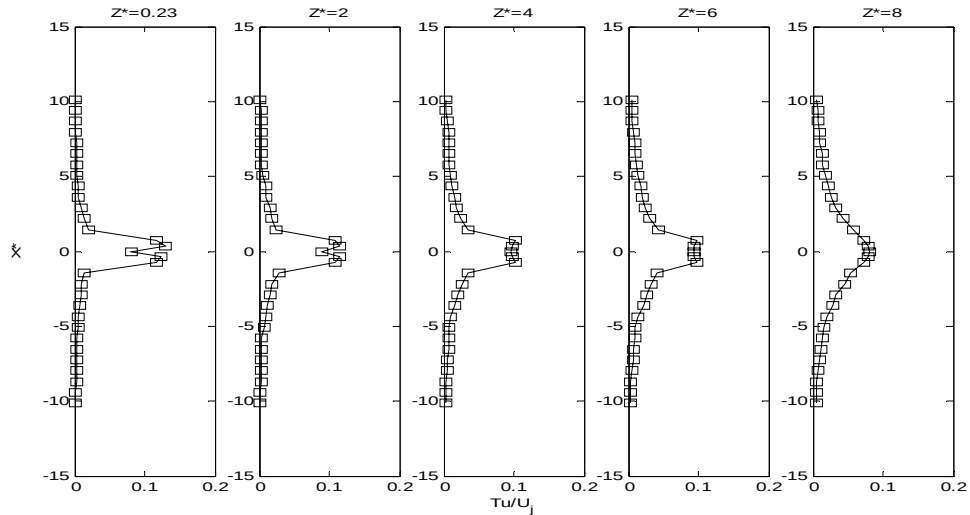
Şekil 8.22. $d/D=0.7$ ve Re 5000 için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=5.5$ m/s

Şekil (8.22)-(8.26) arasındaki grafikler Re sayısının beş ayrı değerindeki bu türbülans şiddeti değişimlerini vermektedir. Grafiklerde çizilen türbülans eğrileri genel olarak büyük bir sapma göstermeyerek, benzer eğilimler göstermiştir. Jetin ağzına yakın mesafelerde boyutsuz türbülans şiddeti değeri yüksek çıktığı gibi oluşan pik değer farkı da önemlidir. $Z^*=0.23$ 'de $X^*=0$ 'da hesaplanan $Tu/U_j=0.089$ iken $X^*=0.362$ 'de $Tu/U_j=0.1798$, $X^*=0.72$ 'de $Tu/U_j=0.1279$ hesaplanmıştır. X^* ifadesinin x/d boyutsuzlaştırılması olduğunu düşünürsek; jetin merkezinde orijinden 10 mm sonra bir pik değer oluştuğu görülüyor. Şimdi literatür araştırması kısmındaki bilgilere geri dönelim: Gardon ve Carbonpue'nun [16] “*düşük Re sayılarında durma noktasından itibaren $0.5d$, $1.4d$ ve $2.5d$ mesafelerinde üç maksimum nokta görülebileceğini*” iddia ettikleri vurgulanmıştı. İlaveten, Gardon ve Akfırat [8], “ *$1 \leq (x/d) \leq 2$ aralığında ısı transferinde oluşan artışın laminardan türbülanslı sınır tabaka akışına geçişle açıklanabileceğini*”i savundukları belirtilmişti. Bu bilgiler ışığında, oluşan pik değerlerin dairesel bir jette oluşan pik değerlerine oldukça yakın olduğunu gözlemliyoruz.



Şekil 8.23. $d/D=0.7$ ve Re 10000 için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=11.35$ m/s

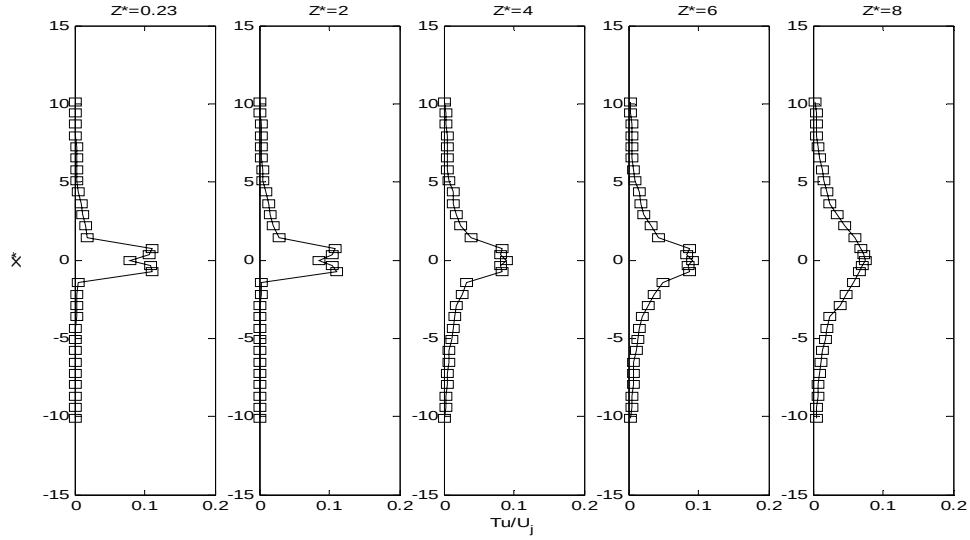
Sırtı çukur (saddle-backed) profil adı verilen bu tür ikincil üçüncül piklerin oluştuğu jet profillerinde, piklerin merkez hattından itibaren hangi mesafeye kadar oluştuğu da önemli bir durumdur. Bu çalışmada Re sayısının 5000-15000 aralığındaki değerlerinde sırtı çukur türbülans profilinin $Z^*=6$ 'ya kadar oluştuğu izleniyor. $Re=20000$ ila 25000'de $Z^*=6$ 'da biraz daha çan eğrisi profilinin oluşumu gerçekleşiyor. $Z^*=8$ 'de ise eğri tamamen sırtı yassı çan eğrisi profiline dönüşüyor.



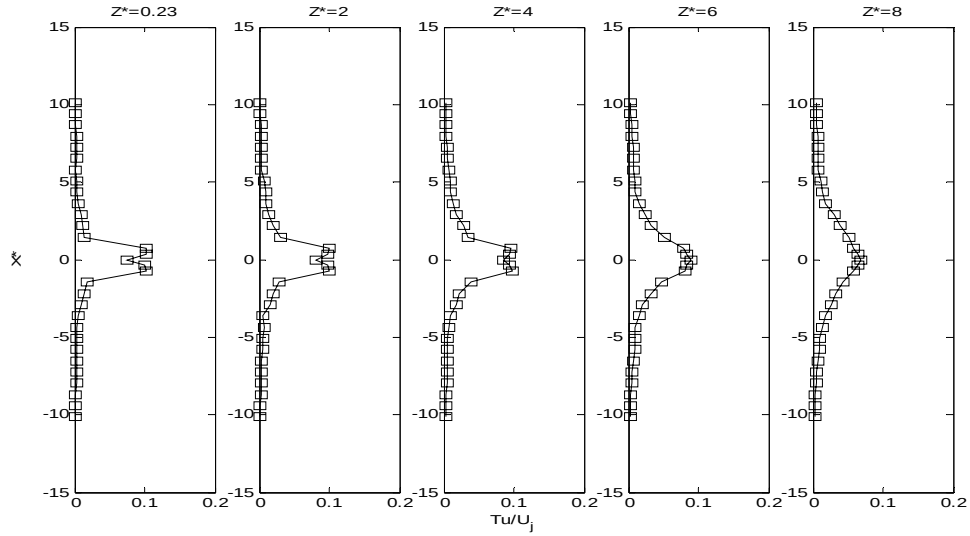
Şekil 8.24. $d/D=0.7$ ve Re 15000 için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=16.5$ m/s

Dairesel jetlerin hemen hemen tüm lüle çaplarında eksenel mesafenin artmasıyla birlikte önce bir müddet türbülans şiddetinin arttığı daha sonra hafif bir eğilimle azalma gösterdiği görülmüştür. Düz dairesel lülelerde artış noktası $Z^*=6$ 'ya kadar olan mesafe olarak tespit

edilmiştir. Eş eksenli jetlerle yapılan deneyler incelendiğinde, bu mesafenin biraz daha kısaldığı görülüyor. $d/D=0.7$, 0.58 ve 0.45 lik üç tip jette de artış $Z^*=4-6$ arasındaki alana kadar devam ediyor. Genelde $Z^*=8$ mesafesi düşüşün başlangıç mesafesi olarak ölçülmüştür.

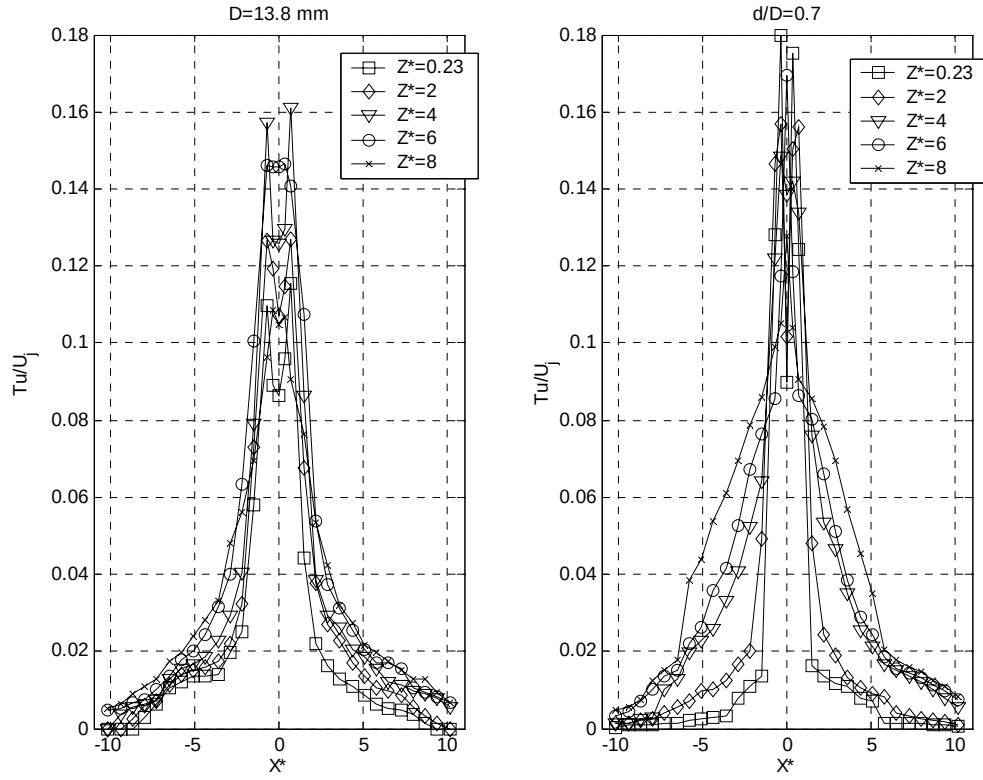


Şekil 8.25. $d/D=0.7$ ve Re 20000 için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=22.5$ m/s



Şekil 8.26. $d/D=0.7$ ve Re 25000 için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=27.5$ m/s

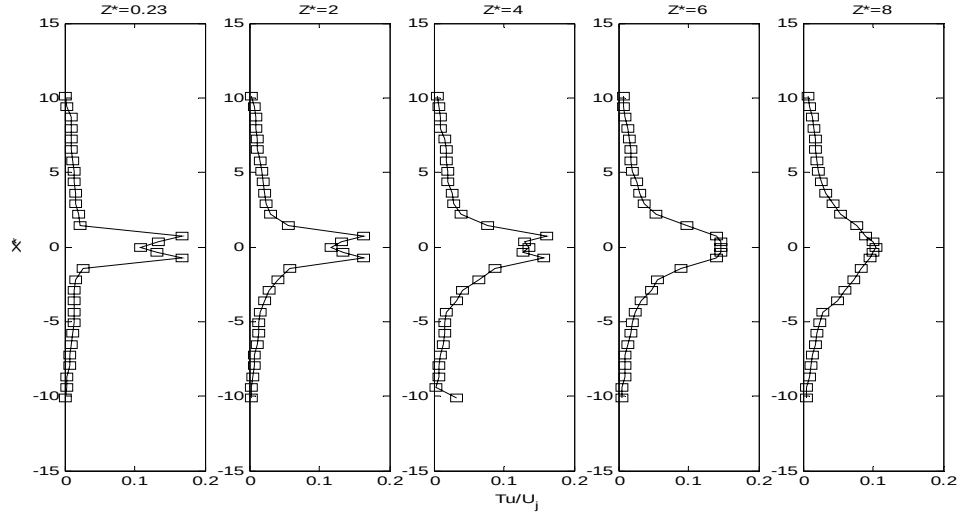
$d/D=0.7$ çap oranlı jetin kullanımı düz bir dairesel lüleye nazaran ölçüm alınan tüm noktalarda türbülansın belli oranlarda artmasına neden olmuştur. Şekil (8.27)'de de görüldüğü gibi türbülansın yüksek oranlarda arttığı alan daha ziyade jetin çıkışının yakın çevresidir.



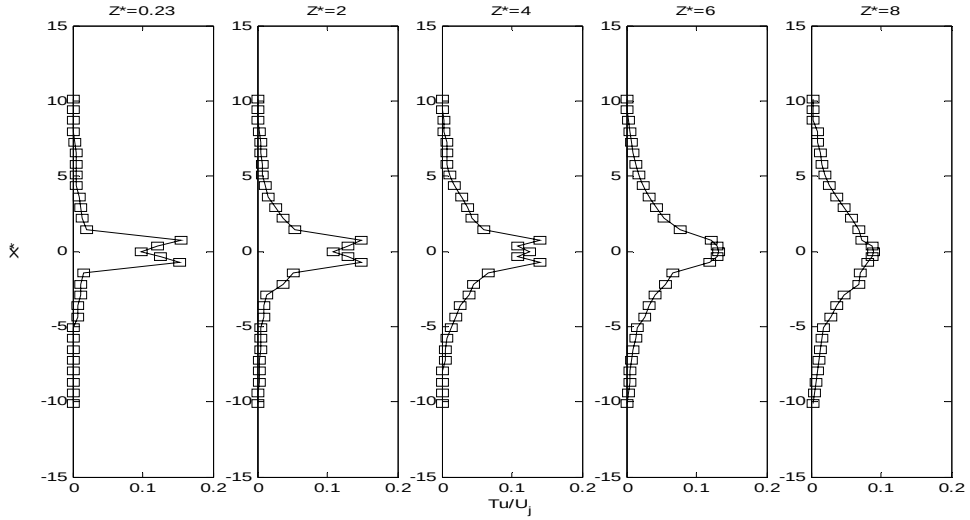
Şekil 8.27. $d/D=0.7$ ile $D=13.8$ mm'lik lüle tiplerinin kıyaslanması, $Re=5000$, $Z^*=0.23$

8.2.2.d/D=0.58 Lüle Tipi için Türbülans Şiddeti Hesaplamaları

d/D 'nin 0.58 gibi bir rakam olması, yani iç –dış jet kesitlerinin neredeyse yarı yarıya bir oranda olması hız oranı λ 'yı 1'e yaklaştırmıştır. Bu da jet çıkışındaki yakın alanda piklerin bir nebze de olsa sönümlemesine neden olmuştur. Şekil (8.28)-(8.32) arasındaki grafiklerin geneli incelenecek olursa merkezin yakın çevresinde ($X^*=0.632$ ve $X^*=0.72$ 'de) oluşan türbülans sıçramaları $d/D=0.7$ 'ye göre daha düşük çıkmıştır.

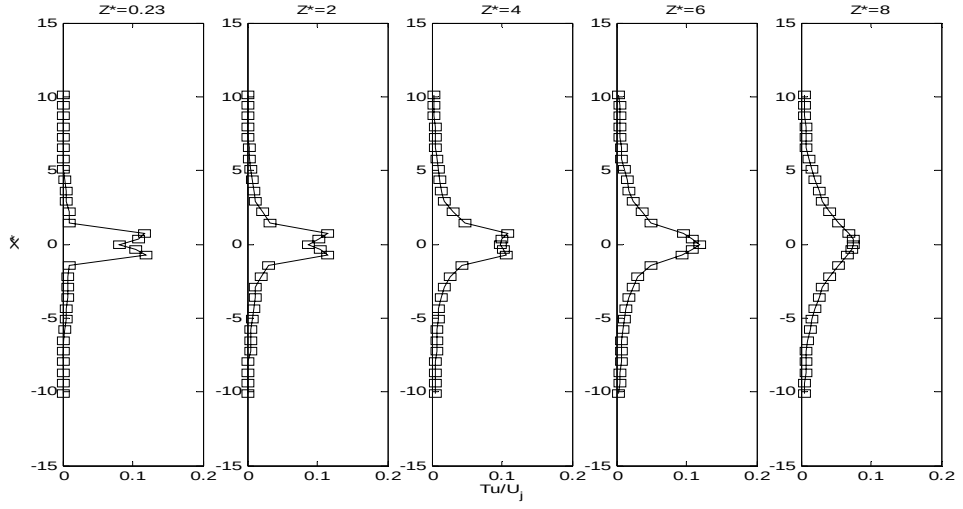


Şekil 8.28. $d/D=0.58$ ve Re 5000 için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi, $U_j=5.5$ m/s

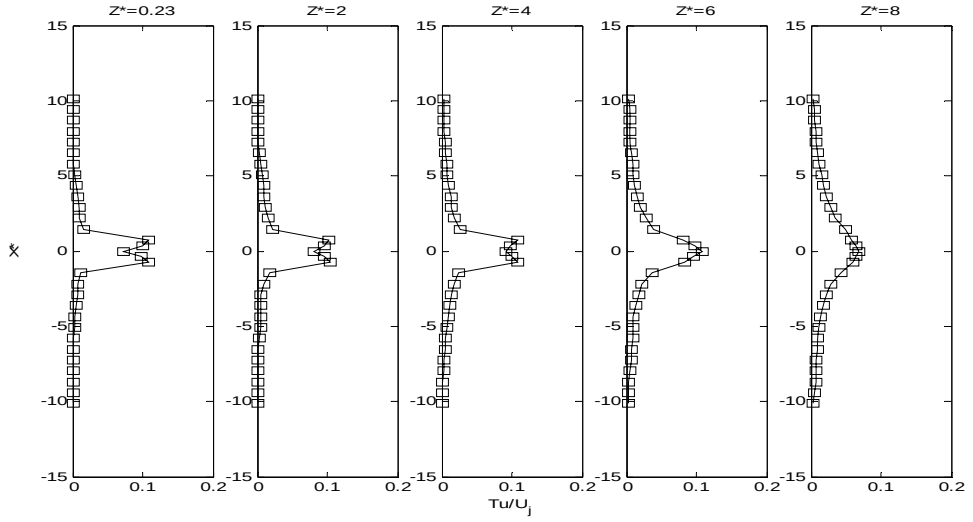


Şekil 8.29. $d/D=0.58$ ve Re 10000 için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi, $U_j=11.35$ m/s

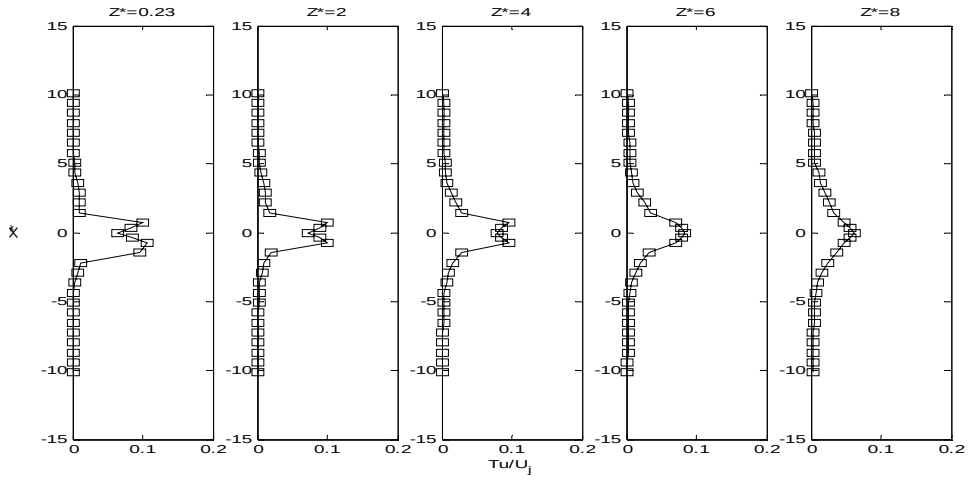
Grafiklerde gözlemlenen bir diğer husus ise piklerin oluşma mesafesinin artık $Z^*=6$ 'ya kadar ulaşmadığıdır. Genelde sırtı çukur profil, $Z^*=4$ 'e kadarlık bir alanda etkin olarak görülmüştür. Ortalama hız değişimlerinde olduğu gibi türbülans şiddeti hesaplamalarında da çap oranını azaltmak lüle çıkışında ölçülen değerleri birbirine yaklaştırmıştır.



Şekil 8.30. $d/D=0.58$ ve Re 15000 için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi, $U_j=16.5$ m/s



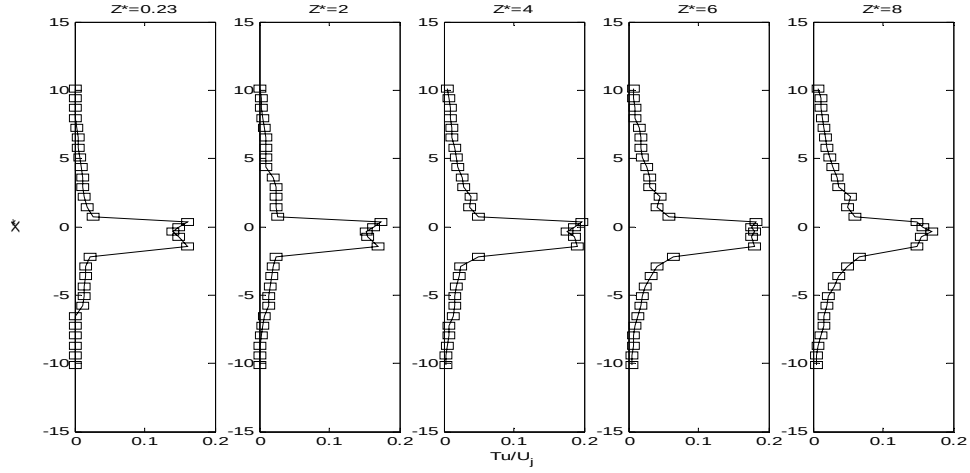
Şekil 8.31. $d/D=0.58$ ve Re 20000 için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi, $U_j=22.5$ m/s



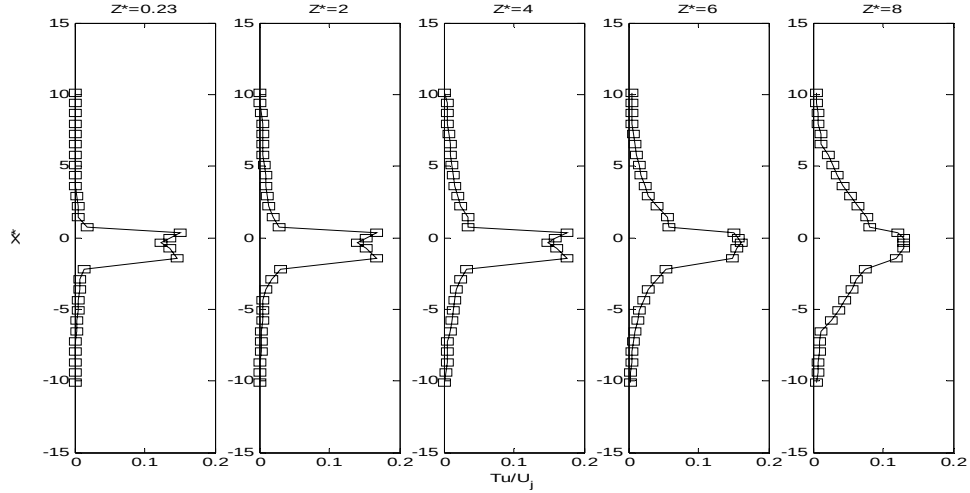
Şekil 8.32. $d/D=0.58$ ve Re 25000 için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi, $U_j=27.5$ m/s

8.2.3. $d/D=0.45$ Lüle Tipi için Türbülans Şiddeti Hesaplamaları

İç/dış lüle çap oranlarının en düşüğü olan $d/D=0.45$ ’ yani $\lambda=0.93$ ’de türbülans değerleri özellikle merkezi yuvarlak jet çıkışında sıçrama yapmıştır. Şekil (8.33)-(8.37) arasındaki grafiklerin genelinde merkezdeki ($X^*=0$) türbülans şiddeti değerinde artış görülmüştür.

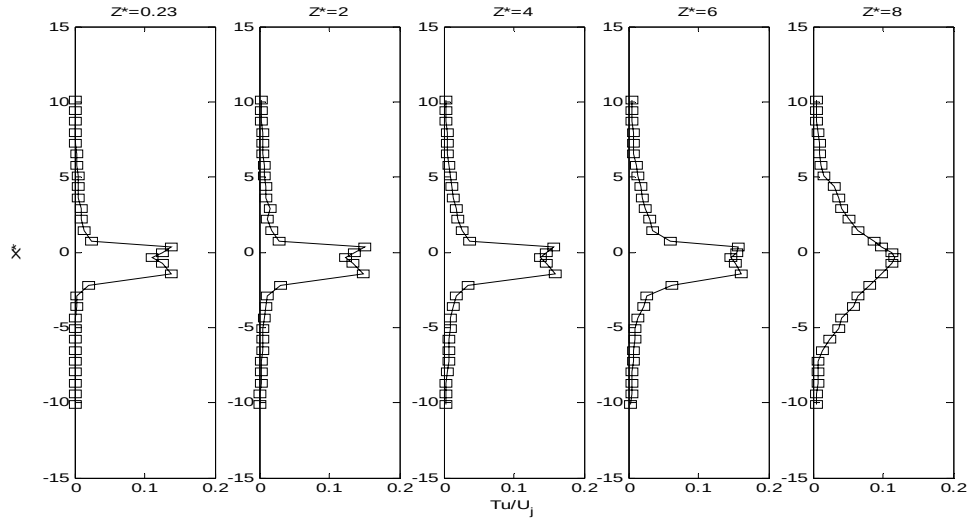


Şekil 8.33. $d/D=0.45$ ve Re 5000 için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi, $U_j=5.5$ m/s

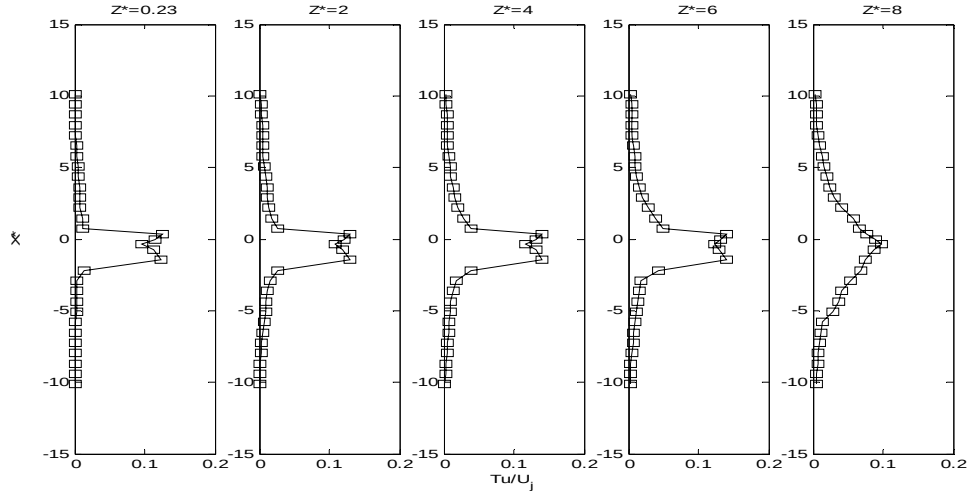


Şekil 8.34. $d/D=0.45$ ve Re 10000 için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi, $U_j=11.35$ m/s

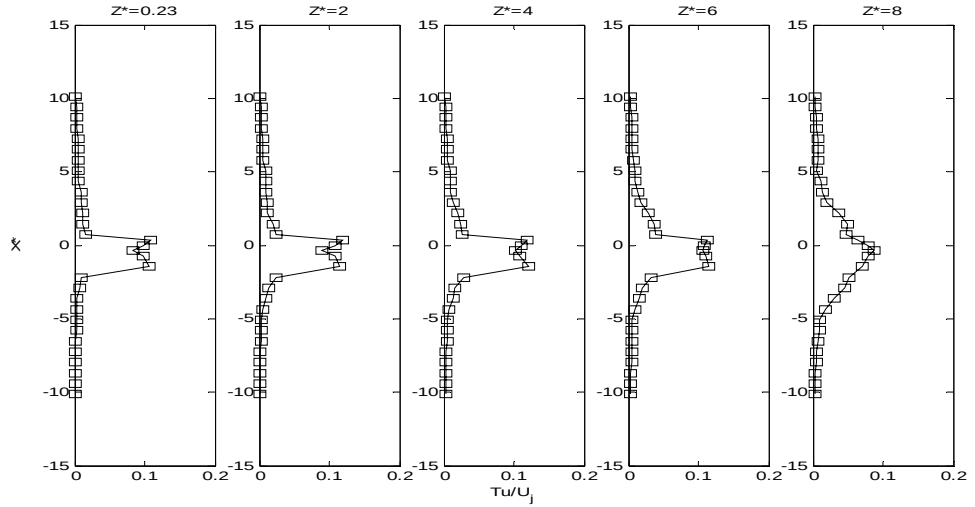
Bu lüle tipinde sırtı çukur profillerin $Z^*=4$ ’e kadar oluştuğunu görüyoruz. Ayrıca genel olarak tüm profillerde merkezden yanlara doğru gidildikçe düşüşün hızlandığını tespit ediyoruz. Yine bu jet tipinde de eksenel mesafe (Z^*) artıkça türbülans değerinin düştüğünü gözlemleyebiliyoruz. Özellikle $Z^*=8$ ’de jetin tek bir dairesel jet karakteri gösterdiği de göze çarpan noktalar arasında.



Şekil 8.35. $d/D=0.45$ ve Re 15000 için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi, $U_j=16.5$ m/s

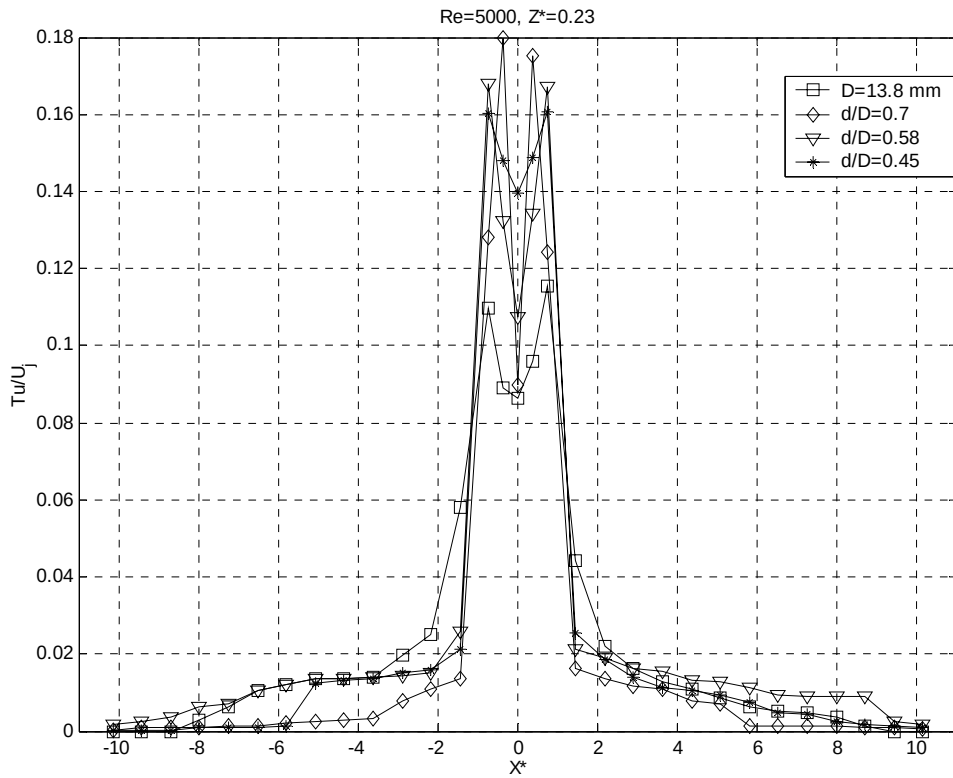


Şekil 8.36. $d/D=0.45$ ve Re 20000 için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi, $U_j=22.5$ m/s



Şekil 8.37. $d/D=0.45$ ve Re 25000 için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi, $U_j=27.5$ m/s

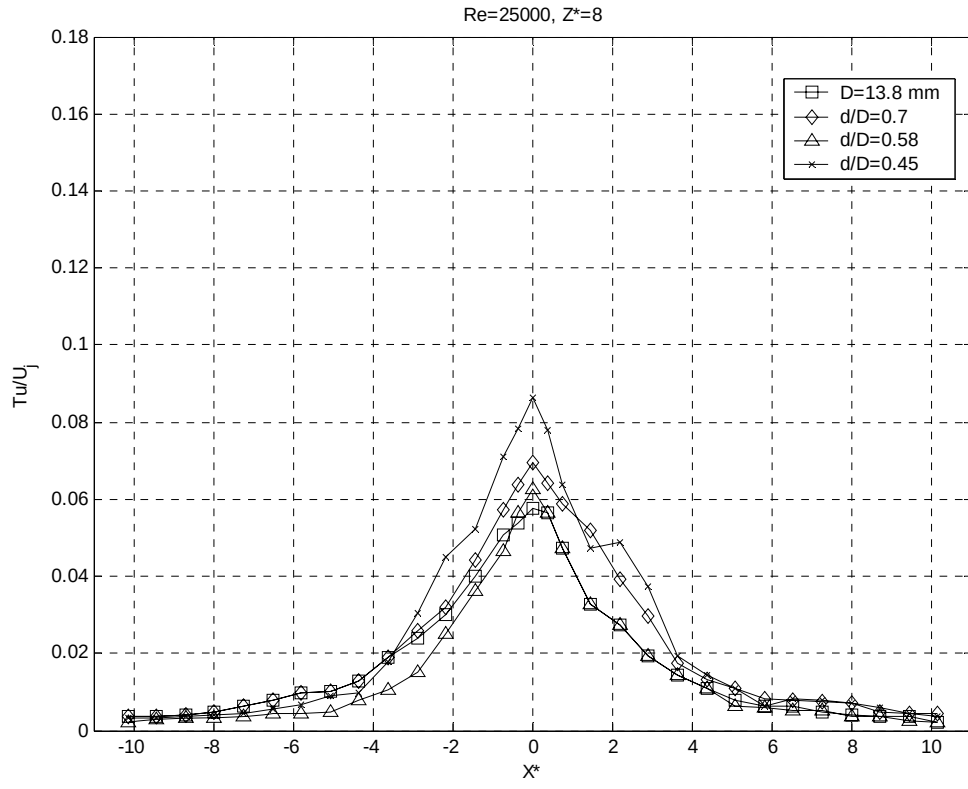
$d/D=0.45$ 'teki türbülans şiddeti ölçümlerinin mahiyetini daha iyi anlayabilmek için diğer iki çap oranıyla birlikte gösteren grafikleri incelemek daha faydalı olacaktır. Şekil (8.38)'de bu tür bir grafik verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi en yüksek türbülans pik değerleri $X^*=0.72$ 'de $d/D=0.7$ 'de ölçülmüştür. Aynı zamanda merkezinde ölçülen türbülans değeriyle halkada ölçülen türbülans değeri arasında en büyük fark ta yine $d/D=0.7$ 'de görülmüştür. Merkezinde türbülansın maksimum çıktığı lüle $d/D=0.45$ olarak görülmüyor. En düşük değerler ise annular halka olmaması halinde, yani tek bir düz dairesel lüle kullanılması durumunda ölçülmüştür. Daha sonra hız oranı λ 'nın 1'e eşit olduğu $d/D=.58$ çaplı lüle merkezinde türbülansın en düşük olduğu ikinci lüle tipi olarak sıralanabilir.



Şekil 8.38. Tüm lüle tiplerinin düz dairesel lüleyle birlikte kıyaslanması, $Re=5000$, $Z^*=0.23$

Şekil (8.39)'de ise lüleden en uzak mesafede $Z^*=8$ 'de Re sayısının 25000 değerindeki değişimler verilmiştir.

Re sayısının maksimum değeri olan 25000'de boyutsuzlaştırma sayısı olan U_j arttığından doğrudan Tu/U_j değeri düşmektedir ($Tu = \sqrt{u'^2} / U_j$). Bu nedenle en düşük değerler Re sayısının 25000 değerinde ve $Z^*=8$ eksenel mesafesinde ölçülmüştür.



Şekil 8.39. Tüm lüle tiplerinin düz dairesel lüleyle birlikte kıyaslanması, $Re=25000$, $Z^*=8$

9. İSTATİSTİKSEL REGRESYON ve BELİRSİZLİK ANALİZİ

9.1. İstatistiksel Regresyon

Yapılan deneysel çalışmanın sonuçları regresyon metodu ile incelenerek, levha yüzeyi üzerinde ölçüm alınan noktanın koordinatlarının (x/L , y/L), Reynolds sayısının (Re) ve lüle-levha arası boyutsuz mesafenin (h/d) yerel, durma noktası ve ortalama Nu sayısını nasıl etkilediği tespit edilmeye çalışılmıştır. Levha üzerindeki yerel ölçüm noktalarını en iyi kapsayacağı düşünülen ampirik bağıntı, levha üzerindeki her bir ölçüm noktasının koordinatlarının da kapsanacağı daire denklemdir. Zira elde edilen deneysel ısı transferi sonuçları Nu sayısının levha üzerinde orijinden itibaren çember şeklinde yayılan kontör eğrileri şeklinde olduğunu göstermiştir. Ancak yatay ve düşey eksenlerinde bu dağılımın tam simetrik olmadığı görülmüştür. Özellikle düşey yönde yerçekimi kuvvetinin etkisi daha ziyade eliptik bir eğilim göstermiştir. Bu nedenle denklemin aşağıdaki şekilde olacağı düşünülmüştür:

$$Nu_{yerel} = C_1 \cdot Re^{m_1} \left(\frac{h}{d} \right)^{n_1} \left[1 - (k_1 \cdot Re^{m_1}) \exp \left(p_1 \left(\frac{x}{L} \right)^2 + q_1 \left(\frac{y}{L} \right)^2 \right) \right] \quad (9.1)$$

Görüldüğü gibi denklem tipi durma noktası dahil tüm ölçüm noktalarını kapsamaktadır. Şekil (9.1)'de ölçüm noktaları boyutsuz koordinatlarıyla birlikte verilmiştir ($x/L, y/L$).

Bu bağıntı tüm lüle tipleri için ayrı ayrı uygulanmış ve dördü dairesel, üçü eş eksenli olmak üzere 7 ayrı bağıntı için denklemdaki katsayılar bulunmuştur.

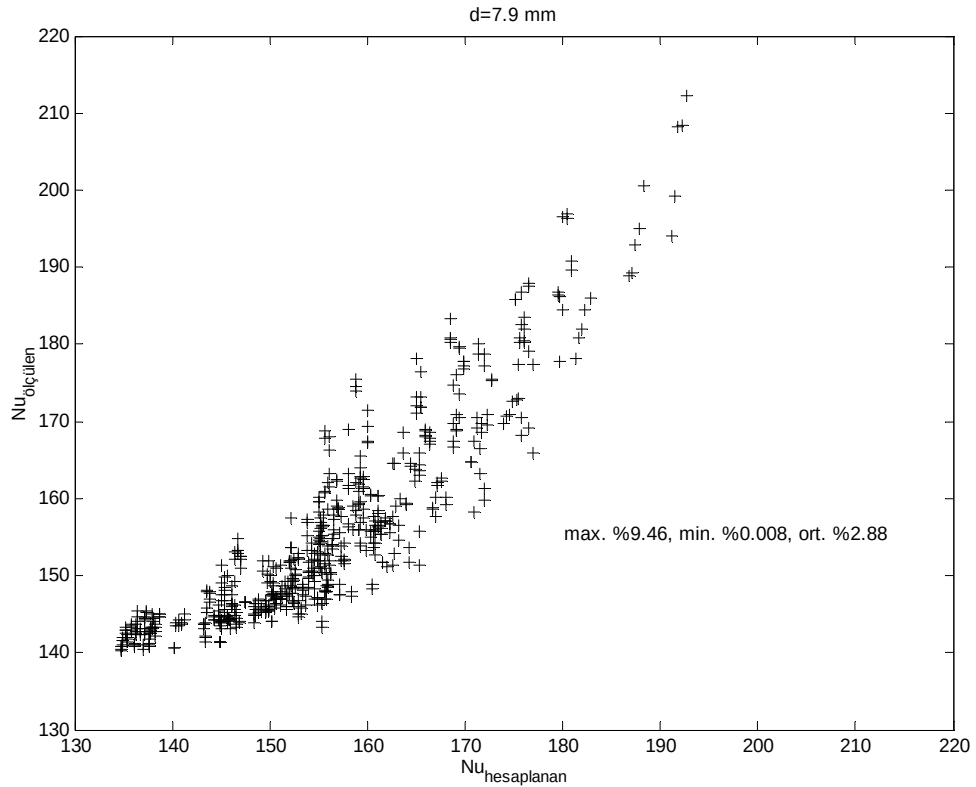
Ortalama ve durma noktası Nu sayıları için önerilen bağıntılar ise:

$$Nu_{ort} = C_2 Re^{m_2} (h/d)^{n_2} \quad (9.2)$$

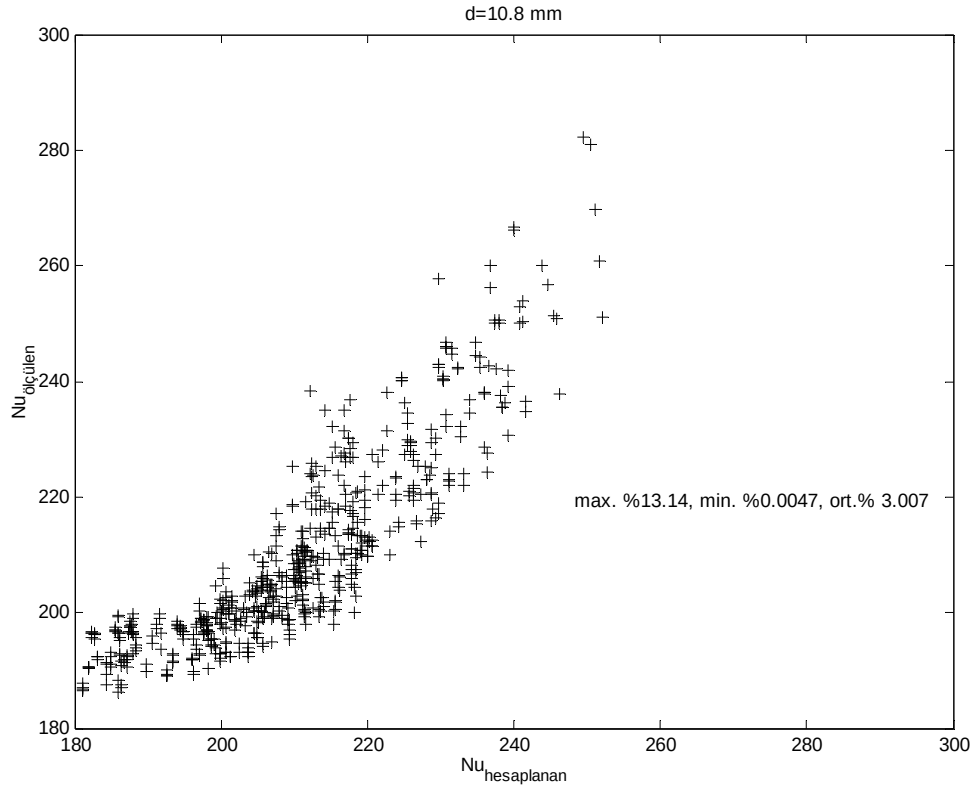
$$Nu_0 = C_3 Re^{m_3} (h/d)^{n_3} \quad (9.3)$$

şeklindedir. Regresyon analizi sonucu bulunan tüm değerler regresyon katsayılarıyla birlikte (R) Tablo 15'de verilmiştir.

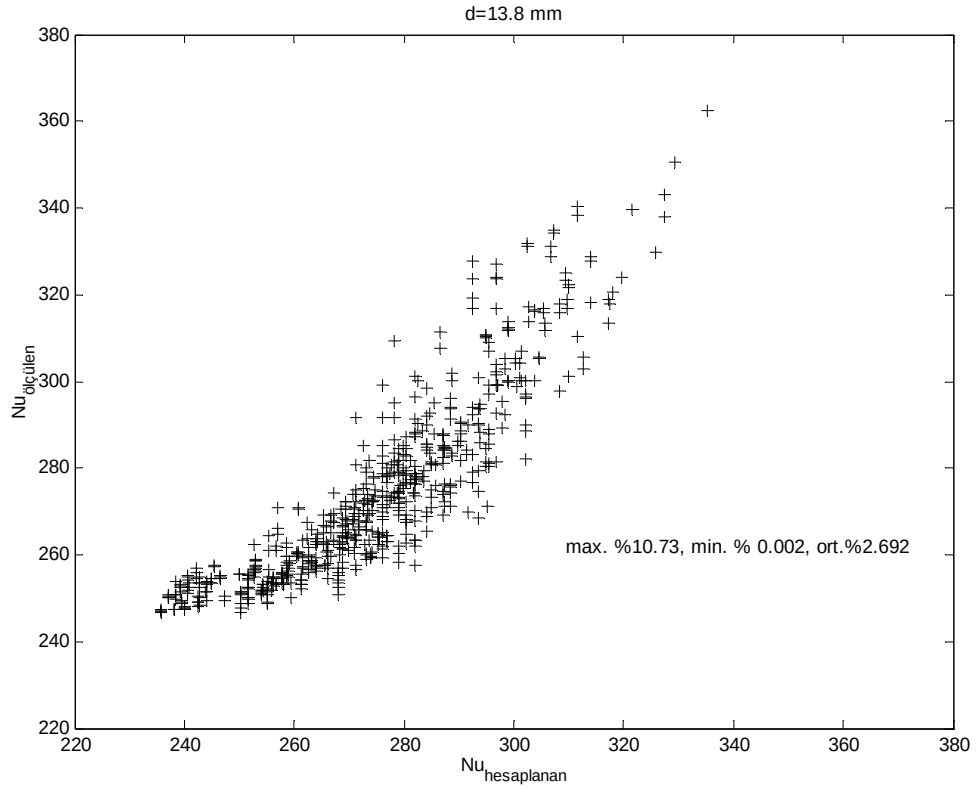
d=13.8 mm düz dairesel lüle					
C ₁	113.093	C ₂	121.331	C ₃	74.949
m ₁	0.0936	m ₂	0.096	m ₃	0.164
n ₁	-0.0266	n ₂	-0.046	n ₃	-0.073
k ₁	-0.0769	---	---	---	---
p ₁	-8.983	---	---	---	---
q ₁	-6.752	---	---	---	---
R=0.89		R=0.96		R=0.97	
d=23.1 mm düz dairesel lüle					
C ₁	57.4423	C ₂	167.845	C ₂	115.03
m ₁	0.066638	m ₂	0.116	m ₂	0.17
n ₁	-0.019819	n ₂	-0.037	n ₂	-0.047
k ₁	-2.04167	---	---	---	---
p ₁	-0.382485	---	---	---	---
q ₁	-0.352819	---	---	---	---
R=0.88		R=0.97		R=0.98	



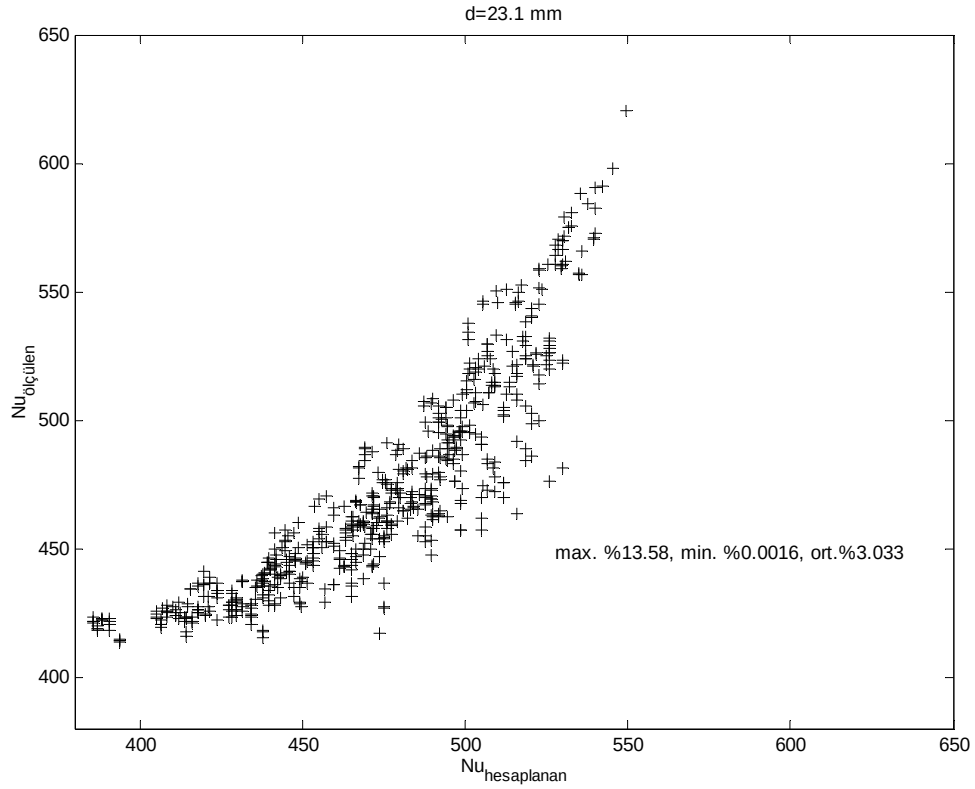
Şekil 9.2. d=7.9 mm için öngörülen Nu sayısı bağıntısı ile bulunan sonuçların deneysel sonuçlarla kıyası



Şekil 9.3. $d=10.8 \text{ mm}$ için öngörülen Nu sayısı bağıntısı ile bulunan sonuçların deneysel sonuçlarla kıyası



Şekil 9.4. $d=13.8 \text{ mm}$ için öngörülen Nu sayısı bağıntısı ile bulunan sonuçların deneysel sonuçlarla kıyası



Şekil 9.5. $d=23.1$ mm için öngörülen Nu sayısı bağıntısı ile bulunan sonuçların deneysel sonuçlarla kıyası

Öngörülen bağıntıyla elde edilen değerlerin, deneysel sonuçlarla olan yaklaşık uyumu regresyonun geçerliliğinin ispatı olacağından, regresyon katsayısı önem taşır. Şu ana kadar elde edilen regresyon katsayısı değerleri kabul edilebilir sınırlar içerisinde. Denklemin geçerliliğindeki diğer bir husus ise öngörülen bağıntıdan elde edilen değerlerle, ölçülen gerçek değerler arasındaki yüzde fark değeridir. Şekil (9.2-9.5)'de sırasıyla $d=7.9, 10.8, 13.8$ ve 23.1 mm çaplı düz dairesel lüleler için elde edilen ampirik bağıntıların kullanılmasıyla elde edilen Nu sayısı değerlerinin gerçek ölçüm değerleriyle kıyası verilmiştir. Ayrıca her bir grafik üzerinde maksimum, minimum ve ortalama farklar verilmiştir.

Tüm grafiklerde artan Re sayısı ile birlikte Nu sayısının arttığı, artan lüle-levha mesafesi ile azaldığı çıkan üs katsayılarından da görülmüştür. Ayrıca ampirik bağıntının solunda yer alan sıcaklık ölçüm koordinatları üzerindeki dağılımın her bir lülede eşit olmadığı tespit edilmiştir.

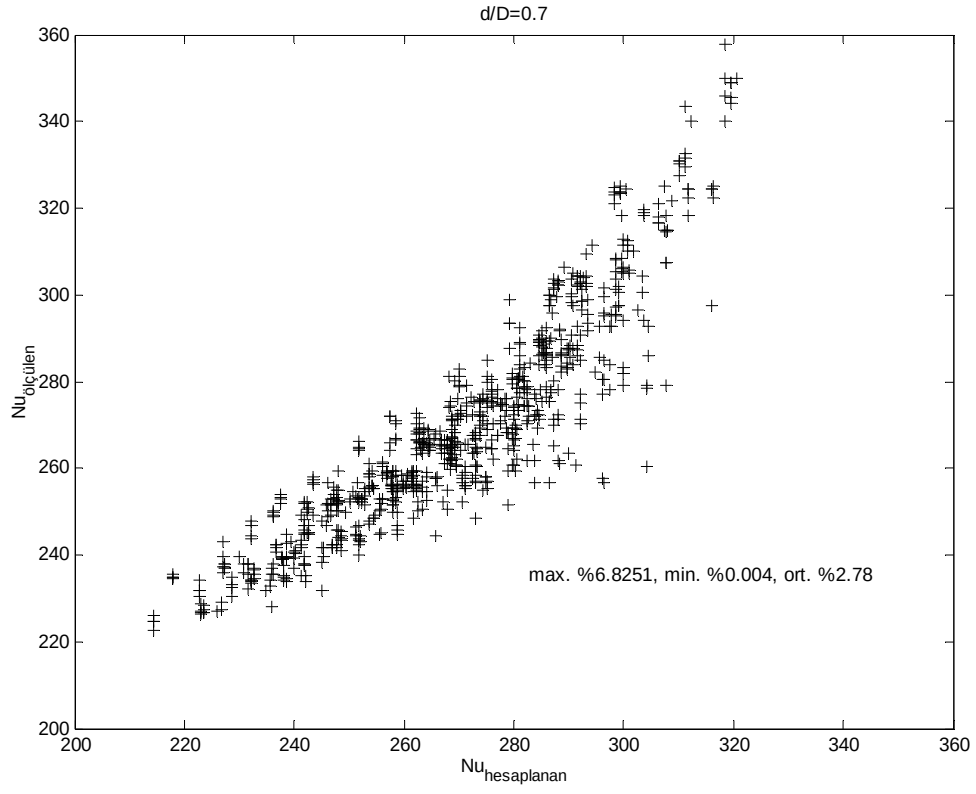
Şu ana kadar verilen değerler düz dairesel lülelerde Re sayısının artmasıyla birlikte ortalama ve durma noktası Nu sayılarının artacağını, (h/d) 'nin artmasıyla beraber azalacağını göstermiştir. Re sayısının üssü $0.11 \sim 0.15$ civarında çıkmıştır. Lüle çapı arttıkça Re sayısının üssü artmıştır. Lüle-levha arası mesafenin lüle çapının artması veya azalmasıyla ilgili doğrusal bir

değişimine ise rastlanmamaktadır. Nu sayısı ile Re sayısı arasındaki $Nu \sim Re^{0.15}$ bağıntısı literatürde sıkça rastlanan $Nu \sim Re^{0.5}$ bağıntısıyla kıyaslandığında, bu çalışmada Re sayısının Nu sayısı üzerindeki etkisinin daha az olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

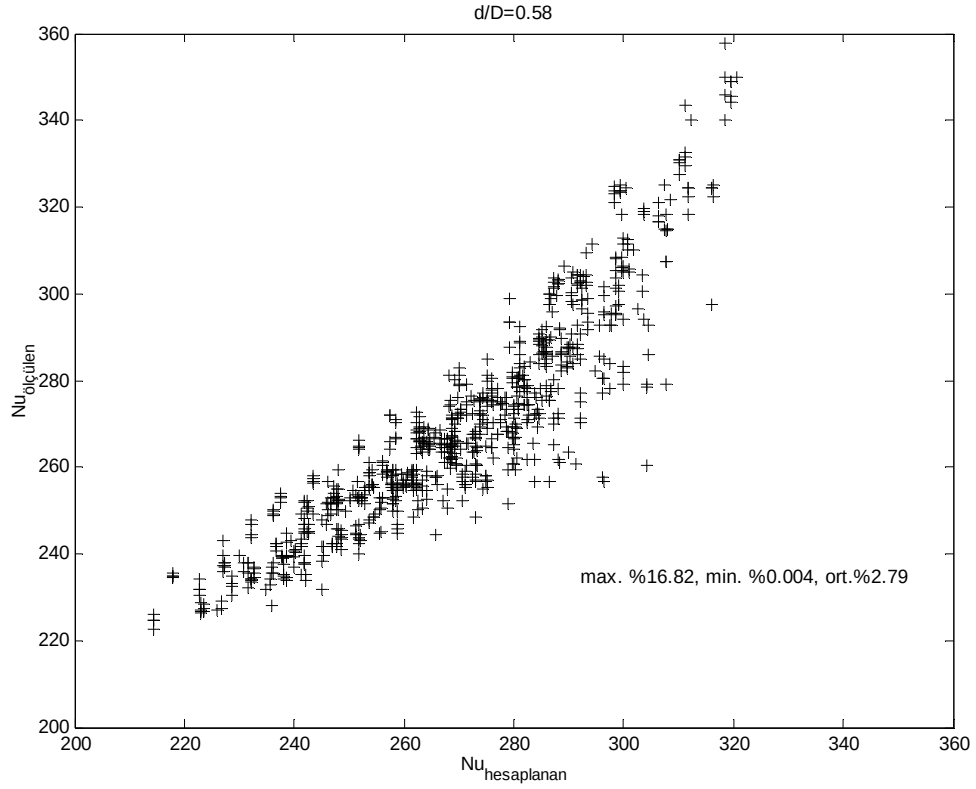
Durma noktası ve ortalama Nu sayıları için verilen bağıntıların regresyon katsayısı oldukça yüksek çıkmıştır, yani öngörülen değerlerle deneysel gözlem değerleri arasındaki uyum kabul edilebilir derecededir.

Tablo 16. Eş-eksenli lülelerin yerel, ortalama ve durma noktası Nu sayıları için bulunan korelasyon katsayıları ($5000 \leq Re \leq 25000$, $4 \leq h/d \leq 12$, durma noktasında $x/L=0, y/L=0$)

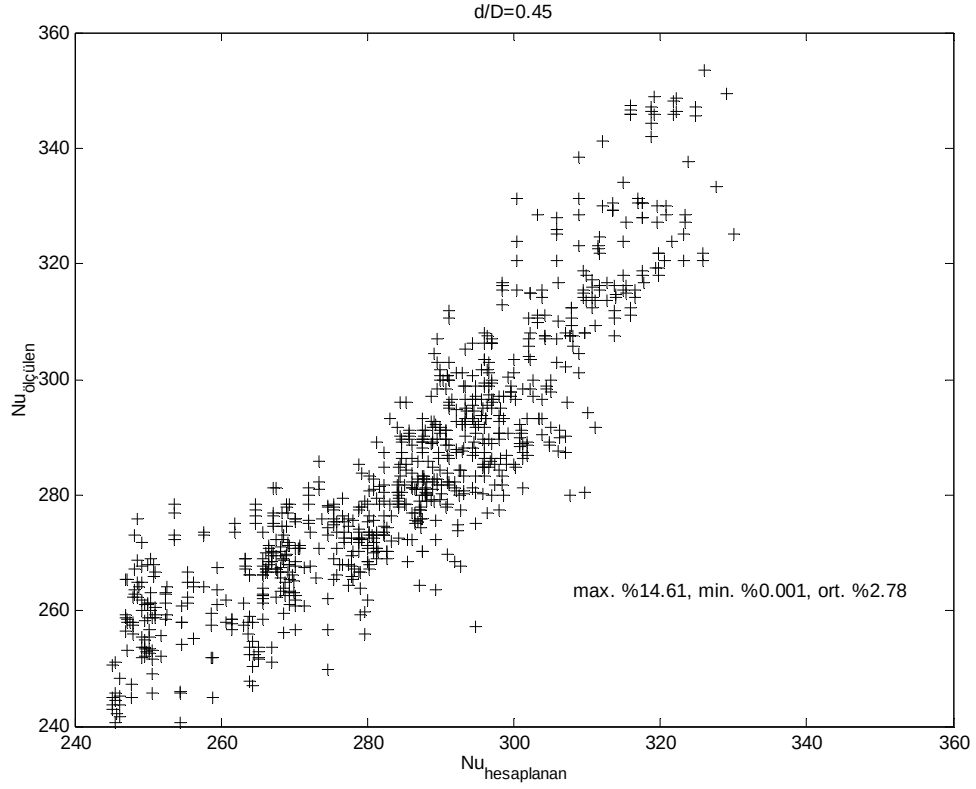
d/D=0.7 oranlı eş-eksenli lüle					
C ₁	27.57	C ₂	107.7	C ₃	84.7
m ₁	0.063525	m ₂	0.116	m ₃	0.154
n ₁	-0.093992	n ₂	-0.093	n ₃	-0.122
k ₁	-3.13289	---	---	---	---
p ₁	-0.272502	---	---	---	---
q ₁	-0.257625	---	---	---	---
R=0.9		R=0.96		R=0.97	
d/D=0.58 oranlı eş-eksenli lüle					
C ₁	27.15186	C ₂	119.15	C ₃	90.95
m ₁	0.063438	m ₂	0.092	m ₃	0.132
n ₁	-0.09399	n ₂	-0.036	n ₃	-0.067
k ₁	-3.19609	---	---	---	---
p ₁	-0.271678	---	---	---	---
q ₁	-0.256827	---	---	---	---
R=0.9		R=0.96		R=0.93	
d/D=0.45 oranlı eş-eksenli lüle					
C ₁	97.05484	C ₂	125.32	C ₃	91.23
m ₁	0.105926	m ₂	0.0966	m ₃	0.131
n ₁	0.017606	n ₂	-0.044	n ₃	-0.03
k ₁	-0.038851	---	---	---	---
p ₁	-14.7569	---	---	---	---
q ₁	-8.68712	---	---	---	---
R=0.88		R=0.99		R=0.90	



Şekil 9.6. $d/D=0.7$ için öngörülen Nu sayısı bağıntısı ile bulunan sonuçların deneysel sonuçlarla kıyası



Şekil 9.7. $d/D=0.58$ için öngörülen Nu sayısı bağıntısı ile bulunan sonuçların deneysel sonuçlarla kıyası



Şekil 9.8. $d/D=0.45$ için öngörülen Nu sayısı bağıntısı ile bulunan sonuçların deneysel sonuçlarla kıyası

Eş-eksenli lüleler için elde edilen korelasyonlardan $d/D=0.7$ ve 0.58 için katsayılar ve üsler yaklaşık olarak benzer çıkmaktadır. $d/D=0.45$ 'de nispeten değişiklik görülmektedir. Nu sayısı grafiklerinden de hatırlanacağı üzere bu lüle tipinde durma noktasındaki soğuma kenarlara göre daha fazlaydı, durma noktasındaki pik değer korelasyonun daha düşük regresyon katsayısı vermesine ve katsayıların değişmesine sebep olmaktadır. Şekil (9.6-9.8) $d/D=0.7$, 0.58 ve 0.45 için denklemlerle hesaplanan Nu değerlerinin gerçek ölçülen değerlerle kıyasını göstermektedir.

9.2. Deneysel Hatalar ve Belirsizlik Analizi

9.2.1. Belirsizlik Analizinin Tanımı ve Önemi

Gerçek hayatta neredeyse tüm mühendisler testlerden ve deneylerden elde edilen datalarla şu veya bu şekilde uğraşmak zorunda kalırlar. Bir data elde etmek durumunda olabilirler, bir datayı bir tasarım için kullanmayı deniyor olabilirler, yada dataları kendi hesaplamalarını yada teorilerini test etmek için kullanıyor olabilirler. Durum ne olursa olsun mühendis ya da araştırmacı dataların doğruluğu konusunda emin olmak ister. Ya, kendi

datalarının doğruluğunu kanıtlamak veya diğer datalarla kendi datalarının uyumunu görmek ihtiyacı duyabilir.

Deneyisel dataların doğruluğunun tespiti “Belirsizlik Tahmini”, “Belirsizlik Aralığı” veya sadece “Belirsizlik” şeklinde adlandırılır. Belirsizliği bulmak üzere kullanılan teknik “Belirsizlik Analizi” olarak adlandırılır. Belirsizlik analiziyle ilgili en açıklayıcı bilgiler Kline ve McClintock ve Holman [76] tarafından yapılmıştır.

Belirsizlik aralığının ölçümlerle simetrik bir bağı vardır; bu aralık genellikle deney yapanın gerçek değer $\pm$ %95 doğrulukla içinde bulunduğu aralık olarak tanımlanır. Belirsizlik aralığı birkaç yolla gösterilir. Bir deneye ait veriler listelendiği zaman “ $\pm$ ” işareti ile belirsizlik aralığı belirlenebilir, örneğin U hızı $20 \pm 1 \text{ m/s}$ ise, belirsizlik 1 m/s’ dir. Bazen de $\delta()$ simgesi ile parantez içerisine belirsizliği hesaplanan özellik yazılarak belirsizlik değeri ifade edilir; örneğin “ $\delta(U) = 1 \text{ m/s}$ ” ifadesi U hızının belirsizliğinin 1 m/s olduğunu gösterir. Son olarak belirsizlik yüzde olarak ifade edilir; örneğin “*hız ölçümünde %5 belirsizlik var*” ifadesi $\delta(U)/U = 0.05$ anlamına gelir [78].

Genelde belirsizlik analizi iki kısma ayrılır; (1) temel ölçümlerdeki belirsizlik, (2) bu ölçümlerden elde edilen sonucun belirsizliği. Temel ölçüm belirsizliği başka bir şeyden türetilmeyen belirsizliktir. Yani voltmetreden okunan gerilim, termometreden ölçülen sıcaklık gibi. Temel ölçümün belirsizlik aralığını tespit etmek için bazı bilgiler gerekir, şöyle ki:

(a) **Dijital çözünürlük, skaladaki bölüntü sayısı:** Eğer skala üzerindeki son bölüntüyü hassas olarak okuyamıyorsanız belirsizlik en küçük bölüntü genişliğinin yarısı kadardır

(b) **İmalatçı bilgileri kalibrasyon bilgileri:** Bazen bir ölçüm çok anlamlı (mesela virgülden sonra altı rakamlı), ancak çok belirsiz olabilir (mesela %15 hatalı olabilir). Böyle durumda katalogu iyi okumak, imalatçı firmanın öngördüğü belirsizliği görmek veya kalibrasyon değerlerini kontrol etmek gerekir.

(c) **Aynı ölçümü tekrarlamak:** Bazen bir cihazın ölçüm değeri zamanla değişiklik gösterebilir, elektrik arızaları, süreksizlik, ortam şartlarının değişmesi gibi. Bu durumda birkaç kez ölçüm alınır ve değerlerin standart sapması hesaplanır.

(d) **Aynı niceliği bağımsız ölçümlerle kıyaslamak:** Bazen iki bağımsız cihaz aynı ölçümü yapmak üzere kullanılabilir (örneğin hava debisini hem rotametre hem de bir orifis metre ile ölçebilirsiniz). Belirsizlik, aradaki farktan daha küçük olduğu sürece ölçümler arasındaki fark belirsizlikleri belirlemede bir rehber olabilir.

(e) **Diğer faktörler:** ölçüm şeklinin geçerliliği konusunda ölçümü yapan araştırmacı ölçümün doğruluk değerini etkileyen dış faktörleri biliyorsa bunları da toplam belirsizliğe eklemelidir. Bir cihazı çalışma aralığı dışında kullanmak, elverişsiz çevre şartları altında çalışmak, elektrik kesintileri v.s faktörler dikkate alınmalıdır.

Belirsizliği Sonuç Olarak Tespit Etmek

Genelde deneysel data sonuca ulaşmak için elde edilir. Elde edilen datalar ile sonuç arasındaki ilişki her zaman bir matematiksel fonksiyon olarak verilebilir. Herhangi bir P sonucunun n değişkene bağlı olduğunu varsayalım:

$$P = P(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (9.5)$$

bu değişkenlerden her birinin kendi belirsizliği olsun; örneğin x_1 'in belirsizliği δx_1 olsun. Bu durumda deney yapanların aralarında vardığı yaygın anlaşmaya göre P 'nin toplam belirsizliği tüm etkilerin karekök ortalaması olarak hesaplanır [78].

$$\delta P = \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x_1} \delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial x_2} \delta x_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial x_3} \delta x_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial P}{\partial x_n} \delta x_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9.6)$$

Bu hesaplama olası olmayan tüm değişkenlerin aynı anda maksimum hataya sahip olmaları kabulüne karşı gelen çeşitli $\delta(x_i)$ belirsizliklerinin basitçe birbirlerine eklenmeleri işlemine göre istatistiksel açıdan çok daha olasıdır. Tüm ilgili $\delta(x_i)$ belirsizliklerinin doğru olarak belirlenmesinin ve bildirilmesinin deney yapan kişinin sorumluluğunda olduğuna dikkate edilmelidir.

Eğer R büyüklüğü diğer değişkenlerin bir basit kuvvet yasası ifadesi ise, örneğin $P = \text{sabit } x_1^n x_2^n x_3^n \dots$, ise bu durumda denklem (9.6)'daki türevler P ile ve geçerli kuvvet yasası üssü ile doğru orantılı ve o değişkenle de ters orantılıdır.

Eğer $P = \text{sabit } x_1^n x_2^n x_3^n \dots$, ise buradan:

$$\frac{\partial P}{\partial x_1} = \frac{n_1 P}{x_1}, \frac{\partial P}{\partial x_2} = \frac{n_2 P}{x_2}, \frac{\partial P}{\partial x_3} = \frac{n_3 P}{x_3}, \dots \quad (9.7)$$

elde edilir. Bu durumda denklem (9.7)'den:

$$\frac{\delta P}{P} = \left[\left(n_1 \frac{\delta x_1}{x_1} \right)^2 + \left(n_2 \frac{\delta x_2}{x_2} \right)^2 + \left(n_3 \frac{\delta x_3}{x_3} \right)^2 + \dots \right]^{1/2} \quad (9.8)$$

elde edilir.

Bu bilgiler ışığında; yapılan deneysel çalışmanın belirsizlik analizi için evvela belirsizlik kaynağı olan parametreler ve bu parametrelerin belirsizlik oranlarını gözden geçirmekte fayda vardır.

9.2.2. Bu Çalışmadaki Toplam Belirsizliklerin Tespiti

Bu çalışmada ana hatlarıyla, sıcaklık, hız, ve debi ölçümleri yapılmıştır. bu ölçümlerden elde edilen değerlerle; Nusselt sayısı, Re sayısı, ortalama hız ve türbülans şiddeti hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler için belirsizlik değerleri aşağıda verildiği gibidir.

Nu sayısı için belirsizlik:

Nu sayısı, Bölüm 4’de verilen bağıntılarla aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Nu = \frac{h_{yemel} d}{k} = \frac{Q_{net} d}{A(T_w - T_{jet})k} = (Q_y - Q_{rad} - Q_d) \frac{d}{A(T_w - T_{jet})k}$$

Tüm ifadeler en açık haliyle yazıldığında şöyle bir eşitlik çıkar:

$$Nu = \left\{ \left[\left[\frac{0.943 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3 C_{p_l} (T_{sat} - T_s)}{h_{fg}} \right]^{1/4}}{\mu (T_{sat} - T_s) L} \right] A (T_{sat} - T_s) - \left[\epsilon \sigma A (T_s^4 - T_\infty^4) \right] \right] \right. \\ \left. - \left[\frac{0.68 + \left[\frac{0.67 \left(\frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu \alpha} \right)^{1/4}}{1 + (0.492/Pr)^{9/16}} \right]^{4/9} k_{hava}}{L} A (T_s - T_\infty) \right] \right\} \frac{d}{A (T_w - T_{jet}) k_{hava}} \quad (9.9)$$

Bu bağıntıda verilen her bir parametrenin belirsizliği Nu sayısının belirsizliğinin tespitinde kullanılacaktır: Nu sayısı için belirsizlik ifadesi:

$$W_{Nu} = \left[\begin{aligned} &\left(\frac{\partial Nu}{\partial g} W_g\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial \rho_l} W_{\rho_l}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial \rho_v} W_{\rho_v}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial k_l} W_{k_l}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial C_{p_l}} W_{C_{p_l}}\right)^2 \\ &+ \left(\frac{\partial Nu}{\partial T_{sat}} W_{T_{sat}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial T_s} W_{T_s}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial h_{fg}} W_{h_{fg}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial \mu} W_{\mu}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial L} W_L\right)^2 \\ &+ \left(\frac{\partial Nu}{\partial A} W_A\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial \varepsilon} W_{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial \sigma} W_{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial T_{\infty}} W_{T_{\infty}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial \beta} W_{\beta}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial v} W_v\right)^2 \\ &+ \left(\frac{\partial Nu}{\partial \alpha} W_{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial k_{hava}} W_{khava}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial T_w} W_{T_w}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial T_{jet}} W_{T_{jet}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial d} W_d\right)^2 \end{aligned} \right]^{1/2} \quad (9.10)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Yukarıda verilen (9.10) eşitliğindeki türev ifadeleri (9.9) bağıntısı yardımıyla bulunarak yerine yazılır ve elde edilen ifade (9.9) bağıntısına bölünürse Nu sayısı için toplam belirsizlik bulunur. Yukarıda yazılan (9.10) ifadesinde türevlerin alınmasında elle çözümü oldukça karmaşık olduğundan MATEMATICA programı kullanılmıştır. Türevlerin alınıp bölme işlemlerinin yapılmasıyla elde edilen ifade çok uzun olduğundan dolayı verilememiştir.

Re sayısı için belirsizlik:

Re sayısı ölçülen değerler cinsinden:

$$Re = \frac{4\dot{V}}{\pi d v} \quad (9.11)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir. Belirsizlik ifadesi ise:

$$W_{Re} = \left[\left(\frac{\partial Re}{\partial v} w_v\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial d} w_d\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial \dot{V}} w_{\dot{V}}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (9.12)$$

şeklinde belirlenebilir. (9.12) eşitliğindeki türev ifadeleri (9.11) bağıntısından bulunarak yerine yazılırsa ve elde edilen ifade 7 bağıntısına bölünürse Reynolds sayısı için toplam belirsizlik:

$$\frac{W_{Re}}{Re} = \left[\left(\frac{w_v}{v} \right)^2 + \left(\frac{w_d}{d} \right)^2 + \left(\frac{w_{\dot{V}}}{\dot{V}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9.13)$$

bağıntısına dönüşür.

Türbülans şiddeti için belirsizlik

Türbülans şiddeti çalkantı hızlarının karesinin toplamalarının karekökü olarak hesaplanır.

$$Tu = \sqrt{(u_a - u)^2} \quad (9.14)$$

Hız ölçümünde karşılaşılan belirsizliklerin toplamı türbülans şiddetinin hesaplanmasındaki belirsizliğe eşittir.

Ölçülen Değerlerin Belirsizliğinin Belirlenmesi

Yukarıda verilen Nu sayısındaki, Re sayısındaki ve türbülans şiddetindeki belirsizlik ifadelerinde ölçülen değerler olarak her bir bağımsız değişken için belirsizliklerin bilinmesi gerekmektedir. Sözü edilen belirsizlikler için çeşitli kaynaklarda benzer ölçümlerdeki belirsizliklerin esas alınması yanında, yukarıda da belirtildiği gibi ölçü aletlerinin üretici firmaları tarafından önerilen belirsizlik değerleri de dikkate alınmıştır. Bunun yanında belirlenmesi zor veya mümkün olmayan hatalar, deneysel tecrübelerden tahmini olarak belirlenmiştir [81]. Bütün bunların göz önüne alınması ile her bir değişken için ortaya çıkabilecek belirsizlik değerleri şu şekilde belirlenebilir:

1. Sıcaklık ölçümünde ortaya çıkabilecek hatalar:

Levha yüzeyinde ölçülen sıcaklıkların ölçümü esnasında doğabilecek belirsizlik kaynakları şöyle sıralanabilir:

(a) Isıl çiftlerden kaynaklanan belirsizlik; $\pm 0.5 \text{ } ^\circ\text{C} \equiv \%0.5$

- (b) Bağlantı elemanları ve noktalarından kaynaklanan belirsizlik; $\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C} \equiv \%0.1$
(c) Data toplayıcının okuma hassasiyetinden kaynaklanan belirsizlik; $\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C} \equiv \%0.1$

Buna göre sıcaklıkların ölçülmesinde ortaya çıkabilecek toplam belirsizlik;

$$W_{T_s} = W_{T_w} = \left[(a)^2 + (b)^2 + (c)^2 \right]^{1/2} \quad (9.15)$$

şeklinde bulunabilir. Jet çıkış sıcaklığının belirlenmesinde oluşan belirsizlik miktarında yalnızca (a) ve (c) faktörleri etkilidir. Böylece:

$$W_{T_{jet}} = \left[(a)^2 + (c)^2 \right]^{1/2} \quad (9.16)$$

şeklinde hesaplanır. Ortam sıcaklığı datalogger üzerinden direkt ölçüldüğünden yalnız (c) geçerlidir.

$$W_{T_{\infty}} = (c) \quad (9.17)$$

2. Debi Ölçümünde ortaya çıkabilecek belirsizlikler

- (d) Rotametre okuma belirsizliği; $\pm \%1-1.5$
(e) Kompresörden kaynaklanan sistem kaçaklarıyla ilgili belirsizlik; $\pm \%2-3$
(f) Sıcaklık farklılıklarından kaynaklanan (yoğunluk farkından) belirsizlik; $\pm \%0.5-1$

Bu belirsizliklerden de debi ölçümünde ortaya çıkabilecek toplam belirsizlik bulunur:

$$W_{\dot{V}} = \left[(d)^2 + (e)^2 + (f)^2 \right]^{1/2} \quad (9.18)$$

3. Hız ve türbülans değerlerinin tespitinde ortaya çıkan belirsizlik

- (g) Data toplayıcının okuma hassasiyetinden kaynaklanan belirsizlik; $\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C} \equiv \%0.1$
(h) Hız dönüştürücüden kaynaklanan belirsizlik; $\pm \%2$
(i) Travers mekanizmasından kaynaklanan belirsizlik; $\pm \%2$

$$W_{Tu} = \left[(g)^2 + (h)^2 + (i)^2 \right]^{1/2} \quad (9.19)$$

4. Diğer belirsizlikler

(j) Fiziksel özelliklerin tablo değerlerinin okunmasında ortaya çıkabilecek belirsizlik [81];

$$\begin{aligned} W_{k_h} &= W_{k_l} = W_{\rho_l} = W_{\rho_v} = W_{\mu} = W_{\nu} = W_{\alpha} = W_{\beta} \\ &= W_g = W_{hfg} = W_{Cp_l} = W_{\varepsilon} = W_{\sigma} = \pm 0.1 - 0.2 \end{aligned} \quad (9.20)$$

(k) Lüle çapında, levha boyunda ve levha alanında oluşabilecek belirsizlik değeri:

$$W_d = W_L = W_A = \pm 0.1 - 0.2 \quad (9.21)$$

5. Ampirik bağıntıları kullanmadan kaynaklanan belirsizlik:

(l) Bölüm 4’de açık hali verilen yoğunlaşma ile ısı transferinde kullanılan ampirik bağıntının (denklem 4.2) literatürde verilen geçerlilik değeri [80]; $\pm 3\%$

Verilen tüm bu değerlerin bağıntılarda yerine koyularak hesaplanması sonucunda ***Nu sayısı için ± 4.97 , Re sayısı için ± 2.89 ve türbülans şiddeti ve hız ölçümleri için ± 2.84*** oranında belirsizlik tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre en büyük belirsizlik Nu sayısında ortaya çıkmaktadır. Nu sayısındaki belirsizliğe en büyük katkıyı sıcaklık ölçümünden kaynaklanan belirsizlik değeri yapmaktadır. Re sayısındaki en büyük belirsizlik faktörü ise debi ölçümünden kaynaklanmaktadır. Türbülans şiddetinde hız dönüştürücüden ve travers mekanizmasından kaynaklanan belirsizlikler toplam belirsizliği arttırıcı etki yapmaktadırlar.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, çarpan jetlerin ısı transferi akış dinamiği konusu deneysel olarak incelenmiştir. Özellikle eş-eksenli jetlerin ısı transferi davranışı ve akım özellikleri detaylı bir şekilde incelenerek, bu açıdan literatüre katkı sağlamak amaçlanmıştır. Çalışmada çıkan ana sonuçlar şöyle sıralanabilir:

- Düz dairesel tam gelişmiş türbülanslı jetlerde lüle çapını arttırmanın yerel Nu sayılarını ciddi oranda etkilediği görülmüştür. Nusselt sayısının hesaplanmasında karakteristik uzunluk olarak lüle çapının alınması bu artıştaki en önemli etkidir.
- Tüm düz dairesel lüle tiplerinde, ortalama Nu sayısı, tüm Re sayılarında durma noktası Nu sayısından düşük çıkmıştır.
- Maksimum ısı transferi potansiyel özün bittiği noktada altı lüle çapı mesafesinde meydana gelmiştir.
- Tüm düz dairesel jet tiplerinde durma noktasında maksimum ısı transferi oluşmuştur. Nusselt sayısı artan Re sayısı ile artmıştır ve ayrıca artan lüle-levha aralığıyla azalmıştır.
- Levha üzerinde durma noktasından kenarlara doğru ısı transferi yayılımı incelendiğinde, düşük lüle çaplarında yüksek Nu sayıları farkı ölçülürken, yüksek lüle çaplarında daha düşük farklar görülmüştür.
- Benzer Re sayısında ve benzer lüle-levha aralığında literatürde yapılmış çalışmalara kıyasla Nu sayısında artış görülmüştür. Bunun en önemli nedenlerinden biri yüzeyde yoğunlaşmayla sağlanan ısı transferidir. Yoğunlaşmayla ısı transferinde yüzey üzerinde sabit sıcaklık sınır şartı %100'e yakın oranda sağlanmıştır. Bu da kayıp ısıyı azaltmıştır.
- Düz dairesel lülelerin ısı transferi karakteristiğini tespit etmek üzere, elde edilen deneysel sonuçlarla STATISTICA programı kullanılarak ampirik bağıntılar türetilmiştir. Bu bağıntılarda ısı transferini etkileyen en önemli unsurun Re sayısı olduğu görülmüştür. Tüm düz dairesel lülelerde $Nu \sim Re^{0.15}$ şeklinde bir ilişki olduğu görülmüştür. Ayrıca artan h/d ile hem durma noktası, hem ortalama Nu sayılarının azaldığı tespit edilmiştir.
- Yapılan akım karakteristiği deneylerinde aynı Re sayısı şartlarında küçük lüle çaplarında daha yüksek hızlar oluştuğundan türbülans şiddeti de aynı oranda artmıştır. Boyutsuzlaştırma işleminde türbülans şiddeti değeri jet çıkış hızına bölündüğünden grafiklere bu durumun yansımaları zıt şekilde olmuştur. Örneğin $Re=25000$ 'de $d=7.9$ mm lik lüle çapında jetin çıkışında $U_j=55.07$ m/s olarak

ölçülmüştür. Aynı noktada oluşan türbülans şiddeti değeri $Tu = \sqrt{u'^2} = 1.3747 \text{ m/s}$ dir. Bu iki değer boyutsuzlaştırma amacıyla birbirine bölündüğünde $Tu/U_j = 0.024963$ gibi bir değer çıkar. Oysa aynı Re sayısında ve aynı konumda $d = 23.1 \text{ mm}$ çaplı lüleyle ölçülen jet çıkış hızı $U_j = 16.5 \text{ m/s}$ 'dir. Türbülans değeri ise $Tu = \sqrt{u'^2} = 1.02 \text{ m/s}$ 'dir. Görüldüğü gibi hız azaldığından türbülans da azalmıştır. Ancak boyutsuzlaştırma işlemi yapıldığında yani Tu/U_j değeri hesaplandığında 0.062245 gibi bir değer çıkmaktadır. Bu değer, $d = 7.9 \text{ mm}$ çapındaki lülede hesaplanan boyutsuz türbülans değerinin yaklaşık 2.5 katı kadardır.

- Her bir lülede Re sayısı arttıkça türbülans şiddeti değerinin de arttığı görülmüştür. Ancak, Re sayısı 5000'den 10000'e çıktığında arada oluşan hız farkı türbülans farkından sayı değeri olarak büyük olduğundan boyutsuz grafiklerde Re sayısı arttıkça azalan bir eğilim çıkmıştır.
- Düz dairesel lülelerle yapılan serbest jet akımı deneylerinde yaklaşık olarak potansiyel özün lüle çapının 6 katı kadar bir mesafede olduğu görülmüştür.
- Jet eksen çizgisinin yüzeyde gösterdiği nokta geometrik çarpma noktasıdır ve maksimum hız bu noktada meydana gelir. Bu nokta aynı zamanda tüm deneylerimizde durgunluk noktası ile çakışmaktadır.
- Akımın çarpma levhasından ne kadar etkilendiği, aynı boyutsuz mesafelerde levhanın olmaması durumlarında, yani serbest jet deneylerinde ortaya çıkmıştır. Çarpma levhası olması durumunda çarpma levhası olmaması durumuna kıyasla geometrik orta noktada ölçülen hızlar, istisnasız tüm Re sayısı değerlerinde daha yüksektir.
- Eş-eksenli jetlerle yapılan deneylerde d/D çap oranının Nu sayısı üzerindeki etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Deneyler sonucunda $d/D = 0.7$ 'de halkadaki akış merkezdeki akıştan daha etkili olduğundan geometrik durma noktasının yakın çevresinde ikinci maksimum değerler ölçülmüştür. Özellikle yakın lüle-levha mesafelerinde maksimum ısı transferi geometrik durma noktasının çevresinde çıkmıştır. Bu durum hem ortalama Nu sayılarının aynı dış lüle çapındaki düz dairesel lüleye göre artmasına neden olmuştur.
- d/D çapını azaltınca, özellikle de annular halkayla merkezi yuvarlak jetin kesitlerini birbirine yakın değere getirince ($d/D = 0.58$ gibi) akım her iki jete eşit dağıldığından ısı transferi üzerindeki etkisi de $d/D = 0.7$ 'ye göre azalmıştır. İçteki jetin kesit alanını azaltınca ise durma noktası Nu sayısında artışlar görülmüştür. $d/D = 0.45$ 'de

en yüksek durma noktası Nu sayıları ölçülmüştür. Özellikle düz dairesel lüleyle kıyaslandığında en yüksek değerler bu tip lülede hesaplanmıştır.

- Eş-eksenli lülelerle yapılan serbest jet deneylerinde türbülans şiddetinin lüleyle yakın mesafelerde düz dairesel lüleyle göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Potansiyel çekirdek bölgesi ise 4-6 lüle çapı kadar bir mesafede kalmıştır.
- Özellikle eş-eksenli lülelerde lüle çıkından itibaren potansiyel öz bölgesi dâhilinde merkezin dışında ikinci üçüncü sıçrama değerleri görülmüştür. Ölçümlerde hız probunu taşıyan travers mekanizmasının sınırlı robotik malzeme imkânlarıyla tasarlanmış olması nedeniyle, eş-eksenli lüle jetinin lüleyle yakın mesafe ölçümleri hassas incelenememiştir. Bu bölgedeki akım karakteristiği daha gelişmiş cihazlarla incelenmesi daha reel sonuçlar verilmesini sağlayacaktır.
- Çalışmada elde edilen Nu sayıları %4.97, Re sayısı %2.89, türbülans şiddeti ölçümleri %2.84 belirsizlikle hesaplanmıştır. Bu değer uluslar arası çalışmalarda kabul edilebilir sınırlar dâhilindedir. Bu belirsizlik değerleri kapsamında %98-99 civarında doğruluk veren durma noktası ve ortalama Nu sayısı bağıntıları ve %89-90 civarında doğrulukla yerel Nu sayısı bağıntıları türetilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M.A. and Button, B.L., “A Review of Heat Transfer Data for Single Circular Jet Impingement”, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 13 (2), 106-115, 1992.
- [2] Gauntner, J.W., Livingood, J.N.B., and Hrycak, P., “Survey of Literature on Flow Characteristics of Single Turbulent Jet Impinging on a Flat Plate”, NASA TN D-5652 NTIS N70-18963, 1970.
- [3] Blevins, R.D., *Applied Fluid Dynamics Handbook*, Florida, 1992.
- [4] Schlichting, H., *Boundary Layer Theory*, McGraw Hill Co., New York, 1968.
- [5] Tani, I., and Komatsu, Y., “Impingement of a Round Jet on a Flat Surface”, *Proc. of the Eleventh International Congress of Applied Mechanics*, (Editor H. Gortler), Springer-Verlag, New York, 672-676, 1966.
- [6] Girald, F., Chia C.J., and Trass, O., “ Characterization of the Impingement Region in an Axisymmetric Turbulent Jet”, *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 16, 21-28, 1977.
- [7] Incropera, F.P. & De Witt, D.P., *Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri*, 4. Basımdan Çeviri, Literatür Yayıncılık, İstanbul, s. 415-421, 2001.
- [8] Stevens, J., Webb, B.W., “Measurements of the Free Surface Flow Structure under an Impinging Free Liquid Jet”, *Journal of Heat Transfer*, 114, 874-879, 1992.
- [9] Can, O., “*Elektronik Devrelerin Soğutulması ve Jet Püskürtmeli Soğutma Sistemlerinin Analizi*” Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1997.
- [10] Martin, H., “Heat and Mass Transfer Between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces”, *Advances in Heat Transfer*, 13, 1-60, 1977.
- [11] Popiel, C.O., and Boguslawski, L., “Effect of Flow Structure on the Heat or Mass Transfer on a Flat Plate in Impinging Round Jet”, *C.201/88*, pp.663-685, 1988.

- [12] Bilen, K., *Isıtılan Düzlem Bir Plakaya Dik ve Eğik Hava Jeti Çarpmasında Isı Transfer Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi*, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1994.
- [13] Sibulkin, M., “Heat Transfer near the Forward Stagnation Point of a Body of Revolution”, *J. Aeronautical Sci. August*, 1952.
- [14] Gordon, R., and Akfirat, J.C., “The Role of Turbulence in Determining the Heat Transfer Characteristics of Impinging Jets”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 8, 1261-1272, 1965.
- [15] Schlunder, E.U., and Gnielinski, V., “Heat and Mass Transfer between Surfaces and Impinging Jets”, *Chemie. Ingr. Tech.*, 39, 578-584, 1967.
- [16] Gordon, R., and Carbonpue, J., “Heat Transfer Between a Flat Plate and Jets of Air Impinging on It”, *Int. Developments in Heat Transfer, Int. Heat Transfer Conf.*, University of Colorado, CO, USA, August 28 to September 1, 2, 454-460, 1962.
- [17] Popiel, C.O., and Trass, O., “The Effect of Ordered Structure of Turbulence on Momentum, Heat and Mass Transfer of Impinging Round Jets”, *Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf.*, Munchen, Germany, September 6-10, 6, 141-146, 1982.
- [18] Popiel, C.O., and Trass, O., “Visualization of a Free and Impinging Round Jet”, *Exp. Thermal Fluid Science*, 4, 253-264, 1991.
- [19] Obot, N.T., Mujumdar, A.S., and Douglas, W.J.M., “Design Correlations for Heat and Mass Transfer under Various Turbulent Impinging Jet Configurations”, *Developments in Drying*, 388-402, 1979.
- [20] Obot, N.T., Mujumdar, A.S., and Douglas, W.J.M., “Effect of Nozzle Geometry on Impingement Heat Transfer under a Round Turbulent Jet”, *ASME Paper*, 79-WA/HF-53, 1979.
- [21] Obot, N.T., Mujumdar, A.S., and Douglas, W.J.M., “Heat Transfer under Axisymmetric Turbulent Impinging Jets”, *AIChE 12nd Ann. Conf.*, San Francisco, CA, USA, AI-C3, 1979.

- [22] Obot, N.T., Mujumdar, A.S., and Douglas, W.J.M., "Effect of Semi-Confinement on Impingement Heat Transfer", *Proc. 7th Int Heat Transfer Conf.*, Munchen, Germany, September 6-10, 3, 395-400, 1982.
- [23] Gundappa, M., Hudson J.F., and Diller, T.E., "Jet Impingement Heat Transfer from Jet Tubes and Orifices", *National Heat Transfer Conf.*, Philadelphia PA, USA, August 6-9, 107, 43-50, 1989.
- [24] Hoogendorn, C.J., "The effect of Turbulence on Heat Transfer at a Stagnation Point", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 20, 1333-1338, 1977.
- [25] Mohanty, A.K., and Tawfek A.A., "Heat Transfer to a Round Jet Impinging Normal to a Flat Surface", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 36 (6), 1639-1647, 1993.
- [26] Hrycak, P., "Heat Transfer from Round Impinging Jets to a Flat Plate", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 26, 12, 1857-1865, 1983.
- [27] Hung, L. and Genk, M.S., "Heat Transfer of an Impinging Jet on a Flat Surface", *J. Heat Mass Transfer*, 37, 13, 1915-1923, 1994.
- [28] Wang, S.X., Dogan, Z., and Jili, M.L., "Heat Transfer between a Circular Free Impinging Jet and a Solid Surface with Non-Uniform Wall Temperature or Wall Heat Flux- 1: Solution for the Stagnation Point", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 32, 1351-1360, 1989.
- [29] Donaldson, C.D., and Snedeker, R.S., "A Study of Free Jet Impingement, Part 1- Mean Properties of Free and Impingement Jet", *J. Fluid Mech.*, 45, 281-319, 1971.
- [30] Donaldson, C.D., Snedeker, R.S. and Margolis, D.P., "A Study of Free Jet Impingement, Part 2- Free Jet Turbulent Structure and Impingement Heat Transfer", *J. Fluid Mech.*, 45, 3, 477-512, 1971.
- [31] Kızılırmak, M., *Çarpan Hava Jeti Yardımı ile Soğutma İşleminin Deneysel İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1995.

- [32] Acar, H., *An Experimental Investigation of a Rectangular Jet Impinging on a Flat Surface*, ITU Institute of Technology and Science, Istanbul, 1998.
- [33] Feralan, A.E., Yamankaradeniz, R., ve Can, M., “Çarpan Hava Jetleri ile İnce Mükkepek Filmlerinin Kurutulması”, *Journal of the Faculty of Eng. of Uludağ Univ.*, Bursa, 3, 1, 1989.
- [34] Baughn, J.W., and Shimizu, S., “Heat Transfer Measurements from a Surface with Uniform Heat Flux and an Impinging Jet, *J. Heat Transfer, Trans. ASME*, 111, 1096-1098, 1989.
- [35] Baughn, J.W., Hechanova, A.E., and Xiaojun, Y., “An Experimental Study of Entrainment Effects on the Heat Transfer from a Flat Surface to a Heated Circular Impinging Jet”, *Proc. of the ASME/JSME Conf., Thermal Engineering*, Reno, NV, USA, March 17-22, 1991.
- [36] Goldstein, R.J., and Behbahani, A.I., “Impingement of a Circular Jet with and without Cross Flow”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 25, 1377-1382, 1982.
- [37] Vickers, J.M.F., “Heat Transfer Coefficients between Fluid Jets and Normal Surfaces”, *Ind. Engng Chem.*, 51, 967-972, 1959.
- [38] Smirnov, V.A., Verevchkin, G.E., and Brdlick, P.M., “Heat Transfer between a Jet and a Held Plate Normal to the Flow”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 2, 1-7, 1961.
- [39] Bouchez, J.P., and Goldstein, R.J., “Impingement Cooling from a Circular Jet in a Crossflow”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 18, 719-730, 1975.
- [40] Hollworth, B.R., and Bowley, W.W., “Heat Transfer Characteristics of an Impinging Jet in a Crossflow”, *ASME Paper, no:75- WA/HT-100*, 1975.
- [41] Yokobori, K., Kasagi, N., and Hirata, M., “Characteristics Behavior of Turbulence and Transport Phenomena at the Stagnation Region of an Axisymmetric Impinging Jet”, *2nd Symp. on Turbulent Shear Flows*, Imperial College, London, July, 1979.
- [42] Kataoka, K., Komai, T., and Nakamura, G., “Enhancement Mechanism of Mass Transfer in a Turbulent Impinging Jet for High Schmidt Numbers”, *ASME Paper no. 78-HT-5*, 1978.

- [43] Murakami E. and Papamoschou, D., “Mean Flow Development in Dual-Stream Compressible Jets”, *AIAA Journal* 40 (6), 1131-1138, 2002.
- [44] Ko, N.W.M., and Chan, W.T., “Similarity in the Initial Region of Annular Jets: Three Configurations”, *Journal of Fluid Mechanics*, 84 (4), 641-656, 1978.
- [45] Ko, N.W.M., and Chan, W.T., “The Inner Region of Annular Jets”, *Journal of Fluid Mechanics*, 93, 549, 1979.
- [46] Chan, W.T., and Ko, N.W.M., “Coherent Structures in the Outer Mixing Region of Annular Jets”, *Journal of Fluid Mechanics*, 89 (3), 515-533, 1978.
- [47] Aiken N.T., “Aerodynamic and Noise Measurements on a Quasi 2D Augmenter Wing Model with Lobe Type Nozzles”, *NASA, TMX-62*, 237, 1973.
- [48] Aly, M.S. “Prediction of Double Concentric Jets with a 2-equation Turbulence Model”, *Fourth International, Conference on Fluid Mechanics*, vol.1, Alex, Egypt, 105, 1992.
- [49] Becker, H.A., Booth, B.D., “Mixing in the Interaction Zone of Two Free Jets”, *Journal of AICHE*, 21, 1975.
- [50] Corrsin, S., “Investigation of Behavior of Parallel 2-D Air Jet”, *NACA W-90*, 1944.
- [51] Elbanna, H., Gahin, S., “Investigation of Two Plane Parallel jets”, *AIAA J.* 21(7), 986, 1982.
- [52] Grandmaison E.W., Zettler N.L., “Turbulent Mixing in Co-flowing Plane Jets”, *Can. J. Chem. Eng.* 67, 889, 1989.
- [53] Forstall, W. and Shapiro, A.H., “Momentum and Mass Transfer in Coaxial Gas Jets”, *TRANS. ASME, J. Applied Mechanics*, 18, 219-228, 1951.
- [54] Durao, J.H. and Whitelaw, J.H., “Turbulent Mixing in the Developing Region of Coaxial Jets”, *TRANS. ASME, J. Fluids Engineering*, 95, 467-473, 1973.

- [55] Warda, H.A., Kassab, S.Z., Elshorbagy, K.A., Elsaadawy, E.A., "An Experimental Investigation of Free Turbulent Round and Annular jets", *Flow Measurement and Instrumentation*, 10, 1-14, 1999.
- [56] Aly, M.S., Rashed, M.I.I., "Experimental Investigation of an Annular jet", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 37, 155-166, 1991.
- [57] Mostafa A.A., Khalifa M.M., and Shabana E.A., "Experimental and Numerical Investigation of Multiple Rectangular Jets", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 21, 171-178, 2000.
- [58] Ko, N.W.M., and Kwan A.S.H., "The Initial Region of Subsonic Coaxial Jets", *Journal of Fluid Mechanics*, 95, 467-473, 1973.
- [59] Ko, N.W.M., and Lam, K.M., "Flow Structures of a Basic Annular Jet", *AIAA Journal*, 23, 1185, 1985.
- [60] Ko, N.W.M., Lau K.K., and Lam, K.M., "Dynamics of interaction modes in excited Annular Jets", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 17, 319-338, 1998.
- [61] Champagne, F. H., and Wygnanski, I. J., "An Experimental Investigation of Coaxial Turbulent Jets," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 14 (9), 1445–1464, 1971.
- [62] Garimella S.V., and Nenaydyk, B., "Nozzle-Geometry Effects in Liquid Jet Impingement Heat Transfer", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 39, 2915-2923, 1996.
- [63] Colucci, D.W., and Viskanta, R., "Effect of Nozzle Geometry on Local Convective Heat Transfer to a Confined Impinging Air Jet", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 13, 71-80, 1996.
- [64] Maki H., Aida, E., and Akimoto, K., "Fundamental Study on the Annular Impinging Jet", *Transactions of JSME, (B)*, 46, 1959-1966, 1980.

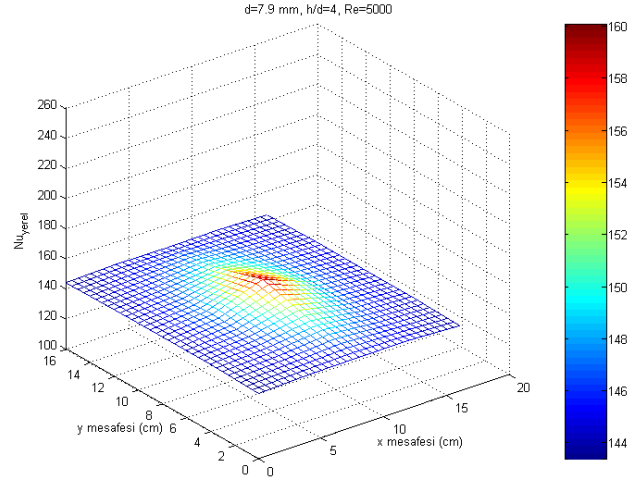
- [65] Maki, H., and Yabe, A., “Heat Transfer by the Annular Impinging Jet”, *Experimental Heat Transfer*, 2, 1-12, 1989
- [66] Maki, H., Yabe, A., “Unsteady Characteristics of the Annular Impinging Jet Flow Field and Reverse Stagnation Point Heat Transfer”, *Proceedings of the National Heat Transfer Conference, Heat Transfer in Convective Flows*, Philadelphia, PA, 107,163-168, 1989.
- [67] Ichimiya K., “Heat Transfer Characteristics of an Annular Turbulent Impinging Jet with a Confined Wall Measured by Thermo Sensitive Liquid Crystal”, *J. Heat and Mass Transfer*, 39, 545-551, 2003.
- [68] Travnicek, Z., Tesar V., “Annular Impinging Jet with Recirculation Zone Expanded by Acoustic Excitation”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 47, 2329-2341, 2004.
- [69] Travnicek, Z., Tesar V., “Annular Synthetic Jet Used for Impinging Flow Mass Transfer”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 46, 3291-3297, 2003.
- [70] Chattopadhyay H., “Numerical Investigations of Heat Transfer from Impinging Annular Jet”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 3197–3201. 2004.
- [71] Okajima A. “Study on Flow-Structure and Control of Coaxial Jets”, *Proceedings of ASME/JSME FEDSM'99 1999 ASME/JSME*, San Francisco, California, p.282, July 18-23, 1999.
- [72] Erdem, D., *Experimental Study on Rectangular Twin Jets*, Doctoral Thesis, ITU Institute of Technology and Science, Istanbul, 2001.
- [73] Sfeir, A.A., “The Velocity and Temperature Fields of Rectangular Jet”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 19, 1289-1297, 1976.
- [74] Yevdjovich, V.M., “Diffusion of Slot Jets with Finite Length-Width Ratio”, *Hydraulic Paper, Colarado State Univ.* 2, 1-40, 1966.
- [75] Sforza, P.M., Steiger, M.H., & Trentacoste, N., “Studies on Three Dimensional Viscous Jets”, *AIAA J.* 4, 800-806, 1966.

- [76] Lee, D.H., Chung, Y.S. and Kim, D.S., “Turbulent Flow and Heat Transfer Measurements on a curved surface with a Fully Developed Round Impinging Jet”, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 18, 160-169, 1997.
- [77] Holmann J.P., *Experimental Methods for Engineers*, 5th edition Mc-Graw Hill Company, New York, 1989.
- [78] White F.M., *Akışkanlar Mekaniği*, Türkçeye çevirenler: Kadir Kırköprü, Erkan Ayder Literatür Yayınevi, İstanbul, 2004.
- [79] Sparrow, E.M., and Gregg, J.L., “A Boundary Layer Treatment of Laminar Film Condensation”, *J. Heat Transfer*, 81, 13, 1959.
- [80] Chen, M.M., “An Analytical Study of Laminar Film Condensation: Part I- Flat Plate”, *J. Heat Transfer*, 83, 48, 1961.
- [81] Asan, H. ve Namlı L., “Deneysel Isı Transferi ve Basınç Kaybı Çalışmalarında Belirsizlik Analizi”, *ULIBTK’97, 11. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Edirne, 369-378, 17-19 Eylül 1997.

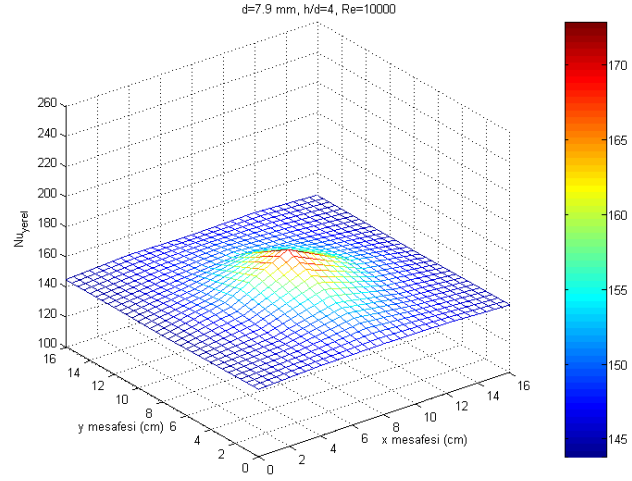
ÖZGEÇMİŞ

Nevin ÇELİK, 14/02/1974 tarihinde Elazığ'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Elazığ'da tamamladı. 1993 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı. 1997 yılında aynı bölümden mezun oldu. Aynı yıl Elazığ Tunç-Teknik Soğutma firmasında proje ve satış mühendisi olarak çalışmaya başladı. 1998 yılında Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek lisans yapmaya başladı. 1999 yılında aynı bölüme Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2000 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlayarak, doktora eğitimine başladı. Halen Fırat Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak çalışan Nevin ÇELİK, İngilizce ve Almanca bilmektedir.

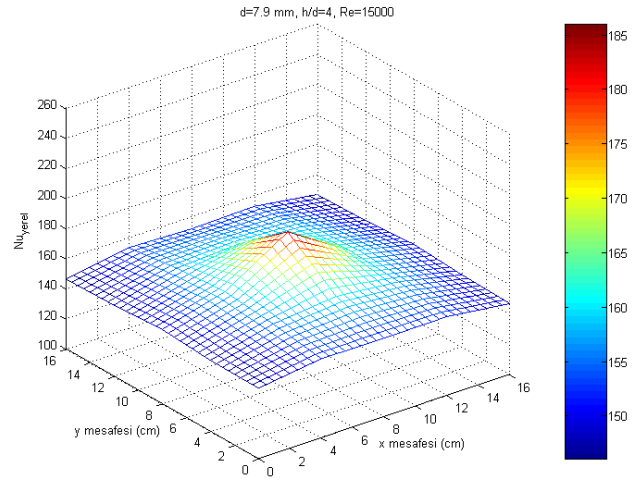
EK- A. DÜZ DAİRESEL LÜLELERDE YEREL NU SAYILARINA AİT GRAFİKLER
d=7.9 mm Çaplı Lüle İçin Yerel Nu Sayılarına Ait Grafikler



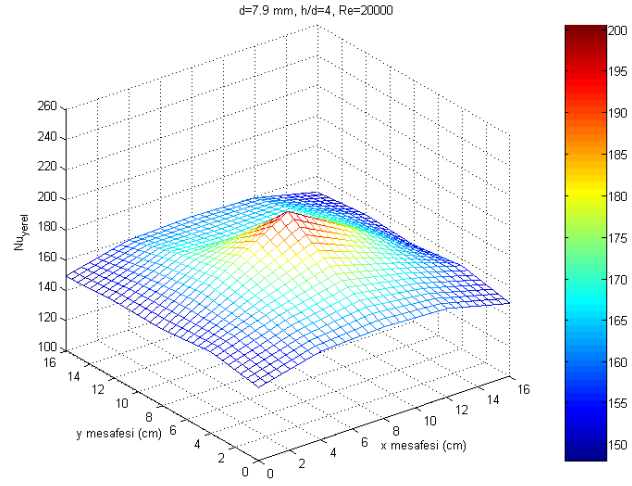
Şekil A. 1. d=7.9 mm, h/d=4, Re=5000 için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



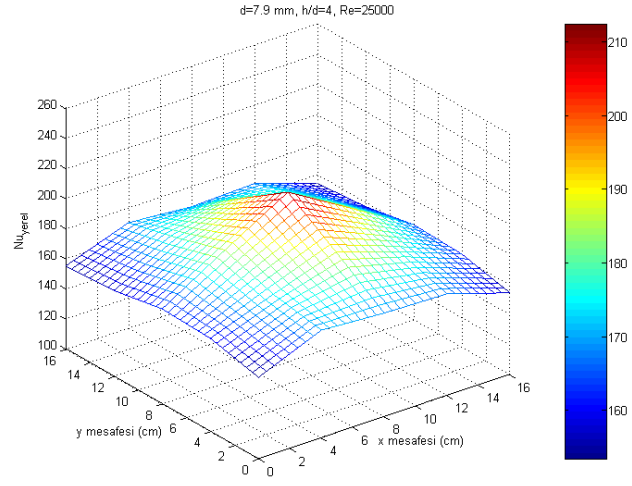
Şekil A. 2. d=7.9 mm, h/d=4, Re=10000 için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



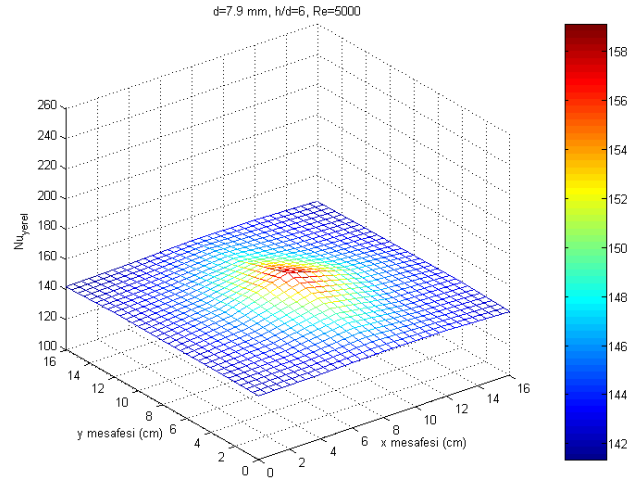
Şekil A. 3. d=7.9 mm, h/d=4, Re=15000 için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



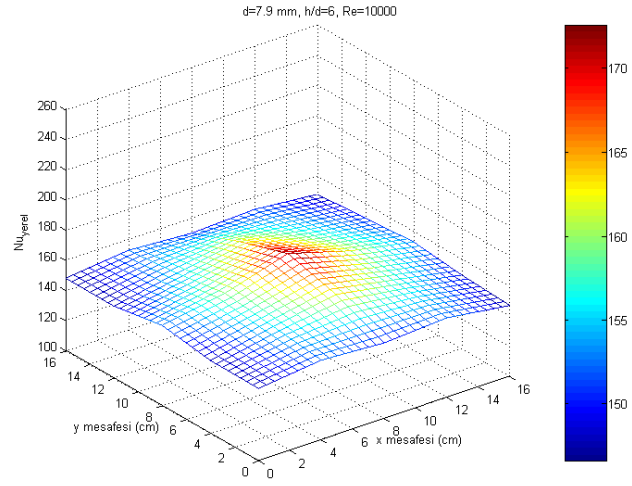
Şekil A. 4. $d=7.9$ mm, $h/d=4$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



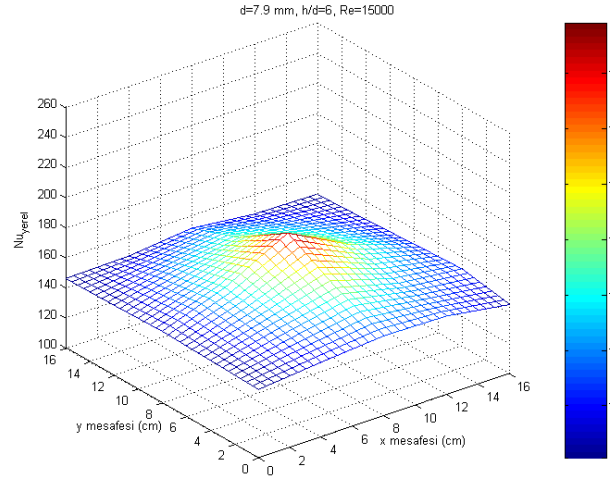
Şekil A. 5. $d=7.9$ mm, $h/d=4$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



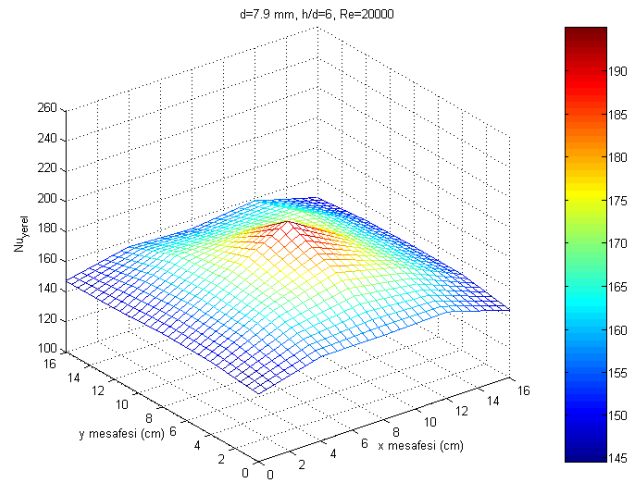
Şekil A. 6. $d=7.9$ mm, $h/d=6$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



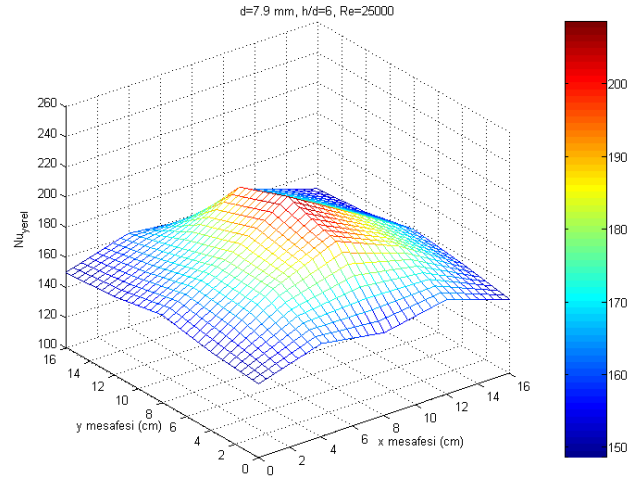
Şekil A. 7. $d=7.9$ mm, $h/d=6$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



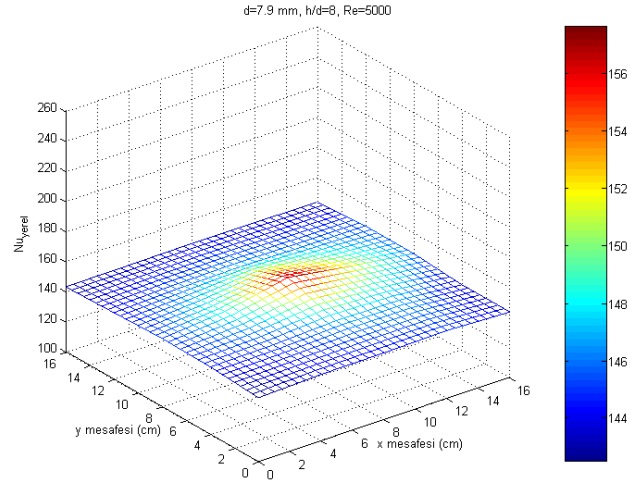
Şekil A. 8. $d=7.9$ mm, $h/d=6$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



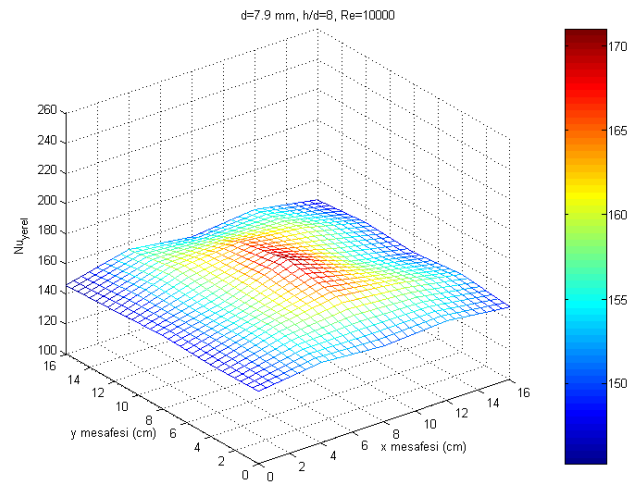
Şekil A. 9. $d=7.9$ mm, $h/d=6$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



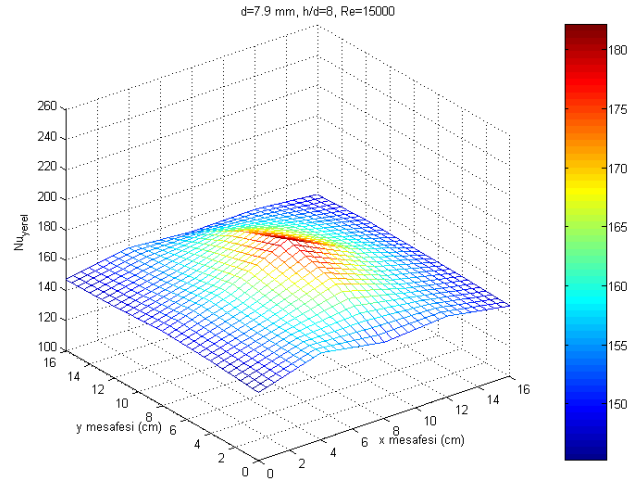
Şekil A. 10. $d=7.9$ mm, $h/d=6$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



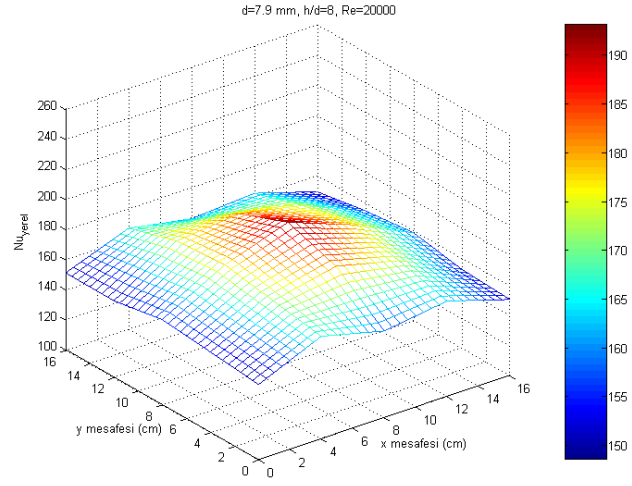
Şekil A. 11. $d=7.9$ mm, $h/d=8$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



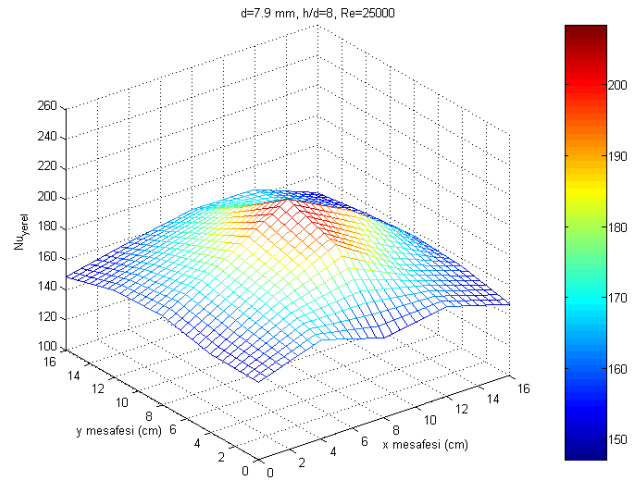
Şekil A. 12. $d=7.9$ mm, $h/d=8$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



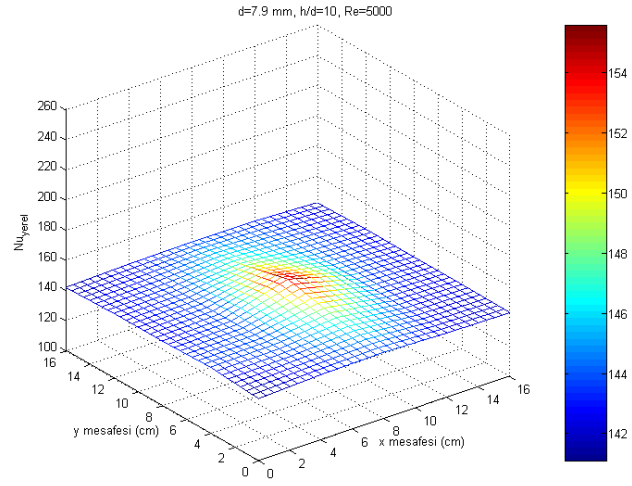
Şekil A. 13. d=7.9 mm, h/d=8, Re=5000 için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



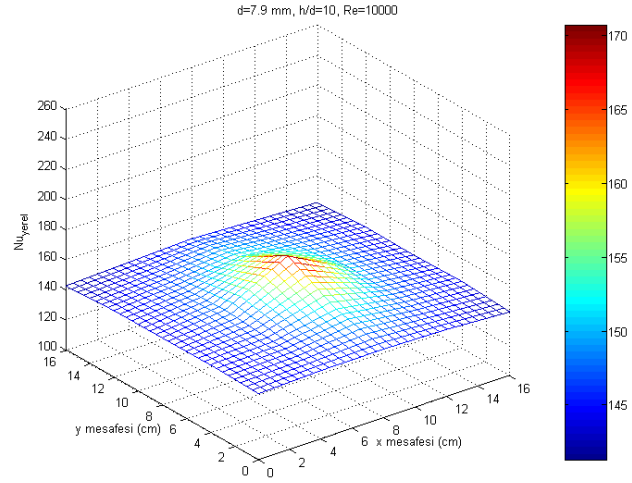
Şekil A. 14. d=7.9 mm, h/d=8, Re=20000 için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



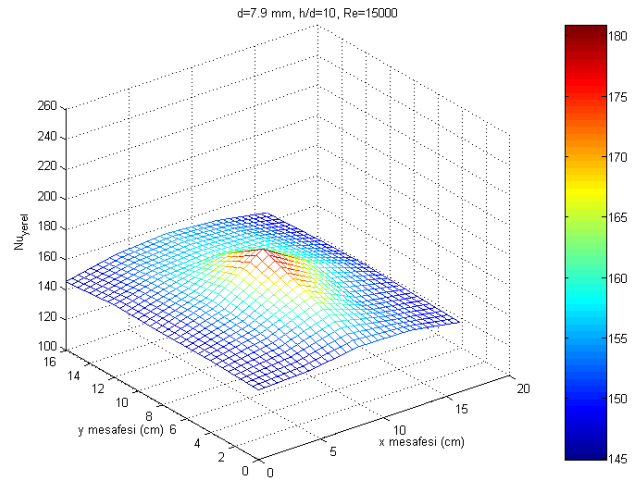
Şekil A. 15. d=7.9 mm, h/d=8, Re=25000 için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



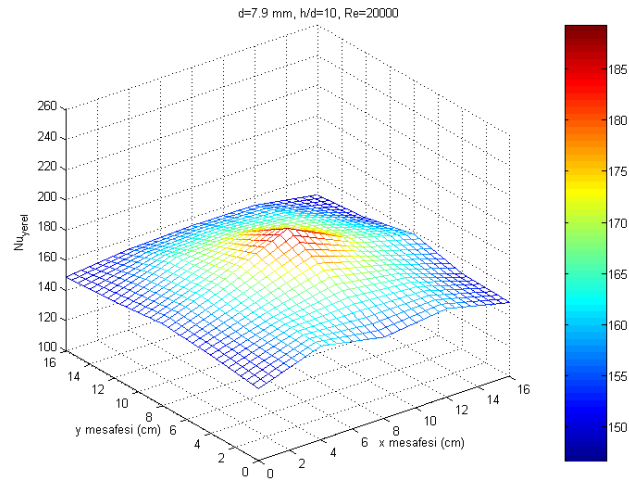
Şekil A. 16. $d=7.9$ mm, $h/d=10$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



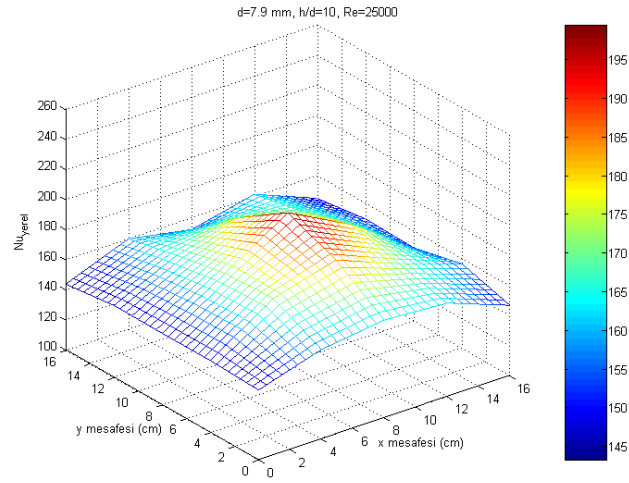
Şekil A. 17. $d=7.9$ mm, $h/d=10$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



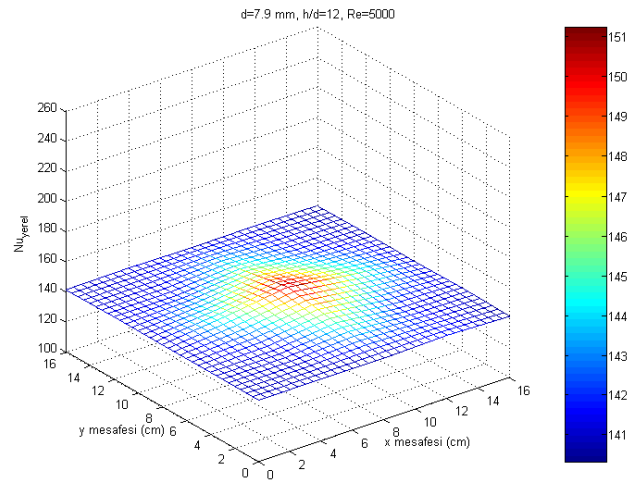
Şekil A. 5.18. $d=7.9$ mm, $h/d=10$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



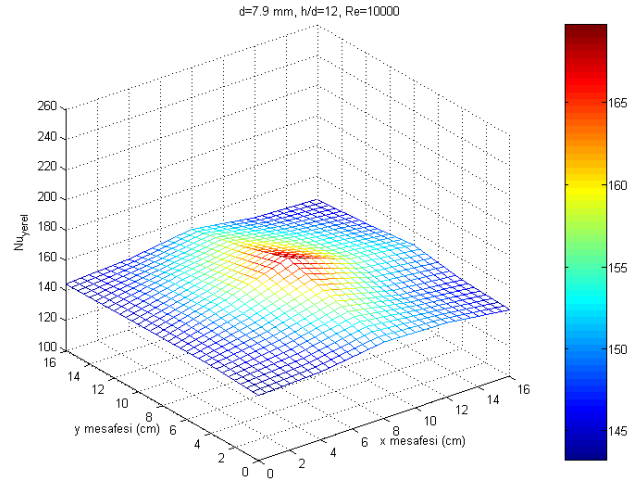
Şekil A. 19. $d=7.9$ mm, $h/d=10$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



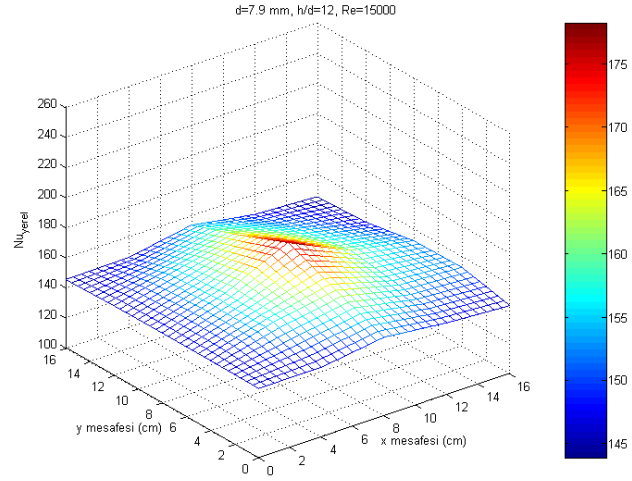
Şekil A. 20. $d=7.9$ mm, $h/d=10$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



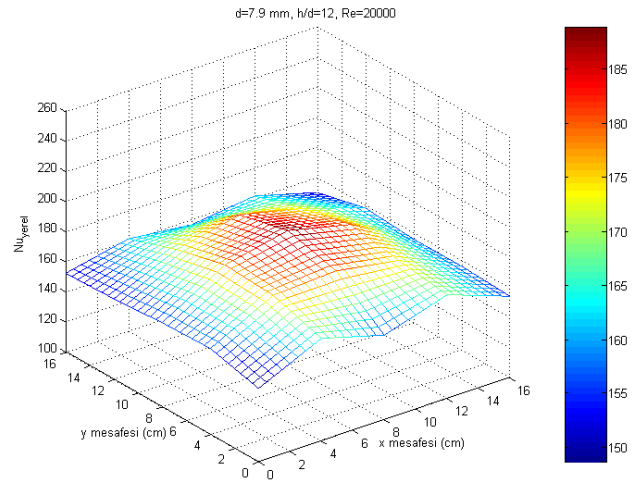
Şekil A. 21. $d=7.9$ mm, $h/d=12$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



Şekil A. 22. $d=7.9$ mm, $h/d=12$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı

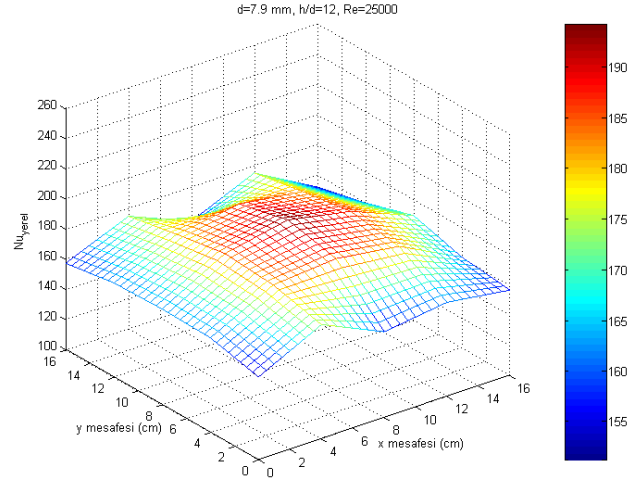


Şekil A. 23. $d=7.9$ mm, $h/d=12$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı



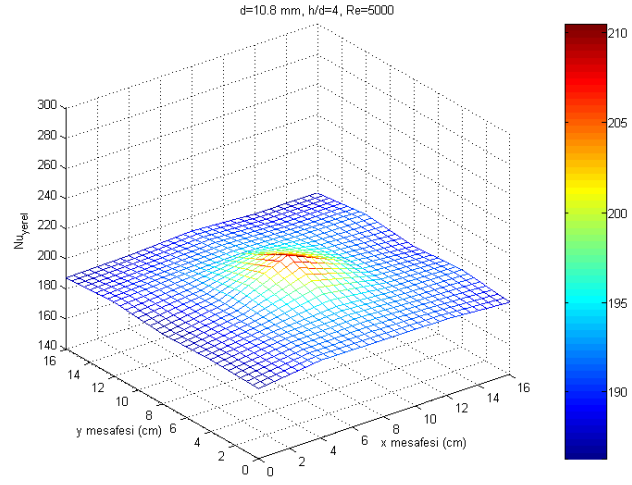
Şekil A. 24. $d=7.9$ mm, $h/d=12$,

Re=20000 için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı

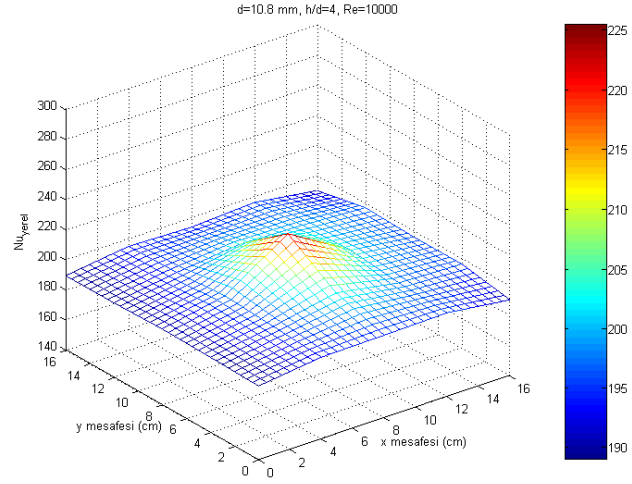


Şekil A. 25. d=7.9 mm, h/d=12, Re=5000 için yerel Nu sayısı (Nu_{yerel}) dağılımı

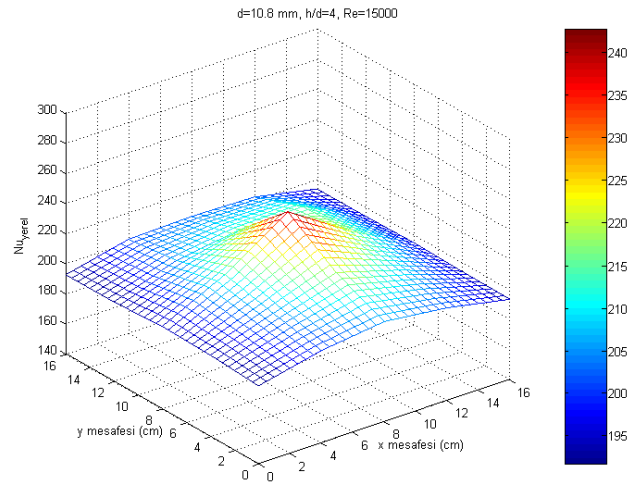
d=10.8 mm Çaplı Lüle İçin Yerel Nu Sayılarına Ait Grafikler



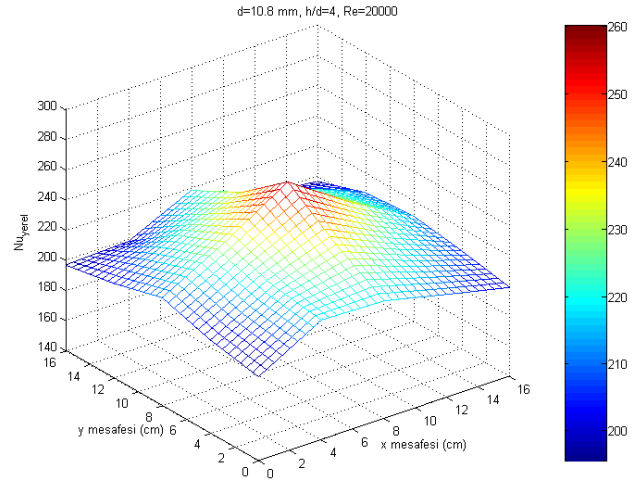
Şekil A. 26. d=10.8 mm, h/d=4, Re=5000 için yerel Nu sayısı dağılımı



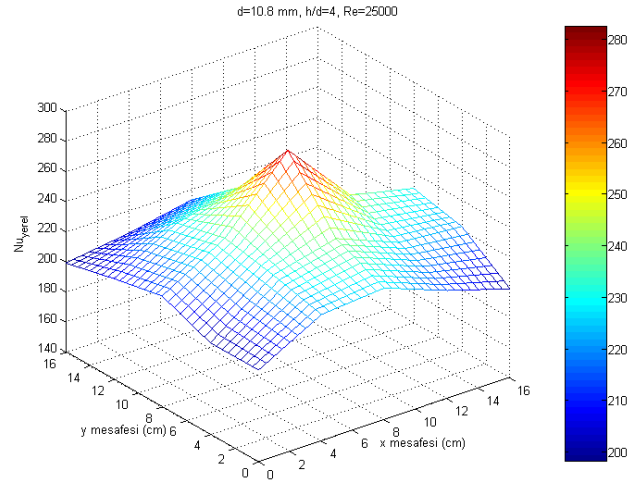
Şekil A. 27. d=10.8 mm, h/d=4, Re=10000 için yerel Nu sayısı dağılımı



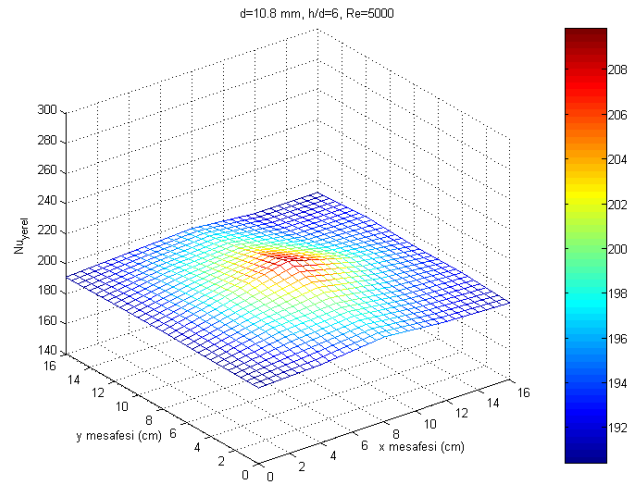
Şekil A. 28. d=10.8 mm, h/d=4, Re=15000 için yerel Nu sayısı dağılımı



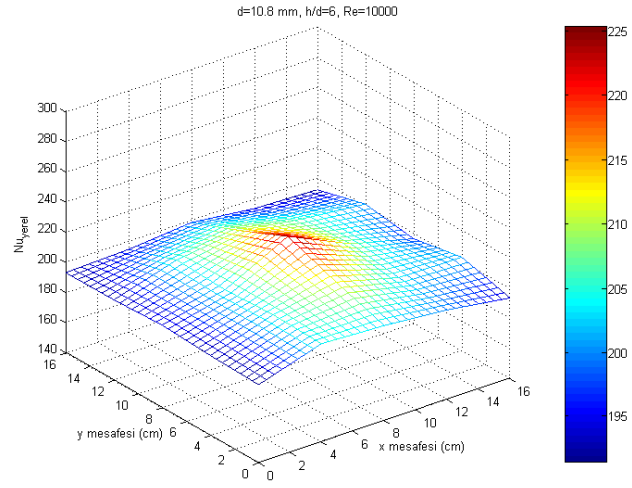
Şekil A. 29. $d=10.8 \text{ mm}$, $h/d=4$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



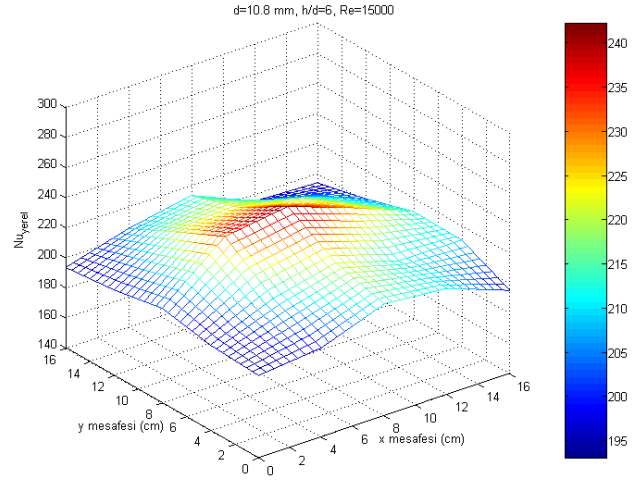
Şekil A. 30. $d=10.8 \text{ mm}$, $h/d=4$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



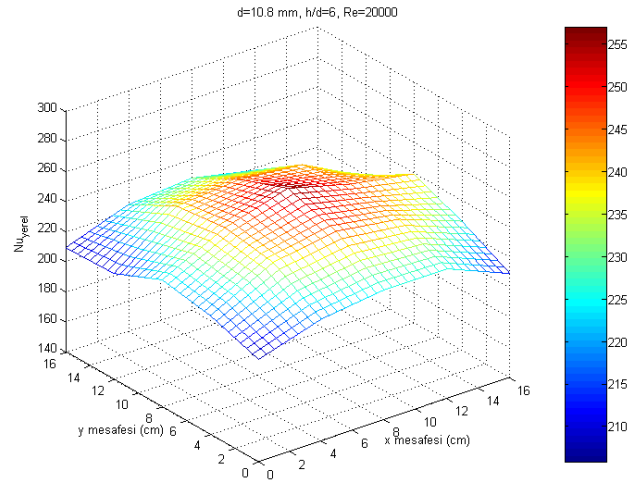
Şekil A. 31. $d=10.8 \text{ mm}$, $h/d=6$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



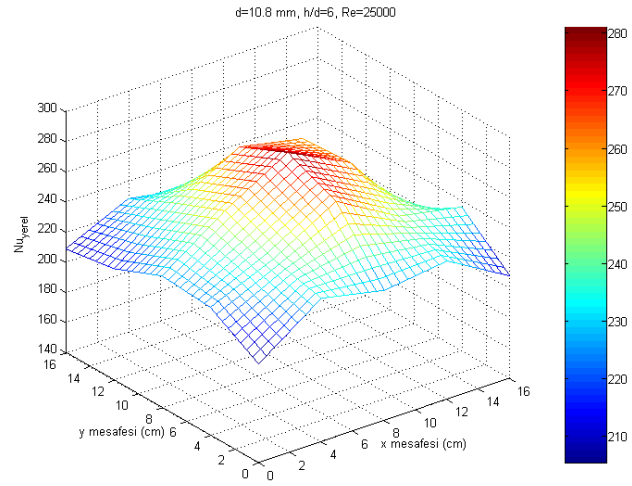
Şekil A. 32. $d=10.8 \text{ mm}$, $h/d=6$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



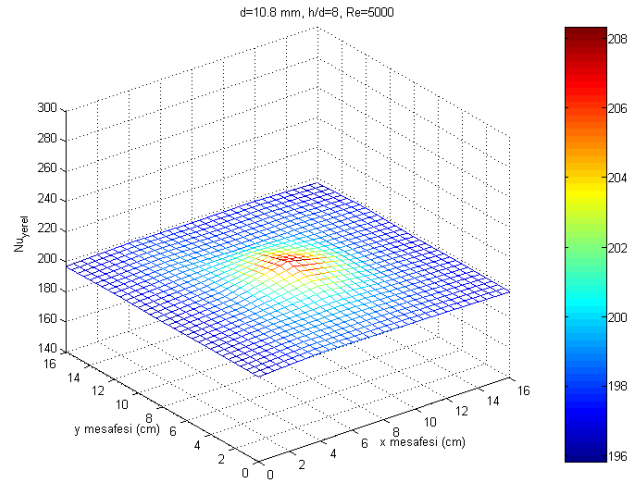
Şekil A. 33. $d=10.8 \text{ mm}$, $h/d=6$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



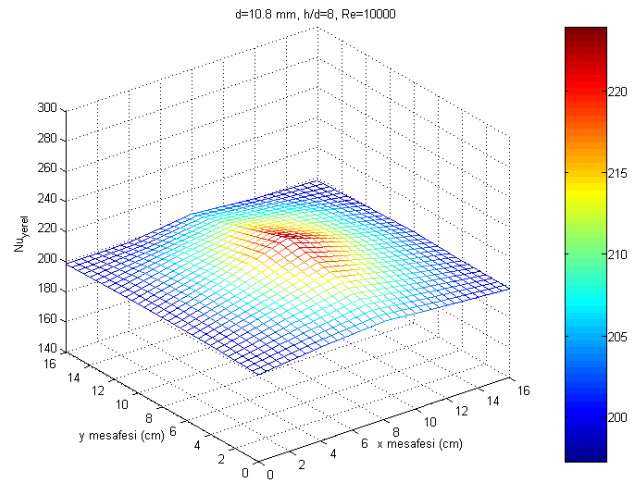
Şekil A. 34. $d=10.8 \text{ mm}$, $h/d=6$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



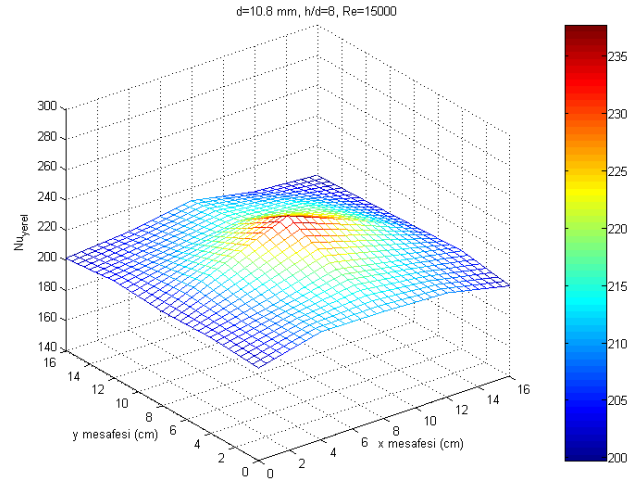
Şekil A. 35. $d=10.8$ mm, $h/d=6$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



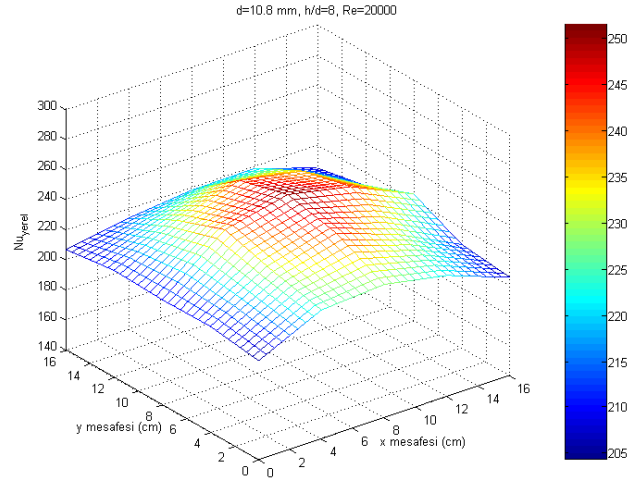
Şekil A. 36. $d=10.8$ mm, $h/d=8$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



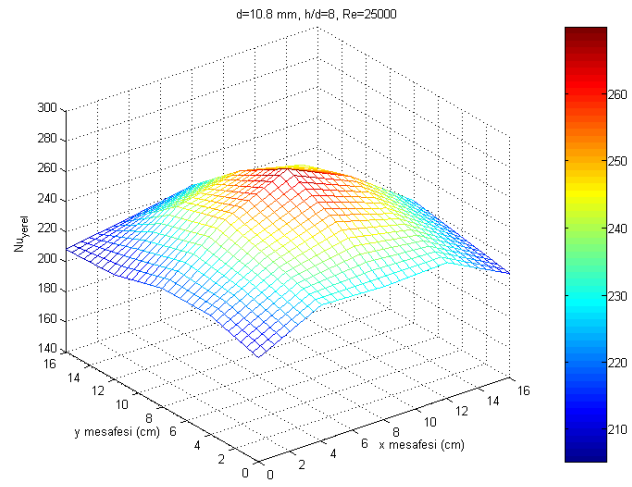
Şekil A. 37. $d=10.8$ mm, $h/d=8$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



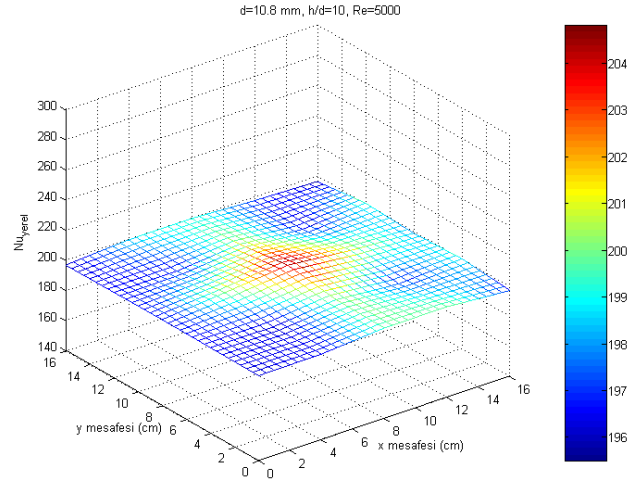
Şekil A. 38. $d=10.8$ mm, $h/d=8$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



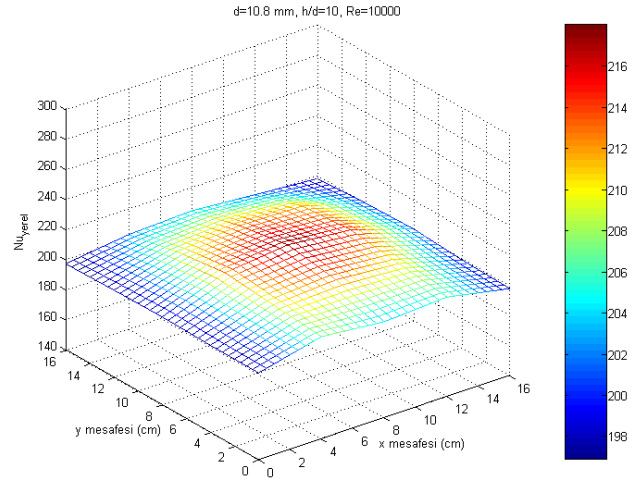
Şekil A. 39. $d=10.8$ mm, $h/d=8$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



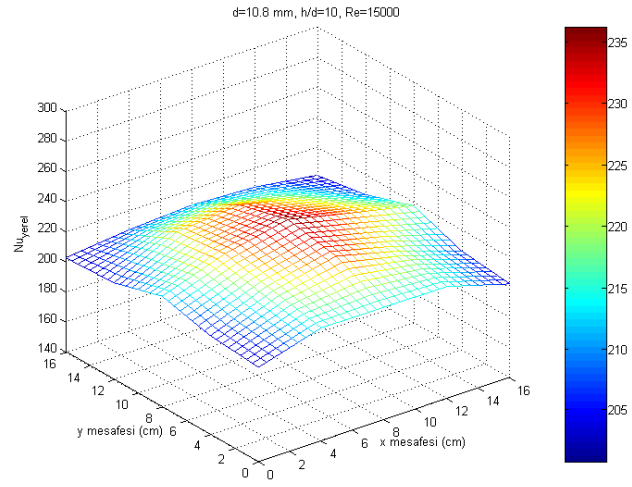
Şekil A. 40. $d=10.8$ mm, $h/d=8$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



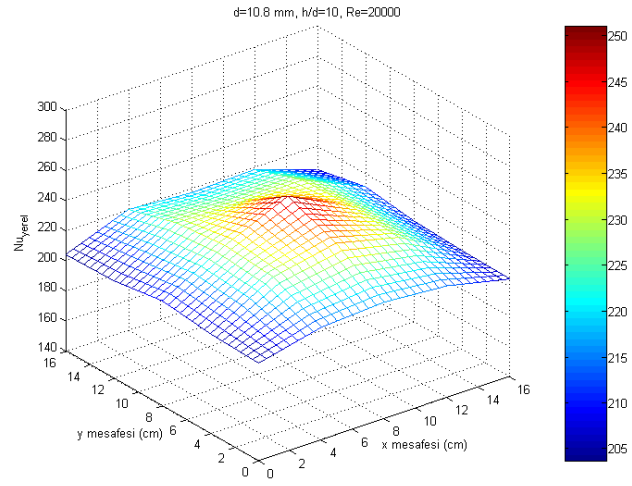
Şekil A. 41. $d=10.8$ mm, $h/d=10$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



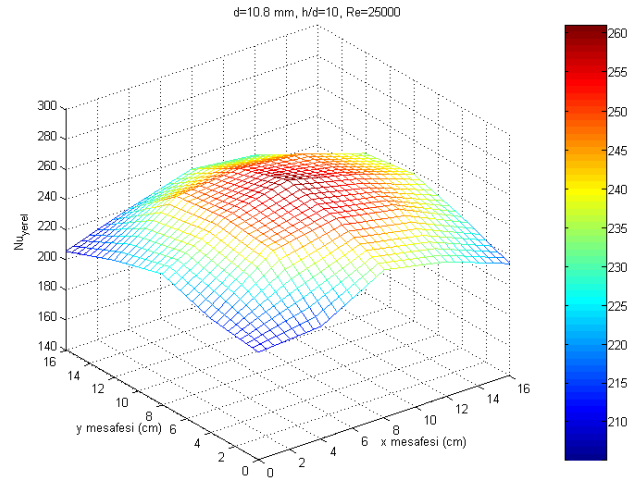
Şekil A. 42. $d=10.8$ mm, $h/d=10$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



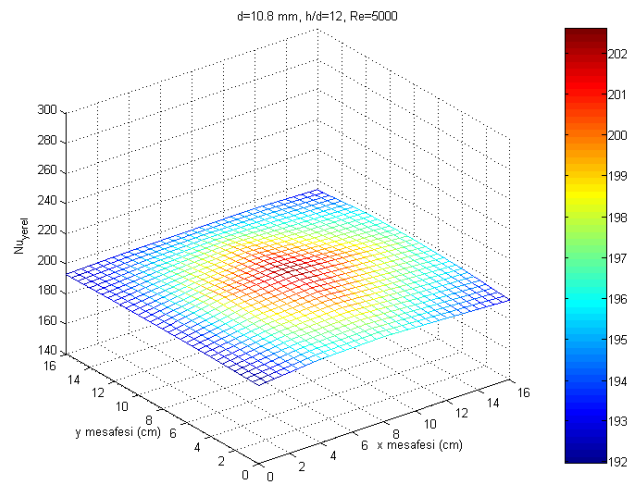
Şekil A. 43. $d=10.8$ mm, $h/d=10$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



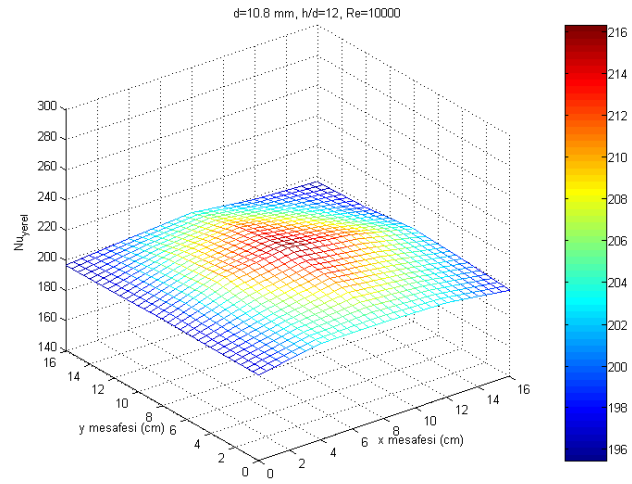
Şekil A. 44. $d=10.8$ mm, $h/d=10$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



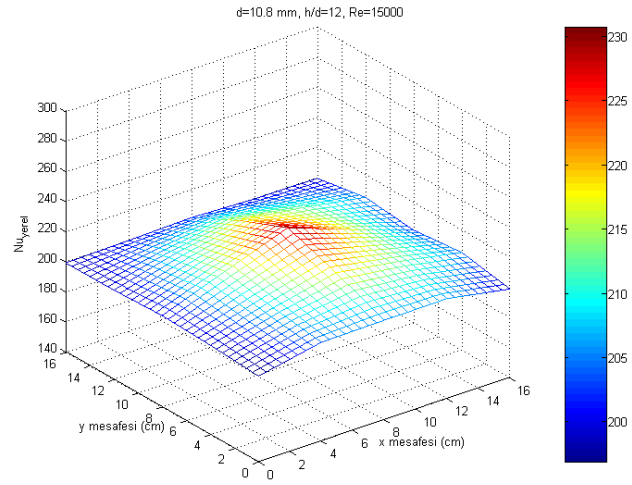
Şekil A. 45. $d=10.8$ mm, $h/d=10$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



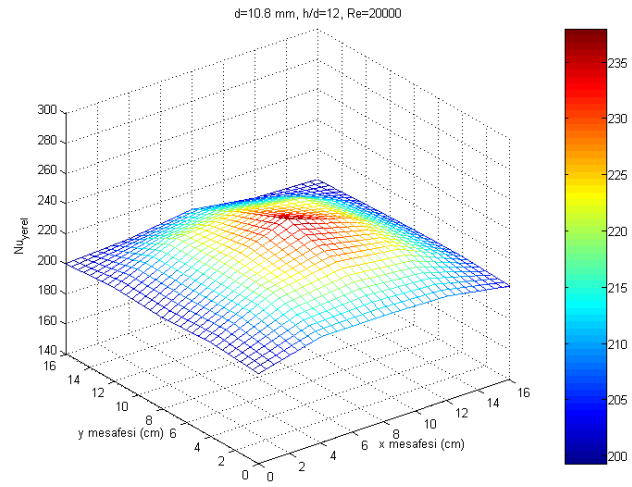
Şekil A. 46. $d=10.8$ mm, $h/d=12$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



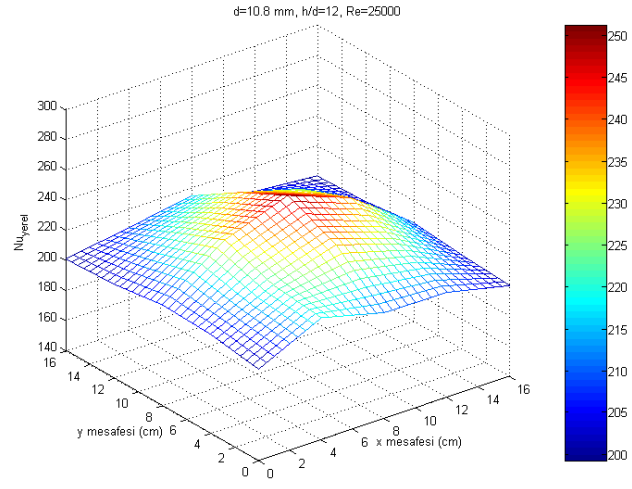
Şekil A. 47. $d=10.8$ mm, $h/d=12$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



Şekil A. 48. $d=10.8$ mm, $h/d=12$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

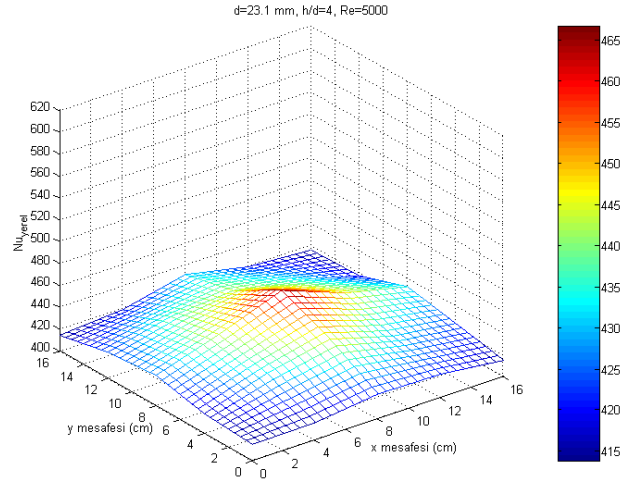


Şekil A. 49. $d=10.8$ mm, $h/d=12$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

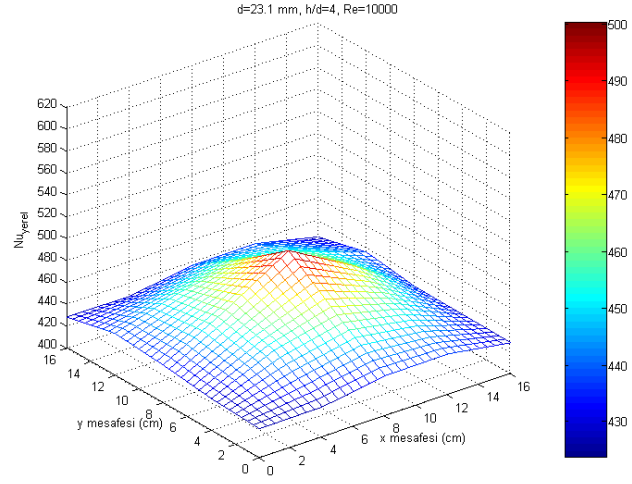


Şekil A. 50. $d=10.8 \text{ mm}$, $h/d=12$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

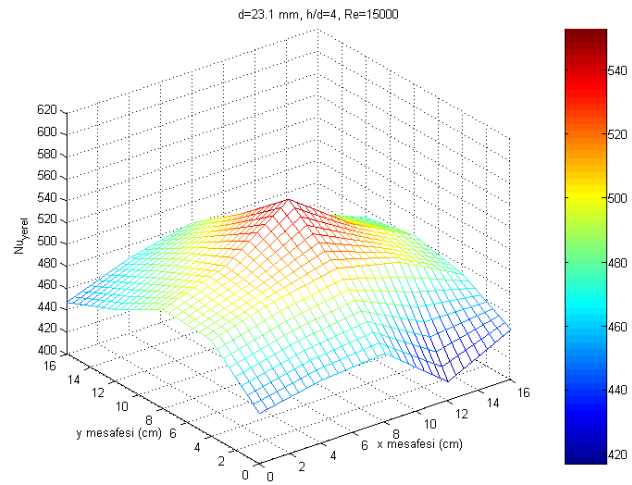
d=23.1 mm Çaplı Lüle İçin Yerel Nu Sayılarına Ait Grafikler



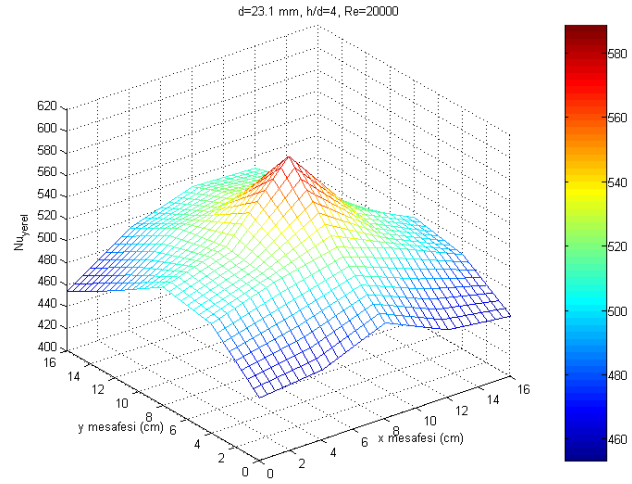
Şekil A. 51. d=23.1 mm, h/d=4, Re=5000 için yerel Nu sayısı dağılımı



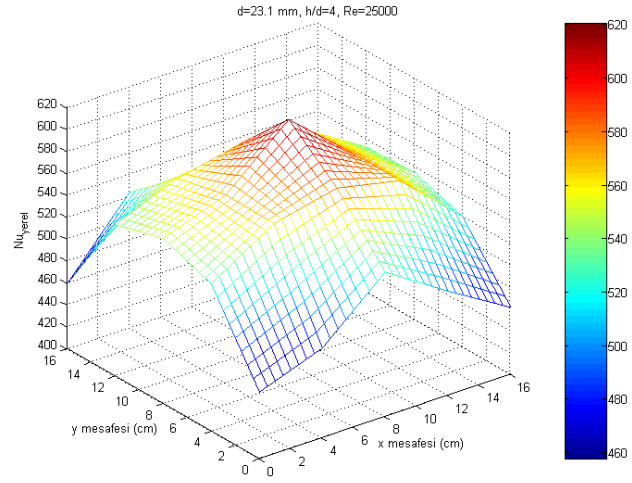
Şekil A. 52. d=23.1 mm, h/d=4, Re=10000 için yerel Nu sayısı dağılımı



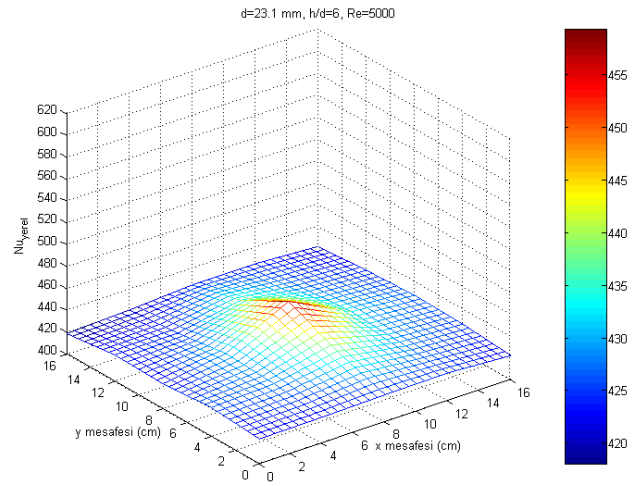
Şekil A. 53. d=23.1 mm, h/d=4, Re=15000 için yerel Nu sayısı dağılımı



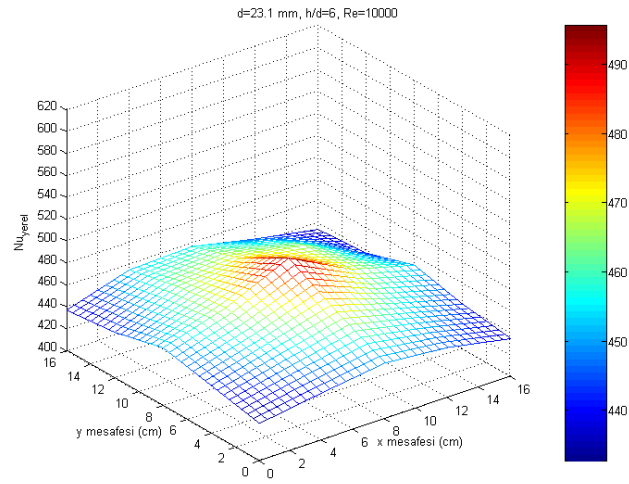
Şekil A. 54. $d=23.1 \text{ mm}$, $h/d=4$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



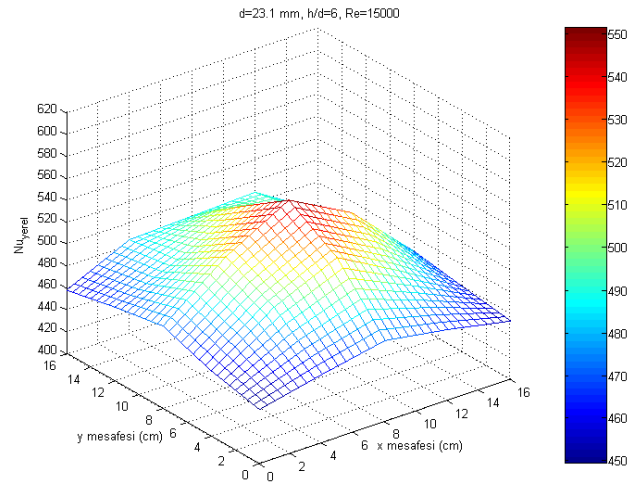
Şekil A. 55. $d=23.1 \text{ mm}$, $h/d=4$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



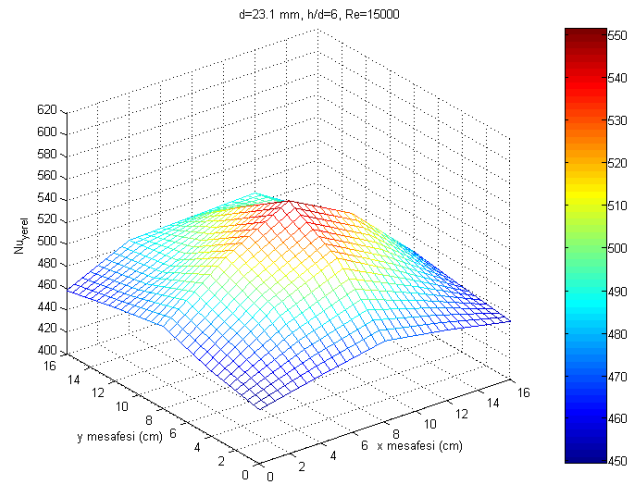
Şekil A. 56. $d=23.1 \text{ mm}$, $h/d=6$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



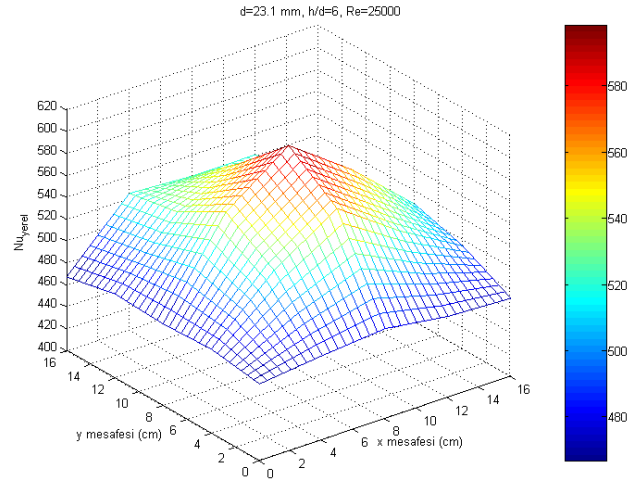
Şekil A. 57. $d=23.1 \text{ mm}$, $h/d=6$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



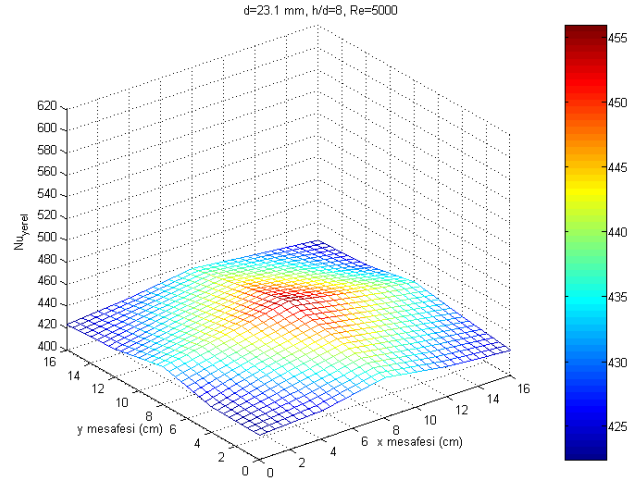
Şekil A. 58. $d=23.1 \text{ mm}$, $h/d=6$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



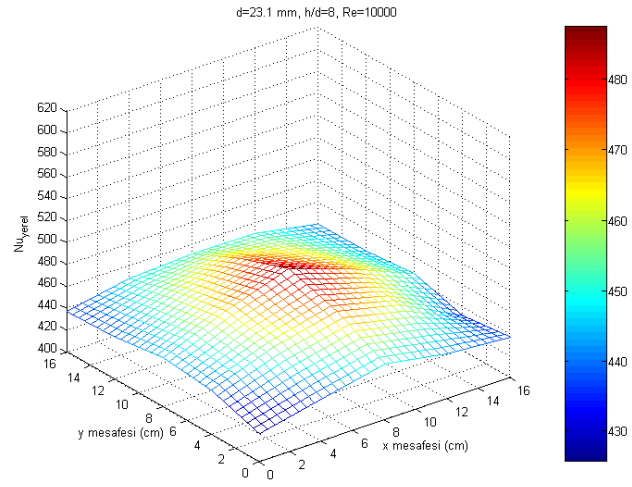
Şekil A. 59. $d=23.1 \text{ mm}$, $h/d=6$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



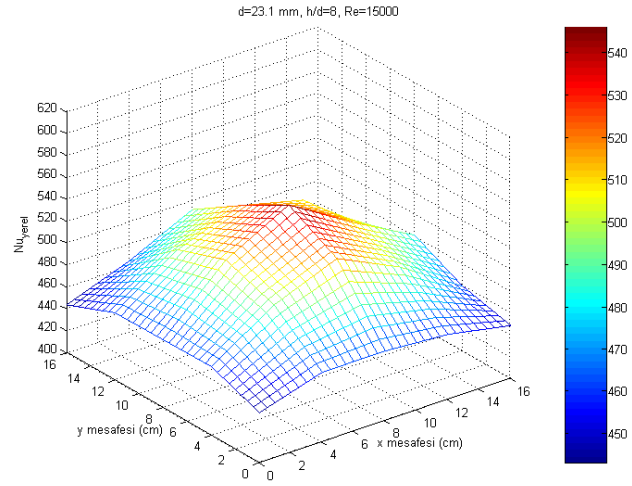
Şekil A. 60. $d=23.1 \text{ mm}, h/d=6, Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



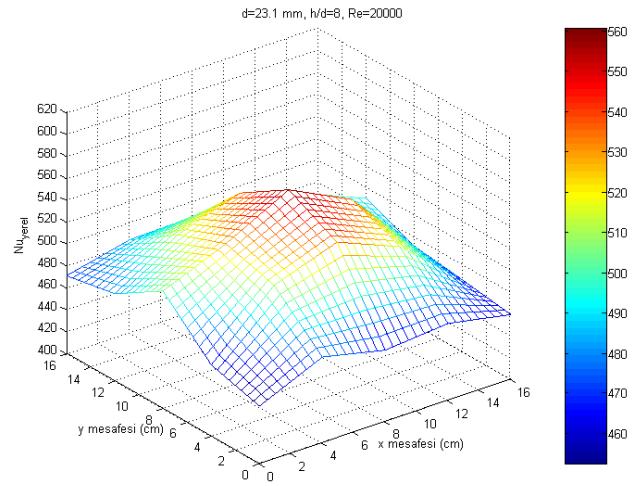
Şekil A. 61. $d=23.1 \text{ mm}, h/d=8, Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



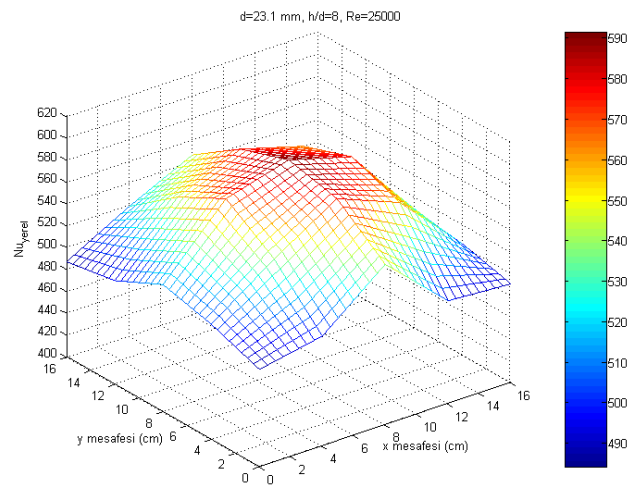
Şekil A. 62. $d=23.1 \text{ mm}, h/d=8, Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



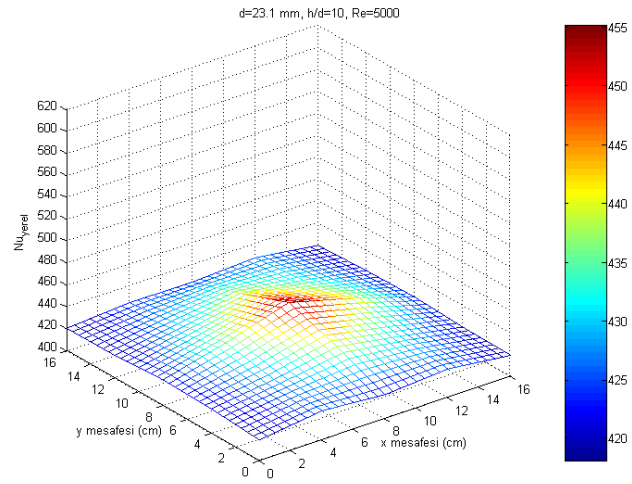
Şekil A. 63. $d=23.1$ mm, $h/d=8$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



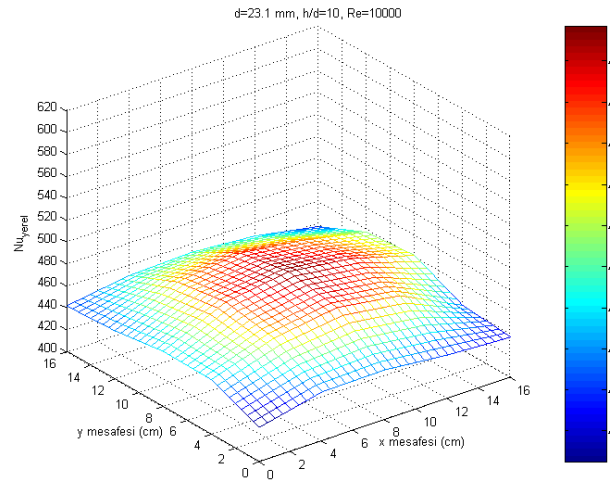
Şekil A. 64. $d=23.1$ mm, $h/d=8$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



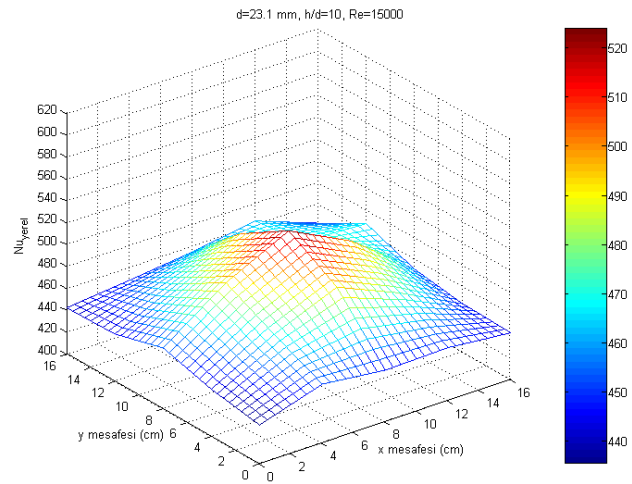
Şekil A. 65. $d=23.1$ mm, $h/d=8$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



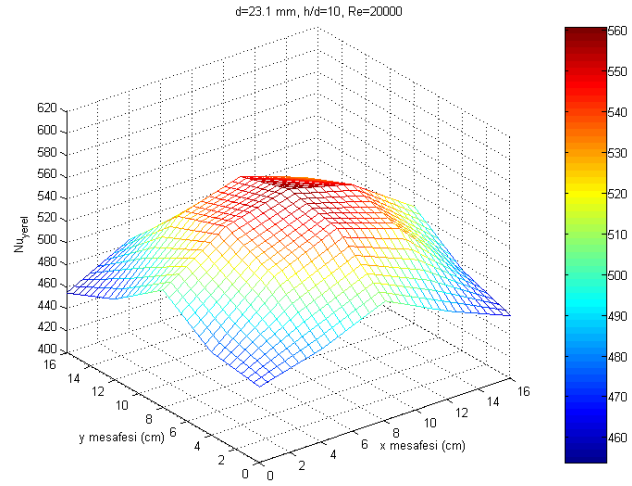
Şekil A. 66. $d=23.1 \text{ mm}$, $h/d=10$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



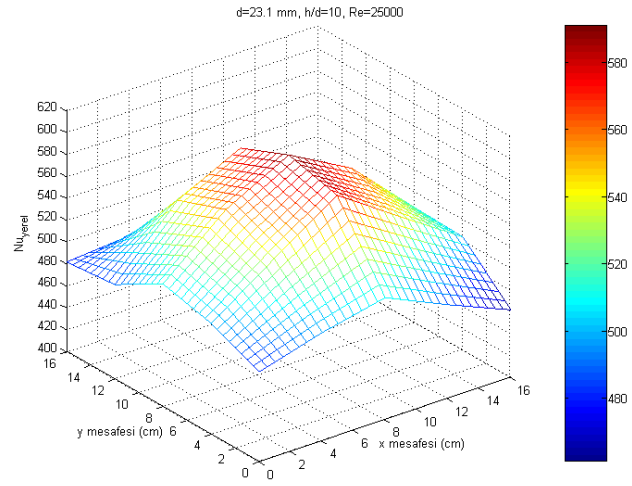
Şekil A. 67. $d=23.1 \text{ mm}$, $h/d=10$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



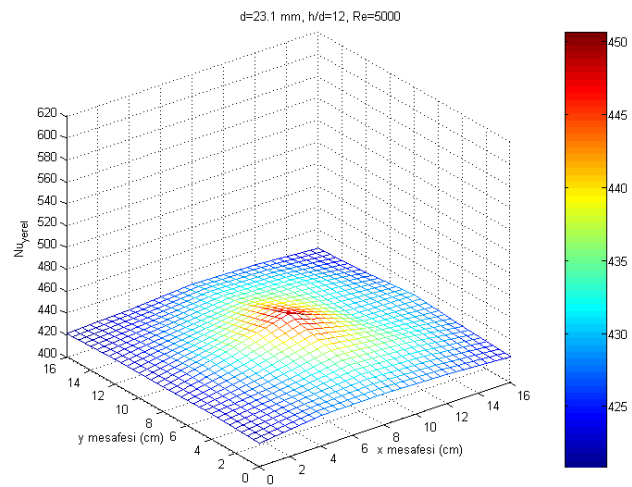
Şekil A. 68. $d=23.1 \text{ mm}$, $h/d=10$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



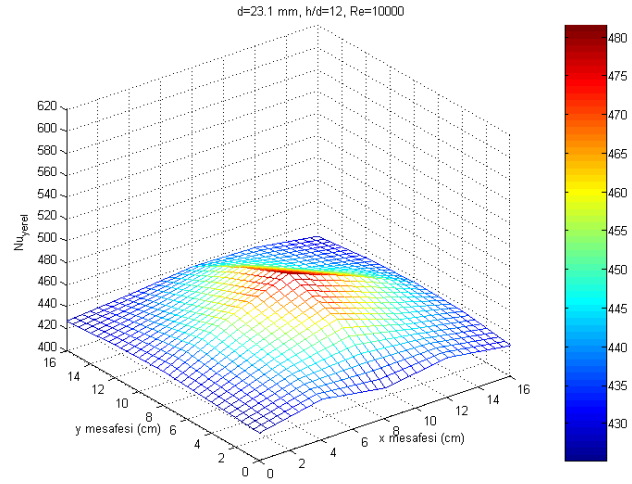
Şekil A. 69. $d=23.1$ mm, $h/d=10$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



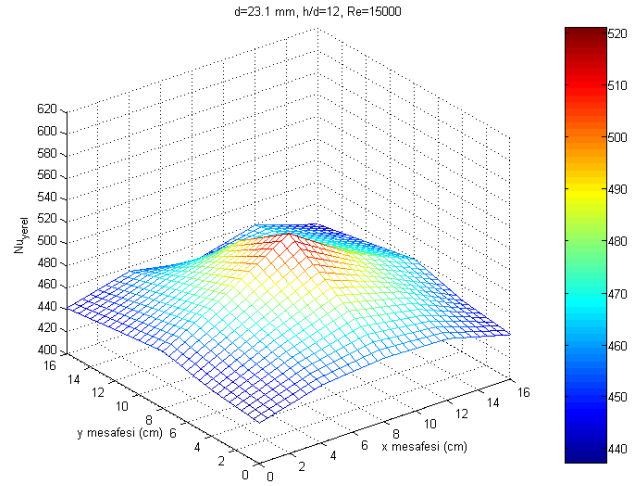
Şekil A. 70. $d=23.1$ mm, $h/d=10$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



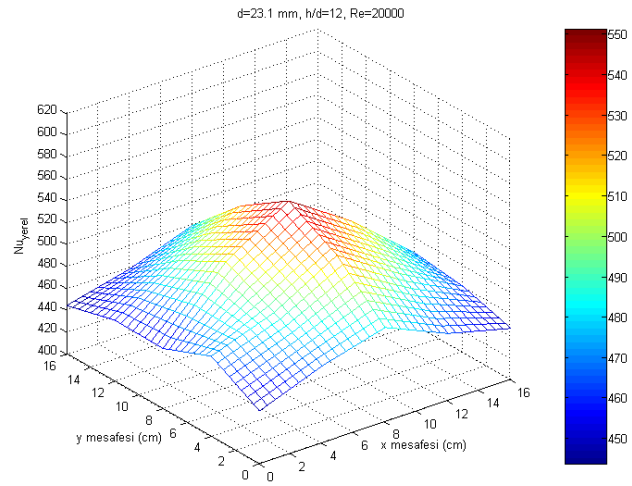
Şekil A. 71. $d=23.1$ mm, $h/d=12$, $Re=5000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



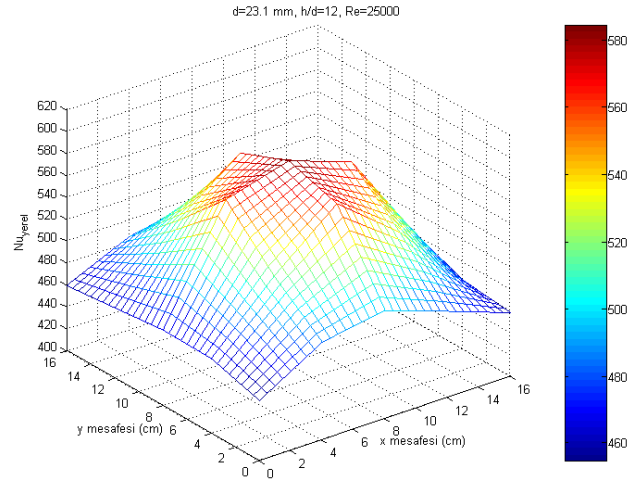
Şekil A. 72. $d=23.1 \text{ mm}$, $h/d=12$, $Re=10000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



Şekil A. 73. $d=23.1 \text{ mm}$, $h/d=12$, $Re=15000$ için yerel Nu sayısı dağılımı



Şekil A. 74. $d=23.1 \text{ mm}$, $h/d=12$, $Re=20000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

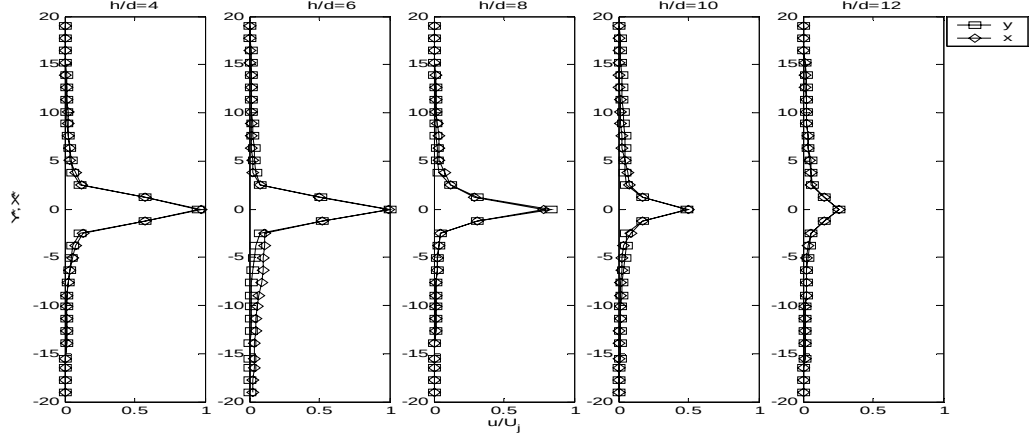


Şekil A. 75. $d=23.1 \text{ mm}$, $h/d=12$, $Re=25000$ için yerel Nu sayısı dağılımı

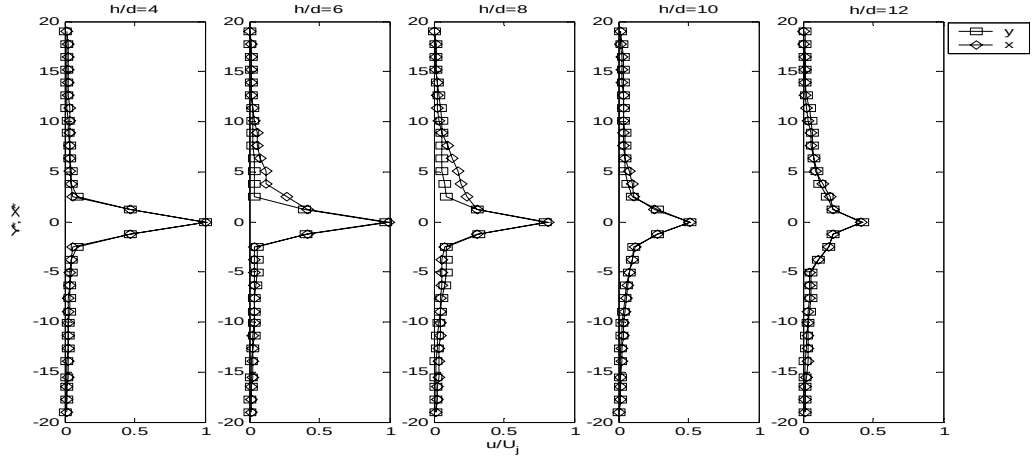
EK-B. DÜZ DAİRESEL LÜLELERE AİT AKIM KARAKTERİSTİKLERİ

B.1. Çarpma Bölgesinde Yapılan Akış Dinamiği Testleri

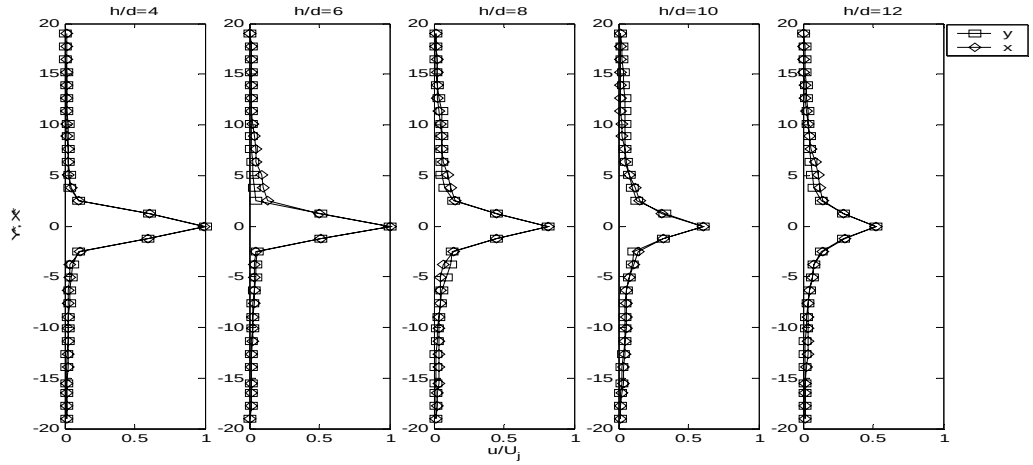
d=7.9 mm Çaplı Lülede Ölçülen Ortalama Hız ve Türbülans Şiddeti Değerleri



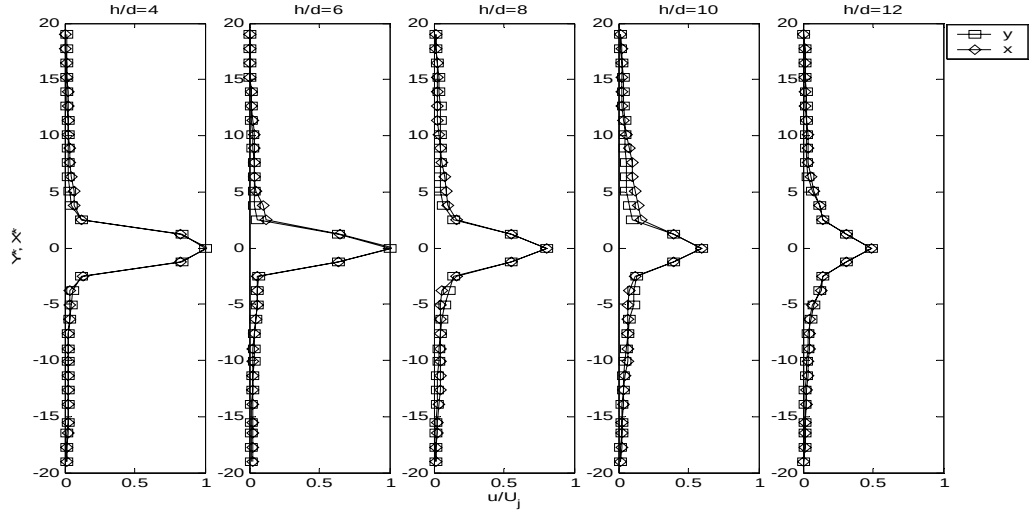
Şekil B.1. d=7.9 mm, Re=5000 iken h/d ile ortalama hızın değişimi, $U_j=10.82$ m/s



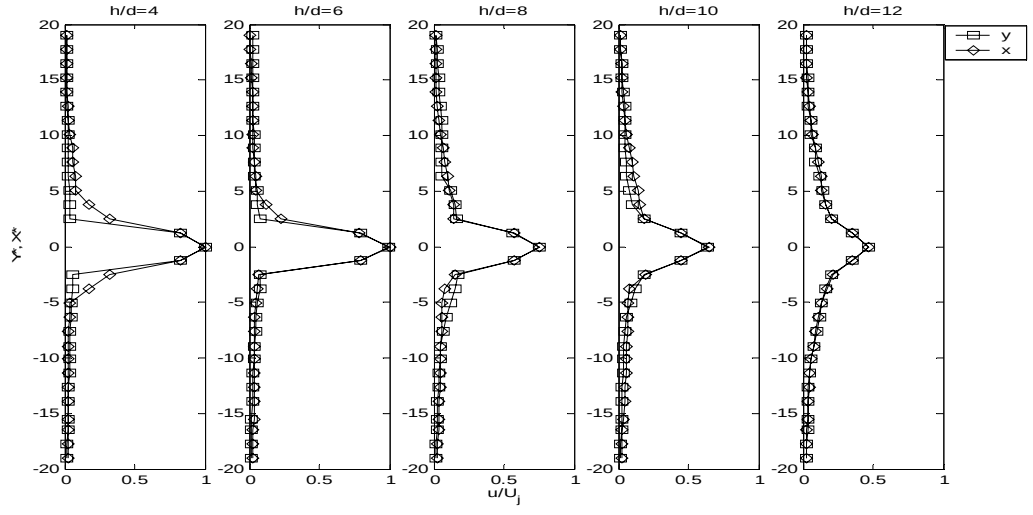
Şekil B. 2. d=7.9 mm, Re=10000 iken h/d ile ortalama hızın değişimi, $U_j=20.63$ m/s



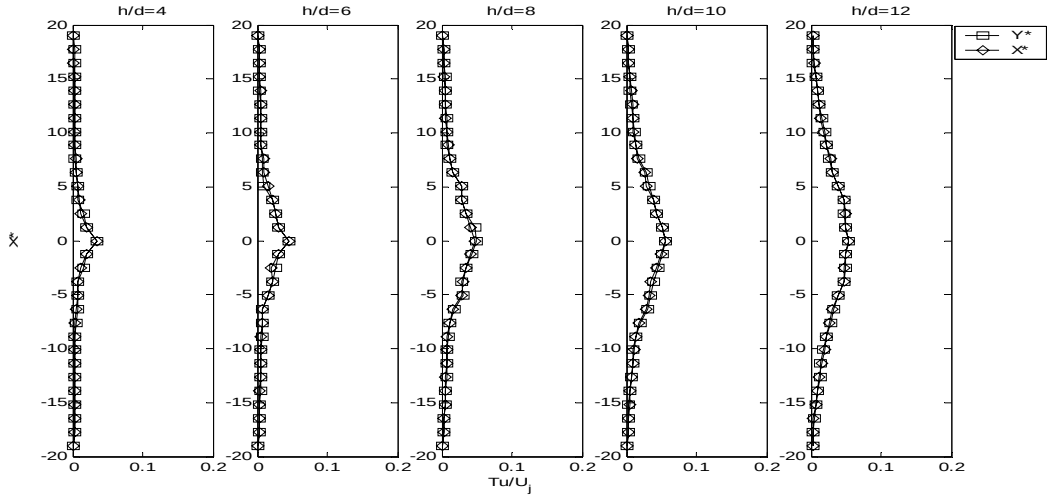
Şekil B. 3. d=7.9 mm, Re=15000 iken h/d ile ortalama hızın değişimi, $U_j=32.56$ m/s



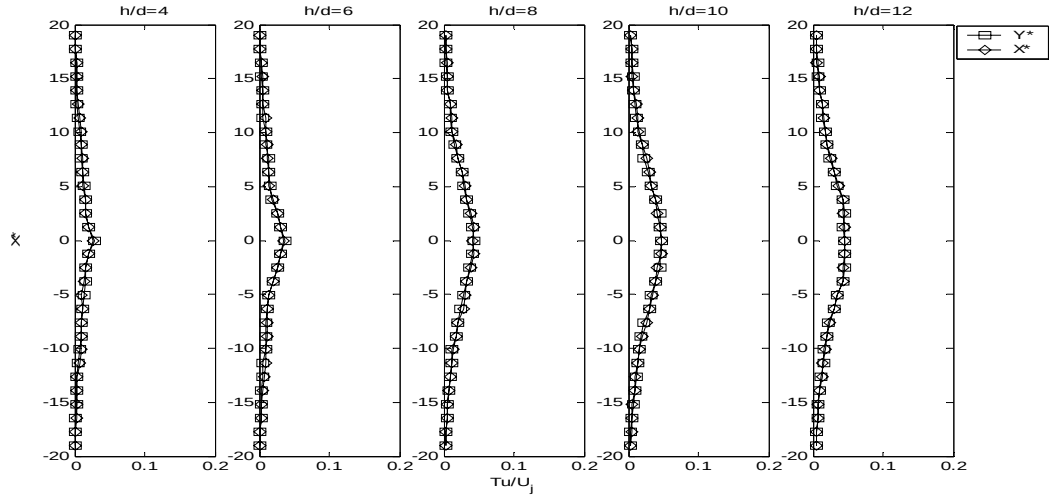
Şekil B. 4. $d=7.9$ mm, $Re=20000$ iken h/d ile ortalama hızın değişimi, $U_j=44.24$



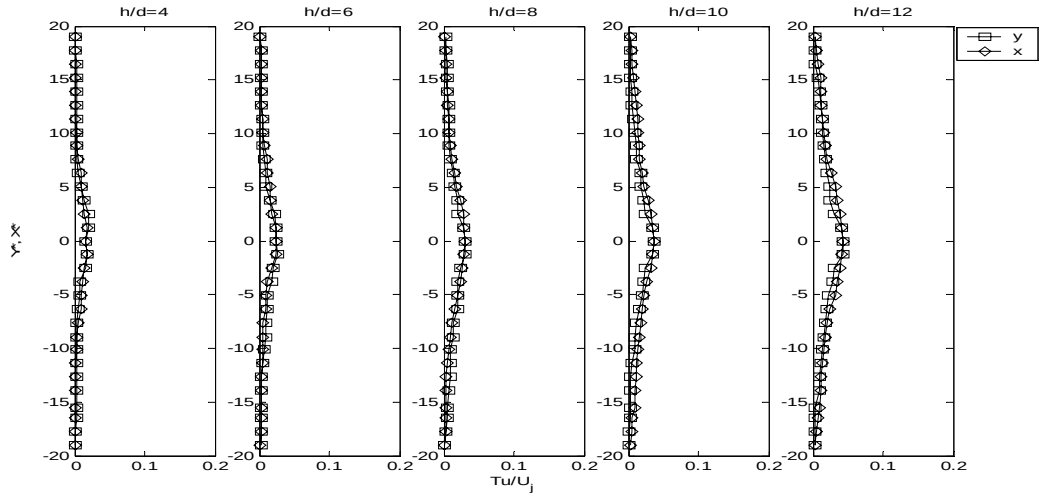
Şekil B. 5. $d=7.9$ mm, $Re=25000$ iken h/d ile ortalama hızın değişimi, $U_j=55.07$ m/s



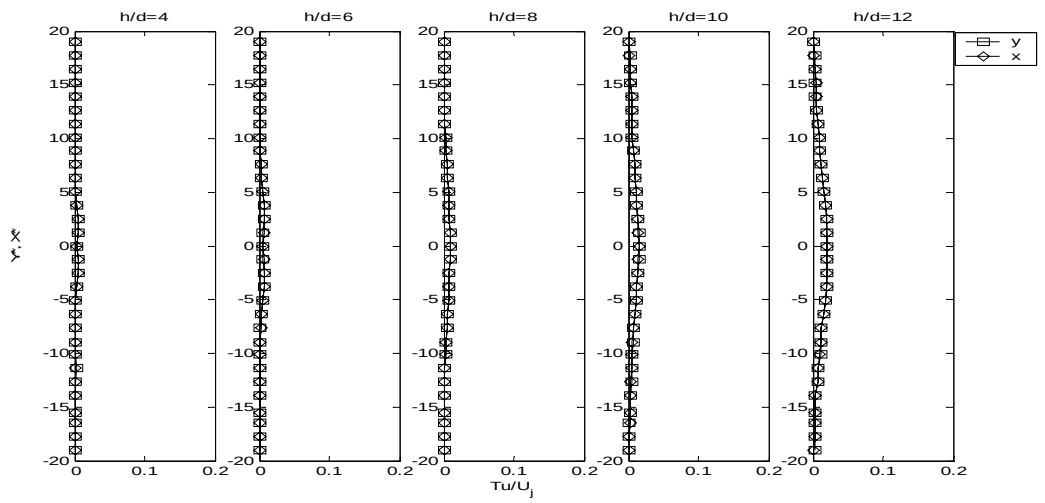
Şekil B. 6. $d=7.9$ mm, $Re=5000$ iken h/d ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=10.82$ m/s



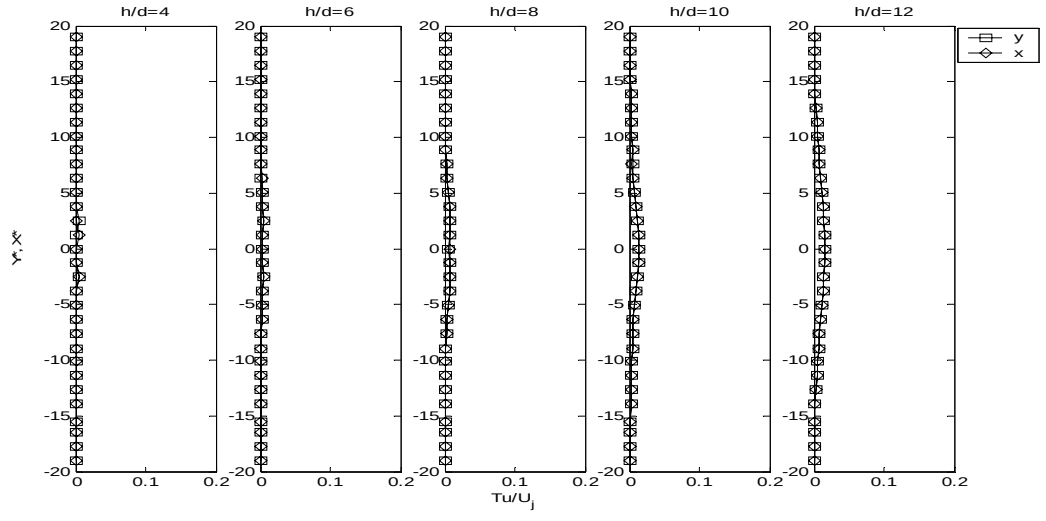
Şekil B. 7. $d=7.9$ mm, $Re=10000$ iken h/d ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=20.63$ m/s



Şekil B. 8. $d=7.9$ mm, $Re=15000$ iken h/d ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=32.56$ m/s

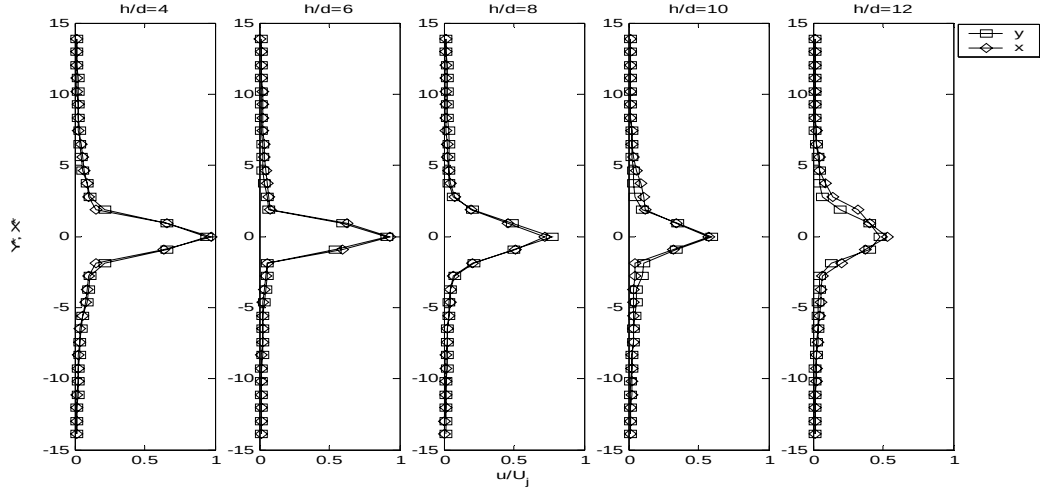


Şekil B. 9. $d=7.9$ mm, $Re=20000$ iken h/d ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=44.24$ m/s

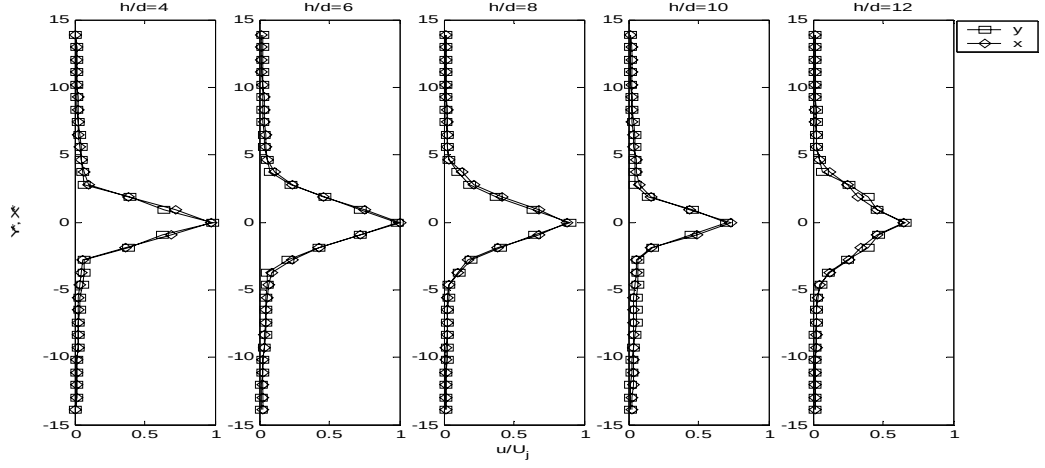


Şekil B. 10. $d=7.9$ mm, $Re=25000$ iken h/d ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=55.07$ m/s

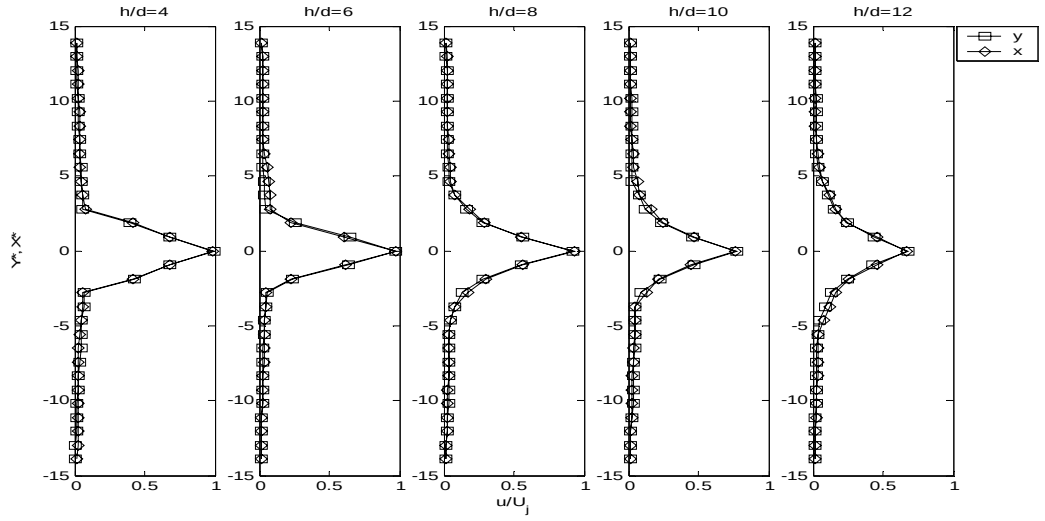
d=10.8 mm Çaplı Lülede Ölçülen Ortalama Hız ve Türbülans Şiddeti Değerleri



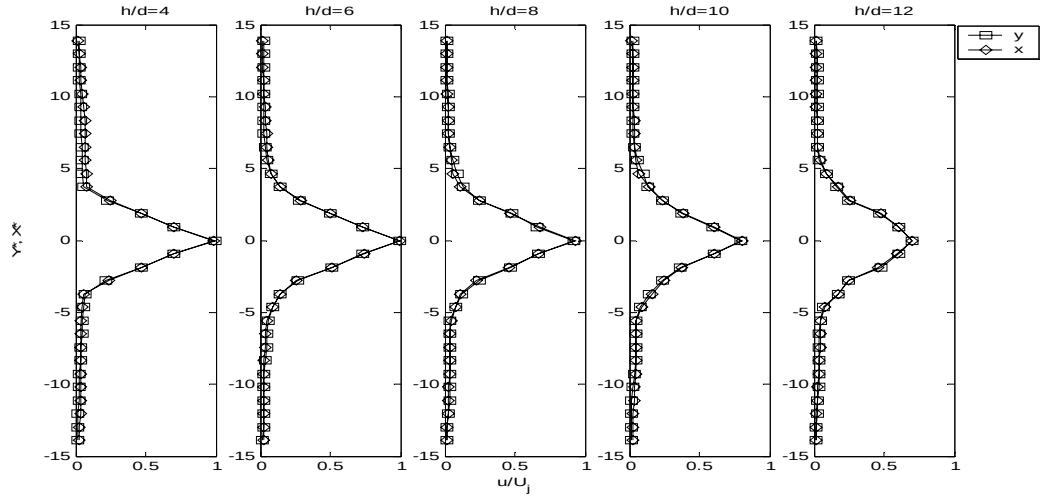
Şekil B. 11. d=10.8 mm, Re=5000 iken h/d ortalama hızın değişimi, $U_j=7.5$ m/s



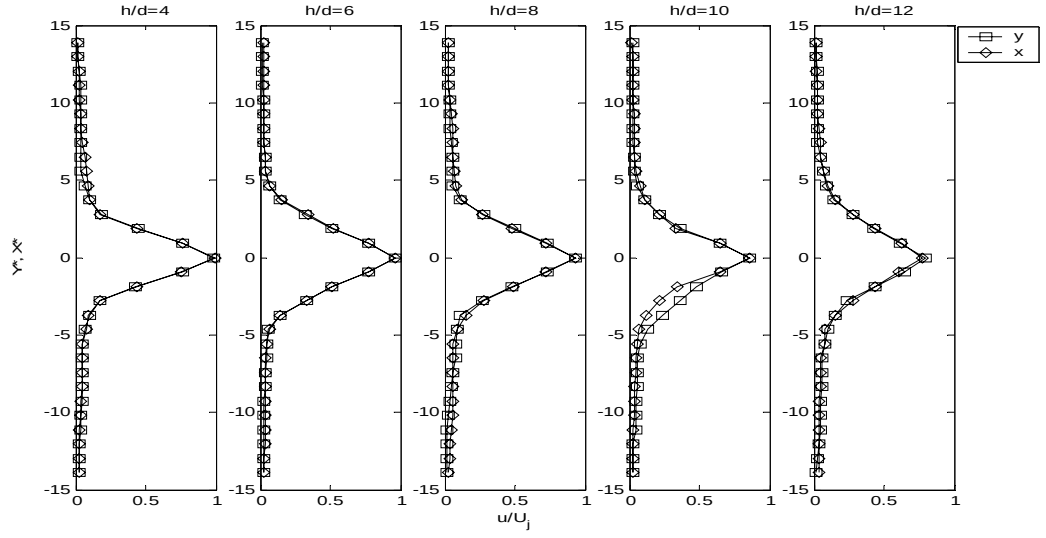
Şekil B. 12. d=10.8 mm, Re=10000 iken h/d ortalama hızın değişimi, $U_j=14.44$ m/s



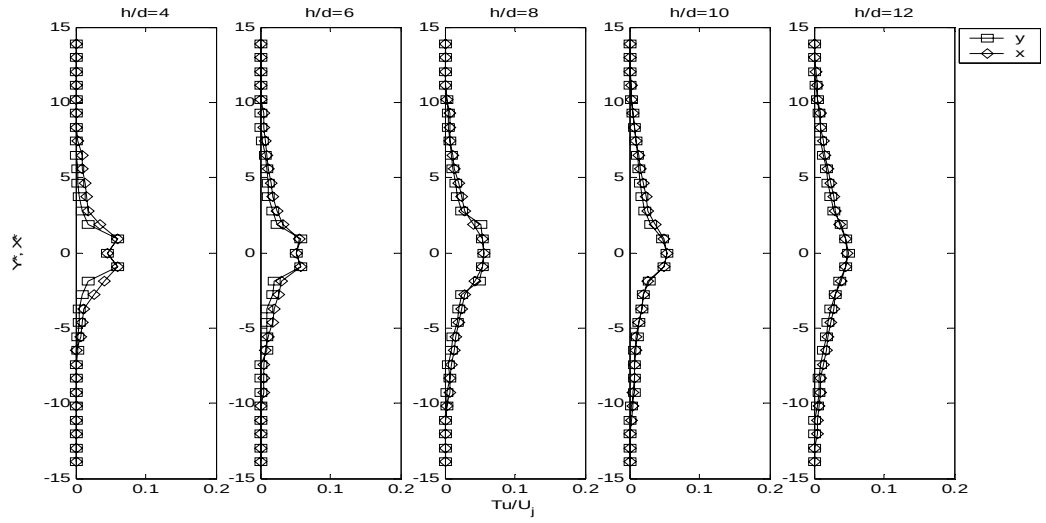
Şekil B. 13. d=10.8 mm, Re=15000 iken h/d ortalama hızın değişimi, $U_j=22.88$ m/s



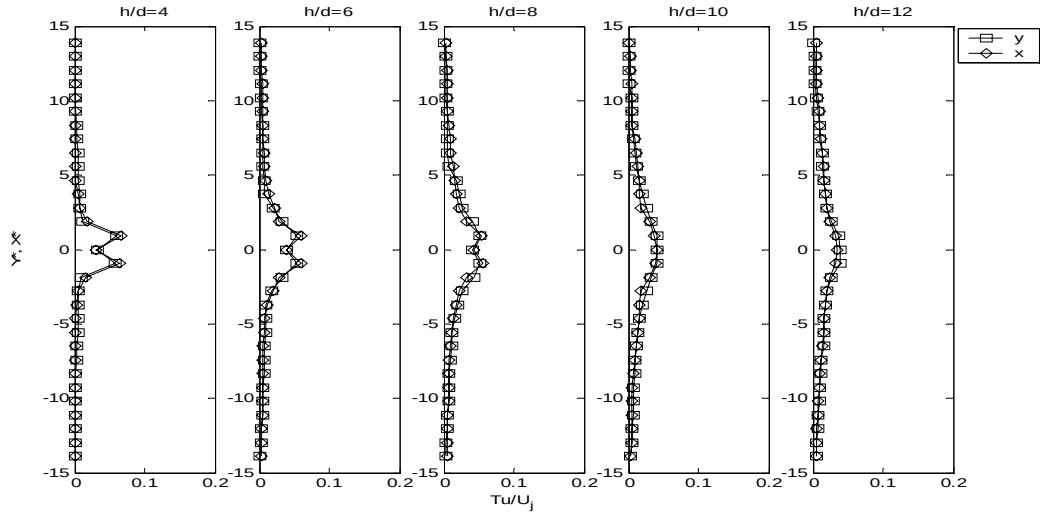
Şekil B. 14. $d=10.8$ mm, $Re=20000$ iken h/d ortalama hızın değişimi, $U_j=30.74$ m/s



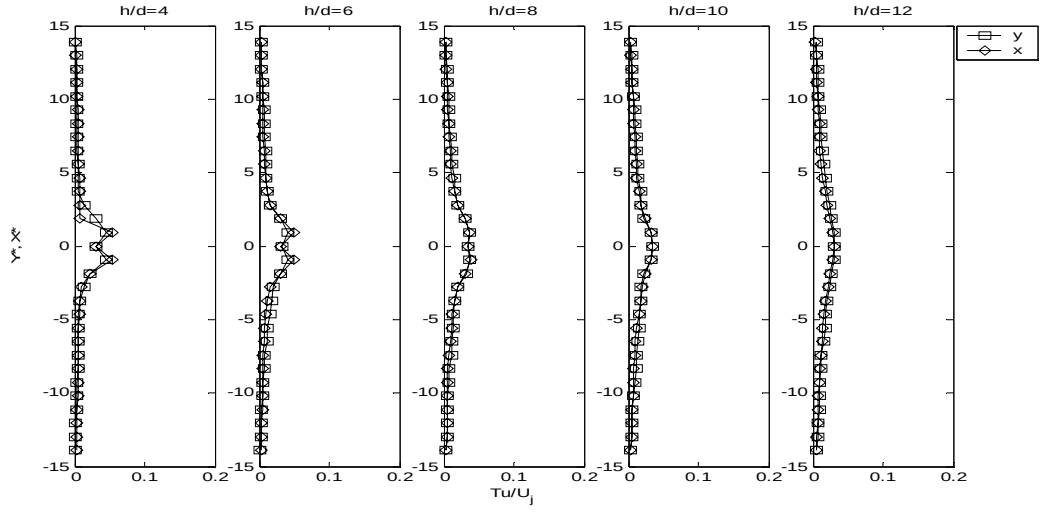
Şekil B. 15. $d=10.8$ mm, $Re=25000$ iken h/d ortalama hızın değişimi, $U_j=37.86$ m/s



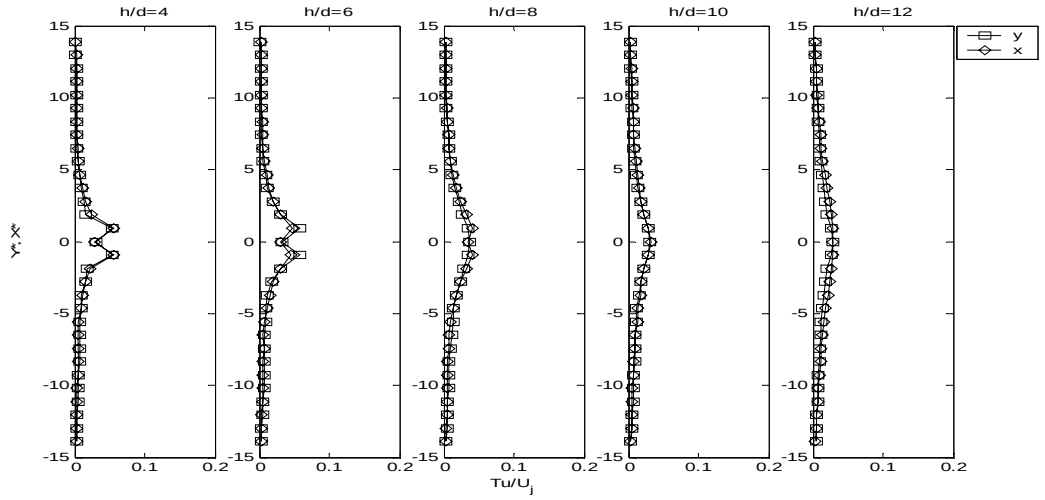
Şekil B. 16. $d=10.8$ mm, $Re=5000$ iken h/d türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=7.5$ m/s



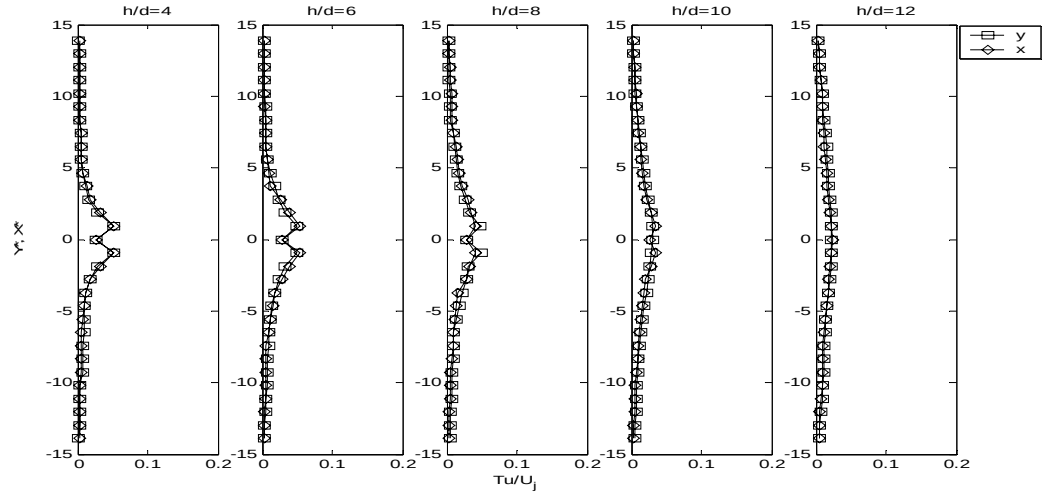
Şekil B. 17. $d=10.8$ mm, $Re=10000$ iken h/d türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=14.44$ m/s



Şekil B. 18. $d=10.8$ mm, $Re=15000$ iken h/d türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=22.88$ m/s

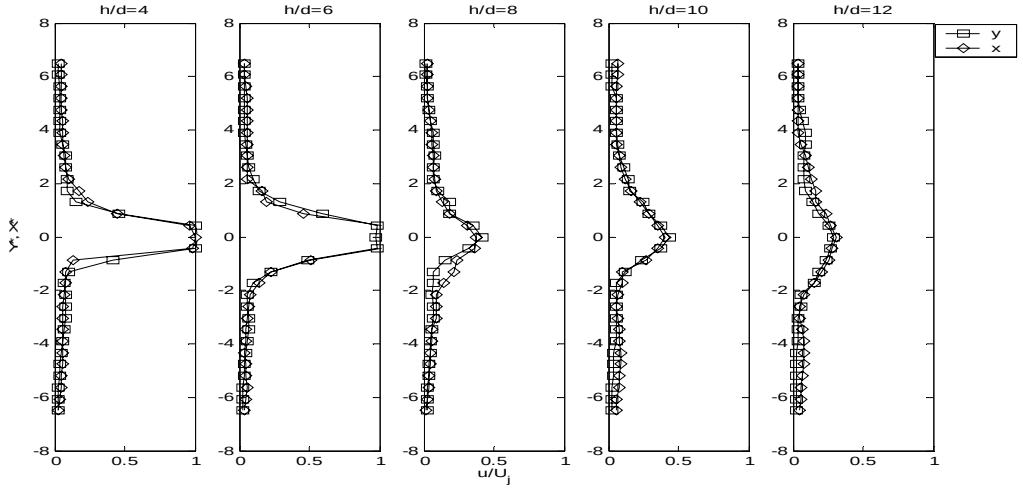


Şekil B. 19. $d=10.8$ mm, $Re=20000$ iken h/d türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=30.74$ m/s

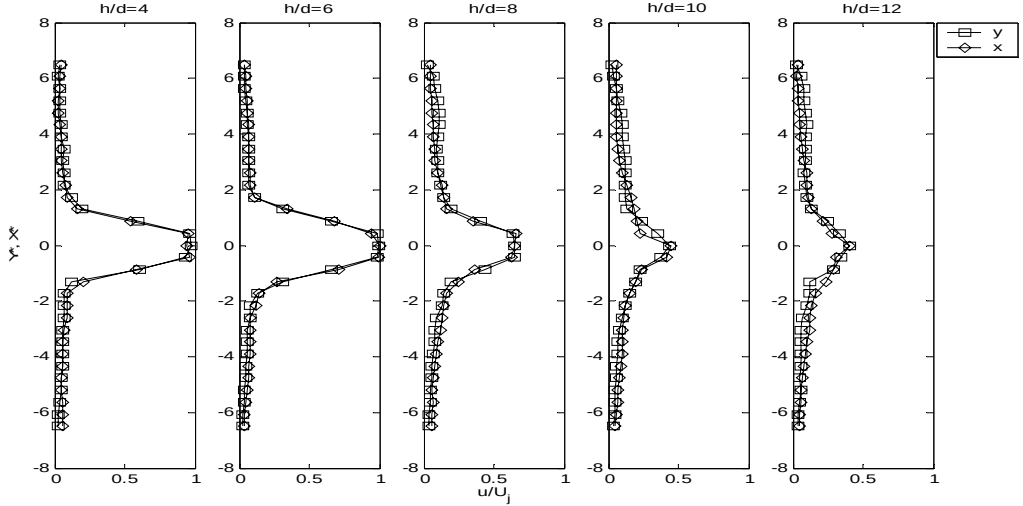


Şekil B. 20. $d=10.8$ mm, $Re=25000$ iken h/d türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=37.86$ m/s

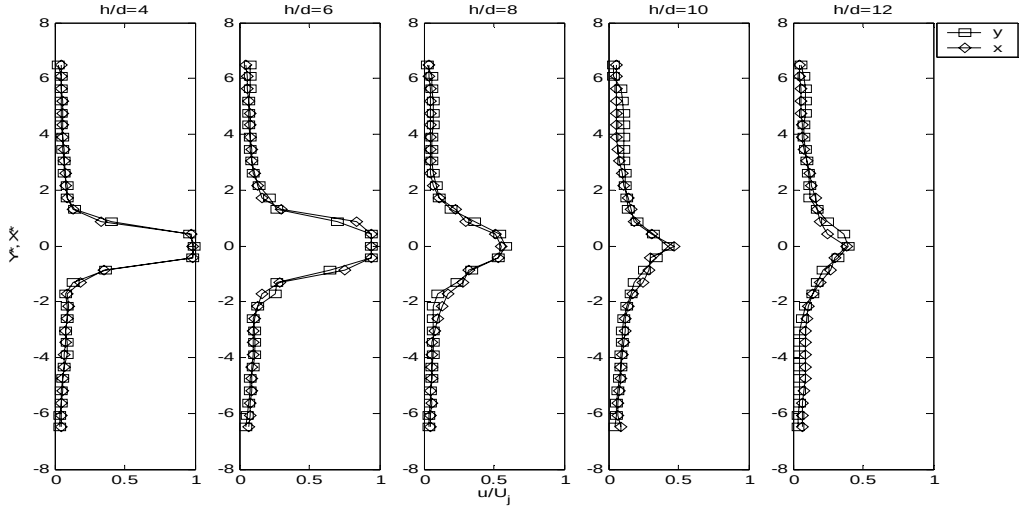
d=23.1 mm Çaplı Lülede Ölçülen Ortalama Hız ve Türbülans Şiddeti Değerleri



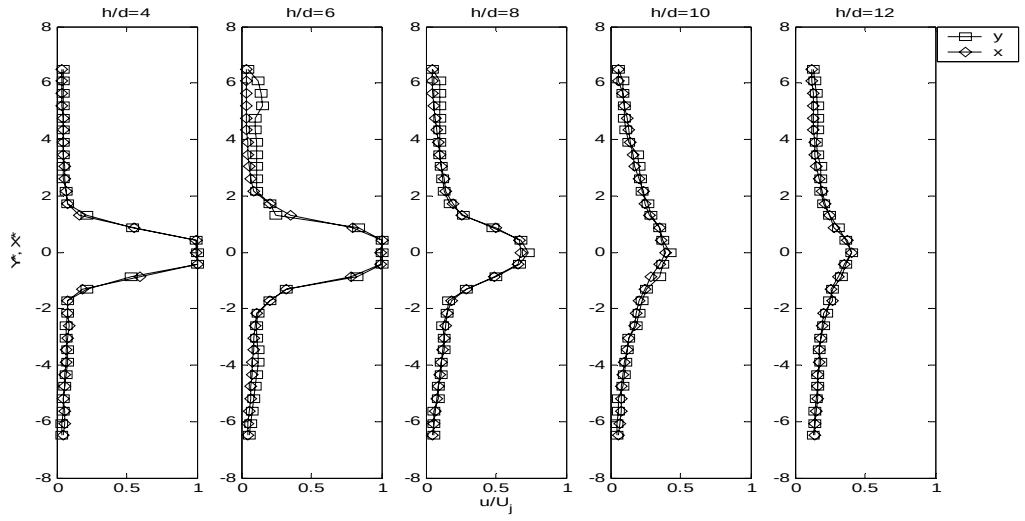
Şekil B. 21. $d=23.1$ mm, $Re=5000$ iken h/d ortalama hızın değişimi, $U_j=3.3$ m/s



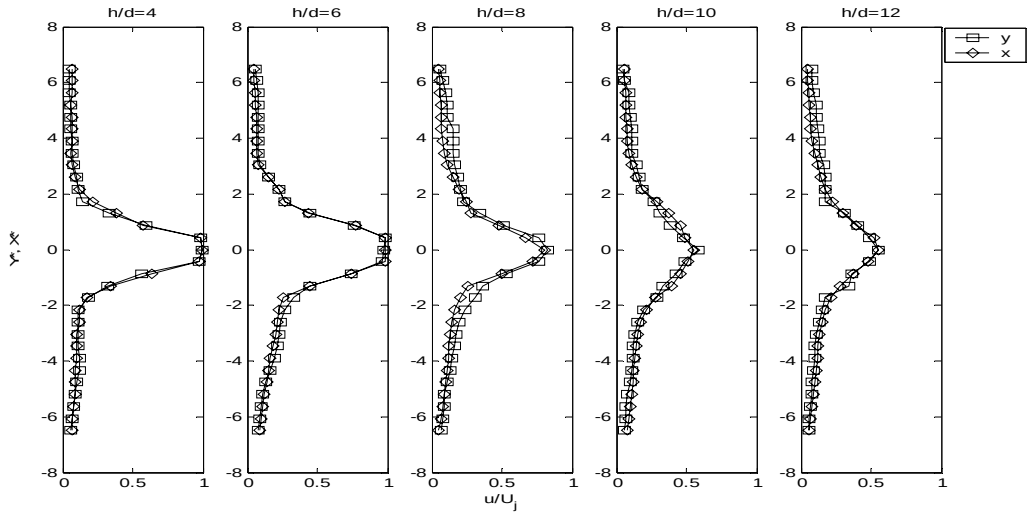
Şekil B.22. $d=23.1$ mm, $Re=10000$ iken h/d ortalama hızın değişimi, $U_j=6.6$ m/s



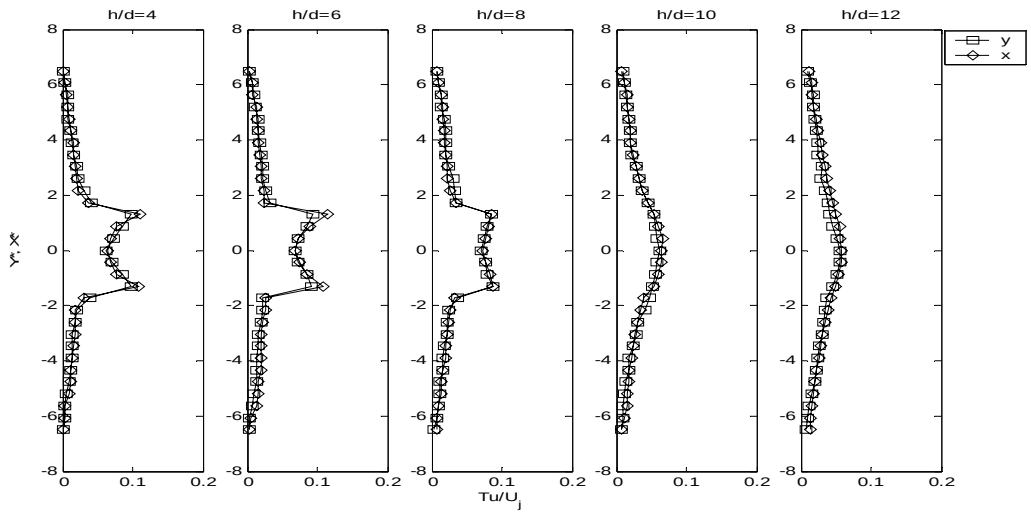
Şekil B. 23. $d=23.1$ mm, $Re=15000$ iken h/d ortalama hızın değişimi, $U_j=10$ m/s



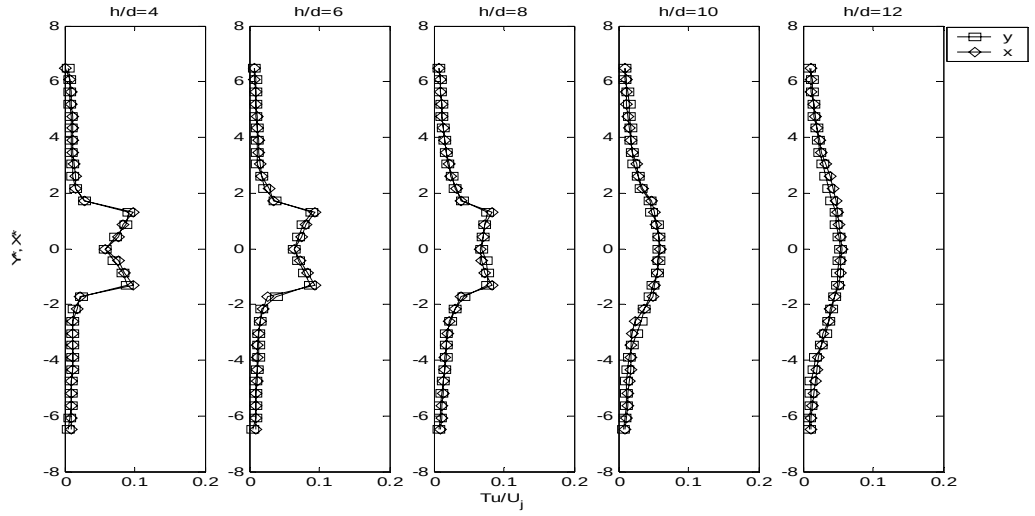
Şekil B.24 $d=23.1$ mm, $Re=20000$ iken h/d ortalama hızın değişimi, $U_j=13.3$ m/s



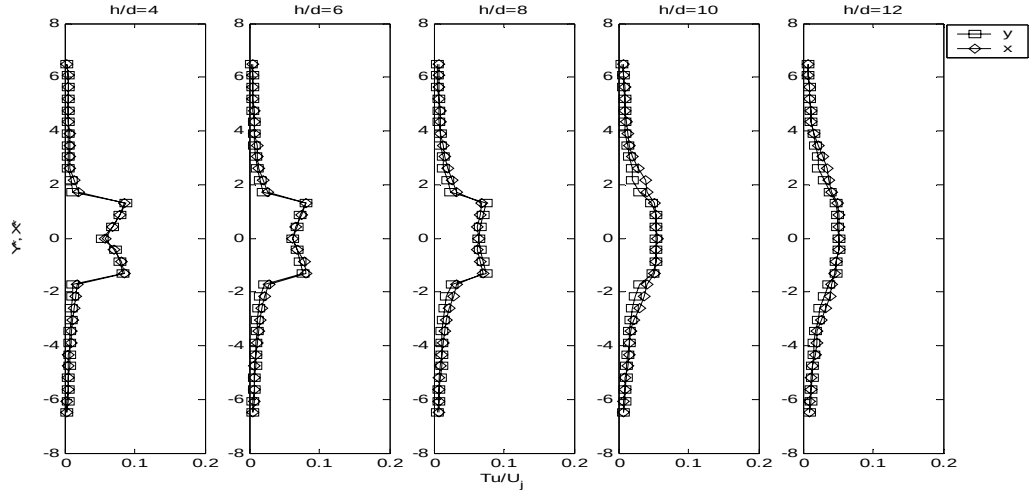
Şekil B. 25. $d=23.1$ mm, $Re=25000$ iken h/d ortalama hızın değişimi, $U_j=16.5$ m/s



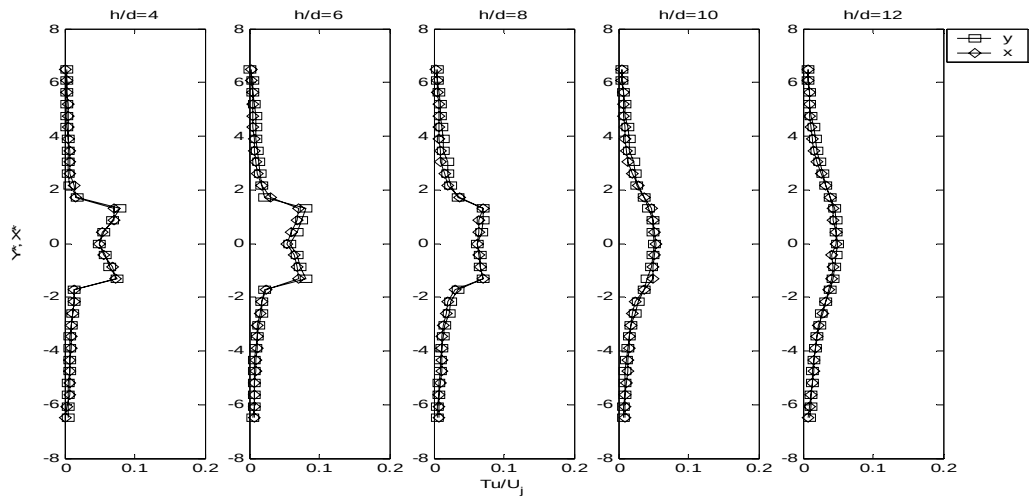
Şekil B. 26. $d=23.1$ mm, $Re=5000$ iken h/d türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=3.3$ m/s



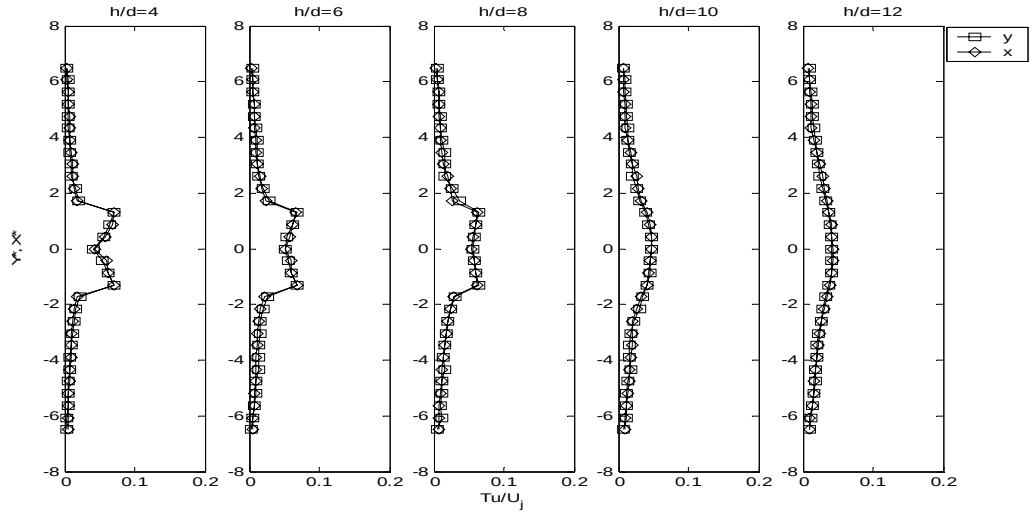
Şekil B.27. $d=23.1$ mm, $Re=10000$ iken h/d türbülans şiddeti değişimi, $U_j=6.6$ m/s



Şekil B. 28. $d=23.1$ mm, $Re=15000$ iken h/d türbülans şiddeti değişimi, $U_j=10$ m/s



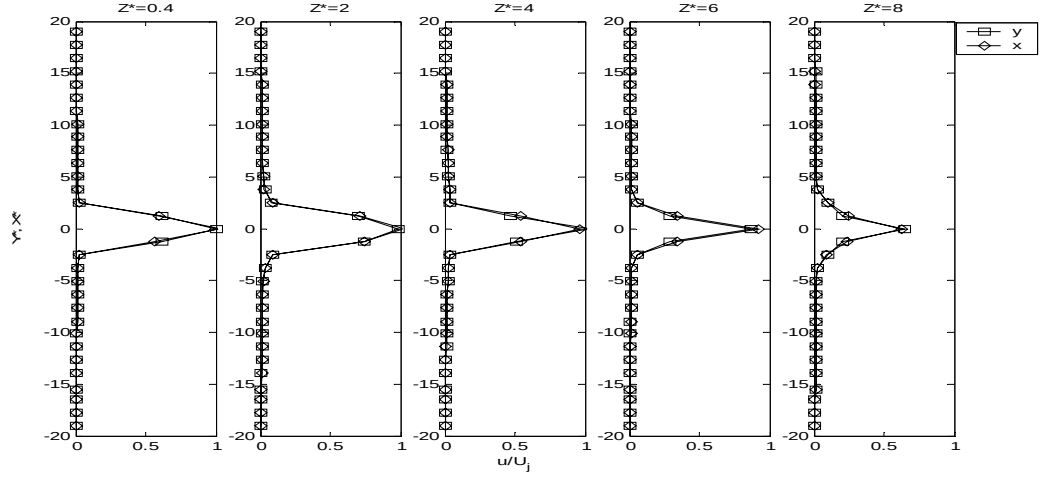
Şekil B. 29. $d=23.1$ mm, $Re=20000$ iken h/d türbülans şiddeti değişimi, $U_j=13.3$ m/s



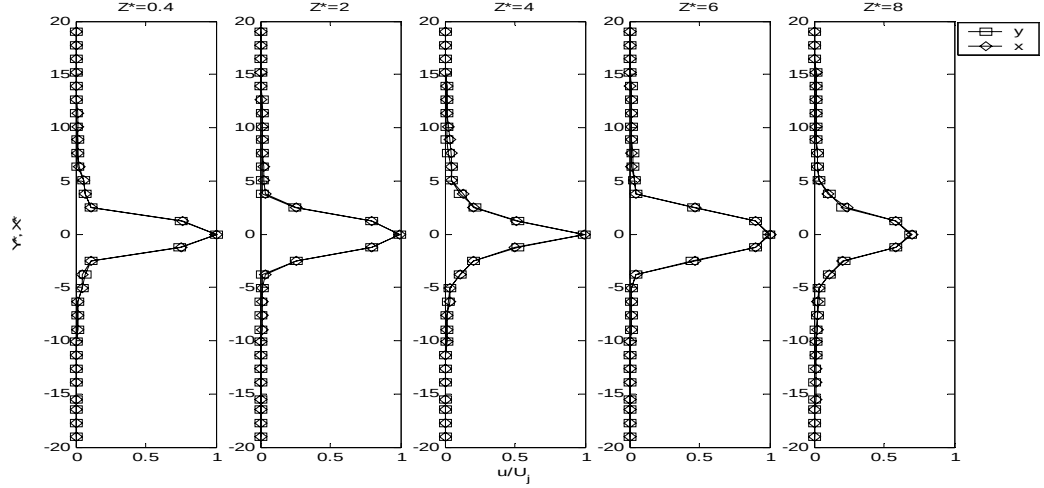
Şekil B. 30. $d=23.1$ mm, $Re=25000$ iken h/d türbülans şiddeti değişimi, $U_j=16.5$ m/s

B.2. Serbest Jetin Akış Dinamiği Testleri (Çarpma Levhası Yok)

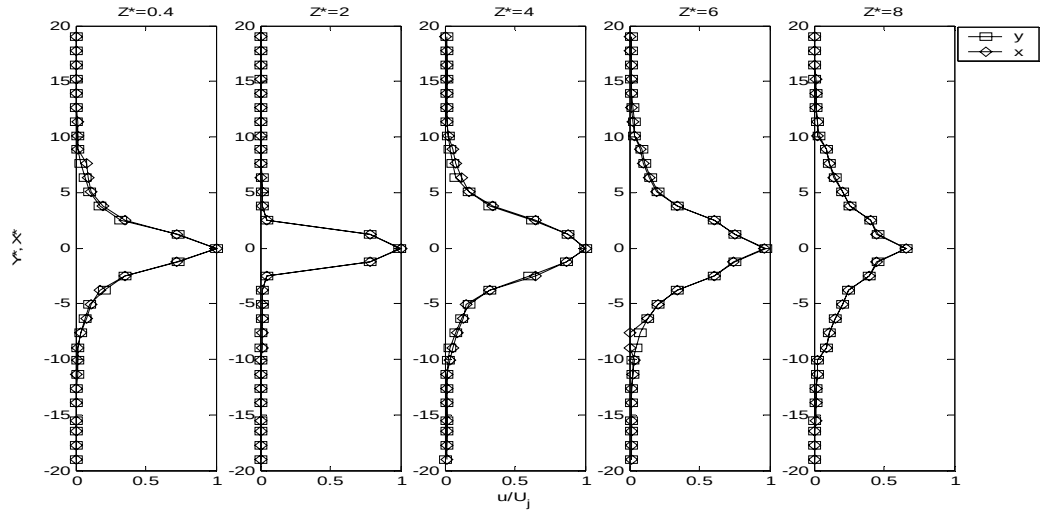
d=7.9 mm Çaplı Lülede Ölçülen Ortalama Hız ve Türbülans Şiddeti Değerleri



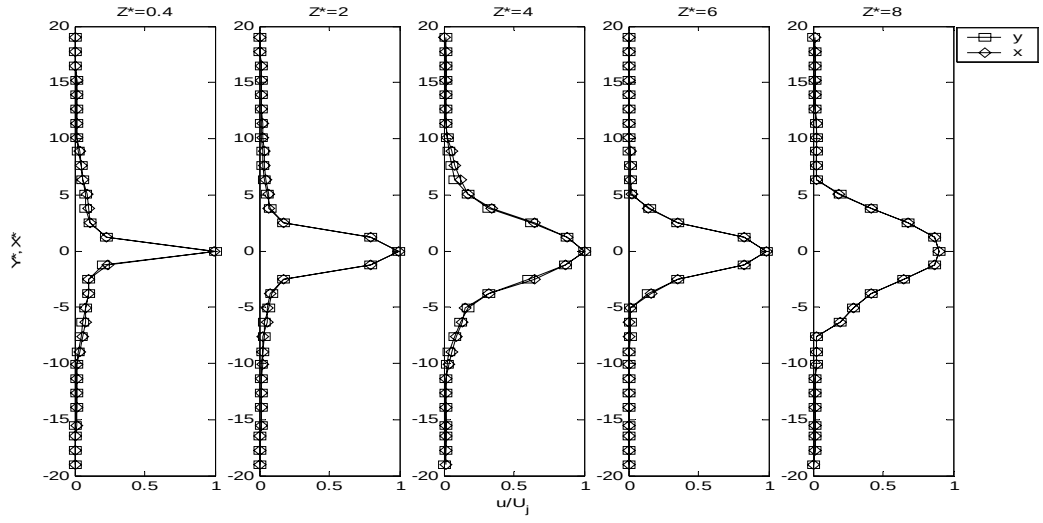
Şekil B. 31. d=7.9 mm çaplı düz lülede $Re=5000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=10.82$ m/s



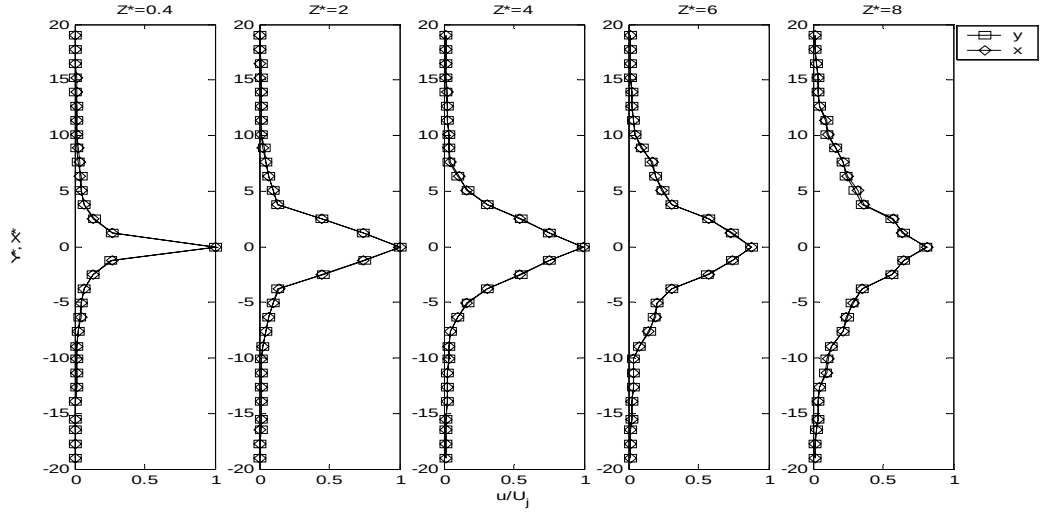
Şekil B. 32. d=7.9 mm çaplı düz lülede $Re=10000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=20.63$ m/s



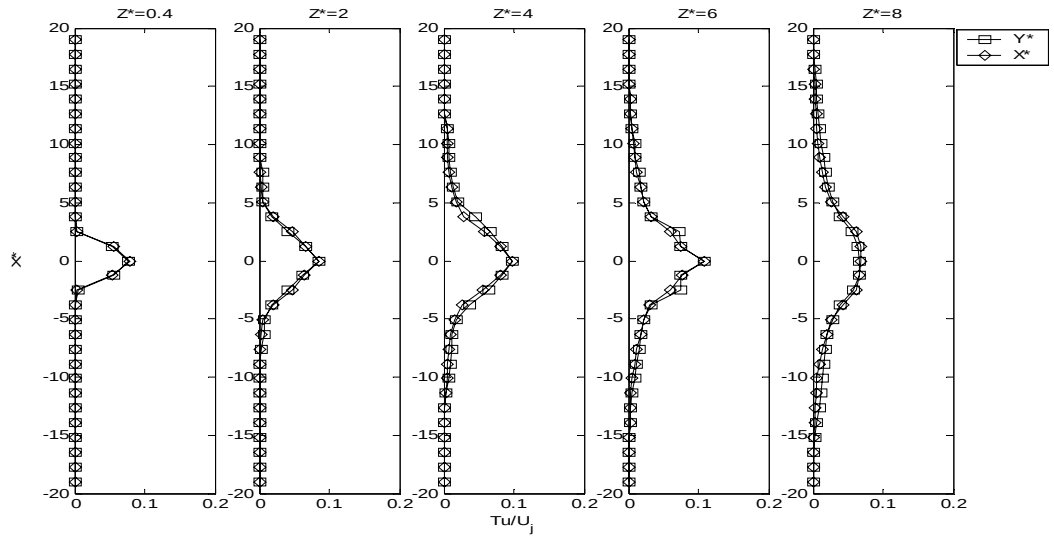
Şekil B. 33. d=7.9 mm çaplı düz lülede $Re=15000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=32.56$ m/s



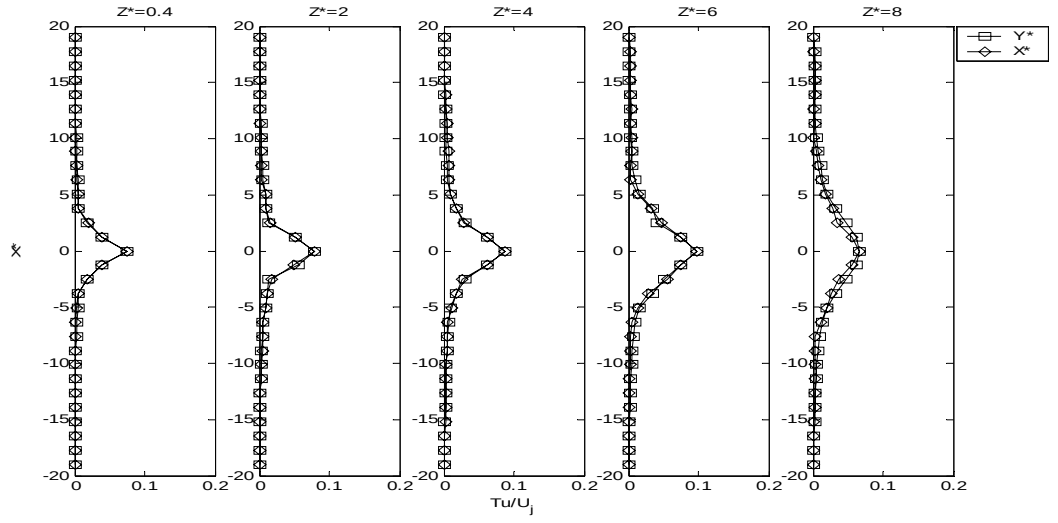
Şekil B. 34. $d=7.9$ mm çaplı düz lülede $Re=20000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=44.24$ m/s



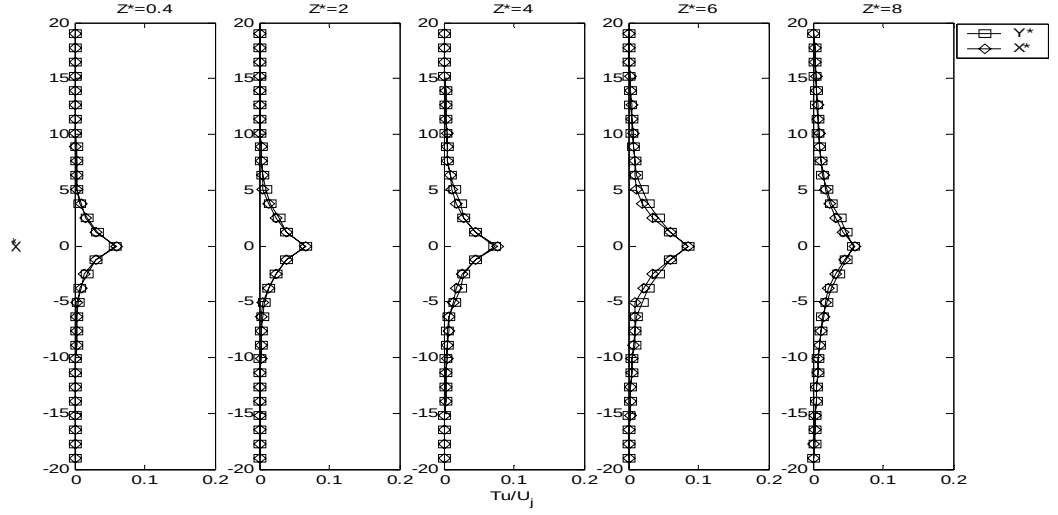
Şekil B. 35. $d=7.9$ mm çaplı düz lülede $Re=25000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=55.07$ m/s



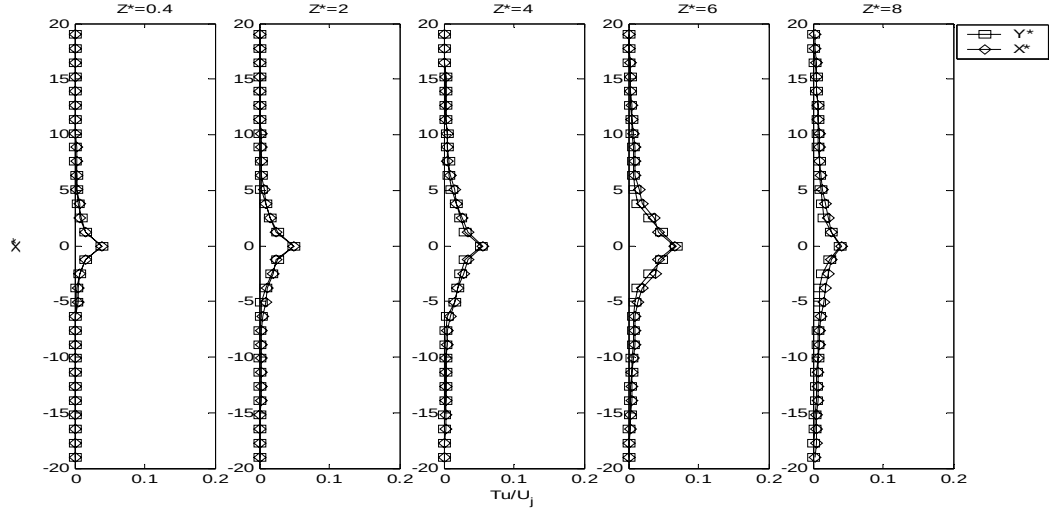
Şekil B. 36. $d=7.9$ mm çaplı düz lülede $Re=5000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=10.82$ m/s



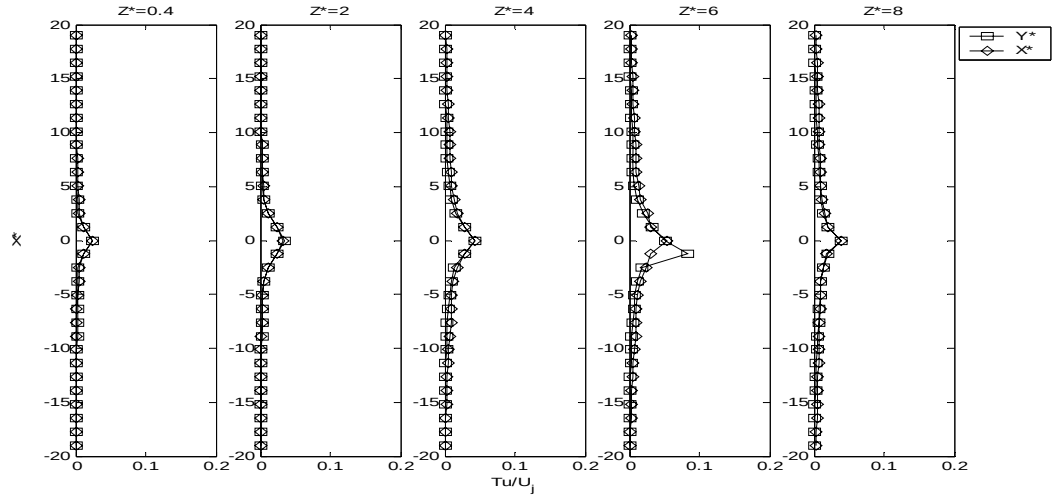
Şekil B.37. $d=7.9$ mm çaplı düz lülede $Re=10000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=20.63$ m/s



Şekil B.38. $d=7.9$ mm çaplı düz lülede $Re=15000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=32.56$ m/s

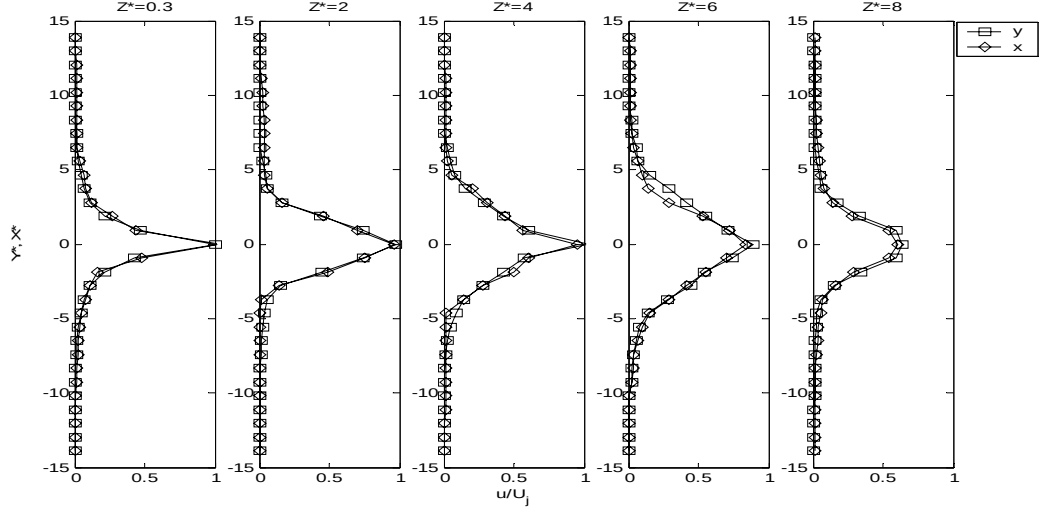


Şekil B. 39. $d=7.9$ mm çaplı düz lülede $Re=20000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=44.24$ m/s

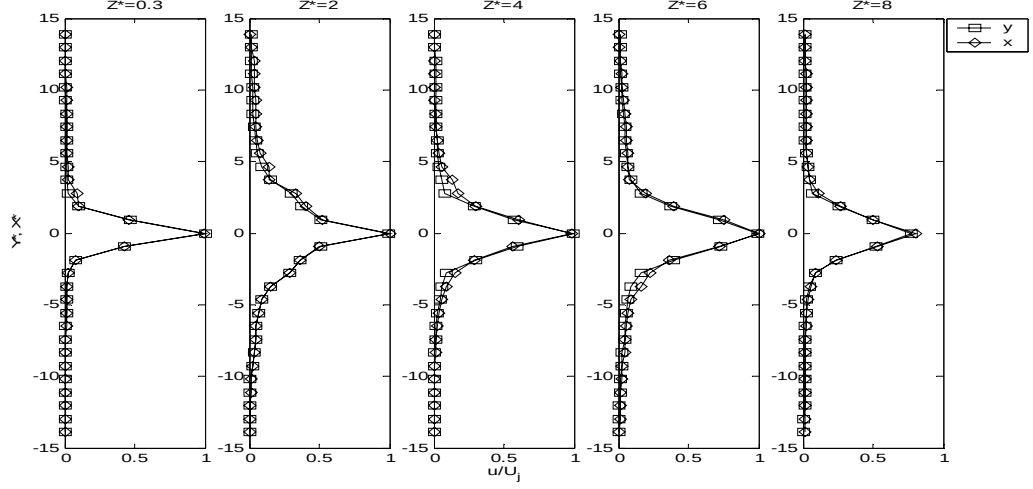


Şekil B. 40. $d=7.9$ mm çaplı düz lülede $Re=25000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=55.07$ m/s

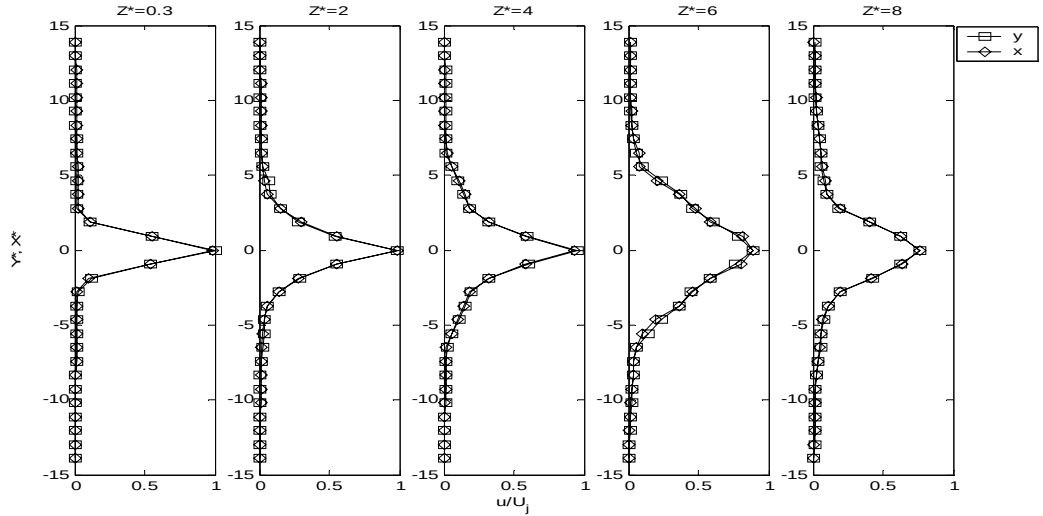
d=10.8 mm Çaplı Lülede Ölçülen Ortalama Hız ve Türbülans Şiddeti



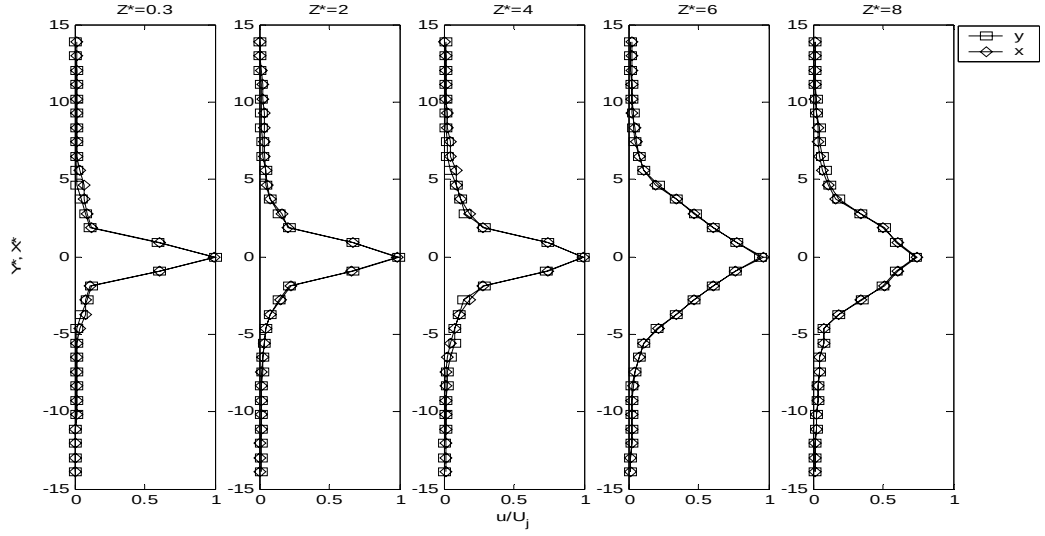
Şekil B. 41. d=10.8 mm çaplı düz lülede $Re=5000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=7.5$ m/s



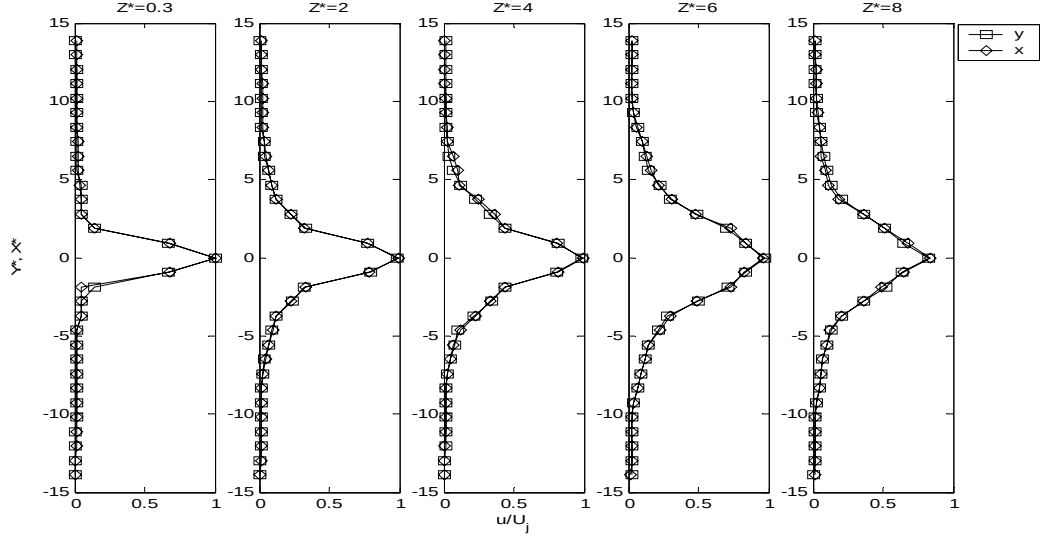
Şekil B. 42. d=10.8 mm çaplı düz lülede $Re=10000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=14.44$ m/s



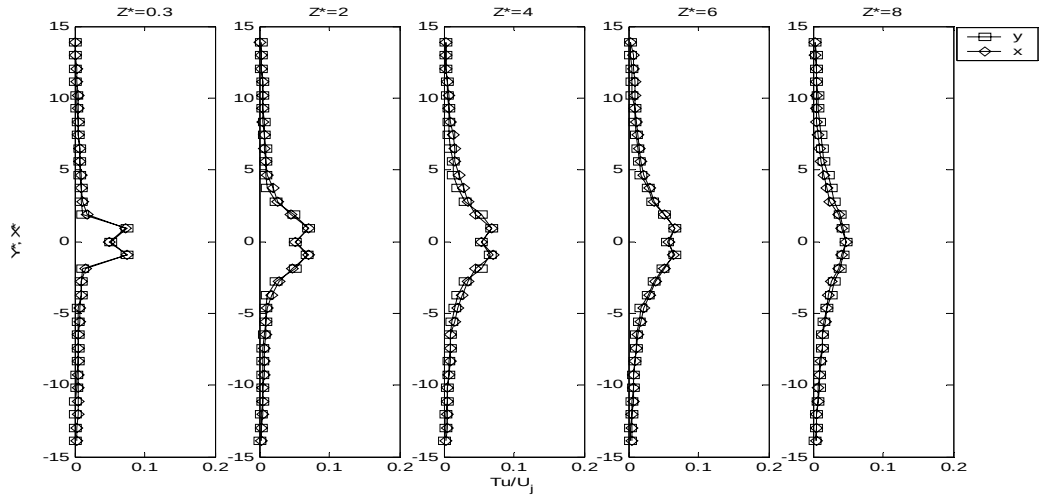
Şekil B. 43. d=10.8 mm çaplı düz lülede $Re=15000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=22.88$ m/s



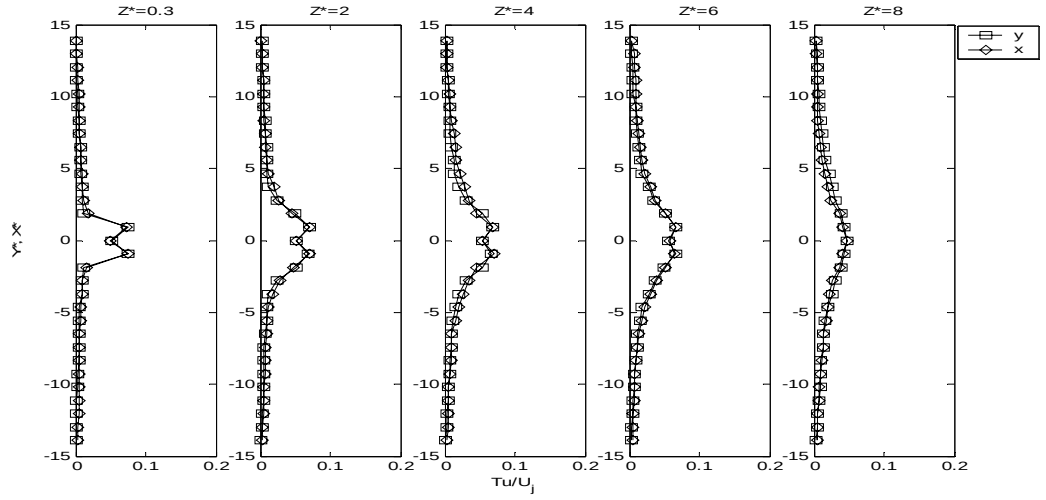
Şekil B.44. $d=10.8$ mm çaplı düz lülede $Re=20000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=30.74$ m/s



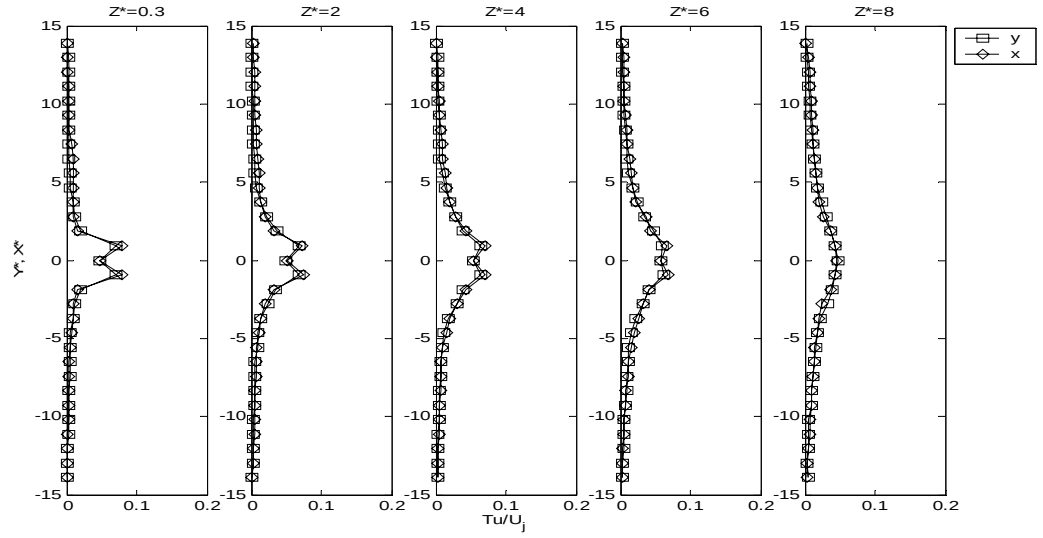
Şekil B. 45. $d=10.8$ mm çaplı düz lülede $Re=25000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=37.86$ m/s



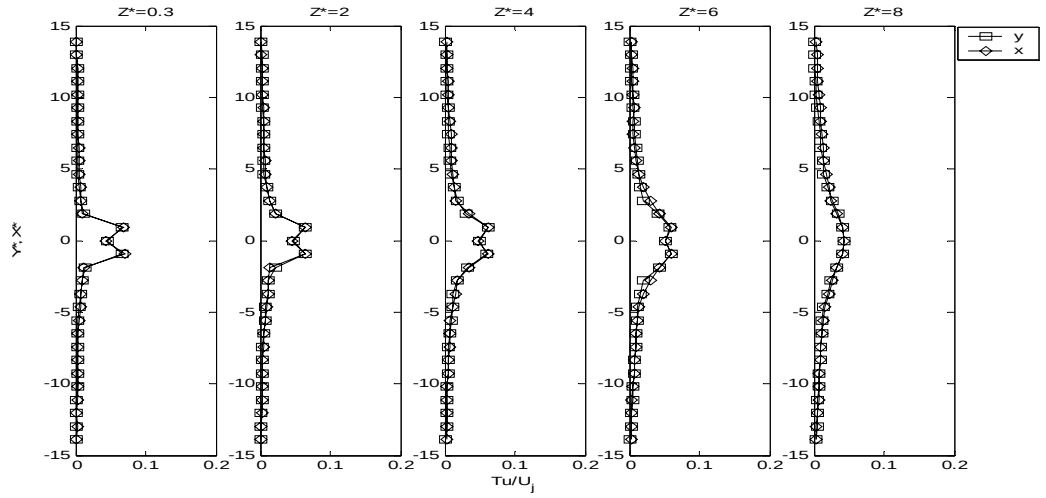
Şekil B. 46. $d=10.8$ mm çaplı düz lülede $Re=5000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=7.5$ m/s



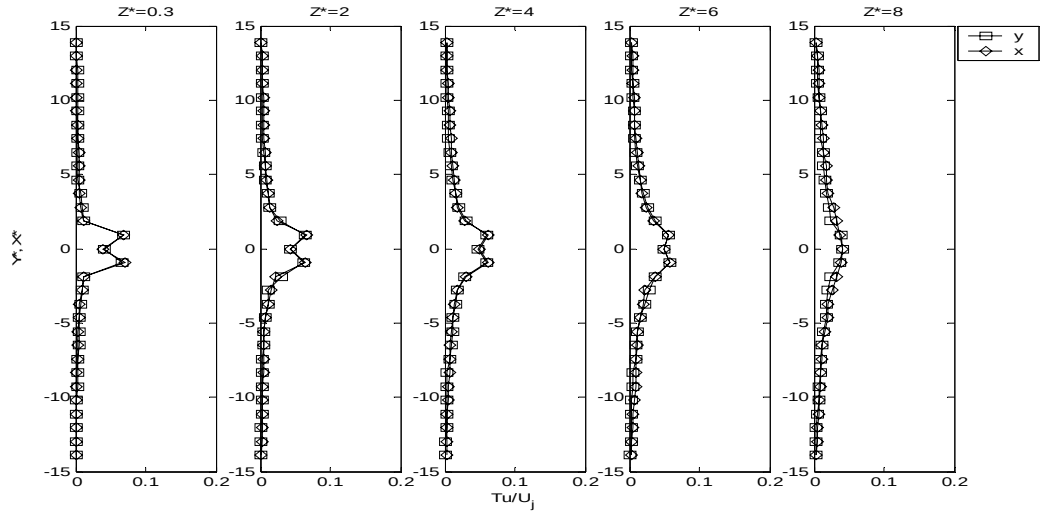
Şekil B.47. $d=10.8$ mm çaplı düz lülede $Re=10000$ için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi, $U_j=14.44$ m/s



Şekil B. 48. $d=10.8$ mm çaplı düz lülede $Re=15000$ için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi, $U_j=22.88$ m/s

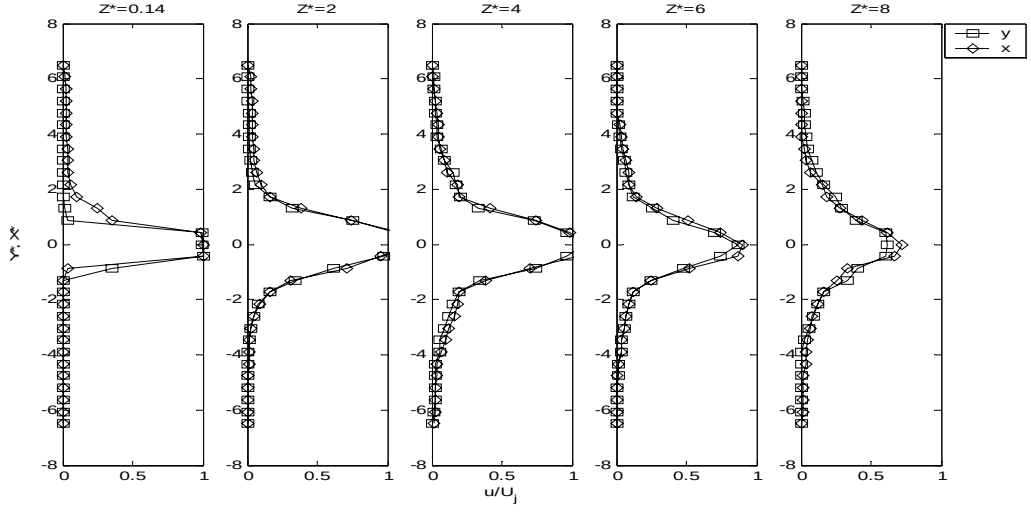


Şekil B. 49. $d=10.8$ mm çaplı düz lülede $Re=20000$ için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi, $U_j=30.74$ m/s

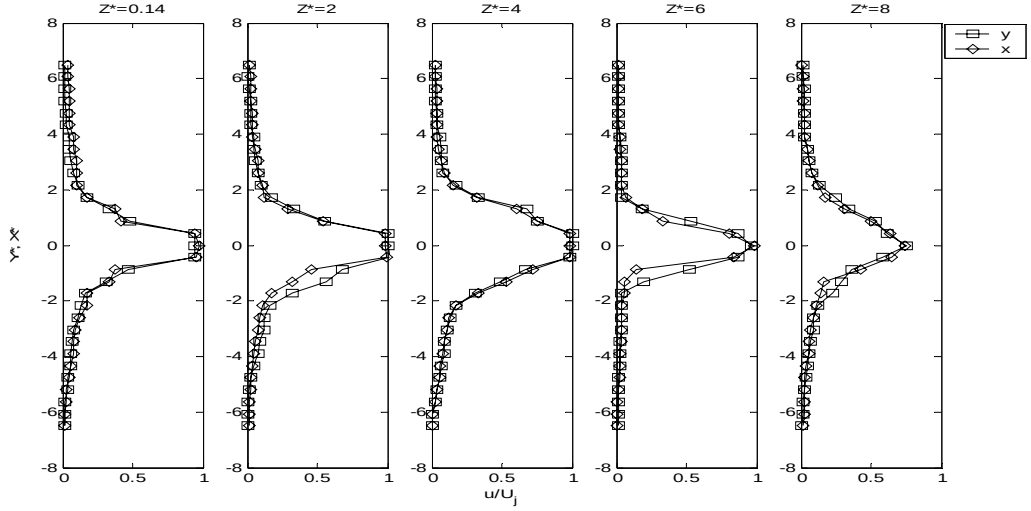


Şekil B. 50. $d=10.8$ mm çaplı düz lülede $Re=25000$ için Z^* ile türbülans şiddeti değişimi, $U_j=37.86$ m/s

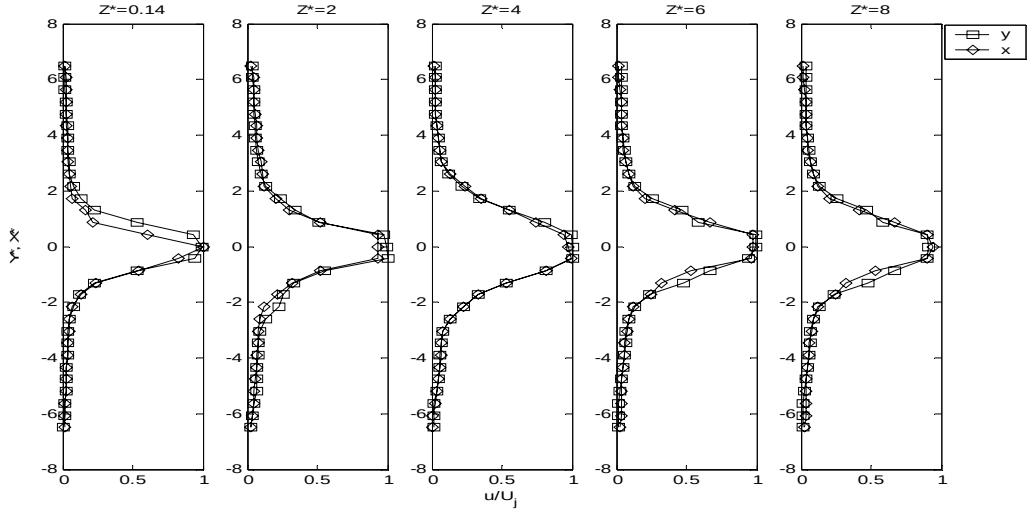
d=23.1 mm Çaplı Lülede Ölçülen Ortalama Hız ve Türbülans Şiddeti



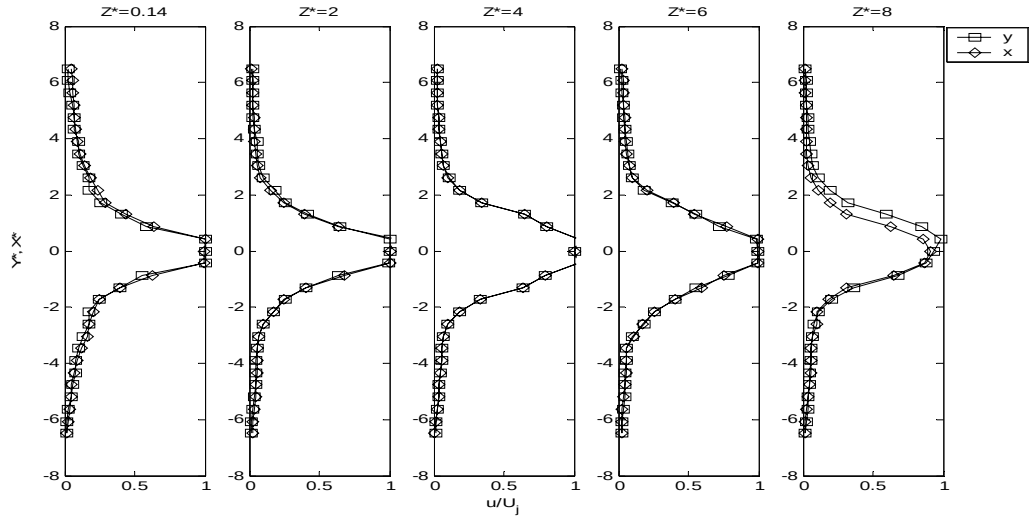
Şekil B. 51. d=23.1 mm çaplı düz lülede $Re=5000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=3.3$ m/s



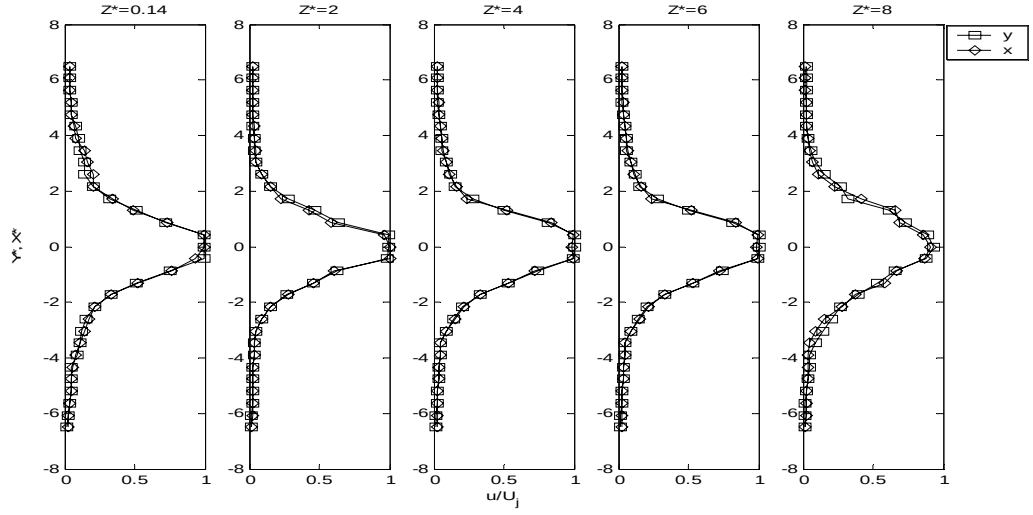
Şekil B. 52. d=23.1 mm çaplı düz lülede $Re=10000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=6.6$ m/s



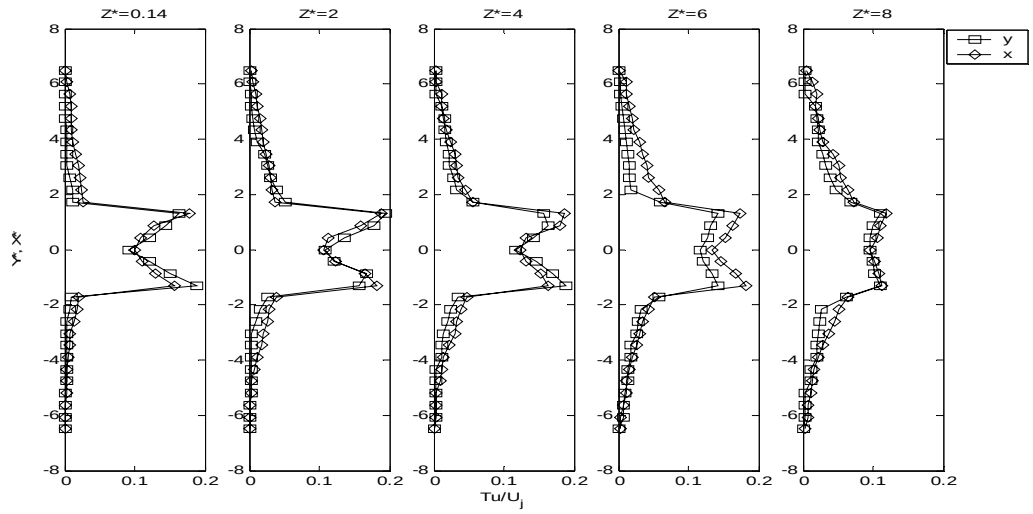
Şekil B.53. d=23.1 mm çaplı düz lülede $Re=15000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=10$ m/s



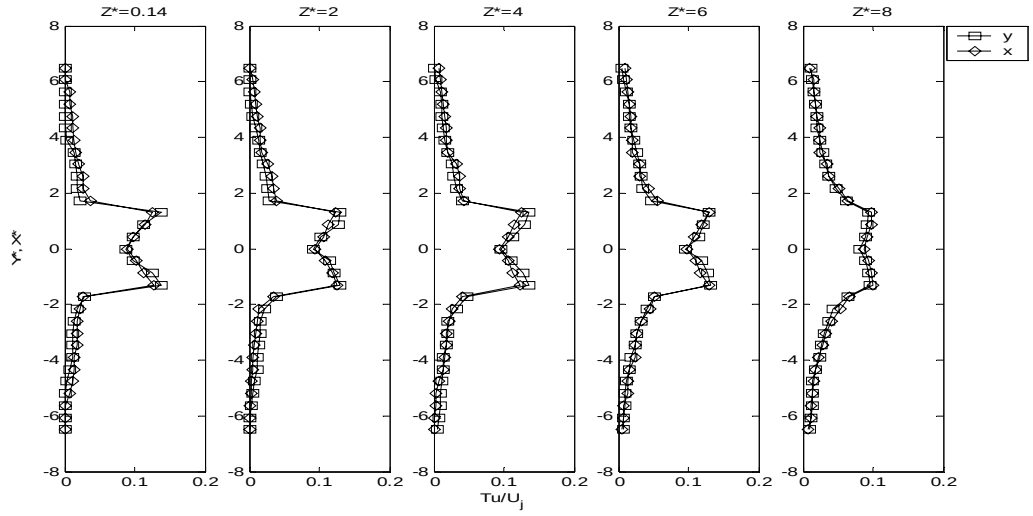
Şekil B. 54. $d=23.1$ mm çaplı düz lülede $Re=20000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=13.3$ m/s



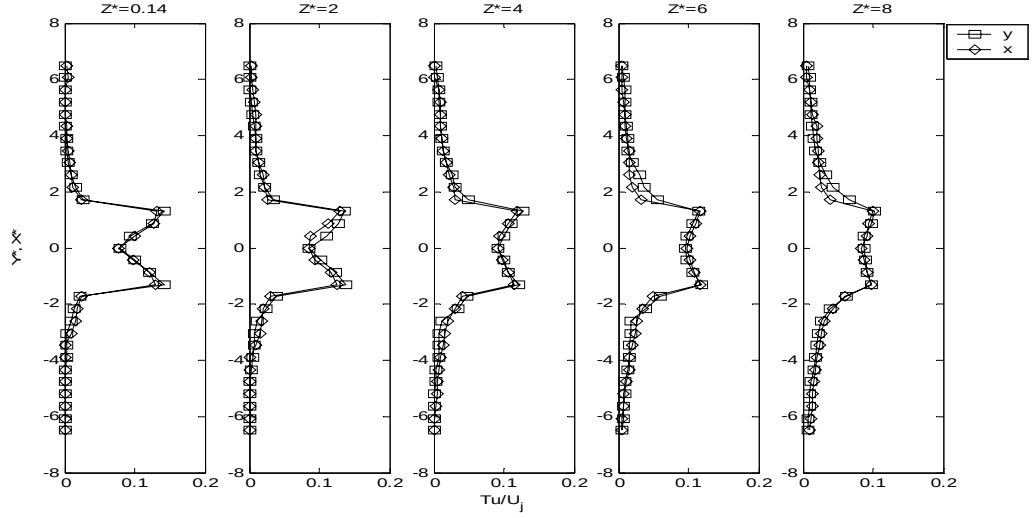
Şekil B. 55. $d=23.1$ mm çaplı düz lülede $Re=25000$ için Z^* ile ortalama hızın değişimi, $U_j=16.5$ m/s



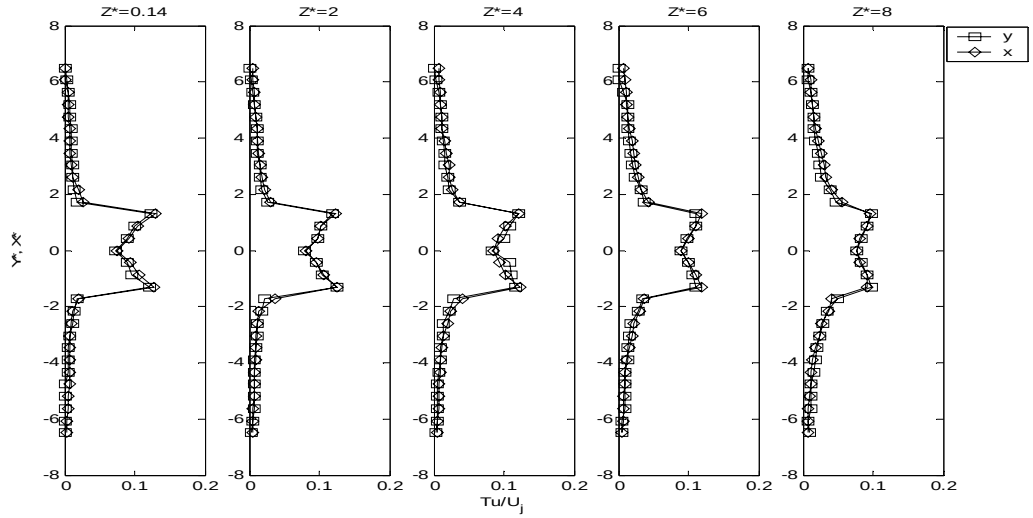
Şekil B. 56. $d=23.1$ mm çaplı düz lülede $Re=5000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=3.3$ m/s



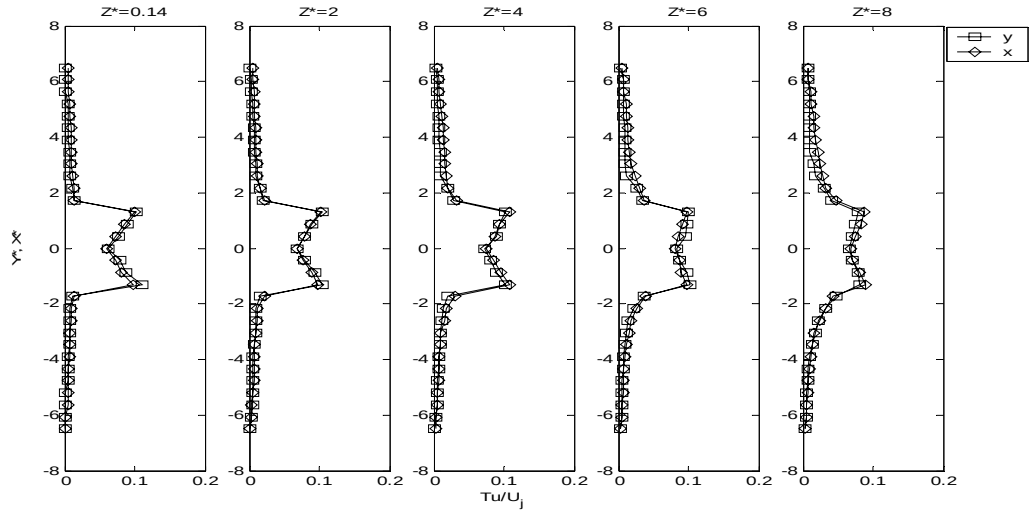
Şekil B. 57. =23.1 mm çaplı düz lülede $Re=10000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=6.6$ m/s



Şekil B. 58. =23.1 mm çaplı düz lülede $Re=15000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=10$ m/s



Şekil B. 59. =23.1 mm çaplı düz lülede $Re=20000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=13.3$ m/s



Şekil B. 60. =23.1 mm çaplı düz lülede $Re=25000$ için Z^* ile türbülans şiddetinin değişimi, $U_j=16.5$ m/s

EK-C TRAVERS MEKANİZMASINI ÇALIŞTIRAN PROGRAM

```
clear all,close all
global x y hz Turx Tury Turxoffset Turyoffset x_basa
dio1=digitalio('parallel','LPT1'); dataout=addline(dio1,0:7,0,'out'); putvalue(dio1,0);
dio2=digitalio('parallel','LPT1'); datain=addline(dio2,0:4,1,'in'); s=getvalue(dio2);
% x yönünde 1 adım = 0.2777 mm mesafeye denk
% y yönünde 1 adım = 0.6666 mm mesafeye denk
%***** ANA PROGRAM *****
bekle=1; % Data okuma esnasında geçmesi gereken süre. Birimi : ( Saniye )
motor_hizi=100; % Motorların ilerleme hızı ( 1 saniyedeki adım sayısıdır... Max. değeri 50 dir.)
x_offset=0; % x yönünde offset mesafesi. (milimetre)
y_offset=0; % y yönünde offset mesafesi. (milimetre)
x_koord=[150 ones(1,30)*150 0 [10:10:300]]; % Sırası ile izleyeceği x koordinat değerleri
y_koord=[0 [10:10:300] 150 ones(1,30)*150]; % Sırası ile izleyeceği y koordinat değerleri
nvn2


---


szx=size(x_koord); szy=size(y_koord);
if szx==szy
plot(-x_koord,y_koord,'k'),hold on,plot(-x_koord,y_koord,'*r'),
axis([(min(-x_koord)-10) (max(-x_koord)+10) (min(y_koord)-10) (max(y_koord)+10))]);
cevap=input('Devam etmek istiyor musunuz? (E/H) ','s');
if double(cevap)==double('H') | double(cevap)==double('h')
disp(' ')
disp('Programı iptal Ettiniz')
break
else
disp(' ')
disp('Manuel (el ile) tarama için control=1 degerini gir')
disp('otomatik tarama için control=0 degerini gir')
disp(' ')
cnt=input('Control (1/0) = ');
nvn3
end
else
display('Hatali işlem')
display('x_koord ve y_koord degerleri aynı boyutta olmalı')
end
end
```

tic

%*****

x=5000; y=5000; hz=1/motor_hizi;

Turxoffset=x_offset/.2777; % x yönünde 1 adım = 0.2777 mm mesafeye denk

Turyoffset=y_offset/.6666; % y yönünde 1 adım = 0.6666 mm mesafeye denk

%*****

sifirla, pause(1);

offset

if cnt==0, pause(bekle), elseif cnt==1, pause, end

szx=size(x_koord); szy=size(y_koord);

x_k=0; y_k=0;

for i=1:max(szx)

ex=x_koord(i)-x_k; x_k=x_koord(i); Turx=abs(ex)/.2777;

if ex>0

xileri

elseif ex<0

xgeri

end

ey=y_koord(i)-y_k; y_k=y_koord(i); Tury=abs(ey)/.6666;

if ey>0

yileri

elseif ey<0

ygeri

end

disp('istenen koordinata ulasildi BEKLEMEDE')

if cnt==0, pause(bekle), elseif cnt==1, pause, end

end

disp('islem Tamamlandi')

toc

function xileri

global x hz Turx

dio1=digitalio('parallel','LPT1'); dataout=addline(dio1,0:7,0,'out'); putvalue(dio1,0);

dataport=[1 2 4 8];

for i=1:Turx

xd=x; x=x-1;

pin1=mod(x,4)+1;

```

    pin2=mod(xd,4)+1;
    port=dataport(pin1)+dataport(pin2);
    putvalue(dio1,port)
    pause(hz)
end
putvalue(dio1,0)

```

```

function xgeri
global x hz Turx
dio1=digitalio('parallel','LPT1'); dataout=addline(dio1,0:7,0,'out'); putvalue(dio1,0);
dataport=[1 2 4 8];
for i=1:Turx
    xd=x; x=x+1;
    pin1=mod(x,4)+1;
    pin2=mod(xd,4)+1;
    port=dataport(pin1)+dataport(pin2);
    putvalue(dio1,port)
    pause(hz)
end
putvalue(dio1,0)

```

```

function yileri
global y hz Tury
dio1=digitalio('parallel','LPT1'); dataout=addline(dio1,0:7,0,'out'); putvalue(dio1,0);
dataport=[1 2 4 8]; mtr=16;
for i=1:Tury
    yd=y; y=y+1;
    pin1=mod(y,4)+1;
    pin2=mod(yd,4)+1;
    port=dataport(pin1)+dataport(pin2);
    putvalue(dio1,port*mtr)
    pause(hz)
end
putvalue(dio1,0)

```

```

function ygeri
global y hz Tury

```

```

dio1=digitalio('parallel','LPT1'); dataout=addline(dio1,0:7,0,'out'); putvalue(dio1,0);
dataport=[1 2 4 8]; mtr=16;
for i=1:Tury
    yd=y; y=y-1;
    pin1=mod(y,4)+1;
    pin2=mod(yd,4)+1;
    port=dataport(pin1)+dataport(pin2);
    putvalue(dio1,port*mtr)
    pause(hz)
end
putvalue(dio1,0)

```

```

function offset
global x y hz Turxoffset Turyoffset
dio1=digitalio('parallel','LPT1'); dataout=addline(dio1,0:7,0,'out'); putvalue(dio1,0);
dataport=[1 2 4 8];

```

```

disp(' ')
disp('x_ yönünde offset ayarı yapılıyor')
for i=1:Turxoffset
    xd=x; x=x-1;
    pin1=mod(x,4)+1;
    pin2=mod(xd,4)+1;
    port=dataport(pin1)+dataport(pin2);
    putvalue(dio1,port)
    pause(hz)
end
putvalue(dio1,0)
disp('x_ yönünde offset ayarı yapıldı')

```

```

disp(' ')
disp('y_ yönünde offset ayarı yapılıyor')
dataport=[1 2 4 8];mtr=16;
for i=1:Turyoffset
    yd=y; y=y+1;
    pin1=mod(y,4)+1;
    pin2=mod(yd,4)+1;
    port=dataport(pin1)+dataport(pin2);
    putvalue(dio1,port*mtr)

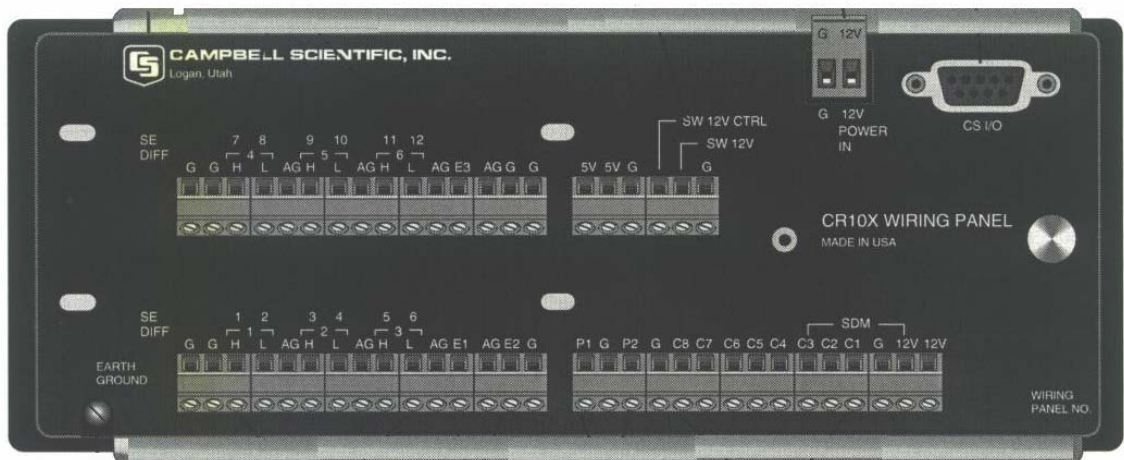
```



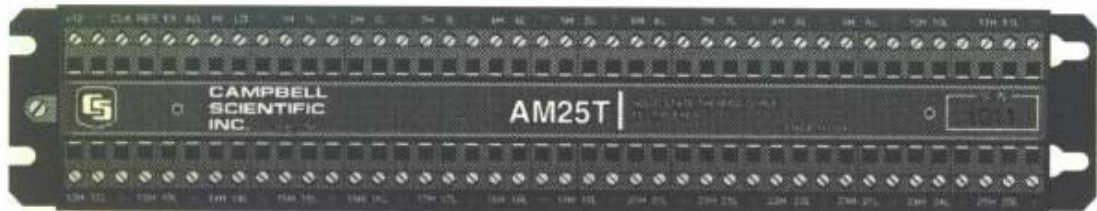
```
    pause(hz)
end
putvalue(dio1,0)
disp('y_ yönünde offset ayarı yapıldı')
```

```
function sıfırla
global x y hz
dio1=digitalio('parallel','LPT1'); dataout=addline(dio1,0:7,0,'out'); putvalue(dio1,0);
dio2=digitalio('parallel', 'LPT1'); datain=addline(dio2,0:4,1,'in'); s=getvalue(dio2);
disp(' ')
disp('Dikey Yönde Sıfırlama Yapılıyor')
dataport=[1 2 4 8]; mtr=16;
while s(4)~=0
    yd=y; y=y-1;
    pin1=mod(y,4)+1;
    pin2=mod(yd,4)+1;
    port=dataport(pin1)+dataport(pin2);
    putvalue(dio1,port*mtr)
    pause(hz)
    s=getvalue(dio2);
end
putvalue(dio1,0)
disp('Dikey Yönde Sıfırlama TAMAMLANDI'), pause(.5)
disp(' ')
disp('Yatay Yönde Sıfırlama Yapılıyor')
dataport=[1 2 4 8];
while s(5)~=1
    xd=x; x=x+1;
    pin1=mod(x,4)+1;
    pin2=mod(xd,4)+1;
    port=dataport(pin1)+dataport(pin2);
    putvalue(dio1,port)
    pause(hz)
    s=getvalue(dio2);
end
disp('Yatay Yönde Sıfırlama TAMAMLANDI')
putvalue(dio1,0)
```

EK-D DENEY DÜZENEĞİ FOTOĞRAFLARI



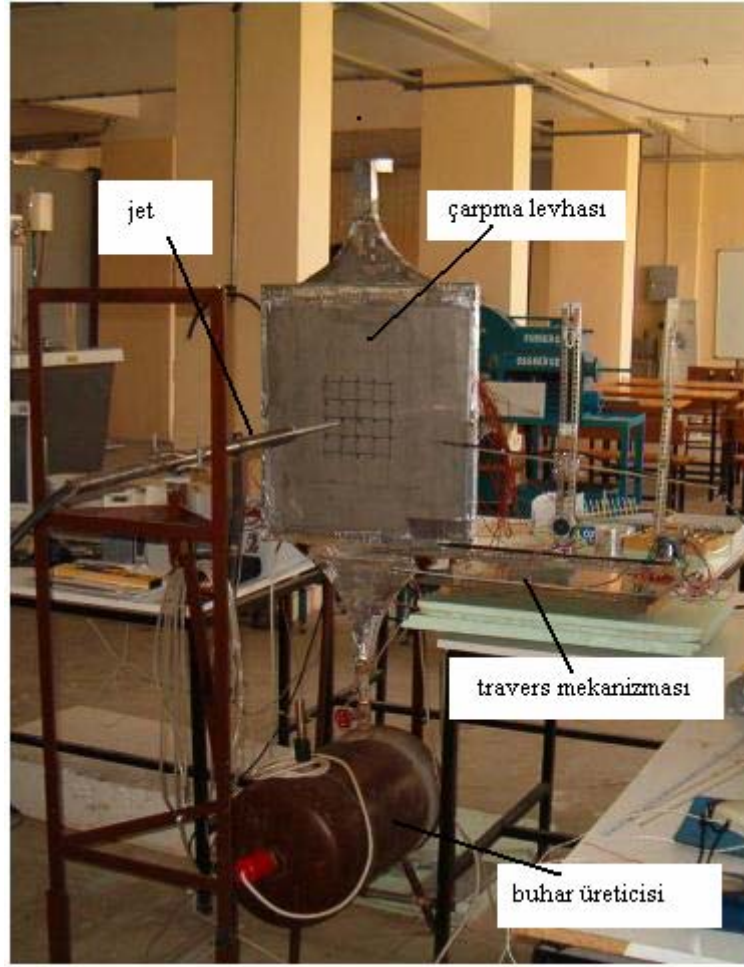
Resim D.1. Data toplayıcı ana ünitesi



Resim D.2. Data toplayıcıya bağlanan sıcaklık ölçüm noktaları



Resim D.3. Jet akımının kaynağı, kompresör



Resim D.4. Çarpma levhası ve buhar kazanı ve hareket mekanizması