T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PERVANE JETİ ETKİSİNDE AKIM ALANININ PIV TEKNİĞİ İLE ARAŞTIRILMASI

Yağızhan BİLMEZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Kıyı ve Liman Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Havva Anıl GÜNER

Temmuz, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PERVANE JETİ ETKİSİNDE AKIM ALANININ PIV TEKNİĞİ İLE ARAŞTIRILMASI

Yağızhan BİLMEZ tarafından hazırlanan tez çalışması 17.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kıyı ve Liman Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Havva Anıl GÜNER
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Havva Anıl GÜNER, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Veysel Şadan Özgür KIRCA, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Havva Anıl GÜNER sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Pervane jeti etkisinde akım alanının PIV tekniği ile araştırılması" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Yağızhan BİLMEZ

İmza

Bu çalışma, “Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü’nün FCD-2022-4734” numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Aileme

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez sürecimde her zaman yanımda olan, bilgisi, deneyimi ve desteğiyle bana yol gösteren değerli tez danışmanım Prof. Dr. Havva Anıl GÜNER'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmam süresince rehberliğini ve desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Yeşim ÇELİKOĞLU'na ve Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deney süreci boyunca birlikte çalıştığım, her adımda desteğini esirgemeyen arkadaşım Batuhan GÜREK'e gönülden teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana bilgi ve deneyimleriyle katkıda bulunan Kıyı ve Liman Mühendisliği Anabilim Dalı'ndaki tüm hocalarıma içtenlikle teşekkür ederim. Ayrıca, deney süreciyle ilgili her sorunda yardımıma koşan, desteğini hiç eksik etmeyen teknisyen Muhammet ULUÇAY'a da teşekkür ederim.

Son olarak, her zaman yanımda olan, sevgisini ve desteğini bana her koşulda hissettiren canım aileme: sabırları, inançları ve sonsuz destekleri için minnettarım.

Yağızhan BİLMEZ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii
KISALTMA LİSTESİ x
ŞEKİL LİSTESİ xi
TABLO LİSTESİ xxv
ÖZET xxvi
ABSTRACT xxviii
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 4
1.3 Hipotez 6
2 GEMİ PERVANESİ JET AKIMI 8
2.1 Gemi Pervanesi Jet Mekanizması 8
2.1.1 Giriş 8
2.1.2 Pervane Jeti Oluşumu 12
2.1.3 Batık Jet Difüzyonu 13
2.1.4 Pervane Jet Difüzyonu 14
2.1.5 Akım Hızı 16
2.1.6 Gelişmekte olan Akım Bölgesi 20
2.1.7 Tam Gelişmiş Akım Bölgesi 25
2.1.8 Düzlem Sınır Taban Varlığında Pervane Jeti 26
3 DENEYSEL YÖNTEM ve PIV ÖLÇÜMLERİ 29
3.1 Giriş 29
3.2 Deney Sistemi 29
3.3 Pervane Sistemi 33
3.4 Ölçüm Yöntemi (Parçacık Görüntüleme Hız Ölçümü (PIV)) 38
3.5 PIV Analiz Yöntemi 45
3.6 PIV Ölçümlerinin Doğrulanması 48
4 DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMESİ 53

4.1 Giriş 53
4.2 Deney Koşulları 55
4.3 Boyuna düzlemde (x-z düzlemi) Akım Özellikleri 56
4.3.1 Ortalama Hızlar 56
4.3.2 Boyutsuz Reynolds Gerilmesi 110
4.4 Enine Düzlemde (y-z düzlemi) Akım Özellikleri 133
4.4.1 Ortalama Hızlar 133
4.4.2 Eşdeğer Türbülans Yoğunlukları 154
4.5 Karakteristik Profiller 165
4.5.1 Derinlik Boyunca (Düşey) Hız Profilleri 165
4.5.2 Maksimum Eksenel Hız Değişimi 196
4.5.3 Kayma Gerilmesi 198
5 SONUÇ **215**
KAYNAKÇA **222**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **227**

SİMGE LİSTESİ

P_A	A noktasındaki basınç
V_A	A noktasındaki hız
ξ	Akım katsayısı
A	Aktüatör disk alanı
P_B	B noktasındaki basınç
V_B	B noktasındaki hız
N	Bir pervanenin kanat sayısı
P_C	C noktasındaki basınç
V_C	C noktasındaki hız
P_D	D noktasındaki basınç
V_D	D noktasındaki hız
D_0	Dairesel jet çapı
w'	Düşey hız dalgalanmaları
$\frac{\sqrt{w'^2}}{U_0}$	Düşey türbülans yoğunluğu
u'	Eksenel hız dalgalanmaları
$\frac{\sqrt{u'^2}}{U_0}$	Eksenel türbülans yoğunluğu
I	Eşdeğer türbülans yoğunluğu
P	Hatve
f	Lens açıklığı
R_{mo}	Maksimum hızın çıkış düzlemindeki yeri
w	Ortalama düşey hız
u	Ortalama eksenel hız
d_{50}	Ortalama parçacık boyutu
v	Ortalama yanal hız
D_p	Pervane çapı
u_c	Pervane ekseni boyunca merkez hızı
y	Pervane ekseninden ölçülen yanal mesafe
R_h	Pervane göbeğinin yarıçapı
D_h	Pervane hub çapı
C_T	Pervane itme katsayısı

β	Pervane kanat oranı
r	Pervane merkezinden radyal uzaklık
C	Pervane ucunun taban arasındaki mesafe
R_p	Pervane yarıçapı
x	Pervane yüzeyinden ölçülen boyuna mesafe
W_0	Pervanenin düşey çıkış hızı
U_0	Pervanenin eksenel çıkış hızı
n	Pervanenin saniyedeki devir sayısı
V_0	Pervanenin yanal çıkış hızı
$-\frac{\bar{u}'\,\bar{w}'}{U_0}$	Reynolds gerilmesi
ν	Sıvının kinematik viskozitesi
h	Su derinliği
ρ	Su yoğunluğu
G	Tabadan pervane ekseninin merkezine kadar olan düşey mesafe
τ_b	Taban yakınında Reynolds gerilmesi
z	Tabandan ölçülen düşey mesafe
v'	Yanal hız dalgalanmaları
σ	Yanal kesitteki hızın standart sapması
g	Yerçekimi ivmesi
u_m	Yerel maksimum yatay hız

KISALTMA LİSTESİ

ADV	Akustik Doppler Hız Ölçümü
ADVP	Akustik Doppler Hız Profilleyici
LDA	Lazer Doppler Anemometrisi
PIV	Parçacık Görüntü Hız Ölçümü
RPM	Dakikadaki Devir Sayısı
SPIV	Stereo Parçacık Görüntü Hız Ölçümü
ZEF	Tam Gelişmiş Akım Bölgesi
ZFE	Gelişmekte Olan Akım Bölgesi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Gemi pervaneleri, baş ve kıç iticiler (Sumer ve Fredsøe, 2002) 8
Şekil 2.2 Ro-Ro gemisi durumunda jet akımı sapması (Sumer ve Fredsøe, 2002) . 9
Şekil 2.3 Pruva pervaneleri kaynaklı jet akımı sapması (Sumer ve Fredsøe, 2002) 10
Şekil 2.4 Rıhtım yapıları: (a) Kapalı ve (b) Açık rıhtımlar (Sumer ve Fredsøe, 2002) 11
Şekil 2.5 Pervane jetinin hız bileşenleri (McGarvey, 1996)..... 12
Şekil 2.6 Pervane jetinin dönüşü (Sumer ve Fredsøe, 2002)..... 13
Şekil 2.7 Orifisten çıkan difüzör jetinin şematik gösterimi (Albertson vd, 1950) 14
Şekil 2.8 Bir pervane jeti tarafından oluşturulan hız dağılımı (Hamill, 1987)..... 15
Şekil 2.9 İdeal aktüatör diski olarak pervane modeli (Massey ve Ward-Smith, 2006) 17
Şekil 2.10 Pervane yüzeyi boyunca akım hızı konumu (Hamill vd., 2004)..... 19
Şekil 2.11 Gelişmekte olan akım bölgesinin şematik gösterimi (Albertson vd. 1950) 23
Şekil 2.12 Gauss normal dağılım eğrisi (Albertson vd., 1950) 23
Şekil 2.13 Gelişmekte olan akım bölgesinde pervane jetinin şematik gösterimi (Hamill, 1987)..... 24
Şekil 2.14 Tam gelişmiş akım gölgesinin şematik gösterimi (Albertson vd. 1950) 26
Şekil 2.15 Sınır tabaka gelişiminin şematik gösterimi (Johnston vd., 2013) 27
Şekil 2.16 Pervane jeti genişleme açısının açıklık yüksekliği ile değişimi (Johnston vd., 2013) 28
Şekil 3.1 Deney sisteminin görünümü..... 30
Şekil 3.2 Deney sistemi (Boyuna kesit)..... 31
Şekil 3.3 Deney sistemi boyuna görünüm 31
Şekil 3.4 Deney sistemi (Plan görünümü) 31
Şekil 3.5 Deney sistemi plan görünüm 32
Şekil 3.6 Pervane sisteminin şematik görünümü..... 33
Şekil 3.7 Bir pervanenin şematik çizimi..... 35
Şekil 3.8 Deneylerde kullanılan dört kanatlı pervanelerin geometrisi 36
Şekil 3.9 Wageningen B5 -75 vida serisi için açık su diyagramı (Carlton, 2007) 38
Şekil 3.10 PIV sistemi 39

Şekil 3.11 Deney sistemi (Plan görünümü), senkronizer, kamera, lazer 39

Şekil 3.12 PIV ölçüm sistemi ve bileşenleri 40

Şekil 3.13 FlowSense CX 4M-563 kamera 40

Şekil 3.14 Deneylerde kullanılan lazer başlığı 40

Şekil 3.15 Kalibrasyon tahtası ve pervane sistemi 41

Şekil 3.16 Ölçüm anından bir görüntü 41

Şekil 3.17 PIV görüntüsü 42

Şekil 3.18 Akım yönünde deney düzeneği a) deney düzeneğinin boyuna görünümü b) deney düzeneğinin enine görünümü c) deney düzeneğinin plan görünümü 44

Şekil 3.19 Dynamic Studio veritabanı yapısı 48

Şekil 3.20 Akım yönünde (x-z düzlemi) ve enine (y-z düzlemi) ölçümlerden elde edilen düşey hızların karşılaştırması: (a) G=15 cm, D=10 cm, *f*=40 Hz; (b) G=15 cm, D=10 cm, *f*=45 Hz; (c) G=15 cm, D=10 cm, *f*=50 Hz . 50

Şekil 3.21 PIV ve ADV ölçümlerinin karşılaştırılması: (a) G=15 cm, D=10 cm, *f*=40 Hz; (b) G=15 cm, D=10 cm, *f*=45 Hz; (c) G=15 cm, D=10 cm, *f*=50 Hz 51

Şekil 4.1 Pervane jeti şematik çizimleri; (a) sınırlandırılmamış pervane jeti, (b) sınırlandırılmış pervane jeti 54

Şekil 4.2 D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 57

Şekil 4.3 D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 58

Şekil 4.4 D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 59

Şekil 4.5 D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 60

Şekil 4.6 D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 61

Şekil 4.7 D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm

G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....62

Şekil 4.8 D=6.5 cm çaplı pervane için ölçüm yapılan eksenlerin plan görünümü 67

Şekil 4.9 y/D_p=0.9, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....69

Şekil 4.10 y/D_p=0.9, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....70

Şekil 4.11 y/D_p=0.6, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....71

Şekil 4.12 y/D_p=0.6, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....72

Şekil 4.13 y/D_p=0.3, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....73

Şekil 4.14 y/D_p=0.3, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....74

Şekil 4.15 y/D_p=-0.3, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....75

Şekil 4.16 y/D_p=-0.3, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....76

Şekil 4.17 y/D_p=-0.6, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....77

Şekil 4.18 y/D_p=-0.6, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....78

Şekil 4.19 y/D_p=-0.9, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....79

Şekil 4.20 y/D_p=-0.9, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....80

Şekil 4.21 D=10 cm çaplı pervane için ölçüm yapılan eksenlerin plan görünümü 81

Şekil 4.22 y/D_p=0.6, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....83

Şekil 4.23 y/D_p=0.6, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....84

Şekil 4.24 y/D_p=0.4, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....85

Şekil 4.25 y/D_p=0.4, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....86

Şekil 4.26 y/D_p=0.2, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....87

Şekil 4.27 y/D_p=0.2, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....88

Şekil 4.28 y/D_p=-0.2, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....89

Şekil 4.29 y/D_p=-0.2, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....90

Şekil 4.30 y/D_p=-0.4, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590

Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....91

Şekil 4.31 y/D_p=-0.4, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....92

Şekil 4.32 y/D_p=-0.6, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....93

Şekil 4.33 y/D_p=-0.6, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....94

Şekil 4.34 D=13 cm çaplı pervane için ölçüm yapılan eksenlerin plan görünümü 95

Şekil 4.35 y/D_p=0.45, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....97

Şekil 4.36 y/D_p=0.45, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....98

Şekil 4.37 y/D_p=0.3, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....99

Şekil 4.38 y/D_p=0.3, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....100

Şekil 4.39 y/D_p=0.15, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....101

Şekil 4.40 y/D_p=0.15, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....102

Şekil 4.41 y/D_p=-0.15, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm.....103

Şekil 4.42 y/D_p=-0.15, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm..... 104

Şekil 4.43 y/D_p=-0.3, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm..... 105

Şekil 4.44 y/D_p=-0.3, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm..... 106

Şekil 4.45 y/D_p=-0.45, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm..... 107

Şekil 4.46 y/D_p=-0.45, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm..... 108

Şekil 4.47 D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm..... 111

Şekil 4.48 D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm..... 112

Şekil 4.49 D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm..... 113

Şekil 4.50 y/D_p= 0.9 D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 115

Şekil 4.51 y/D_p= 0.6 D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 116

Şekil 4.52 y/D_p= 0.3 D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 117

Şekil 4.53 y/D_p=-0.3 D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 118

Şekil 4.54 y/D_p=-0.6 D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 119

Şekil 4.55 y/D_p=-0.9 D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 120

Şekil 4.56 y/D_p= 0.6 D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 121

Şekil 4.57 y/D_p= 0.4 D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 122

Şekil 4.58 y/D_p= 0.2 D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 123

Şekil 4.59 y/D_p=-0.2 D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 124

Şekil 4.60 y/D_p=-0.4 D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 125

Şekil 4.61 y/D_p=-0.6 D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 126

Şekil 4.62 y/D_p= 0.45 D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 127

Şekil 4.63 y/D_p= 0.3 D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 128

Şekil 4.64 y/D_p= 0.15 D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 129

Şekil 4.65 y/D_p=-0.15 D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 130

Şekil 4.66 y/D_p=-0.3 D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 131

Şekil 4.67 y/D_p=-0.45 D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm 132

Şekil 4.68 Pervane jetinin düzlem sınırları gösterimi..... 134

Şekil 4.69 D=6.5 cm, Rpm=590, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine ortalama hız alanları..... 135

Şekil 4.70 D=6.5 cm, Rpm=590, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine akım çizgileri 136

Şekil 4.71 D=6.5 cm, Rpm=670, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine ortalama hız alanları..... 137

Şekil 4.72 D=6.5 cm, Rpm=670, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine akım çizgileri 138

Şekil 4.73 D=6.5 cm, Rpm=745, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine ortalama hız alanları..... 139

Şekil 4.74 D=6.5 cm, Rpm=745, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine akım çizgileri 140

Şekil 4.75 D=10 cm, Rpm=590, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine ortalama hız alanları..... 141

Şekil 4.76 D=10 cm, Rpm=590, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine akım çizgileri 142

Şekil 4.77 D=10 cm, Rpm=670, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine ortalama hız alanları..... 143

Şekil 4.78 D=10 cm, Rpm=670, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine akım çizgileri 144

Şekil 4.79 D=10 cm, Rpm=745, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine ortalama hız alanları..... 145

Şekil 4.80 D=10 cm, Rpm=745, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine akım çizgileri 146

Şekil 4.81 D=13 cm, Rpm=590, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine ortalama hız alanları 147

Şekil 4.82 D=13 cm, Rpm=590, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine akım çizgileri 148

Şekil 4.83 D=13 cm, Rpm=670, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine ortalama hız alanları 149

Şekil 4.84 D=13 cm, Rpm=670, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine akım çizgileri 150

Şekil 4.85 D=13 cm, Rpm=745, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine ortalama hız alanları 151

Şekil 4.86 D=13 cm, Rpm=745, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine akım çizgileri 152

Şekil 4.87 D=6.5 cm, Rpm=590, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) için eşdeğer türbülans yoğunlukları 156

Şekil 4.88 D=6.5 cm, Rpm=670, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) için eşdeğer türbülans yoğunlukları 157

Şekil 4.89 D=6.5 cm, Rpm=745, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) için eşdeğer türbülans yoğunlukları 158

Şekil 4.90 D=10 cm, Rpm=590, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) için eşdeğer türbülans yoğunlukları 159

Şekil 4.91 D=10 cm, Rpm=670, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) için eşdeğer türbülans yoğunlukları 160

Şekil 4.92 D=10 cm, Rpm=745, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) için eşdeğer türbülans yoğunlukları 161

Şekil 4.93 D=13 cm, Rpm=590, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) için eşdeğer türbülans yoğunlukları 162

Şekil 4.94 D=13 cm, Rpm=670, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) için eşdeğer türbülans yoğunlukları 163

Şekil 4.95 D=13 cm, Rpm=745, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) için eşdeğer türbülans yoğunlukları 164

Şekil 4.96 D=6.5 cm, Rpm=590, G=15 cm için I bölgesinde (serbest jet) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı 167

Şekil 4.97 D=6.5 cm, Rpm=590, G=10 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı 167

Şekil 4.98 D=6.5 cm, Rpm=670, G=15 cm için I bölgesinde (serbest jet) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı 168

Şekil 4.99 D=6.5 cm, Rpm=670, G=10 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı 168

Şekil 4.100 D=6.5 cm, Rpm=745, G=15 cm için I bölgesinde (serbest jet) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı 169

Şekil 4.101 D=6.5 cm, Rpm=745, G=10 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı 169

Şekil 4.102 D=10 cm, Rpm=590, G=15 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı 170

Şekil 4.103 D=10 cm, Rpm=590, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı 170

Şekil 4.104 D=10 cm, Rpm=670, G=15 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı 171

Şekil 4.105 D=10 cm, Rpm=670, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı 171

Şekil 4.106 D=10 cm, Rpm=745, G=15 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı 172

Şekil 4.107 D=10 cm, Rpm=745, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı 172

Şekil 4.108 D=13 cm, Rpm=590, G=15 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı 173

Şekil 4.109 D=13 cm, Rpm=590, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı 173

Şekil 4.110 D=13 cm, Rpm=670, G=15 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı 174

Şekil 4.111 D=13 cm, Rpm=670, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı 174

Şekil 4.112 D=13 cm, Rpm=745, G=15 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı 175

Şekil 4.113 D=13 cm, Rpm=745, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı 175

Şekil 4.114 D=6.5 cm, Rpm=590, G=15 cm için I bölgesinde (serbest jet) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı 177

Şekil 4.115 D=6.5 cm, Rpm=590, G=10 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı 177

Şekil 4.116 D=6.5 cm, Rpm=670, G=15 cm için I bölgesinde (serbest jet) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı 178

Şekil 4.117 D=6.5 cm, Rpm=670, G=10 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı..... 178

Şekil 4.118 D=6.5 cm, Rpm=745, G=15 cm için I bölgesinde (serbest jet) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı..... 179

Şekil 4.119 D=6.5 cm, Rpm=745, G=10 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı..... 179

Şekil 4.120 D=10 cm, Rpm=590, G=15 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı 180

Şekil 4.121 D=10 cm, Rpm=590, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı 180

Şekil 4.122 D=10 cm, Rpm=670, G=15 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı 181

Şekil 4.123 D=10 cm, Rpm=670, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı 181

Şekil 4.124 D=10 cm, Rpm=745, G=15 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı 182

Şekil 4.125 D=10 cm, Rpm=745, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı 182

Şekil 4.126 D=13 cm, Rpm=590, G=15 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı 183

Şekil 4.127 D=13 cm, Rpm=590, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı 183

Şekil 4.128 D=13 cm, Rpm=670, G=15 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı 184

Şekil 4.129 D=13 cm, Rpm=670, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı 184

Şekil 4.130 D=13 cm, Rpm=745, G=15 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı 185

Şekil 4.131 D=13 cm, Rpm=745, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı 185

Şekil 4.132 D=6.5 cm, Rpm=590, G=15 cm için I bölgesinde (serbest jet) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı 187

Şekil 4.133 D=6.5 cm, Rpm=590, G=10 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı 187

Şekil 4.134 D=6.5 cm, Rpm=670, G=15 cm için I bölgesinde (serbest jet) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı 188

Şekil 4.135 D=6.5 cm, Rpm=670, G=10 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı 188

Şekil 4.136 D=6.5 cm, Rpm=745, G=15 cm için I bölgesinde (serbest jet) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı 189

Şekil 4.137 D=6.5 cm, Rpm=745, G=10 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı 189

Şekil 4.138 D=10 cm, Rpm=590, G=15 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı 190

Şekil 4.139 D=10 cm, Rpm=590, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı 190

Şekil 4.140 D=10 cm, Rpm=670, G=15 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı 191

Şekil 4.141 D=10 cm, Rpm=670, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı 191

Şekil 4.142 D=10 cm, Rpm=745, G=15 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı 192

Şekil 4.143 D=10 cm, Rpm=745, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı 192

Şekil 4.144 D=13 cm, Rpm=590, G=15 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı 193

Şekil 4.145 D=13 cm, Rpm=590, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı 193

Şekil 4.146 D=13 cm, Rpm=670, G=15 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı 194

Şekil 4.147 D=13 cm, Rpm=670, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı 194

Şekil 4.148 D=13 cm, Rpm=745, G=15 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı 195

Şekil 4.149 D=13 cm, Rpm=745, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı 195

Şekil 4.150 Maksimum eksenel hızın azalması 196

Şekil 4.151 Maksimum eksenel hızdaki azalmanın literatürdeki bulgularla karşılaştırılmalı incelenmesi 197

Şekil 4.152 D=6.5 cm, Rpm =590, G= 10 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi 199

Şekil 4.153 D=6.5 cm, Rpm =670, G= 10 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi 199

Şekil 4.154 D=6.5 cm, Rpm =745, G= 10 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi 200

Şekil 4.155 D=10 cm, Rpm =590, G= 10 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi 200

Şekil 4.156 D=10 cm, Rpm =670, G= 10 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi 201

Şekil 4.157 D=10 cm, Rpm =745, G= 10 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi 201

Şekil 4.158 D=13 cm, Rpm =590, G= 10 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi 202

Şekil 4.159 D=13 cm, Rpm =670, G= 10 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi 202

Şekil 4.160 D=13 cm, Rpm =745, G= 10 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi 203

Şekil 4.161 D=6.5 cm, Rpm =590, G= 15 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi 203

Şekil 4.162 D=6.5 cm, Rpm =670, G= 15 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi 204

Şekil 4.163 D=6.5 cm, Rpm =745, G= 15 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi 204

Şekil 4.164 D=10 cm, Rpm =590, G= 15 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi 205

Şekil 4.165 D=10 cm, Rpm =670, G= 15 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi 205

Şekil 4.166 D=10 cm, Rpm =745, G= 15 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi 206

Şekil 4.167 D=13 cm, Rpm =590, G= 15 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi 206

Şekil 4.168 D=13 cm, Rpm =670, G= 15 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi 207

Şekil 4.169 D=13 cm, Rpm =745, G= 15 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi 207

Şekil 4.170 Deney sonuçları eksenel taban hız değerleri (U_{taban}) ile eşitlik (4.5) kullanılarak tahmin edilen taban hız değerleri karşılaştırması 211

Şekil 4.171 Boyutsuz kayma hızı değerlerinin deneysel ve teorik (Eşitlik 4.3) karşılaştırması 212

Şekil 4.172 Boyutsuz kayma hızı değerlerinin deneysel ve teorik (Eşitlik 4.6) karşılaştırması 213

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Maksimum eksenel hız azalmasını hesaplamak için geliştirilen ifadeler 25

Tablo 3.1 Pervanelerin özellikleri 36

Tablo 3.2 Pervane hatve/çap oranının fonksiyonu olarak itme katsayısı (K_T) (Carlton, 2007) 37

Tablo 4.1 Pervane ekseninde gerçekleştirilen deney koşulları 56

Tablo 4.2 Deneylerde ölçülen maksimum akım hızları (U_0) 63

Tablo 4.3 $u=0.06U_0$ iken X/D_p'ye göre pervane jetinin tabanla temas konumları 65

Tablo 4.4 D=6.5 cm çaplı pervane ekseni dışındaki düzlemlerde gerçekleştirilen deney koşulları 68

Tablo 4.5 D=10 cm çaplı pervane ekseni dışındaki düzlemlerde gerçekleştirilen deney koşulları 81

Tablo 4.6 D=13 cm çaplı pervane ekseni dışındaki düzlemlerde gerçekleştirilen deney koşulları 95

Tablo 4.7 Enine düzlemlerde gerçekleştirilen deney koşulları 134

Tablo 4.8 Deneylerin kapsadığı boyutsuz parametrelerin özeti 198

Tablo 4.9 U_{*maks} değerleri 208

ÖZET

Pervane Jeti Etkisinde Akım Alanının PIV Tekniği ile Araştırılması

Yağızhan BİLMEZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Kıyı ve Liman Mühendisliği Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Havva Anıl GÜNER

Bu çalışmada, serbest dönen bir gemi pervanesinin rijit bir taban üzerinde oluşturduğu jet akımının üç boyutlu yapısı, Parçacık Görüntüleme Hız Ölçümü (PIV) tekniği kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Farklı pervane çapları (6.5, 10 ve 13 cm), devir sayıları (590, 670 ve 745 rpm) ve açıklık yükseklikleri (10 ve 15 cm) ile toplam on sekiz farklı deney konfigürasyonu oluşturulmuştur. Bu konfigürasyonlar kapsamında, akımın eksenel ve yanal hız bileşenleri, Reynolds gerilmeleri, türbülans yoğunlukları ve taban üzerindeki kayma gerilmesi dağılımları değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, pervane jet akımının gelişim sürecine bağlı olarak üç karakteristik bölgeye ayrıldığını (serbest jet, geçiş bölgesi ve duvar jeti); jetin genişleme açısının pervane devir sayısı ile doğrusal olarak arttığını; ayrıca açıklık oranının (G/D_p) akım yapısında belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Jetin rijit tabanla etkileşimi sonucunda oluşan Coandă etkisi nedeniyle akımın alt sınır yüzeyine yönelme eğiliminde olduğu; bu durumun taban yakınında enerjinin hapsolmasına ve türbülans yapılarının asimetrik gelişmesine neden olduğu gözlemlenmiştir. Pervane ekseni boyunca ölçülen hız profillerinde,

göbek etkisine bağlı olarak çift tepeli yapılar ortaya çıkmıştır. Reynolds gerilmelerinin, eksenel hız gradyanı ile pozitif yönde korelasyon gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca pervane dönüş yönünün, yanal hız profillerinde S-şeklinde asimetrik dağılımlar oluşturduğu belirlenmiştir. Pervane jet akımı boyunca, tabandaki kayma gerilmesi geçiş bölgesine kadar düzenli bir artış göstermiş; bu bölgede yaklaşık dört katına çıkarak en yüksek değerlere duvar jeti bölgesinde ulaşmıştır. Duvar jeti bölgesinin $x/D_p \approx 3.3G/D_p$ konumunda oluştuğu görülmüştür. Bu kayma gerilmesi, merkez eksende yoğunlaşmakta ve yanal eksenlere doğru azalmaktadır. Deneysel veriler, mevcut teorik modellerin (özellikle Maynord, 2000) düşük açıklık oranlarında akım yapısıyla uyumlu sonuçlar verdiğini; ancak yüksek açıklık oranlarında belirgin sapmalar gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu doğrultuda, çalışmada sürtünme katsayısı (C_f), açıklık yüksekliği (G) ve jet çıkış hızı (U_0) gibi parametreleri içeren yeni bir ampirik model önerilmiştir. Söz konusu modelin kıyı-liman yapılarının güvenli tasarımında mühendislik uygulamalarına katkı sağlaması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Pervane, Dönen jet, Hız dağılımı, Parçacık görüntüleme hız ölçümü (PIV), Türbülanslı akım

ABSTRACT

Investigation Of The Flow Field Induced by Propeller Jet Using PIV Technique

Yağızhan BİLMEZ

Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Havva Anıl GÜNER

This study investigates the three-dimensional structure of jet flow generated by a freely rotating marine propeller over a rigid bed using the Particle Image Velocimetry (PIV) technique. Eighteen experimental configurations were developed by varying propeller diameters (6.5, 10, and 13 cm), rotational speeds (590, 670, and 745 rpm), and gap heights (10 and 15 cm). The flow's axial and lateral velocity components, Reynolds stresses, turbulence intensities, and bed shear stress distributions were analyzed. The results indicate that the propeller jet evolves through three characteristic regions (free jet, transition region, and wall jet); that the jet spreading angle increases linearly with the propeller rotation speed; and that the clearance ratio (G/D_p) plays a decisive role in the flow structure. The interaction of the jet with the rigid bed induces the Coandă effect, which deflects the flow toward the bed, resulting in energy confinement and asymmetric turbulence near the wall. Velocity profiles along the propeller axis revealed a dual-peak structure caused by hub effects. Reynolds stresses were positively correlated with axial velocity gradients. The direction of propeller rotation produced S-shaped asymmetries in lateral velocity distributions. Bed shear stress increased steadily

along the jet path, peaking in the wall jet region, with a maximum observed around $x/D_p \approx 3.3G/D_p$. The highest shear values were concentrated near the centerline and decreased toward the sides axis. Experimental findings showed that existing theoretical models (particularly Maynord, 2000) aligned well with low gap height ratios but diverged at higher ones. Based on these results, a new empirical model was proposed incorporating parameters such as friction coefficient (C_f), clearance height (G), and jet exit velocity (U_0). This model aims to support engineering applications, particularly in evaluating propeller-induced scour risk and ensuring the safe design of coastal and port structures.

Keywords: Propeller, Rotating jet, Velocity distribution, Particle image velocimetry (PIV), Turbulent flows.

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Gemi pervanelerinin oluşturduğu jet akımları, deniz yapıları üzerinde oluşturduğu etkiler nedeniyle çeşitli araştırmalara konu olmuştur. Bu akımların özellikle rıhtım yapıları ve deniz tabanında yol açtığı oyulmalar önemli bir mühendislik problemi oluşturmaktadır. Gemi pervanesinin oluşturduğu pervane jeti, birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir, çünkü gemi pervanesi tarafından üretilen yüksek hızlar sadece gemiye değil aynı zamanda deniz tabanında oluşan oyulmadan dolayı rıhtım yapısına da zarar vermektedir. Pervane jetinin yarattığı akım alanının daha iyi anlaşılabilmesi açısından üç boyutlu akım alanını ölçmek için aralarında PIV ölçüm tekniğinin de olduğu farklı ölçüm sistemleri kullanılabilmektedir. Literatür incelendiğinde bu konu ile ilgili yapılan çalışmalardan bazıları Yüksel vd., (2012), Çelikoğlu vd. (2012), Hsieh vd. (2013), Yüksel vd. (2018), Tan ve Yüksel (2018), Wei ve Chiew (2018), Wei vd. (2018), Wei vd. (2019) olarak sayılabilir.

Yüksel vd. (2012), deniz tabanına yerleştirilen bir kazık etrafındaki akım özelliklerinin incelemek amacıyla deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada gemi pervane jetleri hem dairesel duvar jeti hem de pervane jeti olarak modellenmiştir. Açık tip rıhtım yapıları için (silindirik kazıkların ve şevlerin etrafında) jet ekseni boyunca deniz tabanındaki kayma gerilmesi ve hız profillerini Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) kullanarak belirlenmiştir.

Hsieh vd. (2013), beş kanatlı bir pervanenin oluşturduğu üç boyutlu akım alanını incelemek için PIV tekniğini kullanmışlardır. Elde edilen ortalama akım alanı ölçümleri, eksenel hız bileşeninin tüm akım alanı içerisinde en büyük katkıyı sağladığını enine ve düşey doğrultudaki hız bileşenlerinin ise ikinci ve üçüncü dereceden etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, maksimum eksenel hızın sönümlenme süreci ve konumu analiz edilerek bu davranışı tanımlayan yeni bir formül önerilmiştir.

Yüksel vd. (2018), bir kazık etrafında pervane jeti kaynaklı oyulmayı incelemişlerdir. Deney sonucunda oyulma profillerinin yüksek oranda yoğunluk Froude sayısına (Fr), pervane çapına (D_p), pervane açıklığına (G) ve kazık çapına (d_0) bağlı olduğunu belirtmişlerdir ve kazık önündeki oyulma derinliğini tahmin etmek için yeni ampirik denklemler önermişlerdir.

Tan ve Yüksel (2018), yapı etkisinden bağımsız pervane jetinin neden olduğu oyulma sürecini analiz ederek ve oyulmayı tahmin eden denklemler önermişlerdir. Deneylerde farklı taban malzemeleri kullanarak önceki çalışmalarla karşılaştırmışlardır.

Wei ve Chiew (2018), PIV tekniğini kullanarak, şevli rıhtım yapısı kullanarak pervane etkisi ile gelişen oyulma çukuru içindeki akım alanını belirlemek için deneysel bir çalışma yapmışlardır.

Wei vd. (2018), rijit tabanlı şevli rıhtım yapısı etrafında, pervane jetinin oluşturduğu akım özelliklerini, PIV tekniği kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir. Pervane ile rıhtım şevi arasında farklı mesafeler dikkate alınarak ortalama hız ve türbülans şiddeti belirlenmiştir. Pervane ile rıhtım şevi arasındaki mesafe arttıkça pervane jeti şeve ulaşmadan önce önemli bir difüzyona uğramaktadır. Bununla birlikte, türbülans şiddeti dağılımları mevcut şevin, tabana yakın bölgesinde önemli bir türbülans artışına neden olduğunu göstermiştir.

Wei vd. (2019), kapalı tipten bir rıhtım önünde pervane kaynaklı akım alanının ve bununla ilişkili oyulma çukurunun karakteristikleri üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Hız alanı ve oyulma profilinin aynı anda ölçülmesine izin veren eğimli PIV tekniğini kullanmışlardır.

Çelikoğlu vd. (2012), gerçekleştirdikleri çalışmada rijit tabana yerleştirilmiş silindirik kazık etrafında, gemi pervanelerinden çıkan su jetlerinden dolayı oluşan akım alanını incelemişlerdir. Gemi pervanelerinden çıkan su jeti, dairesel kesitli duvar jeti olarak benzeştirilmiştir. Deneyler, laboratuvar tankında oluşturulan yatay ve sabit bir taban üzerine yerleştirilmiş silindirik kazık dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Kazık ve su jetinin konumu sabit tutularak farklı jet debileri için, kazık etrafında ve jet ekseni boyunca kazığın memba ve mansabında jet çıkış

çapının katları mesafelerde hız ile kayma gerilmesi dağılımları ADV kullanılarak elde edilmiştir.

Wei and Chiew (2019), düşey bir rıhtım duvarına çarpan pervane jetinden dolayı oluşan akım alanını deneysel olarak araştırmışlardır. Duvar pervaneden farklı uzaklıklara yerleştirilerek yapılan ölçümlerle duvar konumunun akım üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Akım alanı parçacık görüntülü hız ölçümü (PIV) tekniği kullanılarak her duvar konumu için hem akım doğrultusunda (jet ekseni) hem de enine doğrultuda ölçülmüştür. Duvar açıklığına bağlı olarak serbest jet bölgesi, geçiş bölgesi ve duvar jeti bölgesi olmak üzere üç bölge tanımlanmıştır. Farklı duvar açıklıkları için ortalama akım özellikleri ve enerji dağılımları belirlenmiştir.

Marroig (2022), düşük taban açıklığı koşullarında gemi pervanelerinin oluşturduğu jet akımının sediman tabanın üzerindeki etkileri araştırmıştır. Araştırmada hem tekil hem de ikiz pervane sistemi kullanılarak, pervane jet hızları ve taban kesme gerilmeleri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyleri gerçekleştirirken pitot-statik tüp ile hız ölçümleri, basınç sensörleri kullanılarak kayma gerilmesi ölçümleri yer almaktadır. Deneylerde taban açıklığı, duvar mesafesi, pervane dönüş yönü, jet çıkış hızı parametreleri kullanılmıştır. Deneyler sonucu düşük taban açıklığında pervane jetlerinin tabanda yüksek kayma gerilmeleri oluşturduğunu, duvarla olan mesafenin ise oyulma derinliği üzerinde önemli derecede etkisi olduğunu göstermiştir. Ayrıca, pervane dönüş yönünün farklı oyulma davranışları sergilediğini gözlemlemiş, her durum için ayrı ampirik modeller geliştirmiştir.

Hermsen (2019), bir gemi pervanesinin serbest akım durumunda türbülans dinamiğini deneysel olarak belirlemek için su kanalında PIV tekniğini kullanarak deneylerini gerçekleştirmiştir. Deneylerinde hız profilleri, hub ve uç vorteks davranışı ile enerji taşınım mekanizmasını incelemiştir. Deneyler sonucunda, türbülanslı akımda pervane göbeğinin (hub), akım alanının merkezinde belirgin bir hız düşüşüne neden olduğu gözlemlenmiştir.

Mevcut literatür taraması, pervane jetinin hızına ilişkin ilk çalışmaların esas olarak sınırlandırılmamış pervane jetine (yani serbest genişleyen bir jet) odaklandığını, pervane jetinin özelliklerini tanımlamak için özellikle hızın eksenel bileşeni için bir dizi denklem önerildiğini ortaya koymuştur. Ancak, pervaneli jeti normal jetten

ayıran diğer iki hız bileşeni hala tam olarak anlaşılamamıştır. Ayrıca, daha önceki ölçüm tekniklerinin sınırlılığı nedeniyle, önceki çalışmaların çoğu yalnızca tek noktalı ölçüm verilerine dayalı olarak seçilen hız profilini sunmaktadır. Daha da önemlisi, pervane jetinin hidrodinamik özelliklerinin bir düzlem sınırı (sert veya aşınabilir) veya açık bir rıhtım eğimi ile sınırlandırılması konusunda sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Bu araştırma boşluğunu doldurmak amacıyla, pervane jetinin karakteristiklerini etkileyen sınır koşullarını daha iyi ortaya koyabilecek, üç boyutlu sınırlandırılmış pervane jeti akım alanının yüksek çözünürlüklü bir görüntüsünün elde edilmesi için detaylı deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Buna ek olarak, tabana yakın akım yapısının ve akışkan–taban ara yüzeyinde gelişen etkileşimin ayrıntılı şekilde incelenmesi, bu etkileşimin mekanizmasının anlaşılabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

1.2 Tezin Amacı

de Gijt ve Broeken (2005), rıhtım yapılarının tasarımında görev alan mühendislerin, temel derinliği, ara palplanş yerleşimi ve topuk mesafesi gibi yapısal parametreleri belirlerken, pervane kaynaklı oyulma hasarının potansiyel etkilerini dikkate almaları gerektiğini vurgulamaktadır. Günümüze kadar yapılan araştırmalar, pervane jet akımının karakteristik özelliklerini anlamaya ve bu akımların neden olduğu oyulma davranışını hem açık su koşullarında (sınırlandırılmamış jet) hem de kapalı liman duvarlarının yakınında (sınırlandırılmış jet) incelemeye odaklanmıştır. Ancak, açık tip rıhtımlar gibi yarı açık yapılar çevresinde oluşan karmaşık jet etkileşimleri ve buna bağlı oyulma süreçleri üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Gemilerin yanaşma ve ayrılma operasyonları sırasında pervane jetinin rıhtım yapıları etrafındaki akım alanı ile etkileşimi, yapıların güvenliği ve hizmet ömrü açısından önemli bir mühendislik sorunu haline gelmiştir. Özellikle bu süreçte oluşan yüksek hızlı jetler, rıhtım temelleri ve kıyı koruma sistemlerinde ciddi oyulma riskine yol açabilmektedir. Bu nedenle, pervane jetinin tabanda oluşturduğu hız alanının ve buna bağlı kayma gerilmelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi, koruma yapılarına ilişkin etkili tasarım kararlarının alınabilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmanın temel amacı, gemi pervane jeti ile rijit taban arasındaki etkileşimi farklı geometrik ve hidrodinamik koşullarda deneysel olarak incelemek, oluşan akım yapısını detaylı biçimde analiz etmek ve tabandaki potansiyel kayma gerilmelerini nicel olarak belirleyerek, oyulma riskine karşı koruma yapılarına yönelik mühendislik önerileri sunmaktır.

Bu kapsamda, laboratuvar ortamında yürütülen deneysel çalışmalarda PIV (Parçacık Görüntüleme Hız Ölçümü) tekniği kullanılarak üç farklı pervane çapı (6.5 cm, 10 cm, 13 cm), üç farklı pervane dönüş hızı (590, 670, 745 rpm) ve iki farklı açıklık yüksekliği (10 cm ve 15 cm) altında pervane jeti etkisindeki akım alanı incelenmiştir. Bu deneysel parametreler doğrultusunda, rijit taban üzerinde hız profilleri, Reynolds gerilmeleri ve kayma gerilmeleri belirlenerek kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Araştırma Soruları:

- Pervane çapı, dönüş hızı ve açıklık yüksekliği gibi değişkenler, pervane jeti ile taban arasındaki akım yapısını nasıl etkilemektedir?
- Jet akışı tarafından oluşturulan hız alanı, Reynolds gerilmeleri ve kayma gerilmeleri nasıl bir dağılım göstermektedir?
- Farklı sınır koşullarında (farklı açıklık ve pervane çaplarıyla) oluşan kayma gerilmeleri, oyulma açısından hangi koşullarda kritik seviyelere ulaşmaktadır?
- Deneysel bulgular, mevcut rıhtım tasarım standartlarının yeterliliğini sorgulamak ve koruma yapılarının tasarımında yeni yaklaşımlar önermek için nasıl kullanılabilir?
- PIV tekniği, pervane jeti–taban etkileşiminin modellenmesinde ne derece etkin bir ölçüm aracı sunmaktadır?

Alt hedefler:

- Farklı pervane çapları, dönüş hızları ve açıklık yükseklikleri altında oluşan pervane jetlerinin hız alanlarını PIV tekniği ile ölçmek ve karşılaştırmak.
- Rijit taban üzerinde oluşan Reynolds gerilmelerini ve kayma gerilmelerini belirlemek.

- Jetin tabanla etkileşiminin karakteristiğini ortaya koymak ve hidrodinamik parametrelerle ilişkilendirmek.
- Elde edilen verileri kullanarak oyulma riskini değerlendirmek ve kritik koşulları belirlemek.
- Deneysel sonuçlara dayalı olarak, kıyı ve liman yapılarının temellerinde oyulmaya karşı koruma sistemleri için öneriler geliştirmek.

Tez beş ayrı bölüm olacak şekilde düzenlenmiştir. Birinci bölümde, yani mevcut bölümde, araştırma konusunun geçmişi anlatılmaktadır ve gerçekleştirilen çalışmanın amacı ve motivasyonu açıklanmaktadır.

İkinci bölümde, serbest jet akımı koşullarında pervane jetinin özellikleri ile ilgili son araştırmalar genel olarak incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, pervane jet akımının incelenmesi için kullanılan deney düzeneği, veri analizi aşamaları ve kullanılan yöntem açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, deneyler sonucu elde edilen jet akımının özellikleri sunulmuştur. Bu bölümde ortalama akım hız alanı ve türbülans özelliklerinin, ayrıca kayma gerilmesi incelemesinin sonuçları analiz edilmekte ve tartışılmaktadır.

Son olarak, beşinci bölümde mevcut çalışmanın temel bulgularını özetlenmiş ve gelecekteki çalışmalar için öneriler verilmiştir.

1.3 Hipotez

Pervane çapı, devir sayısı (rpm) ve pervane-açıklık yüksekliği gibi temel hidrodinamik ve geometrik parametreler, pervane jetinin rijit taban üzerindeki akım yapısı ve yüzeye iletilen gerilme dağılımı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Bu parametrelerdeki değişim, pervane tarafından oluşturulan jetin enerjisini, yönelimini ve türbülans karakteristiklerini doğrudan etkileyerek, özellikle jet ekseni boyunca ve çevresinde gelişen hız profillerinde ve kayma gerilmesi dağılımlarında anlamlı farklılıklara yol açmaktadır. Jetin rijit tabanla etkileşimi sırasında ortaya çıkan maksimum eksenel hız büyüklüğü, bu hızın yatay ve düşey doğrultularda sönümlenme davranışı, kritik yüzey gerilme değerlerinin oluşumuna neden olabilecek düzeylere ulaşabilmektedir. Belirli sınır koşulları altında (örneğin

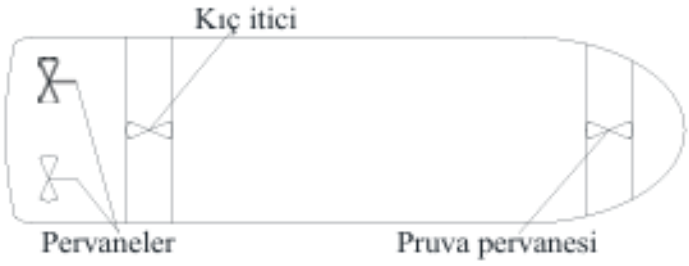
sabit su derinliği, belirli açıklık mesafesi ve akım engelleyici unsurların yokluğu gibi), bu etkileşim yapıların temellerinde lokal oyulma riskini artırabilecek düzeyde hidrodinamik streslerin oluşmasına neden olabilmektedir. Bu bağlamda, pervane parametrelerinin etkisinin sistematik olarak incelenmesi, jetin alt tabakaya ilettiği momentum transferi ile ilişkili olarak hem hız hem de kayma gerilmesi dağılımlarının ayrıntılı olarak değerlendirilmesini gerektirmektedir. Böylece, pervane etkisiyle gelişen akım yapılarının mühendislik yapıları üzerindeki potansiyel etkileri daha sağlıklı biçimde öngörülebilir ve bu tür yapılarda oluşabilecek yapısal bozulmaların önlenmesine yönelik tasarım kriterleri geliştirilebilir.

2
GEMİ PERVANESİ JET AKIMI

2.1 Gemi Pervanesi Jet Mekanizması

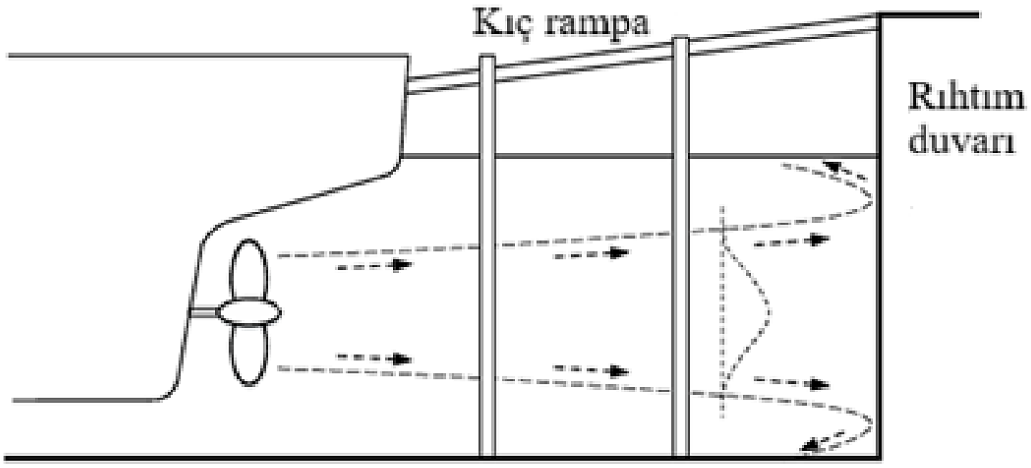
2.1.1 Giriş

Deniz taşımacılığı, Keşifler Çağı'ndan bu yana büyümekte olan uluslararası pazarın ve küreselleşmenin önemli bir parçasıdır. Günümüzde de dünya ticaretinin değişen taleplerini karşılamak için sürekli bir gelişim içerisindedir. PIANC (2015) son on yılda denizcilik sektörünün gelişiminin kapasite artışına dayandığını ve bunun da kaçınılmaz olarak motor gücündeki artışı beraberinde getirdiğini bildirmiştir. Sonuç olarak, daha büyük ve güçlü pervaneler tarafından üretilen daha yüksek akım hızları, omurga altı açıklığı küçük olduğunda ve deniz tabanı ve kıyı alanları bu hızlar için tasarlanmadığından, liman havzalarının ve navigasyon kanallarının tabanında ve şevlerinde daha fazla akıntı kaynaklı hasara neden olmaktadır. Gelgit akıntısı da rıhtım yapıları etrafında oyulmaya neden olabilse de gemi pervaneleri ile karşılaştırıldığında önemsiz olmaktadır (PIANC, 2015). Bu nedenle, gemi pervanesi kaynaklı jet akımı genellikle oyulmanın ana nedenidir. Geminin arka tarafındaki ana pervaneye ek olarak, modern gemiler manevra kabiliyeti için baş ve kıç iticilerle (Şekil 2.1) donatılmıştır ve bu da bağlama ve çözme işlemi sırasında oyulma sorununu daha da ağırlaştırmaktadır.

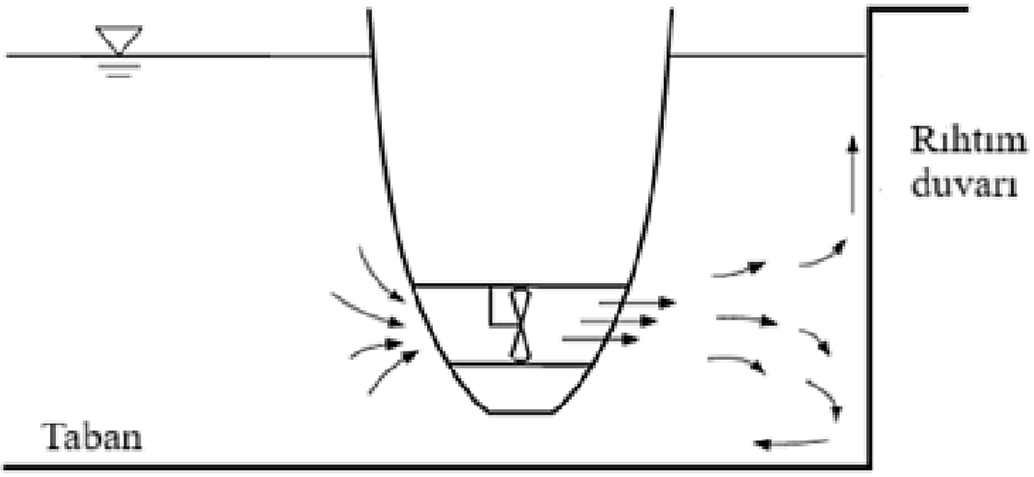


Şekil 2.1 Gemi pervaneleri, baş ve kıç iticiler (Sumer ve Fredsøe, 2002)

Longe (1987) dönen bir pervanenin çıkış hızının ve buna bağlı taban yakınındaki hızların sırasıyla 11-12 m/s ve 3-4 m/s'ye ulaşabileceğini bildirmiştir. İticilere ilişkin olarak, Sumer ve Fredsøe (2002), nozul çıkış hızlarının 8–9 m/s'ye, taban hızlarının ise 3–3.5 m/s'ye kadar ulaşabileceğini bildirmiştir. Bu nedenle taban malzemesi kolayca aşınabilmektedir. Gijt ve Broeken (2005), taban malzemesinin kum ve düşük kayma mukavemetine sahip kohezyonsuz zeminlerden olması durumunda, pervane kaynaklı oyulma çukurunun birkaç metre derinliğe ulaşabileceğini belirtmiştir. Rıhtım yapısı gemi pervanesinin çok yakınında bulunduğundan, maksimum oyulma derinliği genellikle rıhtım duvarlarının tabanında meydana gelmektedir ve bu da yapısal istikrarsızlığa ve hasara neden olabilmektedir. Bu durum özellikle, yerleşik rampalar nedeniyle bir rıhtımın aynı konumuna yanaşan roll-on roll-off gemileri için geçerli olmaktadır. Sonuç olarak, rıhtım yapıları pervane jetinin kümülatif etkisine maruz kalmaktadır. Şekil 2.2 ve Şekil 2.3 sırasıyla kıç rampası ve baş pervanesi olan bir roll-on roll-of gemisi durumunda jet akımının nasıl saptırıldığını göstermektedir.



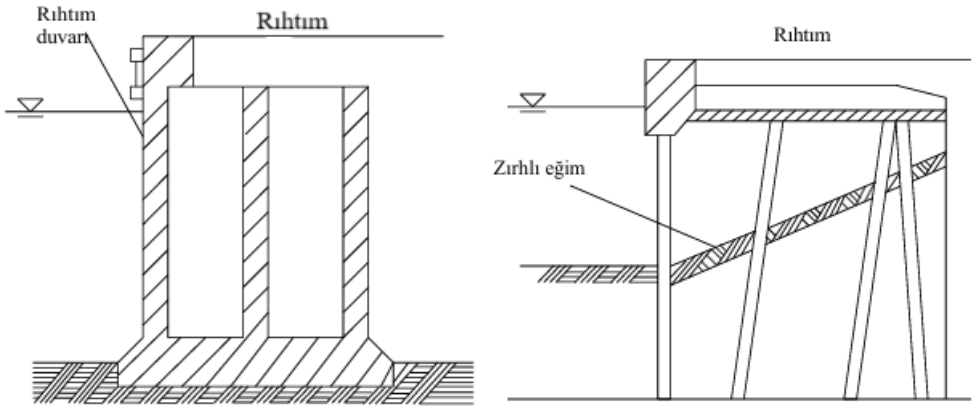
Şekil 2.2 Ro-Ro gemisi durumunda jet akımı sapması (Sumer ve Fredsøe, 2002)



Şekil 2.3 Pruva pervaneleri kaynaklı jet akımı sapması (Sumer ve Fredsøe, 2002)

Rıhtım yapılarında pervane jeti kaynaklı hasarlara ilişkin olarak, hem kıç tarafı rıhtım yapısına dönük şekilde yanaşan gemilerde hem de rıhtım duvarına paralel manevra yapan gemilerde pruva pervanelerinin kullanıldığı durumları içeren bir dizi uygulama çalışması rapor edilmiştir (Bergh ve Cederwall, 1981; Chait, 1987; Quarrain, 1994; Hamill vd. 1999). Tsinker (1995), limanla ilgili yeni deniz yapıları tasarlanırken veya hizmetteki yapıların performansı yeniden değerlendirilirken pervane kaynaklı oyulmanın dikkate alınması gerektiğini öne sürmüştür. Ayrıca, özellikle kazıklı platformlar, palplanş perdeleri ve rip-rap korumalı şevlere sahip açık platform tipi yapılar gibi yatay ve düşey yüklere karşı tasarlanmış bir taban seviyesi ile desteklenenler olmak üzere her tür deniz yapısının pervane kaynaklı oyulmadan zarar görebileceğini bildirmiştir. PIANC (2015) ayrıca rıhtım yapılarının korunması için gemi pervanesi kaynaklı akımın ve bunun sonucunda ortaya çıkan hasarın anlaşılmasının önemini vurgulamaktadır. Pervane jetinin etkisiyle ilgili olarak Sumer ve Fredsøe (2002) ve PIANC (2015) rıhtım yapılarının Şekil 2.4'te gösterildiği üzere kapalı ve açık rıhtımlar olmak üzere başlıca iki tipe ayrılabileceğini belirtmiştir. Birincisi için, rıhtım cephesinde, dolgudan gelen yatay yüke ve diğer hareketli yüklere dayanacak dikey bir katı duvar inşa edilmektedir. İkincisinde ise, bir grup kazık, kolon veya lamel duvar tarafından desteklenen bir rıhtım döşemesi inşa edilmektedir. Kapalı rıhtımla ilişkili oyulma sorunu temelde rıhtım ön duvarının önündeki alan ile sınırlıdır; ancak oyulmanın yanaşma

yüzeyinin yanı sıra şevin kendisinin yakınında da meydana gelebileceği açık rıhtımda daha karmaşıktır.



(a) (b)

Şekil 2.4 Rıhtım yapıları: (a) Kapalı ve (b) Açık rıhtımlar (Sumer ve Fredsøe, 2002)

Gemi pervane jetlerinin oluşturduğu akım yapılarının incelenmesi hem gemi performansını artırmak hem de kıyı ve liman yapılarında oluşabilecek yapısal hasarları önlemek açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, pervane jetlerinin özellikleri hem gemi inşaatı mühendisliği hem de kıyı mühendisliği disiplinlerinde uzun süredir araştırma konusu olmaktadır.

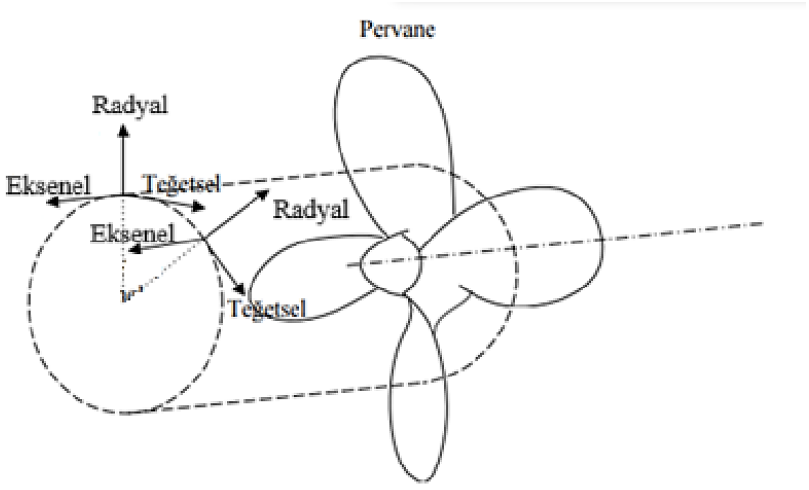
Gemi inşaatı mühendisliği perspektifinden bakıldığında, pervane kanadı geometrisinin performans üzerindeki etkilerini optimize etmek amacıyla yapılan çalışmalar öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, Felli vd. (2006), gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarda pervane çevresindeki hız ve basınç dağılımlarını incelemiş, pervane tasarımına yönelik önemli bilgiler sunmuştur. Bu tür çalışmalar, pervane verimliliğini artırma ve titreşim-gürültü gibi olumsuz etkileri azaltma hedefi taşımaktadır. Bununla birlikte, kıyı mühendisliği alanında yapılan araştırmalar, pervane jetlerinin neden olduğu taban oyulması ve yapısal aşınmalar üzerine yoğunlaşmaktadır. Wei (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, açık tip rıhtım yapısı etrafındaki akım alanı, PIV (Parçacık Görüntüleme Hız Ölçümü) tekniği kullanılarak detaylı biçimde incelenmiş ve pervane jetinin yapı tabanında oluşturduğu etkiler ortaya konmuştur. Bu tür deneysel araştırmalar, liman altyapısında güvenli ve dayanıklı tasarımların geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Bu bölümde, gemi pervane jetleri üzerine yapılan önemli çalışmalara genel bir bakış sunularak, mevcut tez çalışmasının konumlandırıldığı araştırma bağlamı ortaya konulacaktır.

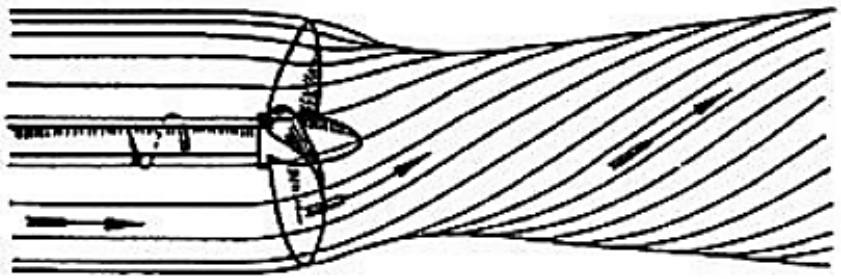
2.1.2 Pervane Jeti Oluşumu

Pervane dönüşü ve akışkan ortam arasındaki etkileşimler sonucu, ortaya çıkan hız alanı eşit olmayan bir şekilde dağılmaktadır. Helikoidal pervane kanatları döndükçe, yukarı akımdaki su iç bölgeye doğru çekilir, hız kazanarak akım alanı içerisinde harekete geçer, bu durum akışkanın geriye doğru momentumunu artırarak gemiyi ileri doğru iten bir itme kuvvetini oluşturmaktadır. Bu kuvveti oluşturan akım "pervane jeti" olarak adlandırılmaktadır.

Pervane jeti, Şekil 2.5'de gösterildiği üzere üç temel hız bileşeninden oluşmaktadır: eksenel, teğetsel (rotasyonel) ve radyal bileşenler. Eksen boyunca yönlenen eksenel hız bileşeni, literatürde en çok çalışılan ve akım alanına en büyük katkıyı sağlayan bileşen olarak öne çıkmaktadır. Teğetsel hız bileşeni jetin dönme (rotasyonel) karakteristiğini oluştururken, radyal bileşen ise jetin çevresine doğru yayılmasını sağlamaktadır. Johnston vd. (2013), bu jet akımının davranışının, klasik üç boyutlu jetlerden farklı olarak dönen bir pervane etkisiyle şekillendiğini ve kendine özgü bir akım yapısı sergilediğini vurgulamıştır. Şekil 2.6, pervane kanatlarının arkasında vorteks yapıları içeren bir pervane jetini göstermektedir. Sumer ve Fredsøe (2002) ise serbest su kütlesi içerisinde gelişen pervane jet akımını deneysel olarak ortaya koymuşlardır.



Şekil 2.5 Pervane jetinin hız bileşenleri (McGarvey, 1996)



Şekil 2.6 Pervane jetinin dönüşü (Sumer ve Fredsøe, 2002)

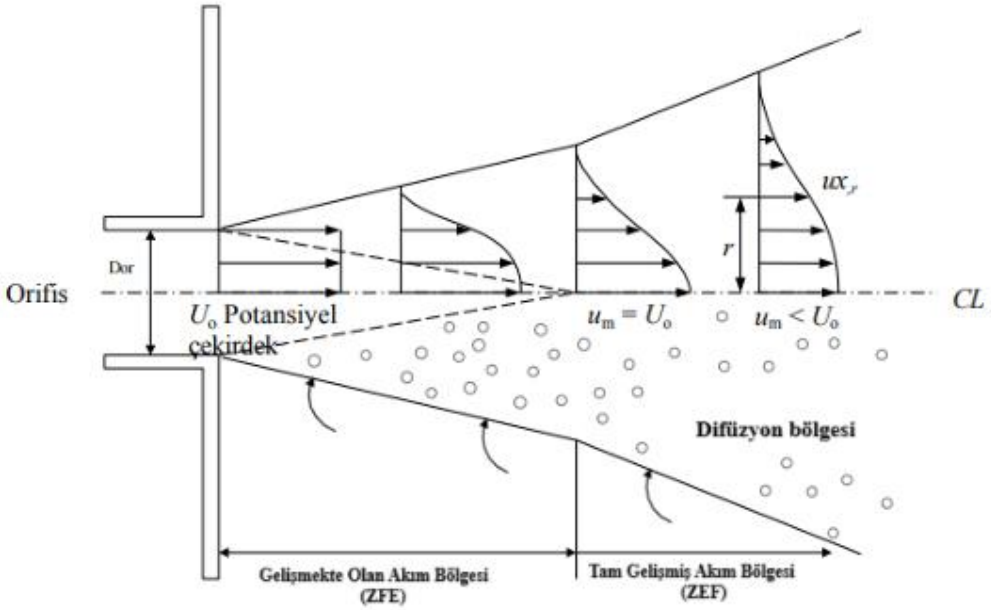
Manevra yapan bir gemide pervane jetinin oluşturduğu akım alanı, durağan durumlara kıyasla çok daha karmaşık bir yapıya sahip olmaktadır. Lam vd. (2011), bu durumu, pervane jetinin yalnızca kendi etkisiyle değil, aynı zamanda gemi gövdesinden kaynaklanan su hareketiyle birleşerek karmaşık bir akım alanı oluşturması şeklinde açıklamaktadır. Ancak Prosser (1986), gemi sabit konumdayken ya da düşük hızla hareket ederken gövde geometrisinin pervane jeti üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu belirtmiştir. Bu nedenle, literatürde yer alan pek çok çalışma, pervanenin durağan çekme durumu (bollard bull) altındaki çalışmasını esas alarak gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, pervane jetinin temel hidrodinamik özelliklerinin daha net şekilde incelenmesine olanak sağlamaktadır.

2.1.3 Batık Jet Difüzyonu

Pervane jeti üzerine yapılan ilk çalışmalar doğrudan pervaneli deney sistemleri yerine batık düz su jeti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Albertson vd. (1950) pervane jetinin kayma akımının (shear layer) diğer batık jetlerden çok az farklılık gösterdiğini belirtmiştir. Bu nedenle, hız dağılımı için benzer analiz yöntemleri kullanılmıştır.

Batık bir jet için jet difüzyonunun şematik gösterimi, Albertson vd. (1950) tarafından Şekil 2.7'de sunulmuştur. Bu modelde, akım alanı iki ana bölgeye ayrılmaktadır: **(1) Gelişmekte olan akım bölgesi** ve **(2) Tam gelişmiş akım bölgesi.** Gelişmekte olan akım bölgesi, sınır açıklığından çıkan akışkanın sabit bir hız profili ile hareket ettiği ve jet ile çevresindeki akışkan arasında belirgin bir hız farkının bulunduğu bölgedir. Bu hız farkı, jet içerisindeki akışkanın yavaşlamasına

ve çevresindeki akışkanın hızlanmasına neden olan yanal karışım süreçlerini başlatmaktadır. Bu süreç hem içe hem de dışa doğru gerçekleşen bir momentum transferiyle karakterize edilmektedir. Mesafe arttıkça, bu karışım jetin merkez hattına doğru ilerlemekte ve hız profili giderek homojenleşmektedir. Tam gelişmiş akım bölgesi, bu noktadan itibaren başlamakta ve difüzyon süreci önemli bir yapısal değişiklik göstermeden devam etmektedir. Bu geçiş, Şekil 2.7'de de açıkça gözlemlenmektedir.

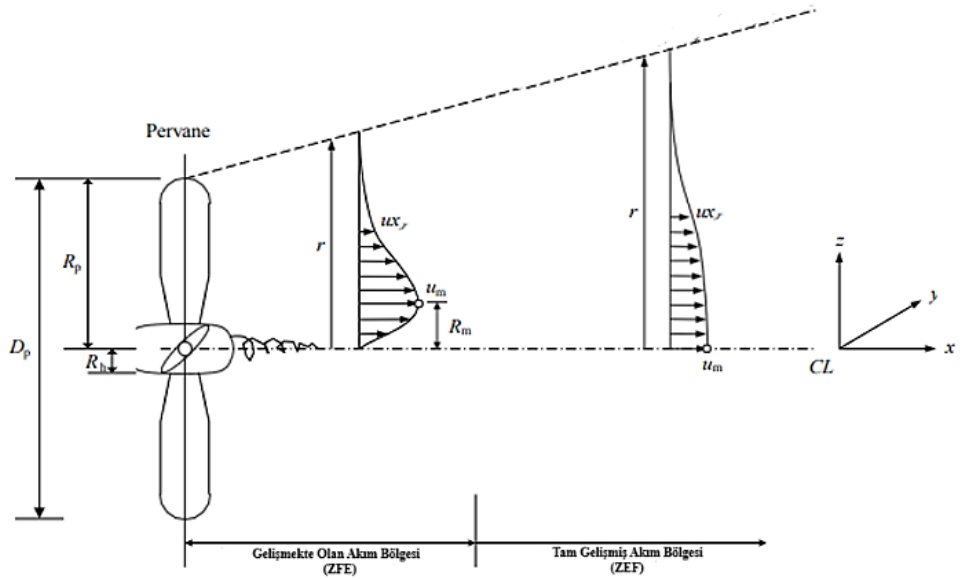


Şekil 2.7 Orifisten çıkan difüzör jetinin şematik gösterimi (Albertson vd, 1950)

2.1.4 Pervane Jet Difüzyonu

Albertson vd. (1950) yaklaşımını takip eden Blaauw ve Kaa (1978), pervaneli jetler üzerine yapılan ilk deneysel çalışmalardan birini gerçekleştirmiştir. Ardından, Berger vd. (1981), Verheij (1983), Hamill (1987), Stewart (1992), Hashmi (1993), Qurrain (1994), Ryan (2002), Hong vd. (2013) ve Hong vd. (2016) gibi araştırmacılar, gerçek pervane modelleri kullanarak gemi pervane jeti üzerine deneysel araştırmalar yapmışlardır. Albertson vd. (1950) ile benzer bir yaklaşım benimsenerek, pervane jetinin arkasındaki akım alanı, Şekil 2.8'de gösterildiği gibi, iki ana bölgeye ayrılmıştır: (1) Gelişmekte olan akım bölgesi ve (2) Tam gelişmiş akım bölgesi. Şekil 2.8'de, x ekseninin pervane dönüş ekseni boyunca akım

yönünde, y ekseninin düzlem iç tarafına doğru açıklık yönünde ve z ekseninin yukarı doğru dikey yönde olduğu göz önünde bulundurularak sağ el koordinat sistemi benimsenmiştir. Buna göre, bu üç yön boyunca karşılık gelen hız bileşenleri bundan sonra u, v ve w olarak gösterilecektir. Bu tezde kullanılan hız bileşenleri gösterimi, literatürdeki çalışmalarla tutarlı olarak u, v ve w şeklinde olacaktır.



Şekil 2.8 Bir pervane jeti tarafından oluşturulan hız dağılımı (Hamill, 1987)

Pervane göbeğinin varlığı nedeniyle, akım oluşum bölgesinin hemen arkasında düşük hızlı bir çekirdek bölge bulunmaktadır, bu da Şekil 2.8'de gösterildiği gibi maksimum hız konumunun dönme ekseninden kaymasına neden olmaktadır. Şekil 2.8'de pervane ekseninin alt tarafı gösterilmemiştir.

Hamill (1987), çalışmasında yüksek hızlı akımın, düşük hızlı çekirdek akım bölgesine nüfuz ettikçe çekirdek etkisinin kademeli olarak azaldığını tespit etmiştir. McGarvey (1996) ise akımın oluştuğu bölgede, akışkanın hem içe hem de dışa doğru karıştığını; ancak akımın tamamen geliştiği bölgede yalnızca dışa doğru karışma olduğunu ve maksimum hızın gelişmekte olan akım bölgesinde meydana geldiğini bildirmiştir.

2.1.5 Akım Hızı

Akım hızı, yayılan bir jet içindeki tüm hız dağılımını tahmin etmek için ön koşul parametresi olarak kullanılmıştır. Belirli bir orifis veya nozuldan çıkan ve akım hızının kesit alanına bölünmesiyle hesaplanabilen genel jetten farklı olarak, bir pervane tarafından üretilen akım, dönen kanatlar arasındaki yarıklardan geçerek ve pervane göbeği varlığından etkilenerek, yaygın jetlerde olduğu gibi akım hızının tanımlanmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar, ilerleyen bölümlerde inceleneceği üzere, pervaneli bir jet için akım hızını hem teorik hem de deneysel olarak belirlemeye yönelik birçok çalışma gerçekleştirmiştir.

Akım hızı için Froude'un eksenel momentum teorisi

Albertson vd. (1950) Froude tarafından önerilen eksenel momentum teorisine dayalı olarak batık düzlem jeti incelemiştir. Pervane jetinin karmaşık yapısı nedeniyle, pervane jeti içindeki eksenel hız alanı ile ilgili ilk çalışmalar Blaauw ve Kaa (1978) tarafından "İdeal Aktüatör Diski" konsepti ve aşağıdaki varsayımların uygulandığı batık düzlem jeti ile ilgili benzer teori kullanılarak araştırılmıştır:

(1) Pervane sonsuz ince bir disk ile temsil edilebilmektedir.

(2) Disk sonsuz sayıda bıçaktan oluşmaktadır.

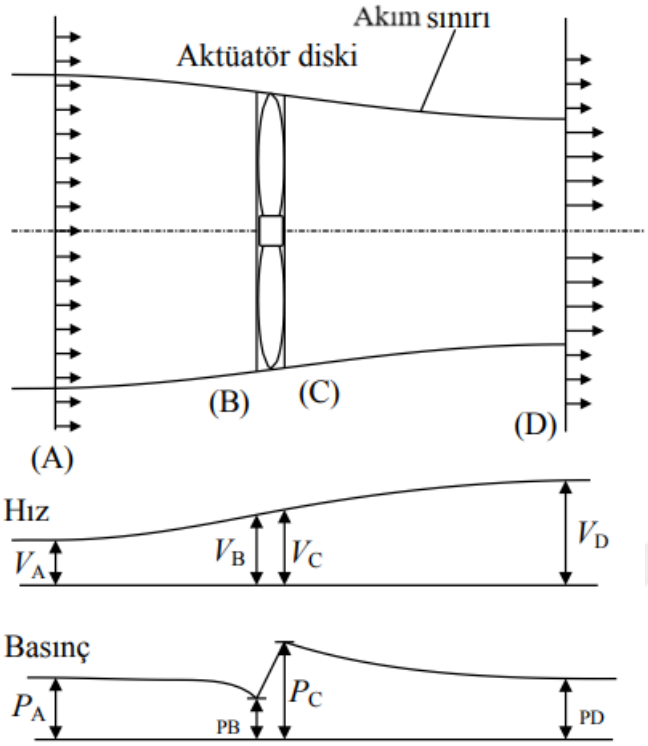
(3) Sonsuz bir hızda dönmektedir.

(4) Akışkanın disk içerisindeki hızı diskin tüm alanı boyunca eşit olmaktadır.

(5) Diske verilen tüm enerji, karşılığında akışkana verilmektedir.

(6) Diski çevreleyen sıvı idealdir.

Froude'un eksenel momentum teorisi, pervane jetleri üzerine daha sonra yapılan birçok araştırmanın temeli olarak kullanılmıştır. Şekil 2.9, sabit bir akım içinde duran ideal aktüatör diski ile temsil edilen bir pervaneyi göstermektedir.



Şekil 2.9 İdeal aktüatör diski olarak pervane modeli (Massey ve Ward-Smith, 2006)

Massey ve Ward-Smith (2006), kayma akımının sınır yüzeyi boyunca bir basınç ve hız süreksizliği olduğunu öne sürmüştür. Diskin yukarısında bir yerde, A bölümü sırasıyla V_A ve P_A ile belirtilen hız ve basınca sahiptir. Akışkan B bölümündeki diske yaklaştıkça hız V_A'dan V_B'ye yükselirken basınç P_A'dan P_B'ye düşer. Sonsuz ince bir disk varsayımı nedeniyle (yani eksenel yöndeki kalınlığı ihmal edilebilir), süreklilik B bölümündeki hız C bölümündeki hız ile eşit olmalıdır, yani $V_B = V_C$. Bununla birlikte, akım diskten geçerken basınç P_C'ye yükselir. Diskin aşağısında bir yerde, D bölümünde, hız daha da artarak V_D'ye ulaşır ve basınç başlangıç durumuna geri döner, yani $P_D = P_A$. Sıkışamaz akışkan için, eksenel hız aşağı yönde arttıkça, kayma akımının kesiti Şekil 2.9'da gösterildiği gibi daralmaktadır. Momentum teorisine göre aktüatör diskinin itme kuvveti Bernoulli denklemi uygulanarak elde edilebilmektedir:

$$T = \frac{1}{2}\rho A(V_D^2 - V_A^2) \tag{2.1}$$

burada; T = aktüatör diskinin itme kuvveti, ρ = akışkanın özgül kütlesi, A = aktüatör disk alanıdır. Boyutsal bir analizle, bu itme (2.2) ifadesi ile de yazılabilmektedir.

$$T = C_t \rho n^2 D_p^4 \tag{2.2}$$

burada; C_t= itme katsayısı (boyutsuz), n = pervane dönüş hızı, D_p = pervane çapıdır. Yukarıdaki iki ifadenin eşitlenmesi (2.3) ifadesini vermektedir:

$$\frac{1}{2}\rho A(V_D^2 - V_A^2) = C_t \rho n^2 D_p^4 \tag{2.3}$$

Bu durum, durağan çekme (bollard pull) koşulunu temsil ettiğinden, gemi hızı sıfır kabul edilmektedir., yani $V_A = 0$ ve $A = \pi {D_p}^2/4$, bu nedenle;

$$V_D = 1.59 n D_p \sqrt{C_t} \tag{2.4}$$

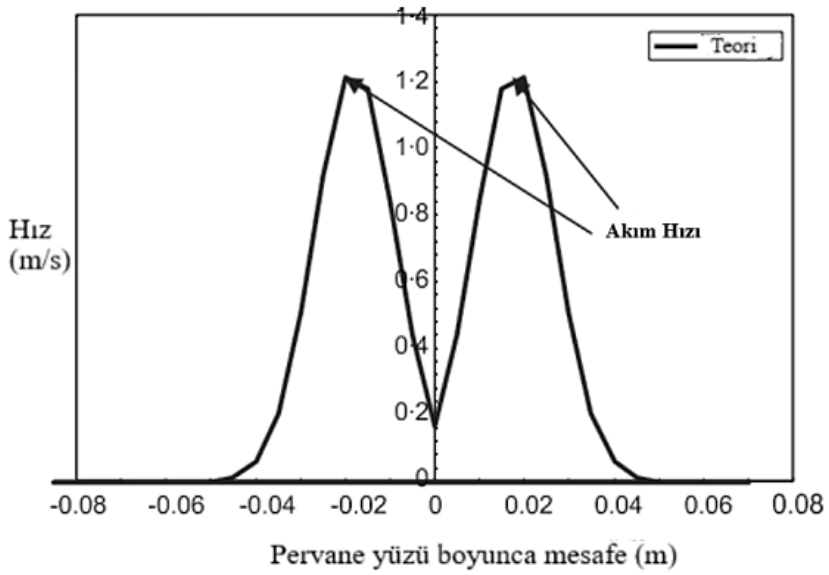
Birçok araştırmacı ayrıntılı bir şekilde formül türetmek için çalışmalarında durağan çekme (bollard pull) koşulunu kullanmıştır (Hamill 1987; Steward 1992). Hamill (1987), denklem (2.5) olarak verilen ifadenin Rowakiewicz (1966), Blaauw ve Kaa (1978) ve Fuehrer vd. (1981) tarafından pervane jetinin çıkış hızını hesaplamak için yaygın olarak kullanıldığını belirtmiştir.

$$U_0 = 1.59 n D_p \sqrt{C_t} \tag{2.5}$$

burada; U_o pervane jetinin eksenel akım hızıdır.

Akım hızı için yarı ampirik denklemler

Fuehrer vd. (1987) denklem (2.5)'in çıkış hızı tahminini ±%20'lik bir hata ile verdiğini belirtmiştir. Bunun nedeni, eksenel momentum teorisinde yapılan varsayımların gerçek pervane jetini tanımlamada hatalı olabilmesidir. Bu nedenle, gerçek pervane modelleri kullanılarak deneysel çalışmalar yürütülmüştür. En önemli etken olan eksenel akım hızı kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Gerçek bir pervane için, Hamill vd. (2004) çıkış hızını pervane yüzeyi boyunca ortalama bir hız dağılımından alınan maksimum hız olarak tanımlamıştır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Pervane yüzeyi boyunca akım hızı konumu (Hamill vd., 2004)

Hamill (1987) iki pervane modeli kullanarak çıkış hızını deneysel olarak araştırmış ve denklem (2.5)'i daha düşük bir katsayı değeri ile değiştirmiştir:

$$U_0 = 1.33 n D_p \sqrt{C_t} \tag{2.6}$$

Stewart (1992) (2.5) ve (2.6) denklemlerindeki 1.59 veya 1.33 katsayısının bir sabit olmadığını ve pervanenin geometrik özelliklerinin bir fonksiyonu olan ξ akış katsayısı ile değiştirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Bu nedenle, (2.6) eşitliği (2.7) olarak verilen forma dönüştürülmüştür:

$$U_0 = \xi n D_p \sqrt{C_t} \tag{2.7}$$

$$\xi = D_p^{-0.0686} \left(\frac{P}{D_p}\right)^{1.519} \beta^{-0.323} \tag{2.8}$$

burada; β = kanat alanı oranı; P = hatve; bir pervanenin kendi ekseni etrafında bir tur dönmesi sonucu ilerlemiş olduğu teorik mesafe ve P/D_p = pervanenin hatve oranıdır.

Stewart (1992)'yi takiben, benzer bir çalışma Hashmi (1993) tarafından gerçekleştirilmiş ve ξ akım katsayısı, pervane çapının göbek çapına göre normalize edilmesiyle (2.9) ifadesi elde edilmiştir.

$$\xi = (\frac{Dp}{Dh})^{-0.403}(Ct)^{-1.79}(\beta)^{0.744} \quad (2.9)$$

burada; D_h = pervane göbeğinin çapıdır.

Hamill vd. (2015), önceki yarı ampirik denklemleri karşılaştırmış ve bu denklemler kullanılarak elde edilen sonuçların, test aralıklarının dışına taşındığında (genelleme yapıldığında), büyük hatalara yol açabileceğini öne sürmüştür. Tipik operasyonel durumları kapsadığı düşünülen geniş bir dönme hızı aralığında çalışan dört pervane kullanarak, Hamill vd. (2015) eksenel akım hızının tahminini daha güncel olarak aşağıdaki ifade ile vermiştir:

$$U_0 = 1.22n^{1.01}D_p^{0.84}C_t^{0.62} \quad (2.10)$$

Hamill ve Kee (2016)'ya göre denklem (2.10) artık PIANC (2015) gibi çeşitli tasarım kılavuzlarında kullanılmaktadır. Ayrıca aynı araştırmacılar, şimdiye kadar sınırlı deneysel araştırmalara konu olan dönme ve radyal akım hızlarına ilişkin ampirik denklemler önermeye çalışmışlardır. Pervane dönüş hızı (n), pervane çapı (D_p) ve itme katsayısı (C_t) gibi aynı değişkenler setinin dönme ve radyal akım hızlarının büyüklüğünü de kontrol ettiğini bulmuşlar ve ilgili hız büyüklükleri için (V_0 ve W_0) aşağıdaki denklemleri vermişlerdir:

$$V_0 = 1.23n^{1.05}D_p^{0.798}C_t^{1.186} \quad (2.11)$$

$$W_0 = 0.153n^{0.986}D_p^{0.719}C_t^{0.344} \quad (2.12)$$

2.1.6 Gelişmekte olan Akım Bölgesi

Maksimum hızın konumu

Albertson vd. (1950) düz bir su jeti durumunda çıkış hızının yerini deneysel olarak incelemiş ve maksimum hızın jetin merkez hattında bulunduğunu tespit etmiştir. Bir pervane jeti için Hamill (1987) maksimum hızın, önemli bir ileri itme kuvveti üretmeyen göbeğin varlığı nedeniyle dönme ekseninden kaydığını göstermiştir. Göbek etkisini dikkate alan Oebius ve Schuster (1975), maksimum hızın dönme ekseninden olan radyal konumunu (R_m) tahmin etmek üzere aşağıdaki denklemi önermiştir:

$$R_m = 0.3R_{mo}\left(\frac{x}{R_{mo}}\right)^{-0.3} \quad (2.13)$$

burada; R_m = kesitteki maksimum hızın konumu ve R_{mo} = akım düzlemindeki maksimum hız ve x = pervane yüzeyinden söz konusu konuma olan mesafedir.

R_{mo} için ise Berger vd. (1981) tarafından (2.14) denklemi önerilmiştir,

$$R_{mo} = 0.67R_p - R_h \tag{2.14}$$

burada; R_p = pervane yarıçapı ve R_h = pervane göbeği yarıçapıdır. Bu denklem Stewart (1992) tarafından deneysel araştırmalarında doğrulanmıştır. Ancak McGarvey (1996) denklem (2.14)'ün neden olduğu hatanın %30'a kadar çıkabileceğini bildirmiştir. Hamill vd. (2004) çıkış düzlemindeki maksimum hız konumunun pervanenin geometrik özelliklerine büyük ölçüde bağlı olduğunu ifade etmiştir.

Maksimum eksenel hızın azalması

Albertson vd. (1950) gelişmekte olan akım bölgesi içinde maksimum hızda bir azalma olmadığını öne sürmüş ve maksimum hız olan u_m ile çıkış hızı olan U_o arasında aşağıdaki gibi bir ilişki önermiştir:

$$\frac{u_m}{U_0} = 1 \tag{2.15}$$

Hamill (1987) denklem (2.15)'in pervaneli bir jet için yalnızca $0 < x/D_p < 0.35$ aralığı için geçerli olduğunu vurgulamıştır. Bu mesafenin dışında, maksimum hızda aşağıdaki denklemle tanımlanabilen kademeli bir azalma olmaktadır:

$$\frac{u_m}{U_0} = 0.87 \left(\frac{x}{D_p}\right)^{-\left(\frac{\beta}{4}\right)} \tag{2.16}$$

Bunu takiben, Stewart (1992) daha ileri araştırmalar yapmış ve akım oluşum bölgesinin uzunluğunun pervane yüzeyinden x/D_p=3.25'e kadar olduğunu belirtmiştir. Ayrıca maksimum hızdaki azalmanın pervaneden x ekseni doğrultusunda ilerleme mesafesi ile arasında doğrusal bir ilişki bulunduğunu önermiştir.

$$\frac{u_m}{U_0} = 1.0172 - 0.1835 \left(\frac{x}{D_p}\right) \tag{2.17}$$

Hsieh vd. (2013) PIV tekniğini kullanarak bir pervanenin neden olduğu dönen jeti deneysel olarak araştırmış ve R^2 = 0.98 ile yeni bir ampirik ifade önermiştir:

$$\frac{u_m}{U_0} = 15.12\, e^{\left(-1.807\frac{x}{D_p}\right)} \left[1 - e^{\left(-\frac{\frac{x}{D_p}}{3.345}\right)}\right] + 0.344\, \left(\frac{x}{D_p}\right) e^{\left(-\frac{\frac{x}{D_p}}{3.345}\right)} \qquad (2.18)$$

Hamill ve Kee (2016), Lazer Doppler Anemometri (LDA) kullanarak dört farklı pervane modeli için pervane jet hızlarını ölçmüştür. Pervane hatvesinin çapa oranının (P/D_p) da maksimum eksenel hızın azalmasında etkili bir değişken olduğunu bildirmişler ve buna göre aşağıdaki gibi yeni bir yarı ampirik denklem önermişlerdir;

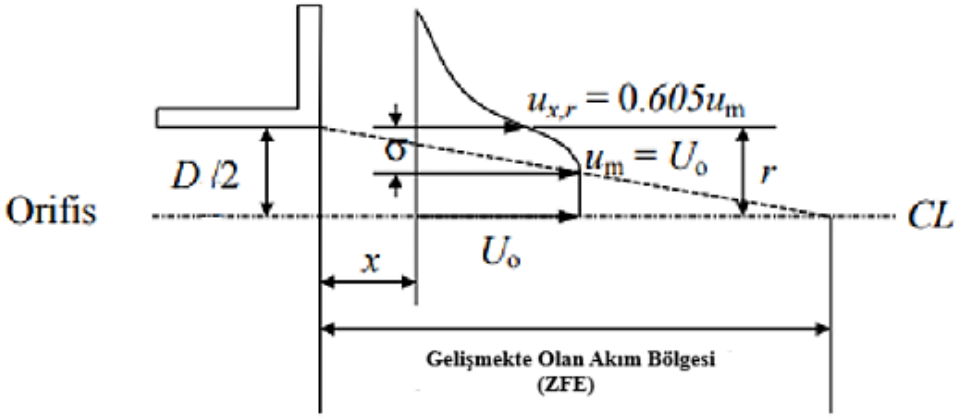
$$\frac{u_m}{U_0} = 1.51 - 0.175\, \left(\frac{x}{D_p}\right) - 0.46\, \left(\frac{P}{D_p}\right) \qquad (2.19)$$

Gelişmekte olan akımın olduğu bölge içindeki hız dağılımı

Düzlem jet için Albertson vd. (1950) gelişmekte olan akım bölgesi içindeki eksenel hız dağılımının Şekil 2.11'de gösterildiği gibi sabit hız çekirdeği boyunca düz bir çizgi ile bağlanan Gauss normal olasılık eğrisinin iki simetrik yarısı ile tanımlanabileceğini öne sürmüştür; burada $u_{x,r}$ = ilk akım düzleminden eksenel x yönü ve dönme ekseninden radyal r uzaklığı ile tanımlanan jetteki herhangi bir konumdaki ortalama hız; σ = standart sapması ve r = jet içindeki radyal uzaklıktır. Difüzyon sürecinin tüm kesitlerde dinamik olarak benzer olduğunu ve σ/x'in sabit olduğunu varsaymışlardır, bu da difüzyon açısının sabit olduğunu göstermektir.

$$\frac{\sigma}{x} = C_o \qquad (2.20)$$

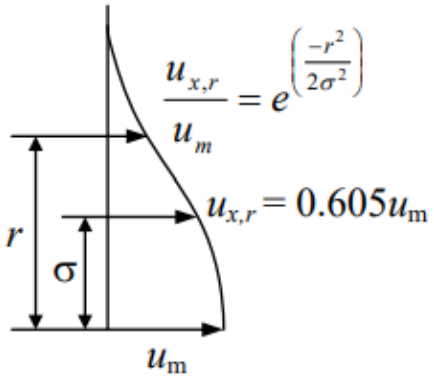
burada; C_o = hızın standart sapmasının eksenel mesafeye oranını temsil eden bir sabittir.



Şekil 2.11 Gelişmekte olan akım bölgesinin şematik gösterimi (Albertson vd. 1950)

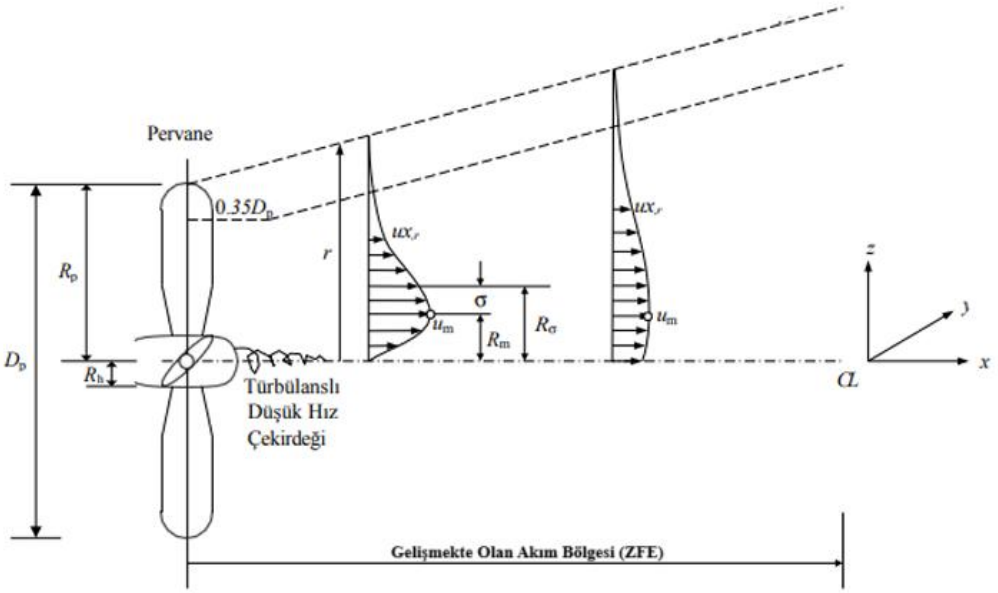
Gauss normal olasılık eğrisi ele alındığında, gelişmekte olan akım bölgesi içerisindeki eksenel hız profili (2.21) eşitliği ile ifade edilebilir ve Şekil 2.12'de gösterildiği gibi çizilebilir.

$$\frac{u_{x,r}}{u_m} = e^{\left(\frac{-r^2}{2\sigma^2}\right)} \tag{2.21}$$



Şekil 2.12 Gauss normal dağılım eğrisi (Albertson vd., 1950)

Pervane jeti için, akış oluşturma bölgesindeki pervane jetinin tanım çizimi Şekil 2.13'te gösterilmektedir.



Şekil 2.13 Gelişmekte olan akım bölgesinde pervane jetinin şematik gösterimi (Hamill, 1987)

Eşitlik (2.21) ile benzer bir üstel ifadeyi takip eden Hamill (1987), gelişmekte olan akım bölgesi içindeki eksenel hız dağılımını tanımlamak için x cinsinden aşağıdaki gibi parçalı bir fonksiyon önermiştir, $x < 0.5D_p$ olduğunda;

$$\frac{u_{x,r}}{u_m} = e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{r-R_{mo}}{\frac{R_{mo}}{2}}\right)\right]^2} \tag{2.22}$$

$x > 0.5D_p$ olduğunda, akım bölgesinin geri kalanı için eksenel hızları belirlemek üzere (2.23) eşitliği ile belirtilen ek bir denklem verilmiştir;

$$\frac{u_{x,r}}{u_m} = e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{r-R_{mo}}{\frac{R_{mo}}{2}+0.075(x-R_p)}\right)\right]^2} \tag{2.23}$$

Stewart (1992) gelişmekte olan akım bölgesi içinde deneyler yapmış ve sonuçları yukarıdaki denklemleri desteklemiştir. Buna ek olarak, gelişmekte olan akım bölgesinin uzunluğunun pervaneden yaklaşık $3.25D_p$ kadar mesafeye ulaşacağını belirtmiştir.

2.1.7 Tam Gelişmiş Akım Bölgesi

Maksimum eksenel hızın azalması

Tam gelişmiş akım bölgesinde, maksimum eksenel hız çevredeki akışkanın sürüklenmesiyle azalmaktadır. Albertson vd. (1950) batık bir jetin maksimum hızının azalması ile akımdan uzaklığı arasında bir ilişki önermiştir.

$$\frac{u_m}{U_0} = \frac{1}{2\,C_o}\left(\frac{x}{D}\right)^{-1} \tag{2.24}$$

burada; C_o (2.20) eşitliğindeki ile aynı sabittir.

Bu yaklaşımın ardından, sonraki araştırmacılar pervane jeti içindeki maksimum eksenel hızın değişimi üzerine daha fazla araştırma yapmış ve Tablo 2.1'de sunulduğu üzere, x/D_p oranına bağlı olarak maksimum hızı tahmin edebilmek için bir dizi denklem geliştirilmiştir.

Tablo 2.1 Maksimum eksenel hız azalmasını hesaplamak için geliştirilen ifadeler

Araştırmacı	Denklem	Koşul	
Stewart (1992)	$u_{m,x}/u_0 = 1.0172\text{-}0.1835(x/D_p)$ $u_{m,x}/u_0 = 0.543\text{-}0.0281(x/D_p)$	$3.25 \leq x/D_p$ $x/D_p \geq 3.25$	(2.25) (2.26)
Hamill ve Johnston (1993)	$u_{m,x}/u_0 = 1$ $u_{m,x}/u_0 = 0.87(x/D_p)^{-(\beta/4)}$ *β=pervane bıçak-alan oranı*	$0.35 \leq x/D_p$ $x/D_p \geq 0.35$	(2.27) (2.28)
Hseih vd. (2013)	$u_{m,x}/u_0 = 15.12\text{Exp}(-1.807(x/D_p))(1\text{-Exp}(-(x/D_p)/3.345)) + 0.344(x/Dp)\ \text{Exp}\ (-(x/D_p)/3.345)$	$x/D_p \geq 0$	(2.29)

Eşitlik (2.26), tam gelişmiş akım bölgesi içinde $x/D_p = 10$ mansap mesafesine kadar uygulanabilir olarak kabul edilmiştir. Hashmi (1993), tam gelişmiş akım bölgesinin uzunluğunun $x/D_p = 16$ mansap mesafesine kadar olabileceğini ifade etmiştir. Buna göre, bu aralıktaki maksimum hız azalmasını tahmin etmek için aşağıdaki gibi ek bir denklem önermiştir:

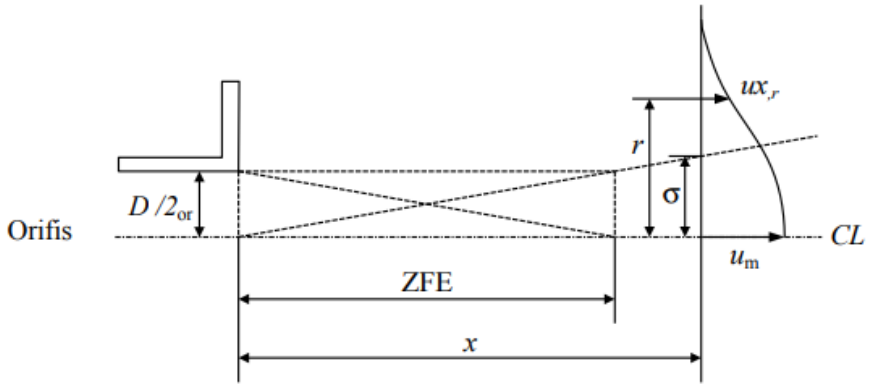
$$\frac{u_m}{U_o} = 0.638\, e^{-0.097\left(\frac{x}{D_p}\right)} \tag{2.30}$$

Hamill ve Kee (2016), eşitlik (2.19) ile bağlantılı olarak, tam gelişmiş akım bölgesi içindeki maksimum eksenel hızın değişimi için aşağıdaki gibi eşleştirilmiş bir denklem de önermiştir:

$$\frac{u_m}{U_o} = 0.964 - 0.039\left(\frac{x}{D_p}\right) - 0.344\left(\frac{P}{D_p}\right) \tag{2.31}$$

Tam gelişmiş akım bölgesi içerisindeki hız dağılımı

Albertson vd. (1950) düzlem jet için, hız dağılımını temsil eden eğrinin Şekil 2.14'de gösterildiği gibi tam gelişmiş akım bölgesinde simetri çizgisini geçtiğini ve difüzyon bölgesinin dışa doğru yayılma oranının doğrudan σ/x oranı ile temsil edilebileceğini belirtmiştir.



Şekil 2.14 Tam gelişmiş akım gölgesinin şematik gösterimi (Albertson vd. 1950)

Pervaneli jet için Fuehrer ve Romisch (1977), tam gelişmiş akım bölgesi içindeki eksenel hız dağılımını tanımlamak için bir ilişki vermiştir;

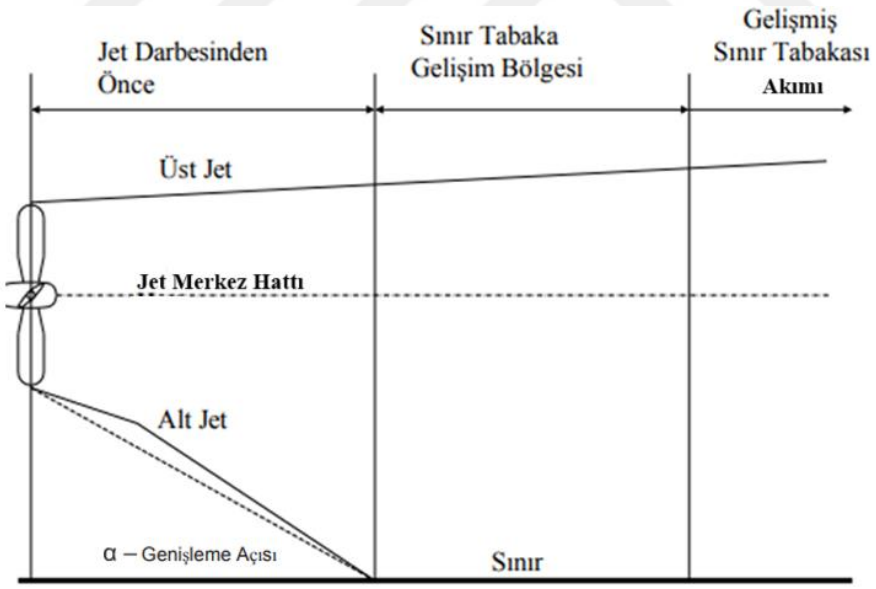
$$\frac{u_{x,r}}{u_m} = e^{\left[-22.2\left(\frac{r}{x}\right)^2\right]} \tag{2.32}$$

Bu denklem, Hamill (1987), Stewart (1992) ve McGarvey (1996) tarafından gerçek pervaneleri içeren sonraki çalışmalar ile doğrulanmıştır.

2.1.8 Düzlem Sınır Taban Varlığında Pervane Jeti

Önceki bölümlerde sunulan literatür özeti, pervane jetleri üzerine yapılan çalışmaların büyük ölçüde serbestçe genişleyen, yani sınırlandırılmamış jet akımlarına odaklandığını göstermektedir. McGarvey ve Hamill (1996) hız

dağılımının bir alt ve bir üst akım olmak üzere iki akım olarak tanımlanabileceğini öne sürmüştür ve pervane jetinin alt akımının, sınırlandırılmamış bir akım durumunda üst akıma simetrik olduğunu ifade etmiştir. Ryan vd. (2009), Pitot tüpleri kullanarak pervane jet hızlarını ölçmüş ve pervane yüzeyinden itibaren 2 D_p mesafeye kadar tabanın alt akım üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu; ancak 2 D_p mesafesinden sonra tabana yakın bölgedeki eksenel hız bileşeninin, Hamill vd. (2004) tarafından sınırlandırılmamış pervane jeti için yapılan tahminlere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. Johnston vd. (2013) pervane jetinin gelişimi üzerinde bir düzlem sınırının etkisini incelemiş ve çalışmalarında, bir sınırın varlığında, pervane ekseninin altındaki alt jetin, jetin altındaki basınç azalması nedeniyle pervane ekseninin üstündeki muadilinden daha hızlı genişlediğini bulmuşlardır. Aynı zamanda, jetin kısıtlanması jet difüzyonunu sınırlandırmış ve sonuç olarak eksenel hızın azalma oranını düşürmüştür. Tabana yakın hızın gelişimi açısından, çalışmalarında üç bölge tanımlanmıştır: (1) jet etkisinden önceki bölge, (2) sınır tabaka gelişimi bölgesi ve (3) gelişmiş sınır tabaka akımı bölgesi (Şekil 2.15).

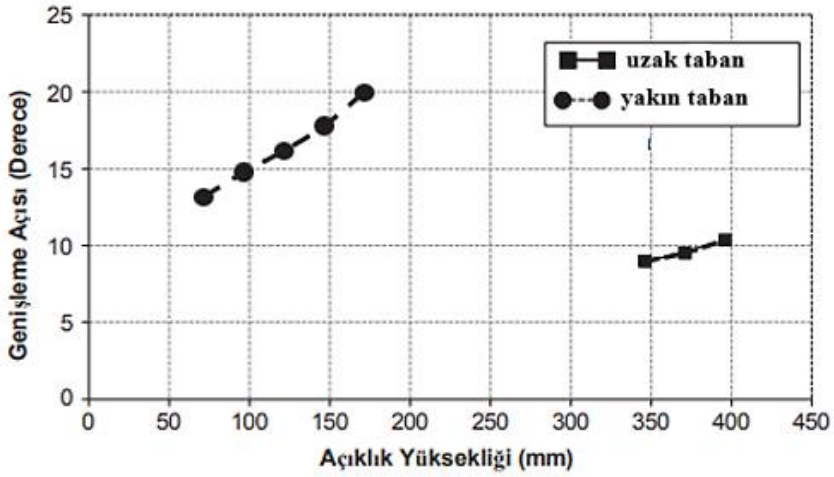


Şekil 2.15 Sınır tabaka gelişiminin şematik gösterimi (Johnston vd., 2013)

Johnston vd. (2013) pervane jetinin gelişimi üzerinde yaptığı deneyler sonucu katı yatay sınır üzerindeki genişleme açısı için bir ifade önermiştir;

$$\alpha = 66 \times 10^{-3} C + 8{,}3 \qquad (2.33)$$

burada; α = Pervane jeti genişleme açısı, C= açıklık yüksekliğidir. Johnston vd. (2013) pervane jetinin farklı açıklık yüksekliği için yaptığı deneyler sonucu bulduğu genişleme açısı sonuçları Şekil 2.16'da verilmiştir.



Şekil 2.16 Pervane jeti genişleme açısının açıklık yüksekliği ile değişimi (Johnston vd., 2013)

Mevcut literatür taraması, pervane jetinin hızına ilişkin ilk çalışmaların esas olarak sınırlandırılmamış pervane jetine (yani serbest genişleyen bir jet) odaklandığını, pervane jetinin özelliklerini tanımlamak için özellikle hızın eksenel bileşeni için bir dizi denklem önerildiğini ortaya koymuştur. Ancak, pervaneli jeti normal jetten ayıran diğer iki hız bileşeni hala tam olarak anlaşılamamıştır. Ayrıca, daha önceki ölçüm tekniklerinin sınırlılığı nedeniyle, önceki çalışmaların çoğu yalnızca tek noktalı ölçüm verilerine dayalı olarak seçilen hız profilini sunmaktadır. Daha da önemlisi, pervane jetinin hidrodinamik özelliklerinin bir düzlem sınırı (sert veya aşınabilir) veya açık bir rıhtım eğimi ile sınırlandırılması konusunda sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Bu araştırma boşluğunu doldurmak amacıyla, pervane jetinin karakteristiklerini etkileyen sınır koşullarını daha iyi ortaya koyabilecek, üç boyutlu sınırlandırılmış pervane jeti akım alanının yüksek çözünürlüklü bir görüntüsünün elde edilmesi için detaylı deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Buna ek olarak, tabana yakın akım yapısının ve akışkan–taban ara yüzeyinde gelişen etkileşimin ayrıntılı şekilde incelenmesi, bu etkileşimin mekanizmasının anlaşılabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

3
DENEYSEL YÖNTEM ve PIV ÖLÇÜMLERİ

3.1 Giriş

Hidrolik yapıların tasarımı ve inşa süreci, yapıların uzun ömürlü, güvenli ve verimli olabilmesi için doğru ve güvenilir tasarım parametrelerinin belirlenmesini gerektirmektedir. Pervane jeti koşullarının neden olduğu akım dinamiklerindeki değişimler, özellikle yüksek türbülanslı akım alanları nedeniyle yapılar üzerinde meydana gelen hasarın anlaşılmasını zorlaştıran karmaşık bir süreçtir. Bu bağlamda, partikül boyutu, şekli ve akım hızı gibi akışkan özelliklerinin yanı sıra, su derinliği ve zemin malzemesinin temel özellikleri (kohezyon, porozite gibi) de bu süreci etkileyen önemli parametrelerdir. Akımın karakteristikleri, akışkan ile yapı yüzeyleri arasındaki etkileşimleri, yerel akım hızlarının ve kayma gerilmelerinin belirlenmesini önemli kılmaktadır. Bu bölümün amacı, pervane yüksekliği, dönüş hızı ve çapı gibi parametrelerin akım alanındaki etkilerini inceleyerek, farklı koşullar altında bu parametrelerin akım dinamiğini nasıl değiştirdiğini anlamaktır. Bölümde, bu amaca yönelik olarak gerçekleştirilen deneysel çalışmaların ayrıntıları, kullanılan deneysel mekanizmalar ve veri toplama yöntemleri de kapsamlı bir şekilde açıklanacaktır.

3.2 Deney Sistemi

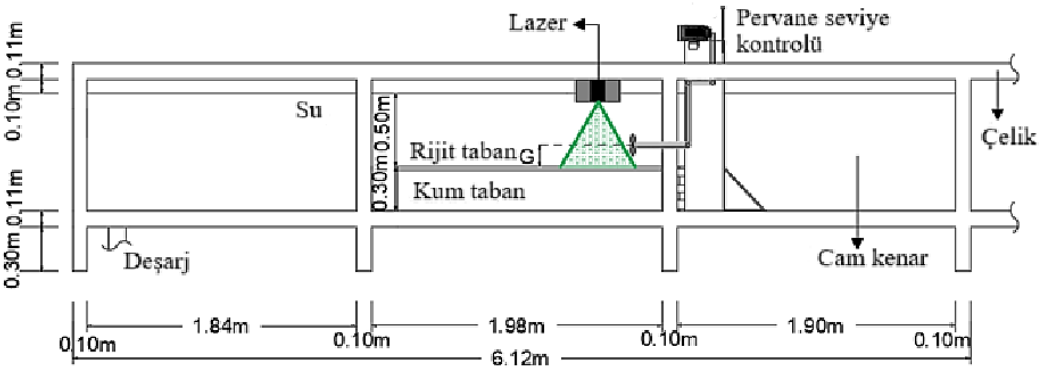
Yakın tarihli çalışmalarda, Hsieh vd. (2013) sınırlandırılmamış pervane jeti üzerinde bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirmiş ve yüksek hızlı parçacık görüntüleme hız ölçümü (PIV) tekniğini kullanarak pervane jetinin 3 boyutlu hız alanını ölçmüştür. Bir diğer çalışmada, Wei vd. (2017) düzlem bir taban varlığında sınırlandırılmış bir pervane jetinin akım özelliklerini PIV tekniği kullanarak 3 boyutlu olarak hız ve türbülans niceliklerini ölçmüştür. Bu çalışmalar incelenerek deney sürecinde benzer PIV tekniği kullanılarak farklı pervaneler ve farklı pervane

dönüş hızlarına göre sınırlandırılmış pervane jetini için 3 boyutlu akım özelliklerini araştırmak için bu çalışma yapılmıştır.

Belirlenen hedeflere ulaşmak için, optik gözlem sürecini mümkün kılacak yanlarında cam duvarlı bir kanala ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle, bu çalışmada hız ölçümlerini içeren deneyler 6.12 m uzunluğunda, 1.42 m genişliğinde ve 1 m derinlik boyutlarına sahip kanalda gerçekleştirilmiştir. (Şekil 3.1)

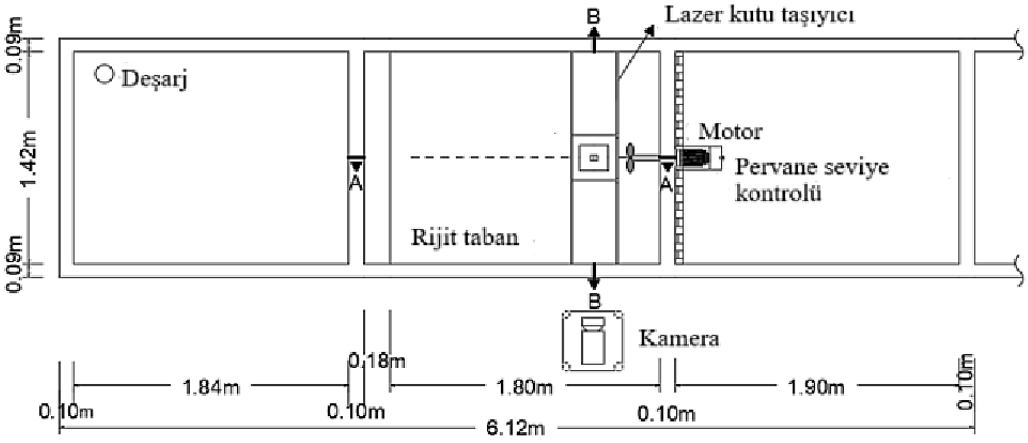
Şekil 3.1 Deney sisteminin görünümü

Kanal Yıldız Teknik Üniversitesi Hidrolik ve Kıyı Mühendisliği laboratuvarında bulunmaktadır. Deneyler kanalın 1.9 m uzunluğunda, 1.42 m genişliğinde ve 0.8 m derinliğine sahip rijit bir düzlem taban üzerindeki kısmında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1'de görülen ışıklandırılmış alan ölçümlerin yapıldığı bölgedir. Şekil 3.2 - Şekil 3.5 sırasıyla deney düzeneğinin boyuna kesitini ve plan görünümleri gösterilmektedir.

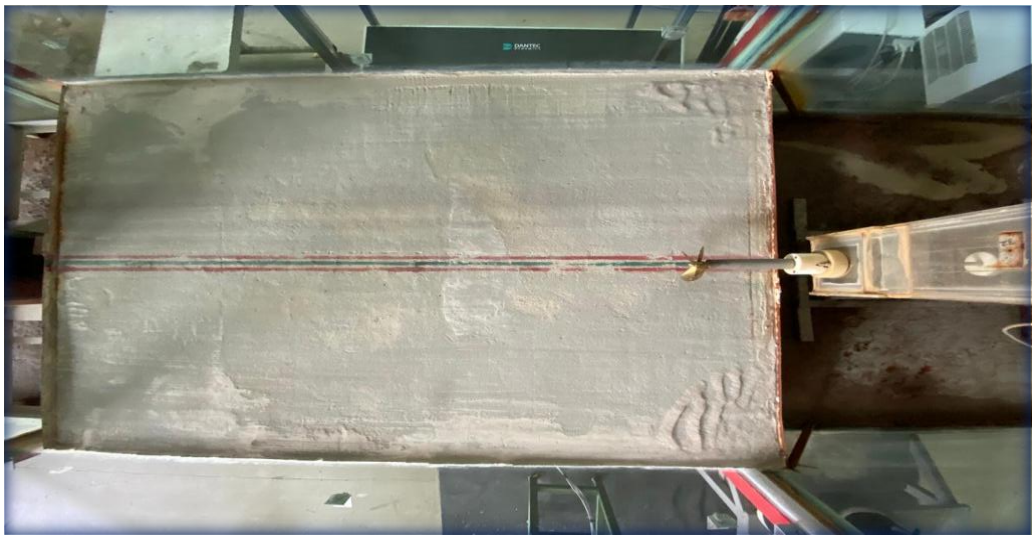


Şekil 3.2 Deney sistemi (Boyuna kesit)

Şekil 3.3 Deney sistemi boyuna görünüm



Şekil 3.4 Deney sistemi (Plan görünümü)



Şekil 3.5 Deney sistemi plan görünüm

Tüm deneyler, ilgili literatür çalışmaları dikkate alınarak belirlenen parametre aralıkları doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, ölçümlerde kullanılan parametreler ve ölçüm sistemi özellikleri şu şekilde özetlenebilmektedir:

• Pervane açıklığı (G): Kontrolör ile ayarlanan pervanenin merkez hattı, rijit taban yüzeyinin 10 cm ve 15 cm üzerinde konumlandırılmıştır,

• Pervane çapı (Dp): Çapları sırasıyla 6.5 cm, 10 cm ve 13 cm olan üç farklı batık Wageningen - B serisi pervane kullanılmıştır,

• Pervane dönüş hızı (rpm): Pervane dönüş hızı, bir frekans regülatörü (40 Hz, 45 Hz ve 50 Hz) aracılığıyla kontrol edilmiştir. Bu çalışma kapsamında, üç farklı pervane dönüş hızı (590 rpm, 670 rpm ve 745 rpm) kullanılarak deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir,

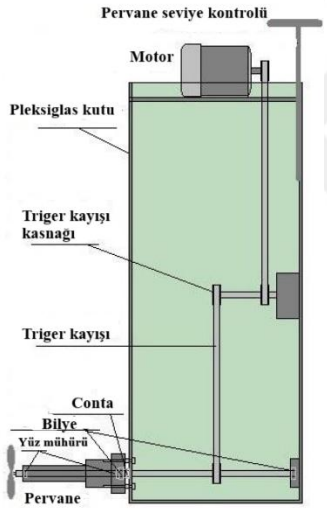
• Gözlem parçacıkları malzemesinin özellikleri: Deneylerde özgül kütlesi 1.03 g/cm^3 ve çapı d_{50}= 50 µm olan polyamid partikülleri kullanılmıştır.

• Kamera: FlowSense CX 4M-563 model yüksek hızlı kamera kullanılmıştır. Bu kamera 4 megapiksel (2336x1728 piksel) çözünürlüğe sahip sensörü ile tam çözünürlükte 563 kare (fps) değerine kadar kayıt yapabilme kapasitesine sahiptir.

• Lazer: Deneylerde 532 nm dalga boyuna sahip Nd:YAG lazer sistemi kullanılmıştır. Bu sistem 100 Hz'e kadar olan frekanslarda etkin bir şekilde çalışabilmektedir.

3.3 Pervane Sistemi

Pervane şaftı, Şekil 3.6'da gösterildiği üzere, pleksiglas malzemeden imal edilmiş bir kutu sistemi üzerine yerleştirilmiştir. Bu kurulum sayesinde, pervane şaftı ile rijit taban arasındaki açıklık mesafesi (G) hassas bir şekilde ayarlanabilmektedir. Pervanelerin döndürülmesi için gerekli tahrik sistemi, kutunun üst kısmına monte edilmiş motor ve kayış mekanizmasından oluşmaktadır. Pervane ile motor arasındaki tork aktarımı, kayışlar aracılığıyla sağlanmıştır. Pervanenin dönüş hızı, bir frekans regülatörü kullanılarak 40 Hz, 45 Hz ve 50 Hz olarak ayarlanmış; bu sayede sırasıyla 590 rpm, 670 rpm ve 745 rpm pervane hızları elde edilmiştir. Motor çalıştırıldığında, oluşturduğu tork kuvveti kayış sistemi üzerinden pervane şaftına iletilmiş ve böylece pervane döndürülmüştür (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Pervane sisteminin şematik görünümü

Tek pervaneli tahrik sistemleri genellikle çift pervaneli tahrik sistemlerine göre daha büyük pervanelerle donatıldıklarından, bu sistemlerin daha fazla oyulma potansiyeline sahip oldukları düşünülmektedir. Sümer ve Fredsøe (2002) iticilerle donatılmış gemilerde, iticilerin 360 derece dönebilmeleri ve değişken hıza sahip tersinir CP (kontrol edilebilir hatveli) pervanelere sahip olmaları nedeniyle dümenlerin manevra için gerekli olmadığını belgelemiştir. Ayrıca, Hamill (1987) manevra sırasında veya sıfır ilerleme hızında etkisi ihmal edilebilir olduğu için gemi gövdesinin dahil edilmesinin gerekli olmayabileceğini öne sürmüştür. Sonuç

olarak, bu çalışmada pervane teçhizatının nihai tasarımı, dümen ve gemi gövdesi olmaksızın bir pervane modelinden oluşmuştur. Pervane düzeneği Şekil 3.7'de verilmektedir. Deney aşamasında manevra veya durağan çekme (bollard pull) koşulu durumunu benzeştirmek için, gemilerin hareketi göz ardı edilmiştir. Literatür araştırmasında benimsenen konvansiyona uygun olarak, bu tez çalışmasında da aynı Sağ El Koordinat Sistemi (o-xyz) kullanılmıştır. Bu sistemde orjin, düzlem sınırında ve pervane yüzeyi düzleminin hemen altında konumlandırılmıştır. x ekseni, akım yönünde ve alt merkez hattı boyunca uzanmakta; y ekseni akım yönüne dik olacak şekilde sağ tarafına doğru; z ekseni ise yukarı yönde dikey olarak yerleştirilmiştir.

Pervane çalışma sistemi, bir şaftın dönmesiyle ortaya çıkan torkun pervane kanatlarına iletilmesi yoluyla eksenel yönde itme kuvveti üretmesi prensibine dayanmaktadır. Pervane, Şekil 3.7'de görüldüğü gibi bir mil etrafında dönen ve itici bir kuvvet üreten iki veya daha fazla kanattan oluşan mekanik bir cihaz olarak tanımlanabilmektedir. Pervaneye ait karakteristikleri tanımlamak amacıyla, literatürde ve bu tez çalışmasında kullanılan ilgili terim ve ifadeler aşağıda sunulmaktadır:

(1) Çap; Pervane dönerken kanat uçları tarafından daire boyunca yapılan mesafe.

(2) Yarıçap; Dönme ekseninden bıçak ucuna olan mesafe.

(3) Göbek; Pervanenin merkezinde bulunan katı silindir.

(4) Dönüş; Kıçtan bakıldığında: Sağ pervaneler ileri itiş sağlamak için saat yönünde döner. Sol pervaneler ileri itiş sağlamak için saat yönünün tersine döner.

(5) Yüz; Her pervane kanadının kıçtan bakıldığında görülen yüzeyi olarak tanımlanır

(6) Hatve; Bir pervanenin bir tam açısal devirde hareket ettiği eksenel mesafe.

(7) Ön Kenar; Bıçağın suyu ilk kesen kenarı.

(8) İz Bırakan Kenar; Suyun bıçaktan çıktığı kenar.

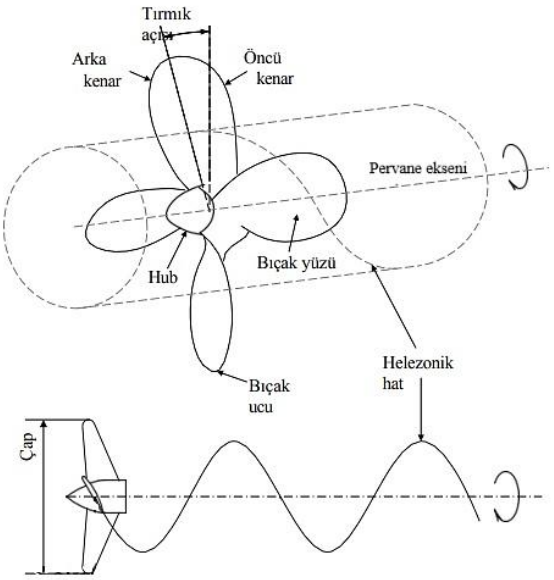
(9) Bıçak Ucu; Bıçağın göbeğin merkezinden maksimum erişimi. Ön ve arka kenarları ayırır.

(10) Tırmık Açısı; Tırmık referans çizgisi ile bıçak ucu dairesi düzlemi arasındaki açı

(11) Yansıtılan Alan; Dönme eksenine normal olan bir düzleme yansıtılabilen tüm pervane kanatlarının alanı olarak tanımlanır

(12) Geliştirilen Alan; Tüm pervane kanatlarının yüzey alanlarının toplamı.

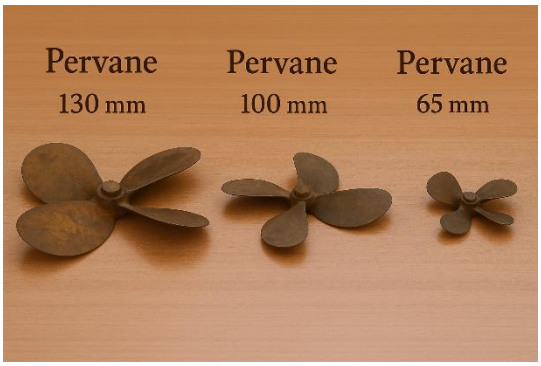
(13) Bıçak Alanı Oranı; Geliştirilen kanat alanının öngörülen alanına oranı.



Şekil 3.7 Bir pervanenin şematik çizimi

Pervanenin özelliklerini tanımlamak amacıyla çap, hatve, disk alanı ilişkisi, göbek, kanat alanı oranı gibi çeşitli teknik terimler kullanılmaktadır. Bu parametrelerin tümü, belirli uygulamalara yönelik performans gereksinimlerini karşılayacak şekilde en uygun pervane tasarımını gerçekleştirmek için hesaplanmakta ve değerlendirmeye alınmaktadır.

Bu çalışma üç farklı Wageningen-B serisi pervane kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan üç sabit hatveli pervane (FPP), Şekil 3.8'deki gibi çaplarına (D_p) göre Pervane- 130 mm, Pervane- 100 mm ve Pervane- 65 mm olarak adlandırılmıştır.



Şekil 3.8 Deneylerde kullanılan dört kanatlı pervanelerin geometrisi

Pervane göbeği, durağan çekme (bollard pull) koşulunda dönüşü sağlamak için paslanmaz çelik bir mile takılmıştır. Bu çalışmada, kıçtan bakıldığında pervanelerden ikisi (Pervane- 65 mm ve Pervane- 130 mm) saat yönünde, üçüncü pervane (Pervane- 100 mm) ise saat yönünün tersine dönmektedir.

Tablo 3.1 Pervanelerin özellikleri

	Pervane- 65 mm	Pervane- 100 mm	Pervane- 130 mm
Pervane tipi	Wageningen B Serisi	Wageningen B Serisi	Wageningen B Serisi
Malzeme	Pirinç	Pirinç	Pirinç
Bıçağın Hatve Tipi	FPP	FPP	FPP
Pervane Çapı (D_p)	65 mm	100 mm	130 mm
Pervane Göbeği Çapı (D_h)	7 mm	10 mm	14 mm
Dönüş Yönü	Sağ	Sol	Sağ
Bıçak Numarası (N)	4	4	4
Kesit Aralığı (P)	91 mm	140 mm	180 mm
Hatve Çapı Oranı (P/D_p)	1.4	1.4	1.4
Genişletilmiş Alan (A_E)	23.12 cm^2	52 cm^2	89 cm^2
Pervane Disk Alanı (A_{disc})	33.18 cm^2	78.54 cm^2	132.73 cm^2
Kanat Alanı Oranı (BAR)	0.7	0.7	0.7
İtme Katsayısı (K_T)	0.61	0.61	0.61

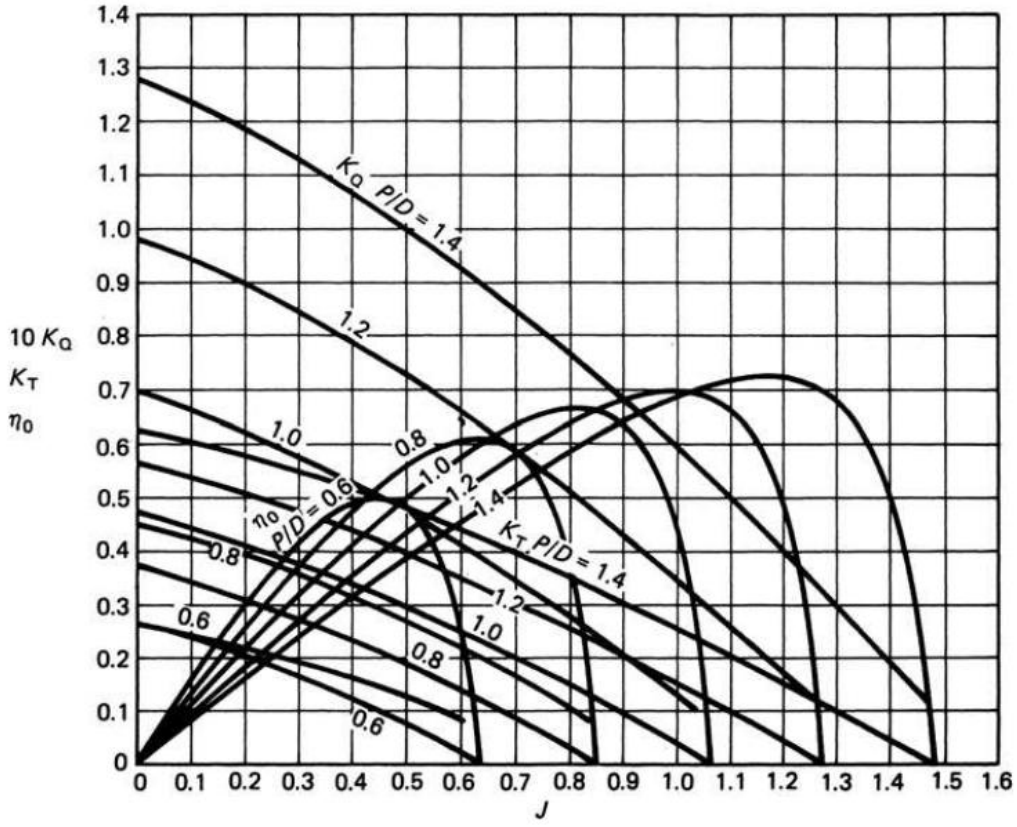
İtme katsayıları (K_T) her pervane için Tablo 3.1'de verilmiştir (Pervane - 65 mm, Pervane - 100 mm ve Pervane - 130 mm). K_T, Şekil 3.9'da gösterildiği gibi kavitasyonsuz bir ortamda çalışan bir dizi sabit hatveli pervane için tipik açık su diyagramından tanımlanmıştır. Bu şekil, belirli bir pervane için, pozitif ilerleme ve dönüş hızında çalışma koşullarının tamamını tanımlamaktadır, çünkü sabit koşullar

altındaki pervane yalnızca hatve pervane çapı oranı P/D_p tarafından tanımlanan karakteristik çizgi boyunca çalışabilmektedir. Pervaneler için K_T değerleri, durağan çekme (bollard pull) koşulunda (U_A=0) ve hatve çapı oranının (P/D_p) 1.4 değeri varsayımına göre en küçük ilerleme katsayısı (J) değeri için Şekil 3.9'dan alınmıştır. Tsinker (1995), sıfır ilerleme hızında K_T değerlerinin Tablo 3.2'de verildiği gibi (P/D_p) fonksiyonuna eşit olduğunu belirtmiştir.

Tablo 3.2 Pervane hatve/çap oranının fonksiyonu olarak itme katsayısı (K_T) (Carlton, 2007)

P/Dp	0.6	0.8	1	1.2	1.4
K_T	0.26	0.37	0.48	0.57	0.54
K_T	0.24	0.37	0.51	0.67	0.82

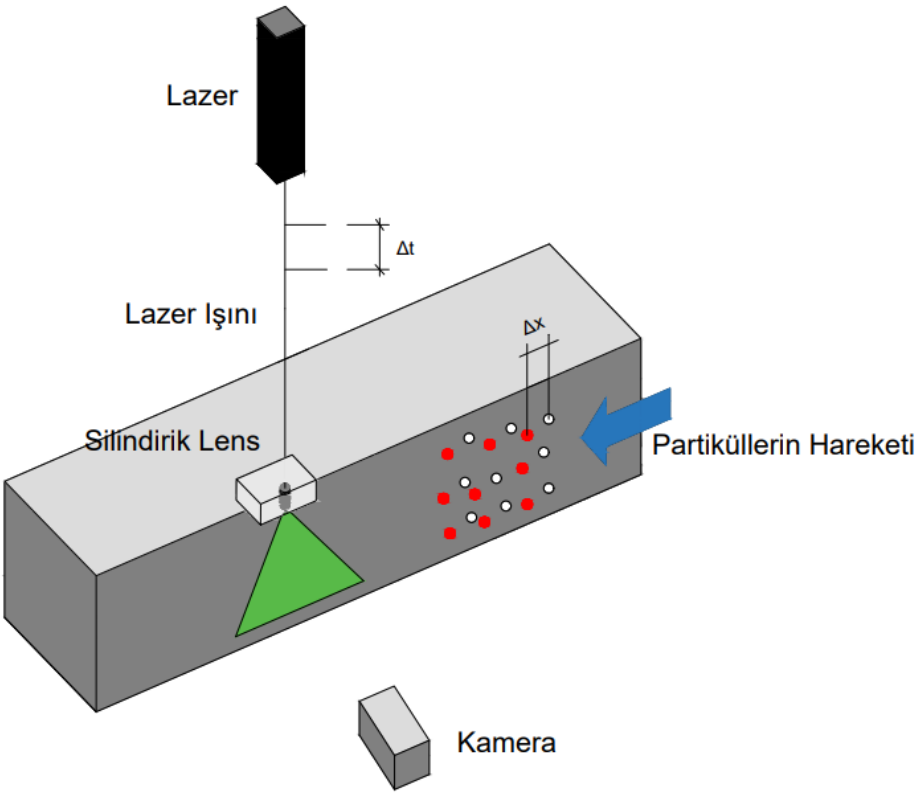
Pervane hatve/çap oranı 1.4 için Tablo 3.2'ye göre 0.54 itme katsayısı elde edilmektedir. Mevcut çalışmada, Tablo 3.2'de verilen değerlere benzer değerlere sahip 1.4 P/D_p pervaneler için Şekil 3.9 kullanılarak itme katsayısı 0.61 olarak bulunmuştur.



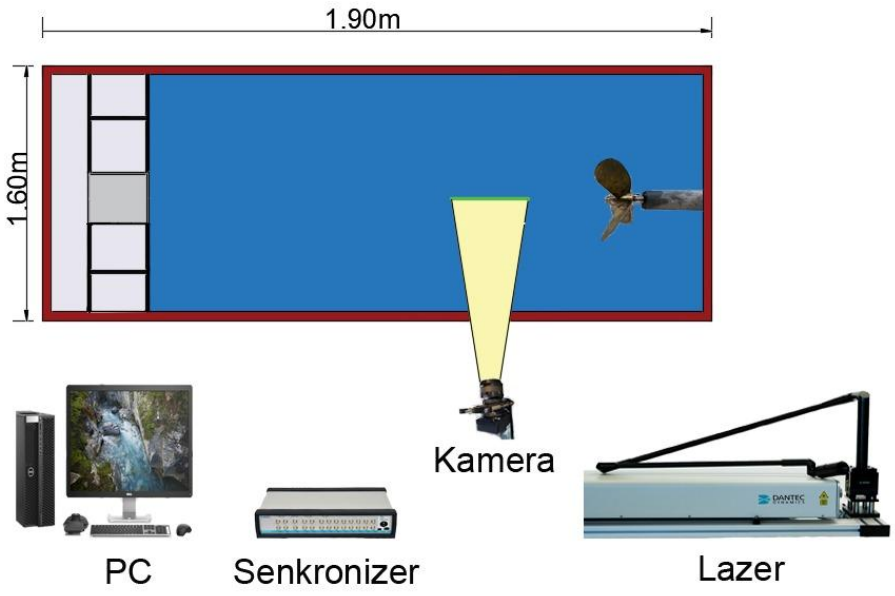
Şekil 3.9 Wageningen B5 -75 vida serisi için açık su diyagramı (Carlton, 2007)

3.4 Ölçüm Yöntemi (Parçacık Görüntüleme Hız Ölçümü (PIV))

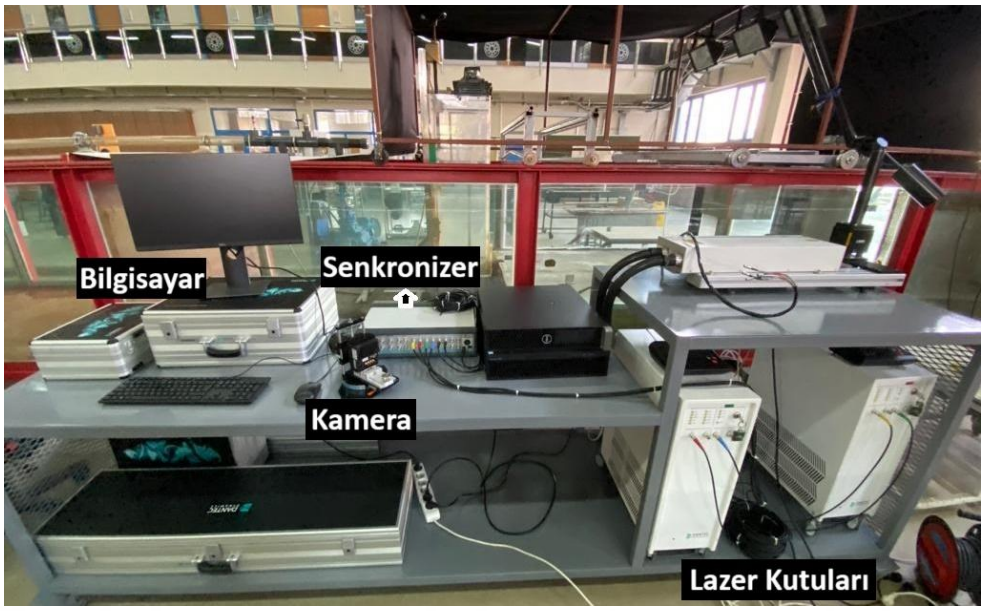
Parçacık Görüntüleme Hız Ölçümü (PIV), akımların dinamiğini incelemek için yaygın olarak kullanılan bir deneysel tekniktir. PIV, akımın hız alanlarını görselleştirmek için küçük, izlenebilir parçacıkların akıma dâhil edilmesini ve bu parçacıkların hareketinin dijital kameralarla kaydedilmesini sağlamaktadır (Şekil 3.10). Akışkan içerisindeki belirli bir düzlem, kısa süreli lazer darbeleriyle aydınlatılır ve bu düzlemdeki parçacıkların hareketi yüksek hızlı kameralar aracılığıyla ardışık görüntüler halinde kaydedilir. Görüntüler arasındaki parçacık yer değiştirmeleri korelasyon teknikleriyle analiz edilerek akımın hız vektörleri hesaplanır. Bu yöntem, özellikle akımın hızlı ve karmaşık hareketlerini incelemek için oldukça etkilidir, çünkü her bir görüntüde çok sayıda noktadaki hız bilgisi elde edilebilir. PIV, akımın iki boyutlu (2D) ya da üç boyutlu (3D) görselleştirilmesini sağlayarak, hız profilleri, türbülans yapıları ve akımın genel dinamikleri hakkında ayrıntılı bilgi sunmaktadır.



Şekil 3.10 PIV sistemi



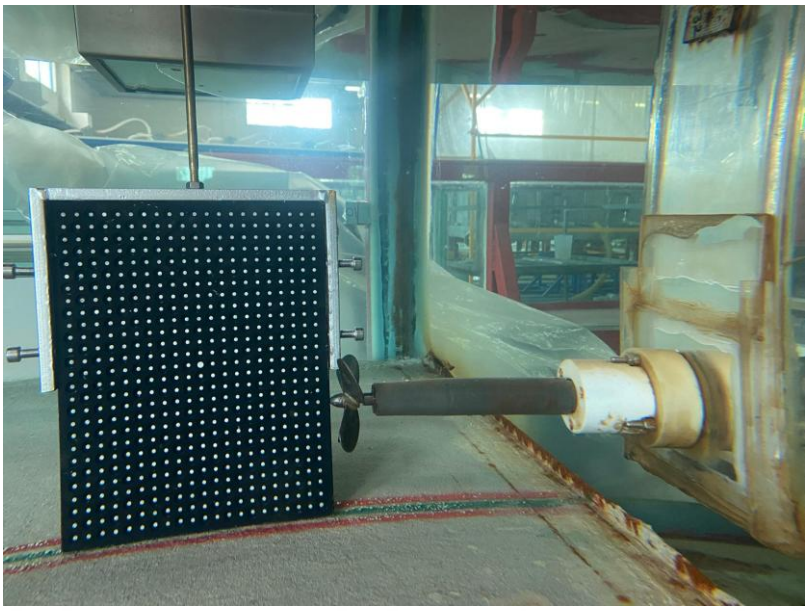
Şekil 3.11 Deney sistemi (Plan görünümü), senkronizer, kamera, lazer



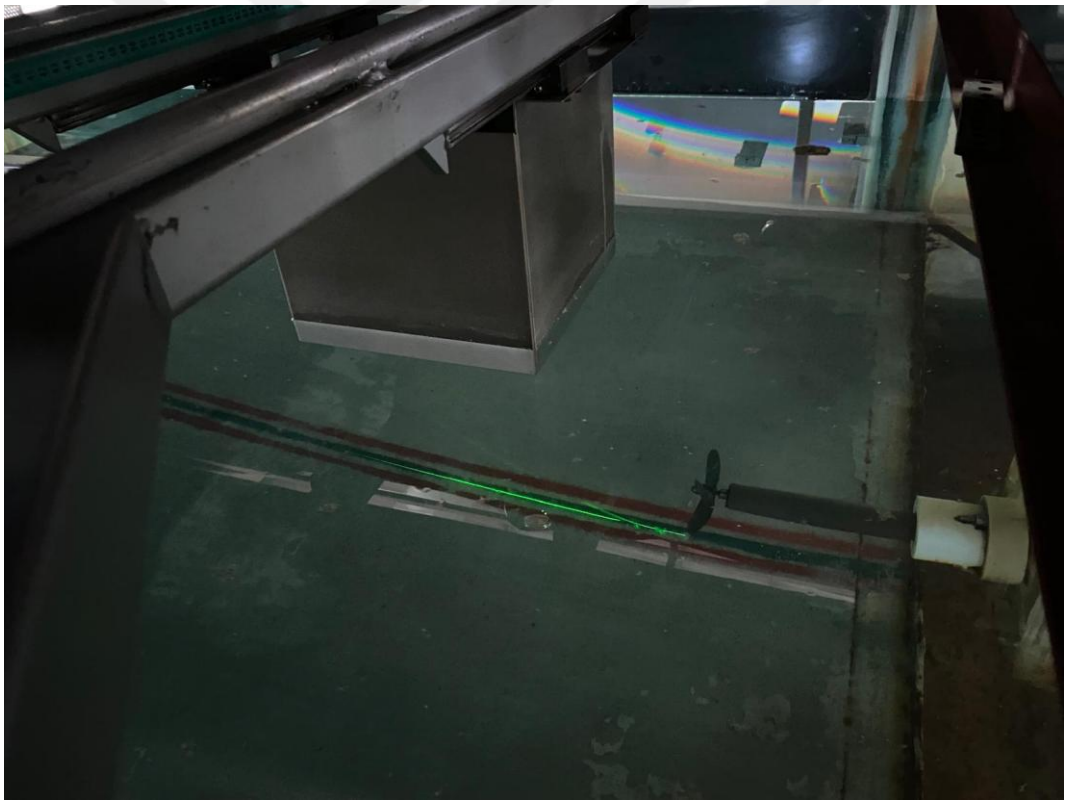
Şekil 3.12 PIV ölçüm sistemi ve bileşenleri

Şekil 3.13 FlowSense CX 4M-563 kamera

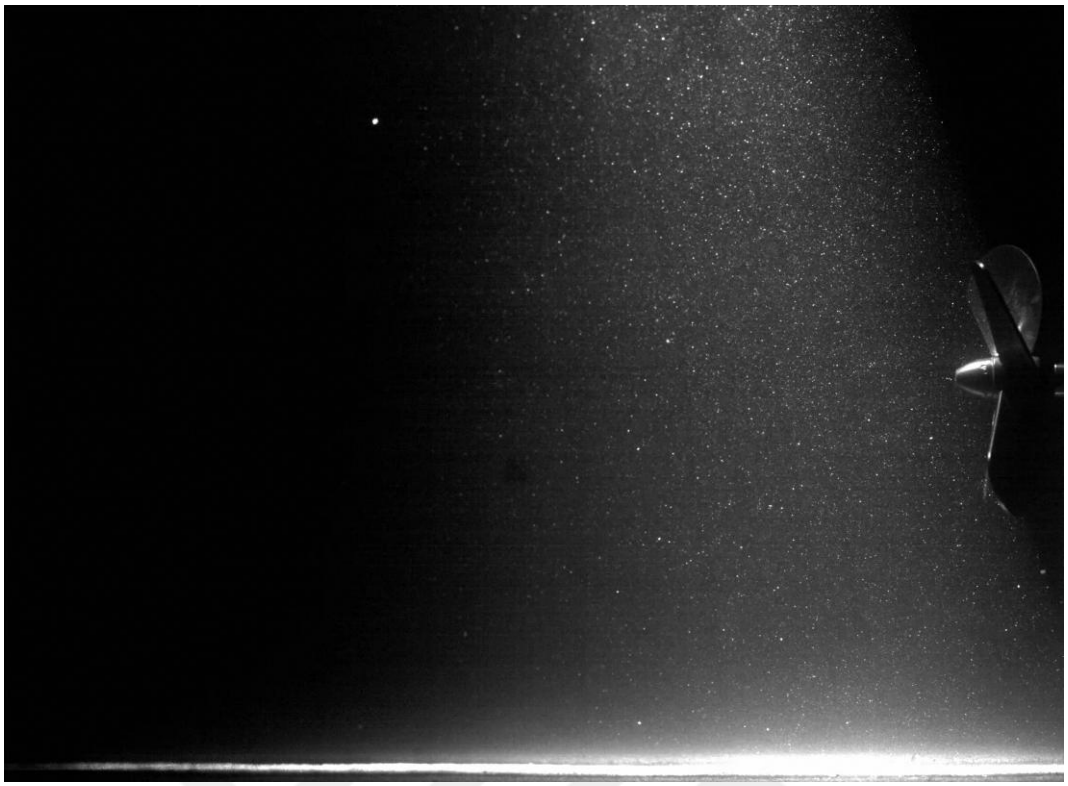
Şekil 3.14 Deneylerde kullanılan lazer başlığı



Şekil 3.15 Kalibrasyon tahtası ve pervane sistemi



Şekil 3.16 Ölçüm anından bir görüntü



Şekil 3.17 PIV görüntüsü

Deneylere başlamadan önce, PIV ölçümlerinin doğruluğunu olumsuz etkileyebilecek lazer ışığının istenmeyen yansımalarını en aza indirmek amacıyla kanal çevresi siyah kumaş ile kaplanmıştır. Şekil 3.18'de gösterildiği üzere, 532 nm dalga boyuna sahip su soğutmalı bir Nd:YAG lazer içeren PIV sistemi ile birlikte yüksek hızlı bir kamera kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Lazer kaynağından çıkan ışık, optik elemanlar yardımıyla su içerisinde yaklaşık 1.5 mm kalınlığında bir lazer ışık düzlemi oluşturmaktadır (Şekil 3.16). Deneylerde kullanılan suyun durgun derinliği 0.5 m olup, bu nedenle serbest yüzey etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilmiştir.

Kullanılan yüksek hızlı kamera (FlowSense CX 4M-563), maksimum 2336 x 1728 piksel çözünürlük, 8-bit görüntü derinliği ve 563 fps'ye kadar örnekleme hızına sahiptir. Akımın izlenebilmesi için, suyun içerisine d_{50} değeri 50 µm ve özgül kütlesi 1.03 g/cm^3 olan polyamid izleyici partikülleri kullanılmıştır. Bu partiküllerin çökelme hızı, Stokes yasası kullanılarak yaklaşık 0.16 µm/s olarak hesaplanmıştır ve bu değer pervane jetinin karakteristik hızlarıyla karşılaştırıldığında ihmal edilebilir düzeydedir. Drain (1980) tarafından önerilen

yaklaşıma göre, parçacık hızının akımın ortalama hızından en fazla %1 sapma gösterebileceği varsayımı altında, kullanılan partikül büyüklüğünün PIV ölçümleri için yeterli olduğu doğrulanmıştır.

$$r_p^2 < 0.1 \frac{\mu_{fluid}}{f_u \rho_p} \tag{3.1}$$

burada; r_p parçacık çapı (m), μ_{fluid} akışkanın vizkozitesi ($Kgm^{-1}s^{-1}$), f_u partikülün takip edilebileceği pik frekans (Hz) ve ρ_p partikül özgül kütlesi (Kg/m^3)

$$f_u = 0.1 \frac{\mu_{fluid}}{r_p^2 \rho_p} \tag{3.2}$$

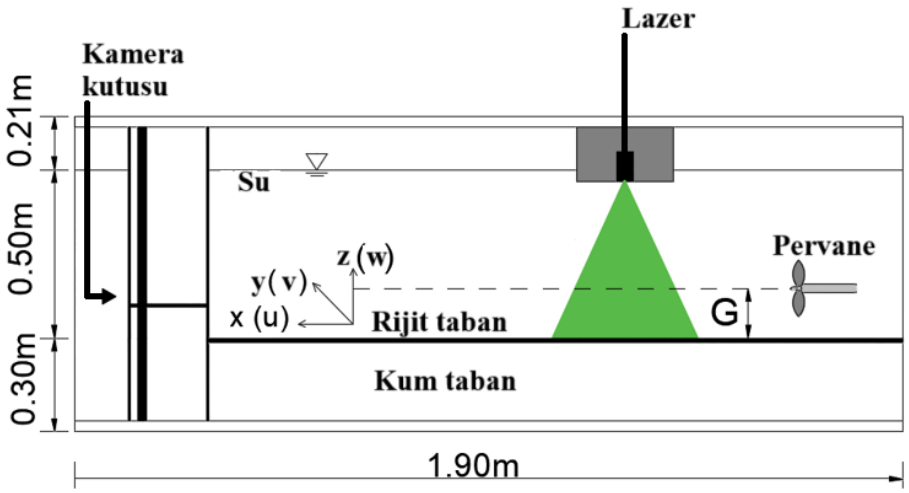
Pervane jetinin üç boyutlu karakteristiğini belirleyebilmek amacıyla, hem akım yönünü hem de enine düzlemleri kapsayan çoklu iki boyutlu ölçüm düzlemleri kullanılmıştır (Şekil 3.15). Akım yönündeki (x-z düzlemi) ve enine yöndeki (y-z düzlemi) akım alanını görüntülemek üzere, 15 Hz kayıt hızında ve çift kare (double-frame) modundan PIV görüntüleri (Şekil 3.17) elde edilmiştir.

Akım yönünde yapılan ölçümler için lazer ışık düzlemi, Şekil 3.18'de gösterildiği üzere, pervane dönüş ekseni ile hizalanacak şekilde x-z düzlemine yerleştirilmiştir. Pervane yüzeyinden başlayarak jetin rijit tabanla etkileştiği bölgeyi ve bu bölgenin ötesini kapsayacak şekilde, akım yönündeki ölçümler birleştirilmiş görüntü alanlarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sırasında, her bir pencere çifti arasında en az %30 örtüşme olacak şekilde görüş alanları ardışık olarak konumlandırılmıştır.

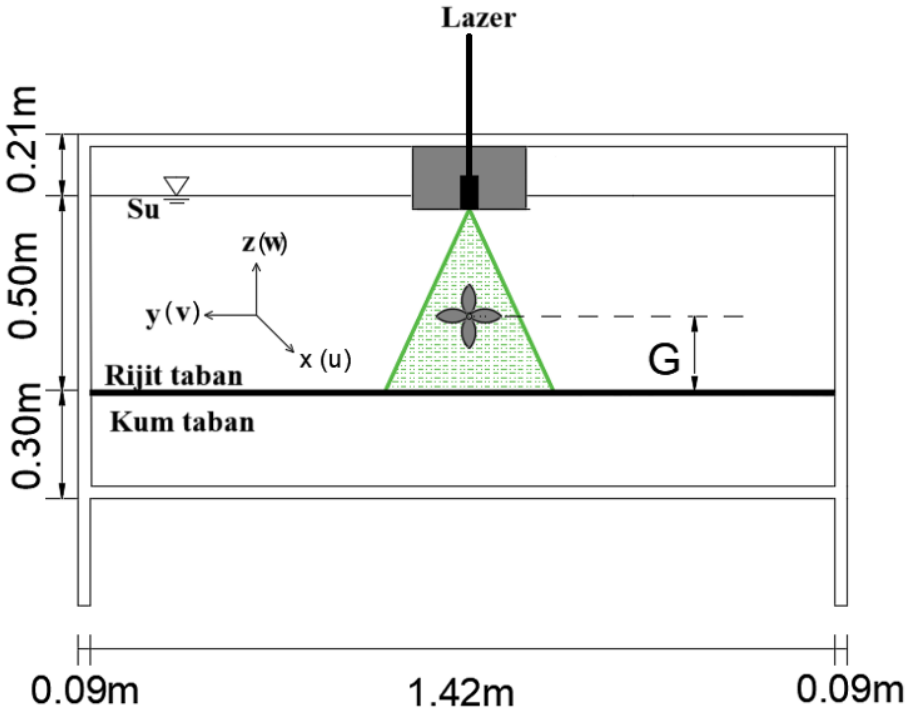
Enine ölçümler için lazer düzlemi, pervane dönüş eksenine dik olacak şekilde y-z düzlemine yerleştirilmiş ve karşıdan görünüm esas alınarak görüş alanı ayarlanmıştır (Şekil 3.18). Bu ölçümlerin elde edilmesi için, yüksek hızlı kamera, pervanenin karşısında yer alan şeffaf kamera kutusuna monte edilmiştir. Kamera, düşey yönde ayarlanabilir bir mekanizma ile konumlandırılmış ve hem pervane hem de rijit tabanı görüş alanına dahil edecek şekilde hizalanmıştır.

Bu düzenleme sayesinde, dönen bir jet akımının üç boyutlu hız yapısını çözümleyebilmek amacıyla hem akım yönündeki (u-w) hem de enine yöndeki (v-w) hız bileşenleri elde edilmiştir. Kullanılan referans koordinat sistemine göre, hız bileşenleri (u-w), x-z düzlemine; (v-w) ise y-z düzlemine karşılık gelmektedir.

a) Yandan görünüm

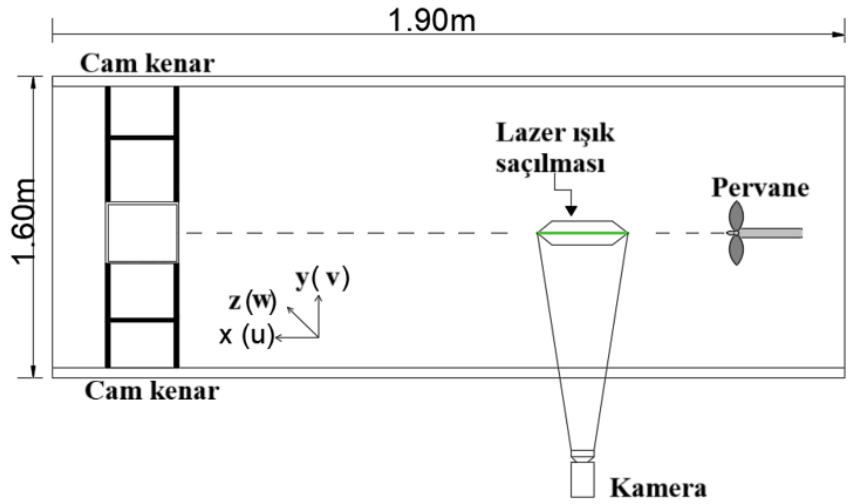


b) Karşıdan görünüm



Şekil 3.18 Akım yönünde deney düzeneği a) deney düzeneğinin boyuna görünümü b) deney düzeneğinin enine görünümü c) deney düzeneğinin plan görünümü

c) Üstten görünüm



Şekil 3.19 Akım yönünde deney düzeneği a) deney düzeneğinin boyuna görünümü b) deney düzeneğinin enine görünümü c) deney düzeneğinin plan görünümü (devam)

3.5 PIV Analiz Yöntemi

PIV analizinin amaçları doğrultusunda, kısa bir zaman aralığında alınan iki ardışık görüntü, gerçek zamanlı olarak kaydedilmekte ve bilgisayar belleğinde eş zamanlı olarak depolanmaktadır. Görüntülerin parlaklığını ve odak derinliğini karşılıklı olarak etkileyen önemli faktörlerden biri diyafram açıklığıdır. Diyafram açıklığı ne kadar büyük olursa, odak derinliği o kadar küçük ve resim parlaklığı o kadar yüksek olmaktadır. Parçacık partiküllerini aydınlatmak için maksimum ışık miktarını sağlamak amacıyla diyafram açıklığının yeterli olması için lens *f*/4 olarak kullanılmıştır. Lazer darbeleri arasındaki süre (Δt) ölçüm düzlemindeki akım hızına bağlıdır. Bu sürenin (Δt) hassas bir şekilde belirlenmesi, PIV deneylerinin doğruluğu ve başarısı açısından kritik öneme sahiptir. El-Adawy (2017) tarafından, ardışık lazer darbeleri arasındaki süre boyunca parçacıkların lazer tabakasına dik yöndeki yer değiştirmesinin, lazer tabakası kalınlığının dörtte birinden daha az olması gerektiği ifade edilmiştir. Bu doğrultuda, deney süresince Δt, ölçüm yapılan düzlemlere bağlı olarak 1000–3000 μs aralığında seçilmiştir.

Anlık hız vektör alanlarının elde edilebilmesi için, kamera tarafından kaydedilen görüntülerin analizinde El-Adawy (2021) tarafından önerilen üç aşamalı bir analiz

yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem; ön işleme, vektör hesaplama ve son işleme aşamalarından oluşmaktadır.

Ön işleme

Ön işleme aşamasında arka planın kaldırılması ve istenmeyen bölgelerin maskeleme işlemleri uygulanmıştır. Bu kapsamda, tüm görüntülerdeki genel ışık dağılımını temsil eden ortalama bir arka plan görüntüsü, kayıtlı tüm karelerin piksel yoğunluklarının ortalaması alınarak oluşturulmuş ve her bir görüntüden bu ortalama görüntü çıkarılarak arka plan etkisi giderilmiştir. Ayrıca, lazer ışığının neden olduğu parlamalar ve yansımalar gibi istenmeyen bölgeler, özel olarak tanımlanmış maske bölgeleri ile kapatılarak analiz dışında bırakılmış ve bu şekilde ön işleme aşaması tamamlanmıştır.

Vektör hesaplama

PIV, incelenen akım alanındaki hız vektörlerini belirlemek amacıyla, akım içerisinde askı halinde bulunan izleyici partiküllerin lazerle aydınlatılarak görüntülenmesine ve analiz edilmesine dayanan bir hız ölçüm tekniğidir. Ölçüm alanındaki bu izleyici partiküllerin, bilinen bir zaman aralığı (Δt) içerisindeki yer değiştirmesi temel alınarak hız vektörleri hesaplanmaktadır. Bu hesaplamada temel yöntem olarak çapraz korelasyon (cross-correlation) tekniği kullanılmaktadır.

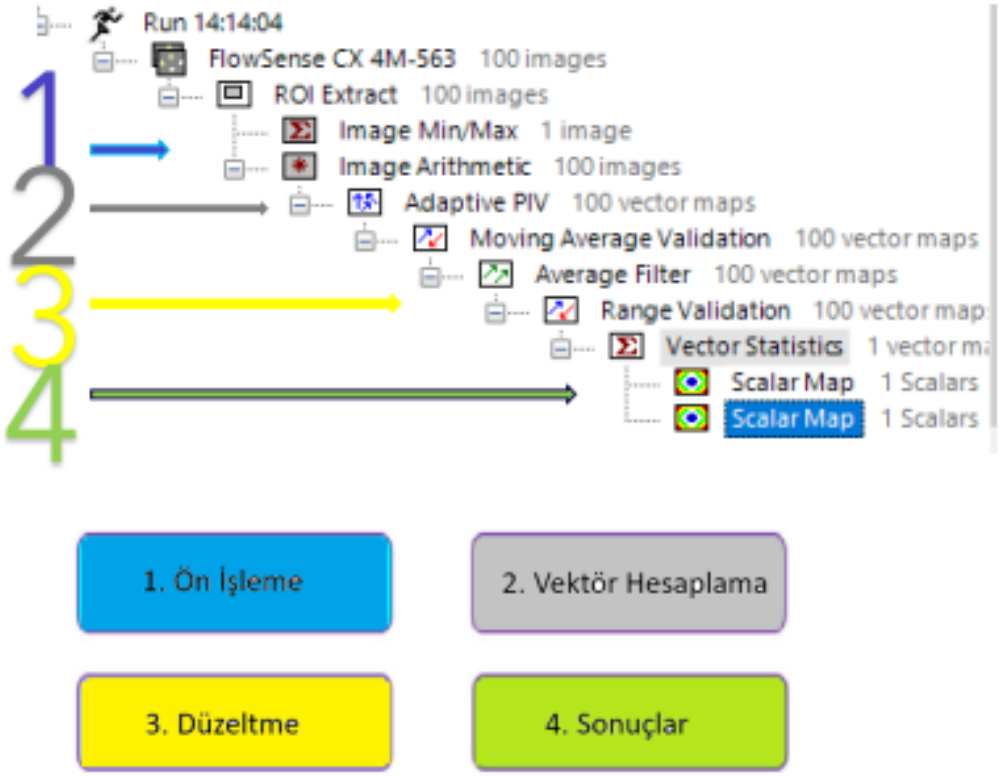
Vektör hesaplama sürecinde, partiküllerin birinci ve ikinci lazer pozlamalarından elde edilen saçılan ışık iki ayrı görüntü karesine kaydedilmektedir. Her bir görüntü karesi, "sorgulama alanı" (Interrogation Area – IA) olarak adlandırılan daha küçük alt bölgelere ayrılmaktadır. Bu alt bölgeler, doğrusal aralıklı ve genellikle 16×16, 32×32, 64×64 ya da 128×128 piksel boyutlarında seçilir; bu seçimde FFT (Fast Fourier Transform) algoritmasının uygulanabilirliği dikkate alınmaktadır.

Sorgulama alanı boyutunun belirlenmesinde, akışkanlar mekaniği açısından alanın yerel akım karakteristiklerini yansıtacak kadar küçük; ancak yeterli sayıda partikül içerecek ve doğru vektör tahmini sağlayacak kadar büyük olması gerekmektedir. Ayrıca, pencere boyutları, partiküllerin ortalama düzlem içi yer değiştirmesinin yaklaşık dört katı olacak şekilde seçilmelidir. Bu çalışma kapsamında, deney süresince en küçük 16×16 piksel ve en büyük 64×64 piksel boyutlarında sorgulama

pencereleri kullanılmış; nihai hız vektörleri 32×32 piksel doğrusal aralıklı sorgulama alanları üzerinden oluşturulmuştur.

Son işleme

Bu aşamada, zayıf çapraz korelasyon katsayılarından kaynaklanan hatalı vektörlerin ortadan kaldırılması, doğru akım vektör alanlarının elde edilmesi açısından önemli bir adımı oluşturmaktadır. Çapraz korelasyon yöntemi kullanılmakta ve bu sayede oluşturulan hız vektör alanlarında, yanıltıcı vektörler kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. Bu vektörler, genellikle komşu vektörlere göre farklı yön ve büyüklüklerde görünmekte ve bu farklar sayesinde tespit edilebilmektedir. Elde edilen hız vektör haritalarının son işlem aşamasında, aykırı vektörlerin düzeltilmesi ve verinin bütünlüğünün sağlanması amacıyla hareketli ortalama doğrulama ve ortalama filtreleme gibi yöntemler doğrulama tekniği olarak kullanılmıştır. Hareketli ortalama tekniği, her bir hız vektörünün belirli bir alanda yer alan komşu vektörlerin ortalama değeri ile karşılaştırılarak değerlendirilmesini sağlamaktadır. Bu yöntem, hız vektörü haritasının oluşturulmasında önemli bir doğrulama aracı olarak kullanılmaktadır. Akım alanının sürekliliği varsayımı göz önünde bulundurulduğunda, belirli bir (m×n) boyutlarındaki ortalama alan içerisinde yer alan vektörlerden anlamlı biçimde sapma gösteren vektörler, çevresindeki komşuların aritmetik ortalaması ile değiştirilebilmektedir. Bu yaklaşım, ölçüm hatalarından kaynaklanan aykırı değerlerin giderilmesine olanak tanımakta ve vektör alanının daha tutarlı bir yapıya kavuşmasını sağlamaktadır. Bu bağlamda, ortalama filtre yöntemi gürültüyü azaltmak amacıyla uygulanmış ve vektör alanındaki her bir bileşenin komşu değerlerine göre filtrelenmesini mümkün kılmıştır. Şekil 3.19'da, söz konusu analiz yönteminin uygulandığı yazılım arayüzüne ait bir ekran görüntüsü sunulmaktadır.



Şekil 3.20 Dynamic Studio veritabanı yapısı

3.6 PIV Ölçümlerinin Doğrulanması

Pervane jeti, eksenel, radyal ve teğetsel olmak üzere üç bileşenli karmaşık bir dönel akım yapısına sahip olduğundan, ortama serbestçe dağılmış parçacıklar düzlem dışı hız bileşenlerine de maruz kalmaktadır. Bu nedenle, iki boyutlu PIV (Parçacık Görüntüleme Hız Ölçümü) tekniği ile elde edilen verilerin doğruluğu, özellikle üç boyutlu bir akım alanının ölçümünde dikkatle değerlendirilmelidir. Bu çalışmada gerçekleştirilen deneylerde, düzlem içi hız bileşenlerinin doğru şekilde yakalanabilmesi amacıyla yüksek hızlı kameranın örnekleme hızı ve lazer tabakasının kalınlığı (yaklaşık 1.5 mm) dikkatle optimize edilmiştir. Böylece, parçacıkların yer değiştirmesi büyük oranda lazer tabakası içerisinde kalmakta ve düzlem dışı hız bileşenlerinden kaynaklanan sapmalar minimuma indirilmektedir.

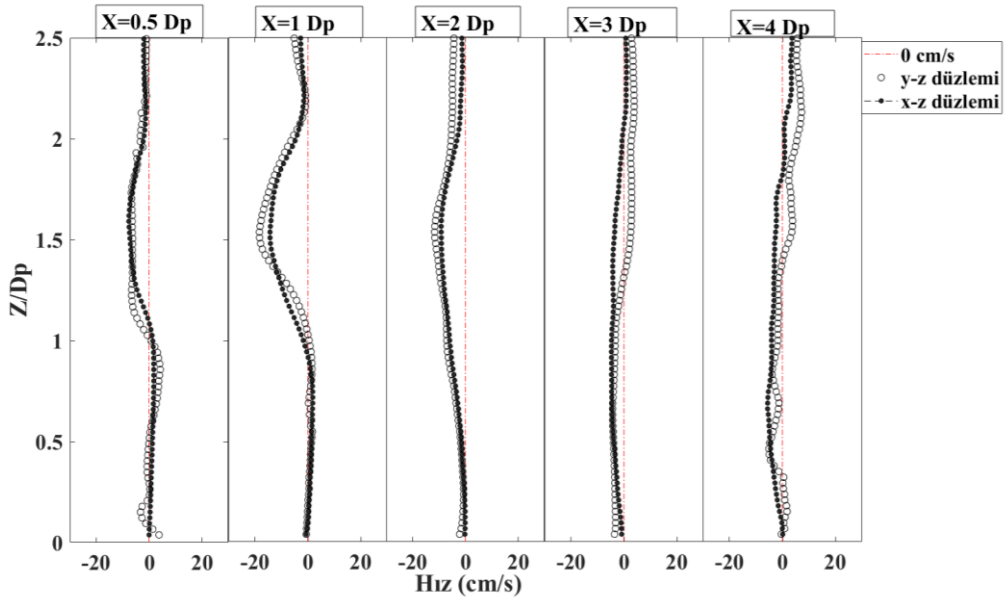
Bu doğrultuda, oldukça yüksek bir örnekleme frekansı tercih edilerek, düzlem dışı hareketlerin ölçüm sonuçları üzerindeki etkisi ihmal edilebilir seviyeye indirgenmiştir. Yoon ve Lee (2002) tarafından yapılan çalışmada, iki boyutlu PIV

ile stereoskopik PIV (SPIV) teknikleri karşılaştırılmış ve eksenel hız bileşeni ölçümlerinde maksimum farkın %5'in altında olduğu rapor edilmiştir. Bu bulgu, her ne kadar kanat ucu yakınlarında SPIV ölçümleri ile daha belirgin farklılıklar gözlemlense de genel olarak her iki yöntemin benzer akım yapıları ortaya koyabildiğini göstermektedir.

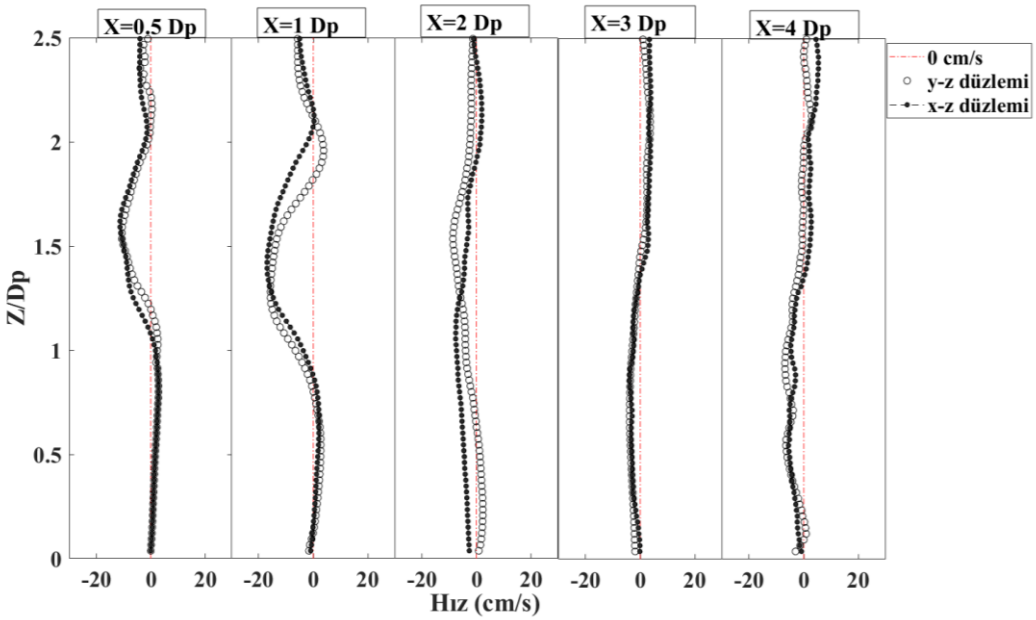
Hsieh vd. (2013) aynı pervane jet hız profilini ölçmek için Akustik Doppler hız ölçer (ADVP) 2D PIV sonuçları ile karşılaştırmış ve bu iki ölçüm tekniği tarafından üretilen sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu göstermiştir. Mevcut deneyde, enine düzlemdeki akım alanı ölçülürken, akım yönündeki (x) hız bileşeni, düzlem dışı hareketlere neden olabilmektedir. Bu durum özellikle pervane jetinin dönel karakterinden kaynaklanmaktadır. Dikey hız bileşeni (w), hem akım yönünde (x-z düzlemi) hem de enine yönde (y-z düzlemi) yapılan ölçümlerle elde edilebildiğinden, aynı konumda bu iki düzlemden elde edilen w bileşenlerinin tutarlı sonuçlar vermesi beklenmektedir. Enine düzlemde yapılan ölçümlerin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, Şekil 3.20'de Dp = 10 cm, G = 15 cm ve n = 590, 670, 745 rpm koşullarında, pervane jetinin farklı konumlarında x-z ve y-z düzlemlerinden elde edilen dikey hız profilleri karşılaştırılmıştır. Şekil 3.20'de sunulan bu karşılaştırma, her iki düzlemden elde edilen sonuçlar arasında makul düzeyde tutarlılık olduğunu ortaya koymakta olup, kullanılan ölçüm yönteminin geçerliliğini ve güvenilirliğini desteklemektedir.

Bu çalışmada, boyuna akım bileşeninin ölçüm doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, aynı deney koşullarında Tan (2019) tarafından gerçekleştirilen ADV hız ölçümleri kullanılmıştır. Elde edilen ADV verileri, bu çalışmada uygulanan PIV tekniği ile elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Şekil 3.21'de, X/D_p = 0.5 konumunda, D_p = 10 cm, G = 15 cm ve n = 590, 670, 745 rpm deney koşulları için yapılan karşılaştırma sunulmaktadır. İki yöntemle elde edilen veriler arasındaki makul düzeydeki uyum, Şekil 3.21'de görüldüğü üzere, PIV tekniğinin bu deneysel kurulumda güvenilir bir şekilde uygulanabilir olduğunu doğrulamaktadır.

a) G=15 cm, D=10 cm, *f*=40 Hz

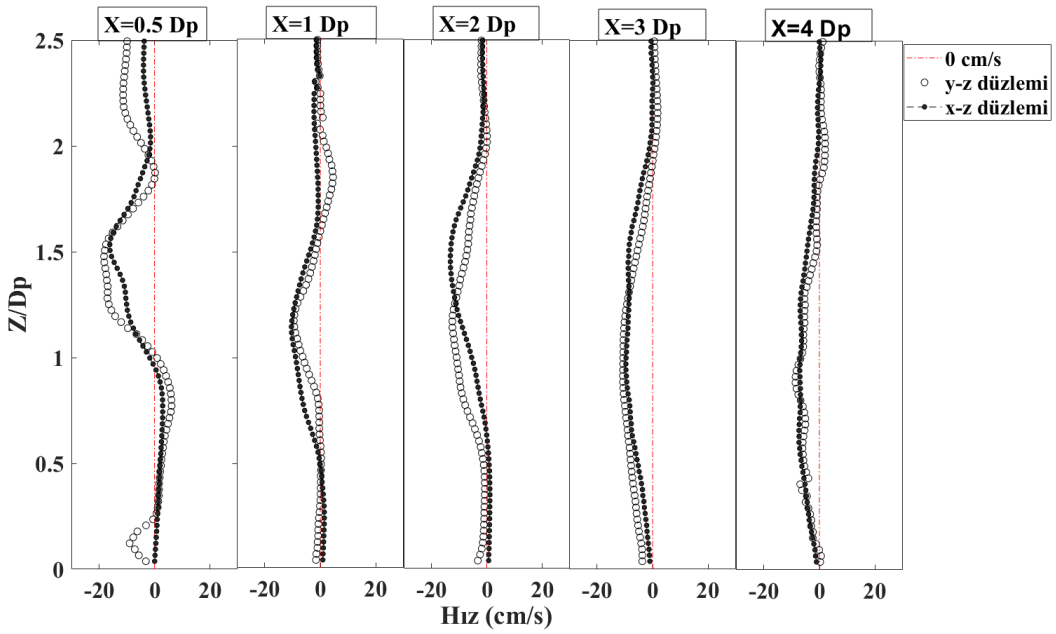


b) G=15 cm, D=10 cm, *f*=45 Hz



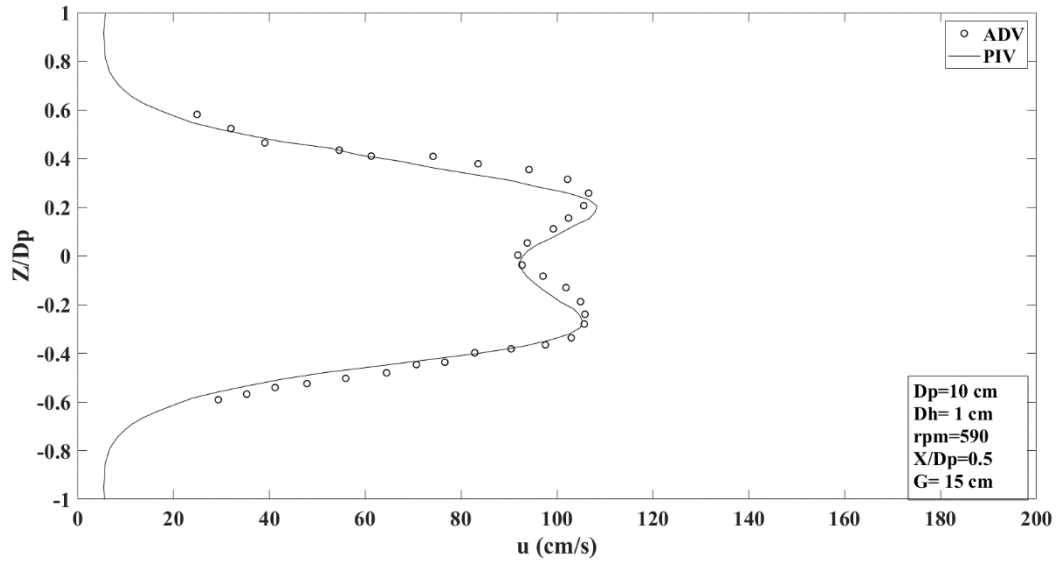
Şekil 3.21 Akım yönünde (x-z düzlemi) ve enine (y-z düzlemi) ölçümlerden elde edilen düşey hızların karşılaştırması: (a) G=15 cm, D=10 cm, *f*=40 Hz; (b) G=15 cm, D=10 cm, *f*=45 Hz; (c) G=15 cm, D=10 cm, *f*=50 Hz

c) G=15 cm, D=10 cm, *f*=50 Hz



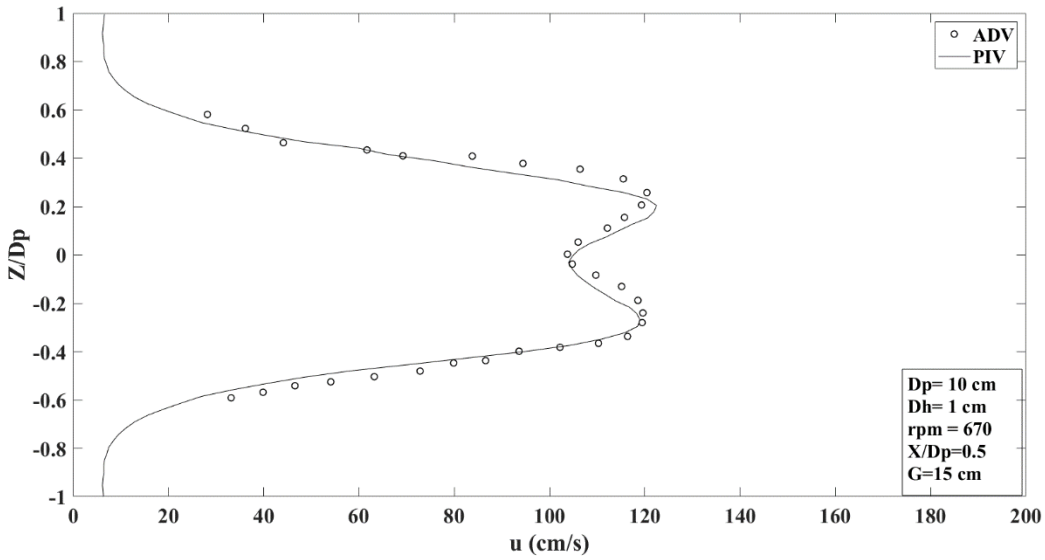
Şekil 3.22 Akım yönünde (x-z düzlemi) ve enine (y-z düzlemi) ölçümlerden elde edilen düşey hızların karşılaştırması: (a) G=15 cm, D=10 cm, *f*=40 Hz; (b) G=15 cm, D=10 cm, *f*=45 Hz; (c) G=15 cm, D=10 cm, *f*=50 Hz (devamı)

a) G=15 cm, D=10 cm, *f*=40 Hz

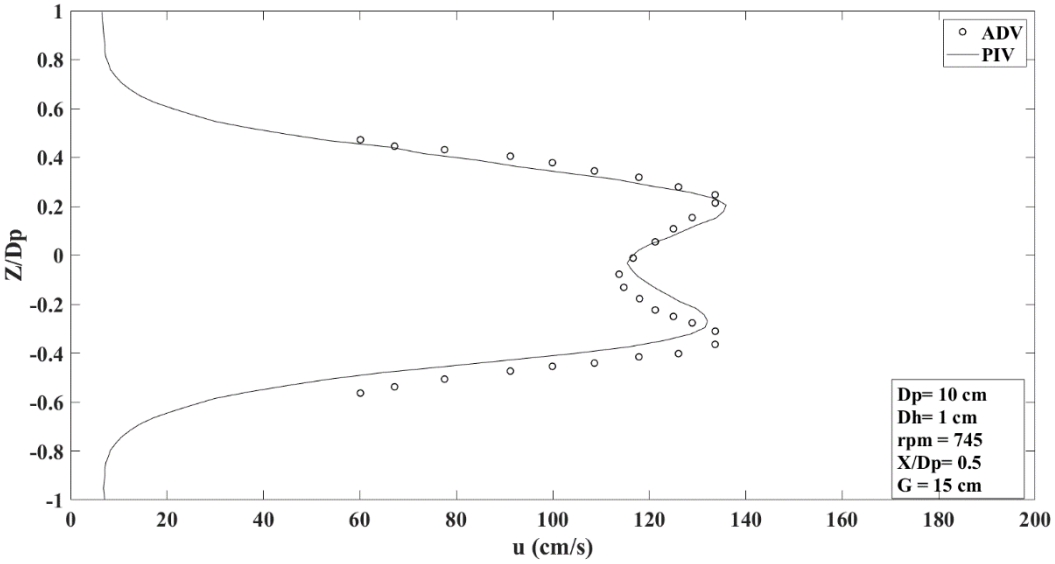


Şekil 3.23 PIV ve ADV ölçümlerinin karşılaştırılması: (a) G=15 cm, D=10 cm, *f*=40 Hz; (b) G=15 cm, D=10 cm, *f*=45 Hz; (c) G=15 cm, D=10 cm, *f*=50 Hz

b) G=15 cm, D=10 cm, *f*=45 Hz



c) G=15 cm, D=10 cm, *f*=50 Hz



Şekil 3.24 PIV ve ADV ölçümlerinin karşılaştırılması: (a) G=15 cm, D=10 cm, *f*=40 Hz; (b) G=15 cm, D=10 cm, *f*=45 Hz; (c) G=15 cm, D=10 cm, *f*=50 Hz (devamı)

4
DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMESİ

4.1 Giriş

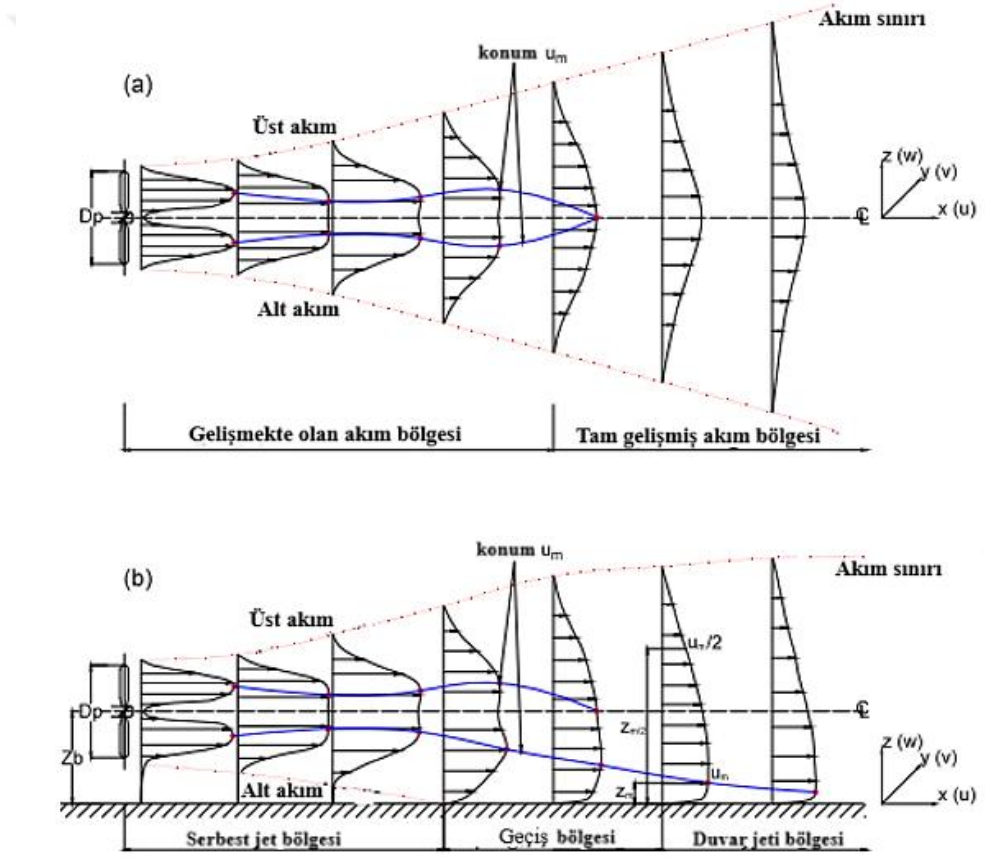
Bölüm 2'de sunulan literatür taramasında, pervane jetleri üzerine gerçekleştirilen çalışmaların büyük çoğunluğunun serbest genişleyen, yani sınırlandırılmamış jet akımlarına odaklandığı ortaya konulmuştur. Sınırlandırılmış bir pervane jetinde ise, göbeğin (hub) varlığı, jetin yapısını önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle göbeğin hemen arkasında düşük hızlı bir bölge oluşmakta ve pervane yüzeyine yakın bölgelerde çift tepe karakteristiği gösteren bir hız profili meydana gelmektedir. Bu durumda, maksimum eksenel hız doğrudan jet merkezinde değil, merkez hattından belirli bir uzaklıkta oluşmaktadır.

Jet akımının gelişim süreci, merkez hattındaki göreli hız dağılımına bağlı olarak iki ana bölgeye ayrılmaktadır: gelişen akım bölgesi ve tam gelişmiş akım bölgesi. Çift tepe yapısının belirginliği nedeniyle McGarvey (1996), pervane jetini merkez hattı etrafında iki simetrik alt ve üst akım yapısına sahip bir formasyon olarak tanımlamıştır.

Sınırlandırılmamış bir pervane jetinin kesit görünümü Şekil 4.1(a)'da şematik olarak sunulmuştur. Bu yapıda, jet akımının üst ve alt merkez dışı konumlarında oluşan yerel maksimum hız bölgeleri, ilerleyen mesafelerde birleşerek tam gelişmiş akım bölgesinin başlangıcını işaret etmektedir. Ek olarak, sınırlandırılmış bir pervane jetinin şematik gösterimi Şekil 4.1(b)'de verilmektedir. Bu gösterimde, Z_b pervane ekseni ile taban yüzeyi arasındaki boşluk yüksekliğini, D_p pervane çapını, um yerel maksimum eksenel hızı, z_m yerel maksimum eksenel hızın konumunu ve $z_m/2$ yerel maksimum eksenel hızın yarısının elde edildiği konumu temsil etmektedir.

Dairesel jetlerle ilgili önceki çalışmalarda, Kumar ve Das (2011), jetin her iki tarafındaki asimetrik sürüklenme nedeniyle, akımın tabana doğru sapmaktadır ve

bu etki Coanda etkisi olarak bilinmektedir. Düzlemsel bir sınırın varlığında, pervane jet akımı niteliksel olarak vortekse sahip bir dairesel jet akımına eşdeğer olabilmektedir. Bu nedenle, pervane jeti belirli bir açıklık yüksekliğinde durgun bir su kütlesine girdiğinde, (I) serbest jet bölgesi; (II) geçiş bölgesi ve (III) duvar jeti bölgesi olmak üzere üç bölgenin oluşması beklenmektedir. I. bölgede, pervane yüzeyinin yakınında, sınır etkisinin ihmal edilebilir olduğu ve jetin simetrik üst ve alt akımlara sahip genişleyen bir jet akımı gibi davranacağı beklenmektedir. II. bölgede, jet akımı tabana çarptığında, sınır alt akımın genişlemesini kısıtlayarak tabana paralel hareket etmeye başlamaktadır. III. bölgede, jet klasik bir duvar jetine benzer hale gelmektedir.



Şekil 4.1 Pervane jeti şematik çizimleri; (a) sınırlandırılmamış pervane jeti, (b) sınırlandırılmış pervane jeti

Pervane kaynaklı oyulma gibi mühendislik problemlerinin söz konusu olduğu durumlarda, pervane jet akımı genellikle bir kanal veya deniz tabanı gibi sınır koşulları tarafından kısıtlanmaktadır. Hamill vd. (2009), dümen ve hareketli bir

tabanın varlığının hız dağılımı üzerindeki etkilerini incelemiş ve hareketli bir tabanın bulunması durumunda akım alanının simetrik özelliklerini kaybettiğini tespit etmiştir. Johnston vd. (2013), bir düzlem sınırının pervane jetinin eksenel hız gelişimi üzerindeki etkilerini araştırmış ve sınır varlığında jetin alt akım bölgesinin daha hızlı genişlediğini ortaya koymuştur. Wei (2018) düz bir taban sınırının varlığında üç farklı açıklık yüksekliği için üç boyutlu akım ve türbülans özelliklerini araştırmış ve sınırın varlığı akım düzlemindeki düşey hız değişimini ve türbülans yoğunluğunu önemli ölçüde kısıtlayarak türbülans özelliklerinin anizotropik hale gelmesine neden olduğunu ve ayrıca geçiş bölgesinde enine akımı önemli ölçüde deforme ettiğini gözlemlemiştir. Bu araştırmada üç boyutlu pervane jeti kaynaklı akım alanını daha iyi anlayabilmek amacıyla, rijit bir taban etrafındaki akımı iki farklı açıklık yüksekliği, üç farklı pervane çapı ve üç farklı pervane dönüş hızı için ortalama ve türbülanslı akım özelliklerinin karşılaştırılmasına odaklanmıştır.

4.2 Deney Koşulları

Bu çalışmada, pervane jetinin sınırlandırılmış ortamlardaki üç boyutlu akım karakteristiklerini incelemek amacıyla, çeşitli deneysel parametreler altında hem boyuna (x–z düzlemi) hem de enine (y–z düzlemi) ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deneyler, taban ile pervane ekseni arasındaki boşluk yüksekliğini temsil eden iki farklı açıklık mesafesi (10 cm ve 15 cm), üç farklı pervane dönüş hızı (n = 590 rpm, 670 rpm ve 745 rpm) ve üç farklı pervane çapı (6.5 cm, 10 cm ve 13 cm) kullanılarak yürütülmüştür. Bu parametreler, pervane jeti akımının hız dağılımı, türbülans özellikleri ve tabanla etkileşimi üzerindeki etkilerini detaylı şekilde analiz etmek için sistematik biçimde bir araya getirilmiştir. Gemilerin hareketinin göz ardı edildiği durağan çekme "bollard pull koşulu" durumunu taklit etmek için pervane modelinin konumu kanal içinde sabitlenmiştir. Birincil amaç, pervane jetinin gelişimi üzerindeki sınır etkisini incelemektir.

4.3 Boyuna düzlemde (x-z düzlemi) Akım Özellikleri

4.3.1 Ortalama Hızlar

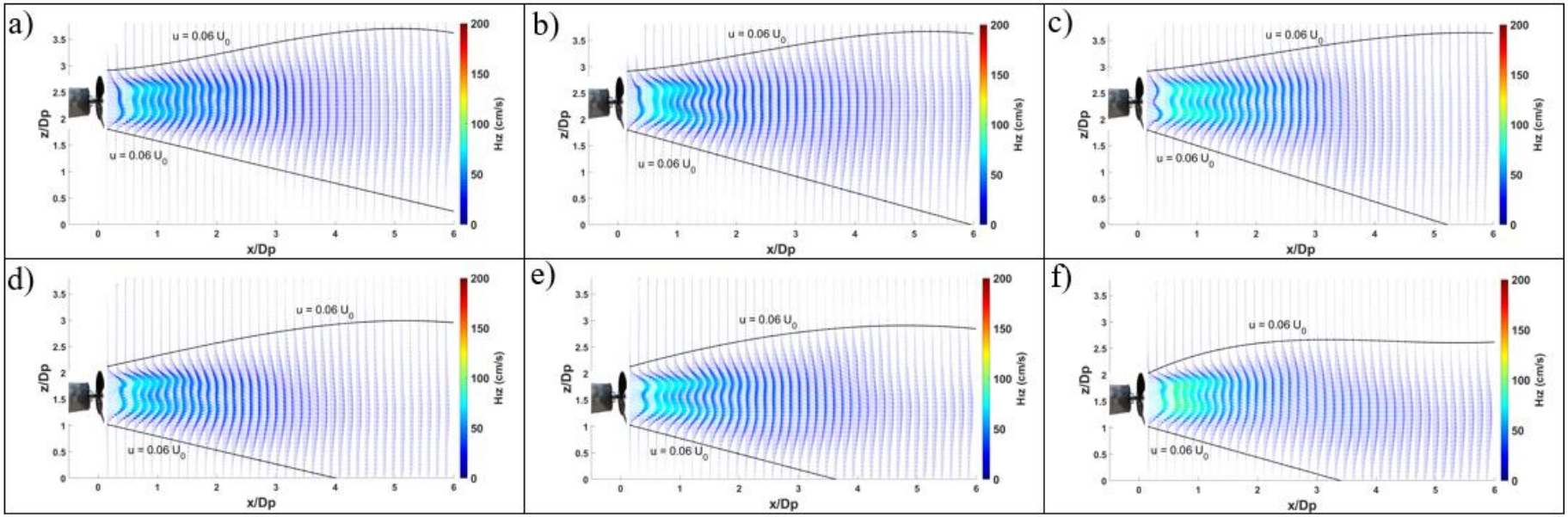
Zaman ortalamalı akım alanı, sınırlandırılmamış (serbestçe genişleyen) pervane jetinin karakteristiklerini tanımlamak amacıyla literatürde geniş ölçekte incelenmiştir (Blaauw ve Kaa 1978; Verheij 1983; Hamill 1987; Stewart 1992, vb.). Bu bölümde ise sınır etkilerinin pervane jet yapısı üzerindeki rolünü daha iyi ortaya koymak amacıyla, sınırlandırılmış pervane jetlerine ait ortalama akım yapıları analiz edilmektedir.

4.3.1.1 Pervane Ekseninde Ortalama Hızlar

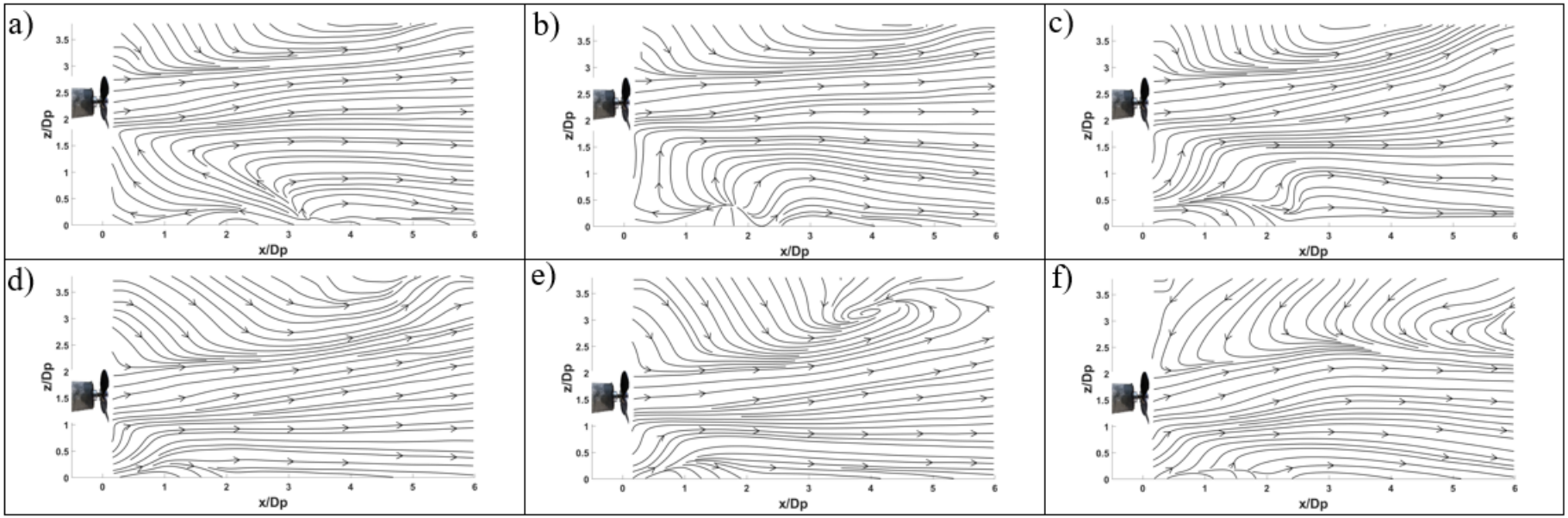
Deneysel olarak elde edilen zaman ortalamalı akım alanları, farklı pervane çapları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Buna göre, Tablo 4.1'de pervane ekseni için deney koşulları verilirken, D=6.5 cm çaplı pervane için sonuçlar Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te, D=10 cm için Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te, D=13 cm için ise Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de, ortalama hız vektör haritaları ile birlikte ortalama akım çizgileri şeklinde sunulmaktadır. Burada hız vektörlerinin büyüklüğü ve yönü sırasıyla $(u^2 + w^2)^{1/2}$ ve $\tan^{-1}(w/u)$ ile tanımlanmıştır. Grafiklerde tüm vektörlerin maksimum uzamsal çözünürlükte gösterilmemesinin nedeni, yoğun veri noktalarının grafik üzerinde aşırı sıkışıklığa yol açarak yorumlamayı güçleştirmesidir. Bu nedenle, akım yapısının genel özelliklerini açıkça yansıtacak şekilde vektör yoğunluğu seyreltilmiştir.

Tablo 4.1 Pervane ekseninde gerçekleştirilen deney koşulları

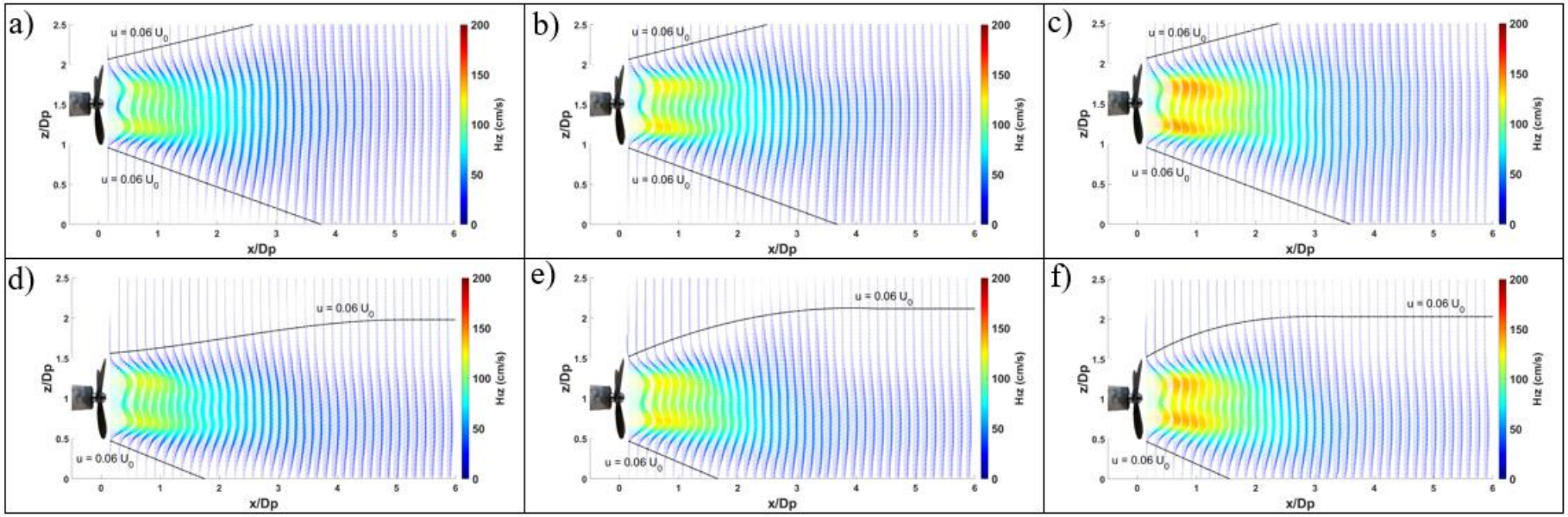
Deney No	Dp (cm)	G (cm)	n (rpm)	Ölçüm Düzlemi	Açıklama	Gözlem Alanı (cm^2)	Uzamsal çözünürlük (cm)
1	6.5	10	590	Boyuna (x-z)	y=0, merkez düzlem	60x25	0.248
2	6.5	10	670	Boyuna (x-z)	y=0, merkez düzlem	60x25	0.248
3	6.5	10	745	Boyuna (x-z)	y=0, merkez düzlem	60x25	0.248
4	6.5	10	590	Boyuna (x-z)	y=0, merkez düzlem	60x25	0.248
5	6.5	10	670	Boyuna (x-z)	y=0, merkez düzlem	60x25	0.248
6	6.5	10	745	Boyuna (x-z)	y=0, merkez düzlem	60x25	0.248
7	10	10	590	Boyuna (x-z)	y=0, merkez düzlem	60x25	0.248
8	10	10	670	Boyuna (x-z)	y=0, merkez düzlem	60x25	0.248
9	10	10	745	Boyuna (x-z)	y=0, merkez düzlem	60x25	0.248
10	10	15	590	Boyuna (x-z)	y=0, merkez düzlem	60x25	0.248
11	10	15	670	Boyuna (x-z)	y=0, merkez düzlem	60x25	0.248
12	10	15	745	Boyuna (x-z)	y=0, merkez düzlem	60x25	0.248
13	13	15	590	Boyuna (x-z)	y=0, merkez düzlem	60x25	0.248
14	13	15	670	Boyuna (x-z)	y=0, merkez düzlem	60x25	0.248
15	13	15	745	Boyuna (x-z)	y=0, merkez düzlem	60x25	0.248
16	13	15	590	Boyuna (x-z)	y=0, merkez düzlem	60x25	0.248
17	13	15	670	Boyuna (x-z)	y=0, merkez düzlem	60x25	0.248
18	13	15	745	Boyuna (x-z)	y=0, merkez düzlem	60x25	0.248



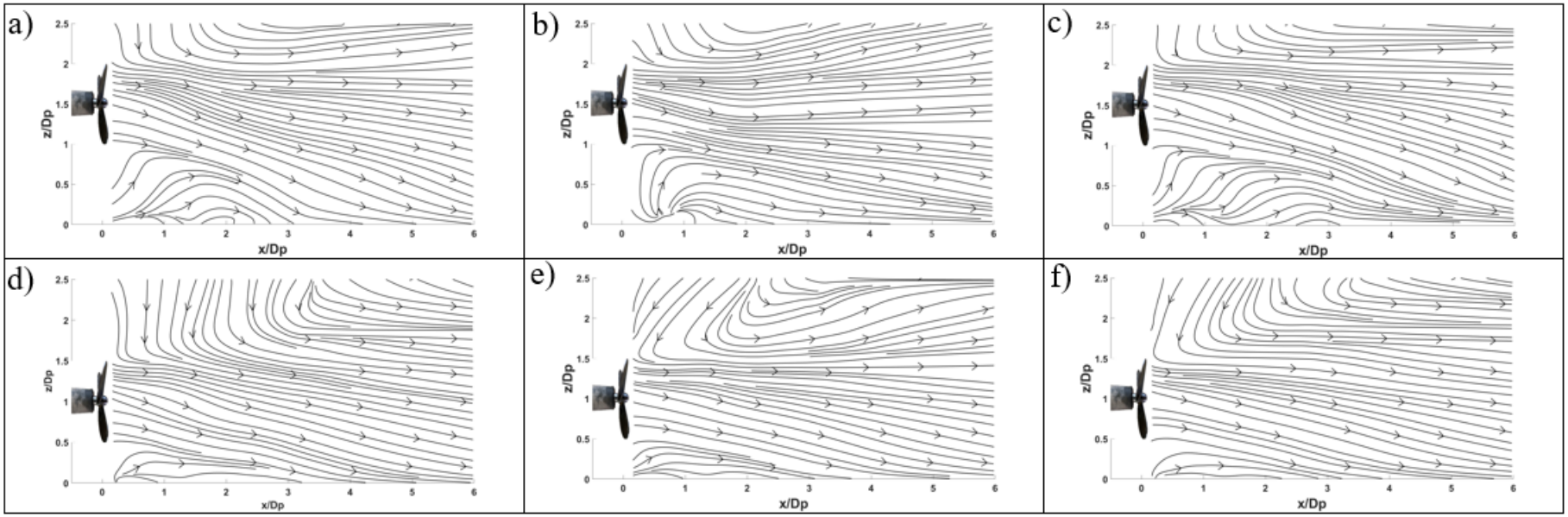
Şekil 4.2 D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



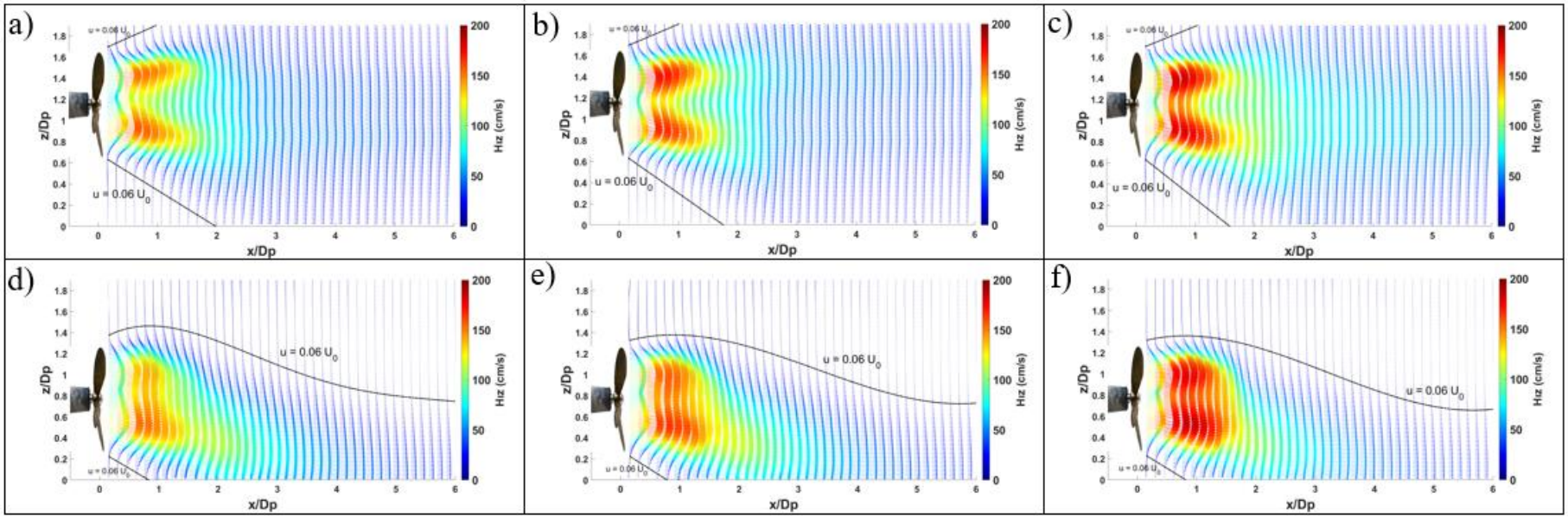
Şekil 4.3 D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



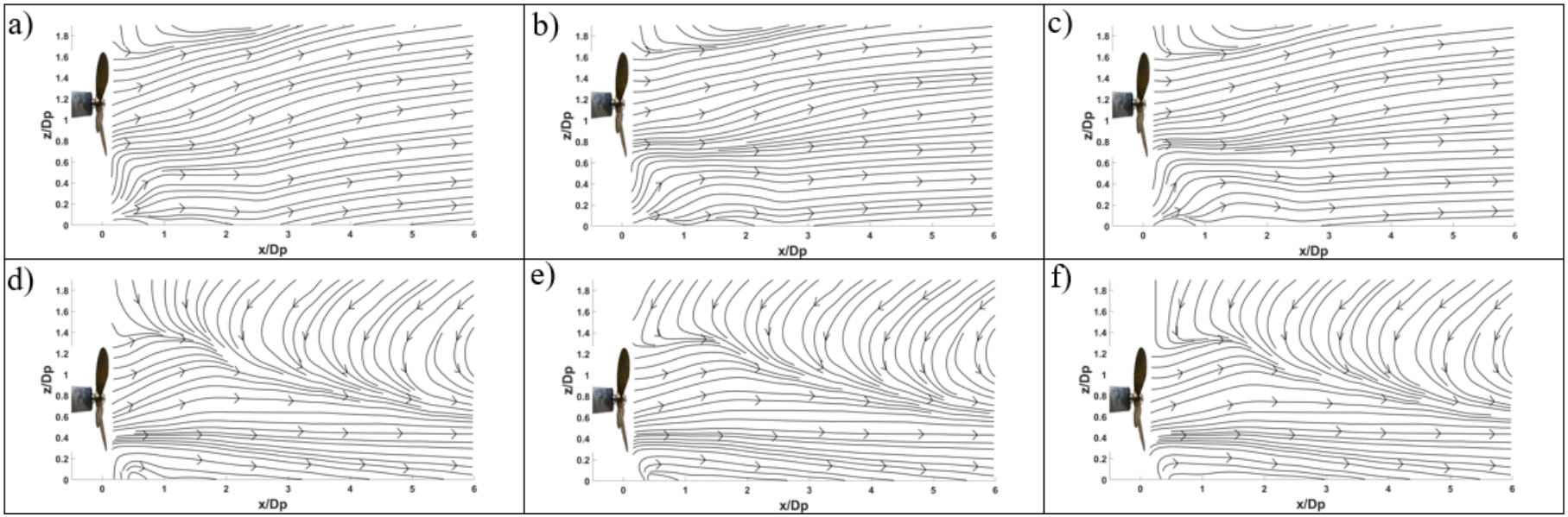
Şekil 4.4 D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



Şekil 4.5 D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



Şekil 4.6 D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



Şekil 4.7 D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm

Bir pervane jet akımının çıkış hızı, çıkış düzlemi boyunca maksimum ortalama hız ($x/D_p=0$) olarak kabul edilmiş ve pervane jet akımının çıkış hızı büyüklüğünü tahmin etmek için Hamill (1987), Hseih (2013) ve Hamill ve Kee (2016) gibi birçok araştırmacı tarafından temel olarak kullanılmıştır. Pervane çalışırken, kanatlarının çıkış düzlemindeki lazer tabakasını periyodik olarak kesmesi, bu bölgede görüntü kalitesini düşürerek güvenilir veri elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada, PIV hesaplamaları sırasında pervane konfigürasyonunu örtmek için görüntülerde maskeleme yapılmıştır. Sonuç olarak, ölçülen ilk akım düzlemi pervane göbeğinin ucundan başlamaktadır ve ölçülen maksimum hız, akım hızı U_0 olarak kabul edilmektedir. Tablo 4.2'de yapılan ölçümler için akım hızı tablosu verilmiştir.

Tablo 4.2 Deneylerde ölçülen maksimum akım hızları (U_0)

U_0 (cm/s)	D= 6.5 cm			D= 10 cm			D= 13 cm		
	590 Rpm	670 Rpm	745 Rpm	590 Rpm	670 Rpm	745 Rpm	590 Rpm	670 Rpm	745 Rpm
G=10 cm	72.28	78.76	88.89	118.42	129.18	139.91	152.96	164.84	185.50
G=15 cm	68.95	74.72	83.83	114.62	130.18	144.72	157.26	171.71	185.37
% σ	2.36	2.63	2.93	1.63	0.38	1.69	1.39	2.04	0.04

Deney sonuçları değerlendirildiğinde, sınırın akım hızı üzerindeki sınır etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu söylenebilmektedir. Farklı pervane dönüş hızları ve açıklık yükseklikleri için elde edilen veriler karşılaştırıldığında, ortalama akım hızından sapma en fazla %2.93 ile D=6.5 cm çapındaki pervanenin 745 rpm'deki ölçümünde gözlenmiştir. Bu sapma oranının düşük olması, ölçüm sürecindeki doğal varyasyonlar ve deneysel belirsizlikler ile açıklanabilir niteliktedir. Dolayısıyla, sınır koşullarının ortalama akım hızına anlamlı bir etki yapmadığı sonucuna varılabilir.

Yüksek bir noktadan boşaltılan dairesel bir ofset jet akımı durumunda, giriş düzlemi genellikle dikey bir duvarla sınırlandırılmıştır. Bu tür bir düzenekte, jet mansap bölgesindeki duvara bağlandığında, akım yapısı içerisinde devridaim bölgesi (recirculation zone) olarak adlandırılan ayrık bir bölge oluşmaktadır (Bhuiyan vd. 2011). Ancak bu durum pervane etkisinde oluşan jet için geçerli değildir çünkü

pervane jet akımı, çevresinde bir su kütlesinin etkisi altındadır. Şekil 4.3, Şekil 4.5 ve Şekil 4.7'de verilen akım çizgileri incelendiğinde, pervane hareketi sırasında etrafındaki su kütlesini pervaneye doğru çekmektedir ve pervane jet akımının oluşturduğu sürüklenme sebebiyle üst ve alt kısımdan çekilmekte olan su kütlesi jet bölgesine çekilirken ters yönde vorteks oluşmadığı gözlenmektedir. G=10 cm pervane açıklığı ölçümleri için bu akım daha belirgin bir şekilde gözlenmektedir, G=15 cm pervane açıklığı ölçümleri için açıkça görülmese de benzer bir geri akım bulunmaktadır. Öte yandan, açıklık yüksekliği azaldıkça Şekil 4.6'daki ölçümler karşılaştırıldığında jetin altındaki katı sınırın varlığı jet altındaki herhangi bir sürüklenmeyi kısıtlamaktadır. Ayrıca, jetin üzerindeki geri akım, daha yüksek açıklık durumundaki muadilinden daha yoğun görünmekte ve jet genişlemesini bastırmaktadır. Diğer ölçümler için katı sınırın varlığı nedeniyle jet genişlemesinin bastırılması Şekil 4.6'daki ölçümlere göre daha açık bir şekilde görülmemektedir.

Jet kayma akımı, çevredeki su kütlesiyle etkileşime girerek karışma eğilimindedir; bu durum, net bir jet akımı sınırının gözlenmesini zorlaştırmaktadır. Ana jetin enerjisini saran ve akımın tabana çarpma noktasını yaklaşık olarak belirleyen eşdeğer bir jet sınırı tanımlamak amacıyla, kontur grafiğinde yer alan dış izohat (bu çalışmada $u \approx 0{,}06U_o$) jetin gövdesini saran bir zarf eğrisi olarak, ampirik bir yaklaşımla seçilmiştir. Bu sınır, jetin karakteristik yayılımını tanımlamak ve analizlerde ortak bir referans oluşturmak için kullanılmaktadır (Şekil 4.2, Şekil 4.4, Şekil 4.6). Benzer bir yöntem Liepmann ve Laufer (1947), düzlem kayma tabakalarını tanımlamak için kullanılmıştır. Bu yaklaşım temel alınarak, Tablo 4.3'te sunulan deney koşulları için jet akım sınırının alt kısmının rijit tabana çarptığı konumlar belirlenmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, ardışık akım bölgeleri arasında fiziksel olarak varlığı kaçınılmaz olan geçiş bölgelerinin bu analizde ihmal edilmiş olmasıdır. Tanımlanan çarpma noktası, akım yapısının daha anlaşılır bir şekilde sunulabilmesi amacıyla yapılmış kavramsal bir tanımlamadır ve kesin fiziksel bir sınır niteliği taşımamaktadır. Bu yaklaşım, jetin tabanla etkileşimini analiz ederken açıklayıcılığı arttırmak amacıyla kullanılmaktadır.

Tablo 4.3 u=0.06U_0 iken X/D_p'ye göre pervane jetinin tabanla temas konumları

$0.06U_0$ X/D_p	D= 6.5 cm			D= 10 cm			D= 13 cm		
	590 Rpm	670 Rpm	745 Rpm	590 Rpm	670 Rpm	745 Rpm	590 Rpm	670 Rpm	745 Rpm
G=10 cm	3.98	3.63	3.40	1.75	1.66	1.56	0.82	0.81	0.78
G=15 cm	6.93	6.07	5.22	3.76	3.68	3.60	1.98	1.78	1.58

Her iki pervane açıklığı durumu için, pervane dönüş hızının artmasıyla birlikte jet akımının genişleme eğiliminde olduğu Tablo 4.3'te görülmektedir. Bu durum, Macías-Lezcano vd. (2024), pervane kaynaklı oyulma genişliğinin pervane dönüş hızı ile birlikte arttığını gözlemlediği durum ile uyumludur. Böylelikle pervane jet akımının genişlemesi literatürde yer alan çalışmalarla benzerlik göstermektedir. Farklı açıklık yükseklikleri için elde edilen ortalama hız vektörü dağılımları (Şekil 4.2, Şekil 4.4, Şekil 4.6), pervane jetinin rijit taban ile çarpmadan önceki bölgesinde, jetin neredeyse doğrusal olarak genişlediğini ortaya koymaktadır. Bu bölgede gözlemlenen akım yapısı, gelişmekte olan akım bölgesine özgü tipik bir çift tepeli hız profili sergilemektedir. Söz konusu profil, jetin merkez hattı etrafında iki ayrı hız maksimumu barındırmakta ve merkezde daha düşük hız değerleri göstermektedir. Bu karakteristik yapı, sınırlandırılmamış serbest genişleyen jetlerde gözlemlenen akım davranışına (Hseih vd. 2013) oldukça benzerlik göstermekte, dolayısıyla rijit taban etkisine rağmen jetin gelişim aşamasında sınırlandırılmamış jet dinamiği ile ortak özellikler taşıdığını işaret etmektedir. Jet akımının gelişimi üzerindeki sınır etkisinin gelişmekte olan akım bölgesinde önemsiz olduğunu ortaya koymaktadır ve bu bölge serbest jet bölgesi olarak kabul edilebileceğini göstermektedir. Ancak bu durum, jetin Şekil 4.6'daki G=10 cm pervane açıklığı ölçümleri için $x/D_p \approx 0.8$' 'den itibaren geçiş bölgesine girdiği için jetin gelişimi sınırlanmaktadır, diğer ölçüm sonuçları için jet genişlemesinin sınırlanması net bir şekilde gözlenmemiştir. Taban ile jet akımının temas ettiği noktaya ulaşıldığında, jetin gelişiminde belirgin bir farklılaşma gözlemlenmektedir. Özellikle, nispeten yüksek açıklık yüksekliği durumunda (Şekil 4.2), jetin rijit tabanla temas ettiği konum, daha düşük açıklık yüksekliklerine ait durumlarla (Şekil 4.4 ve Şekil 4.6) karşılaştırıldığında daha ileride yer almakta, dolayısıyla

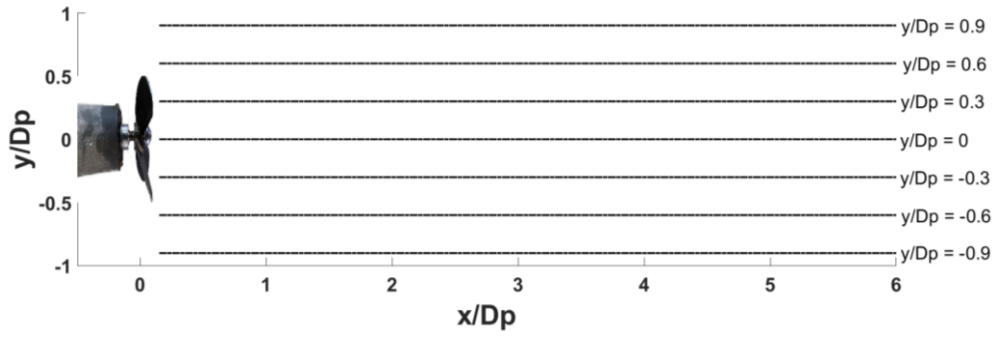
G/D_p oranı daha yüksek bir değere ulaşmaktadır. Bu durum, açıklık yüksekliğinin artmasıyla birlikte jetin daha uzun bir mesafe boyunca serbestçe gelişmesine olanak tanındığını ve tabana temas etmeden önce daha fazla genişleme imkânı bulduğunu göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, açıklığın artması jetin yayılma karakteristiğini doğrudan etkileyerek, çarpma noktasının daha uzakta oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, jet bir şekilde sınırlandırılmamış bir jet gibi davranır ve jetin tüm şekli önemli ölçüde deforme olmaz. G/D_p değeri azaldıkça jetin şeklinde deformasyon artmaktadır, $G/D_p \leq 1$ değerinden sonra jetin gelişimi üzerindeki taban etkisi net bir şekilde gözlenmektedir ve bu gözlenen taban etkisi jetin artık pervane ekseni etrafında sınırlandırılmamış bir jette veya büyük bir G/Dp değerine sahip sınırlandırılmamış bir jette olduğu gibi simetrik olmadığını göstermektedir. Böylelikle, jet akımı rijit tabanla etkileşime girdiğinde, Coandă etkisi (duvar bağlanma etkisi) sonucu tüm jet akışı tabana doğru yönlendirilmektedir. Bu yönlendirme, literatürde ofset jetlerle ilgili çalışmalarda yaygın olarak gözlenen bir olguyu andırmaktadır. Li ve Huai (2020), Kumar ve Das (2011), Bhuiyan vd. (2011) yaptıkları çalışmalarda benzer bir taban etkileşimini detaylı şekilde ortaya koymuşlardır. Bu durum, düz bir sınır yüzeyine sahip sınırlı bir pervane jetinin, özellikle sınıra yakın bölgelerde gelişen ofset jetlerle niteliksel olarak karşılaştırılabilir olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, bu gözlem pervane jetlerinde Coandă etkisinin belirgin şekilde var olduğunu ve akım karakteristiğini önemli ölçüde etkilediğini doğrulamaktadır.

Geçiş noktasının ötesinde, G/D_p oranının yüksek olduğu durumlarda jetin gelişimi, sınırlandırılmamış jet akımlarına kıyasla önemli bir farklılık göstermemektedir. Ek olarak, alt akım bölgesinde jet hızı beklenen şekilde zayıftır çünkü jet genişleme süreci $x/D_p=4$ civarında durmuş gibi görünmektedir. Bu konum, Hsieh vd (2013) tarafından rapor edilen ve vorteks etkisinin ihmal edilebilir hale geldiği konumla tutarlıdır. Öte yandan, G/D_p'nin değeri azaldıkça çarpma noktasının ötesinde alt akım konumundaki jetin bir duvar jeti gibi davrandığı görülmüştür ve bu etki pervanenin tabana yaklaştıkça daha net bir şekilde gözlenmektedir. Özellikle, çarpma sonrası jetin hızında görece bir artış gözlemlenmiş ve bu durum Beltaos (1976) tarafından tanımlanan eğik çarpan jet davranışıyla açıklanabilmektedir. Beltaos (1976), çarpma üzerine jetin içindeki basıncın yükseldiğini ve bunun da

akımı duvara paralel olacak şekilde saptıran önemli bir basınç gradyanına yol açtığını bildirmiştir. Daha sonra, duvar jeti bölgesi başladığında basınç tekrar düşmektedir. Bu bulgular ışığında, her bir bölgenin kapsamının açıklık yüksekliğine bağlı değiştiği görülmektedir. Özetle, $G/D_p > 1$ açıklık durumu için jetin akımının gelişimi ve gelişmiş jet akım bölgelerinin mevcut olduğu; $G/D_p \leq 1$ açıklık durumu için her üç bölgenin de mevcut olduğu gözlemlendiği sonucuna varılabilmektedir.

4.3.1.2 Pervane Ekseni Dışındaki Düzlemlerde Ortalama Hızlar

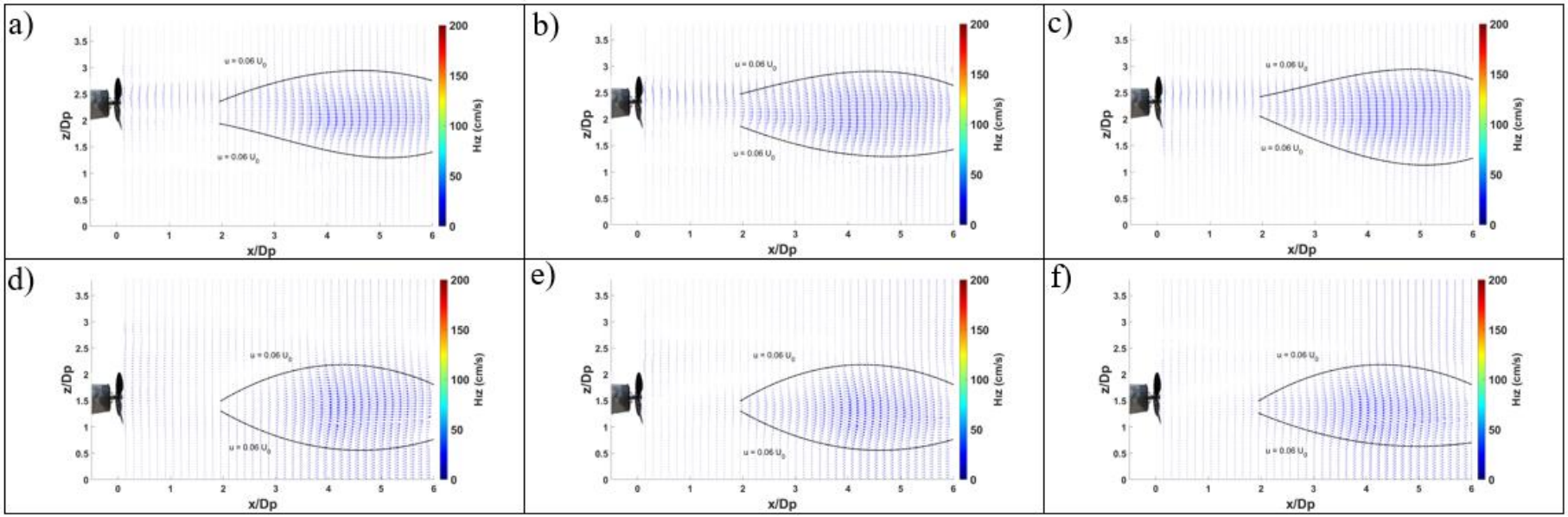
Bu bölümde, sınır etkilerinin pervane jeti üzerindeki etkisini daha kapsamlı değerlendirebilmek amacıyla, sınırlandırılmış jet akımlarının pervane ekseni dışındaki düzlemlerde ortalama akım yapıları belirli aralıklarla ölçülmüştür. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar, pervane çapına bağlı olarak gruplanmış ve analiz edilmiştir. D = 6.5 cm çapındaki pervane için yapılan ölçümlerin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla Şekil 4.8'de deneysel düzeneğe ait şematik bir gösterim sunulmuştur ve Tablo 4.4'te deney koşulları verilmiştir. Bu pervane çapı için elde edilen ortalama hız vektörü dağılımları sırasıyla Şekil 4.9, Şekil 4.11, Şekil 4.13, Şekil 4.15, Şekil 4.17 ve Şekil 4.19'da sunulmuştur. İlgili akım yapılarının detaylı analizine olanak sağlamak amacıyla, aynı ölçümlere ait ortalama akım çizgileri ise sırasıyla Şekil 4.10, Şekil 4.12, Şekil 4.14, Şekil 4.16, Şekil 4.18 ve Şekil 4.20'de verilmiştir.



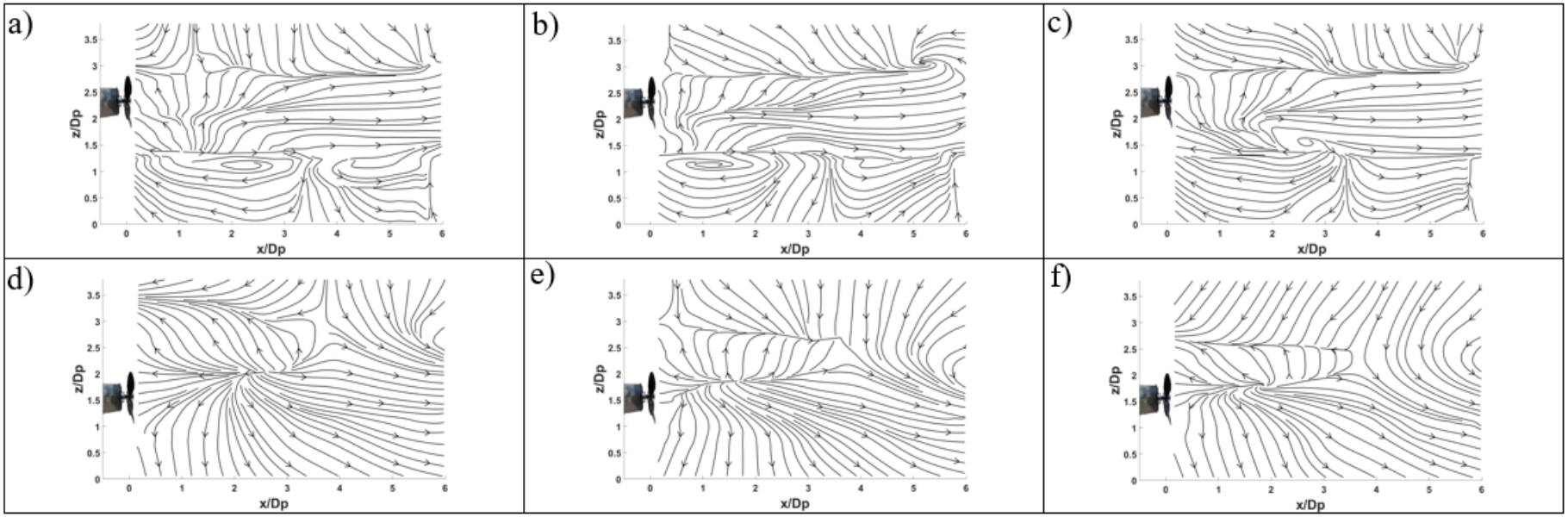
Şekil 4.8 D=6.5 cm çaplı pervane için ölçüm yapılan eksenlerin plan görünümü

Tablo 4.4 D=6.5 cm çaplı pervane ekseni dışındaki düzlemlerde gerçekleştirilen deney koşulları

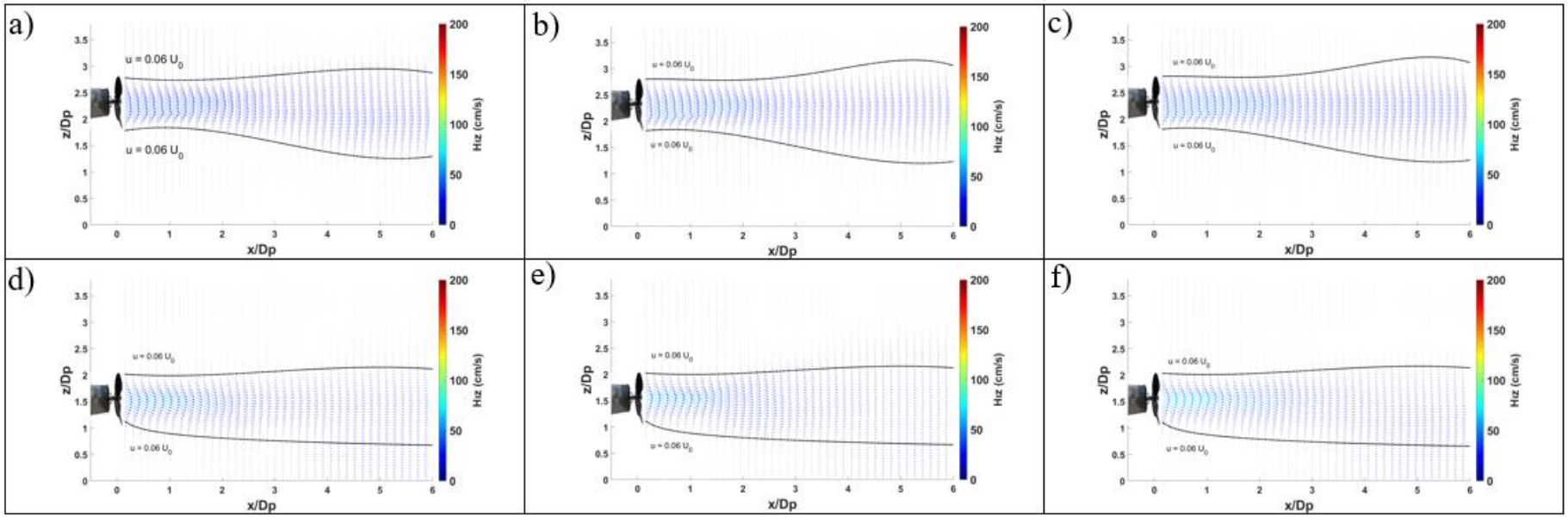
Deney No	Dp (cm)	G (cm)	n (rpm)	Ölçüm Düzlemi	Açıklama	Gözlem Alanı (cm^2)	Uzamsal çözünürlük (cm)
19	6.5	10	590	Boyuna (x-z)	y= 0.9 Dp	60x25	0.248
20	6.5	10	670	Boyuna (x-z)	y= 0.9 Dp	60x25	0.248
21	6.5	10	745	Boyuna (x-z)	y= 0.9 Dp	60x25	0.248
22	6.5	15	590	Boyuna (x-z)	y= 0.9 Dp	60x25	0.248
23	6.5	15	670	Boyuna (x-z)	y= 0.9 Dp	60x25	0.248
24	6.5	15	745	Boyuna (x-z)	y= 0.9 Dp	60x25	0.248
25	6.5	10	590	Boyuna (x-z)	y= 0.6 Dp	60x25	0.248
26	6.5	10	670	Boyuna (x-z)	y= 0.6 Dp	60x25	0.248
27	6.5	10	745	Boyuna (x-z)	y= 0.6 Dp	60x25	0.248
28	6.5	15	590	Boyuna (x-z)	y= 0.6 Dp	60x25	0.248
29	6.5	15	670	Boyuna (x-z)	y= 0.6 Dp	60x25	0.248
30	6.5	15	745	Boyuna (x-z)	y= 0.6 Dp	60x25	0.248
31	6.5	10	590	Boyuna (x-z)	y= 0.3 Dp	60x25	0.248
32	6.5	10	670	Boyuna (x-z)	y= 0.3 Dp	60x25	0.248
33	6.5	10	745	Boyuna (x-z)	y= 0.3 Dp	60x25	0.248
34	6.5	15	590	Boyuna (x-z)	y= 0.3 Dp	60x25	0.248
35	6.5	15	670	Boyuna (x-z)	y= 0.3 Dp	60x25	0.248
36	6.5	15	745	Boyuna (x-z)	y= 0.3 Dp	60x25	0.248
37	6.5	10	590	Boyuna (x-z)	y= -0.3 Dp	60x25	0.248
38	6.5	10	670	Boyuna (x-z)	y= -0.3 Dp	60x25	0.248
39	6.5	10	745	Boyuna (x-z)	y= -0.3 Dp	60x25	0.248
40	6.5	15	590	Boyuna (x-z)	y= -0.3 Dp	60x25	0.248
41	6.5	15	670	Boyuna (x-z)	y= -0.3 Dp	60x25	0.248
42	6.5	15	745	Boyuna (x-z)	y= -0.3 Dp	60x25	0.248
43	6.5	10	590	Boyuna (x-z)	y= -0.6 Dp	60x25	0.248
44	6.5	10	670	Boyuna (x-z)	y= -0.6 Dp	60x25	0.248
45	6.5	10	745	Boyuna (x-z)	y= -0.6 Dp	60x25	0.248
46	6.5	15	590	Boyuna (x-z)	y= -0.6 Dp	60x25	0.248
47	6.5	15	670	Boyuna (x-z)	y= -0.6 Dp	60x25	0.248
48	6.5	15	745	Boyuna (x-z)	y= -0.6 Dp	60x25	0.248
49	6.5	10	590	Boyuna (x-z)	y= -0.9 Dp	60x25	0.248
50	6.5	10	670	Boyuna (x-z)	y= -0.9 Dp	60x25	0.248
51	6.5	10	745	Boyuna (x-z)	y= -0.9 Dp	60x25	0.248
52	6.5	15	590	Boyuna (x-z)	y= -0.9 Dp	60x25	0.248
53	6.5	15	670	Boyuna (x-z)	y= -0.9 Dp	60x25	0.248
54	6.5	15	745	Boyuna (x-z)	y= -0.9 Dp	60x25	0.248



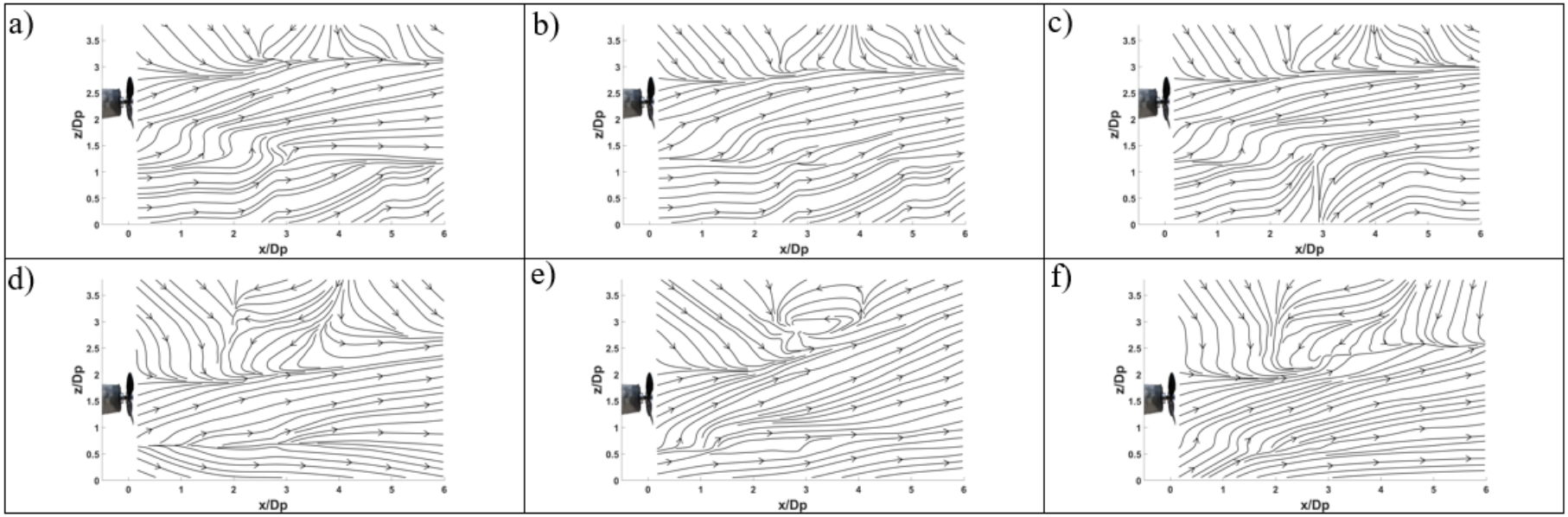
Şekil 4.9 y/D_p=0.9, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



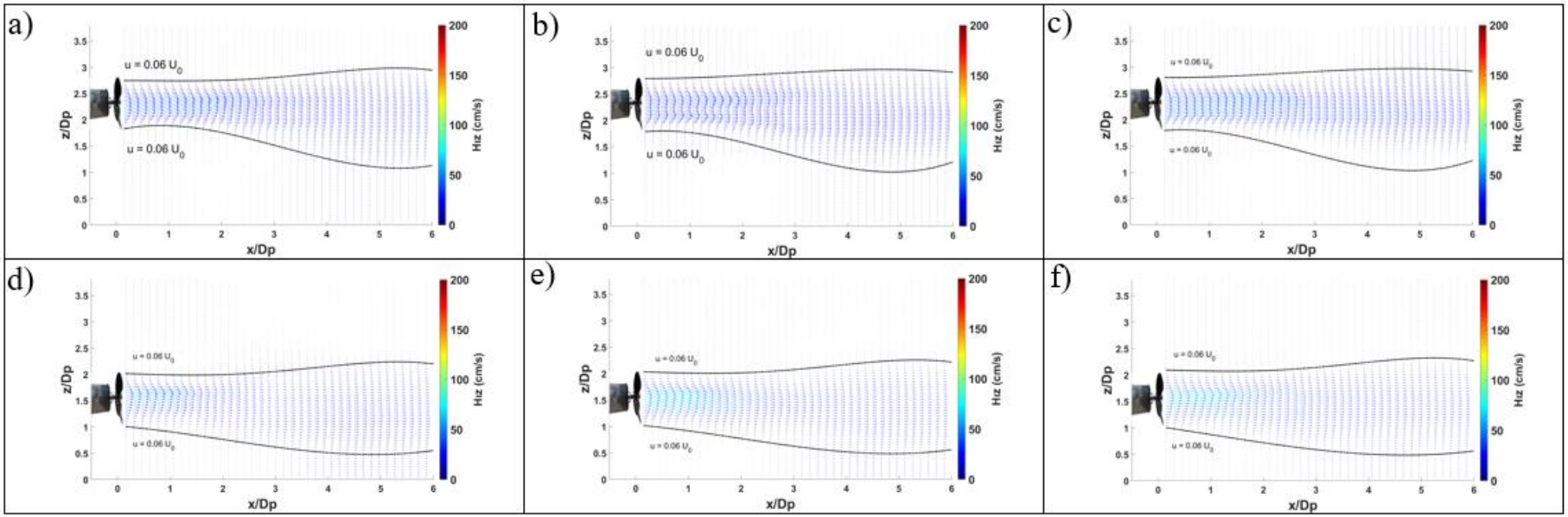
Şekil 4.10 y/D_p=0.9, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



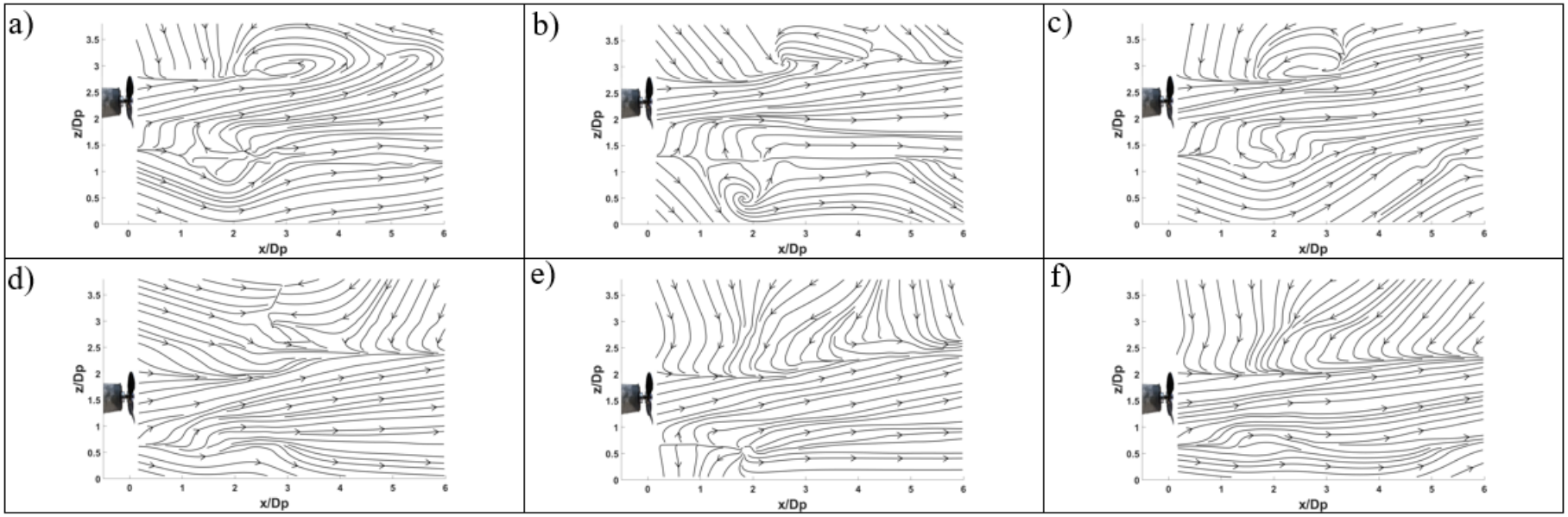
Şekil 4.11 y/D_p=0.6, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



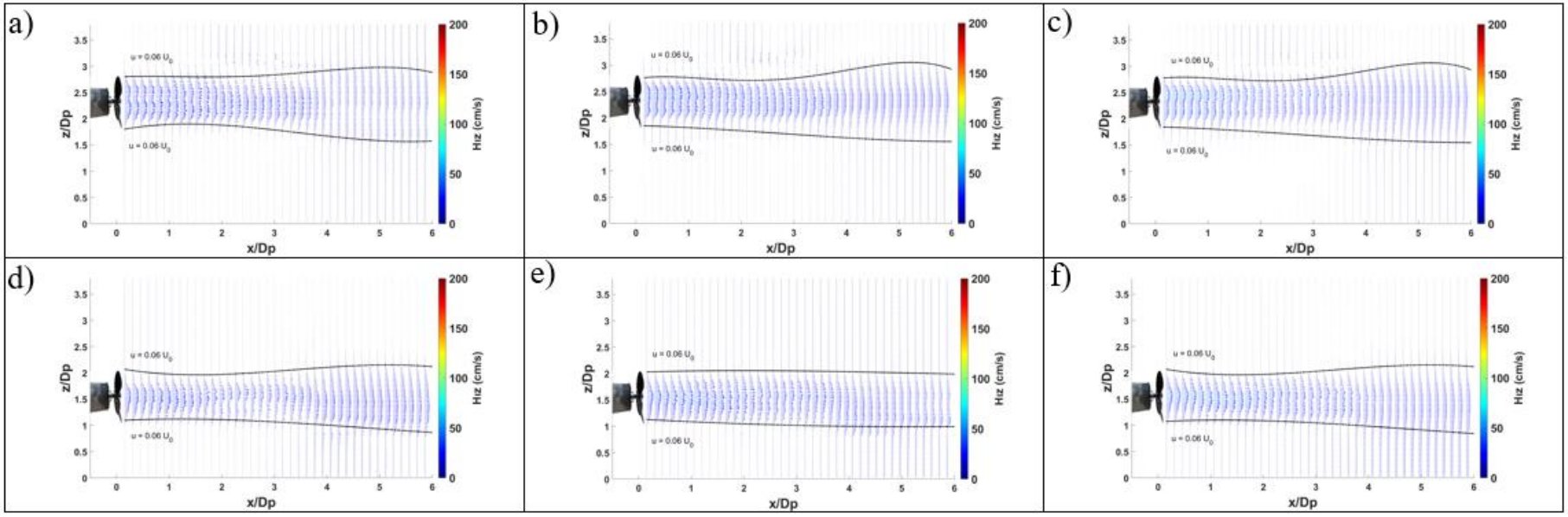
Şekil 4.12 y/D_p=0.6, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



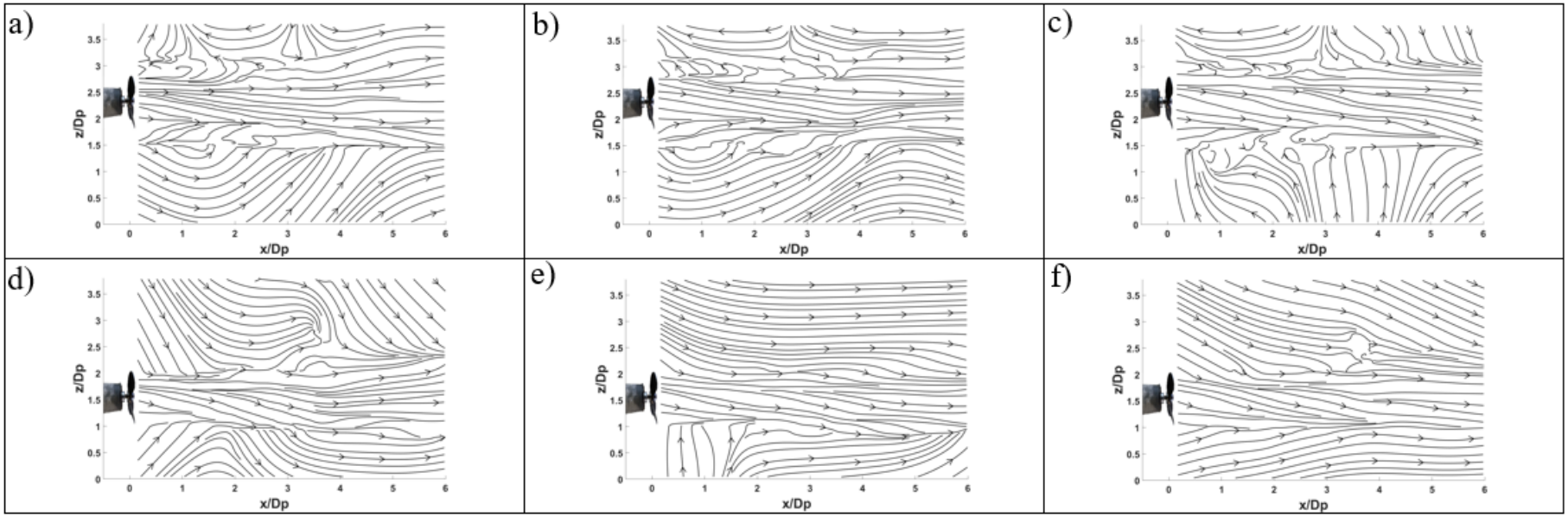
Şekil 4.13 y/D_p=0.3, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



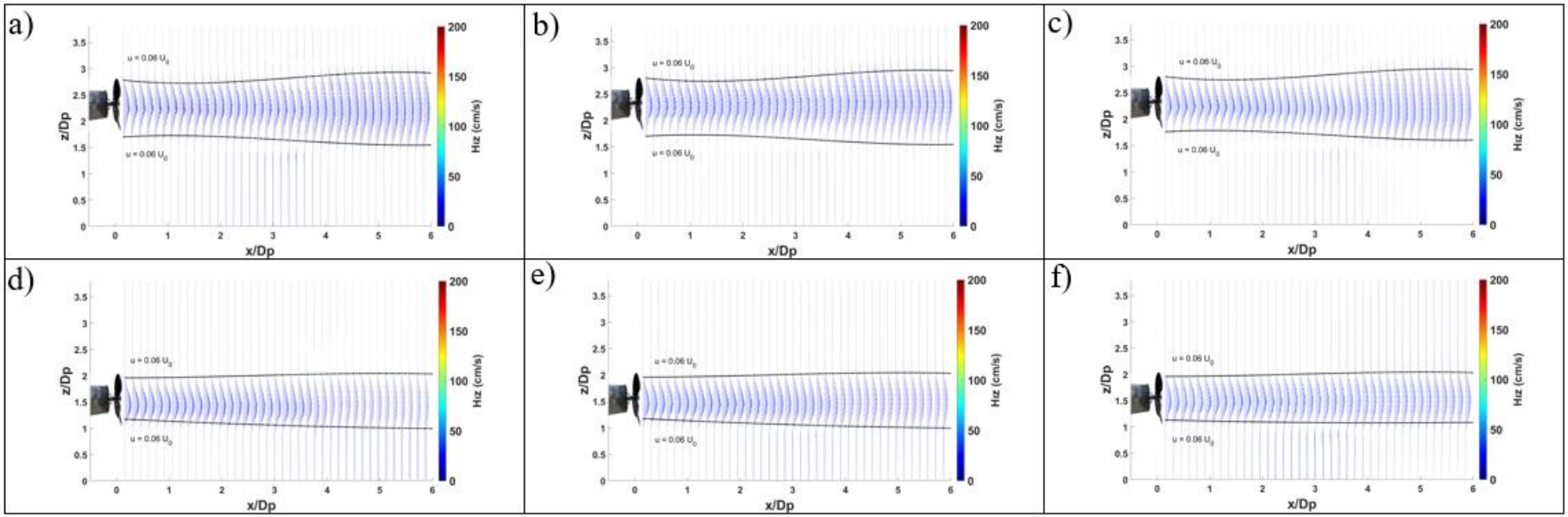
Şekil 4.14 y/D_p=0.3, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



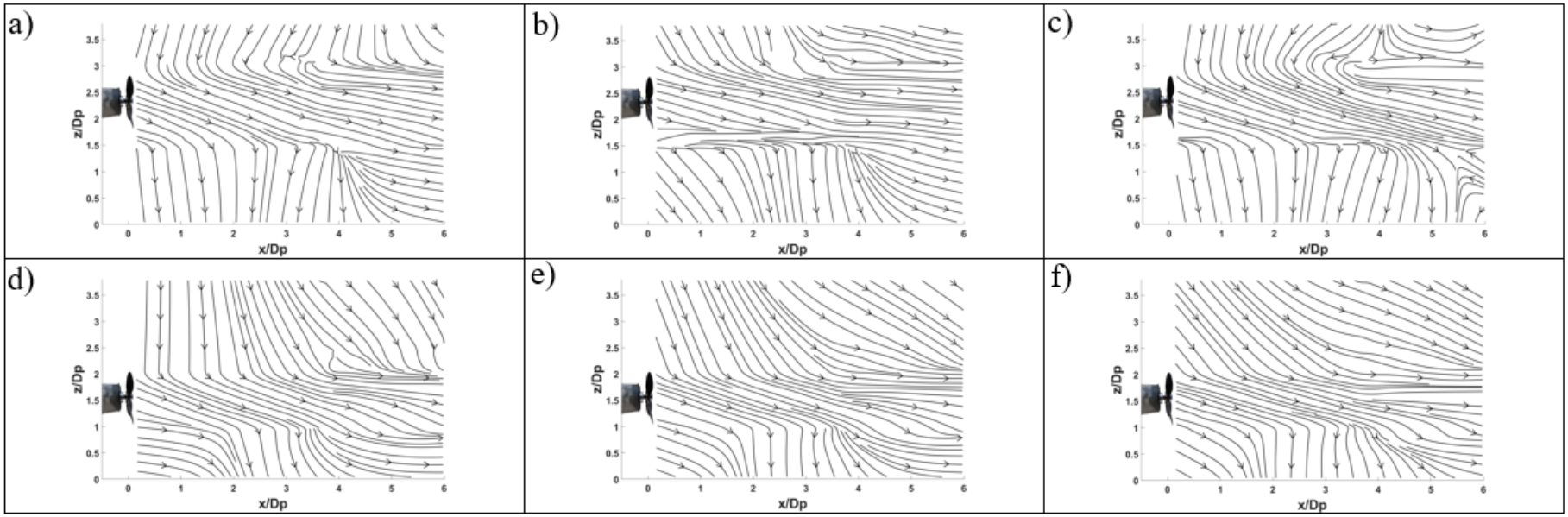
Şekil 4.15 y/D_p=-0.3, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



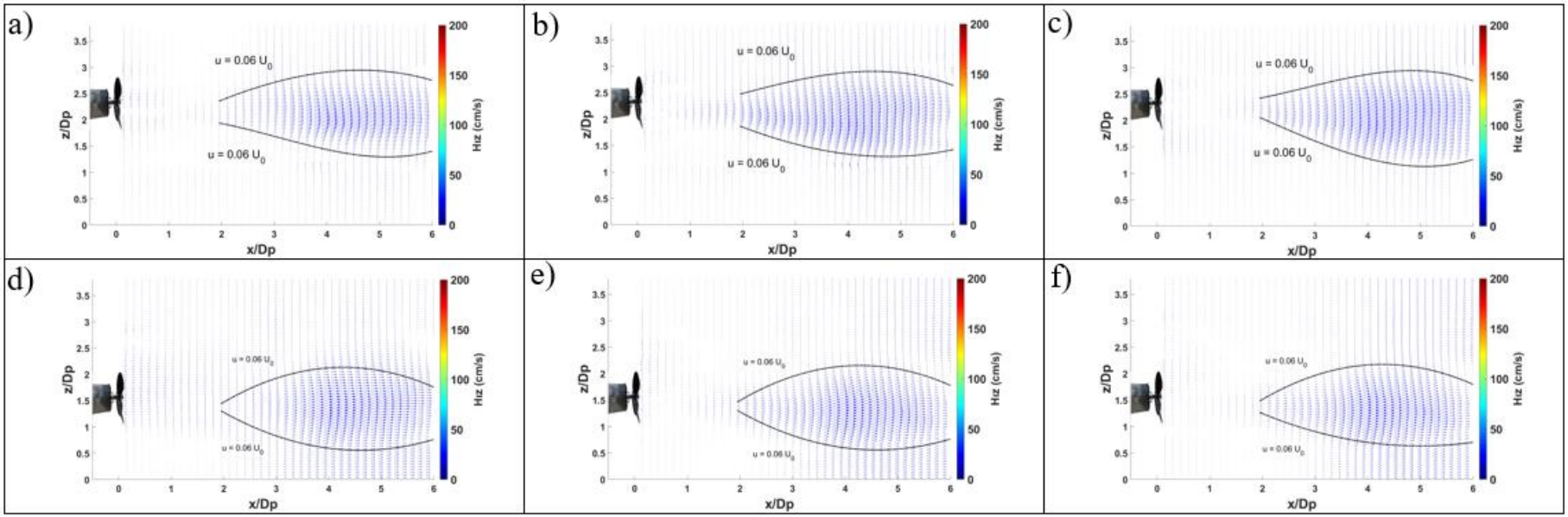
Şekil 4.16 y/D_p=-0.3, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



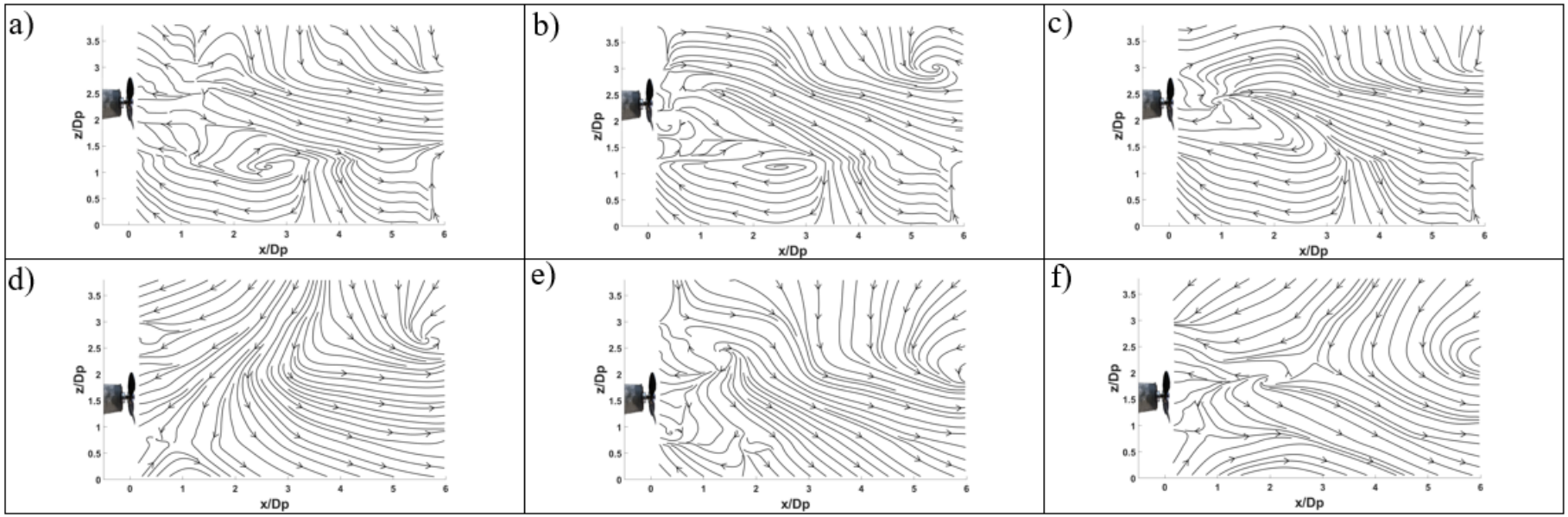
Şekil 4.17 y/D_p=-0.6, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



Şekil 4.18 y/D_p=-0.6, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm

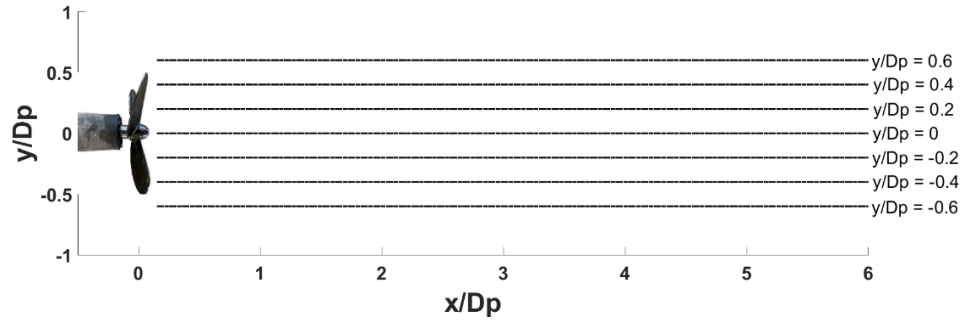


Şekil 4.19 y/D_p=-0.9, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



Şekil 4.20 y/D_p=-0.9, D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm

D = 10 cm çapındaki pervane için gerçekleştirilen ölçümlerin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla Şekil 4.21'de şematik bir gösterim sunulmuştur. Bu pervane çapına ait ortalama hız vektörü dağılımları sırasıyla Şekil 4.22, Şekil 4.24, Şekil 4.26, Şekil 4.28, Şekil 4.30 ve Şekil 4.32'de; ortalama akım çizgisi görselleştirmeleri ise Şekil 4.23, Şekil 4.25, Şekil 4.27, Şekil 4.29, Şekil 4.31 ve Şekil 4.33'te sunulmuştur. Her bir grafik, farklı açıklık yüksekliği ve pervane dönüş hızlarına karşılık gelen akım yapısını detaylı şekilde ortaya koymaktadır.



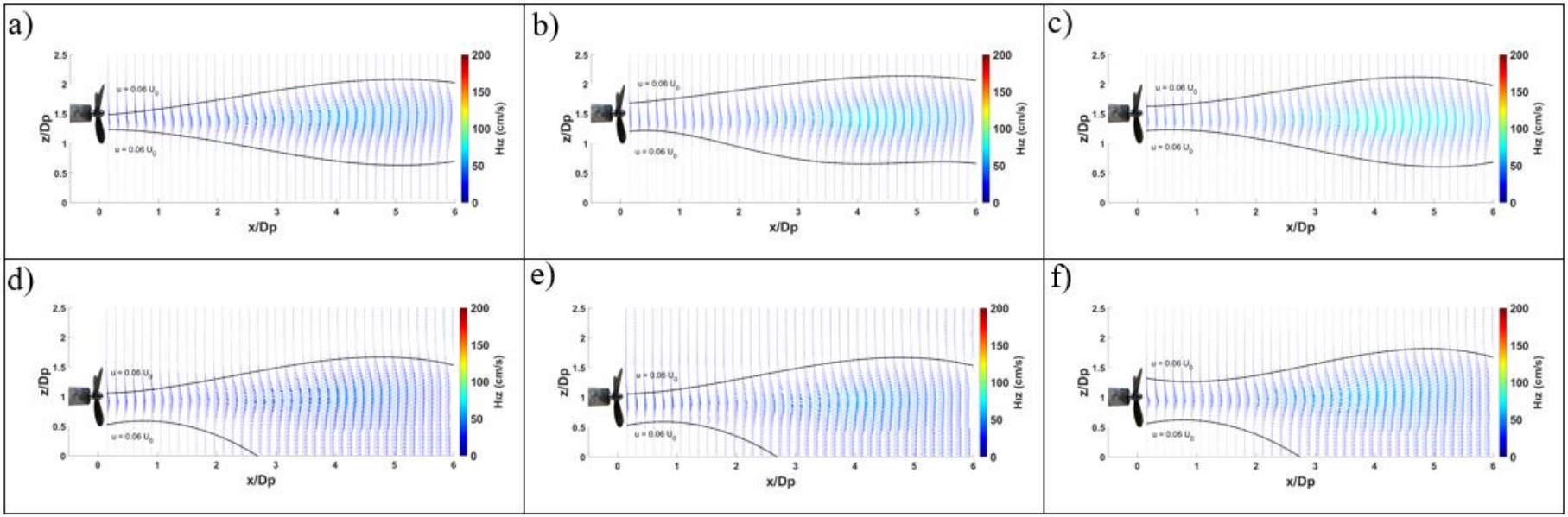
Şekil 4.21 D=10 cm çaplı pervane için ölçüm yapılan eksenlerin plan görünümü

Tablo 4.5 D=10 cm çaplı pervane ekseni dışındaki düzlemlerde gerçekleştirilen deney koşulları

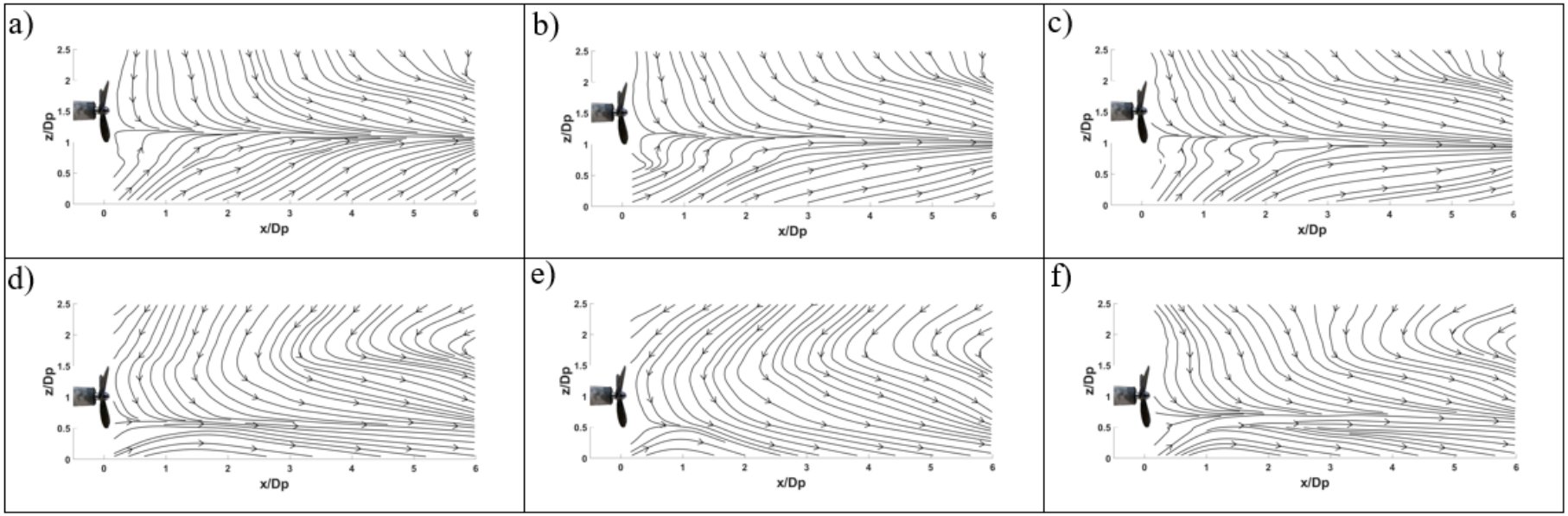
Deney No	Dp (cm)	G (cm)	n (rpm)	Ölçüm Düzlemi	Açıklama	Gözlem Alanı (cm^2)	Uzamsal çözünürlük (cm)
55	10	10	590	Boyuna (x-z)	y= 0.6 Dp	60x25	0.248
56	10	10	670	Boyuna (x-z)	y= 0.6 Dp	60x25	0.248
57	10	10	745	Boyuna (x-z)	y= 0.6 Dp	60x25	0.248
58	10	15	590	Boyuna (x-z)	y= 0.6 Dp	60x25	0.248
59	10	15	670	Boyuna (x-z)	y= 0.6 Dp	60x25	0.248
60	10	15	745	Boyuna (x-z)	y= 0.6 Dp	60x25	0.248
61	10	10	590	Boyuna (x-z)	y= 0.4 Dp	60x25	0.248
62	10	10	670	Boyuna (x-z)	y= 0.4 Dp	60x25	0.248
63	10	10	745	Boyuna (x-z)	y= 0.4 Dp	60x25	0.248
64	10	15	590	Boyuna (x-z)	y= 0.4 Dp	60x25	0.248
65	10	15	670	Boyuna (x-z)	y= 0.4 Dp	60x25	0.248
66	10	15	745	Boyuna (x-z)	y= 0.4 Dp	60x25	0.248
67	10	10	590	Boyuna (x-z)	y= 0.2 Dp	60x25	0.248
68	10	10	670	Boyuna (x-z)	y= 0.2 Dp	60x25	0.248
69	10	10	745	Boyuna (x-z)	y= 0.2 Dp	60x25	0.248
70	10	15	590	Boyuna (x-z)	y= 0.2 Dp	60x25	0.248
71	10	15	670	Boyuna (x-z)	y= 0.2 Dp	60x25	0.248
72	10	15	745	Boyuna (x-z)	y= 0.2 Dp	60x25	0.248
73	10	10	590	Boyuna (x-z)	y= -0.2 Dp	60x25	0.248
74	10	10	670	Boyuna (x-z)	y= -0.2 Dp	60x25	0.248
75	10	10	745	Boyuna (x-z)	y= -0.2 Dp	60x25	0.248
76	10	15	590	Boyuna (x-z)	y= -0.2 Dp	60x25	0.248
77	10	15	670	Boyuna (x-z)	y= -0.2 Dp	60x25	0.248
78	10	15	745	Boyuna (x-z)	y= -0.2 Dp	60x25	0.248

Tablo 4.5 D=10 cm çaplı pervane ekseni dışındaki düzlemlerde gerçekleştirilen deney koşulları (devamı)

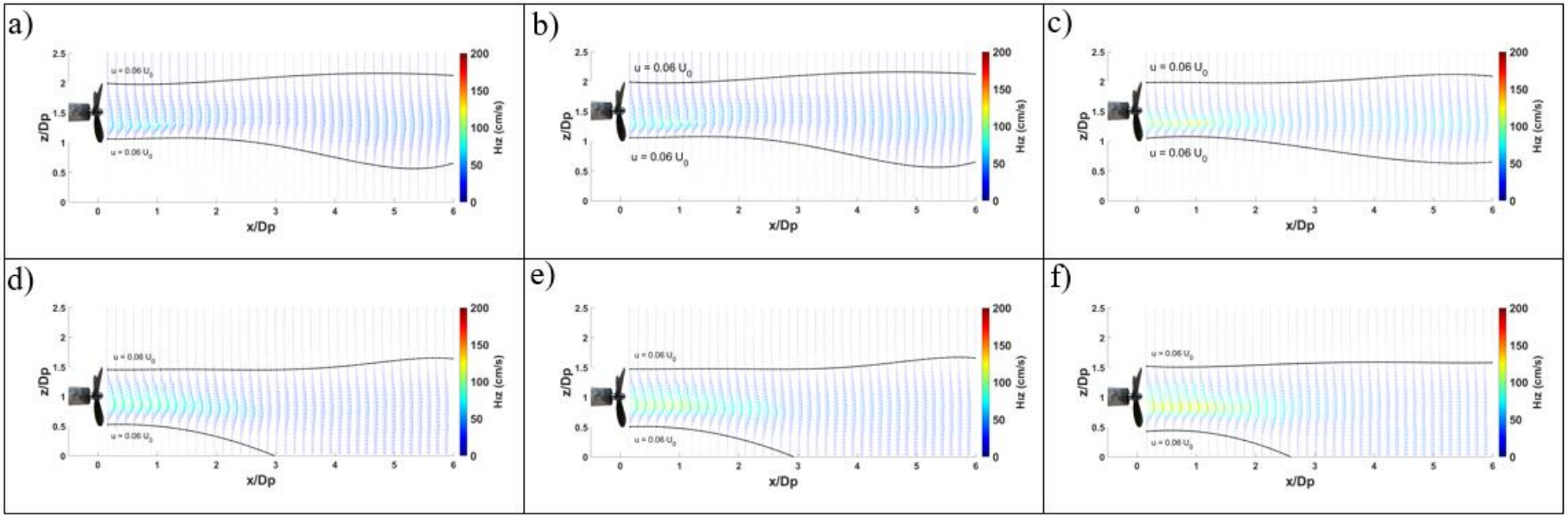
79	10	10	590	Boyuna (x-z)	y= -0.4 Dp	60x25	0.248
80	10	10	670	Boyuna (x-z)	y= -0.4 Dp	60x25	0.248
81	10	10	745	Boyuna (x-z)	y= -0.4 Dp	60x25	0.248
82	10	15	590	Boyuna (x-z)	y= -0.4 Dp	60x25	0.248
83	10	15	670	Boyuna (x-z)	y= -0.4 Dp	60x25	0.248
84	10	15	745	Boyuna (x-z)	y= -0.4 Dp	60x25	0.248
85	10	10	590	Boyuna (x-z)	y= -0.6 Dp	60x25	0.248
86	10	10	670	Boyuna (x-z)	y= -0.6 Dp	60x25	0.248
87	10	10	745	Boyuna (x-z)	y= -0.6 Dp	60x25	0.248
88	10	15	590	Boyuna (x-z)	y= -0.6 Dp	60x25	0.248
89	10	15	670	Boyuna (x-z)	y= -0.6 Dp	60x25	0.248
90	10	15	745	Boyuna (x-z)	y= -0.6 Dp	60x25	0.248



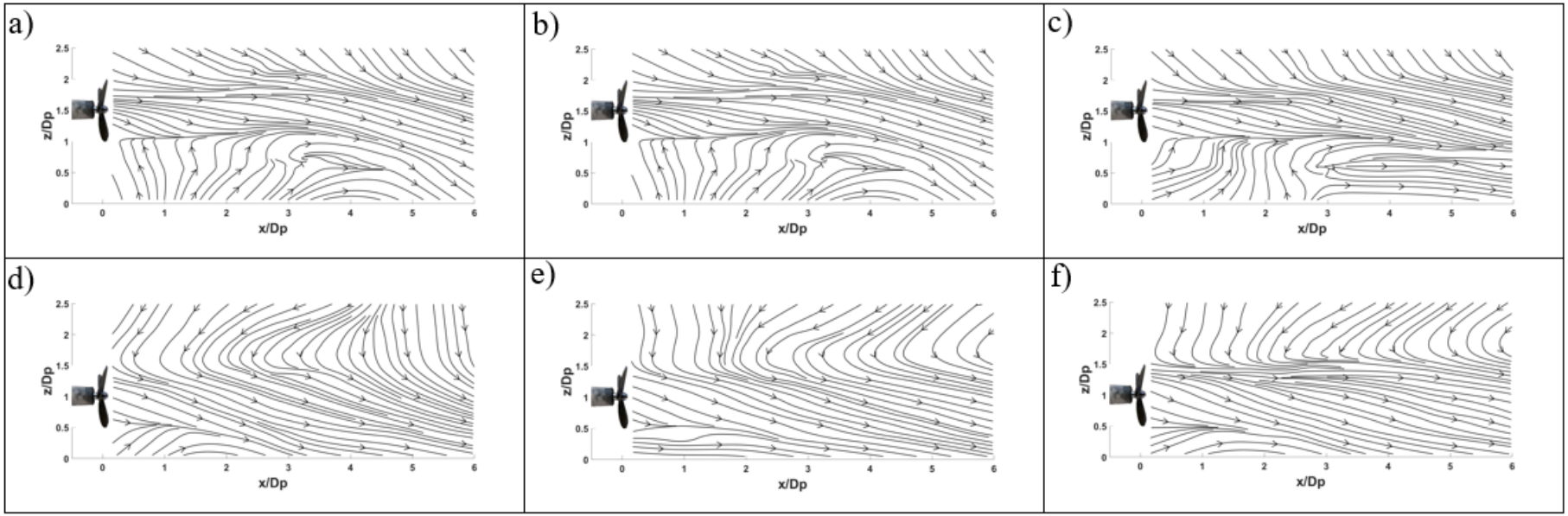
Şekil 4.22 y/D_p=0.6, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



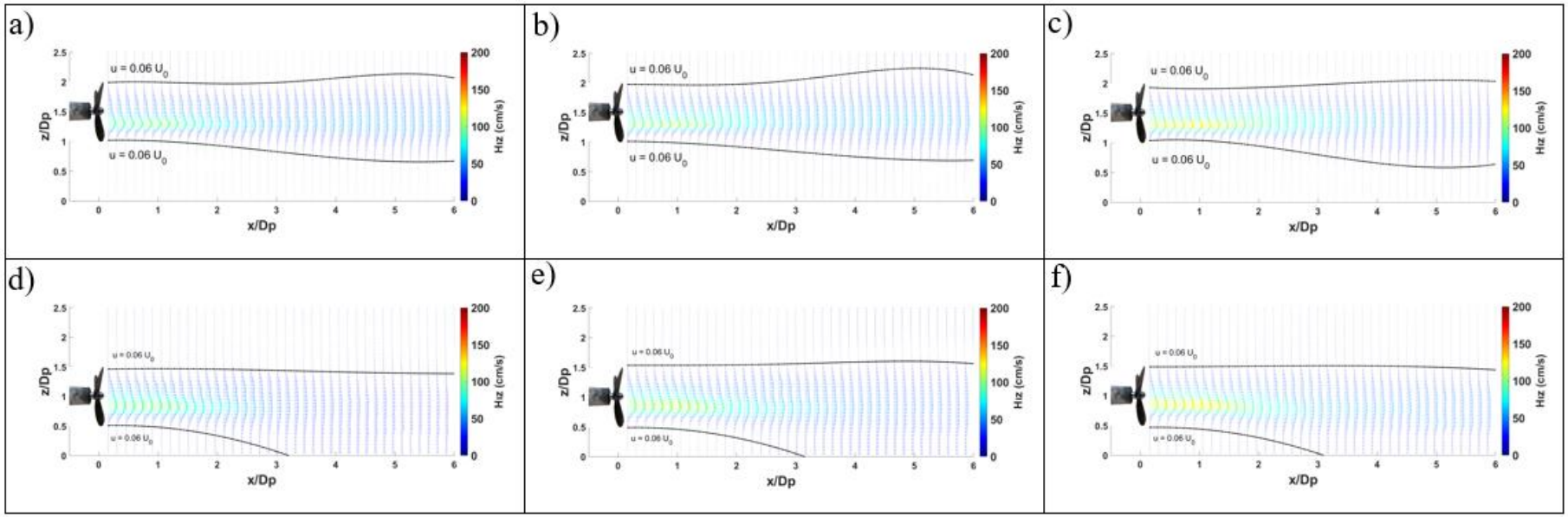
Şekil 4.23 y/D_p=0.6, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



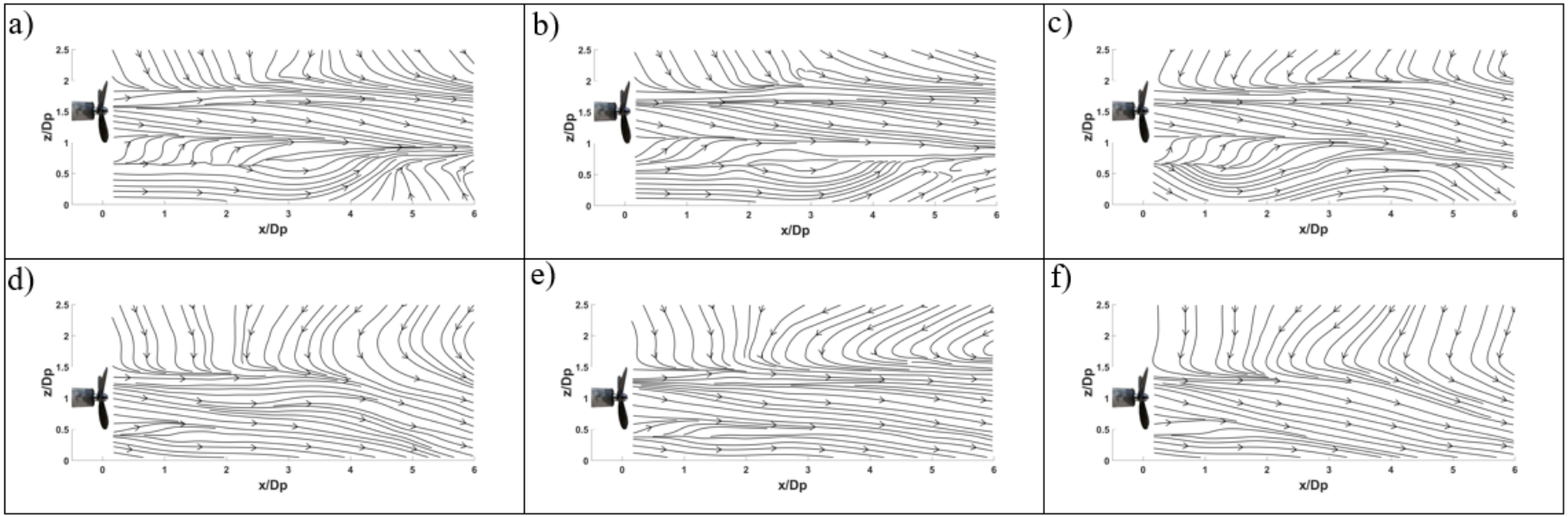
Şekil 4.24 y/D_p=0.4, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



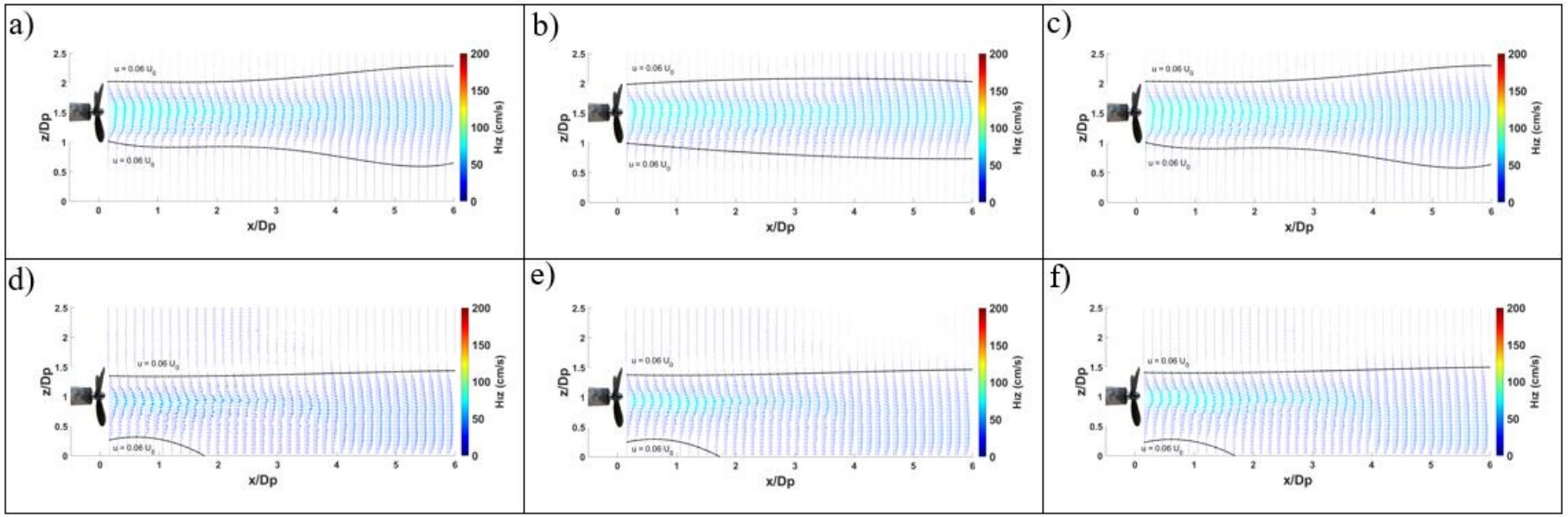
Şekil 4.25 y/D_p=0.4, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



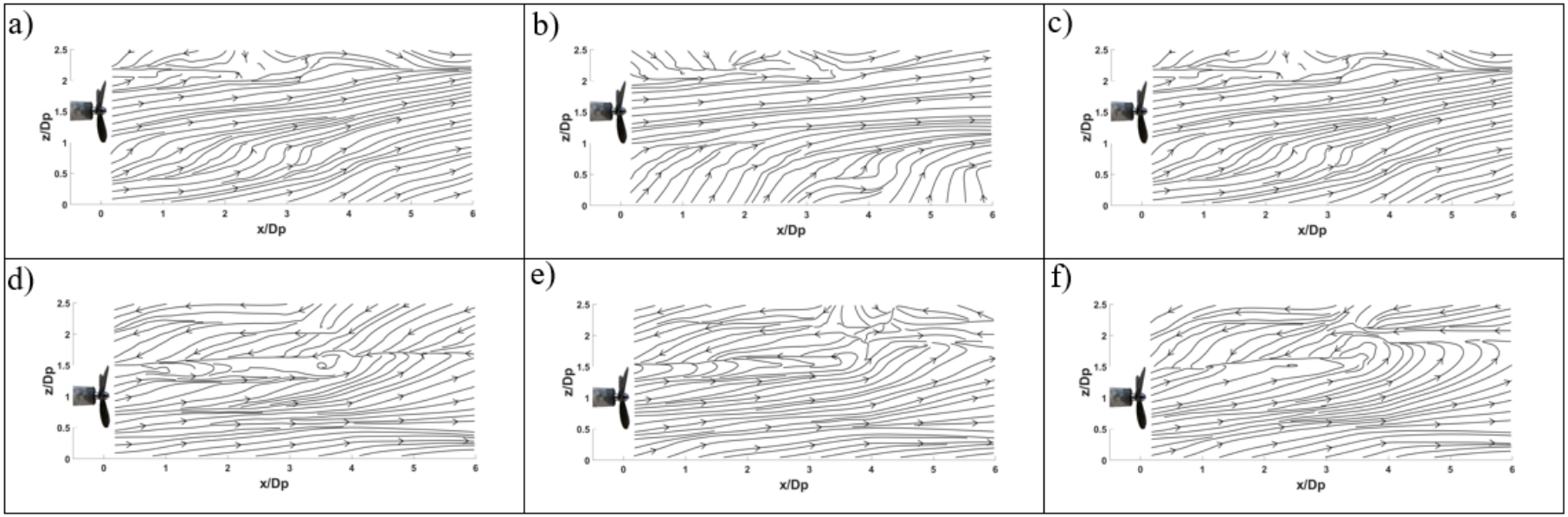
Şekil 4.26 y/D_p=0.2, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



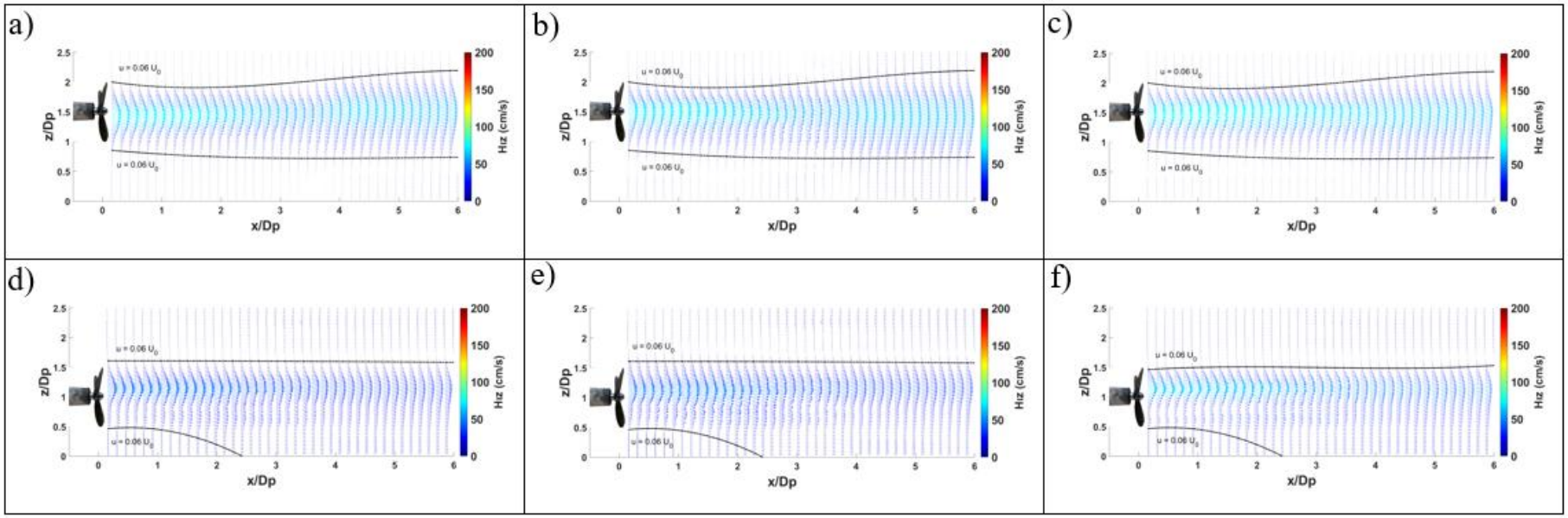
Şekil 4.27 y/D_p=0.2, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



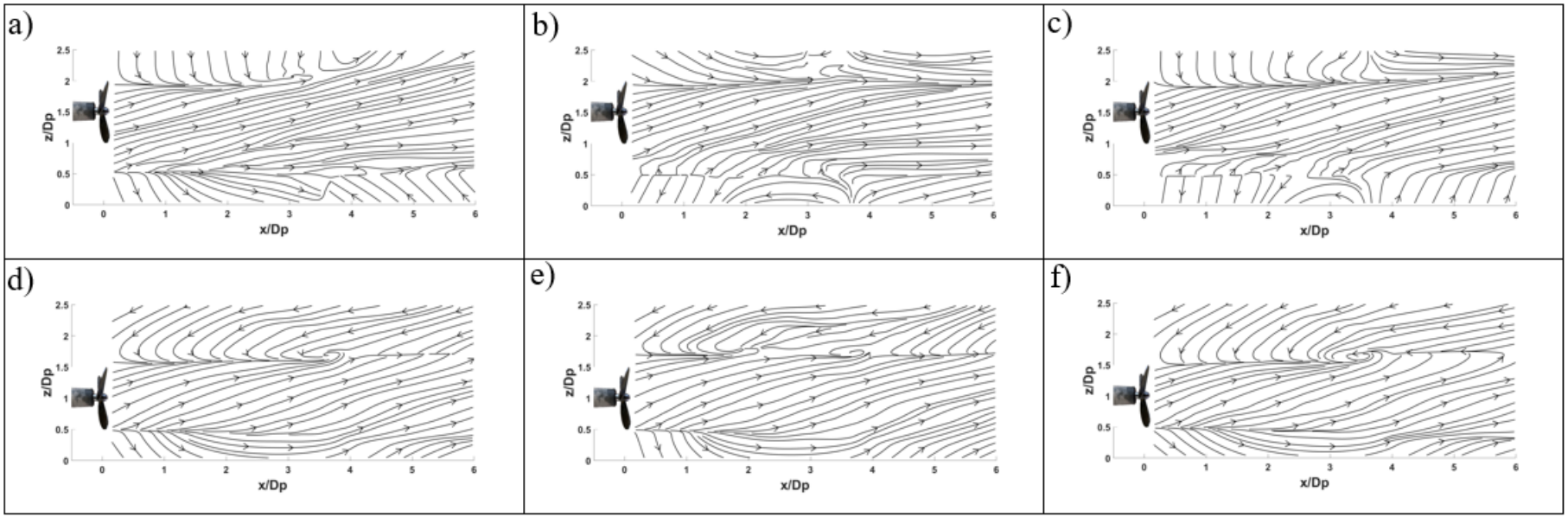
Şekil 4.28 y/D_p=-0.2, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



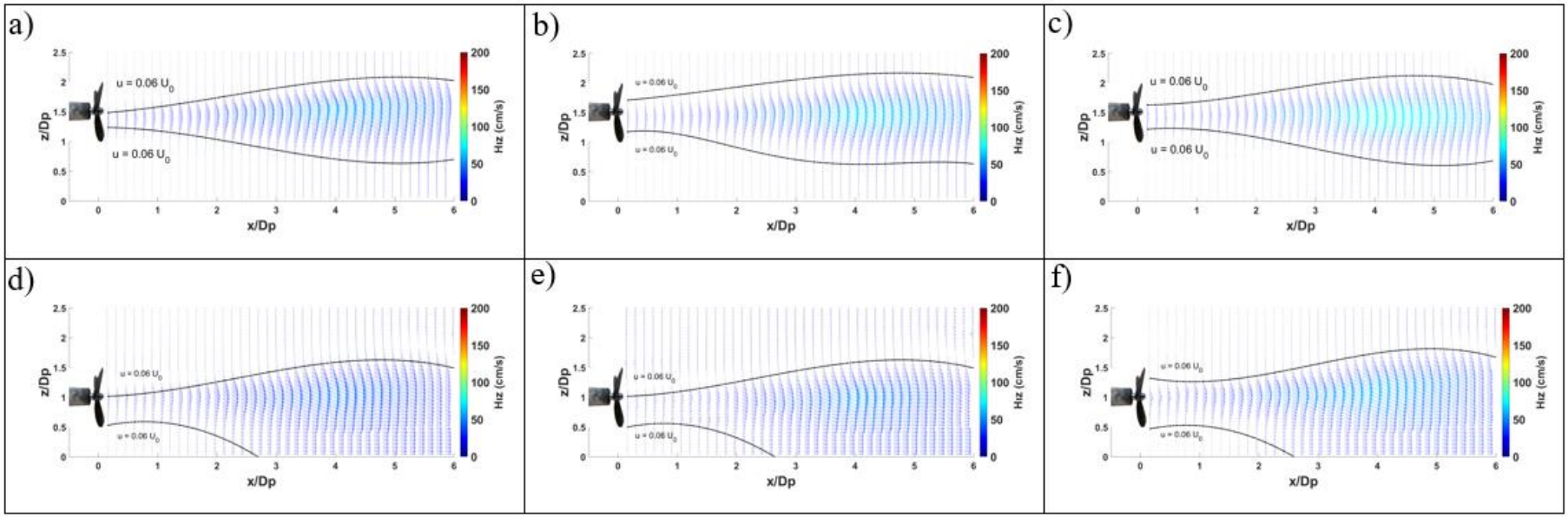
Şekil 4.29 y/D_p=-0.2, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



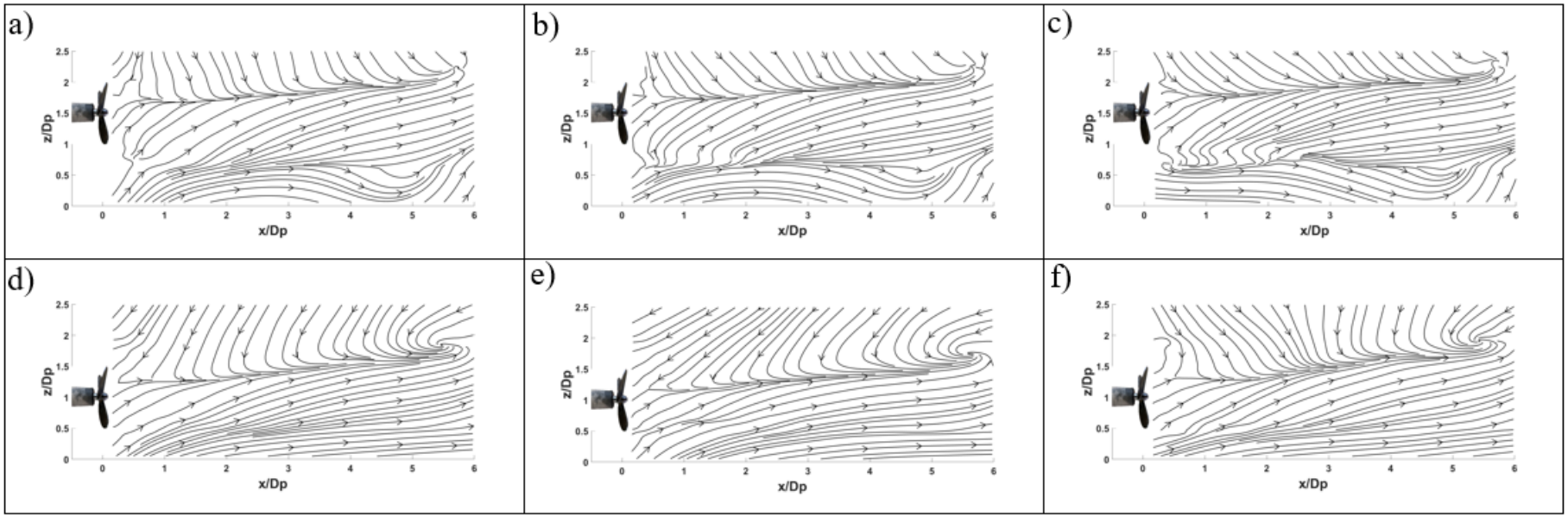
Şekil 4.30 y/D_p=-0.4, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



Şekil 4.31 y/D_p=-0.4, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm

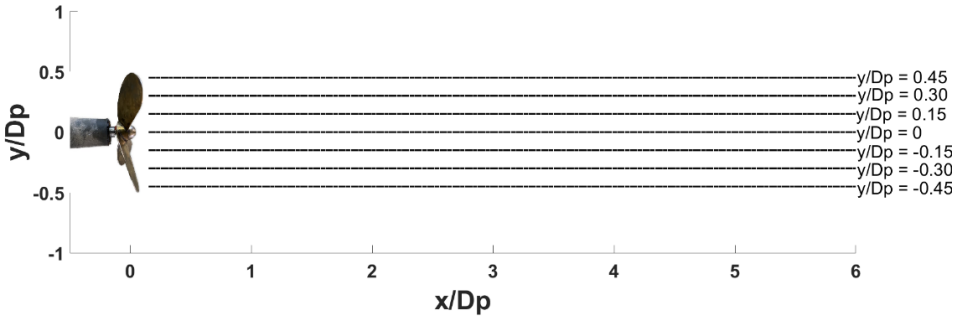


Şekil 4.32 y/D_p=-0.6, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



Şekil 4.33 y/D_p=-0.6, D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm

D = 13 cm çapındaki pervane için gerçekleştirilen ölçümlerin yerleşimini ve analiz düzlemlerini açıklamak amacıyla Şekil 4.34'te şematik bir gösterim sunulmuştur. Bu pervane çapına ait ortalama hız vektörü dağılımları Şekil 4.35, Şekil 4.37, Şekil 4.39, Şekil 4.41, Şekil 4.43 ve Şekil 4.45'te; ortalama akım çizgisi görselleştirmeleri ise Şekil 4.36, Şekil 4.38, Şekil 4.40, Şekil 4.42, Şekil 4.44 ve Şekil 4.46'da sunulmuştur. Her bir grafik, açıklık yüksekliği ve pervane dönüş hızının üç boyutlu akım yapısı üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirme imkânı sağlamaktadır.



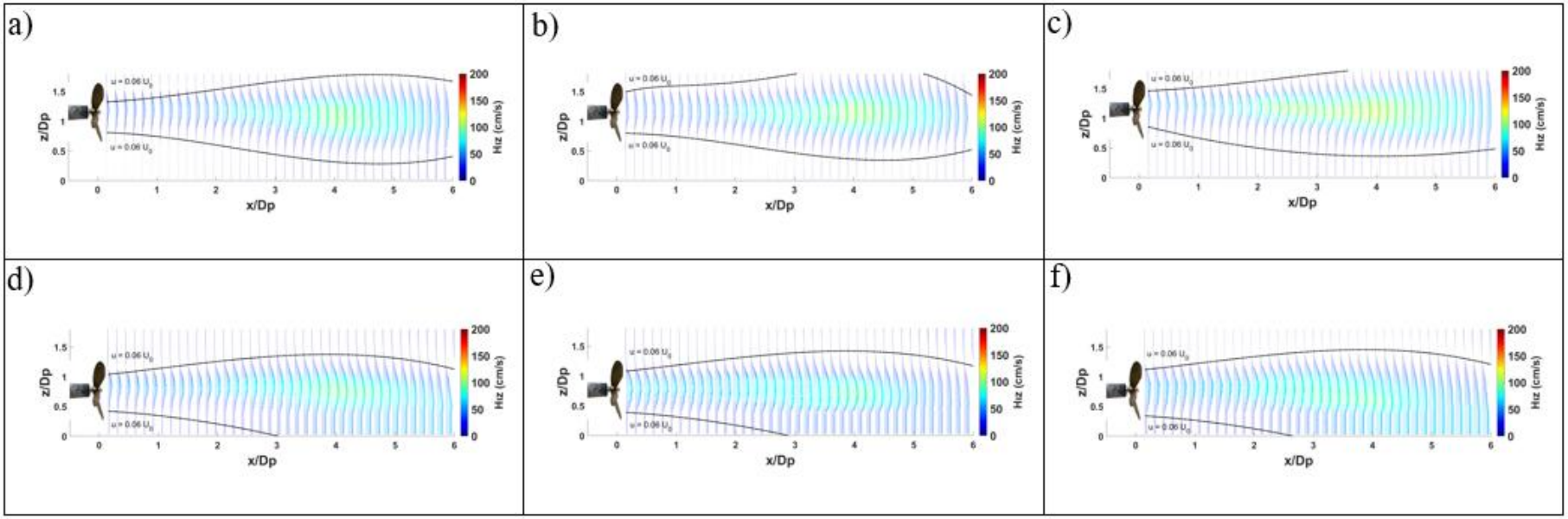
Şekil 4.34 D=13 cm çaplı pervane için ölçüm yapılan eksenlerin plan görünümü

Tablo 4.6 D=13 cm çaplı pervane ekseni dışındaki düzlemlerde gerçekleştirilen deney koşulları

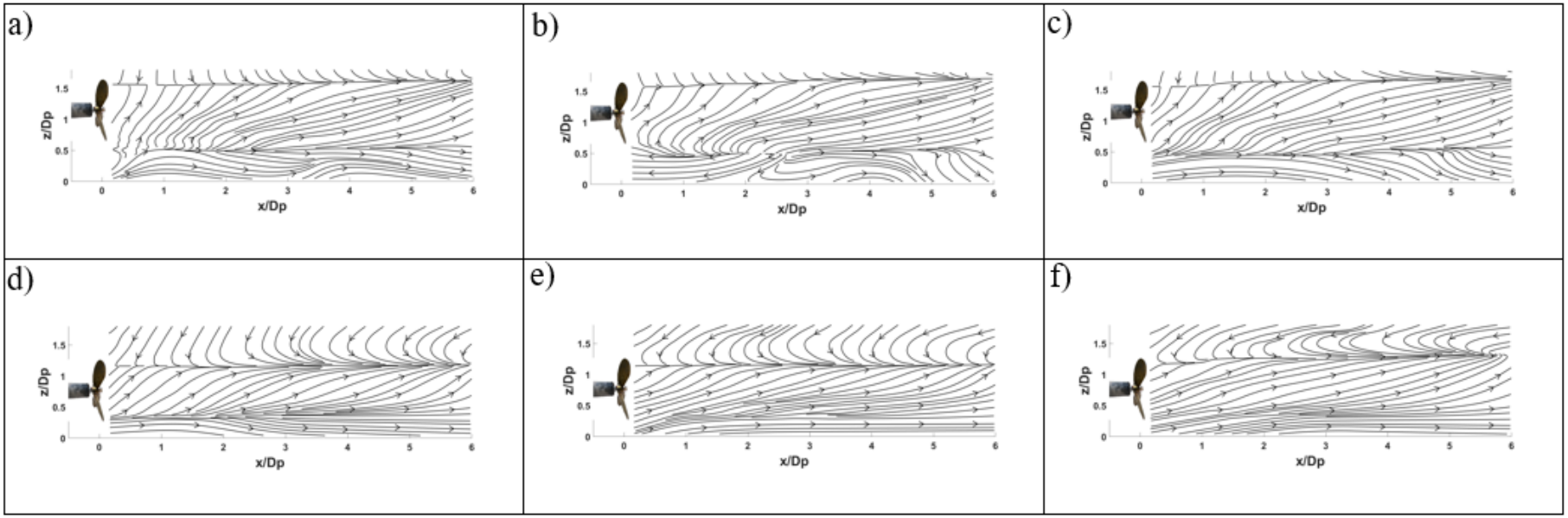
Deney No	Dp (cm)	G (cm)	n (rpm)	Ölçüm Düzlemi	Açıklama	Gözlem Alanı (cm^2)	Uzamsal çözünürlük (cm)
91	13	10	590	Boyuna (x-z)	y= 0.45 Dp	60x25	0.248
92	13	10	670	Boyuna (x-z)	y= 0.45 Dp	60x25	0.248
93	13	10	745	Boyuna (x-z)	y= 0.45 Dp	60x25	0.248
94	13	15	590	Boyuna (x-z)	y= 0.45 Dp	60x25	0.248
95	13	15	670	Boyuna (x-z)	y= 0.45 Dp	60x25	0.248
96	13	15	745	Boyuna (x-z)	y= 0.45 Dp	60x25	0.248
97	13	10	590	Boyuna (x-z)	y= 0.3 Dp	60x25	0.248
98	13	10	670	Boyuna (x-z)	y= 0.3 Dp	60x25	0.248
99	13	10	745	Boyuna (x-z)	y= 0.3 Dp	60x25	0.248
100	13	15	590	Boyuna (x-z)	y= 0.3 Dp	60x25	0.248
101	13	15	670	Boyuna (x-z)	y= 0.3 Dp	60x25	0.248
102	13	15	745	Boyuna (x-z)	y= 0.3 Dp	60x25	0.248
103	13	10	590	Boyuna (x-z)	y= 0.15 Dp	60x25	0.248
104	13	10	670	Boyuna (x-z)	y= 0.15 Dp	60x25	0.248
105	13	10	745	Boyuna (x-z)	y= 0.15 Dp	60x25	0.248
106	13	15	590	Boyuna (x-z)	y= 0.15 Dp	60x25	0.248
107	13	15	670	Boyuna (x-z)	y= 0.15 Dp	60x25	0.248
108	13	15	745	Boyuna (x-z)	y= 0.15 Dp	60x25	0.248
109	13	10	590	Boyuna (x-z)	y= -0.15 Dp	60x25	0.248
110	13	10	670	Boyuna (x-z)	y= -0.15 Dp	60x25	0.248
111	13	10	745	Boyuna (x-z)	y= -0.15 Dp	60x25	0.248

Tablo 4.6 D=13 cm çaplı pervane ekseni dışındaki düzlemlerde gerçekleştirilen deney koşulları (devamı)

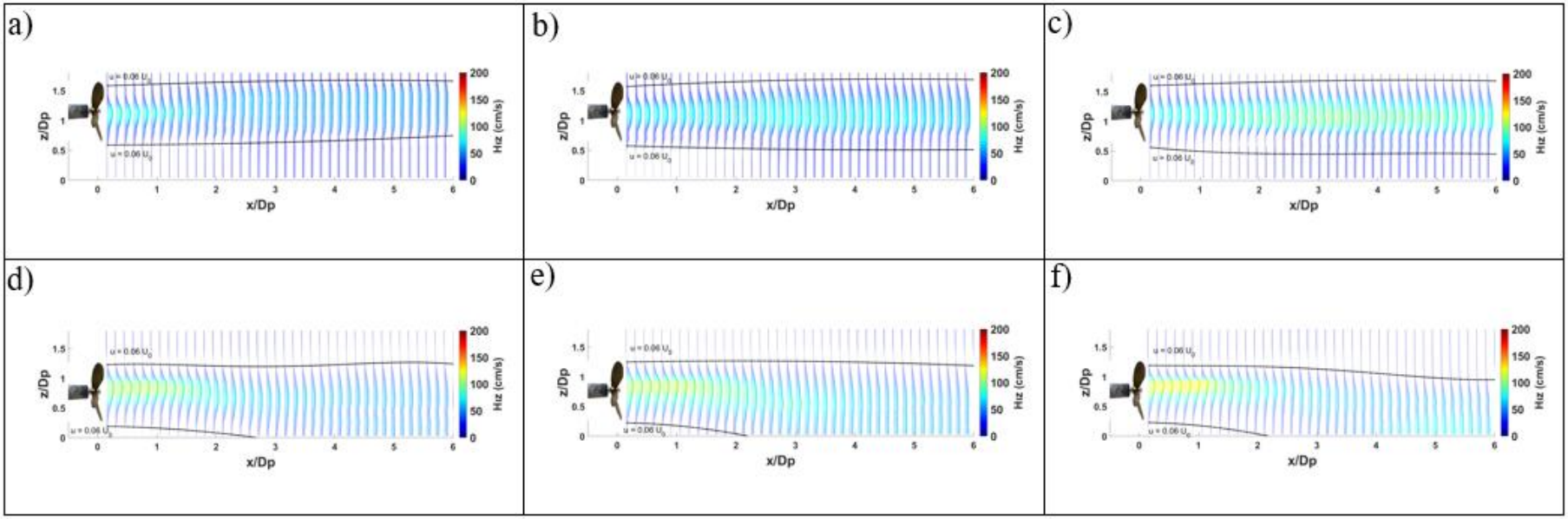
112	13	15	590	Boyuna (x-z)	y= -0.15 Dp	60x25	0.248
113	13	15	670	Boyuna (x-z)	y= -0.15 Dp	60x25	0.248
114	13	15	745	Boyuna (x-z)	y= -0.15 Dp	60x25	0.248
115	13	10	590	Boyuna (x-z)	y= -0.3 Dp	60x25	0.248
116	13	10	670	Boyuna (x-z)	y= -0.3 Dp	60x25	0.248
117	13	10	745	Boyuna (x-z)	y= -0.3 Dp	60x25	0.248
118	13	15	590	Boyuna (x-z)	y= -0.3 Dp	60x25	0.248
119	13	15	670	Boyuna (x-z)	y= -0.3 Dp	60x25	0.248
120	13	15	745	Boyuna (x-z)	y= -0.3 Dp	60x25	0.248
121	13	10	590	Boyuna (x-z)	y= -0.45 Dp	60x25	0.248
122	13	10	670	Boyuna (x-z)	y= -0.45 Dp	60x25	0.248
123	13	10	745	Boyuna (x-z)	y= -0.45 Dp	60x25	0.248
124	13	15	590	Boyuna (x-z)	y= -0.45 Dp	60x25	0.248
125	13	15	670	Boyuna (x-z)	y= -0.45 Dp	60x25	0.248
126	13	15	745	Boyuna (x-z)	y= -0.45 Dp	60x25	0.248



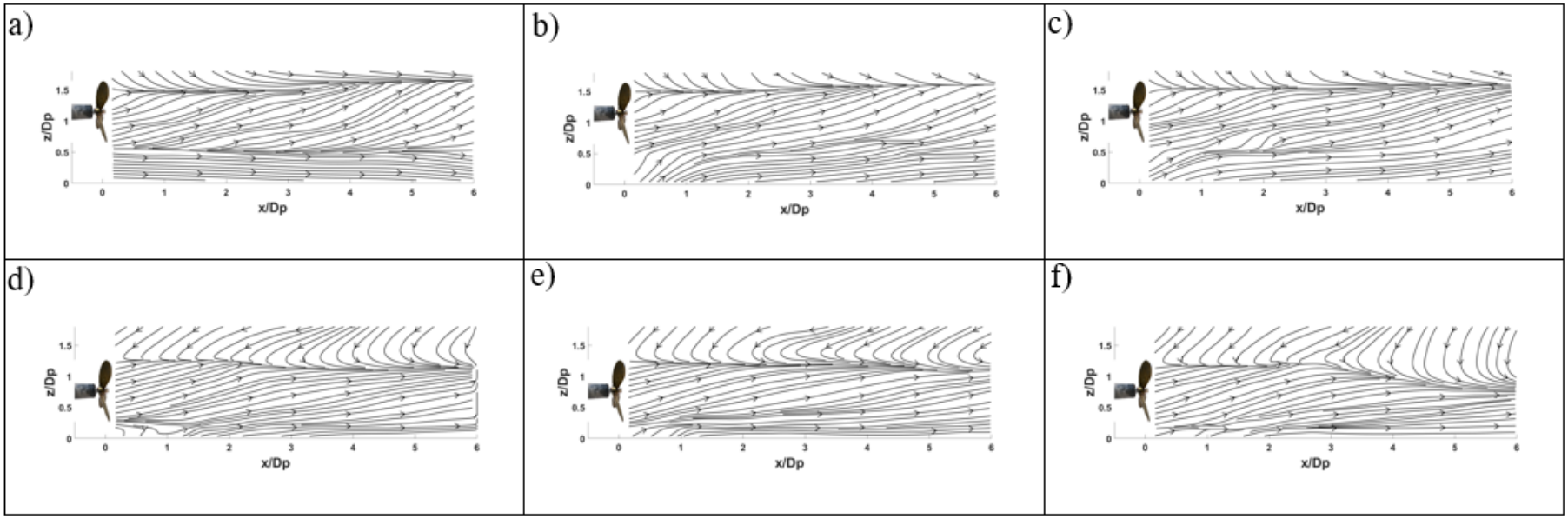
Şekil 4.35 y/D_p=0.45, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



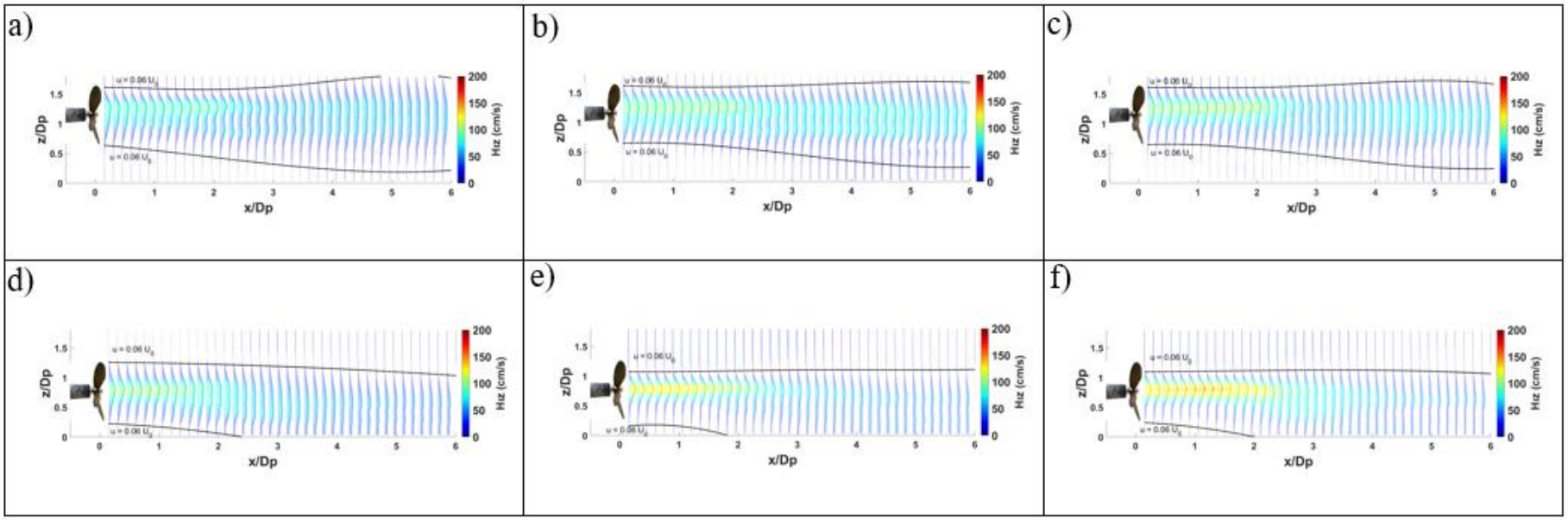
Şekil 4.36 y/D_p=0.45, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



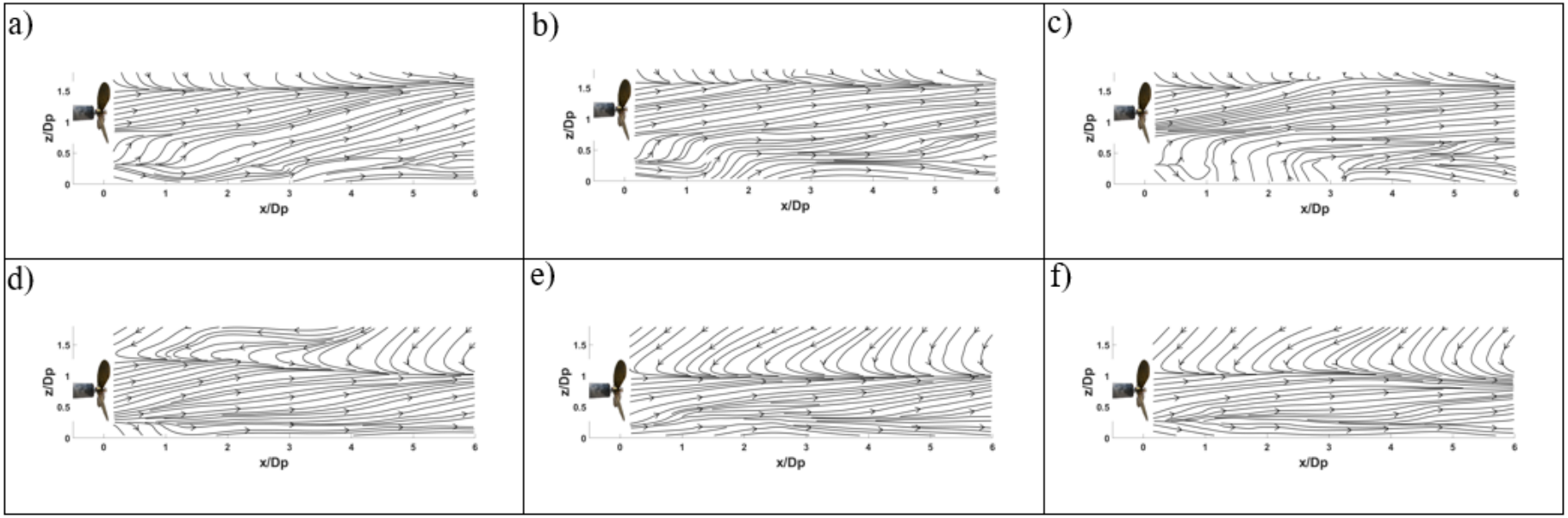
Şekil 4.37 y/D_p=0.3, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



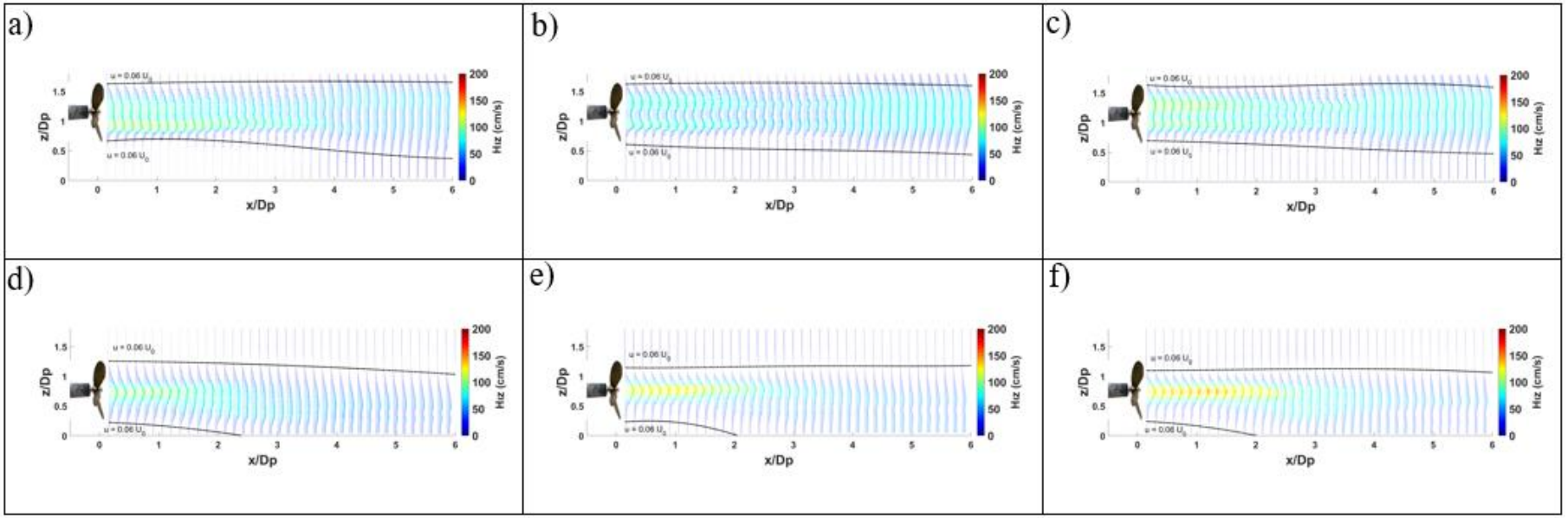
Şekil 4.38 y/D_p=0.3, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



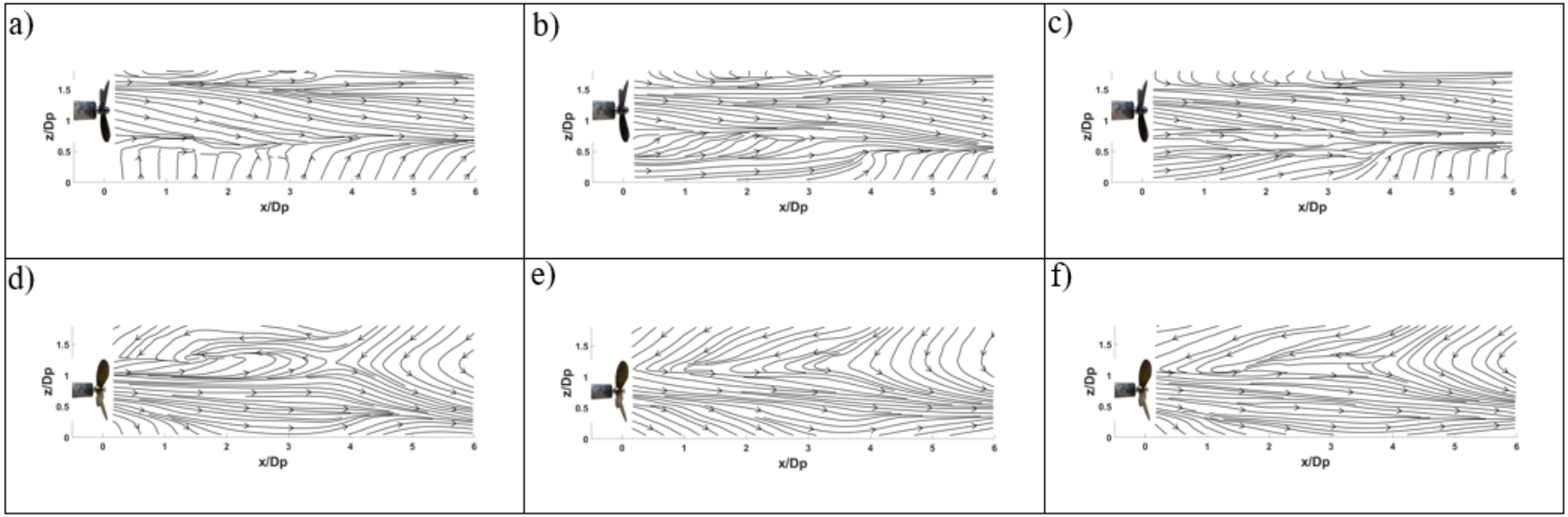
Şekil 4.39 y/D_p=0.15, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



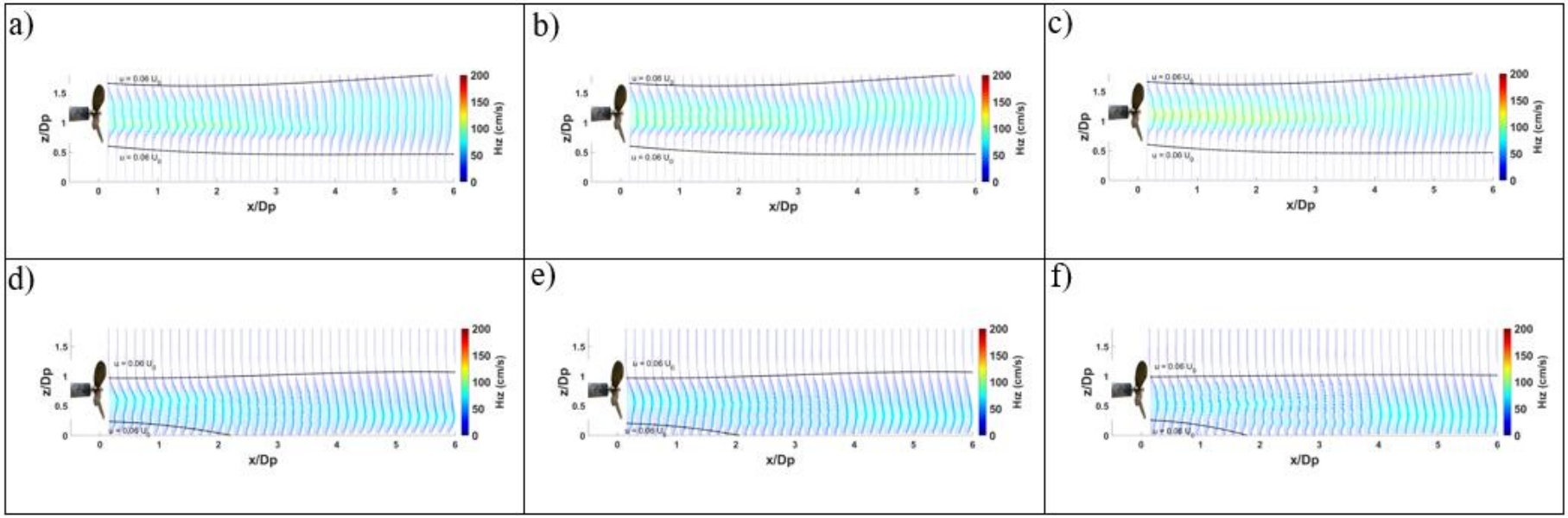
Şekil 4.40 y/D_p=0.15, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



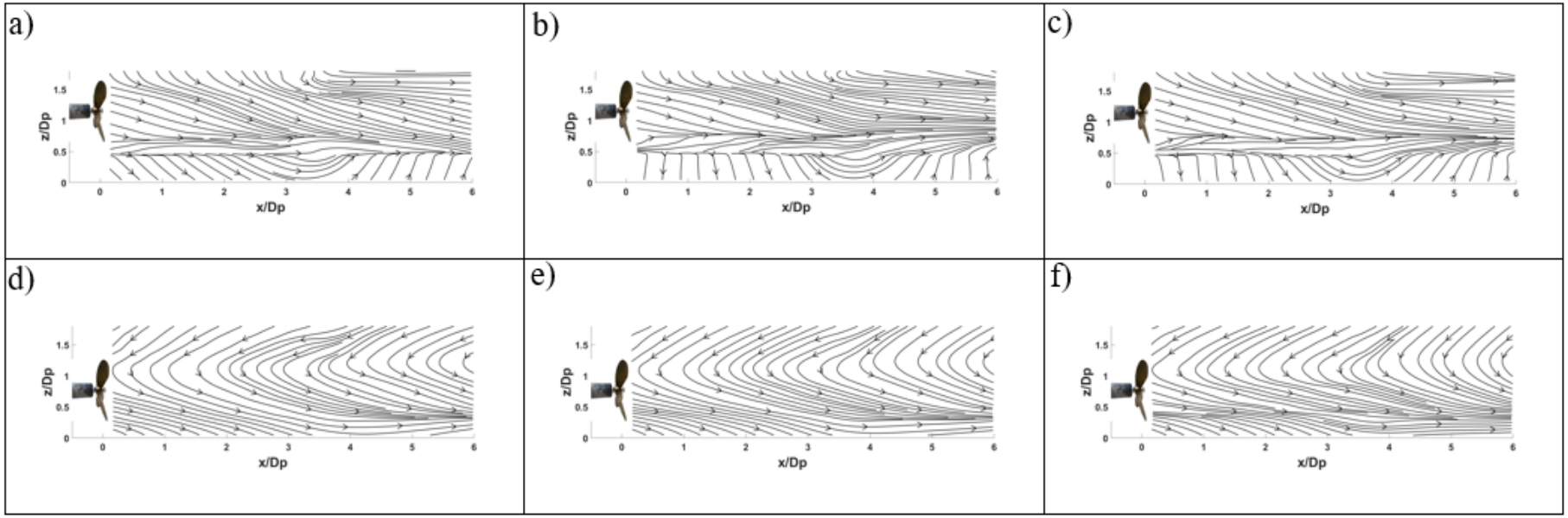
Şekil 4.41 y/D_p=-0.15, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



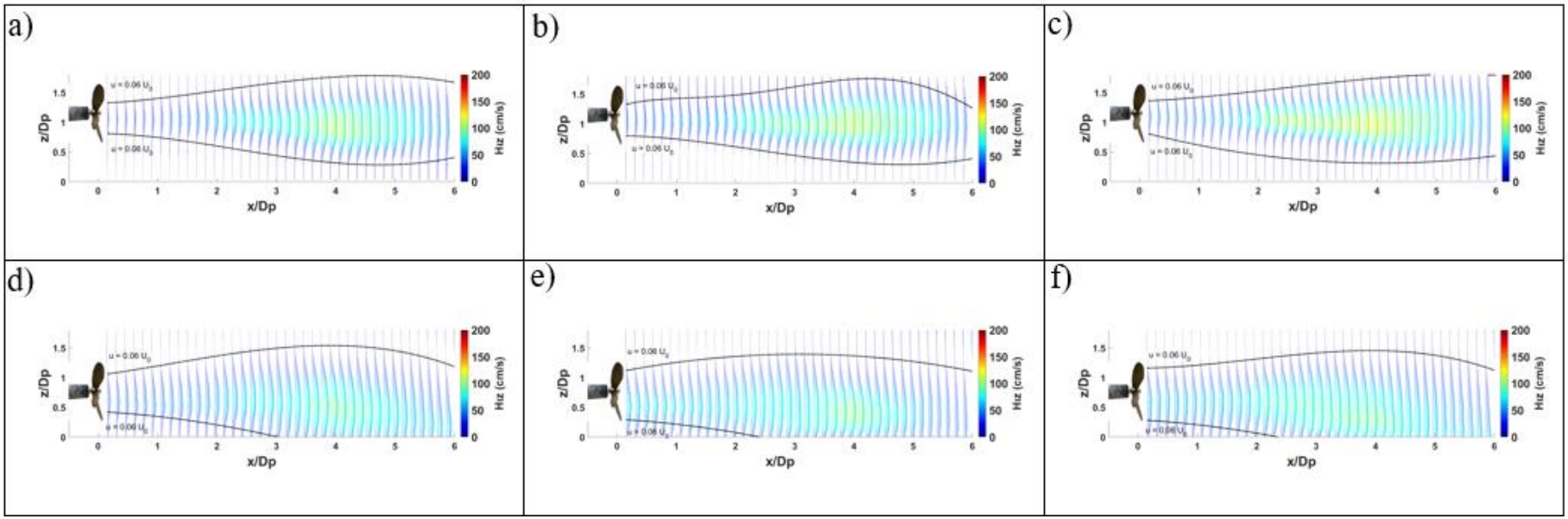
Şekil 4.42 y/D_p=-0.15, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



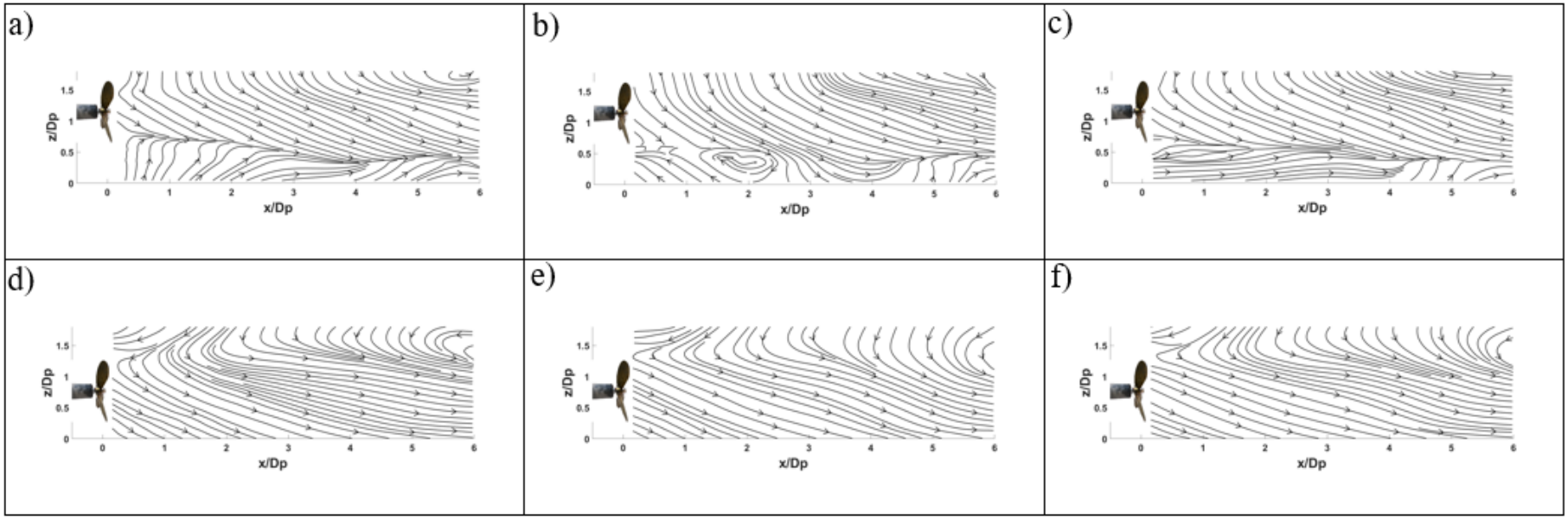
Şekil 4.43 y/D_p=-0.3, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



Şekil 4.44 y/D_p=-0.3, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



Şekil 4.45 y/D_p=-0.45, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama hız alanı vektör grafikleri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



Şekil 4.46 y/D_p=-0.45, D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında ortalama akım çizgileri: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm

Pervane jet akımının eksenel simetri ekseni etrafındaki gelişimini incelemek amacıyla, pervane göbeği ucundan başlayan ve eksene paralel olarak belirli aralıklarla konumlandırılmış düzlemlerde hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler sayesinde, jet akımının çevresel bölgelerindeki değişimler değerlendirilmiştir.

Pervane ekseninde yapılan ölçümlerde gözlenen karakteristik çift tepeli hız profili, eksenden yatay uzaklığı $y/D_p = 0.15$ olan düzlemlerde de (Şekil 4.39 ve Şekil 4.41) belirgin şekilde izlenmiştir. Ancak, bu düzlemlerde simetri bozulmakta ve pervane kanatlarının dönüş yönüne bağlı olarak bir tepe noktası diğerine kıyasla daha baskın hale gelmektedir. Örneğin, Şekil 4.39'da üstteki tepe noktası daha yüksek hız değerine sahipken, Şekil 4.41'de bu durum tersine dönmektedir.

Eksenden uzaklaştıkça çift tepeli yapı ortadan kalkmakta ve dönüş yönüne bağlı olarak kaymış tek tepeli hız profilleri ortaya çıkmaktadır. Bu durum, $y/D_p = 0.2$ düzleminde yer alan Şekil 4.26 ve Şekil 4.28'de gözlemlenmiştir ve $y/D_p = 0.45$ değerlerine kadar devam etmektedir. Dolayısıyla, pervane göbeğinin oluşturduğu çift tepeli yapı, yaklaşık bir pervane hub çapı uzaklığında etkisini kaybetmektedir.

Pervane eksenine en uzak ölçüm düzlemi olan $y/D_p = 0.9$ için elde edilen veriler Şekil 4.9 ve Şekil 4.19'da sunulmuştur. Bu konumda ölçülen hızlar, eksen üzerindeki değerlere kıyasla oldukça düşük olup, $u = 0.06U_0$ düzeyindeki hızlar pervaneden itibaren $x/D_p \approx 2$ mesafede görülmeye başlamaktadır. Bu durum, pervane tarafından oluşturulan jetin yanal olarak $y/D_p = 0.9$ değerine kadar etkisini sürdürdüğünü göstermektedir. Ayrıca, yatay düzlemde mesafe arttıkça hız bileşenlerinde anlamlı bir zayıflama gözlenmiştir. Bu eğilim, Tan vd. (2023) tarafından geliştirilen sayısal modelleme çalışmasında raporlanan hız dağılımı ile de tutarlılık göstermektedir.

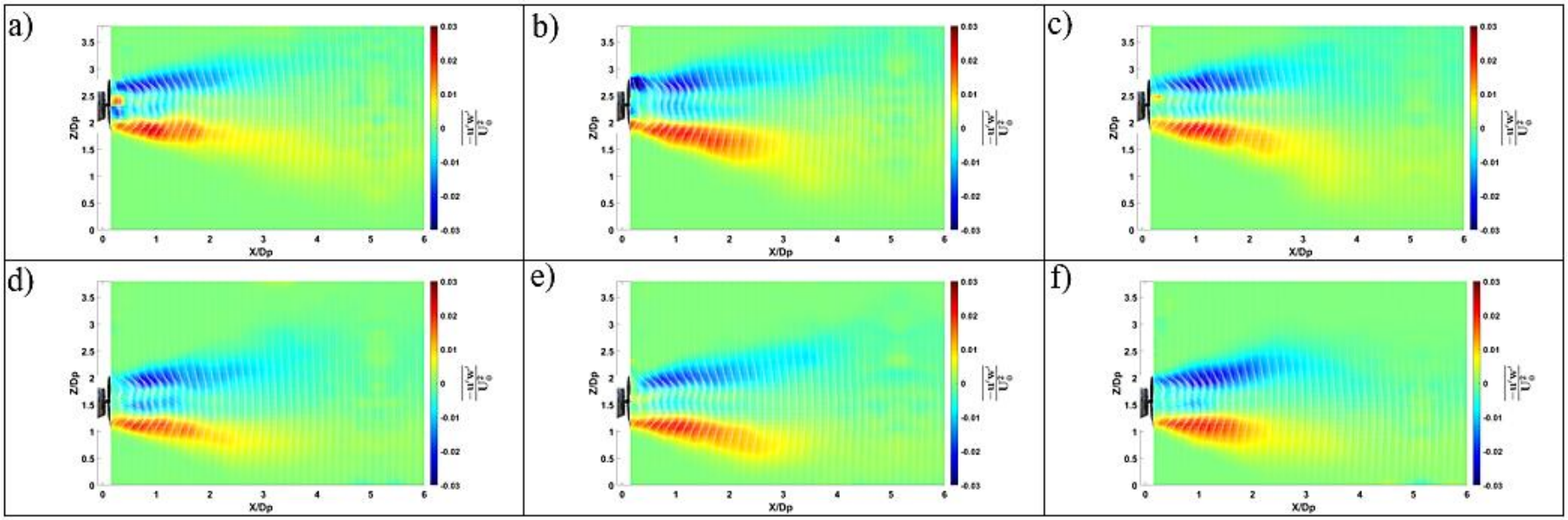
Bir sonraki bölümde, pervaneli jetin Reynolds gerilmesi üzerindeki sınır etkilerini değerlendirmek amacıyla bölgesel analiz yaklaşımı kullanılacaktır.

4.3.2 Boyutsuz Reynolds Gerilmesi

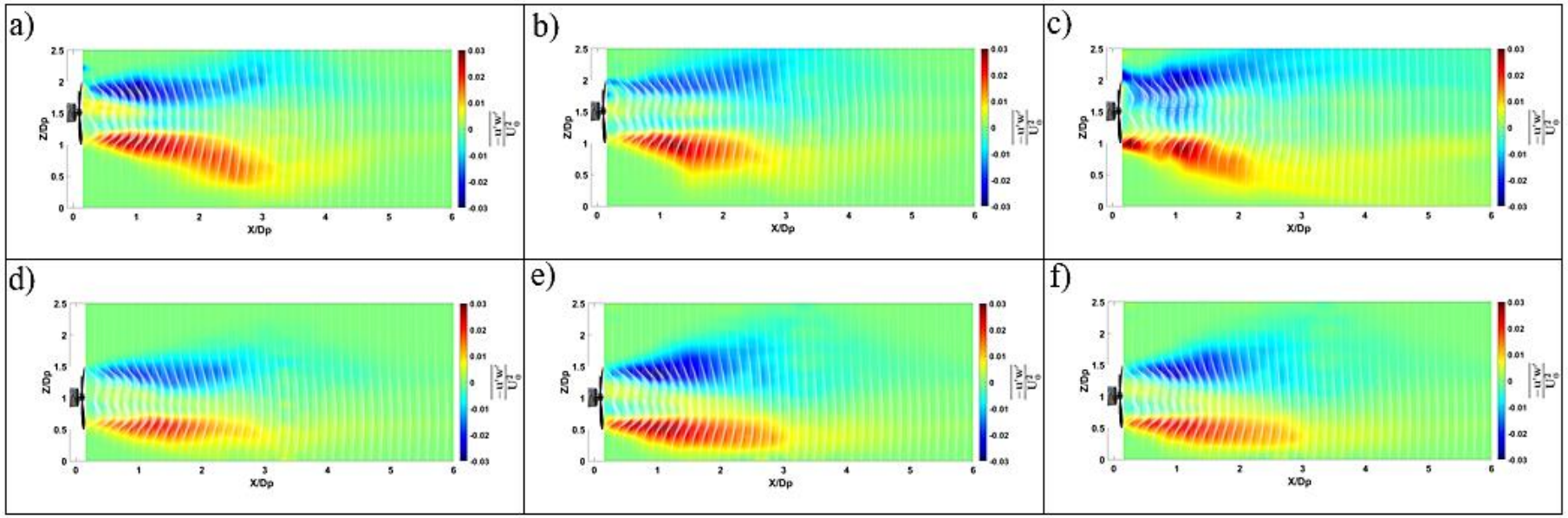
PIV tekniği kullanılarak, ortalama hız alanlarının yanı sıra Reynolds gerilmesi de elde edilebilmektedir. Bu bölümde verilen grafiklerde boyutsuz Reynolds gerilmesi $\frac{-\bar{u'}\bar{w'}}{U^2_0}$ ile birlikte boylamasına ve düşey yöndeki çalkantı hızları sırasıyla $\frac{\bar{u'}}{U_0}$, $\frac{\bar{w'}}{U_0}$. Bu grafikler, türbülansın karakteristik bileşenlerini temsil etmektedir.

4.3.2.1 Pervane Ekseninde Boyutsuz Reynolds Gerilmesi

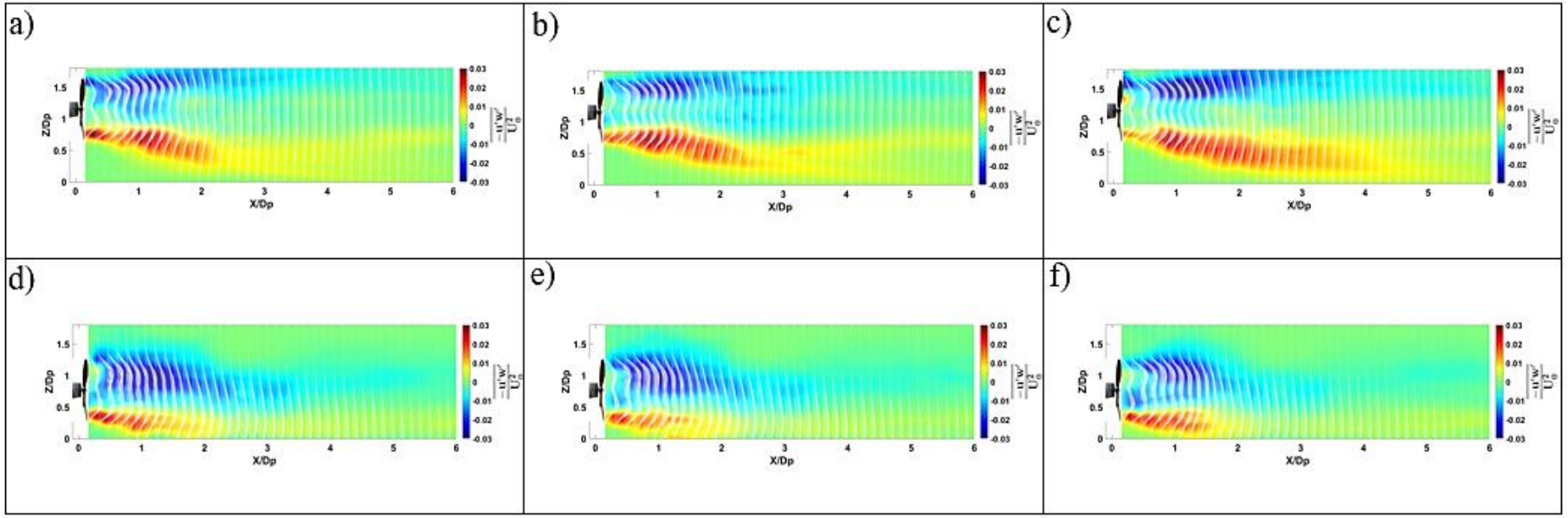
Bu bölümde, sınır etkilerinin pervane jeti üzerindeki etkisini daha kapsamlı değerlendirebilmek amacıyla, sınırlandırılmış jet akımlarının pervane eksenindeki düzlemde Reynolds gerilmesi belirli aralıklarla ölçülmüştür. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar, pervane çapına bağlı olarak gruplanmış ve analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, farklı açıklık yükseklikleri için akım yönünde en küçük pervane çapı ve en düşük devir sayısından başlanarak sırasıyla Şekil 4.47, Şekil 4.48, Şekil 4.49'da sunulmuştur. Her bir Reynolds gerilimi dağılımının üzerine karşılık gelen ortalama hız vektörleri de çakıştırılarak görsel analiz kolaylaştırılmıştır.



Şekil 4.47 D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



Şekil 4.48 D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm

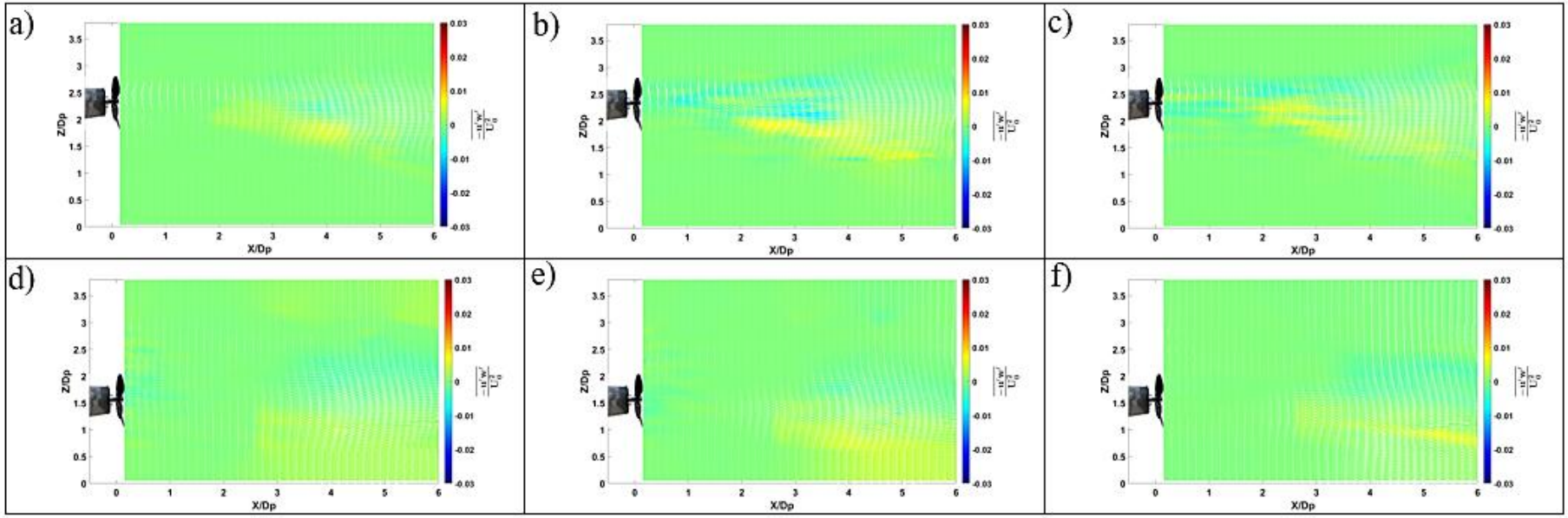


Şekil 4.49 D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm

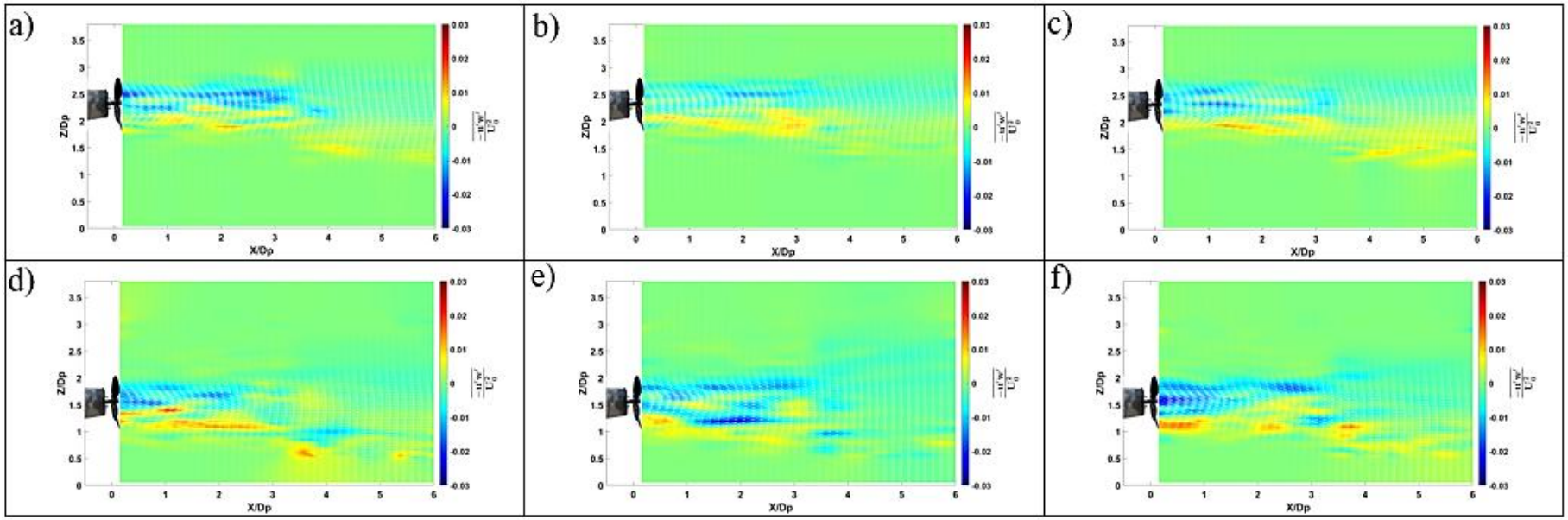
Boyutsuz Reynolds gerilmesinin verildiği grafikler, bir önceki bölümde sunulan ortalama hız vektörü grafiklerinin üzerine eklenmiştir. Ortalama hız vektörü dağılımında görüldüğü gibi, üst ve alt akım bölgelerinde zıt yönlü hız gradyanları nedeniyle zıt işaretli bir çift Reynolds gerilimi yapısı ortaya çıkmaktadır. Genel olarak Reynolds gerilmesi, eksenel hız gradyanı ($\partial u/\partial z$) ile pozitif bir korelasyon göstermektedir; alt akım bölgesinde pozitif gradyan, üst akım bölgesinde ise negatif gradyan gözlenmektedir. Bununla birlikte, pervane göbeğine yakın bölgede ($0 \leq x/D_p \leq 0.6$), üst ve alt akımlarda sırasıyla pozitif ve negatif Reynolds gerilmeleri meydana gelmektedir. Bu farklılık, pervane yüzeyine yakın bölgede gözlenen büzülmeden kaynaklanmaktadır. Hseih vd. (2013), bu büzülmenin nedenini yüksek $\partial w/\partial x$ değerine bağlamış ve bu durumu bir delikten çıkan akımda görülen daralma bölgesi (vena contracta) etkisine benzetmiştir. Reynolds gerilmesinin çift kanatlı yapısı, genişleyen kayma tabakası ile birlikte daha geniş bir alana yayılma eğilimi gösterirken, $x/D_p = 3$ sonrasında belirgin bir azalma gözlemlenmektedir. Bu durum, jet genişlemesi sürecinde jet enerjisinin yayılmasına işaret etmektedir. $G/D_p < 1$ olduğu durumda (örneğin, Şekil 4.49'daki G = 10 cm ölçümlerinde), jetin genişlemesinin sınır etkisi ile kısıtlanması nedeniyle momentum transferinin sönümlendiği görülmektedir.

4.3.2.2 Pervane Ekseni Dışındaki Düzlemlerde Boyutsuz Reynolds Gerilmesi

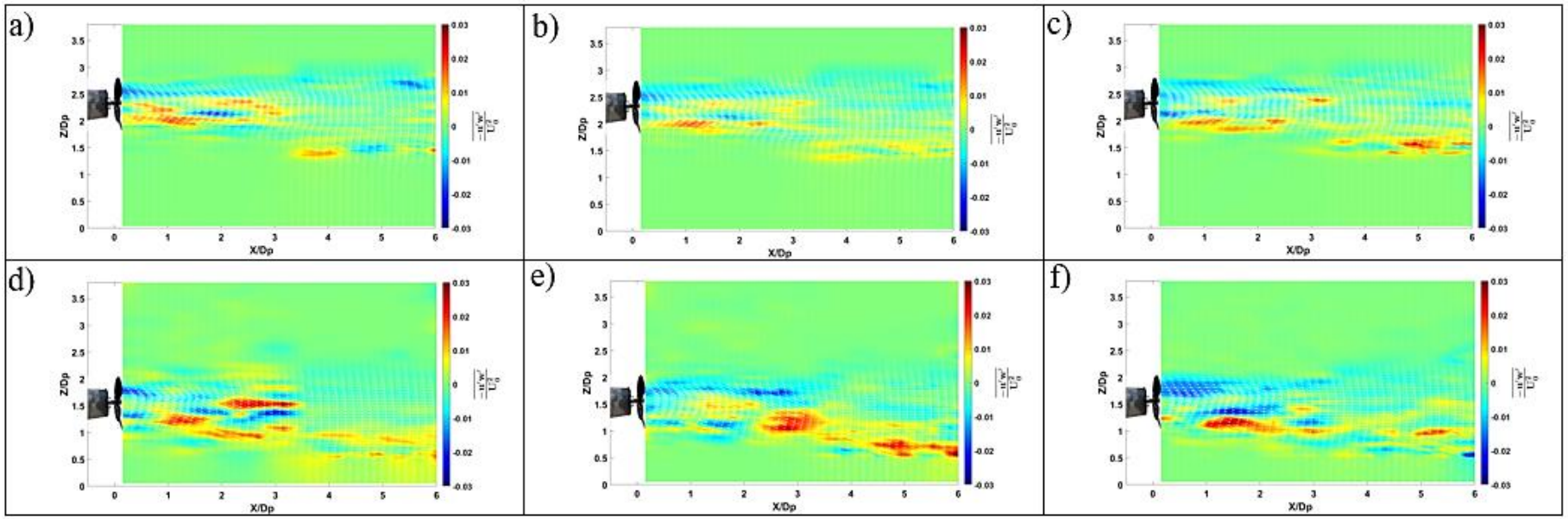
Bu bölümde, sınır etkilerinin pervane jeti üzerindeki etkisini daha kapsamlı değerlendirebilmek amacıyla, sınırlandırılmış jet akımlarının pervane ekseni dışındaki düzlemlerde Reynolds gerilmesi belirli aralıklarla ölçülmüştür. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar, pervane çapına bağlı olarak gruplanmış ve analiz edilmiştir. Burada boyutsuz Reynolds gerilimi $\frac{-\bar{u'}\bar{w'}}{U^2_0}$ ile birlikte boylamasına ve düşey yöndeki çalkantı hızları sırasıyla $\frac{\bar{u'}}{U_0}$, $\frac{\bar{w'}}{U_0}$ sırasıyla boyuna ve düşey çalkantı hızlarıdır. Farklı açıklık yükseklikleri ve pervane eksenine göre belirli aralıklarla yapılan ölçümler doğrultusunda, en küçük pervane çapı ve düşük devir sayısından başlanarak, akım yönünde pozitif en büyük eksen konumuna kadar elde edilen boyutsuz Reynolds gerilmeleri Şekil 4.50–Şekil 4.67 arasında sunulmuştur. Bu grafiklerde, önceki bölümde verilen ortalama hız vektörü dağılımları da ilgili türbülans grafiklerine eklenerek birlikte gösterilmiştir



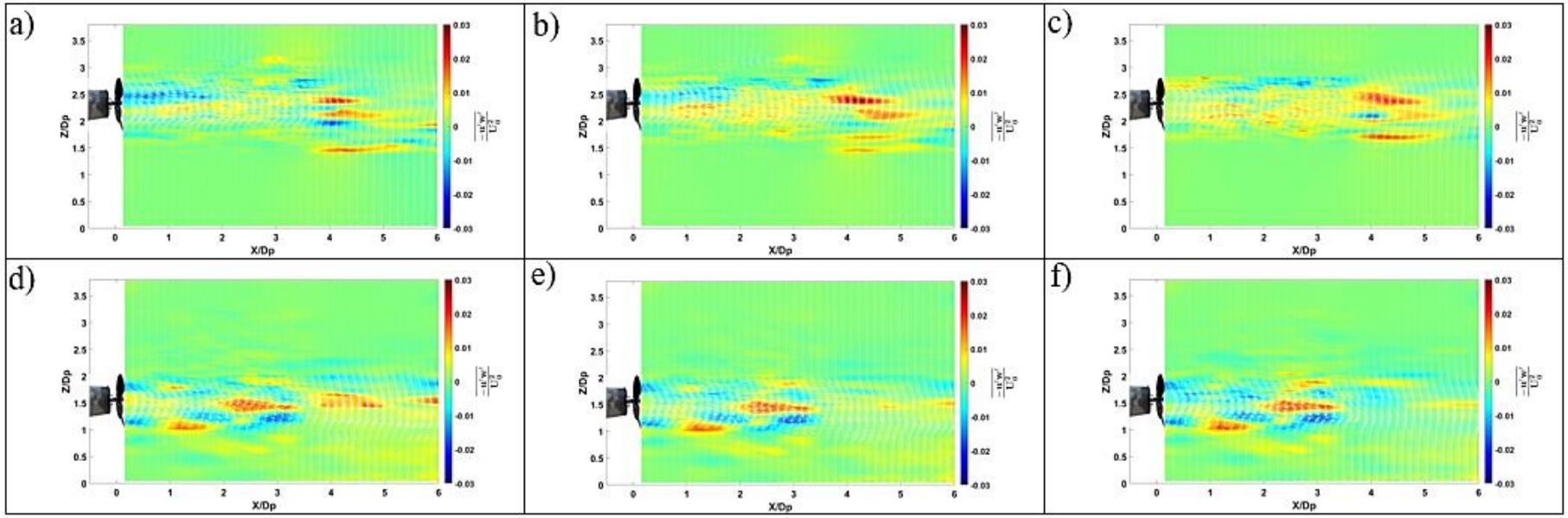
Şekil 4.50 y/D_p= 0.9 D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



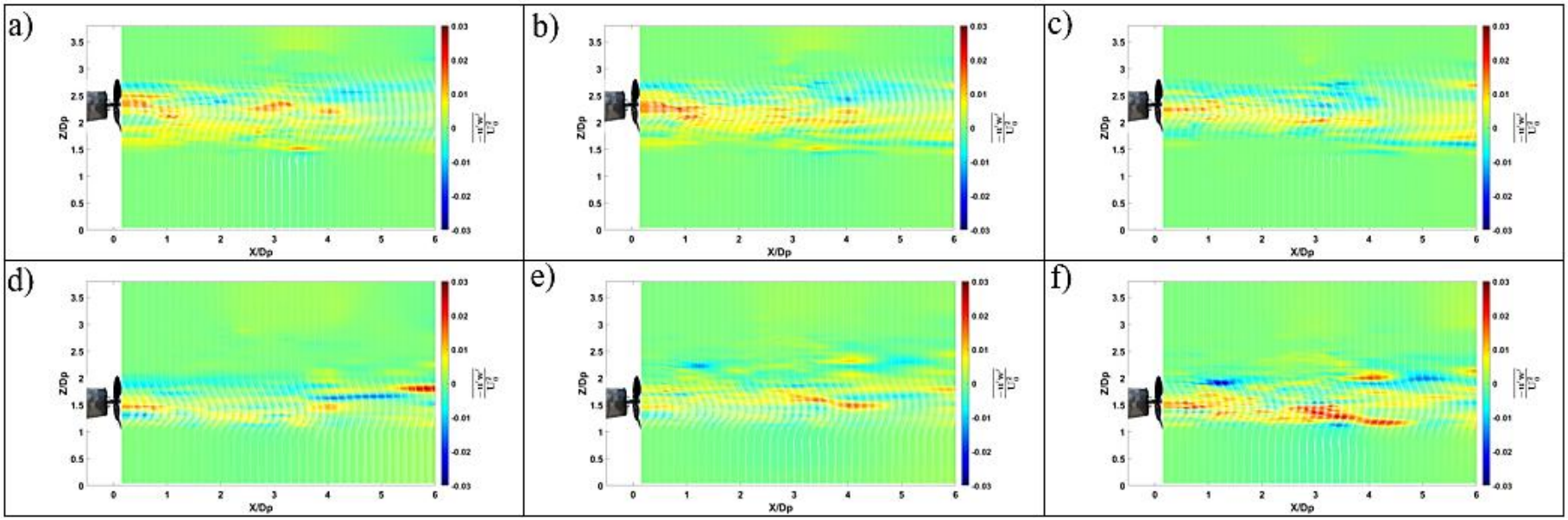
Şekil 4.51 y/D_p= 0.6 D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



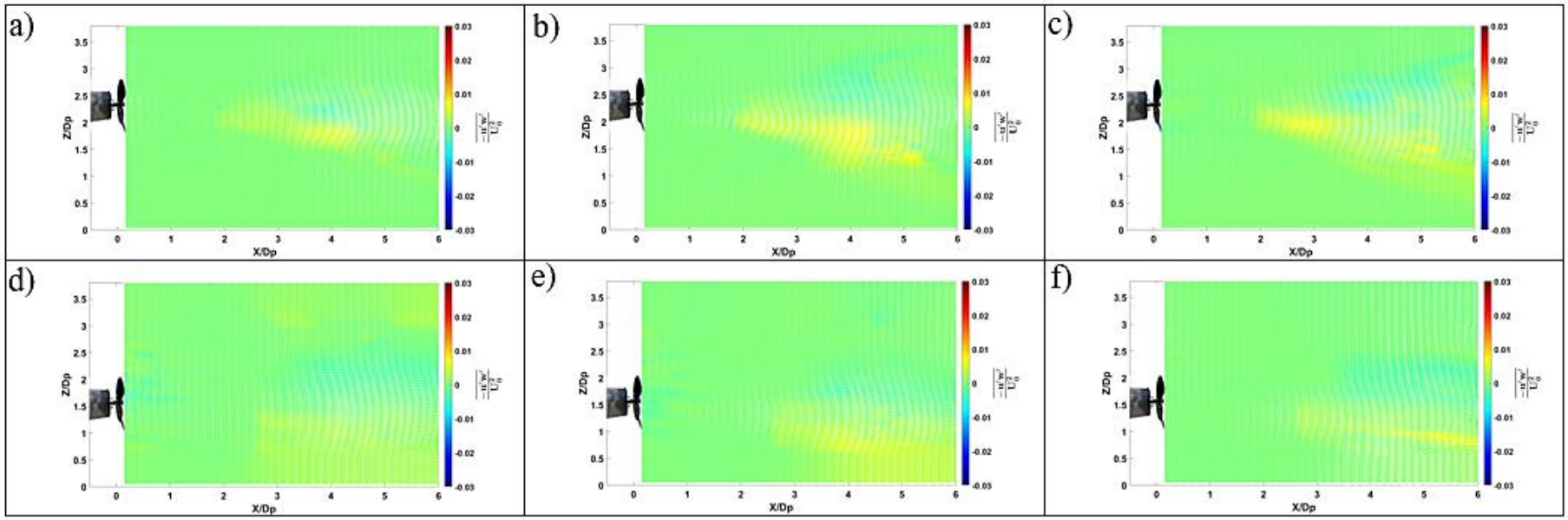
Şekil 4.52 y/D_p= 0.3 D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



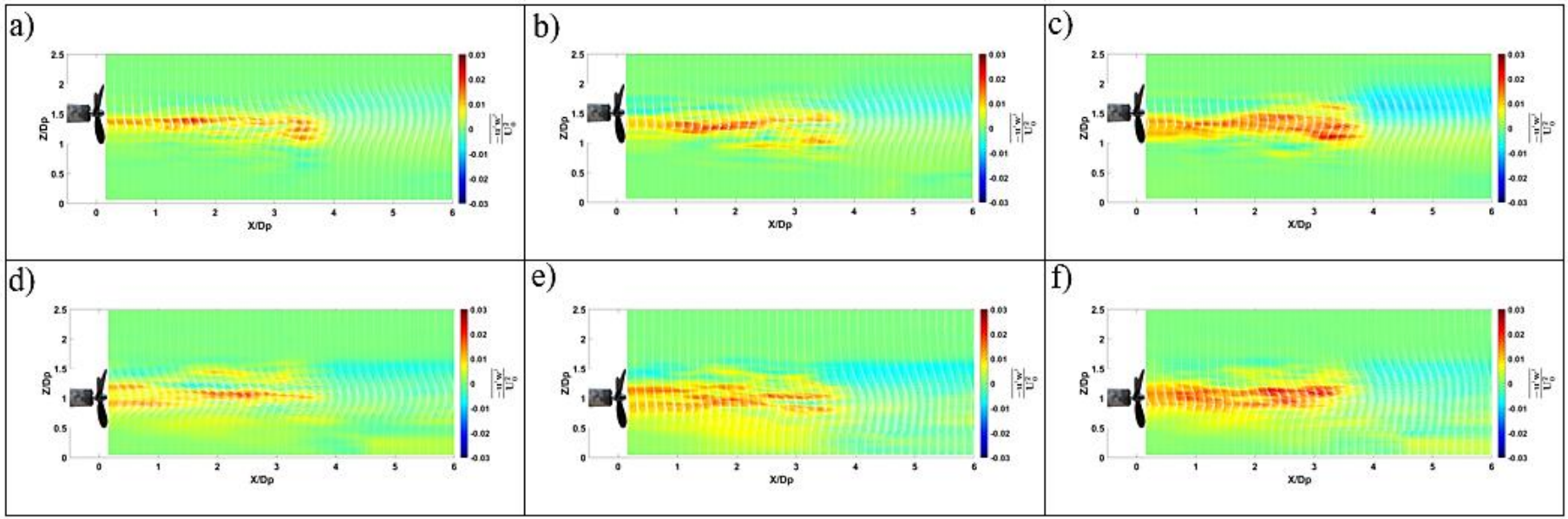
Şekil 4.53 y/D_p=-0.3 D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



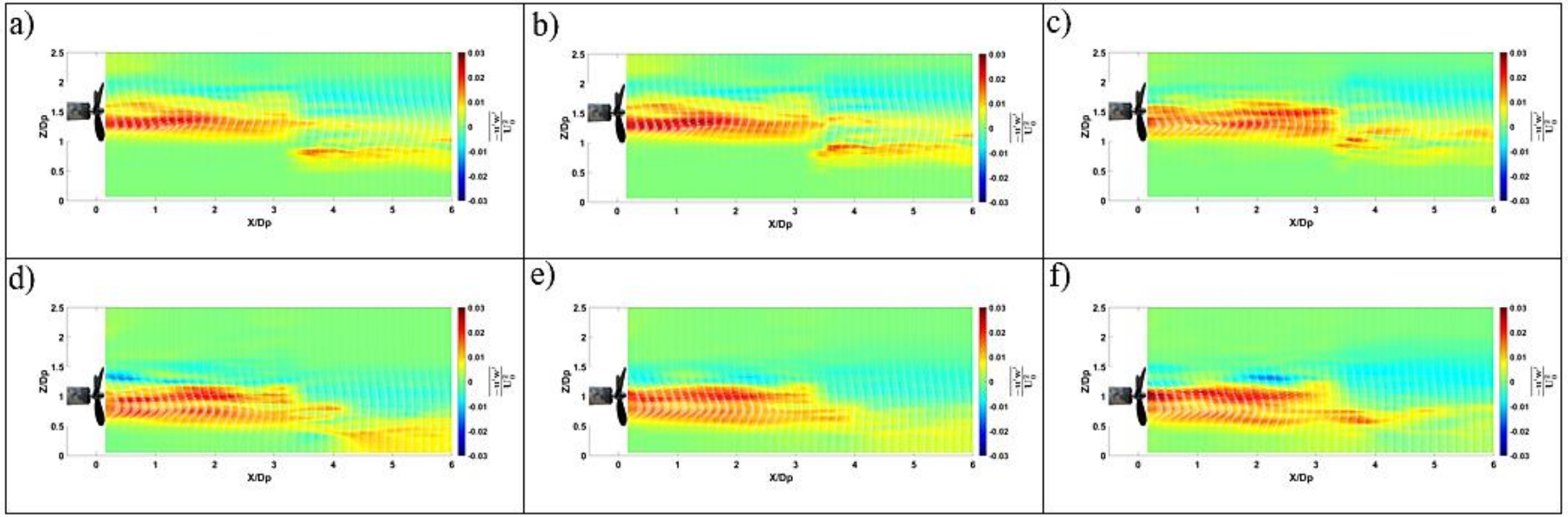
Şekil 4.54 y/D_p=-0.6 D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



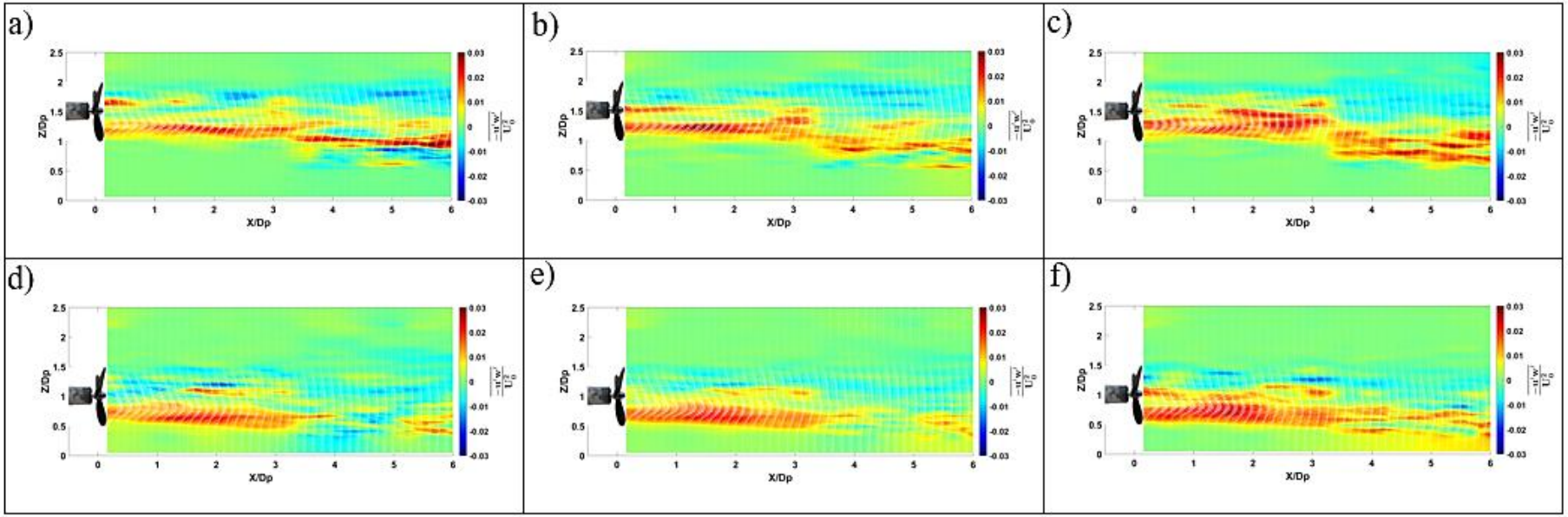
Şekil 4.55 y/D_p=-0.9 D= 6.5 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



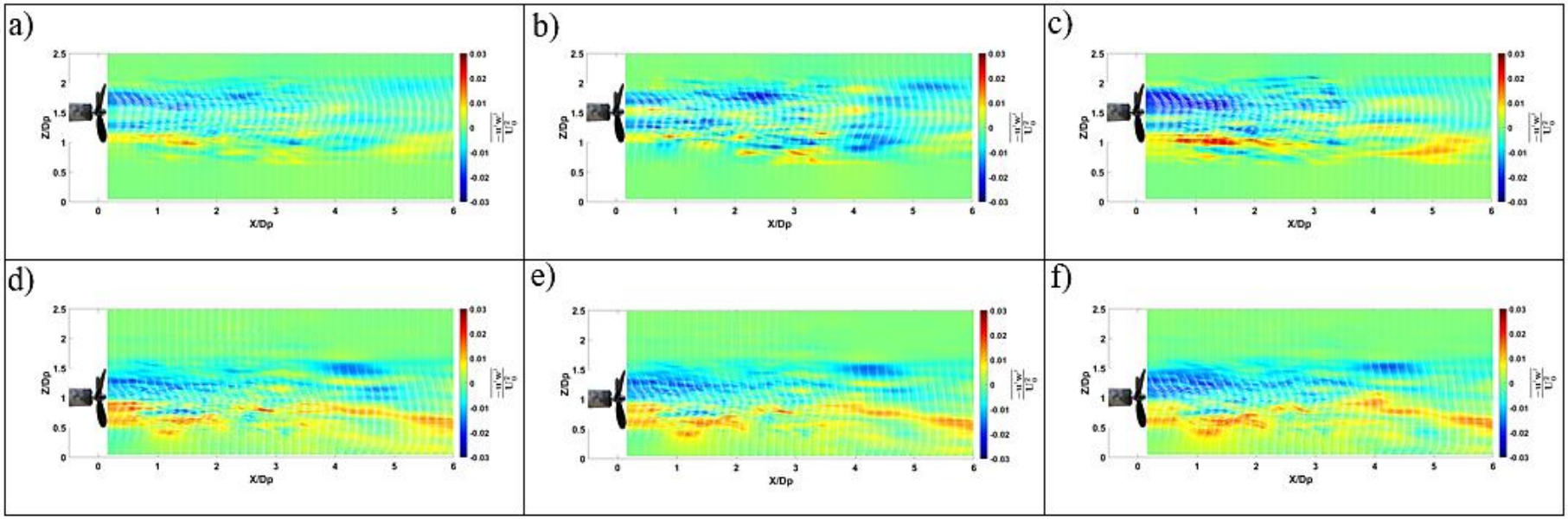
Şekil 4.56 y/D_p= 0.6 D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



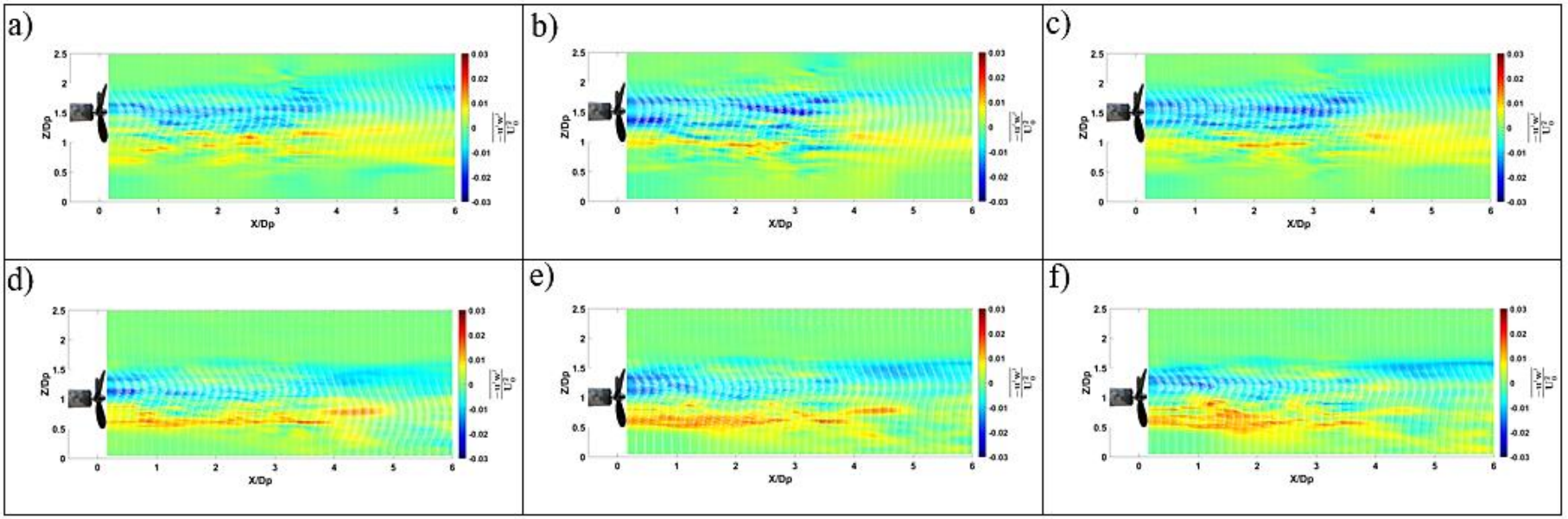
Şekil 4.57 y/D_p= 0.4 D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



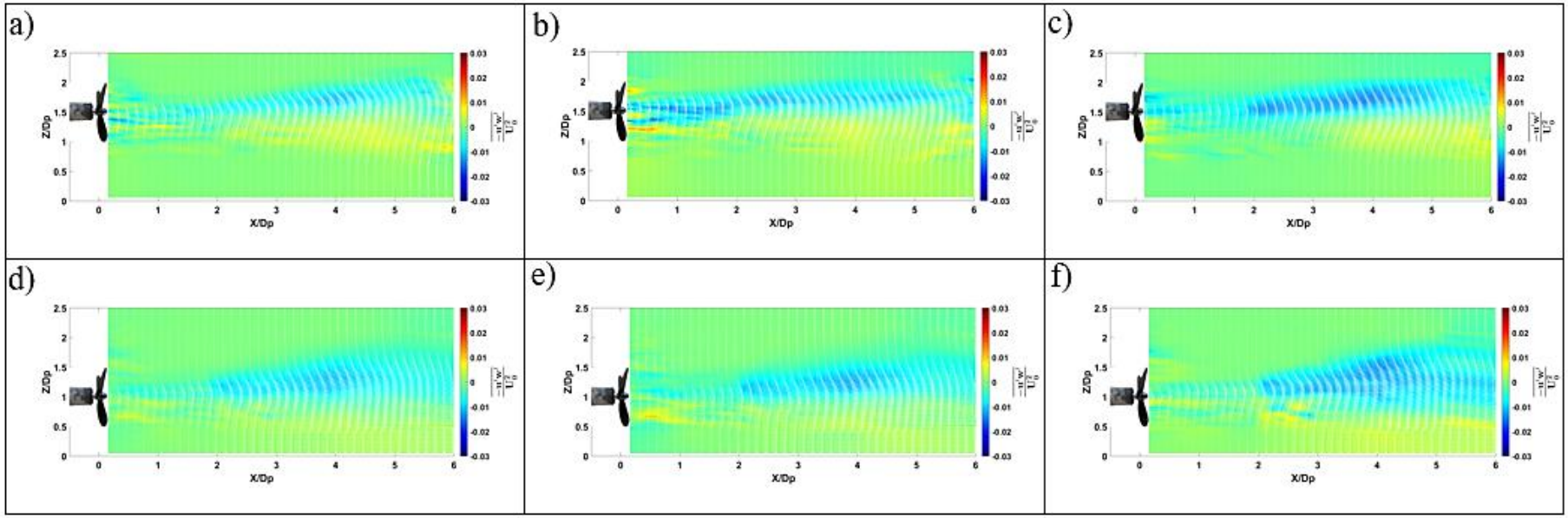
Şekil 4.58 y/D_p= 0.2 D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



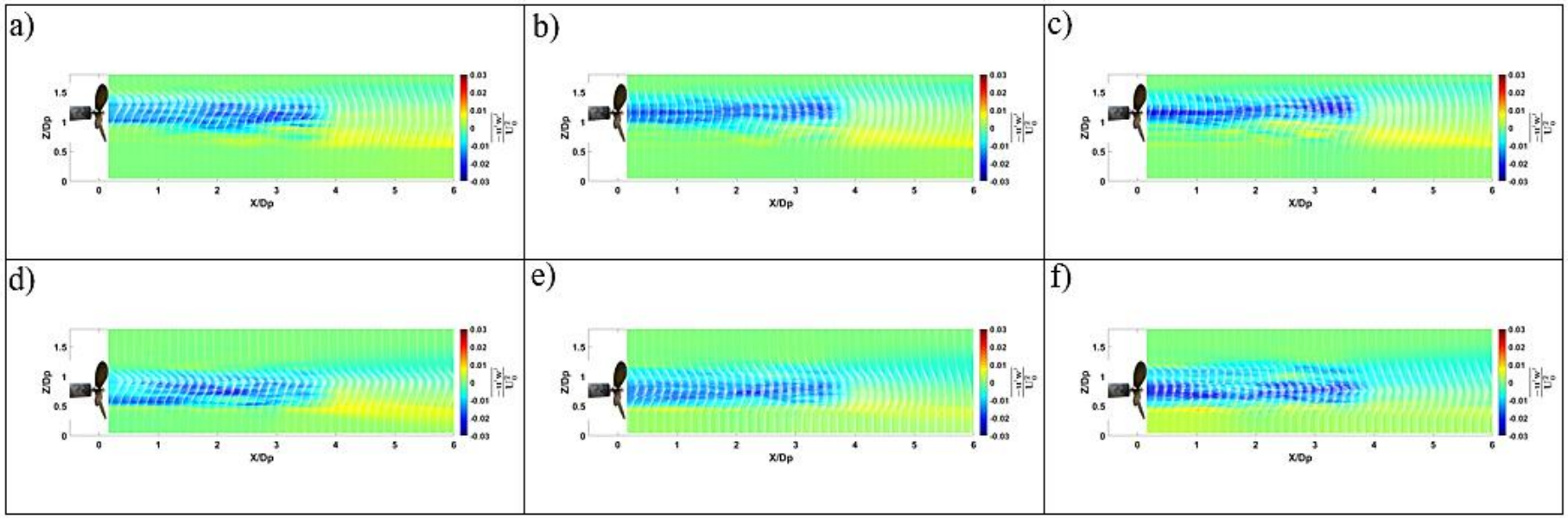
Şekil 4.59 y/D_p=-0.2 D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



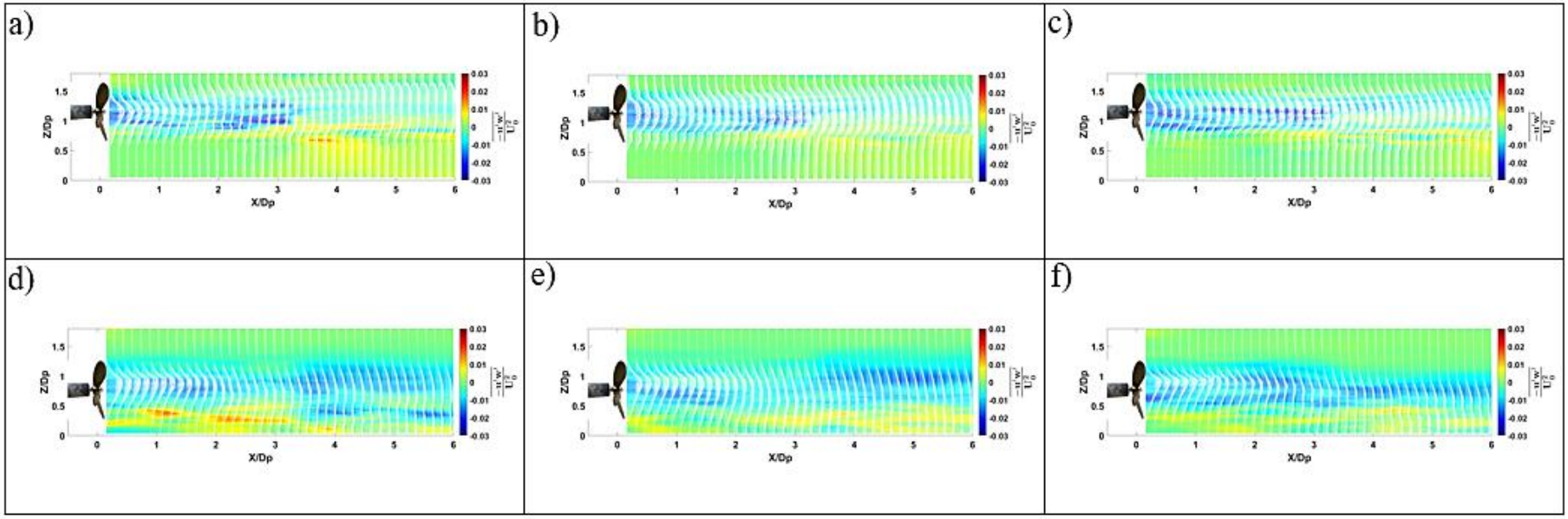
Şekil 4.60 y/D_p=-0.4 D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



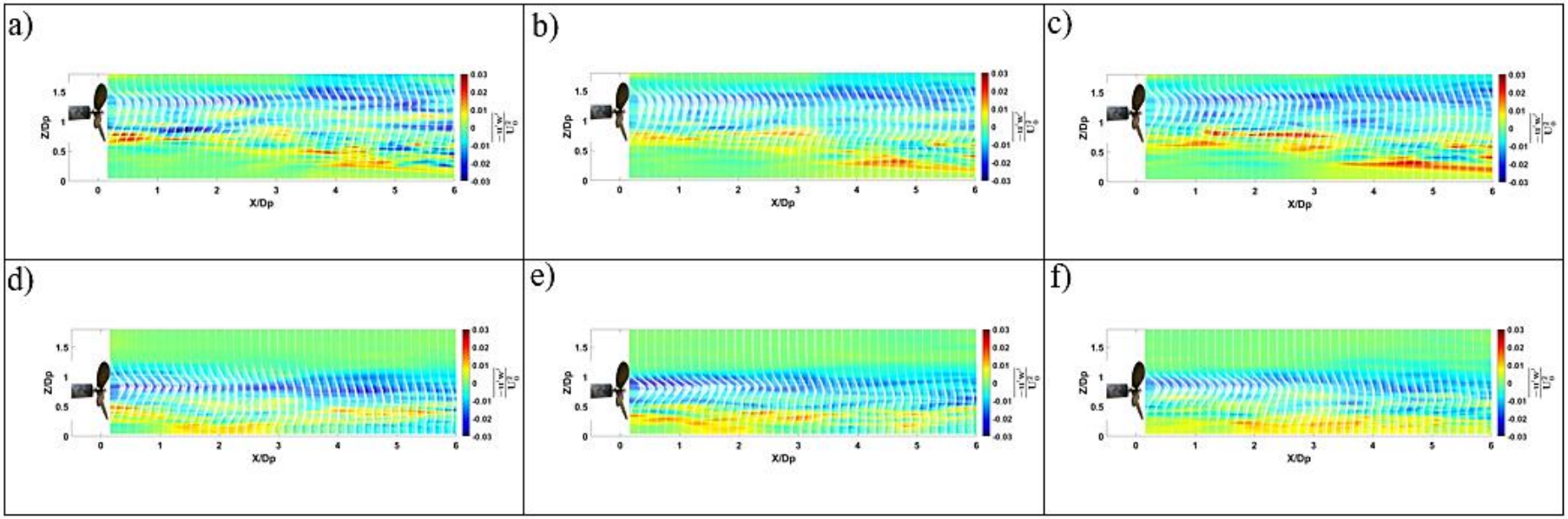
Şekil 4.61 y/D_p=-0.6 D= 10 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



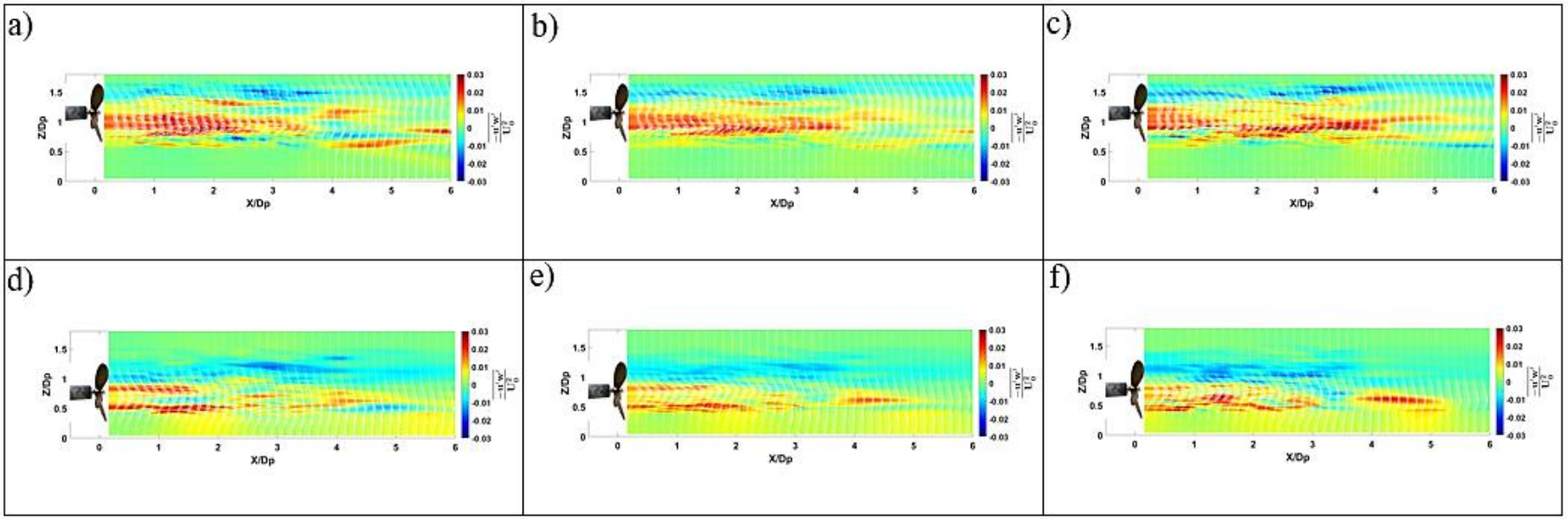
Şekil 4.62 y/D_p= 0.45 D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



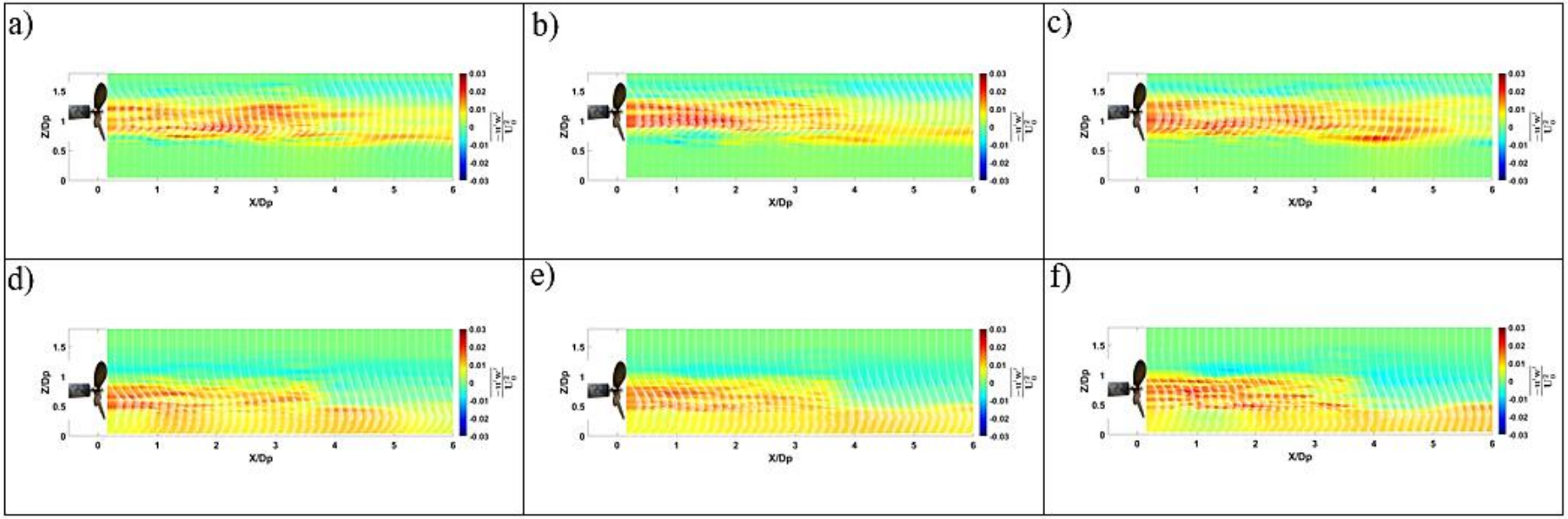
Şekil 4.63 y/D_p= 0.3 D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



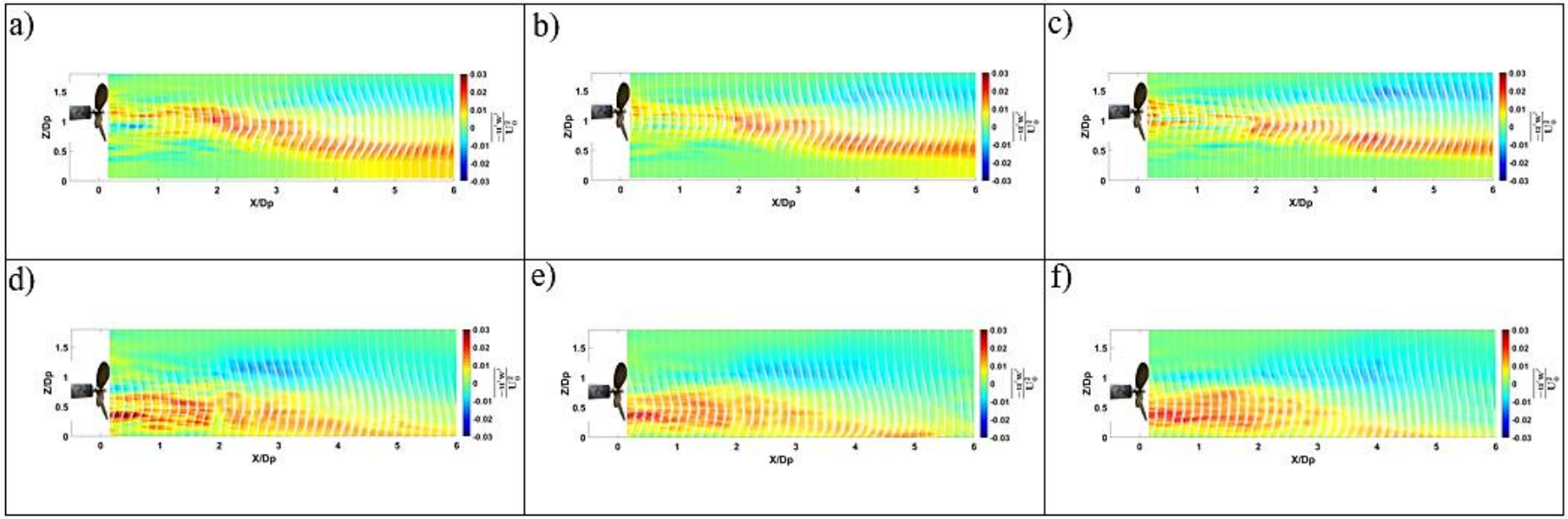
Şekil 4.64 y/D_p= 0.15 D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



Şekil 4.65 y/D_p=-0.15 D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



Şekil 4.66 y/D_p=-0.3 D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm



Şekil 4.67 y/D_p=-0.45 D= 13 cm pervane için değişen açıklık yükseklikleri ve pervane dönüş hızlarında boyutsuz Reynolds gerilmesi: (a) 590 Rpm G=15 cm, (b) 670 Rpm G=15 cm, (c) 745 Rpm G=15 cm, (d) 590 Rpm G=10 cm, (e) 670 Rpm G=10 cm, (f) 745 Rpm G=10 cm

Reynolds gerilmesinin karşılaştırılmasında, ortalama hız vektörlerinin üst üste çakıştırıldığı grafiklerde de görülebileceği üzere, pervane yüzeyinden belirli aralıklarla yapılan ölçümlerde, üst ve alt akım bölgelerinde zıt hız gradyanları nedeniyle zıt işaretli bir çift Reynolds gerilmesi kanadı görünümü devam etmektedir. Bu gerilme kanatlarının yoğunluğu, konuma bağlı olarak değişim göstermektedir. Pervane dönüş yönüne bağlı olarak, pozitif hız gradyanının baskın olduğu bölgelerde pozitif Reynolds gerilmesinin; negatif hız gradyanının baskın olduğu bölgelerde ise negatif Reynolds gerilmesinin daha belirgin olduğu gözlenmektedir. Pervane ekseninden uzaklaştıkça Reynolds gerilmelerinin şiddetinde azalma meydana gelmektedir. Ayrıca, pervane göbeğine yakın konumlarda ($0 \leq x/D_p \leq 0.6$) üst ve alt akımlarda sırasıyla pozitif ve negatif Reynolds gerilmelerinin ortaya çıktığı görülmektedir. Ancak eksenden uzaklaştıkça bu etki ortadan kalkmakta ve daha önce ortalama hız vektörlerinde de tartışıldığı gibi, bu etki pervane göbeği çapı kadar bir mesafede etkisini yitirmektedir.

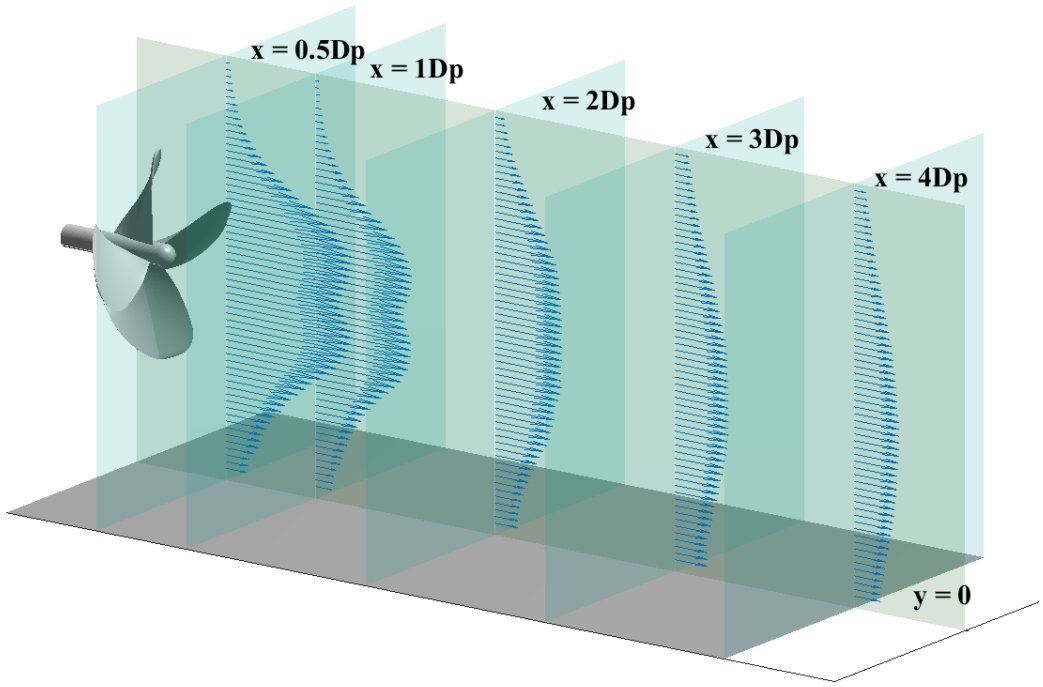
4.4 Enine Düzlemde (y-z düzlemi) Akım Özellikleri

4.4.1 Ortalama Hızlar

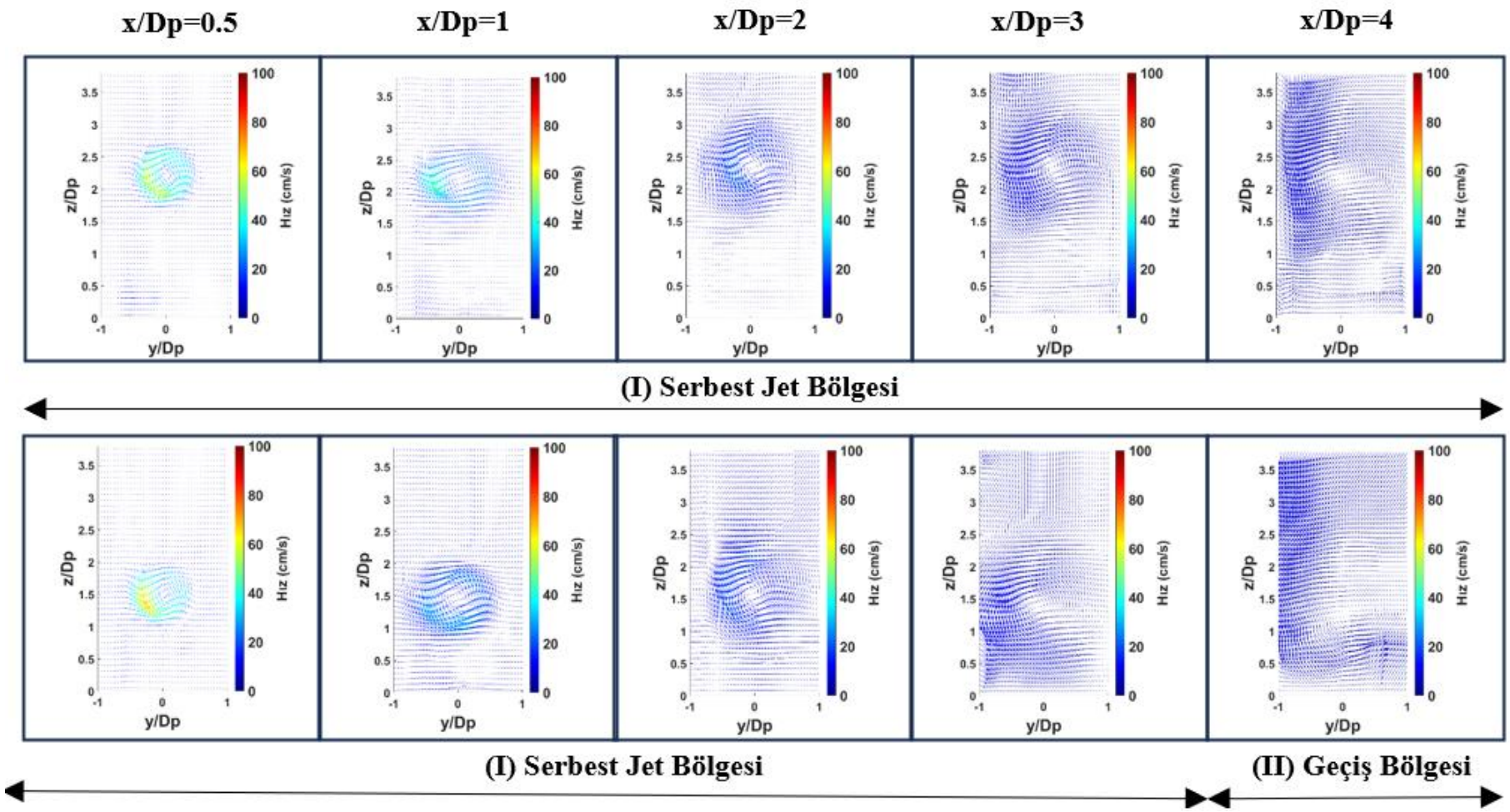
Sınırlandırılmamış bir pervane jetinin enine akım alanı Hsieh vd. (2013) tarafından ortaya konulmuştur. Buna ek olarak, Wei (2018) çalışmasında bir sınır yakınındaki pervane akımlarının enine vorteks yapılarını, farklı açıklık yükseklikleri için incelemiştir. Bu çalışmada ise, farklı pervane çapları (D=6.5 cm, 10 cm, 13 cm) ve pervane dönüş hızları için, x/D_p=0.5, 1, 2, 3 ve 4 konumlarında (Şekil 4.68), G= 10 cm ve G=15 cm olmak üzere iki farklı açıklık yüksekliğiyle, pervane yüzey düzleminden itibaren beş farklı enine düzlemde vorteks yapıları ölçülmüştür. Vorteks etkisinin esas olarak sınırlandırılmamış jet bölgesine karşılık geldiği serbest jet bölgesiyle birlikte, sınırlandırılmış jetin geçiş bölgesine karşılık geldiği serbest jet bölgesiyle birlikte, sınırlandırılmış jetin geçiş bölgesi ve duvar jeti bölgesi için ölçülen veriler, vektör ve akım çizgisi grafiklerinde Şekil 4.69-Şekil 4.86 aralığında sunulmuştur. Ölçümlerde kullanılan pervanelerden D = 10 cm çapındaki pervane saat yönünde dönerken, D = 6.5 cm ve D = 13 cm çaplı pervaneler saat yönünün tersine dönmekte olup, buna karşılık gelen akım yapıları ilgili şekillerde gösterilmiştir.

Tablo 4.7 Enine düzlemlerde gerçekleştirilen deney koşulları

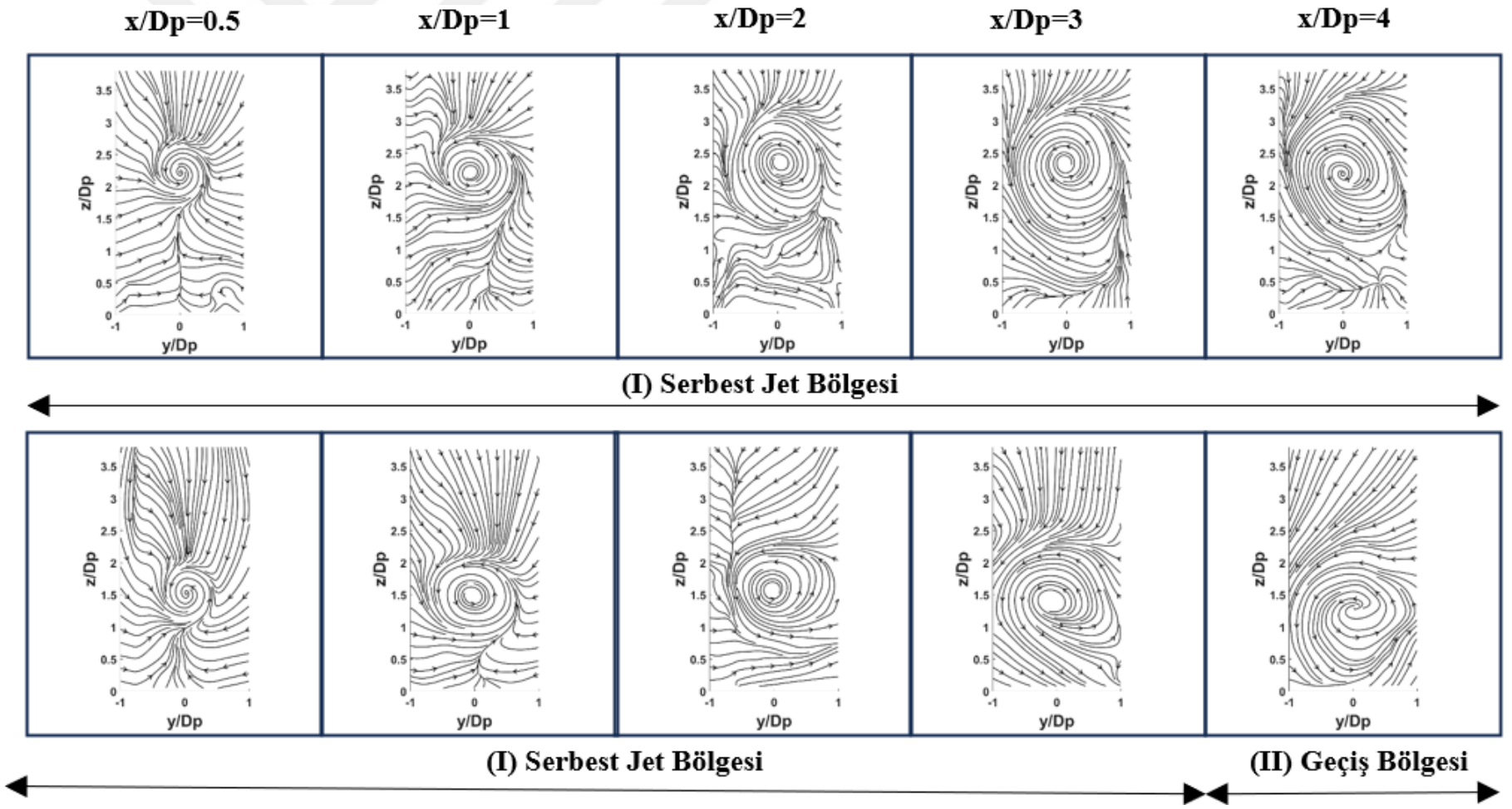
Deney No	Dp (cm)	G (cm)	n (rpm)	Ölçüm Düzlemi	Açıklama	Gözlem Alanı (cm^2)	Uzamsal çözünürlük (cm)
127	6.5	10	590	Enine (y-z)	x/Dp =0.5, 1, 2, 3, 4	20x25	0.274
128	6.5	10	670	Enine (y-z)	x/Dp =0.5, 1, 2, 3, 5	20x25	0.274
129	6.5	10	745	Enine (y-z)	x/Dp =0.5, 1, 2, 3, 6	20x25	0.274
130	6.5	15	590	Enine (y-z)	x/Dp =0.5, 1, 2, 3, 7	20x25	0.274
131	6.5	15	670	Enine (y-z)	x/Dp =0.5, 1, 2, 3, 8	20x25	0.274
132	6.5	15	745	Enine (y-z)	x/Dp =0.5, 1, 2, 3, 9	20x25	0.274
133	10	10	590	Enine (y-z)	x/Dp =0.5, 1, 2, 3, 10	20x25	0.274
134	10	10	670	Enine (y-z)	x/Dp =0.5, 1, 2, 3, 11	20x25	0.274
135	10	10	745	Enine (y-z)	x/Dp =0.5, 1, 2, 3, 12	20x25	0.274
136	10	15	590	Enine (y-z)	x/Dp =0.5, 1, 2, 3, 13	20x25	0.274
137	10	15	670	Enine (y-z)	x/Dp =0.5, 1, 2, 3, 14	20x25	0.274
138	10	15	745	Enine (y-z)	x/Dp =0.5, 1, 2, 3, 15	20x25	0.274
139	13	10	590	Enine (y-z)	x/Dp =0.5, 1, 2, 3, 16	20x25	0.274
140	13	10	670	Enine (y-z)	x/Dp =0.5, 1, 2, 3, 17	20x25	0.274
141	13	10	745	Enine (y-z)	x/Dp =0.5, 1, 2, 3, 18	20x25	0.274
142	13	15	590	Enine (y-z)	x/Dp =0.5, 1, 2, 3, 19	20x25	0.274
143	13	15	670	Enine (y-z)	x/Dp =0.5, 1, 2, 3, 20	20x25	0.274
144	13	15	745	Enine (y-z)	x/Dp =0.5, 1, 2, 3, 21	20x25	0.274



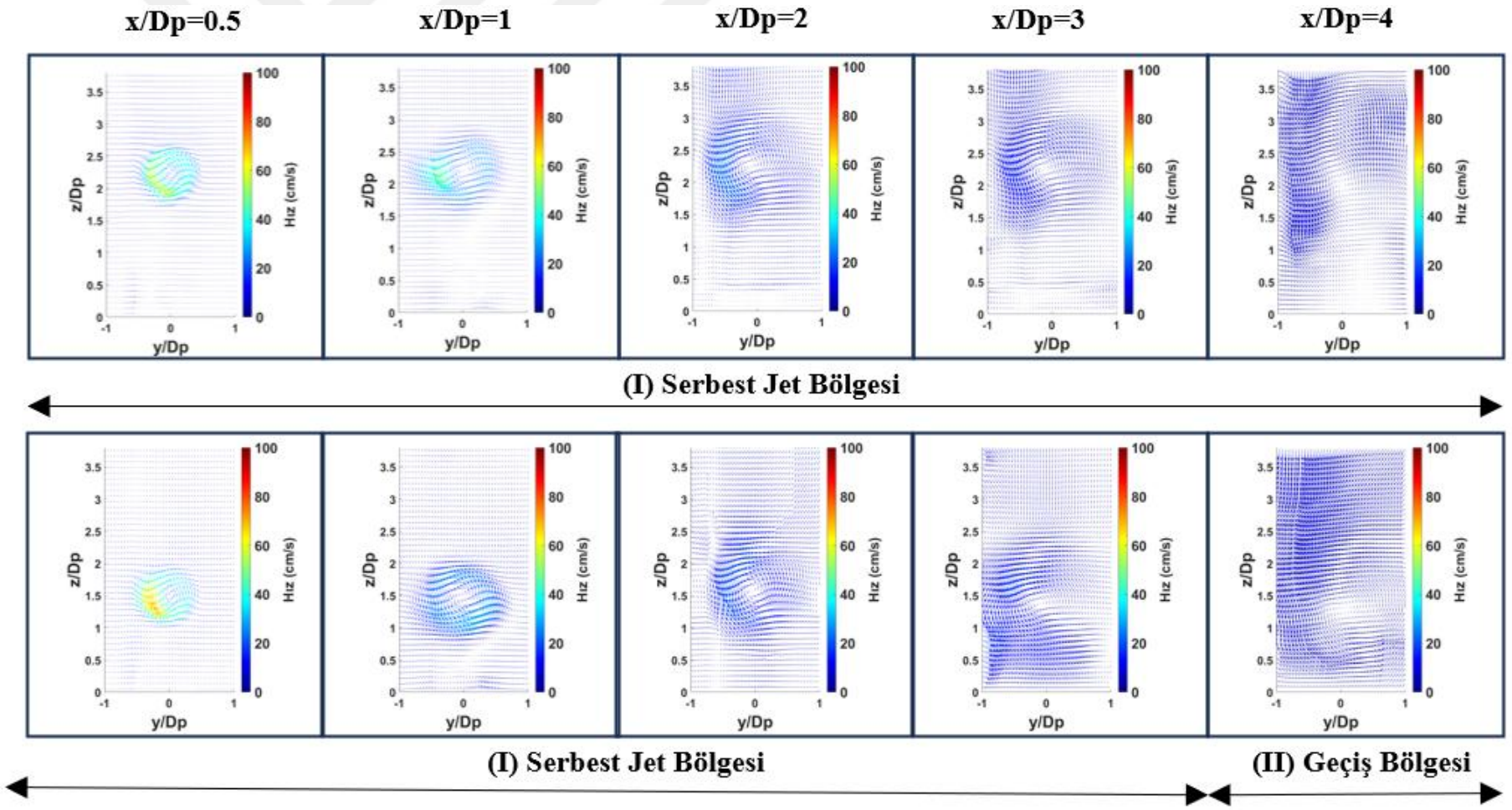
Şekil 4.68 Pervane jetinin düzlem sınırları gösterimi



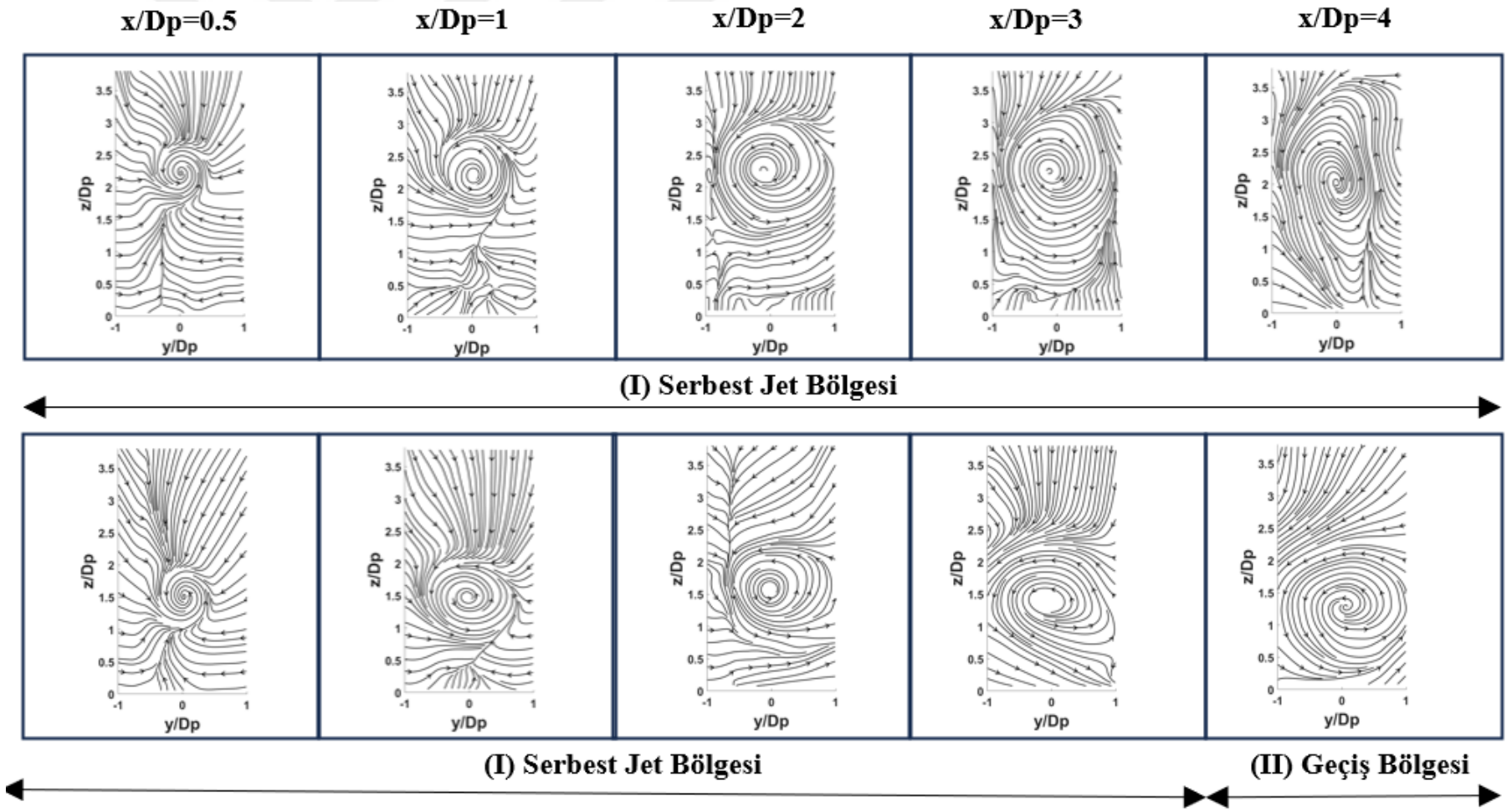
Şekil 4.69 D=6.5 cm, Rpm=590, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine ortalama hız alanları



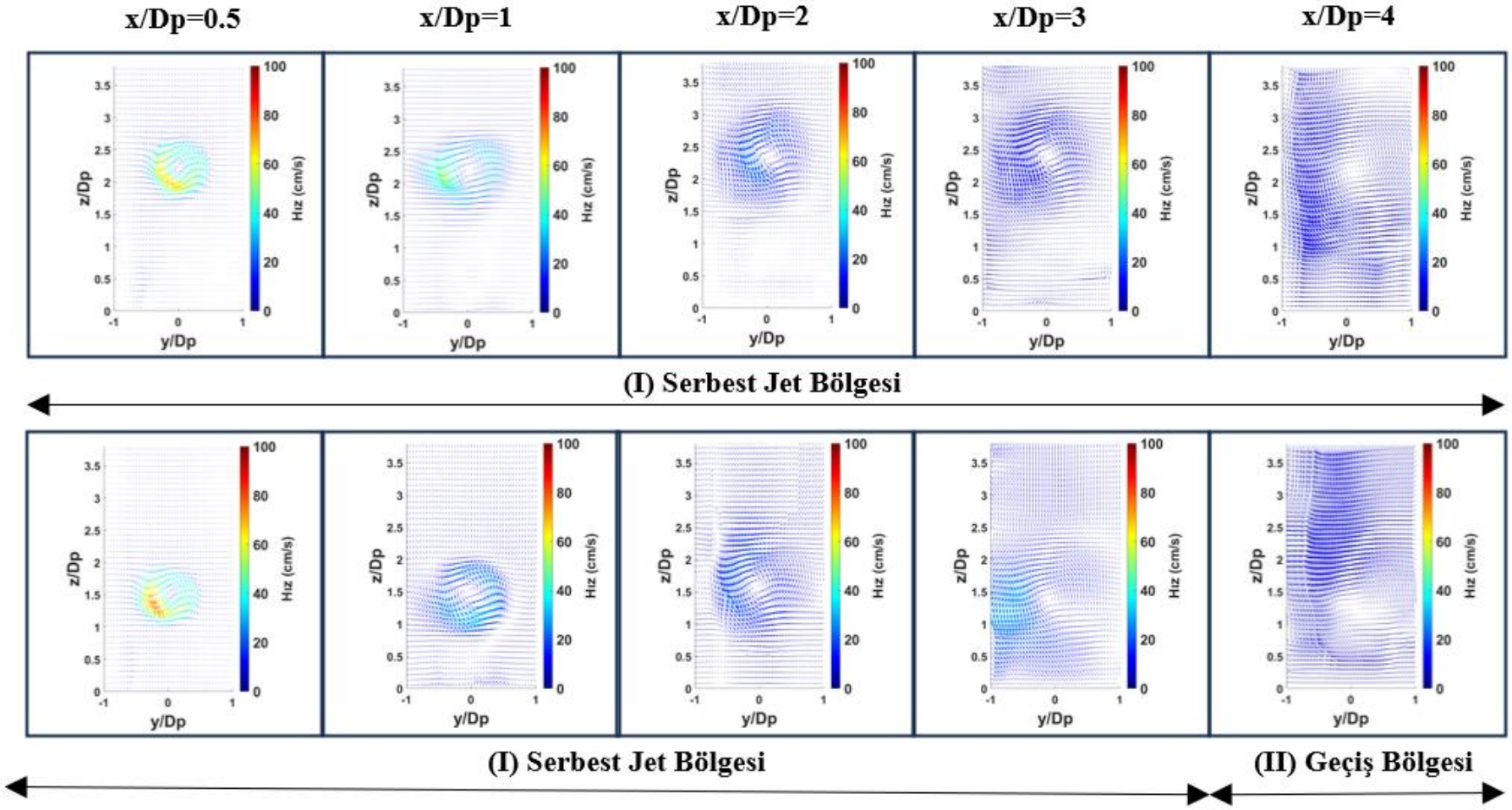
Şekil 4.70 D=6.5 cm, Rpm=590, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine akım çizgileri



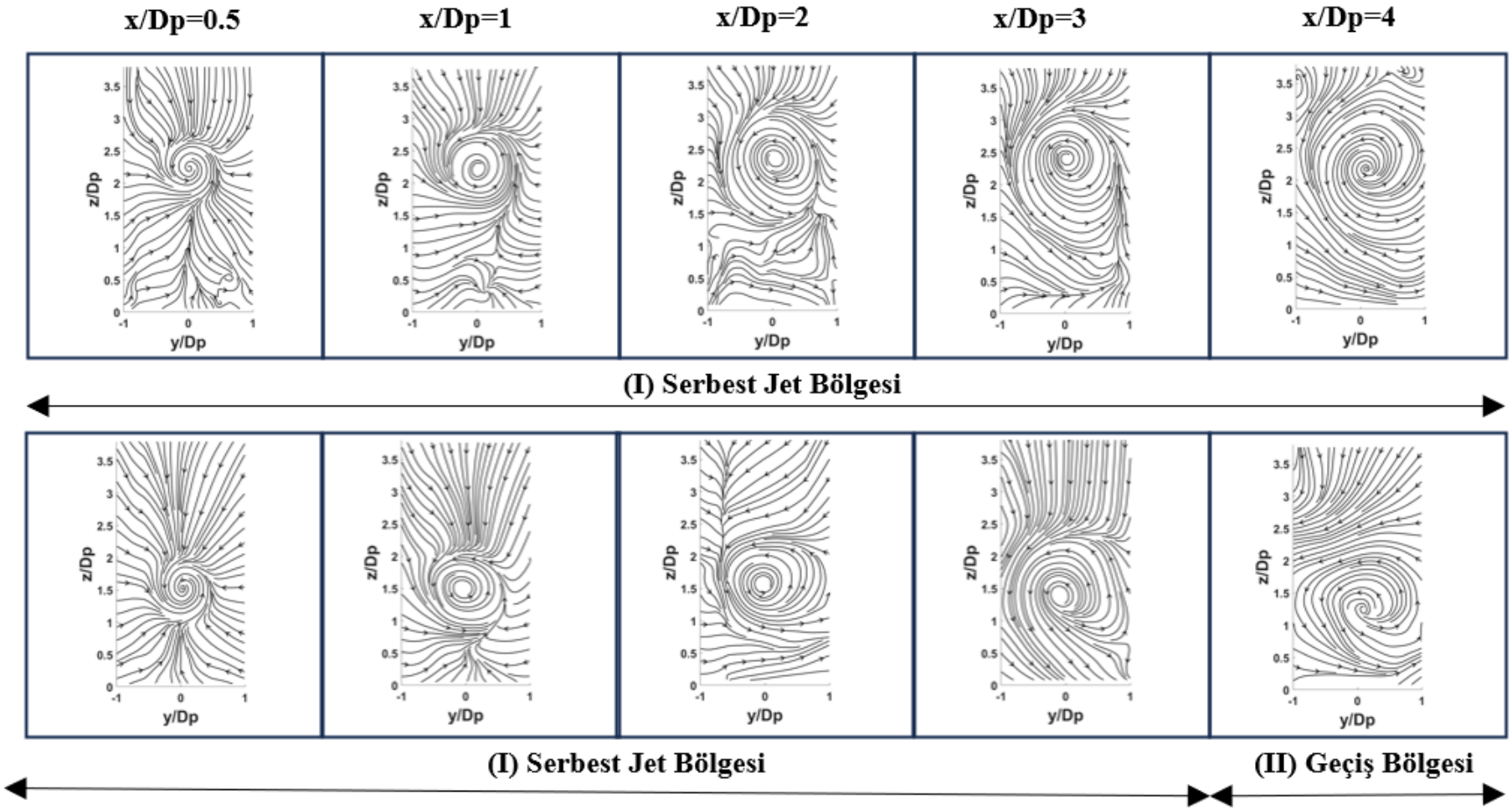
Şekil 4.71 D=6.5 cm, Rpm=670, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine ortalama hız alanları



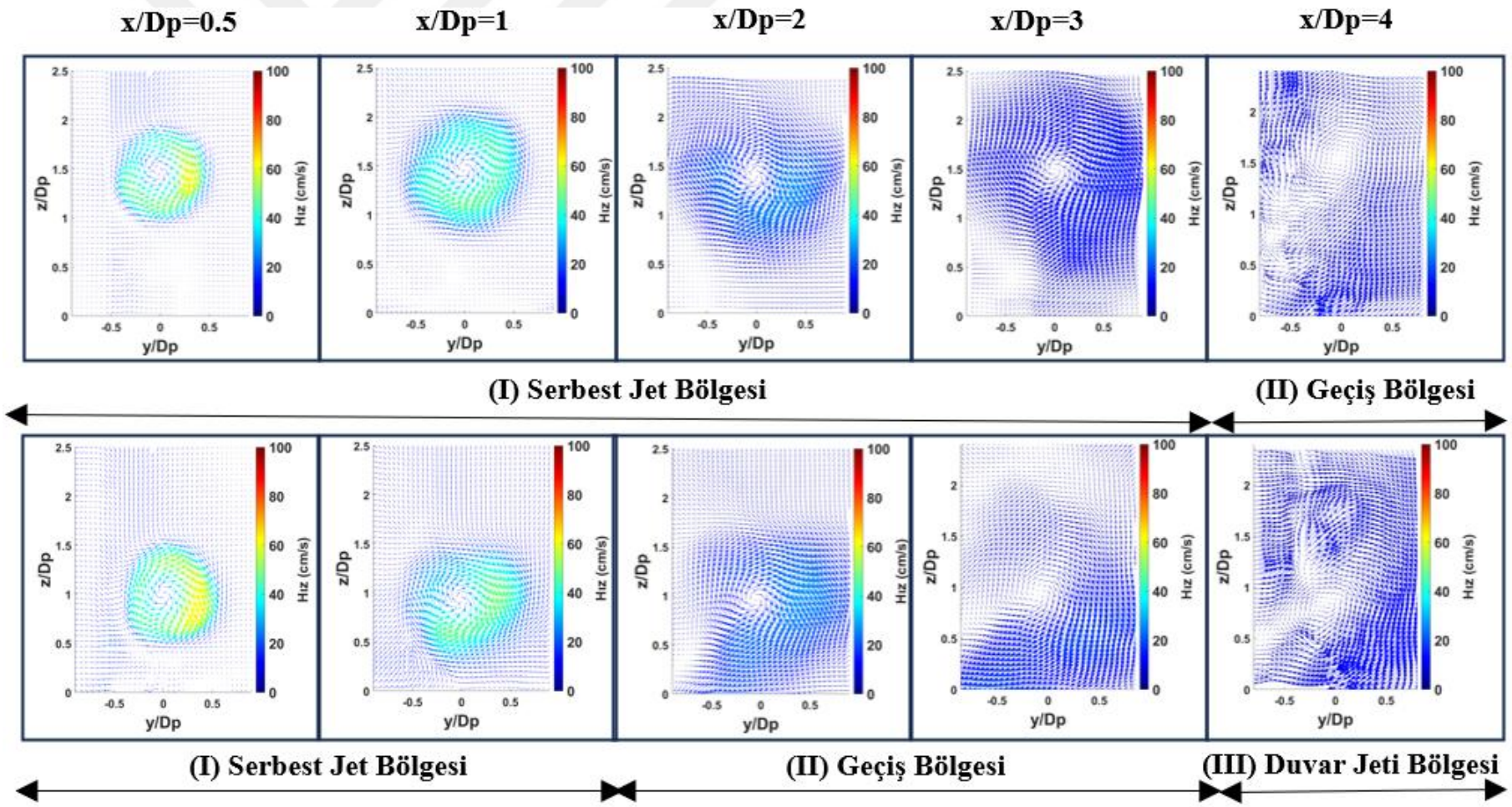
Şekil 4.72 D=6.5 cm, Rpm=670, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine akım çizgileri



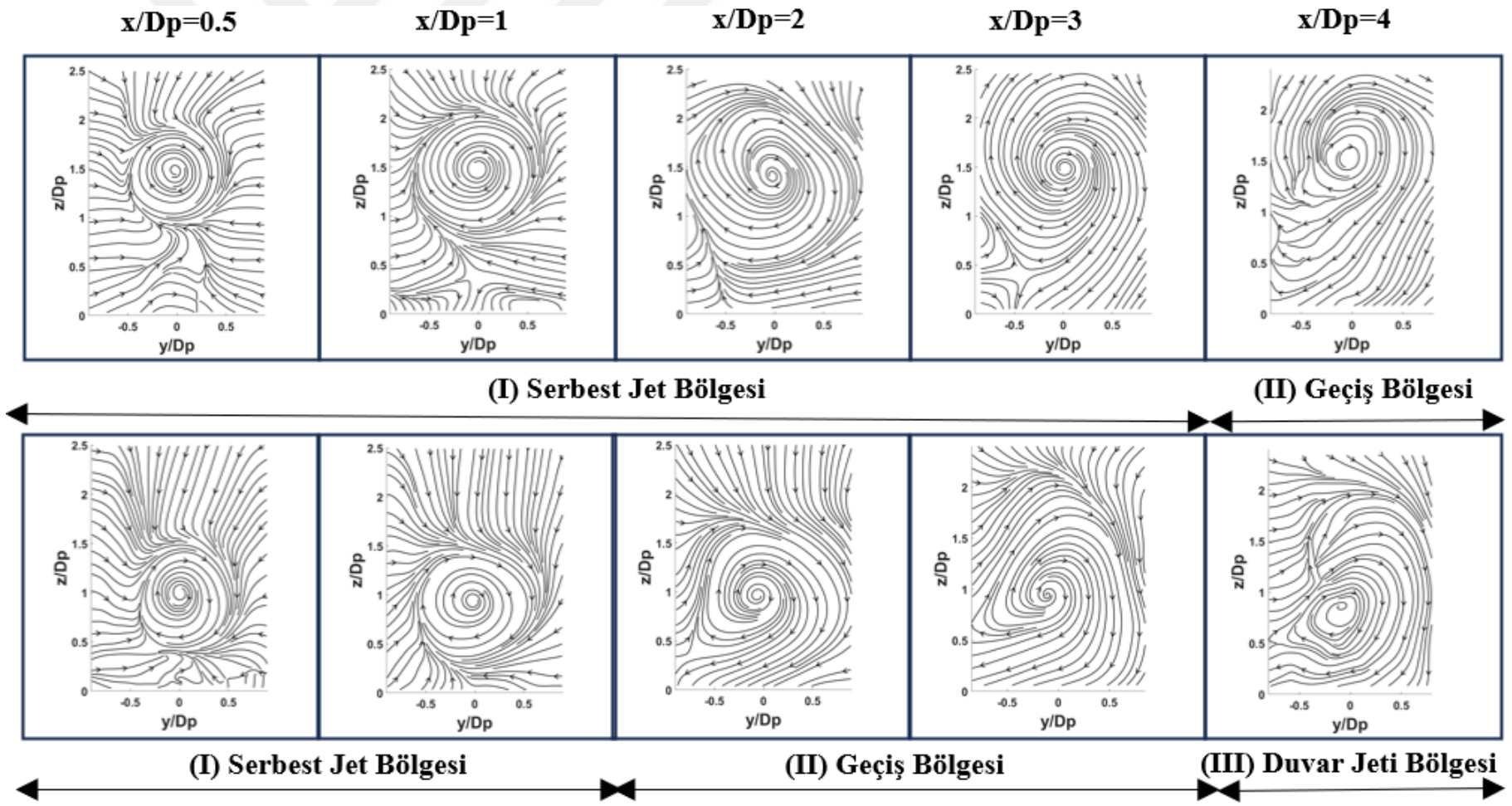
Şekil 4.73 D=6.5 cm, Rpm=745, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine ortalama hız alanları



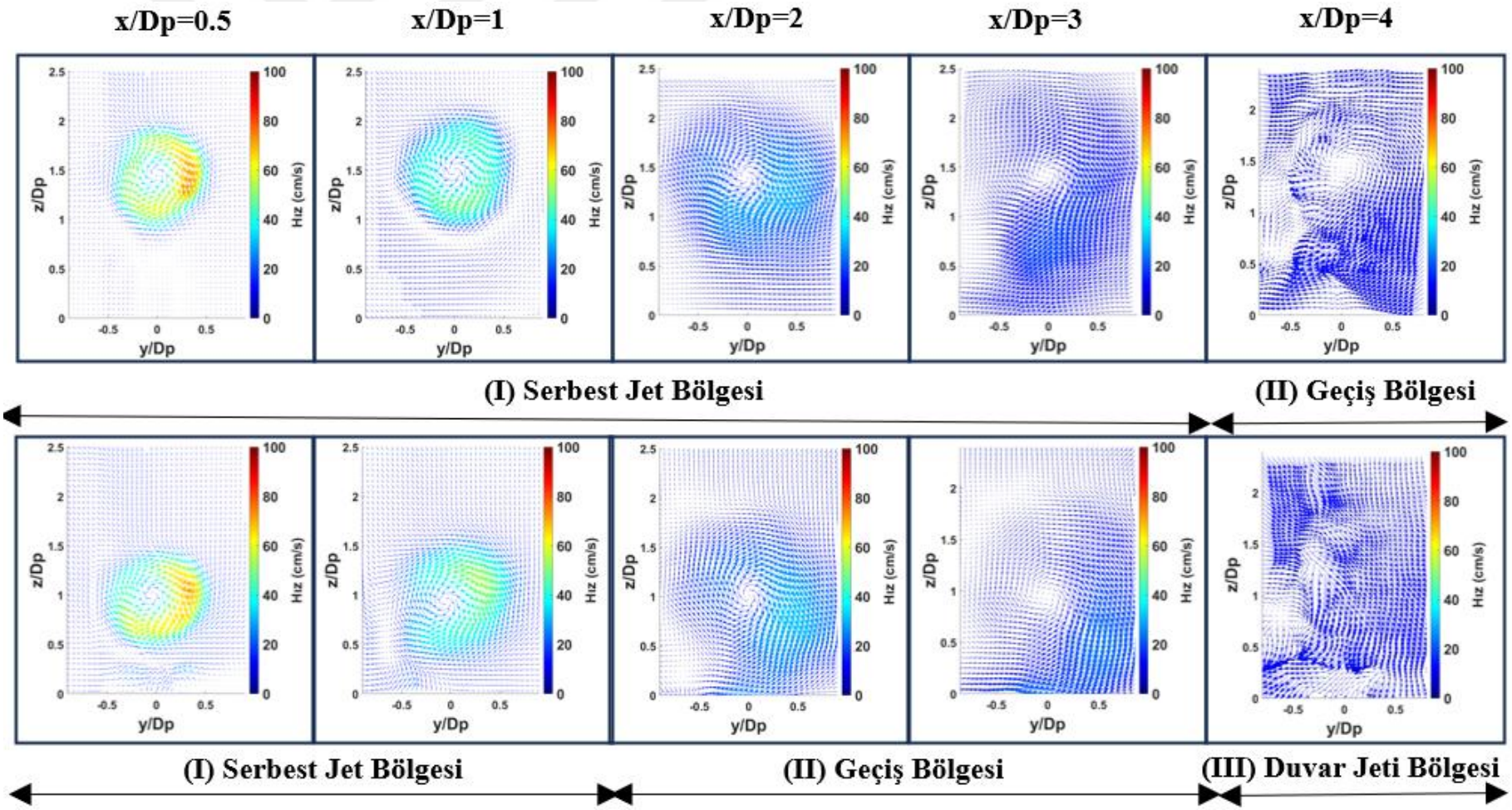
Şekil 4.74 D=6.5 cm, Rpm=745, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine akım çizgileri



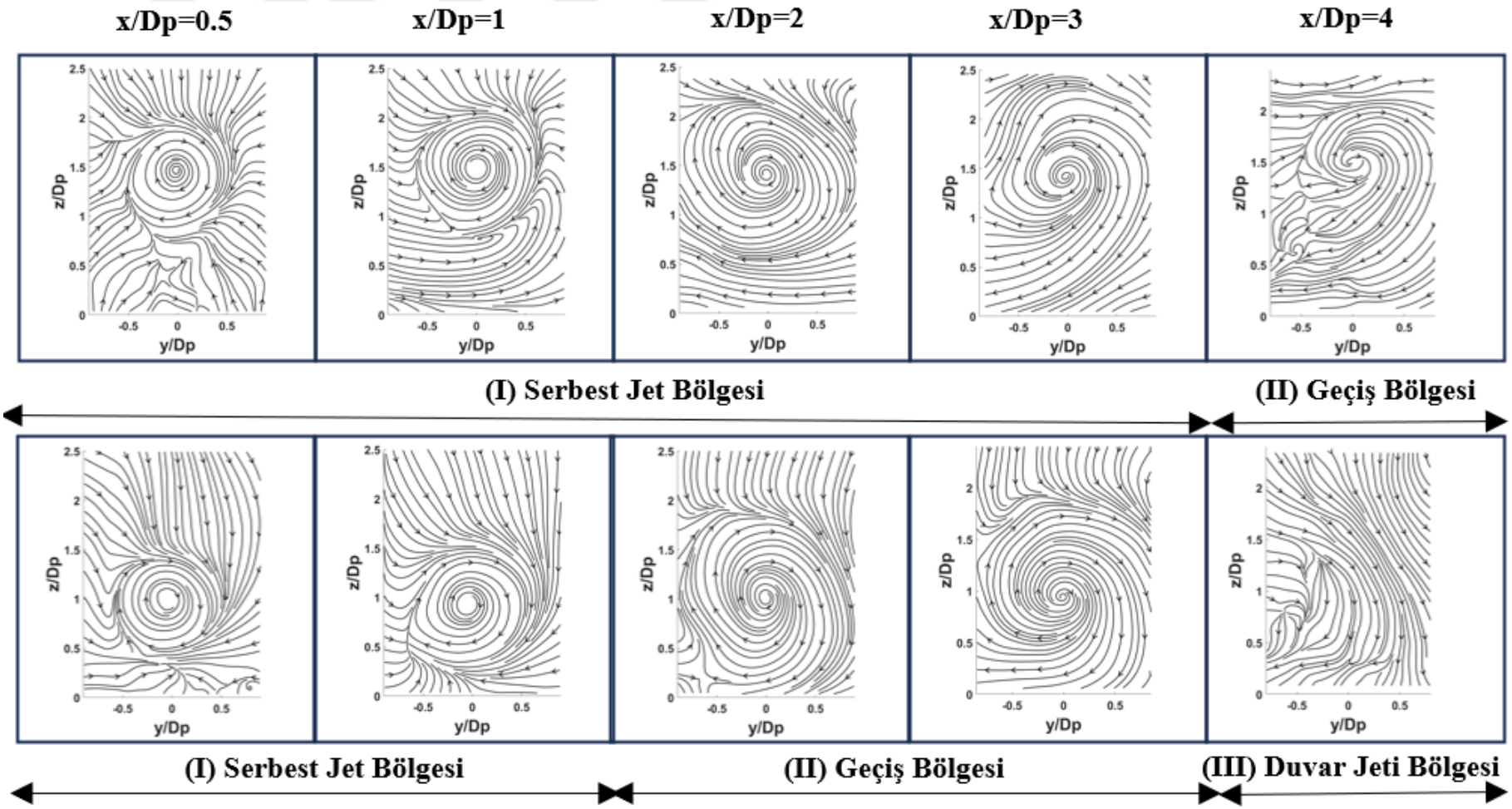
Şekil 4.75 D=10 cm, Rpm=590, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine ortalama hız alanları



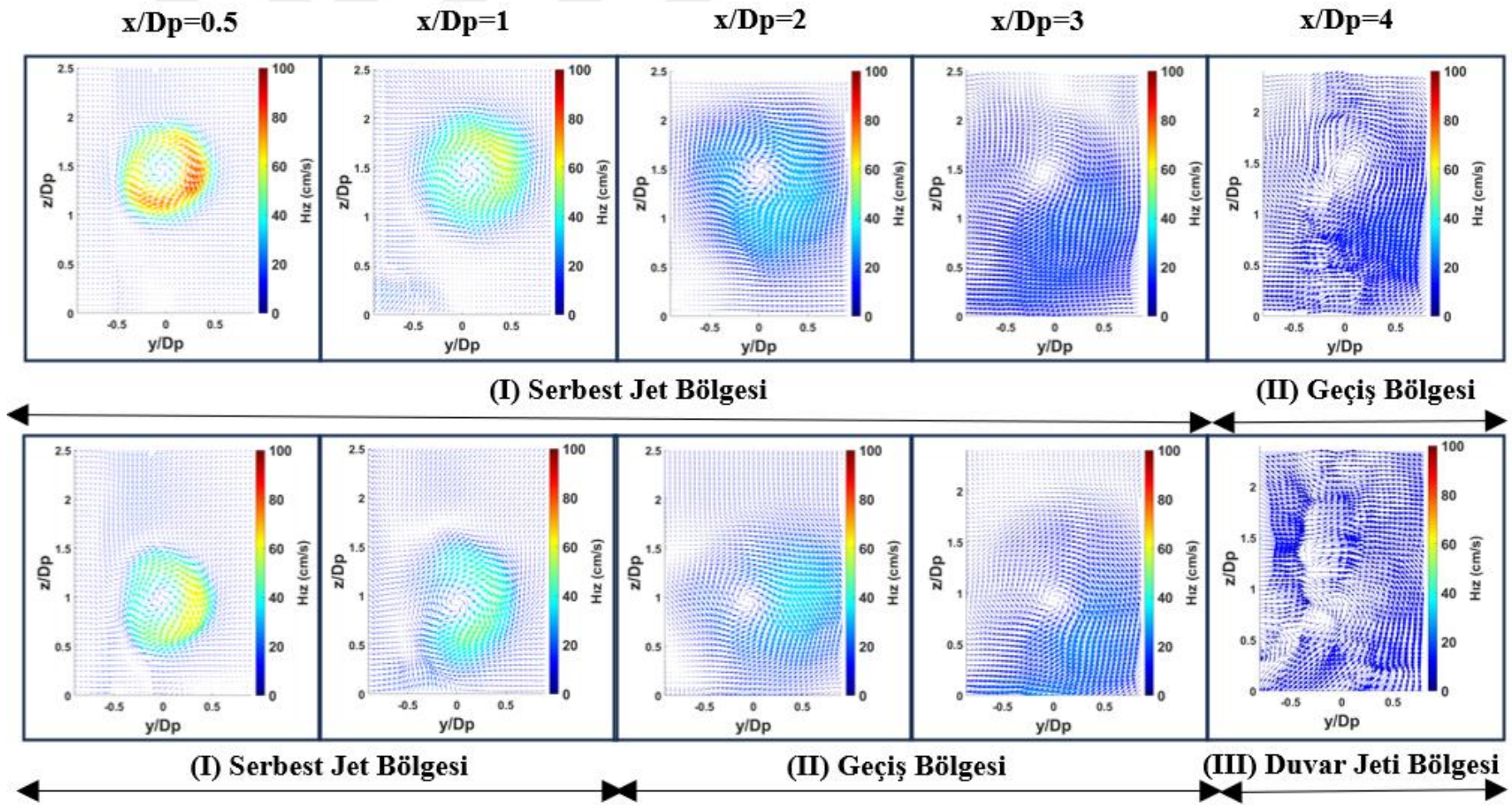
Şekil 4.76 D=10 cm, Rpm=590, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine akım çizgileri



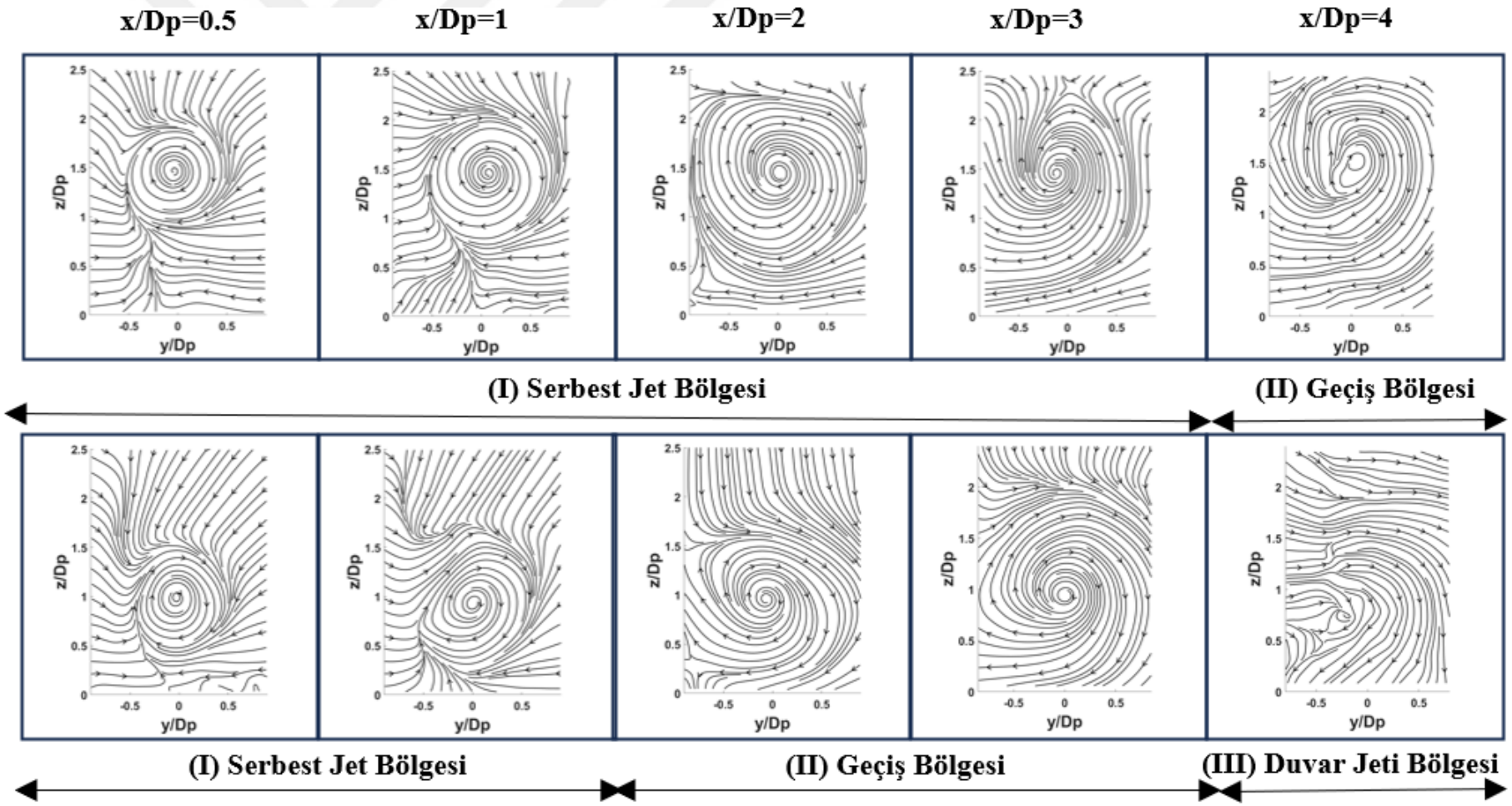
Şekil 4.77 D=10 cm, Rpm=670, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine ortalama hız alanları



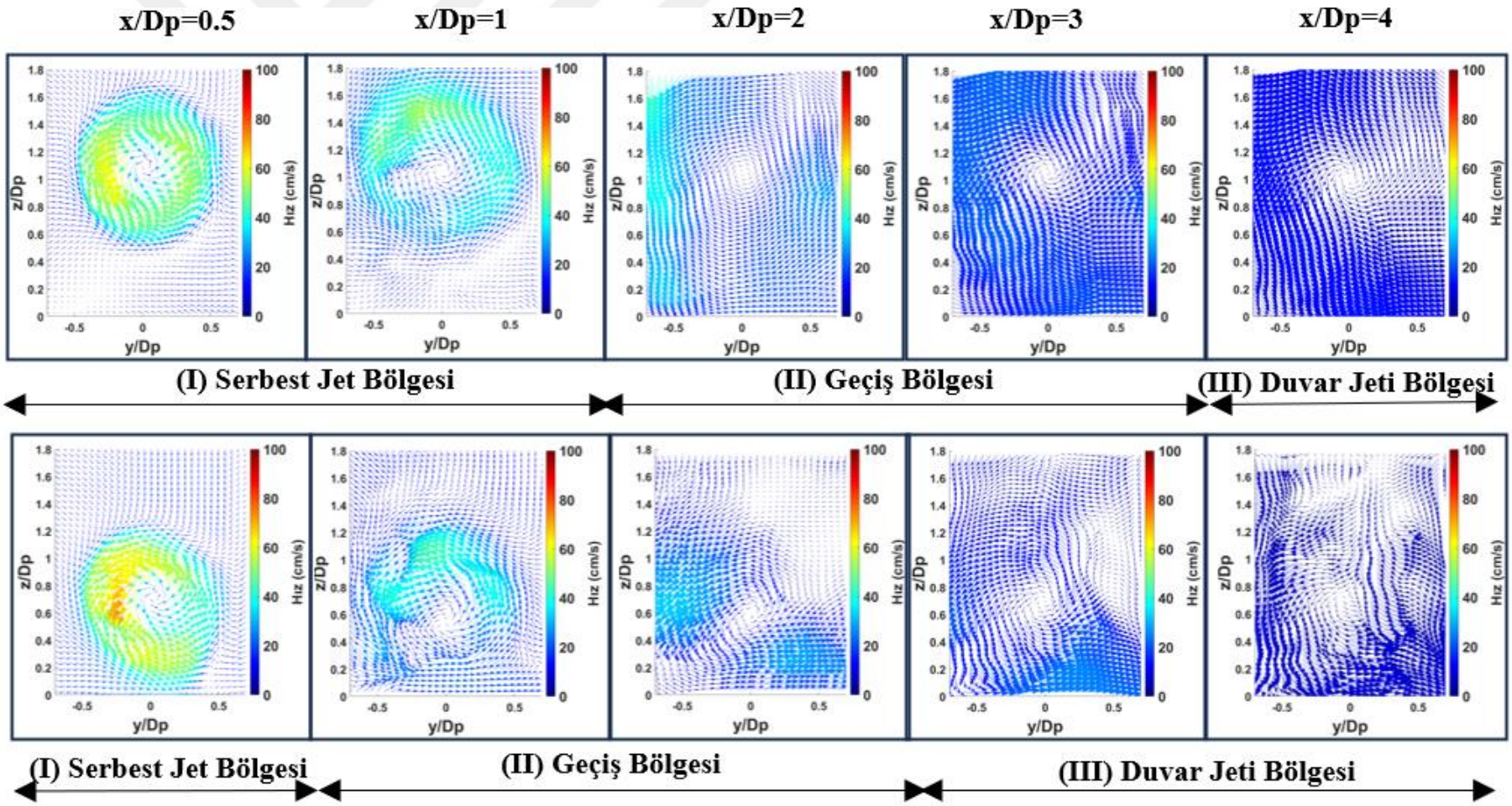
Şekil 4.78 D=10 cm, Rpm=670, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine akım çizgileri



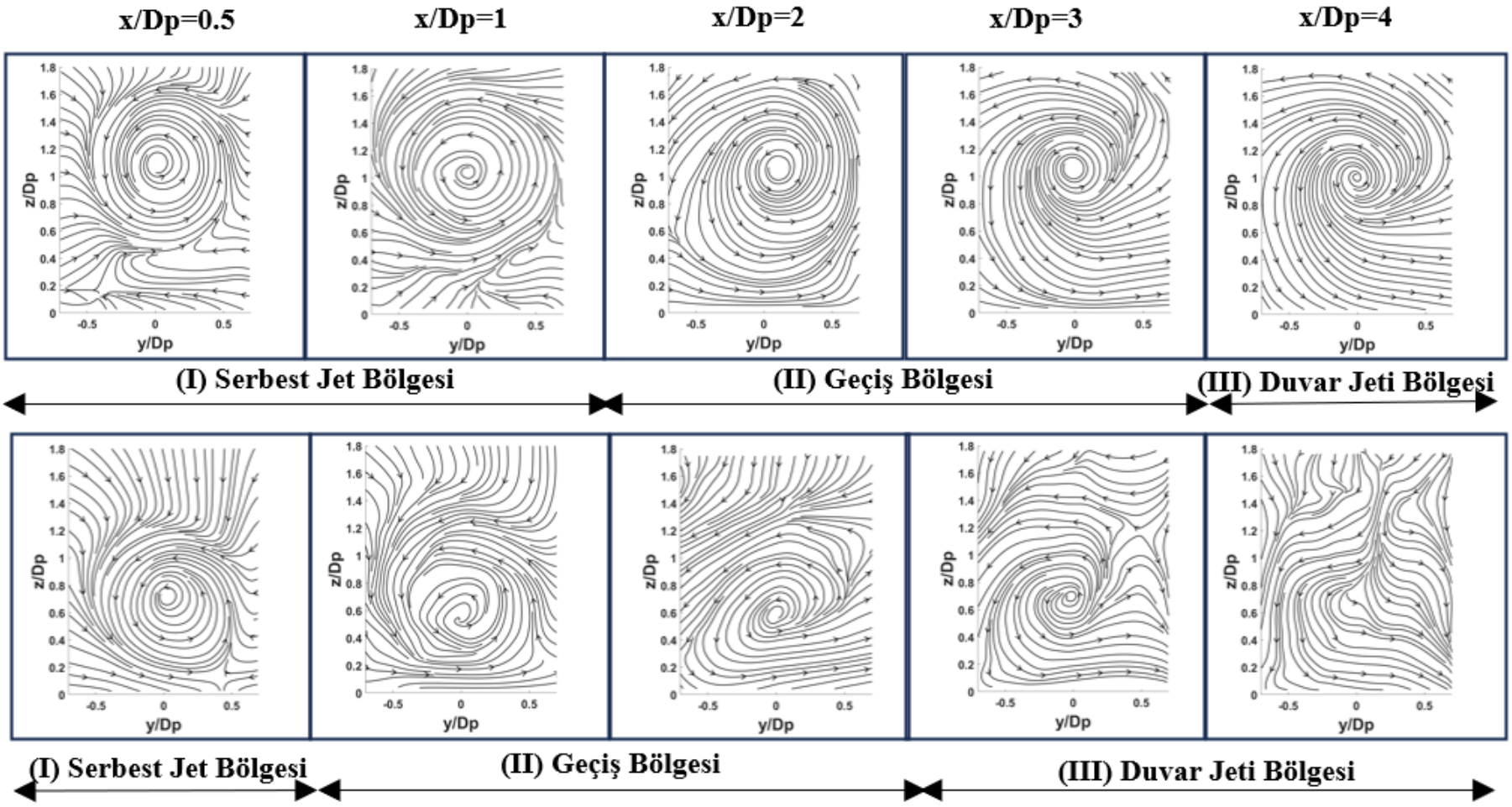
Şekil 4.79 D=10 cm, Rpm=745, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine ortalama hız alanları



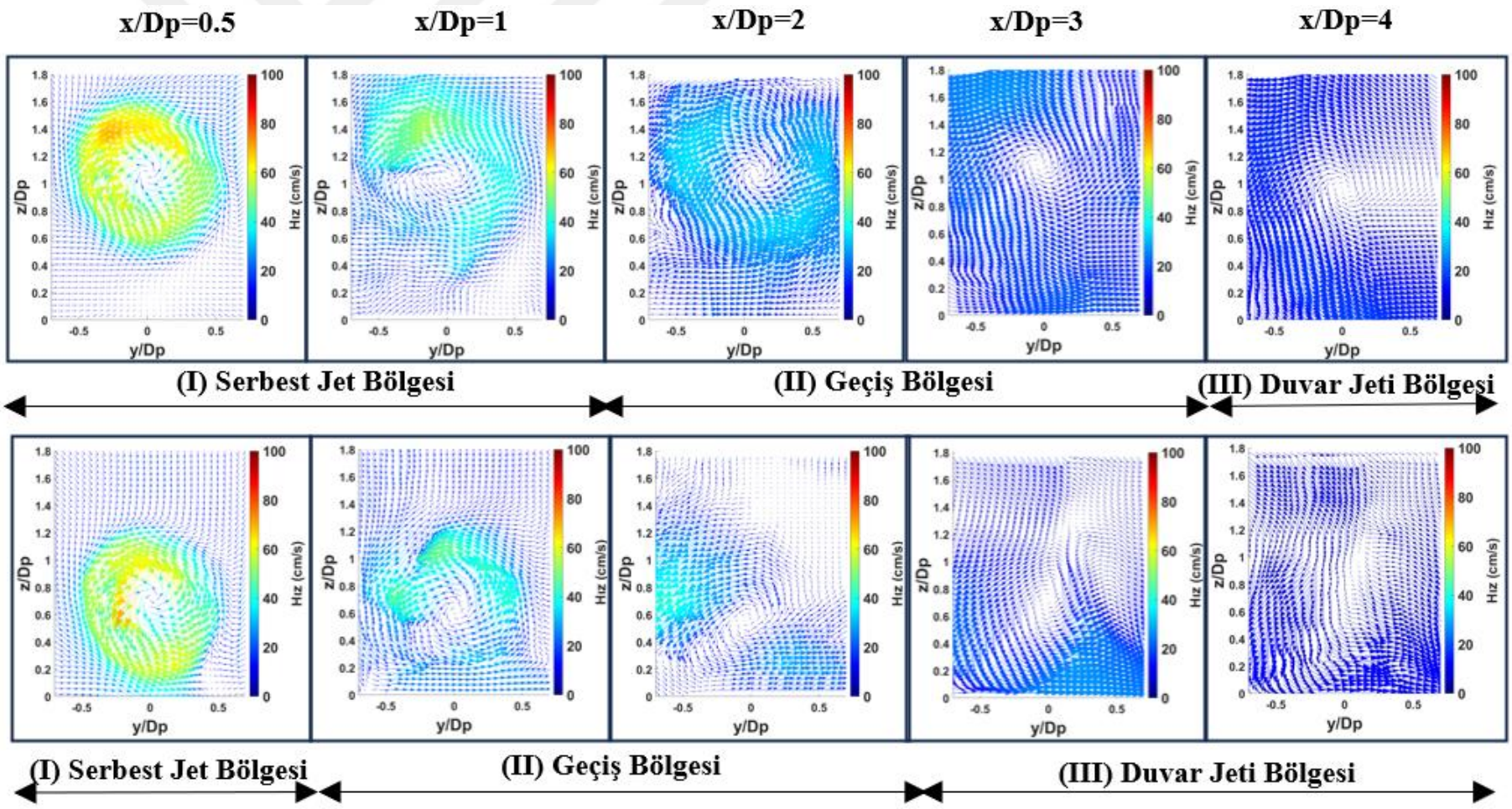
Şekil 4.80 D=10 cm, Rpm=745, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine akım çizgileri



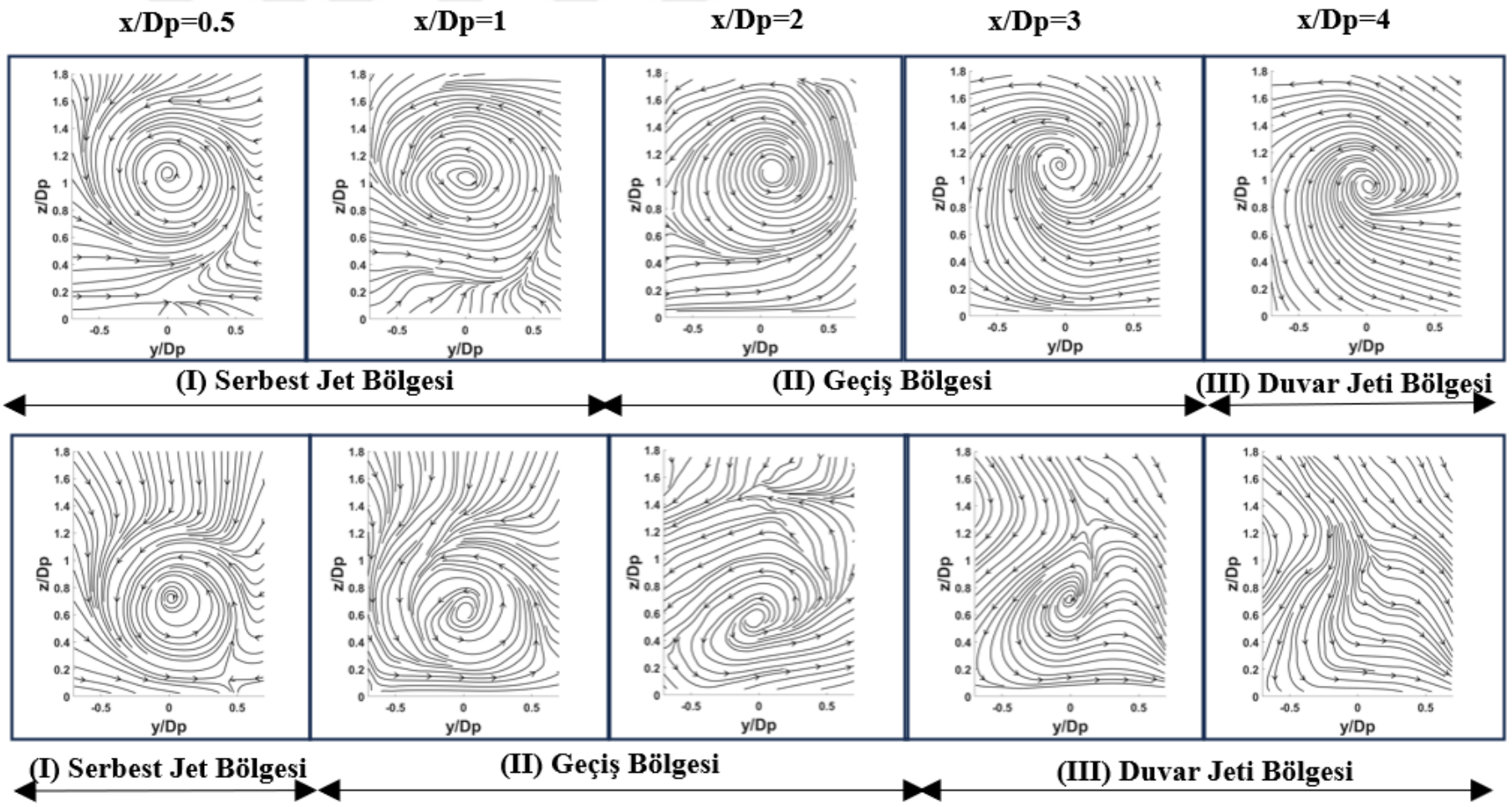
Şekil 4.81 D=13 cm, Rpm=590, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine ortalama hız alanları



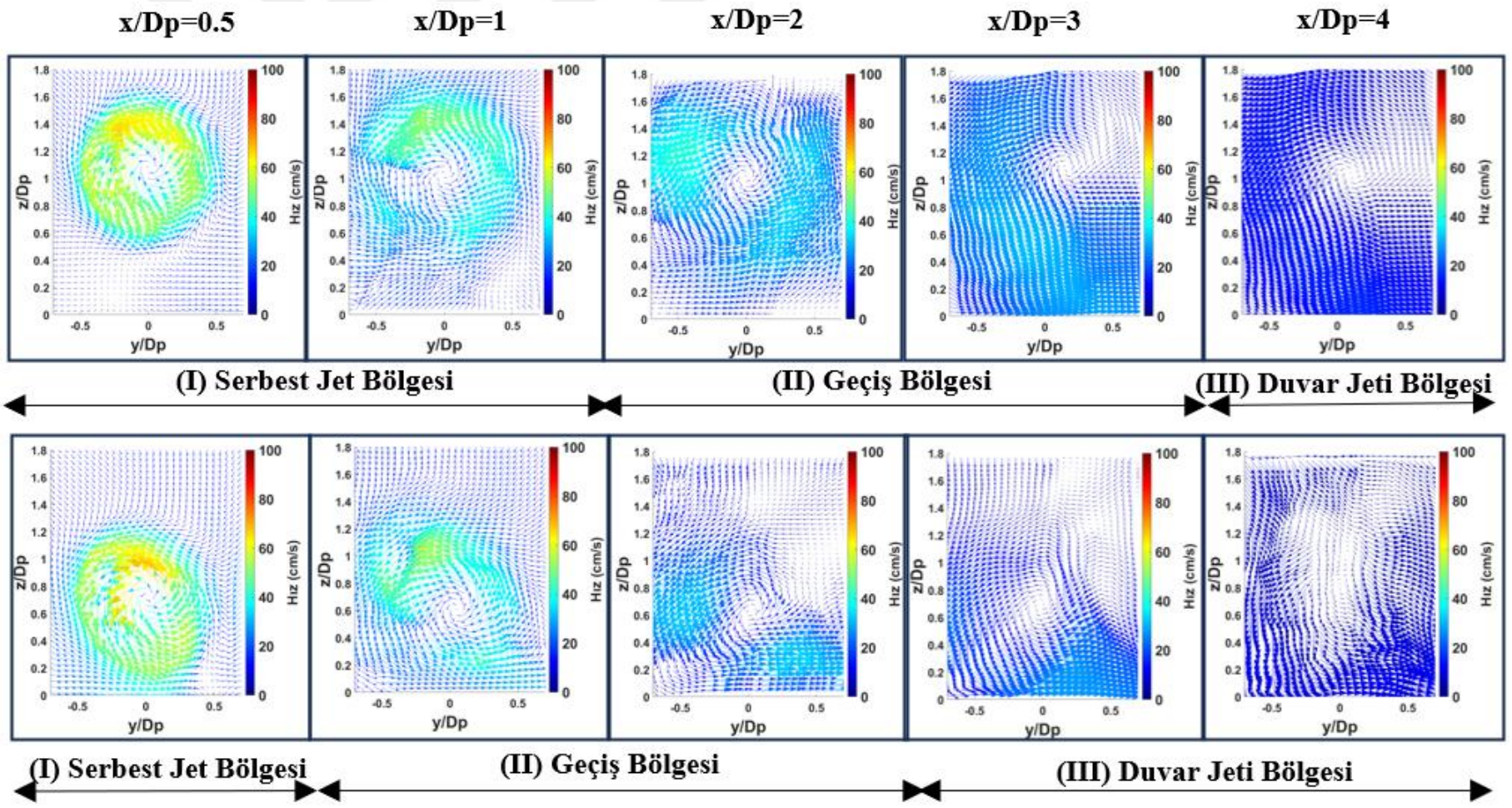
Şekil 4.82 D=13 cm, Rpm=590, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine akım çizgileri



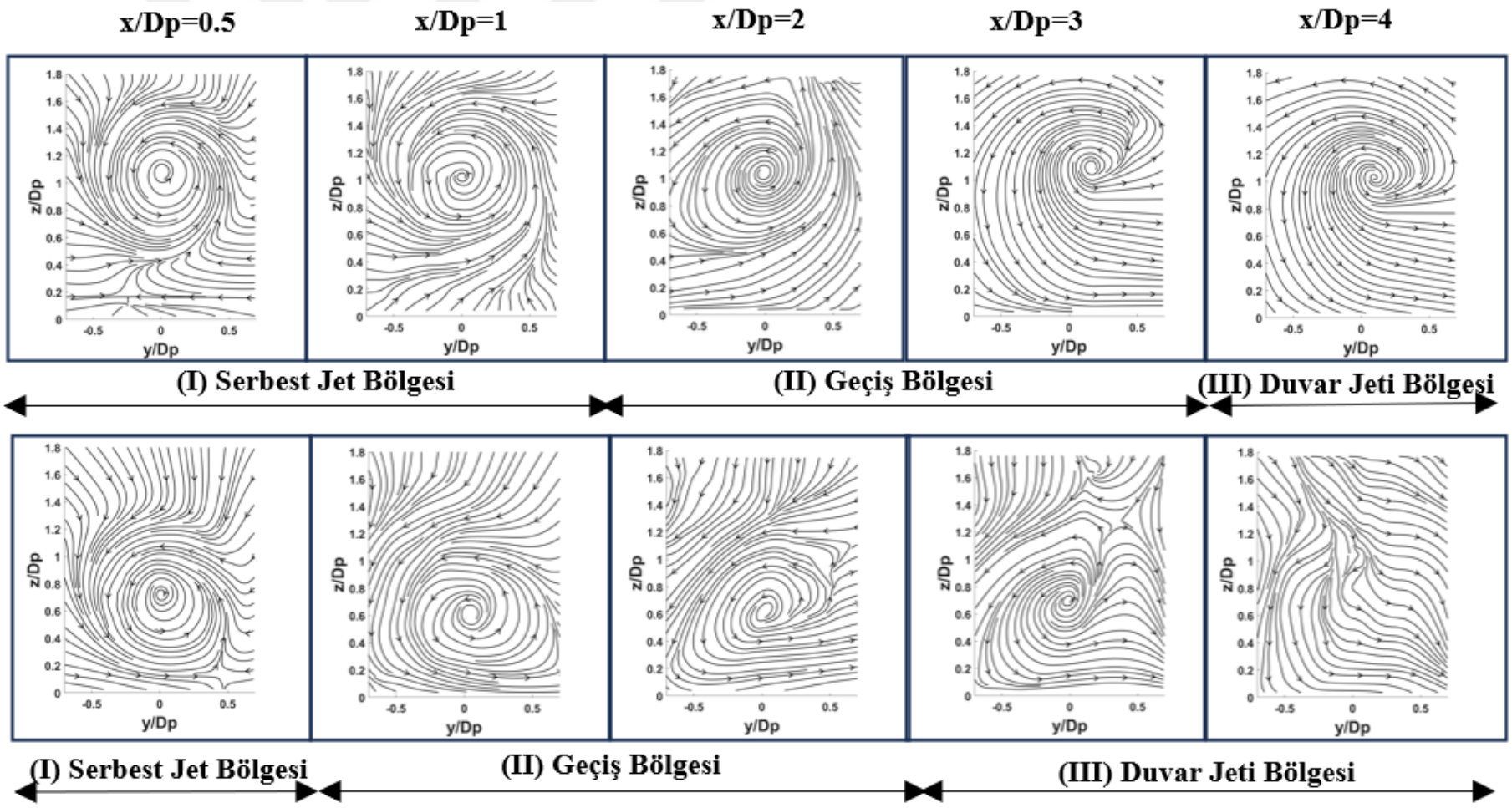
Şekil 4.83 D=13 cm, Rpm=670, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine ortalama hız alanları



Şekil 4.84 D=13 cm, Rpm=670, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine akım çizgileri



Şekil 4.85 D=13 cm, Rpm=745, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine ortalama hız alanları



Şekil 4.86 D=13 cm, Rpm=745, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) enine akım çizgileri

Serbest jet bölgesinde, jet henüz sınıra çarpmadan önce, enine düzlemde santrosimetrik bir vorteks yapısı sergilenmekte ve jetin çevresel yüzeyi etrafında simit biçiminde bir kayma tabakası oluşmaktadır. Bu durum, Hsieh vd. (2013) tarafından yayımlanan sınırlandırılmamış jet yapısıyla benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte, jet gövdesinin dışında ve tabana yakın dönen jetin alt kısmında düşük hızlı bir bölge gözlenmektedir. Oysa sınırlandırılmamış jet durumunda, Hsieh vd. (2013), çevredeki akışkanın jet çekirdeğine eşit olarak çekildiğini ve bu nedenle jetin çevresel yüzeyi etrafında hız dağılımının neredeyse tekdüze olduğunu belirtmiştir. Bu farklılık, muhtemelen jetin alt kısmındaki sürüklenmeyi sınırlayan rijit taban nedeniyle ortaya çıkmakta ve burada daha düşük hızların oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, Wei (2018) tarafından yapılan gözlemlerle de örtüşmektedir. Ayrıca mesafe (x/D_p) arttıkça vorteks gücü ve büyüklüğünün azaldığı gözlemlenmektedir.

Geçiş bölgesinde, D=10 cm ve D=13 cm pervane çaplarında yapılan ölçümlerde, vorteks yapısının rijit taban varlığı nedeniyle bozulmaya başladığı ve dolayısıyla dairesel formunu koruyamadığı gözlemlenmiştir. G=15 cm açıklık yüksekliğinde, pervane kanadının dönüş yönüne bağlı olarak aşağı doğru hareket ettiği çeyrekte daha yüksek hız bölgeleri oluşmakta; jet ilerledikçe, kanadın yukarı hareket ettiği çeyrekte ise daha düşük hızlar gözlenmektedir ve jetin zamanla tabana bağlı bir şekil almaktadır. Pervanenin tabana daha yakın olduğu G=10 cm açıklık yüksekliğine sahip, $G/D_p < 1$ olduğunda ise jetin geçiş bölgesi daha belirgin şekilde gözlenmiştir. Özetle, jet çarpmadan sonra yukarı doğru hareket edememekte ve tabana bağlanmaktadır. Bu gözlem, Wei (2018) tarafından bildirilen "jetin çarpmadan sonra yukarı yönde hareket edememesi" bulgusu ile tutarlıdır. Jetin tabana bağlanmasının temel nedeni, rijit tabanın jetin enerjisini sınırlaması olabilir.

Duvar jeti bölgesi Şekil 4.75-Şekil 4.80 (G=10 cm ölçümleri) ile Şekil 4.81-Şekil 4.86 arasında görülmektedir ve bu bölgede vorteks etkisinin özellikle merkez düzlem (y=0) boyunca ihmal edilebilir düzeye inmektedir ve G=15 cm pervane açıklığında, sınır tabakası yakınlarında daha yüksek hız bölgelerinin varlığını sürdürdüğü gözlenmiştir. G=10 cm açıklığında ise vorteks yapısı merkezi düzlemin her iki yanında simetrik olmayan biçimde iki zıt yönlü ikincil vortekse ayrılmaktadır. Bu gözlem, Wei (2018) tarafından sınıra yakın bölgelerde

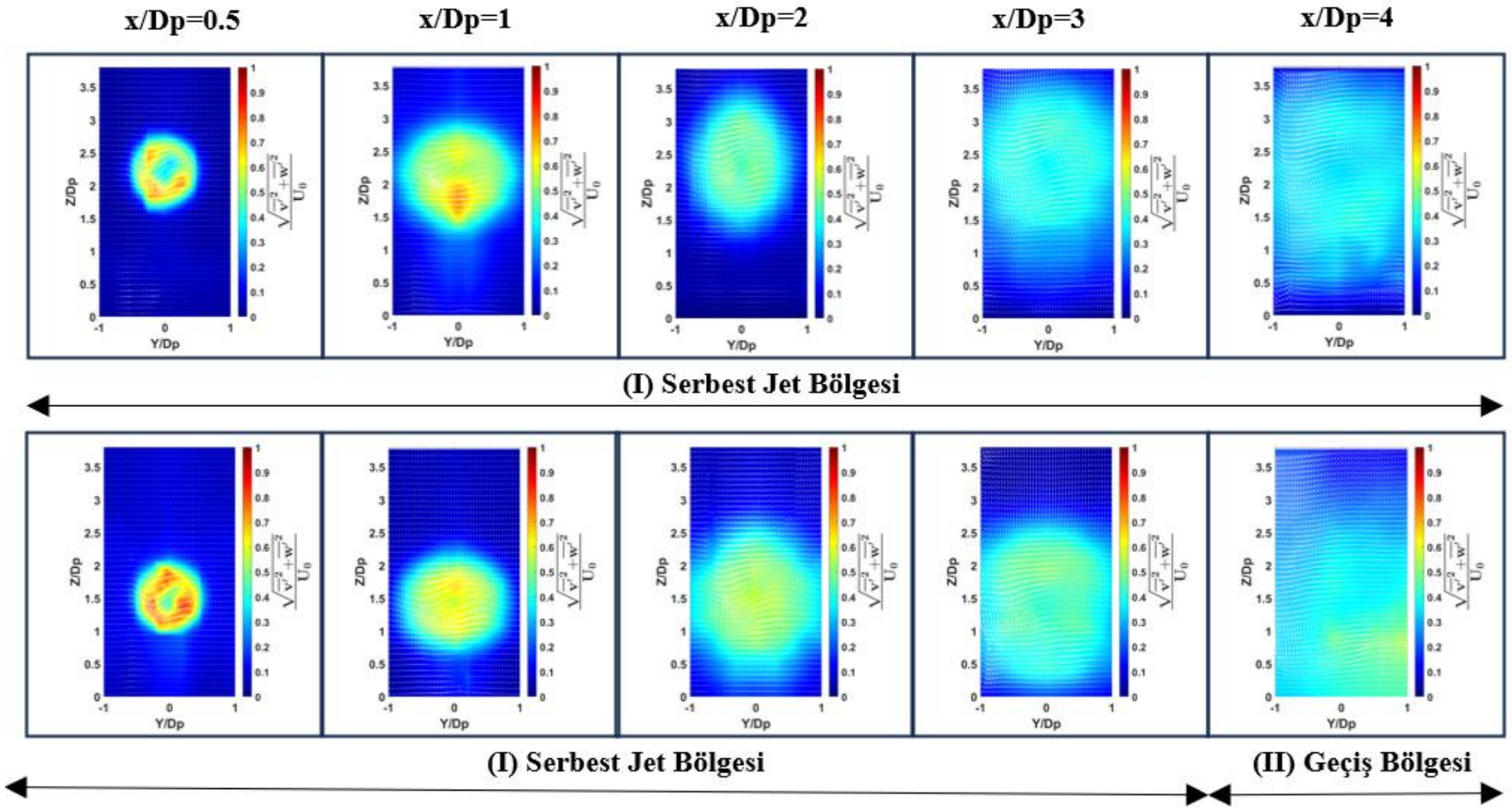
tanımlanan yanal akımların varlığıyla ve bu akımların jeti merkezi düzlemden yatay olarak uzaklaştırarak, akım sürekliliğini sağlamak amacıyla akımın tabana yönelmesi gözlemi ile örtüşmektedir. Pervane jetinin asimetrik vorteks yapısı, merkezi düzlemin her iki tarafında gözlenen yanal akım farklılıklarının temel sebebidir. x/D_p = 4 konumunda, daha büyük açıklık yüksekliğine sahip deneylerdeki gözlemlere benzer şekilde düşük hız büyüklükleri tespit edilmiştir; bu durum, söz konusu uzaklıkta enine bileşenin ihmal edilebileceğini ve akım yapısının yarı-iki boyutlu karakter kazandığını göstermektedir.

4.4.2 Eşdeğer Türbülans Yoğunlukları

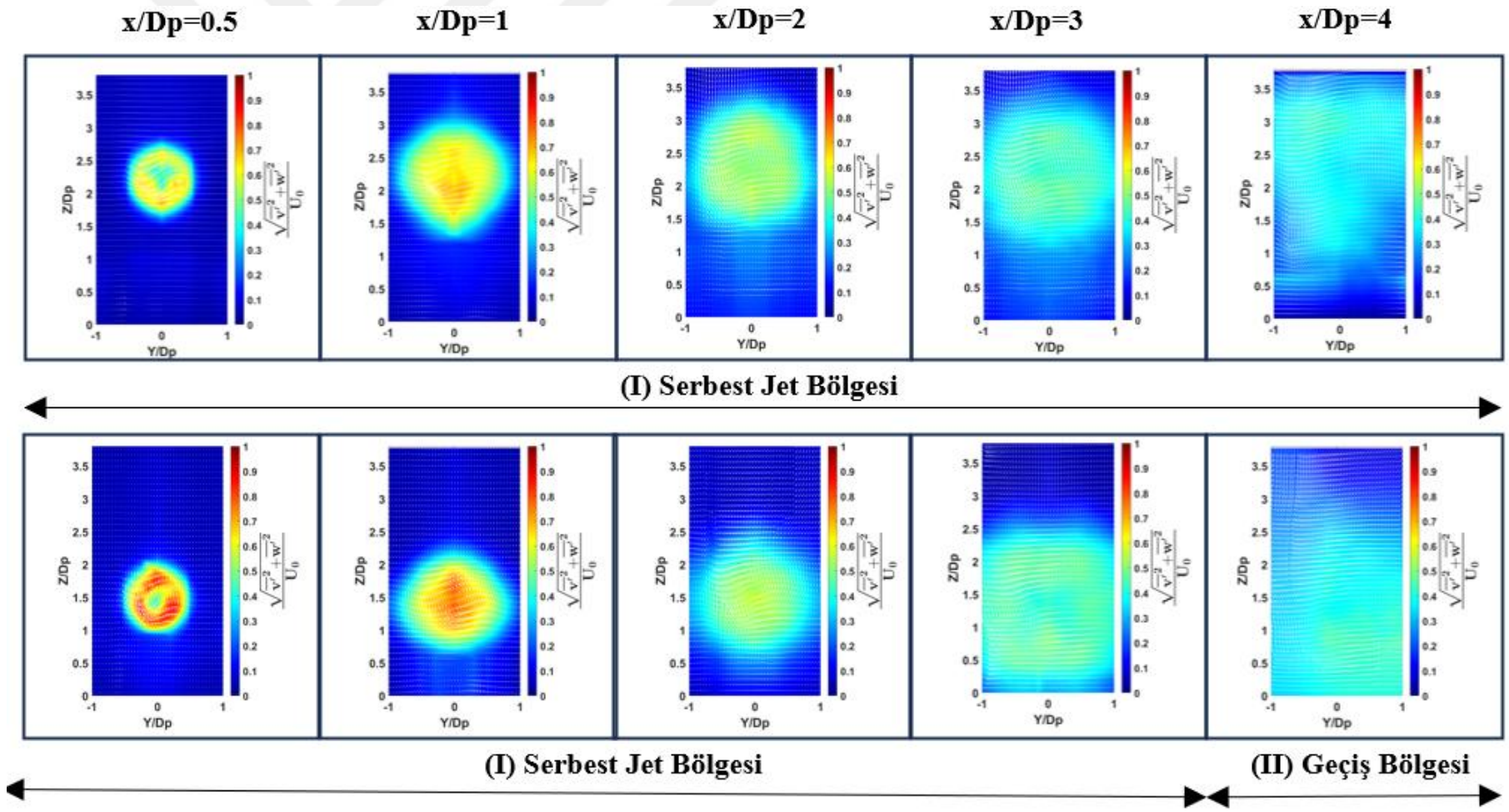
Bu bölümde, yukarıda belirtilen enine düzlemlere ait eşdeğer türbülans yoğunlukları, $I = \frac{\sqrt{\bar{v}^2 + \bar{w}^2}}{U_0}$, Şekil 4.87-Şekil 4.95 arasında sunulmaktadır. Grafikler incelendiğinde, açıklık yükseklik farkının türbülans yoğunluğu üzerinde belirgin bir büyüklük etkisi oluşturmadığı gözlemlenmiştir. $z/D_p < 1$ değerindeki ölçümler incelendiğinde, pervane yakınındaki maksimum türbülans yoğunluğunda önemli bir azalma tespit edilmemiştir. Bu gözlem, akım yönündeki gözlemlerle paralellik göstermektedir. Bu durumun olası nedeni, enine düzlemde vorteks etkilerinin baskın türbülans kaynağı olarak rol oynaması ve türbülans yoğunluğunun pervane dönüş hızına bağlı olarak değişmesidir. Pervane dönüş hızı arttıkça türbülans yoğunluğunda net bir artış gözlemlenmektedir. Jet akımı ilerledikçe ise, azalan vorteks etkisiyle birlikte türbülans yoğunluğunda bir azalma görülmektedir; bu durum, literatürdeki diğer çalışmalarla uyumludur.

Türbülans yoğunluğu alanının dağılımı, ortalama akım yapısıyla tutarlı bir görünüm sergilemektedir. $x = 1\ D_p$ konumuna kadar vorteks etkisinin halen güçlü bir şekilde varlığını sürdürmesi yüksek türbülans yoğunluğu göstermesine neden olmaktadır. Bu durum, açıklık yüksekliğinden bağımsız olarak gözlemlenmektedir. Ancak açıklık yüksekliği düşük olan durumlarda, jetin ilerlemesiyle birlikte rijit taban vorteks halkasını bozmakta ve bu da türbülansın daha geniş alanlara yayılmasına neden olmaktadır. $x = 2D_p$ konumunda, vorteks hareketi sınır etkisiyle kesintiye uğramaktadır ve yüksek türbülans yoğunluğu jetin difüzyon hareketiyle birlikte yayılmaktadır. $x = 3D_p$'nin ötesinde ise, türbülans yoğunluğunun ölçüm alanı içerisinde neredeyse homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir. Bununla

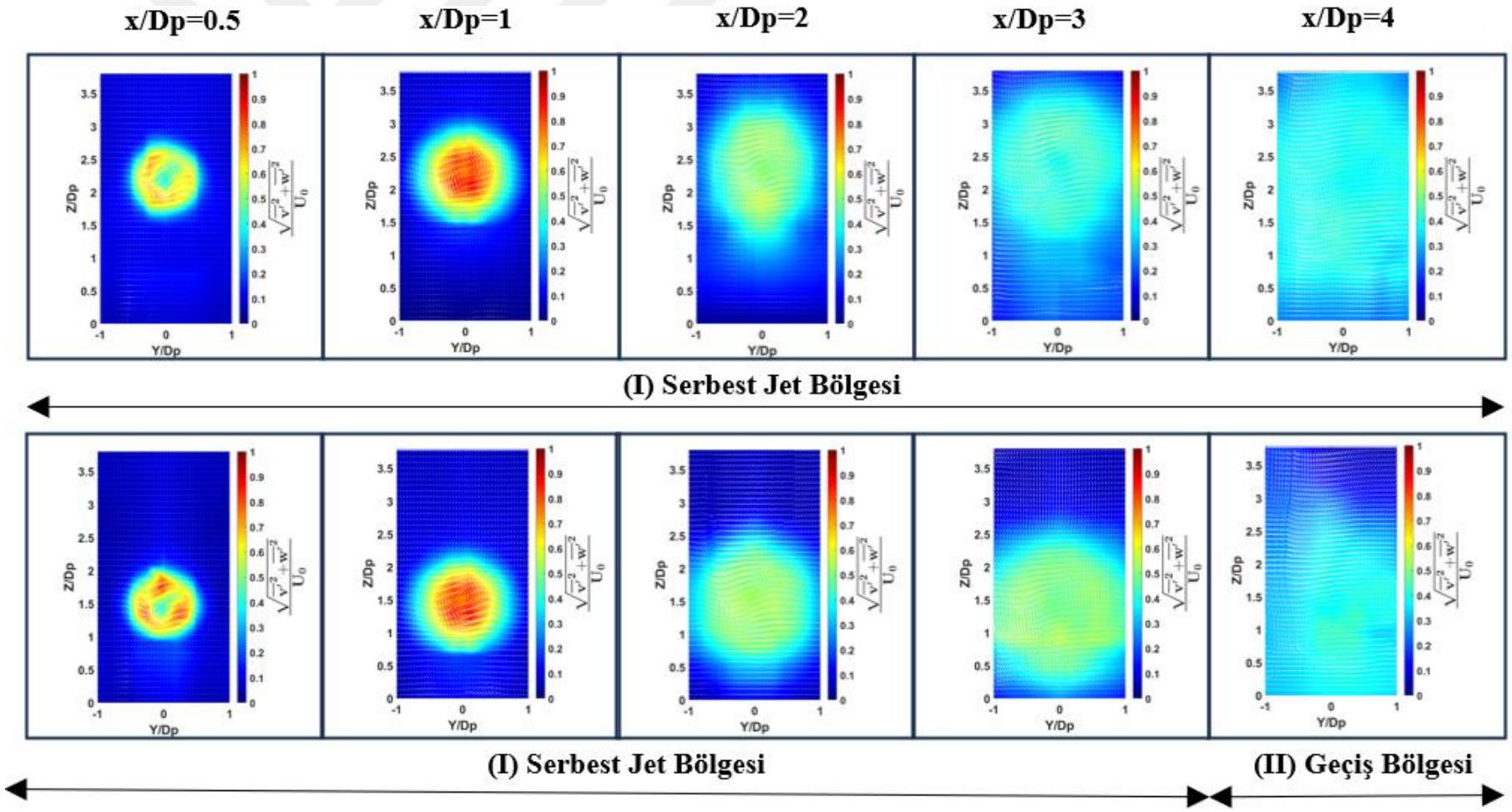
birlikte, açıklık yüksekliği düşük olan ölçümlerde taban etkisiyle türbülansın sınıra bağlandığı ve dikey yöndeki jet difüzyonunun önemli ölçüde sınırlandığı görülmektedir.



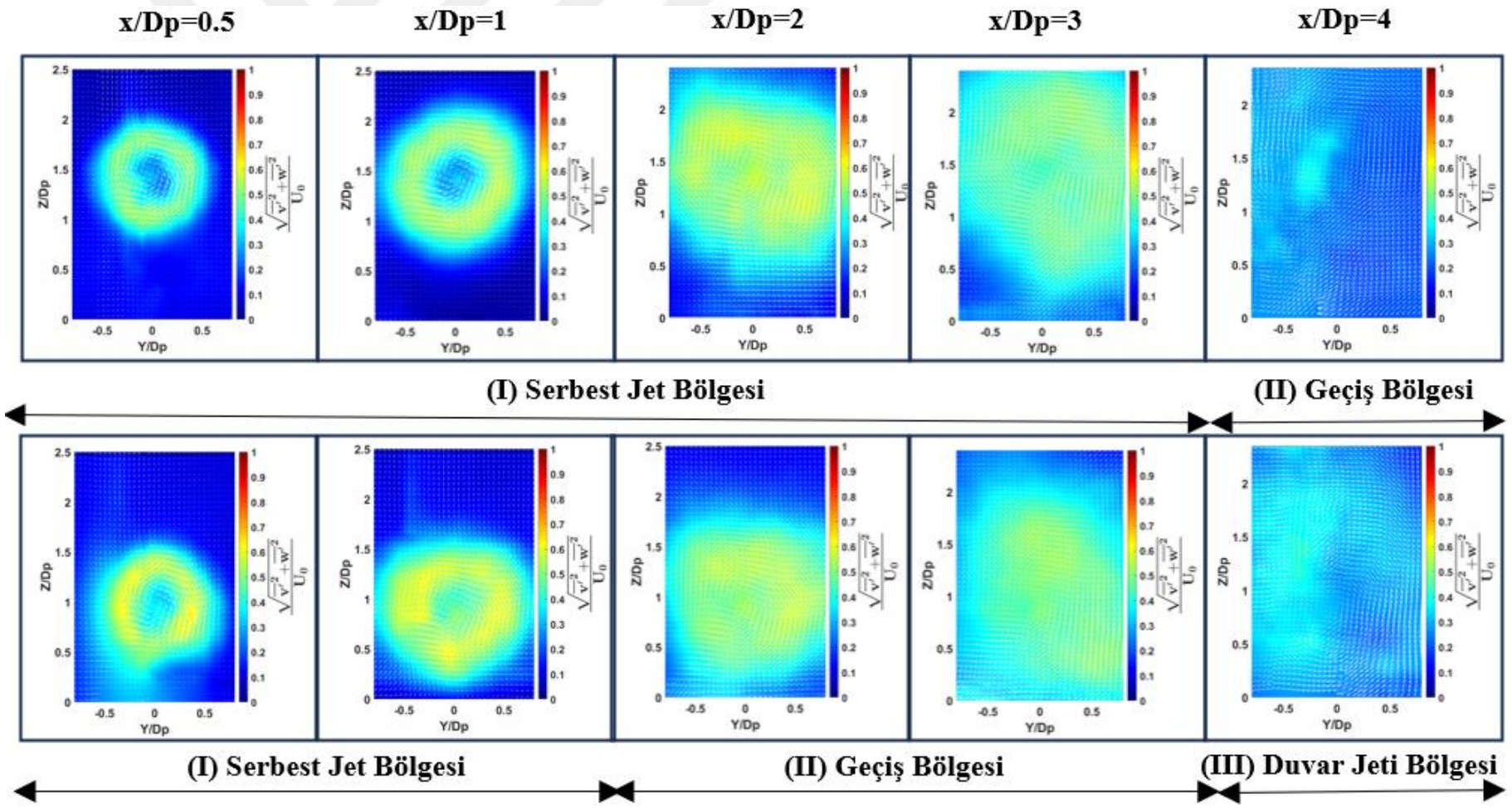
Şekil 4.87 D=6.5 cm, Rpm=590, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) için eşdeğer türbülans yoğunlukları



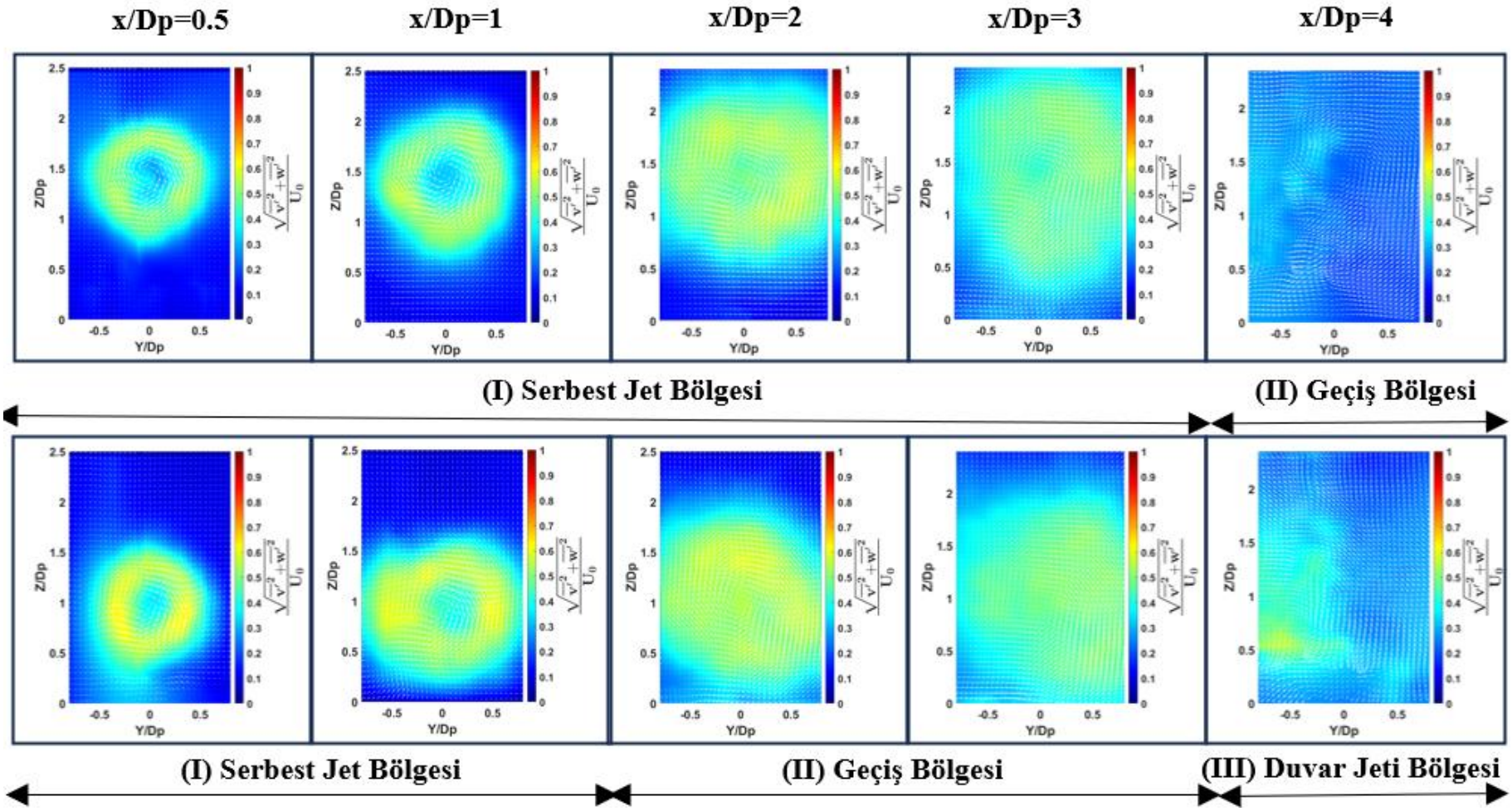
Şekil 4.88 D=6.5 cm, Rpm=670, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) için eşdeğer türbülans yoğunlukları



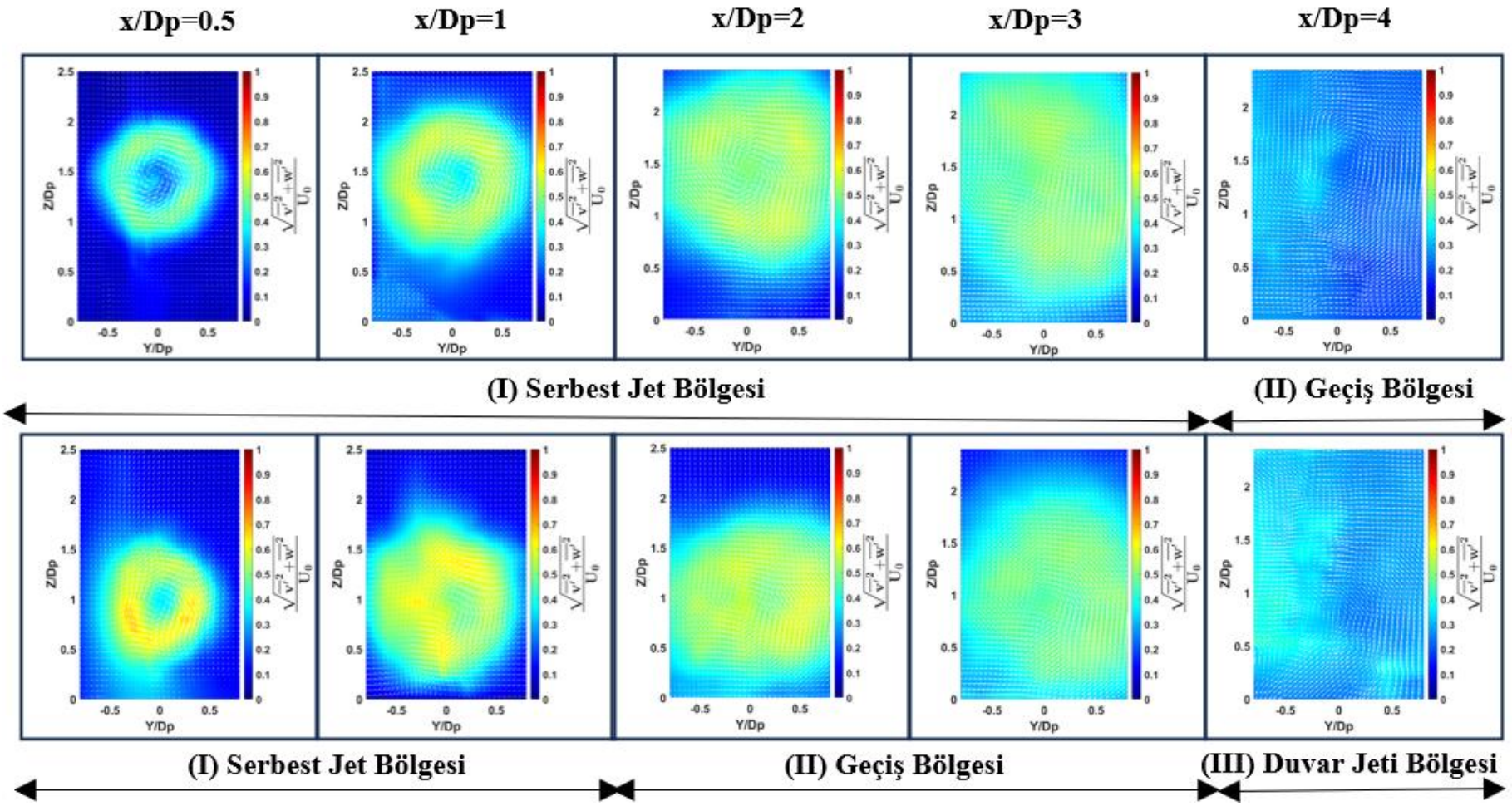
Şekil 4.89 D=6.5 cm, Rpm=745, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) için eşdeğer türbülans yoğunlukları



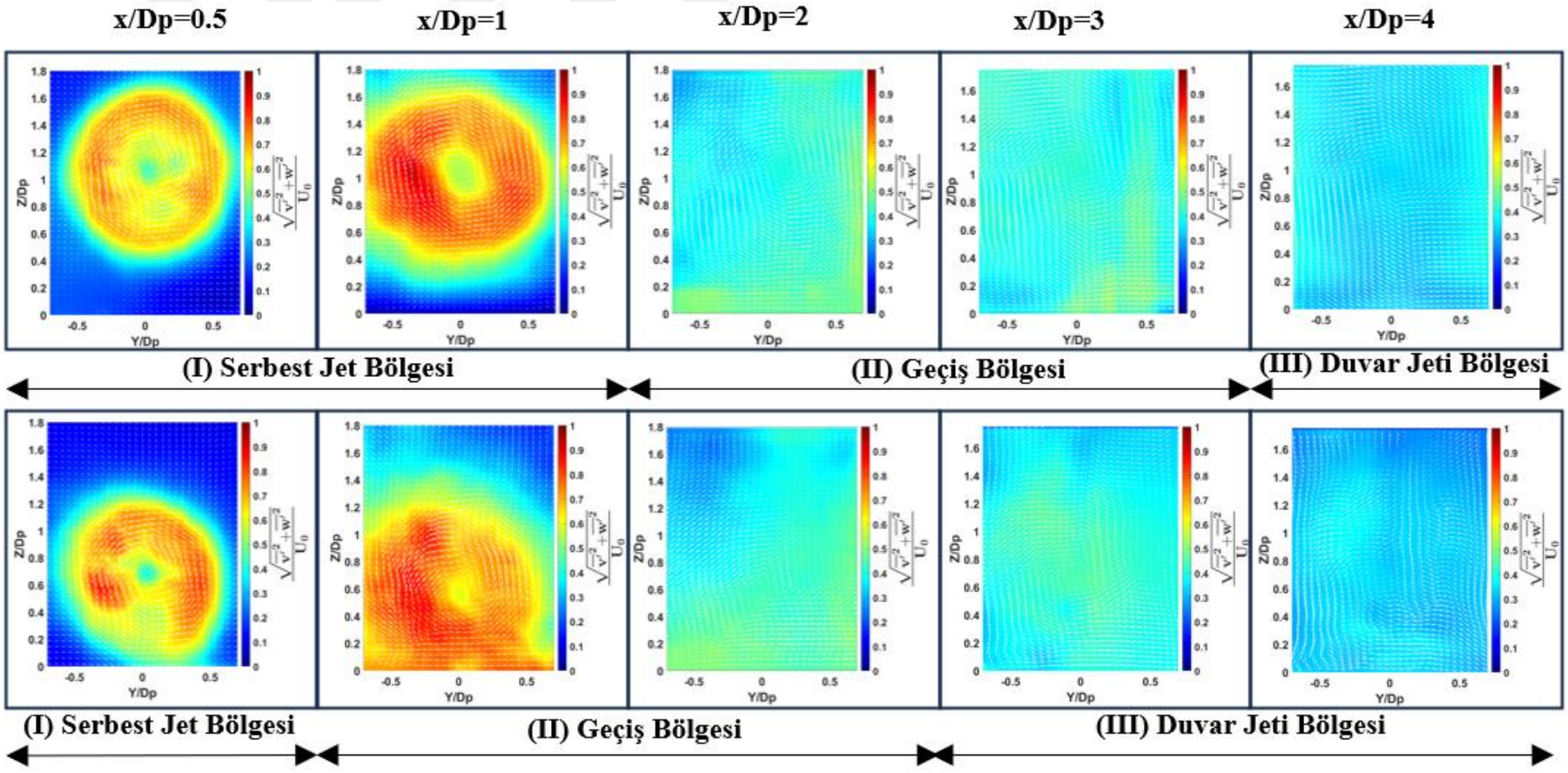
Şekil 4.90 D=10 cm, Rpm=590, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) için eşdeğer türbülans yoğunlukları



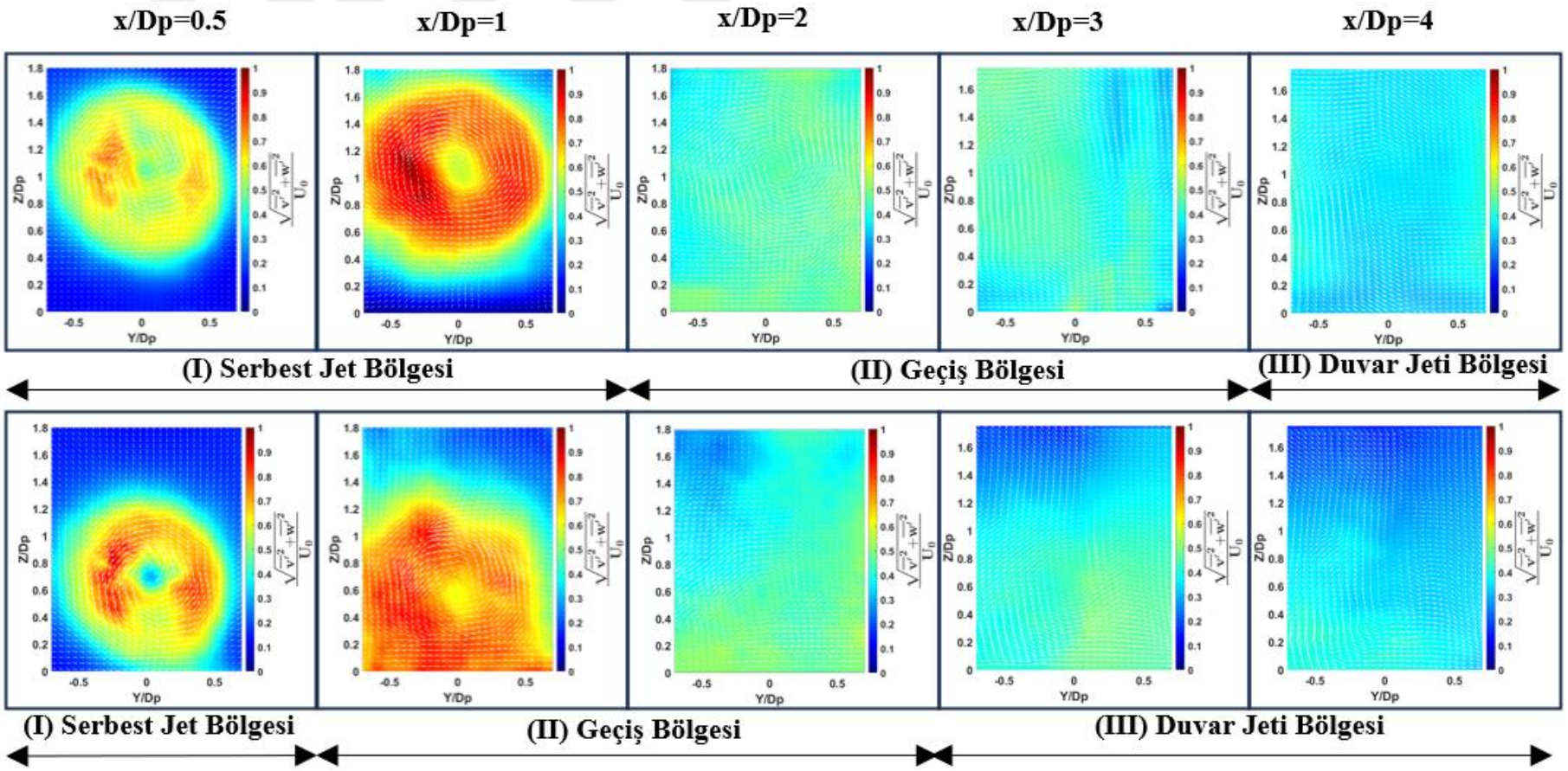
Şekil 4.91 D=10 cm, Rpm=670, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) için eşdeğer türbülans yoğunlukları



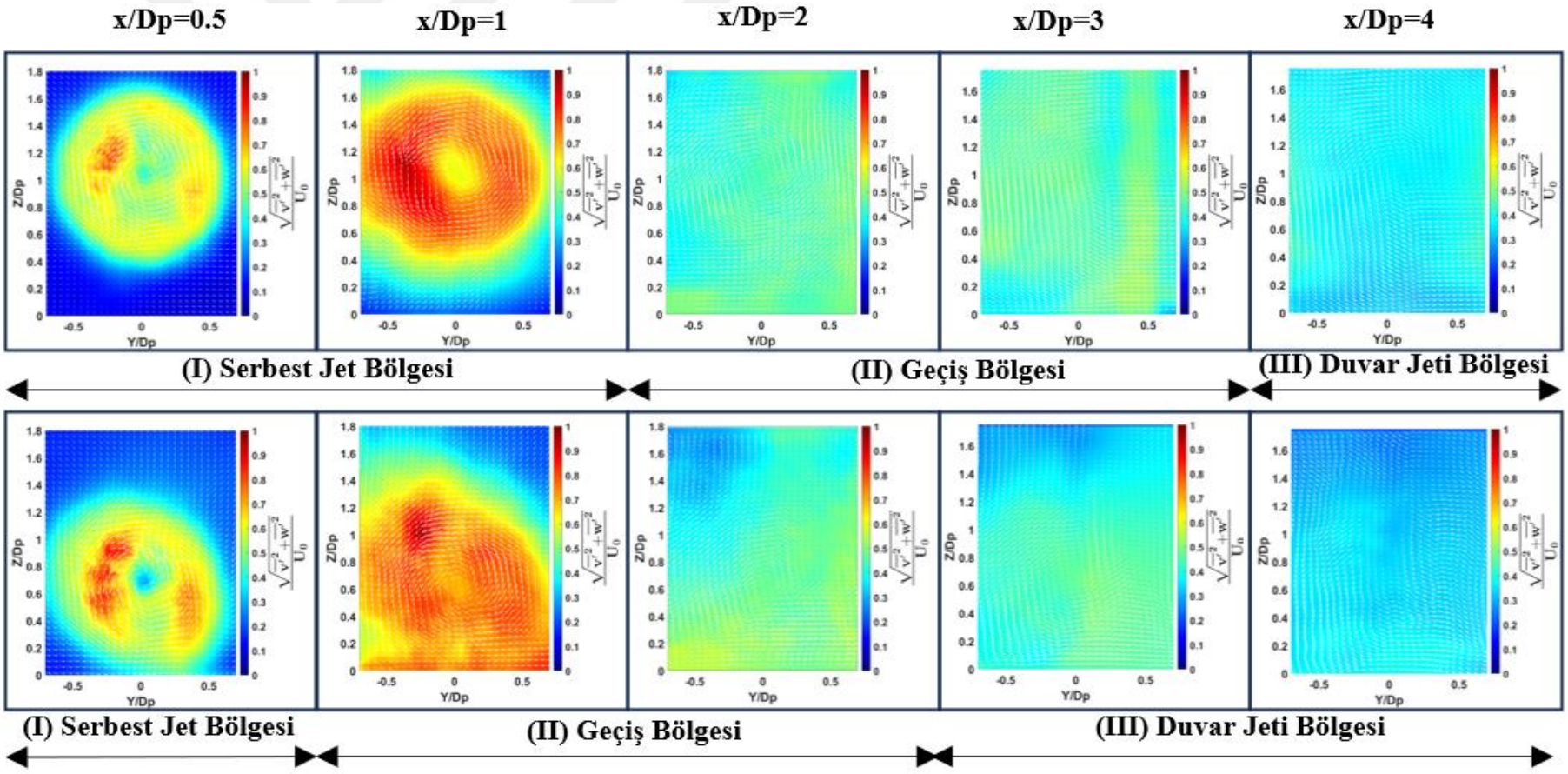
Şekil 4.92 D=10 cm, Rpm=745, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) için eşdeğer türbülans yoğunlukları



Şekil 4.93 D=13 cm, Rpm=590, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) için eşdeğer türbülans yoğunlukları



Şekil 4.94 D=13 cm, Rpm=670, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) için eşdeğer türbülans yoğunlukları



Şekil 4.95 D=13 cm, Rpm=745, G=15 cm (üst sıra) ve G=10 cm (alt sıra) için eşdeğer türbülans yoğunlukları

4.5 Karakteristik Profiller

4.5.1 Derinlik Boyunca (Düşey) Hız Profilleri

Sınır etkilerinin, üç hız bileşeni u (x), w (z) ve v (y) üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, bu bileşenlerin merkezi düzlemde belirlenen konumlardaki düşey profilleri Şekil 4.96 - Şekil 4.149 arasında sunulmuştur. Ayrıca, her bir profil için pervane ekseni konumu ilgili üst kısımda belirtilmiştir.

Şekil 4.96 – Şekil 4.113 aralığındaki grafiklerde, ortalama eksenel hız bileşeni u'nun farklı akım konumlarındaki düşey profillerdeki gelişimi sunulmaktadır. Bu grafikler ile birlikte Şekil 4.2 – Şekil 4.46 aralığındaki veriler incelendiğinde, pervaneli jet konfigürasyonunda eksenel hız bileşeninin akımın baskın yönünü temsil ettiği anlaşılmaktadır. Lam vd. (2010) gibi önceki araştırmacıların da deneysel gözlemlerine dayalı olarak belirttiği üzere, başlangıçtaki üç boyutlu pervane jeti yapısı içerisinde eksenel hız bileşeni ana taşıyıcı bileşen olarak öne çıkmaktadır.

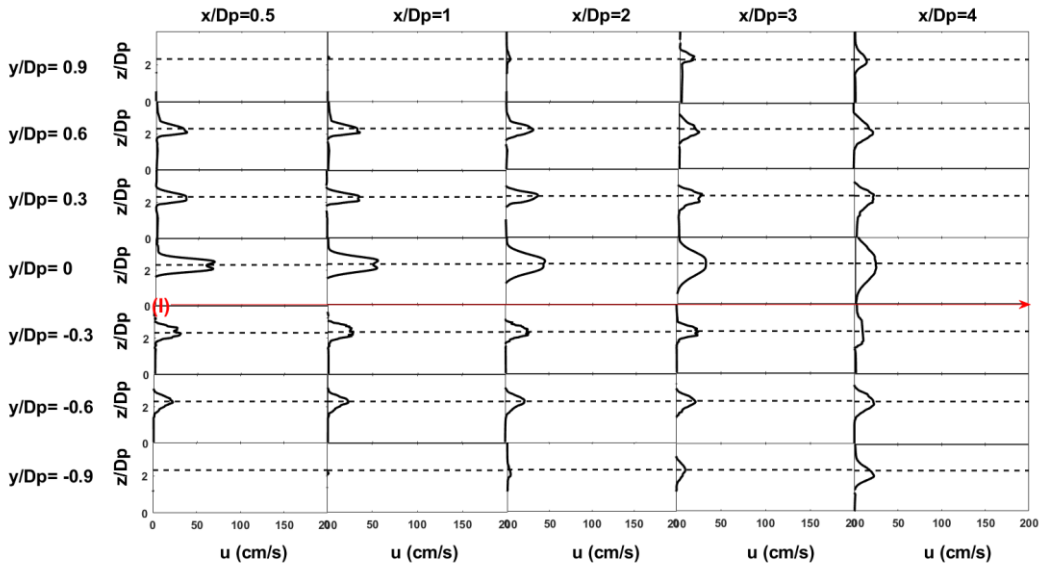
Şekil 4.96 – Şekil 4.113 arasındaki düşey hız profilleri dikey olarak hizalandığında, pervane eksenine yakın konumda ($y/D_p = 0$) ve $x = 0.5\ D_p$'ye kadar olan bölgede, her iki açıklık yüksekliğinde (G = 10 cm ve G = 15 cm) yatay hız bileşeni (u) profillerinin benzer büyüklüğe sahip, çift tepe yapısı gösterdiği gözlemlenmektedir. Akım yönünde ilerledikçe, açıklık yüksekliğine bağlı olarak gelişim eğilimleri farklılaşmaktadır. G = 15 cm açıklığında, çift tepe formunun sınır etkileriyle birlikte bozulmadan $x = 2\ D_p$'ye kadar korunduğu; bu noktadan sonra ise tek tepe profiline dönüştüğü görülmektedir. Bu durum, Şekil 4.2 – Şekil 4.46 aralığındaki ortalama hız grafikleriyle de desteklenmektedir; bu grafiklerde, çift tepe yapısının $x = 2\ D_p$ – $3\ D_p$ aralığında, pervane ekseni altında tek bir merkeze kaydığı görülmektedir.

Ek olarak, açıklık yüksekliğinin azaldığı G = 10 cm durumunda, jet daha erken bir mesafede çarpma bölgesine ulaşmakta ve sınır etkileri daha erken devreye girmektedir. G = 10 cm D = 10 cm ve G = 15 cm D = 13 cm ölçümlerinde, simetrik çift tepe yapısı $x = 2\ D_p$ noktasında asimetrik hale gelmekte olup bu durum sırasıyla Şekil 4.103, 4.105, 4.107, 4.108, 4.110 ve 4.112'de açıkça gözlemlenebilmektedir. G = 10 cm D = 13 cm ölçümlerinde ise jetin serbest bölgesi daha kısa sürede

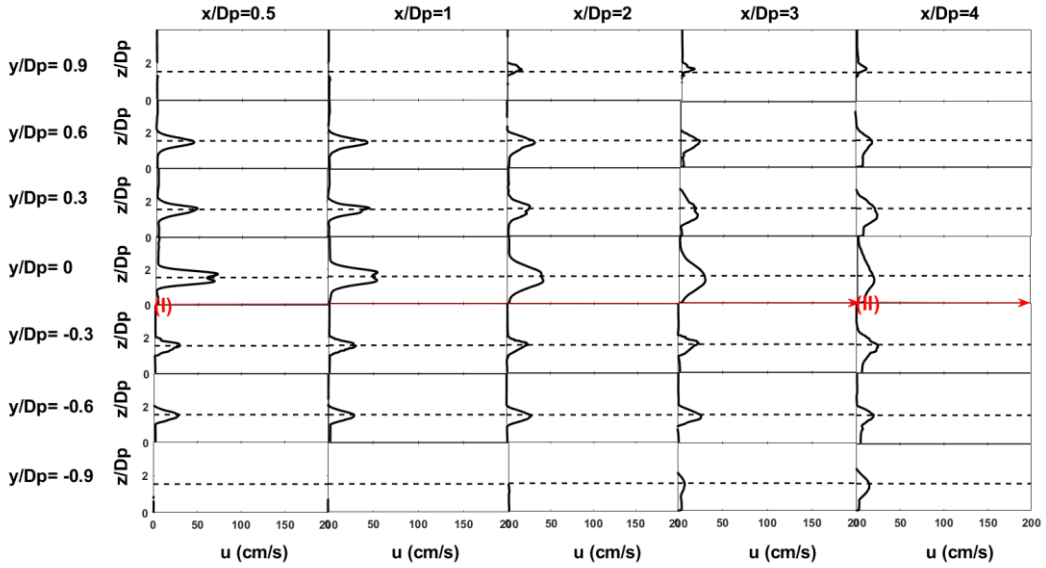
sınırlanmakta ve çift tepe profili x = 1 Dp mesafesinde asimetrik hale gelmektedir; bu bulgu Şekil 4.109, 4.111 ve 4.113'de gözlenmektedir. Asimetrik profilde, genellikle alt tarafta bulunan tepe noktasının daha yüksek hız büyüklüğüne sahip olduğu dikkat çekmektedir. Bu noktadan itibaren, merkezden sapmış tek tepe formu akım yönünde sınır bölgesine kadar devam etmekte olup, bu durum duvar jeti karakteristiklerini andıran bir yapıya işaret etmektedir.

Pervane yüzeyinde farklı konumlarda elde edilen ölçümlerin karşılaştırılmasını kolaylaştırmak amacıyla, bu ölçümler Şekil 4.96 – Şekil 4.113 aralığında sunulmuştur. Pervane yüzeyinden uzaklaşıldıkça, eksenel hız bileşeninde belirgin bir azalma gözlemlenmektedir. Pervane ekseni yakınında ($y/D_p = 0$) göbek (hub) etkisiyle ortaya çıkan çift tepe formundaki hız dağılımı, pervane yüzeyinden uzaklaştıkça yerini tek tepe şeklinde bir dağılıma bırakmaktadır. Bu çift tepe yapısının, göbek (hub) çapı mertebesindeki bir mesafe içerisinde sönümlendiği tespit edilmiştir.

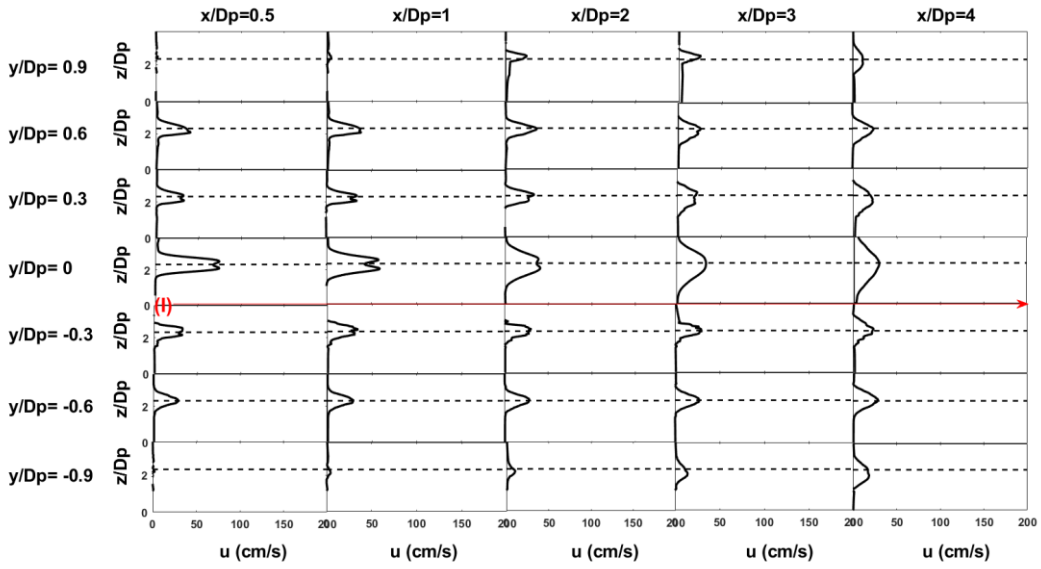
Pervane jetinin akım yönünde genişlemesiyle birlikte, D = 6.5 cm pervane çapına ait ölçümlerde $x/D_p = 2$ konumunda, eksenel hız bileşeninin $y/D_p = \pm 0.9$ konumlarında da gözlenebilir hâle geldiği görülmektedir. Bu durum, jetin yanal yönde genişleyerek daha geniş bir alana yayıldığını ve eksenel hız bileşeninin merkez ekseninden uzak noktalarda da etkili olduğunu ortaya koymaktadır.



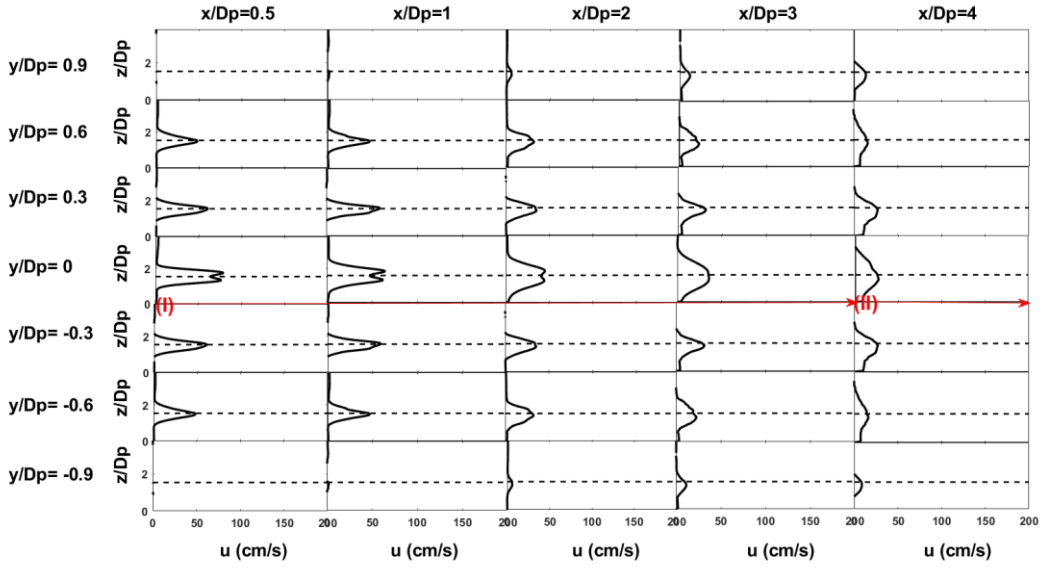
Şekil 4.96 D=6.5 cm, Rpm=590, G=15 cm için I bölgesinde (serbest jet) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı



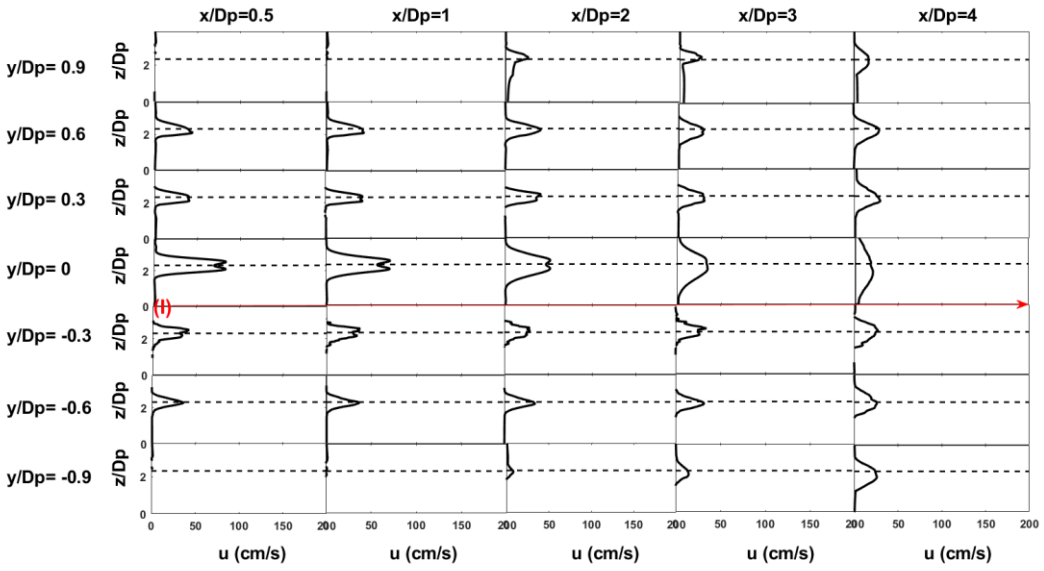
Şekil 4.97 D=6.5 cm, Rpm=590, G=10 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı



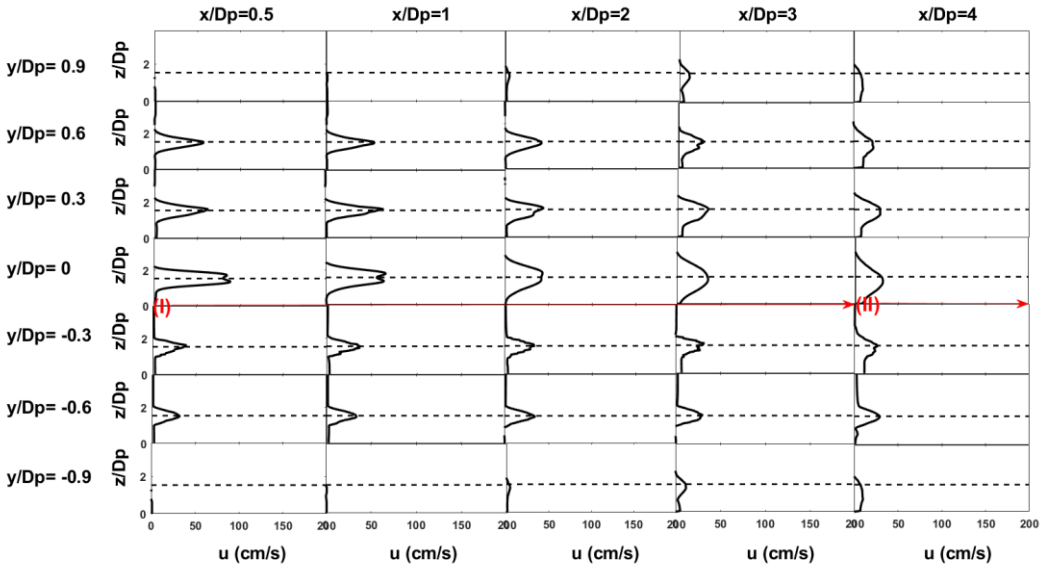
Şekil 4.98 D=6.5 cm, Rpm=670, G=15 cm için I bölgesinde (serbest jet) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı



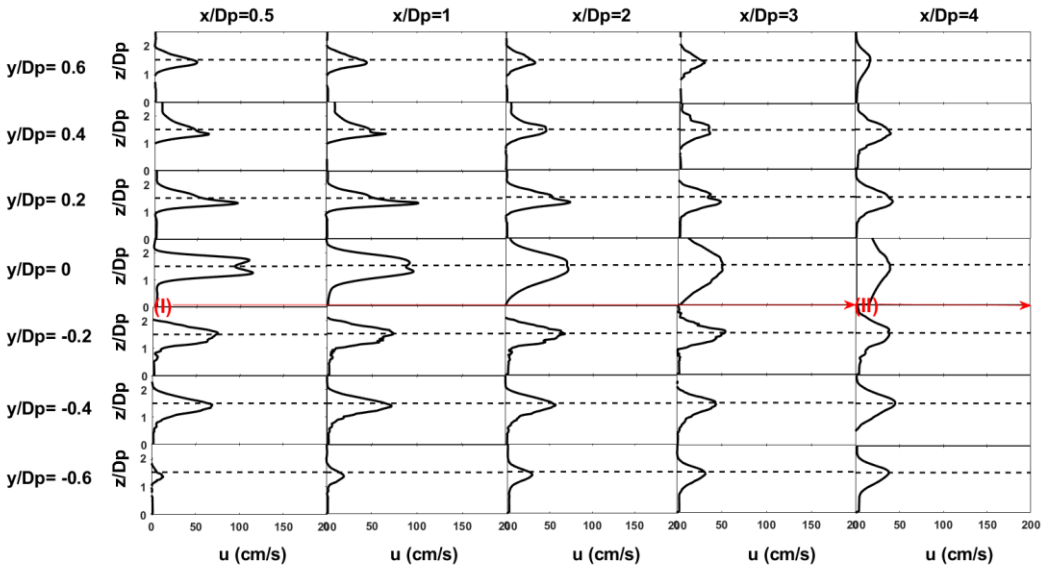
Şekil 4.99 D=6.5 cm, Rpm=670, G=10 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı



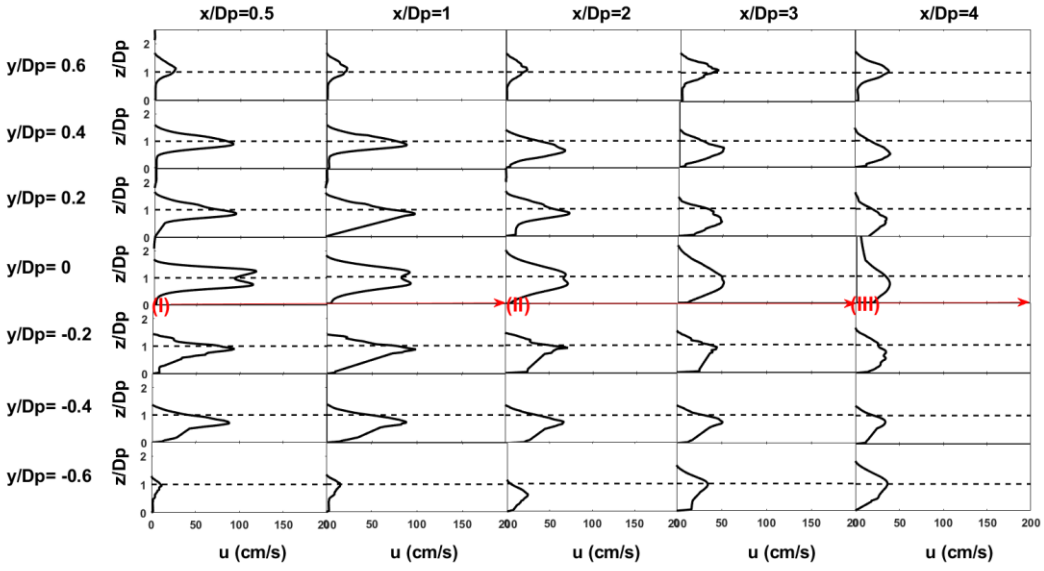
Şekil 4.100 D=6.5 cm, Rpm=745, G=15 cm için I bölgesinde (serbest jet) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı



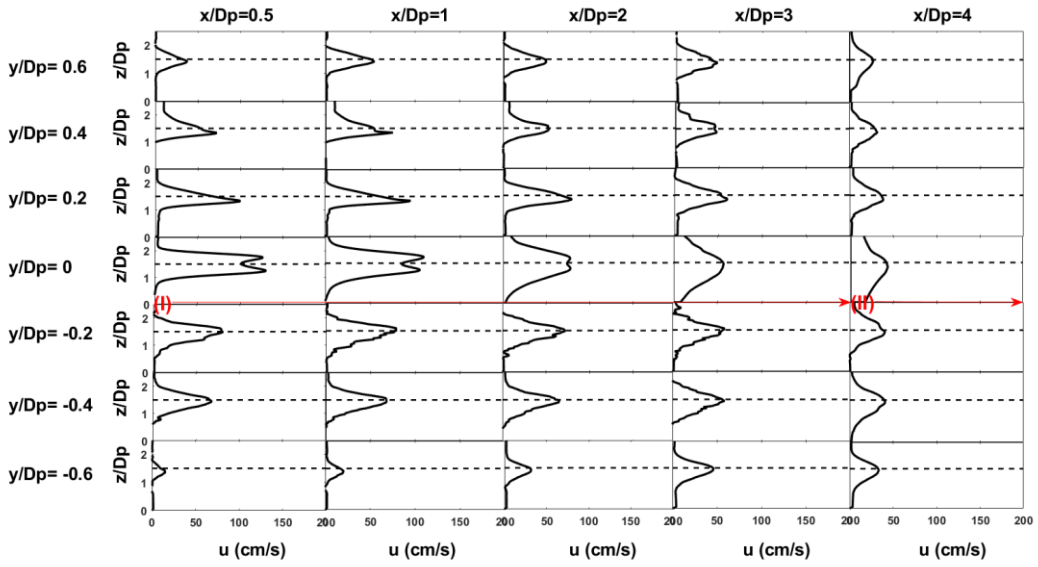
Şekil 4.101 D=6.5 cm, Rpm=745, G=10 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı



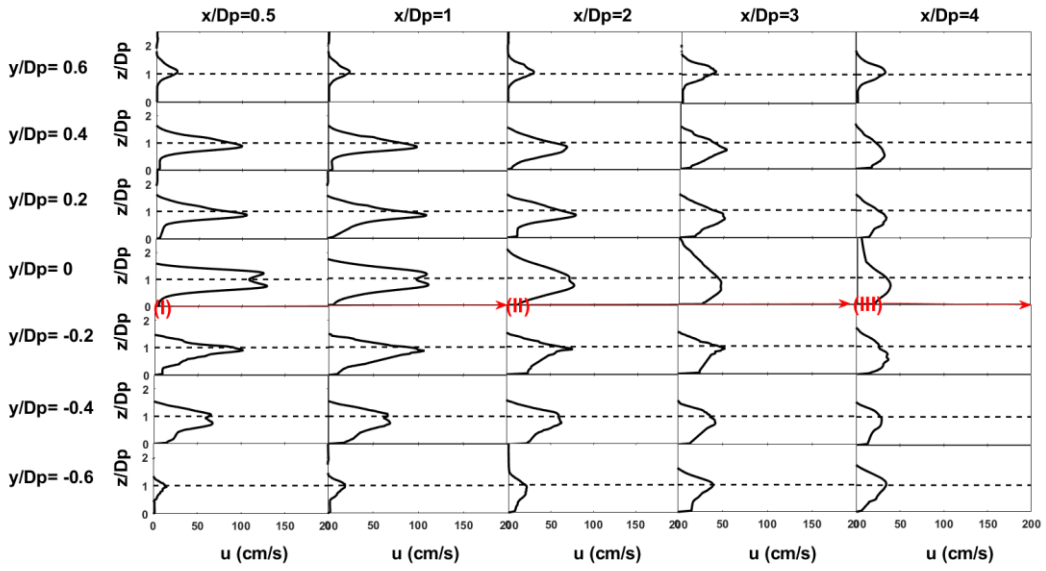
Şekil 4.102 D=10 cm, Rpm=590, G=15 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı



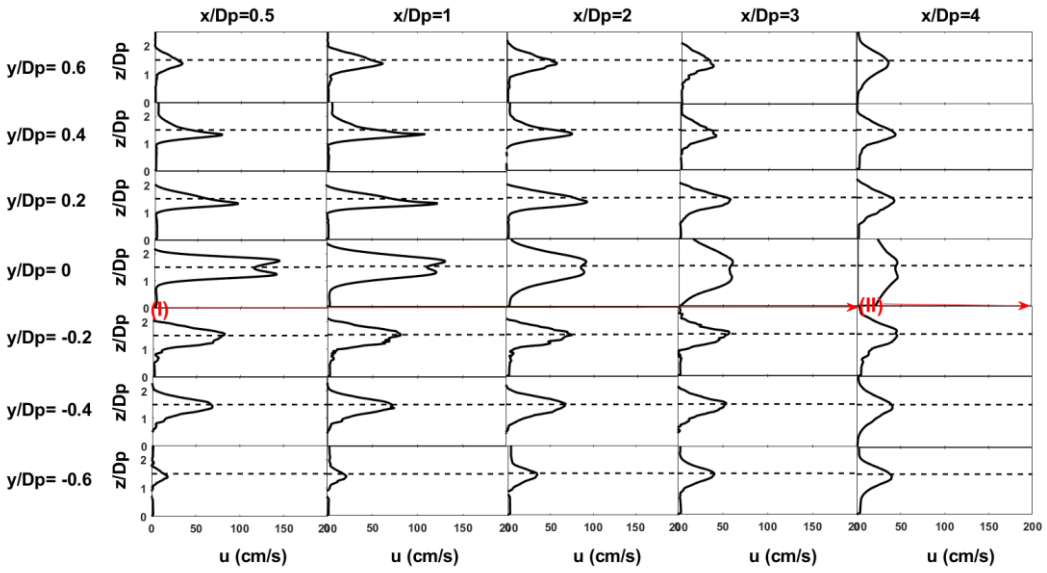
Şekil 4.103 D=10 cm, Rpm=590, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı



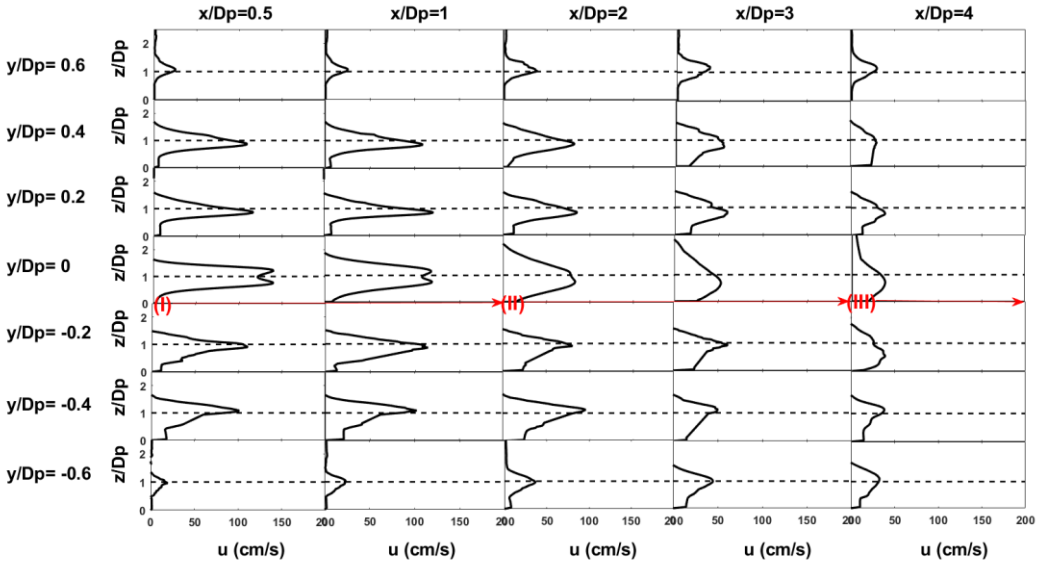
Şekil 4.104 D=10 cm, Rpm=670, G=15 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı



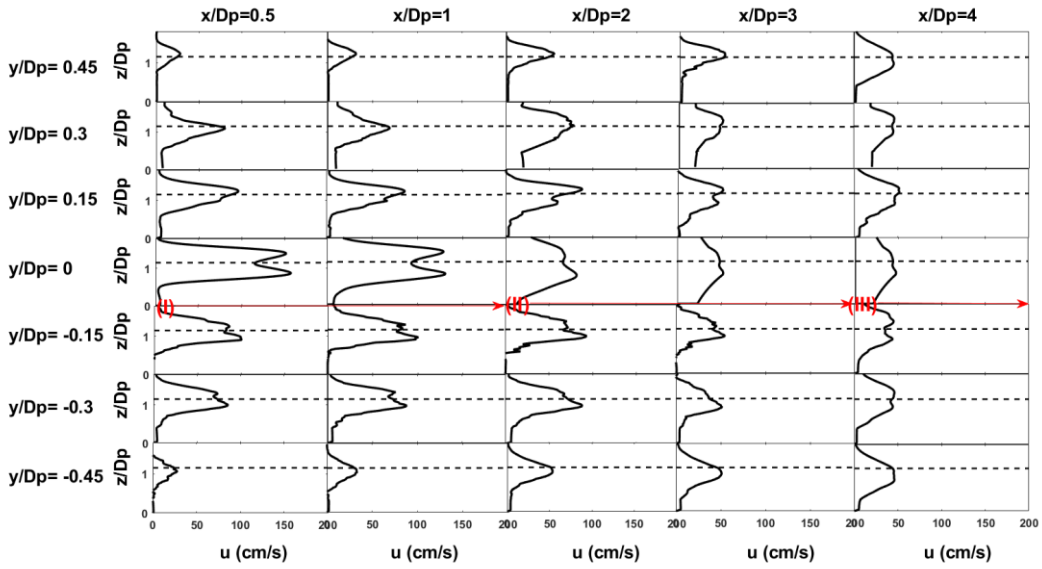
Şekil 4.105 D=10 cm, Rpm=670, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı



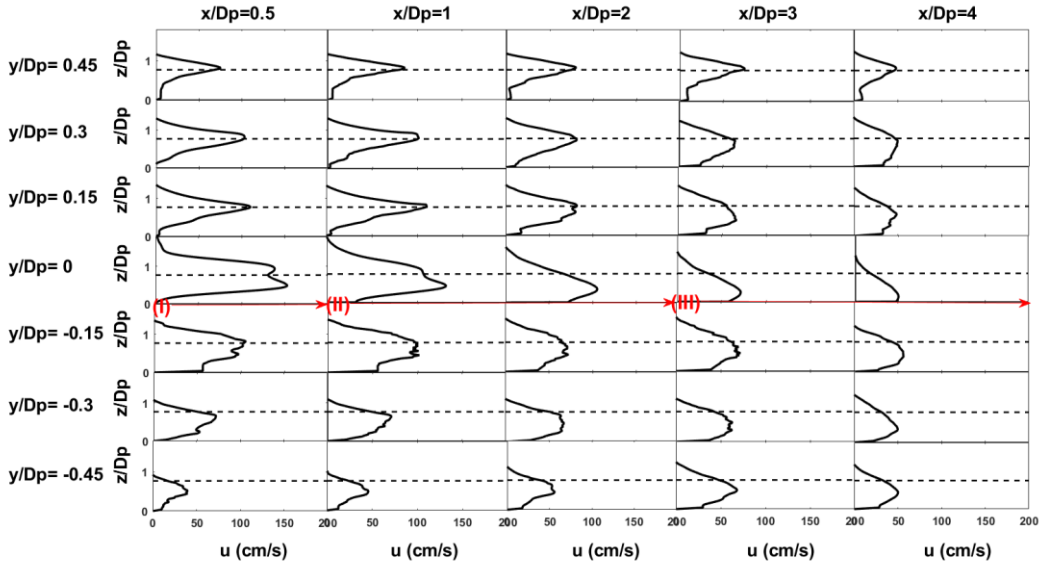
Şekil 4.106 D=10 cm, Rpm=745, G=15 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı



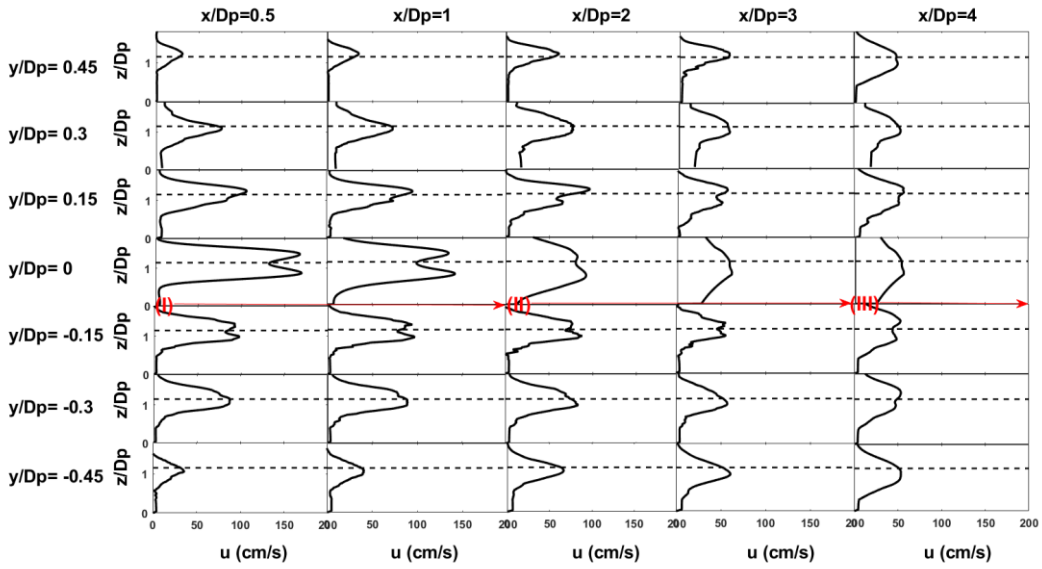
Şekil 4.107 D=10 cm, Rpm=745, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı



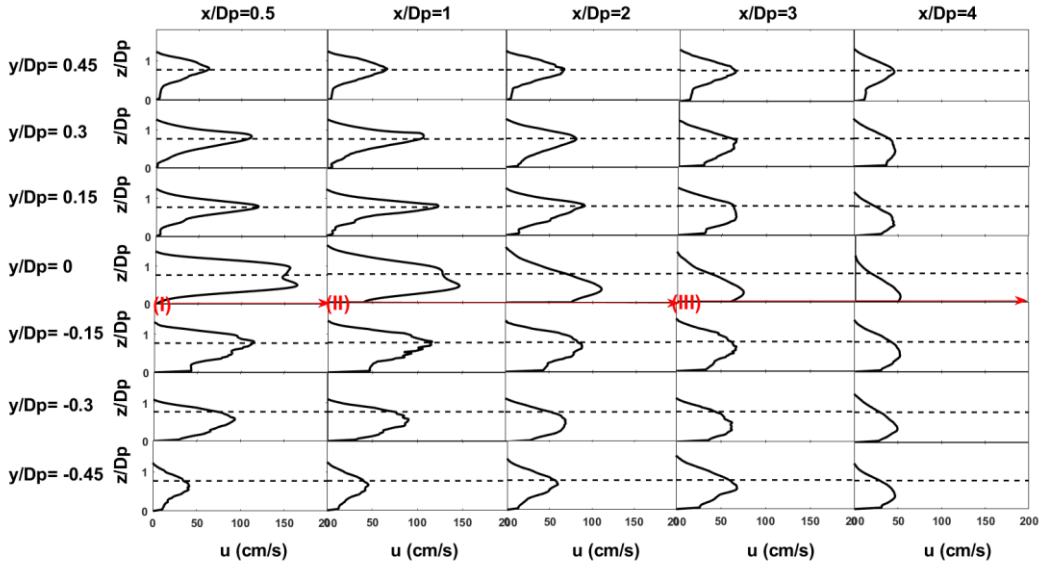
Şekil 4.108 D=13 cm, Rpm=590, G=15 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı



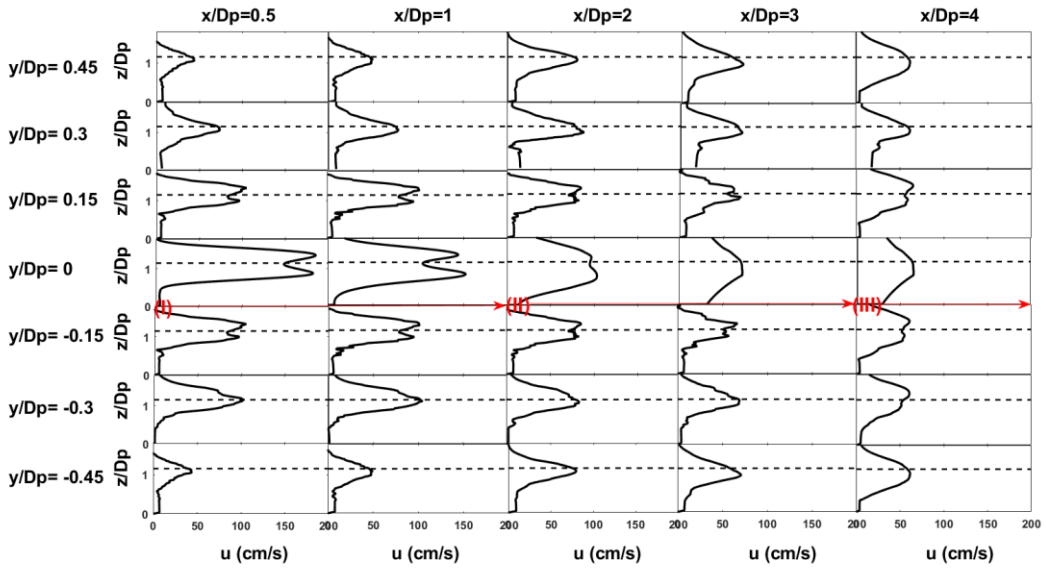
Şekil 4.109 D=13 cm, Rpm=590, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı



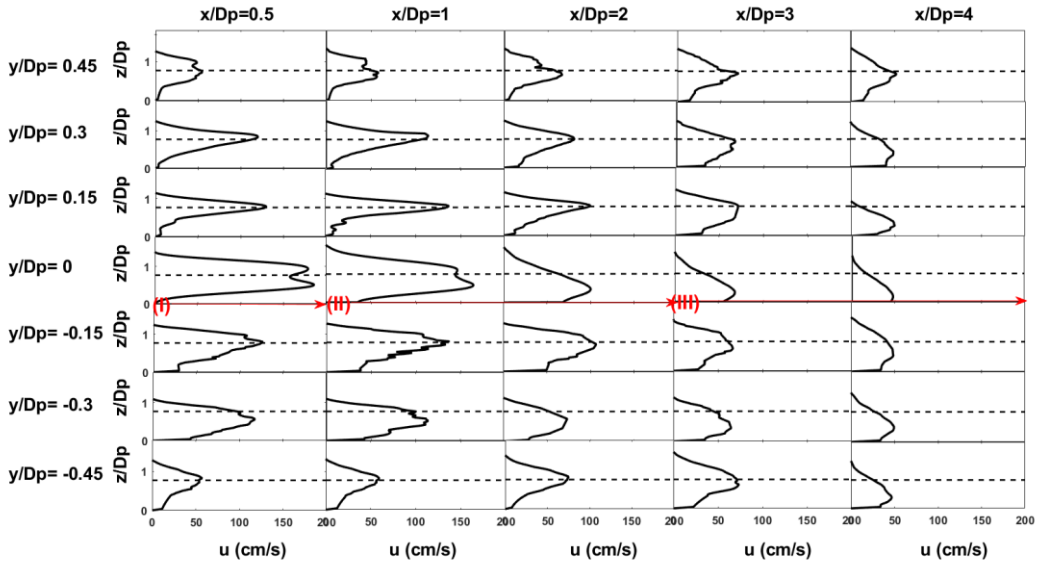
Şekil 4.110 D=13 cm, Rpm=670, G=15 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı



Şekil 4.111 D=13 cm, Rpm=670, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı



Şekil 4.112 D=13 cm, Rpm=745, G=15 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı



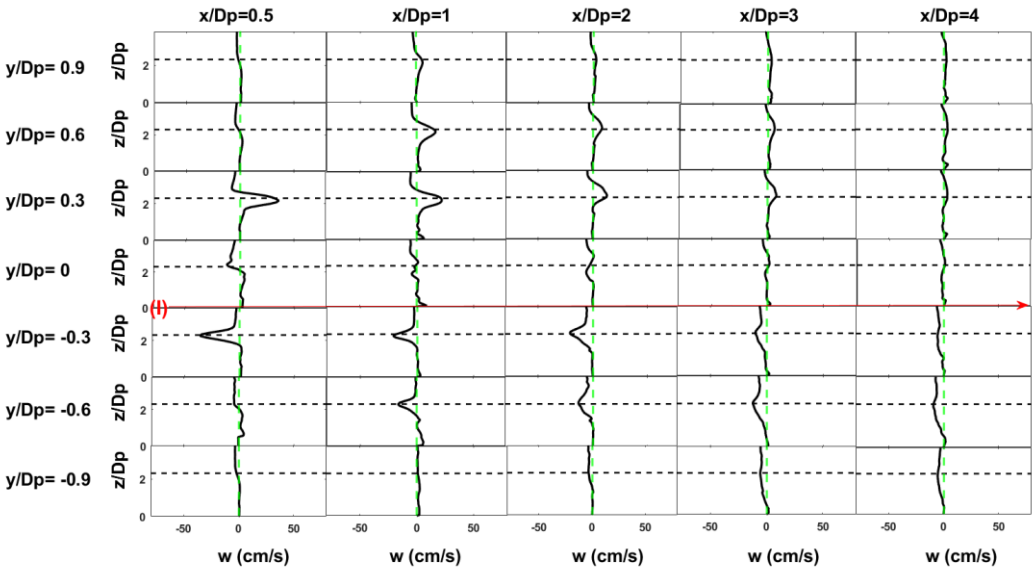
Şekil 4.113 D=13 cm, Rpm=745, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama eksenel hız dağılımı

Şekil 4.114- Şekil 4.131 arasında, üç boyutlu türbülanslı pervane jet akımının farklı akım mesafelerinde seçilmiş konumlardaki ortalama düşey hız bileşeni (w) profilleri sunulmaktadır. Genel olarak pervane ekseninde ($y/D_p= 0$) ve pervane cidarında, serbest jet bölgesi olarak tanımlanan bölgede (I), düşey hız bileşeninin üst akımda negatif, alt akımda ise pozitif değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, çevreleyen akışkanın hem jetin üstünden hem de altından çekildiğini, yani akımın çevreden sürüklendiğini göstermektedir. Geçiş bölgesi olarak tanımlanan bölgede (II) ise hem üst hem de alt akımda düşey hızların negatif değerlere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, ortam akışkanının ağırlıklı olarak üst akım bölgesinden içeri doğru sürüklendiğini işaret etmektedir. Duvar jeti bölgesinde (III) ise düşey hız bileşenlerinin büyüklüğü neredeyse sıfıra inmektedir. Bu durum, jetin tabana bağlandığı ve düşey bileşenin zayıfladığı bir akım yapısına işaret etmektedir. Özellikle alt akım tarafında, açıklık yüksekliğine bağlı olarak pervane ekseninin altında gözlenen düşey hız bileşenleri, açıklık yüksekliği azaldıkça daha negatif değerlere ulaşmaktadır. Bu bulgu, jetin duvara daha erken bağlandığını ve aşağı yönde yönlendirici etkisinin arttığını niceliksel olarak ortaya koymaktadır.

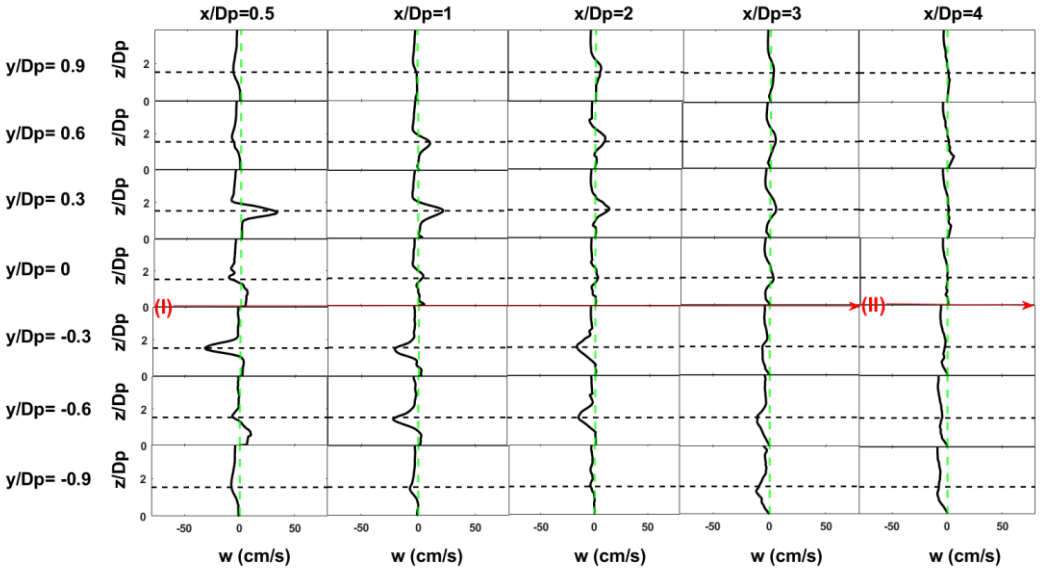
Pervane ekseninden uzaklaşıldıkça, artan y/D_p değerlerine bağlı olarak pervane dönüşünün etkisiyle düşey hız bileşeninde belirgin değişimler gözlenmektedir. Özellikle pervane çapı içerisinde kalan bölgede ($-0.5\leq y/D_p \leq 0.5$), pervane açıklığının bulunduğu merkez konumlarında, dönüş yönüne bağlı olarak pozitif ya da negatif yönde, mutlak değerce eksen üzerinde gözlemlenen hızlardan daha yüksek düşey hız değerleri tespit edilmiştir. Bu durum, pervane kanadının eksenden uzaklaştıkça daha baskın hale gelen tek yönlü hareketinin bir sonucu olarak değerlendirilebilir.

Pervane dönüşüne bağlı olarak düşey hız bileşeninde meydana gelen bu değişim, serbest jet bölgesi (Bölge I) içerisinde yoğun bir şekilde hissedilirken, geçiş bölgesinde (Bölge II) giderek azalmaktadır. Duvar jeti bölgesinde (Bölge III) ise düşey hızlar, eksende olduğu gibi sıfıra yakın değerlere inmektedir.

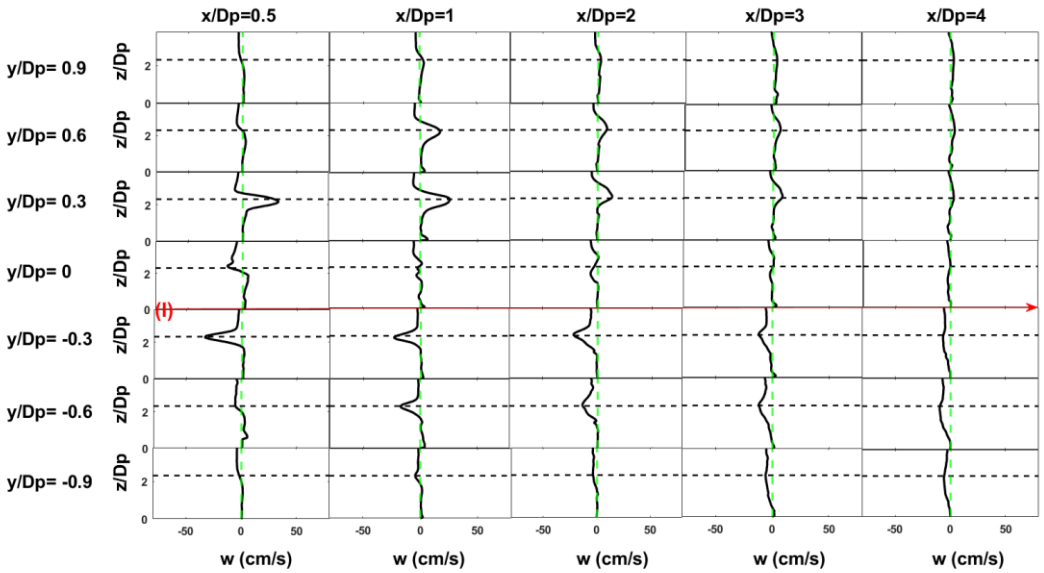
Şekil 4.2 – Şekil 4.46 arasında sunulan hız profillerinde gözlemlenen tepe hızların konumlarındaki kaymaların temel nedenlerinden biri olarak, düşey hız bileşenindeki bu değişimlerin etkili olduğu değerlendirilmektedir.



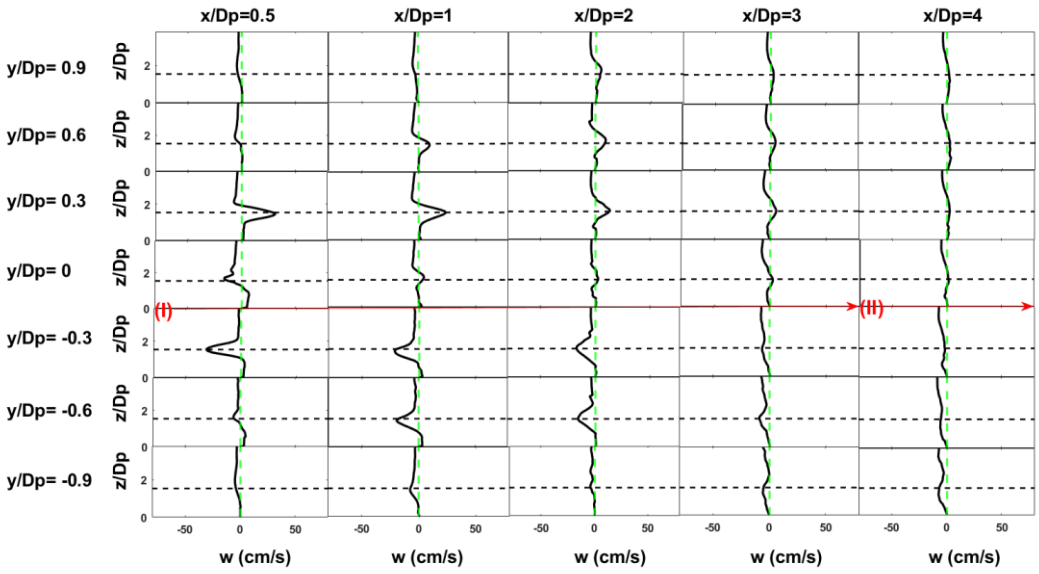
Şekil 4.114 D=6.5 cm, Rpm=590, G=15 cm için I bölgesinde (serbest jet) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı



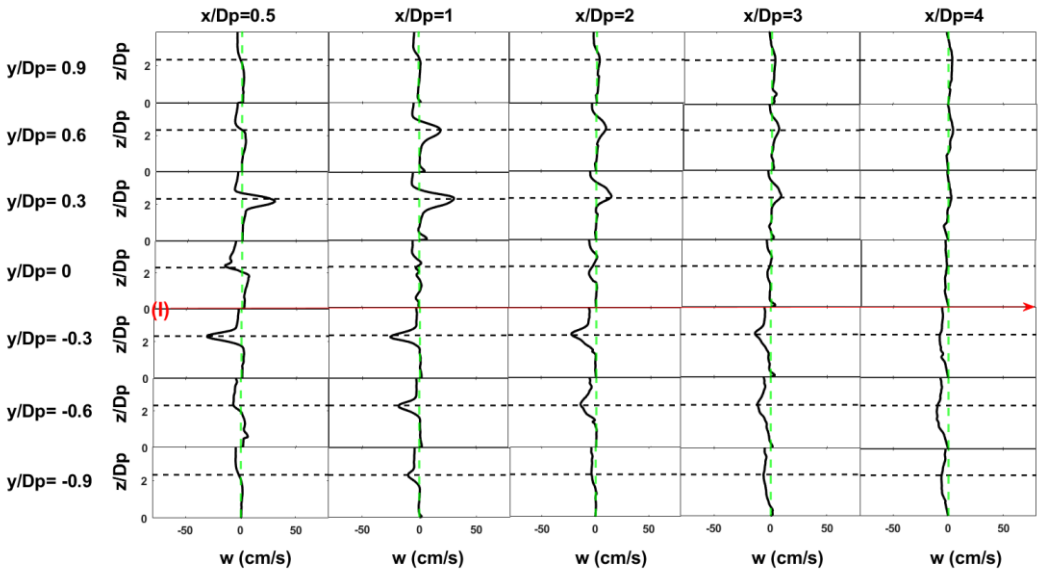
Şekil 4.115 D=6.5 cm, Rpm=590, G=10 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı



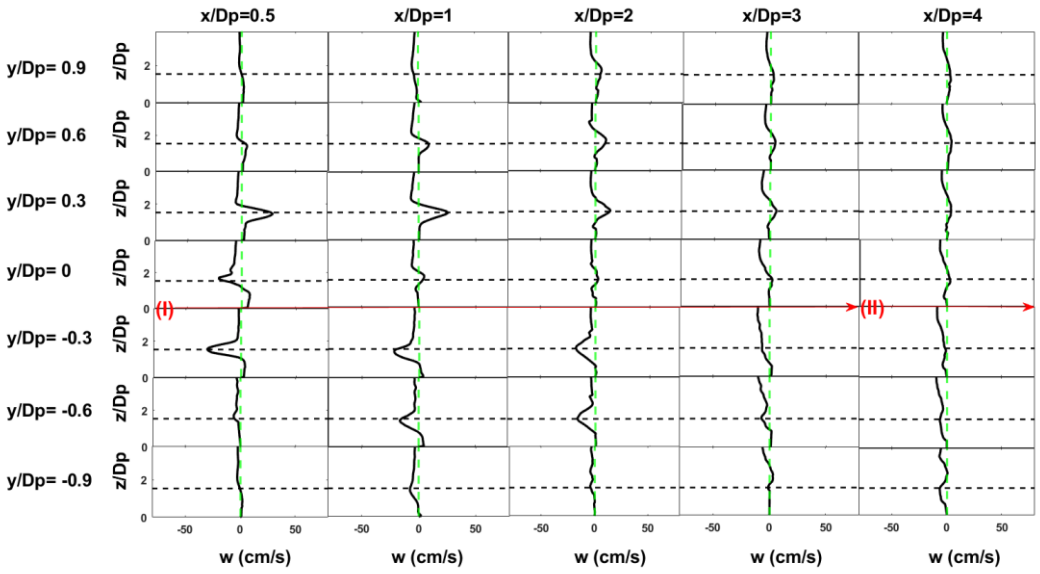
Şekil 4.116 D=6.5 cm, Rpm=670, G=15 cm için I bölgesinde (serbest jet) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı



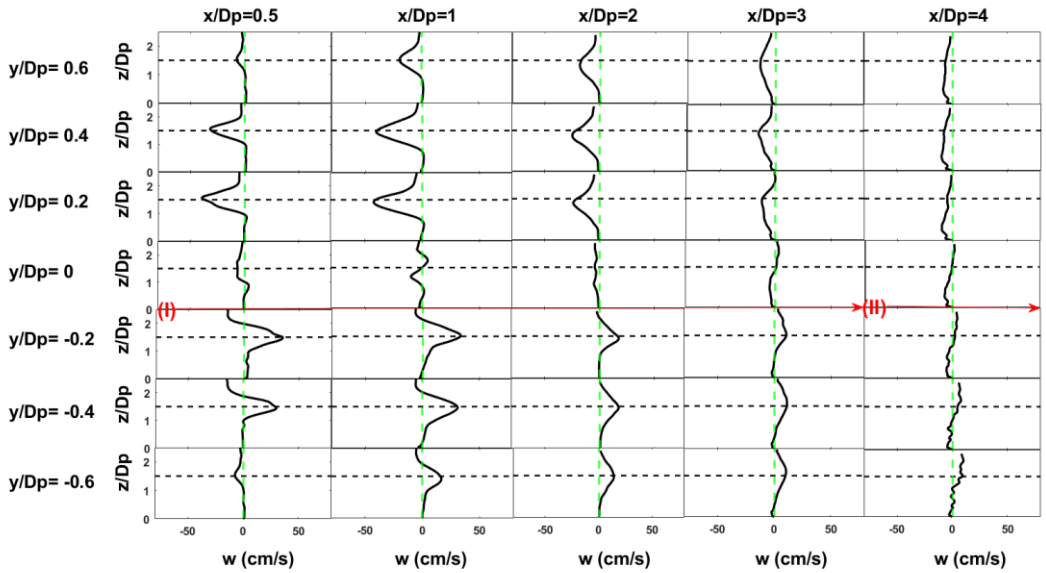
Şekil 4.117 D=6.5 cm, Rpm=670, G=10 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı



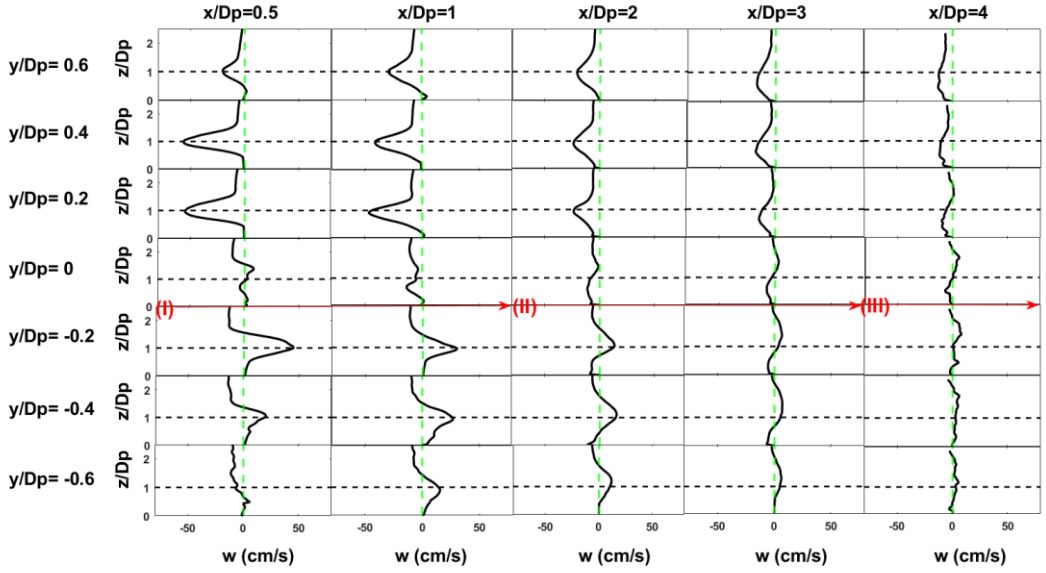
Şekil 4.118 D=6.5 cm, Rpm=745, G=15 cm için I bölgesinde (serbest jet) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı



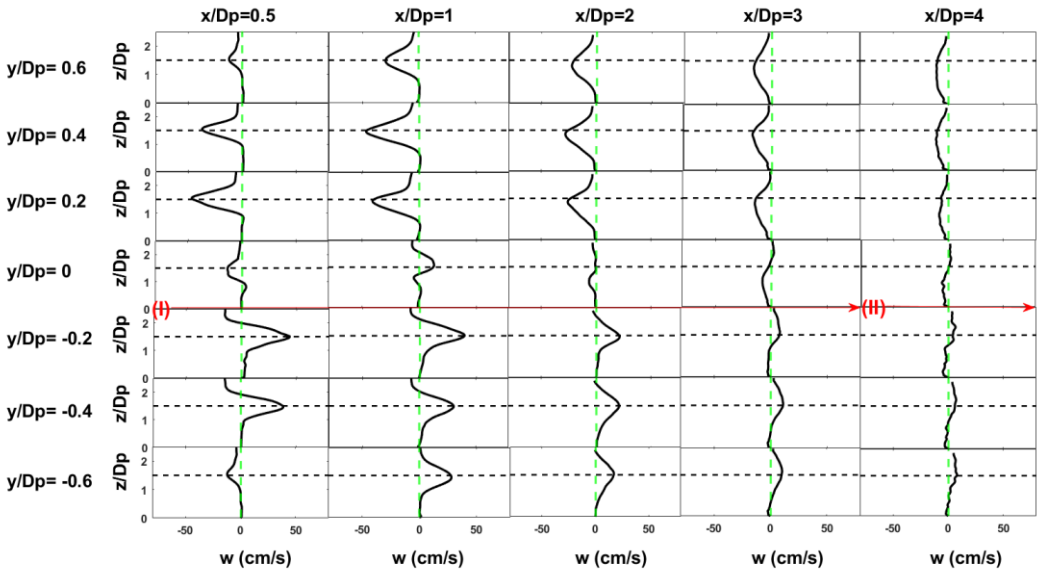
Şekil 4.119 D=6.5 cm, Rpm=745, G=10 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı



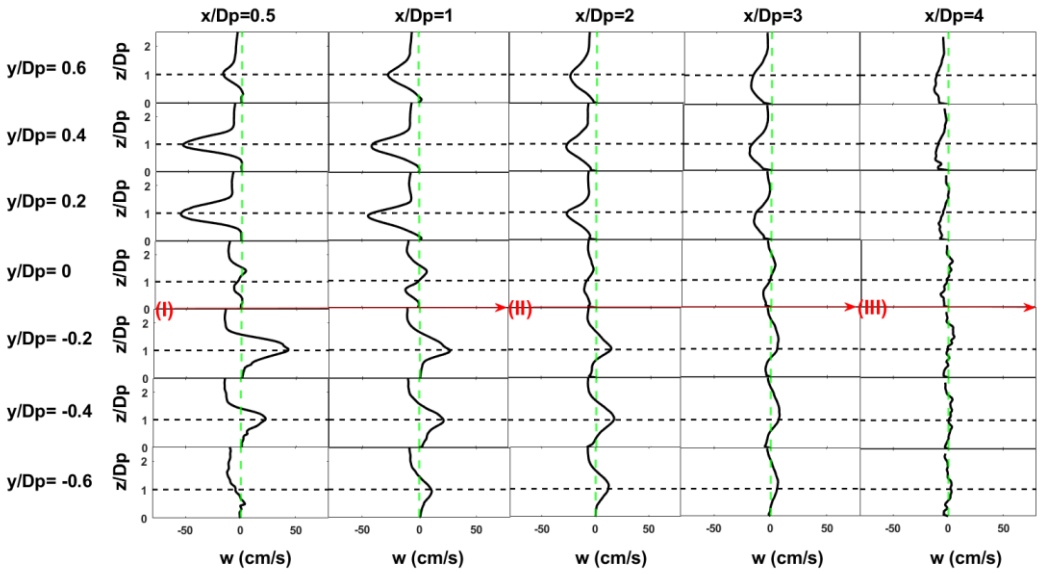
Şekil 4.120 D=10 cm, Rpm=590, G=15 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı



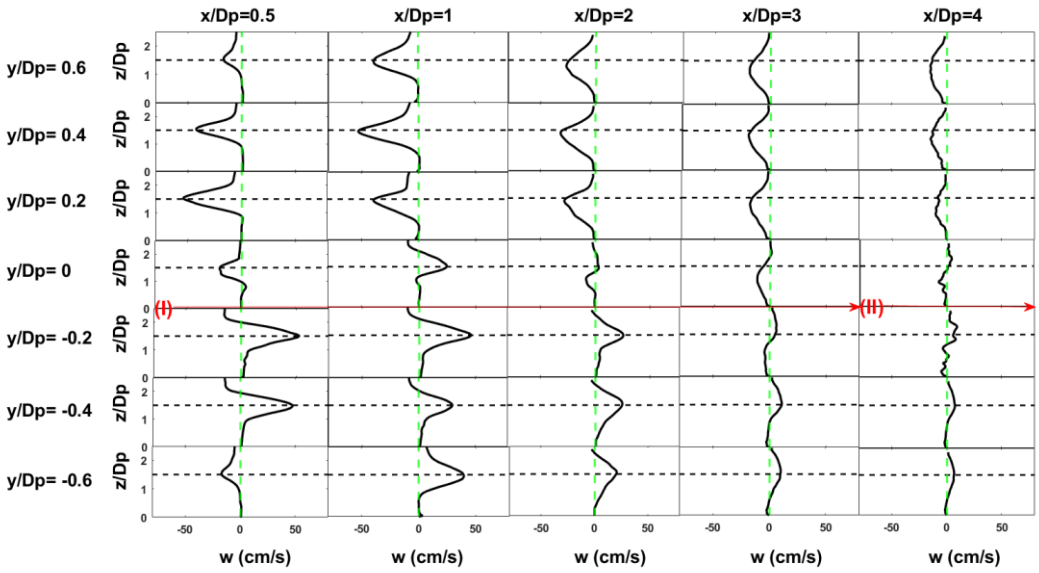
Şekil 4.121 D=10 cm, Rpm=590, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı



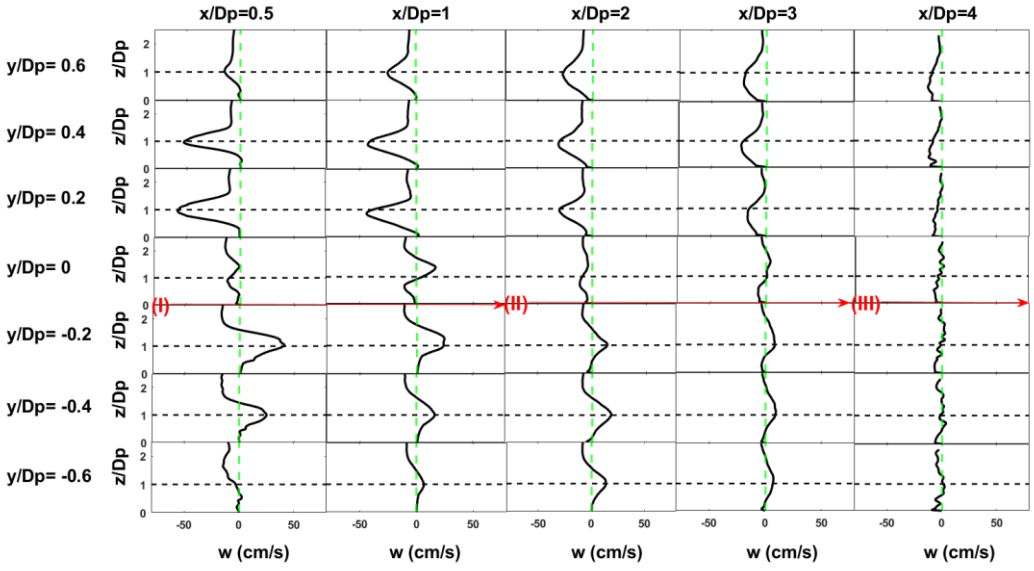
Şekil 4.122 D=10 cm, Rpm=670, G=15 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı



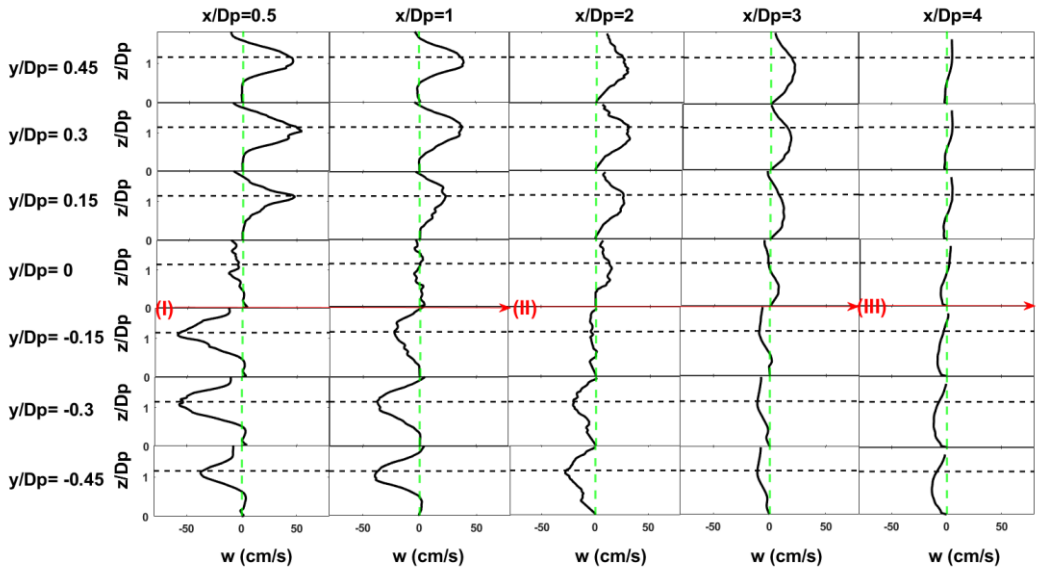
Şekil 4.123 D=10 cm, Rpm=670, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı



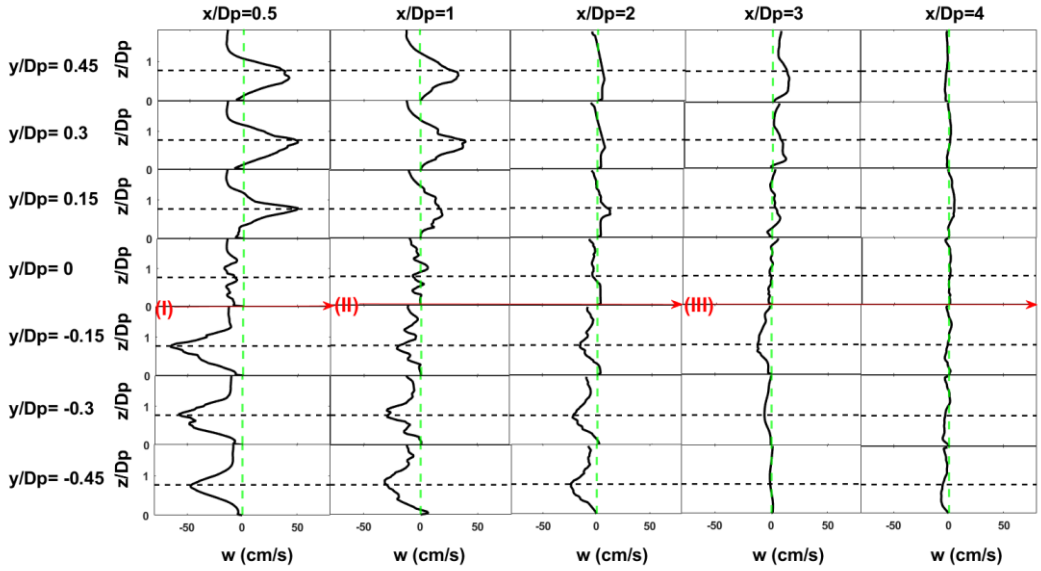
Şekil 4.124 D=10 cm, Rpm=745, G=15 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı



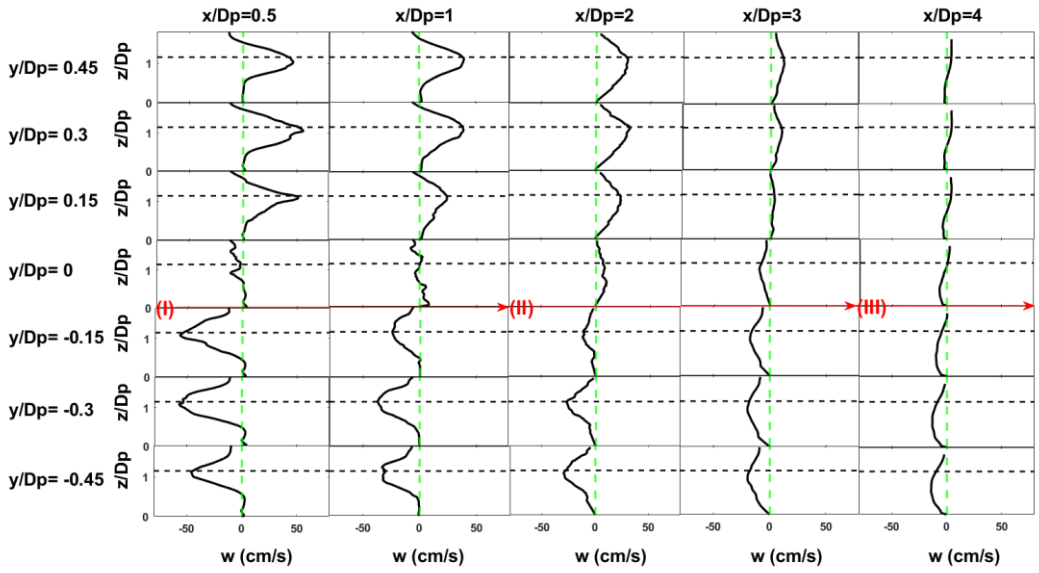
Şekil 4.125 D=10 cm, Rpm=745, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı



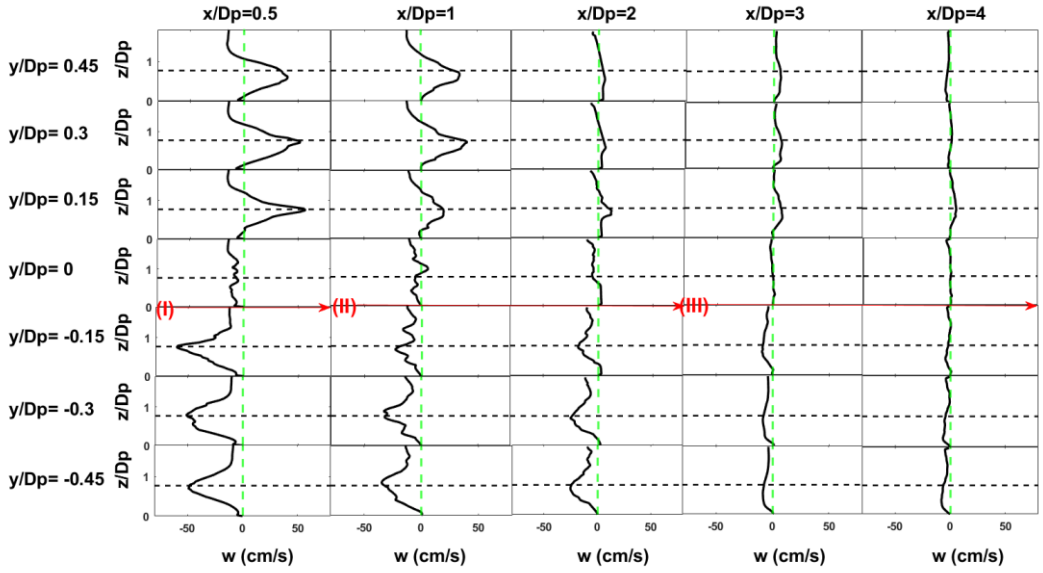
Şekil 4.126 D=13 cm, Rpm=590, G=15 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı



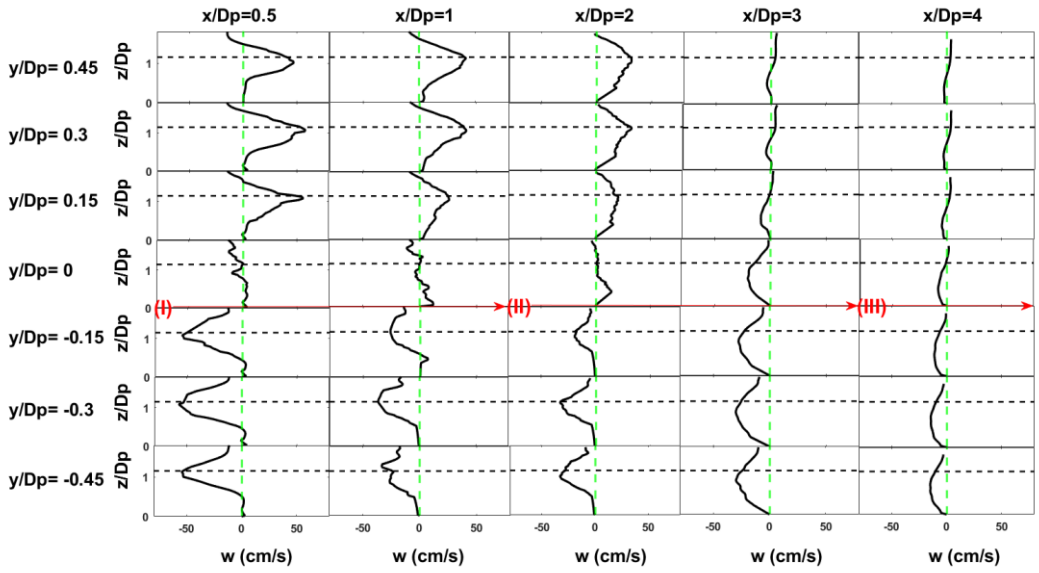
Şekil 4.127 D=13 cm, Rpm=590, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı



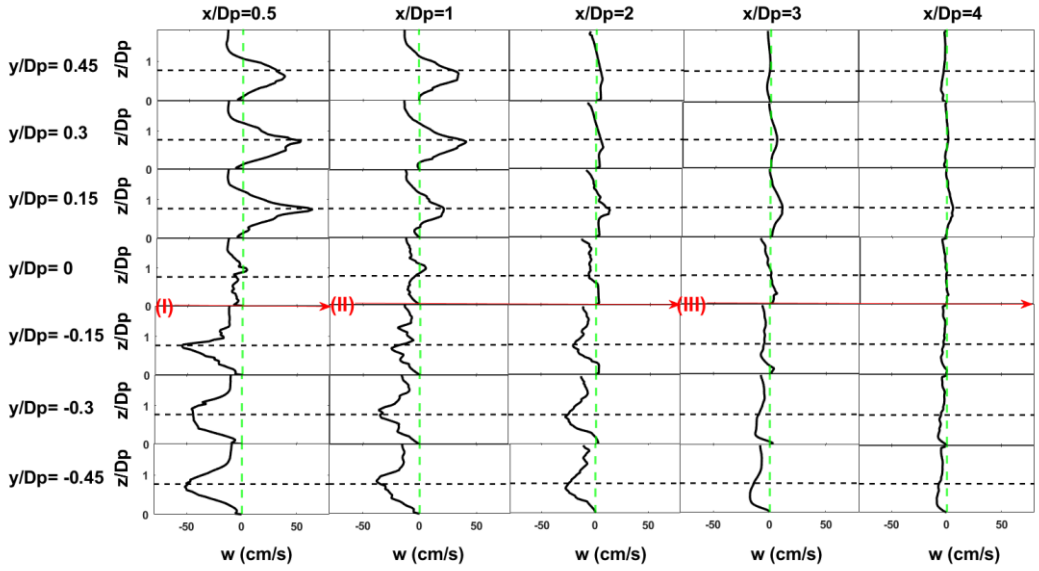
Şekil 4.128 D=13 cm, Rpm=670, G=15 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı



Şekil 4.129 D=13 cm, Rpm=670, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı



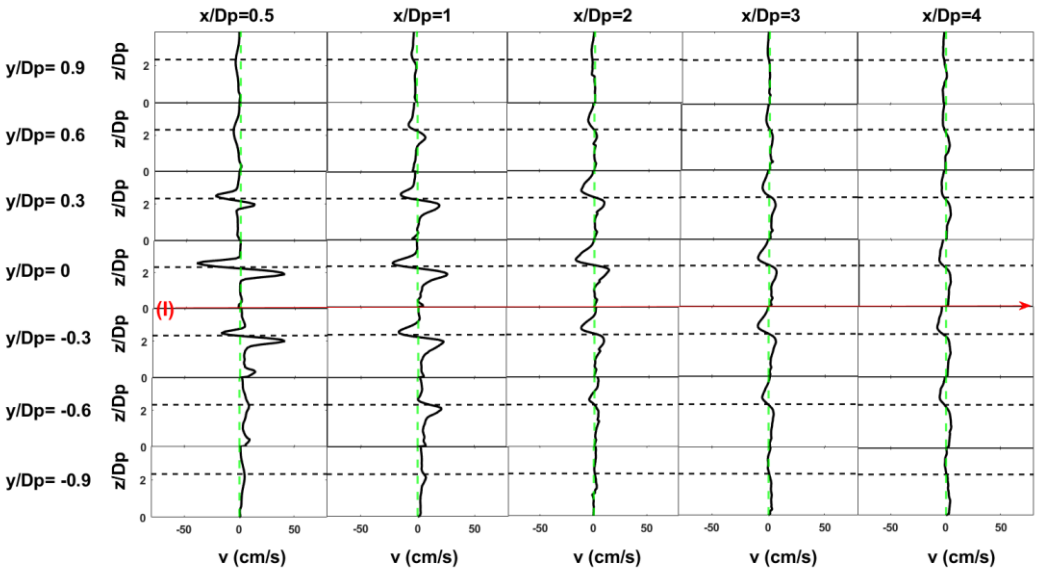
Şekil 4.130 D=13 cm, Rpm=745, G=15 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı



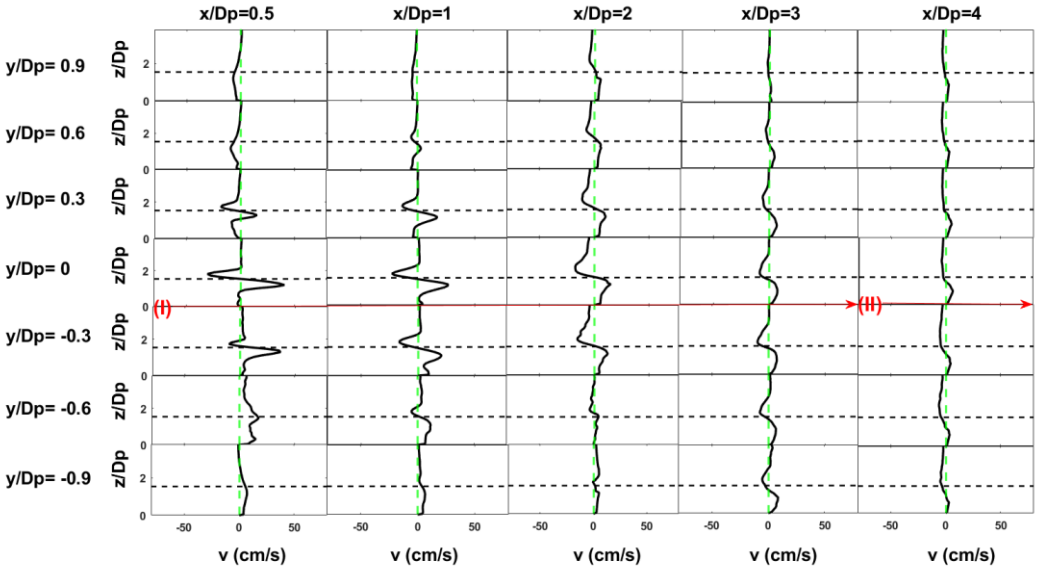
Şekil 4.131 D=13 cm, Rpm=745, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama düşey hız dağılımı

Şekil 4.132–Şekil 4.149, üç boyutlu türbülanslı jet akımının farklı konumlardaki seçilmiş akım mesafelerinde ortalama yanal hız bileşeni (v) için düşey dağılımları göstermektedir. Genel olarak, pervane ekseni doğrultusunda ($y/D_p = 0$) incelendiğinde, serbest jet bölgesi olarak tanımlanan (I) bölgesinde, D = 6.5 cm ve D=13 cm pervane çaplarında yanal hız profillerinin vortekse sahip akım yapısına bağlı olarak ters S-şekilli bir dağılım sergilediği gözlemlenmektedir. Buna karşın, D=10 cm pervane çapında ise profillerin S-şekilli bir form aldığı dikkat çekmektedir. Jetin çarpma bölgesine yaklaşmasıyla birlikte geçiş bölgesi olarak tanımlanan (II) bölgede, tabana yakın yanal hız bileşenlerinin bastırıldığı ve bu etkinin belirginleştiği görülmektedir. Jetin duvarla etkileşime geçtiği duvar jeti bölgesinde (III) ise, yanal hız bileşenleri neredeyse sıfıra yaklaşmakta ve vorteks etkisinin kademeli olarak zayıfladığı anlaşılmaktadır. Bu durum, ana vorteksin merkezi düzlemin her iki yanında ikincil vorteks çiftine ayrılmasıyla açıklanabilir (Şekil 4.75–4.86). Böylece, merkezi düzlemdeki akım zamanla daha çok iki boyutlu bir yapıya dönüşmektedir.

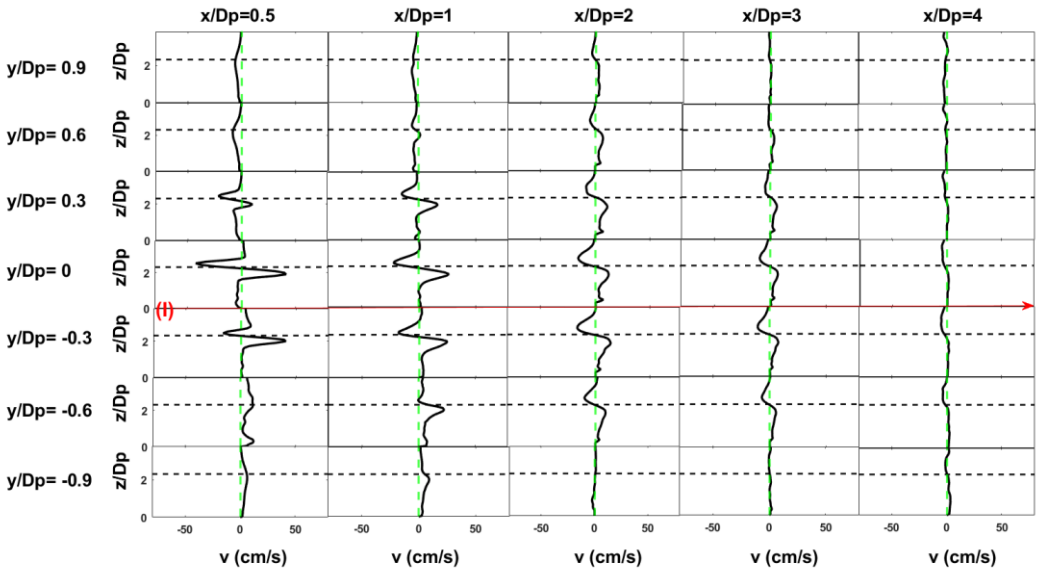
Pervane ekseninden uzaklaşıldıkça ($y=-0.5D_p$ ve $0.5D_p$) değişen y/D_p konumlarında, pervane dönüşüne bağlı olarak yanal hız bileşenlerinde eksenel konuma benzer S-şekilli bir profil oluştuğu gözlemlenmektedir. Bu profil, akım yönünde ilerledikçe genliğini kaybederek sıfıra yaklaşan bir dağılıma dönüşmektedir. Pervane çapı dışındaki bölgelerde ise yanal hızlar neredeyse sıfır seviyesinde kalmakta, bu da pervane kaynaklı üç boyutlu vorteks etkisinin esas olarak pervane alanı içerisinde yoğunlaştığını ve dış bölgelerde karışımın zayıfladığını göstermektedir. Yanal hız bileşenlerindeki bu değişim, serbest jet bölgesi (I) boyunca oldukça belirgin şekilde izlenebilirken, geçiş bölgesinde (II) etkisini kaybetmeye başlamakta ve duvar jeti bölgesinde (III) ise, eksenel doğrultuda olduğu gibi, hız bileşenleri neredeyse sıfırlanmaktadır. Şekil 4.2–Şekil 4.46'da gözlemlenen hız profillerindeki pik değerlerin konumsal değişimi, büyük ölçüde bu yanal hız bileşenindeki varyasyonların etkisiyle açıklanabilir.



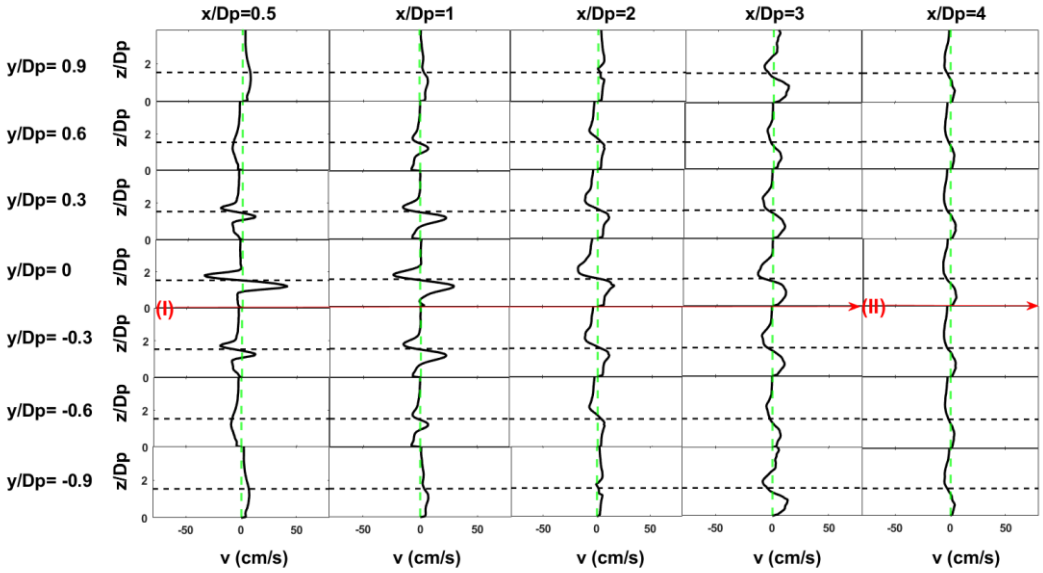
Şekil 4.132 D=6.5 cm, Rpm=590, G=15 cm için I bölgesinde (serbest jet) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı



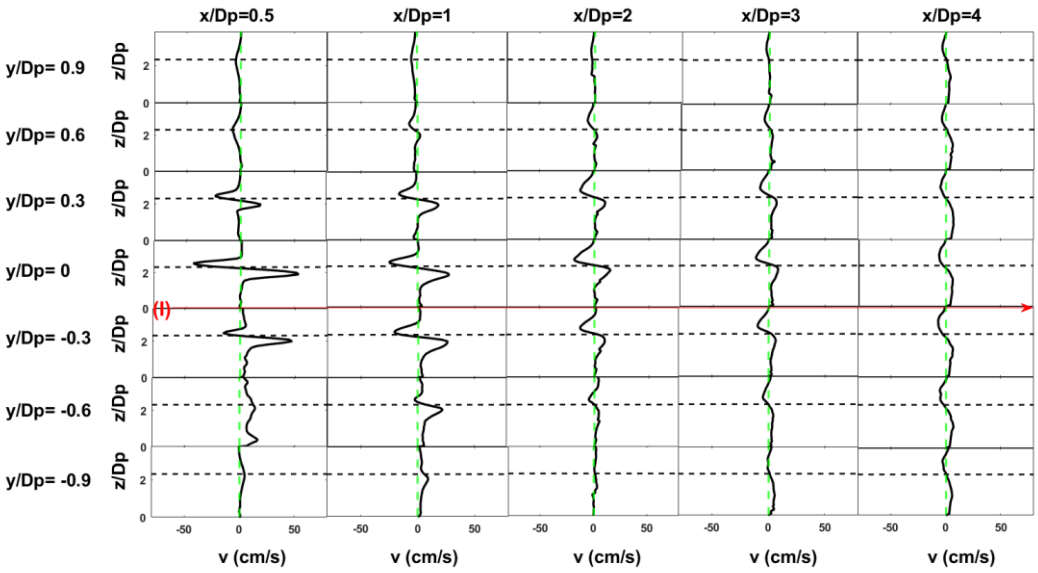
Şekil 4.133 D=6.5 cm, Rpm=590, G=10 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı



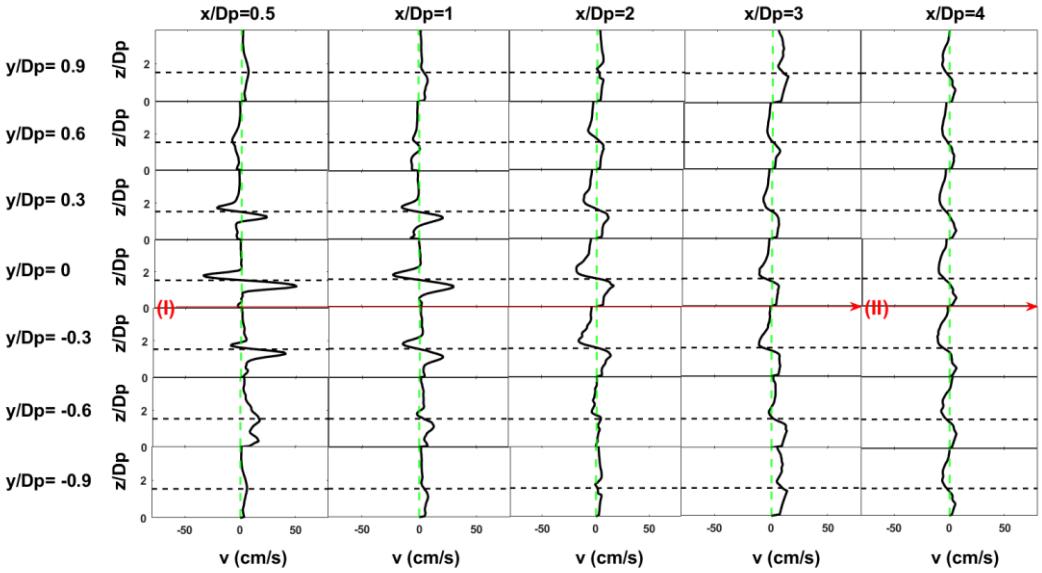
Şekil 4.134 D=6.5 cm, Rpm=670, G=15 cm için I bölgesinde (serbest jet) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı



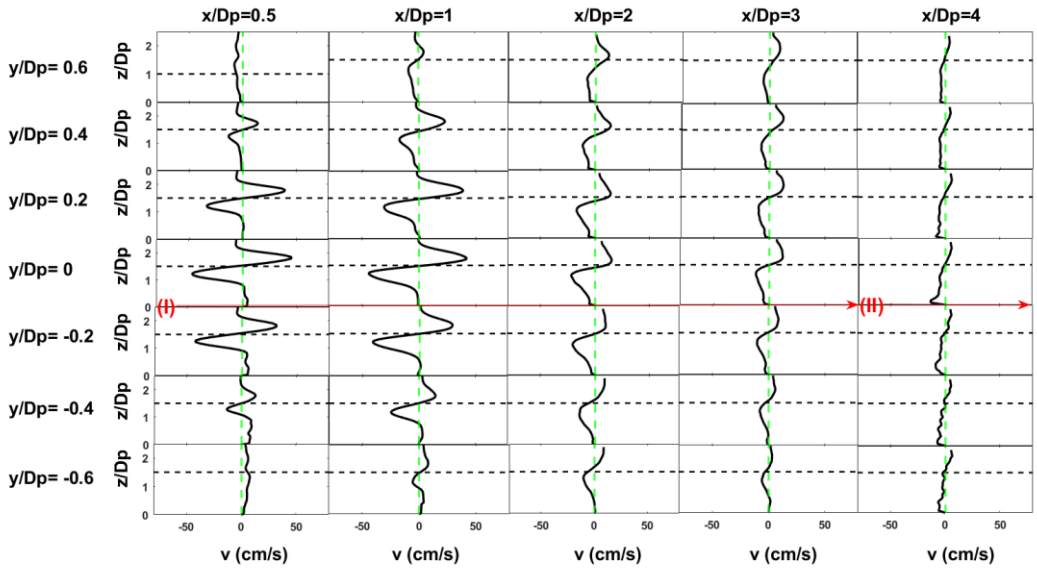
Şekil 4.135 D=6.5 cm, Rpm=670, G=10 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı



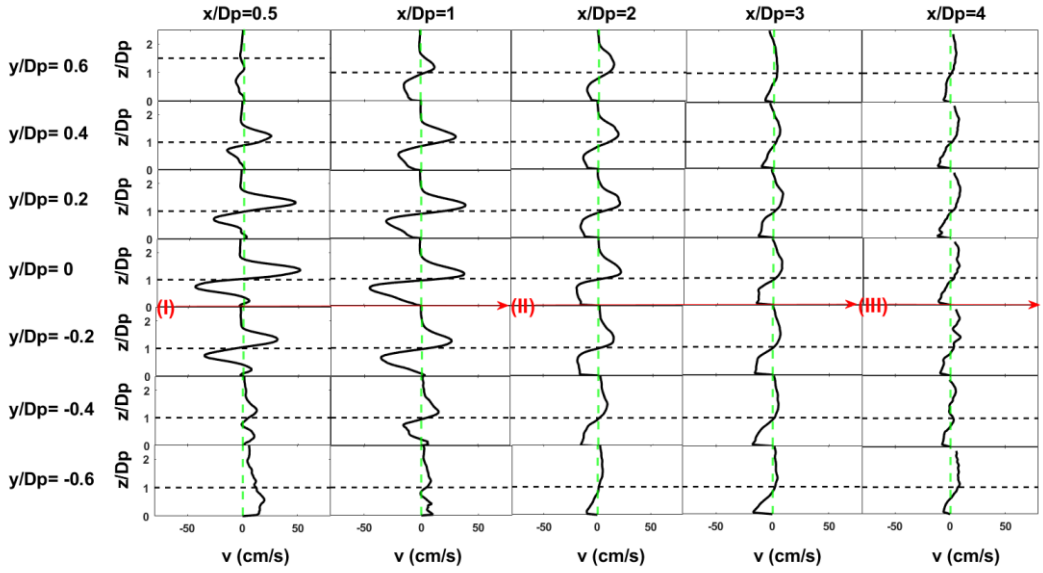
Şekil 4.136 D=6.5 cm, Rpm=745, G=15 cm için I bölgesinde (serbest jet) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı



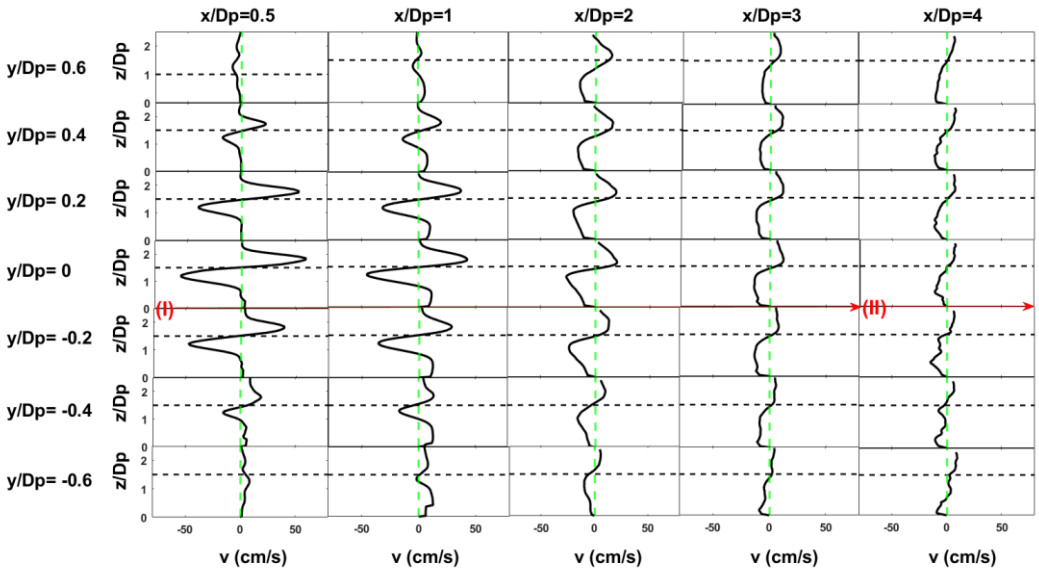
Şekil 4.137 D=6.5 cm, Rpm=745, G=10 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı



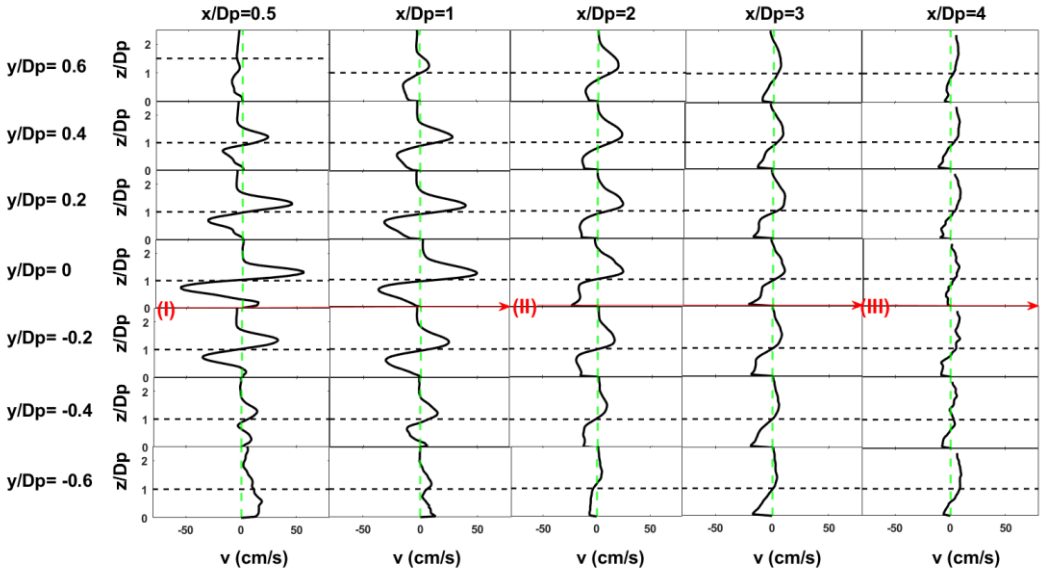
Şekil 4.138 D=10 cm, Rpm=590, G=15 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı



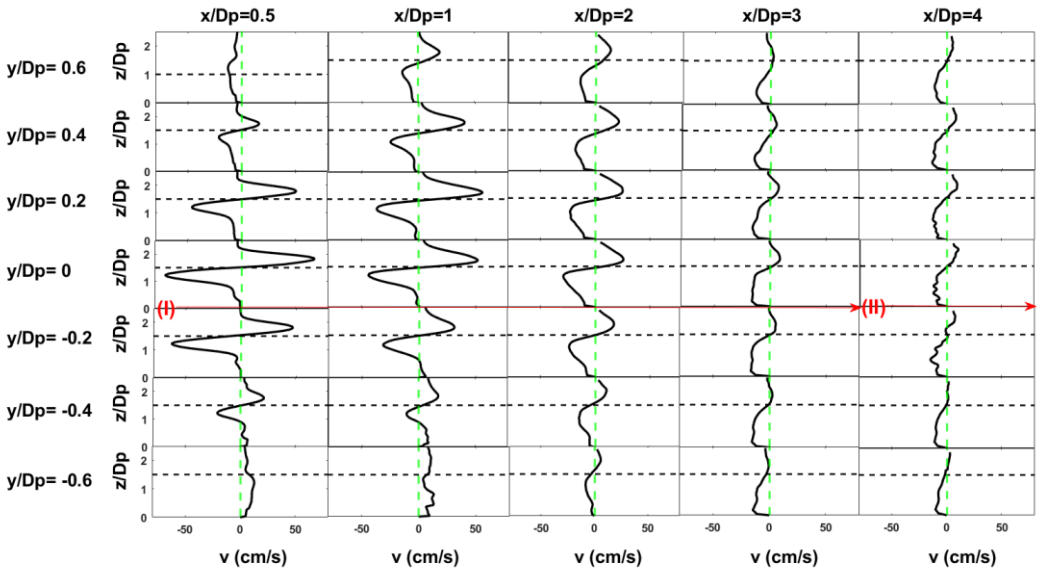
Şekil 4.139 D=10 cm, Rpm=590, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı



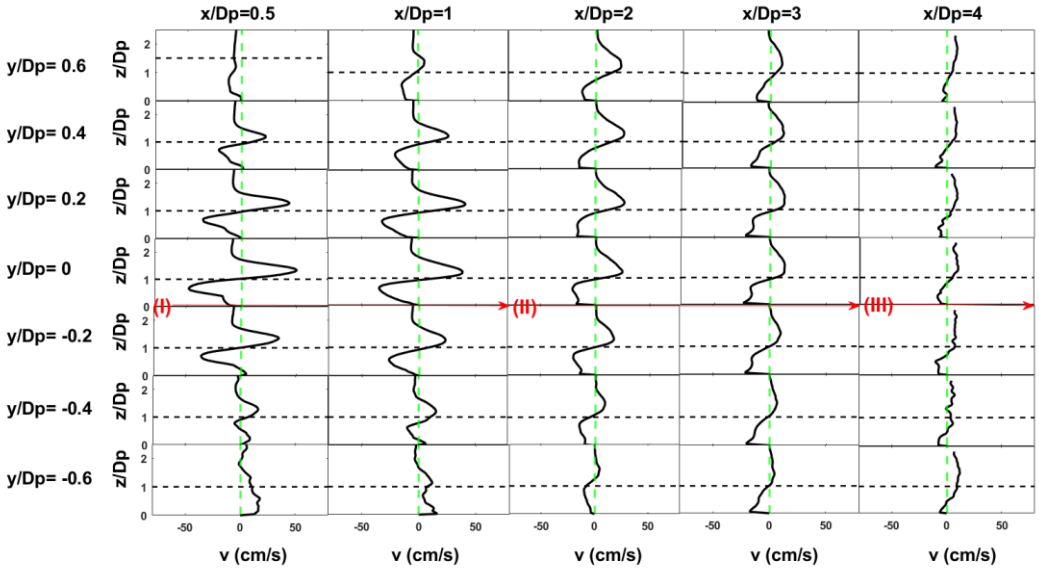
Şekil 4.140 D=10 cm, Rpm=670, G=15 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı



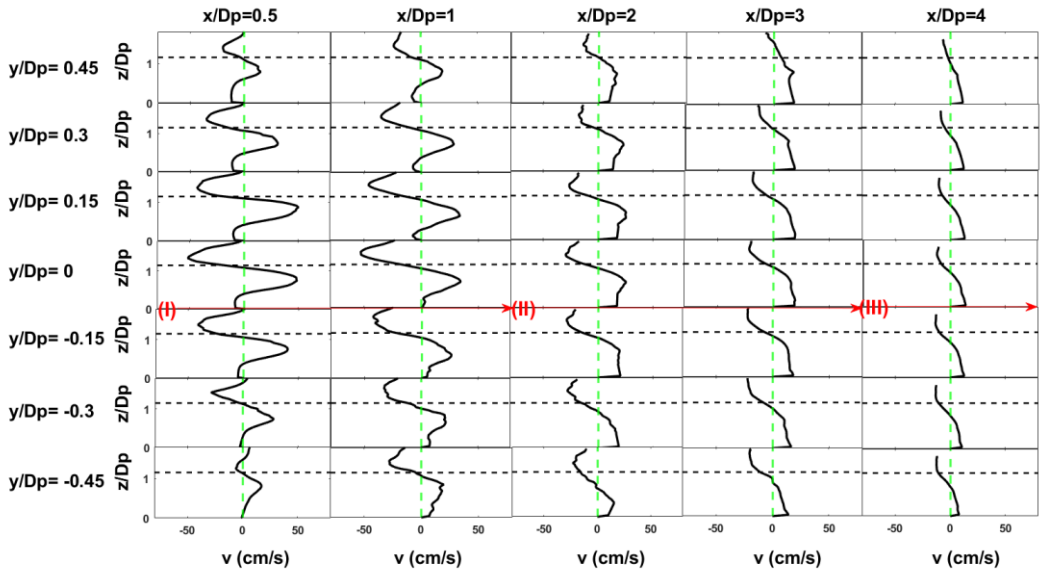
Şekil 4.141 D=10 cm, Rpm=670, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı



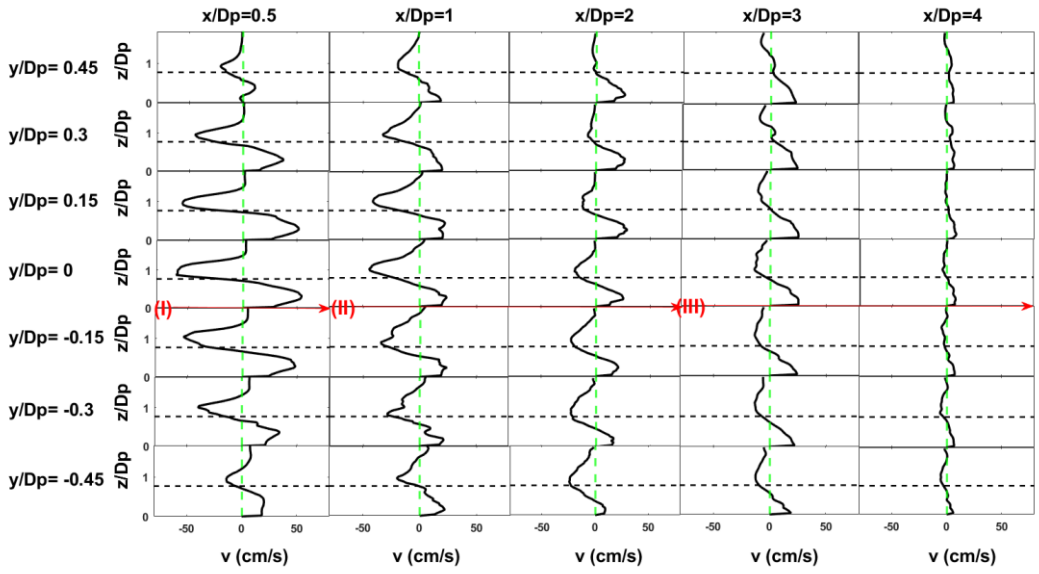
Şekil 4.142 D=10 cm, Rpm=745, G=15 cm için I, II bölgelerinde (serbest jet, geçiş) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı



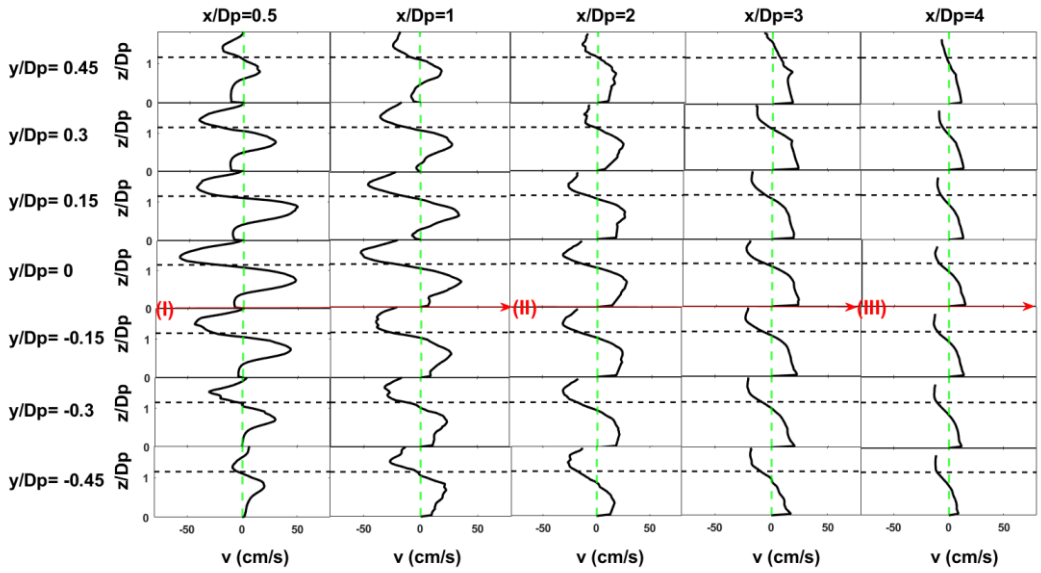
Şekil 4.143 D=10 cm, Rpm=745, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı



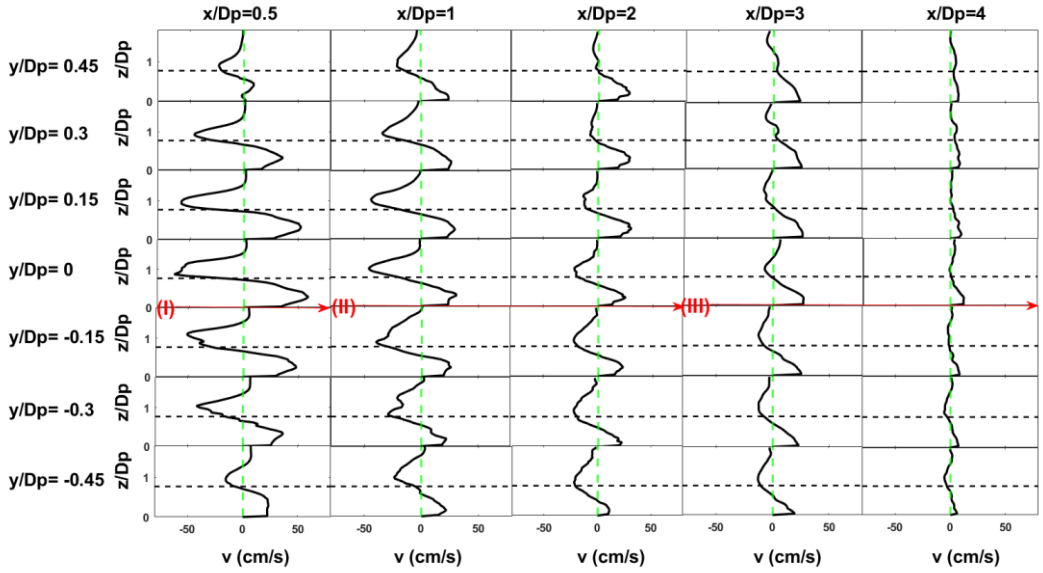
Şekil 4.144 D=13 cm, Rpm=590, G=15 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı



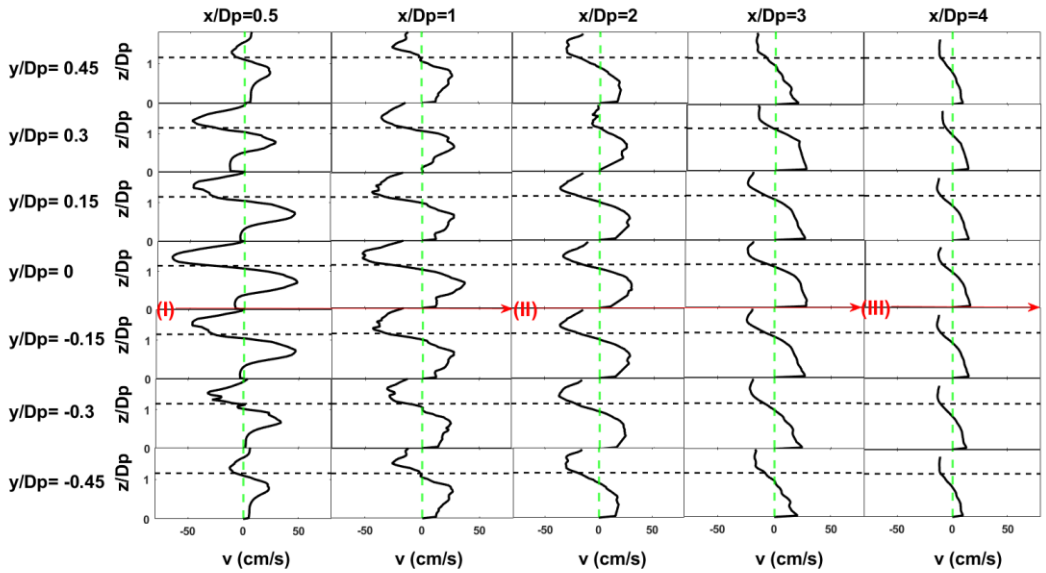
Şekil 4.145 D=13 cm, Rpm=590, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı



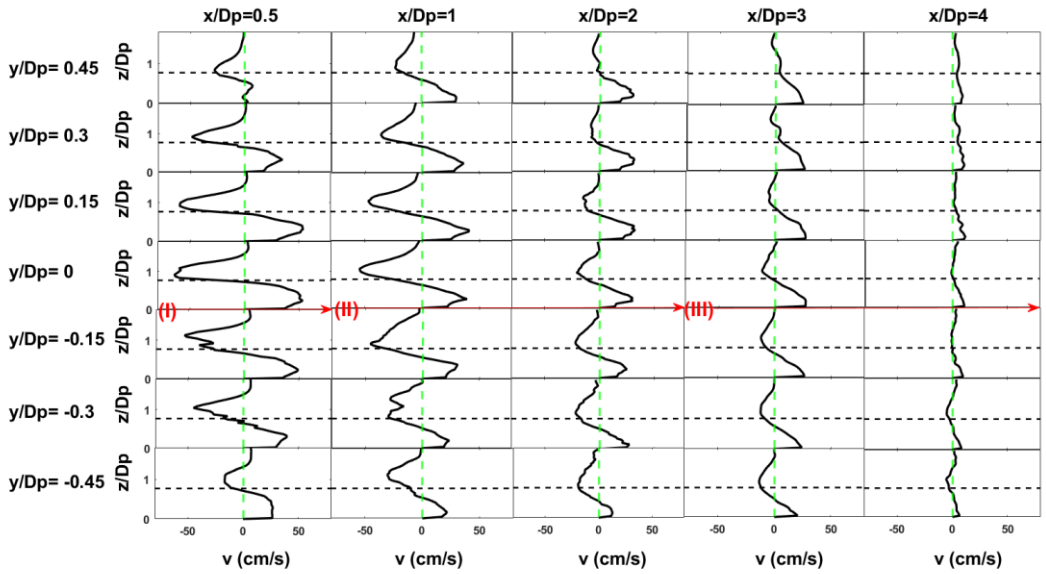
Şekil 4.146 D=13 cm, Rpm=670, G=15 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı



Şekil 4.147 D=13 cm, Rpm=670, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı



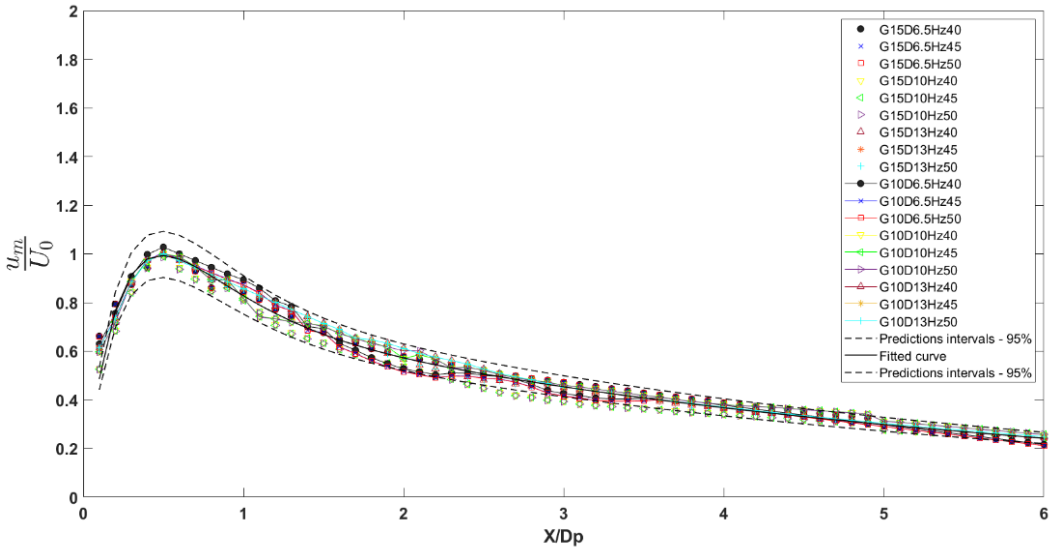
Şekil 4.148 D=13 cm, Rpm=745, G=15 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı



Şekil 4.149 D=13 cm, Rpm=745, G=10 cm için I, II, III bölgelerinde (serbest jet, geçiş, duvar jeti) farklı akım konumlarında ortalama yanal hız dağılımı

4.5.2 Maksimum Eksenel Hız Değişimi

Önceki bölümlerde sunulan deney parametrelerine bağlı olarak jet gelişimi sonucunda eksenel hız bileşenindeki değişimi incelemek amacıyla, Şekil 4.150'de maksimum eksenel hız bileşeni u_m'nin büyüklüğündeki değişim gösterilmektedir.



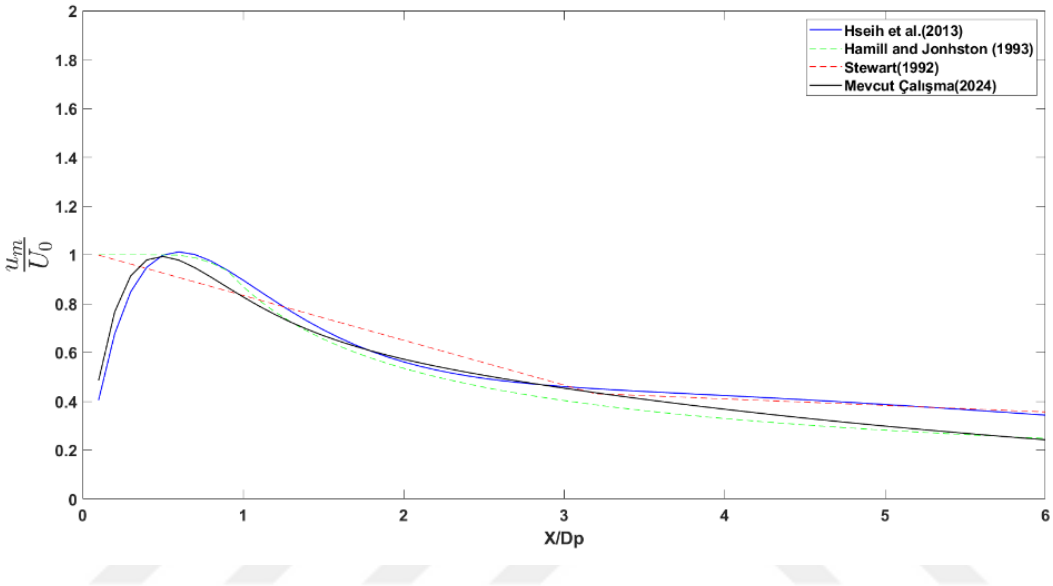
Şekil 4.150 Maksimum eksenel hızın azalması

Pervane dönerken, yukarı akım bölgesindeki akışkan kanat bölgesine doğru çekildiğinden, en yüksek hızların pervane düzleminde gözlenmesi beklenmektedir. Jetin yüksek hızlı bölgesine ortam akışkanının giriş yapmasıyla birlikte maksimum eksenel hız bileşeninde bir azalma meydana gelmesi öngörülmektedir. Ancak Şekil 4.150 incelendiğinde, verilen deney koşulları altında normalize edilmiş maksimum eksenel hız (um) değerinin, x=1 D_p mesafesine kadar belirgin bir azalma göstermediği; tersine, x=0.5 D_p civarında hafif bir artış sergilediği gözlemlenmiştir. Bu artışın, akımın daralarak hızlandığı daralma bölgesi (vena kontrakta) etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Genel olarak, her iki açıklık yüksekliği için maksimum eksenel hızın değişim eğrileri benzer bir eğilim göstermektedir. Pervane jetinin, x=1 D_p mesafesine kadar serbest jet bölgesi içerisinde benzer hız kayıpları sergilemesi, bu davranışın açıklık yüksekliğinden bağımsız olduğunu ortaya koymaktadır. Bu noktadan sonra, düşük açıklık yüksekliğine sahip durumda, beklenenin aksine daha büyük bir hız kaybı gözlenmemektedir. Bu durum, Johnston vd. (2013) tarafından ifade edilen, sınırlı

ortamın jet içerisine ortam akışkanının sürüklenmesini kısıtlayarak karışım yoğunluğunu azalttığı ve dolayısıyla maksimum eksenel hızın değişim oranını düşürdüğü yönündeki bulgularla tutarlıdır. Böylelikle her iki açıklık durumu için benzer değişim eğrileri elde edilmiştir.

Maksimum eksenel hızdaki bu değişim, literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve sonuçlar Şekil 4.151'de sunulmuştur.



Şekil 4.151 Maksimum eksenel hızdaki azalmanın literatürdeki bulgularla karşılaştırılmalı incelenmesi

Bu çalışmada, her bir deney koşulu için elde edilen maksimum eksenel hız, Hsieh vd. (2013) tarafından uygulanan yöntem doğrultusunda, $x/D_p = 0.5$ konumundaki maksimum hız (U_0) ile normalize edilerek x/D_p'ye karşı Şekil 4.150'da sunulmuştur. Şekil incelendiğinde, maksimum eksenel hızın tüm deney koşullarında yaklaşık $x/D_p \approx 0.5$ konumunda pik yaptığı ve bu noktadan itibaren azalma eğilimine girdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, Tablo 2.1'de verilen ampirik formüller kullanılarak hesaplanan değerler ile birlikte Şekil 4.151'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Genel olarak, hem bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçların hem de literatürde önerilen denklemlerle hesaplanan değerlerin maksimum eksenel hızdaki azalma eğilimlerini benzer şekilde yansıttığı görülmektedir.

4.5.3 Kayma Gerilmesi

Türbülanslı akımların incelenmesinde, taban kayma gerilmesi genellikle Reynolds gerilme dağılımının tabana doğru ekstrapolasyonu yoluyla tahmin edilmektedir (Dey, 2014). PIV tekniği sayesinde, noktasal ölçüm hassasiyetinde ve yüksek uzamsal çözünürlükte tabana yakın akım alanı verileri elde edilebilmektedir. Bu çalışmada elde edilen deneysel veriler, akım Reynolds sayısı ile pervane kanatları boyunca akımın vizkozitesine bağlı ölçek etkileri açısından Verheij (1983) tarafından belirtilen eşik değerlerle uyumlu olup, ilgili parametreler Tablo 4.8'te sunulmuştur.

$$Fr = \frac{U_0}{\sqrt{gD_p}} \tag{4.1}$$

$$Re_f = \frac{U_0 D_p}{v} \tag{4.2}$$

burada;

U_0 = Akım hızı (ms^{-1})

Fr = Froude Sayısı

Re_f = Akım Reynolds Sayısı

D_p = Pervane Çapı (m)

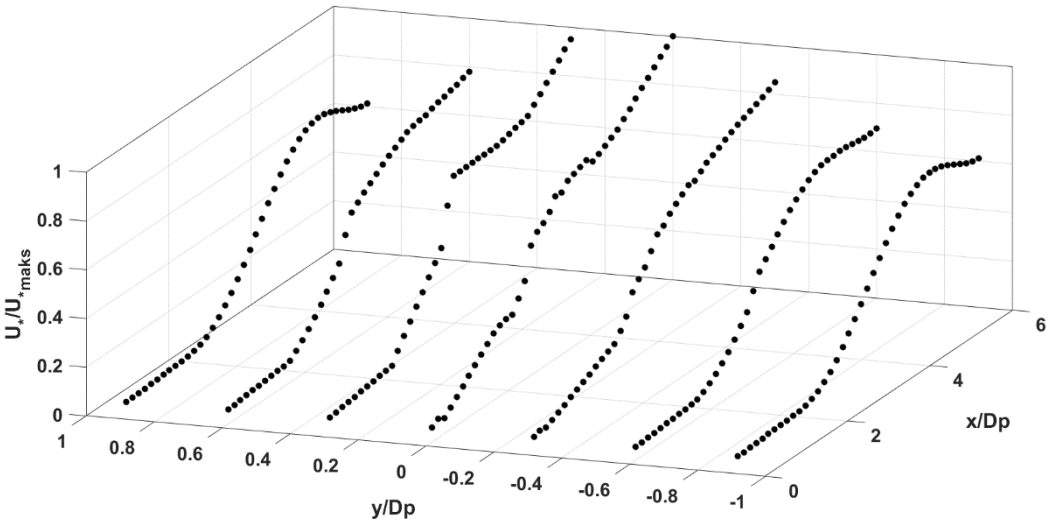
Tablo 4.8 Deneylerin kapsadığı boyutsuz parametrelerin özeti

Pervane Çapı	Fr	$Re_f x10^5$
6.5 cm	0.9-1.1	0.45-0.55
10 cm	1.15-1.46	1.1-1.4
13 cm	1.35-1.65	1.97-2.4

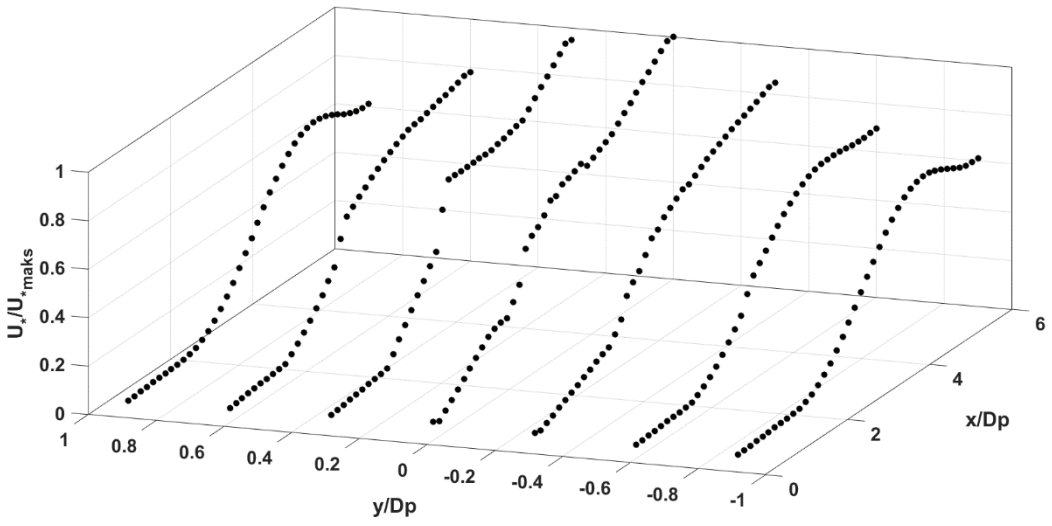
4.5.3.1 Akım boyunca boyutsuz kayma hızı değişimi

Rijit tabana yakın kayma gerilmesi değerlerinde, olası sınır etkilerinden kaçınmak ve yansıma kaynaklı ölçüm hatalarını en aza indirmek amacıyla, analizlerde taban yüzeyinin 5 mm üzerindeki konumdan elde edilen veriler kullanılmıştır. Akım boyunca gerçekleştirilen PIV ölçümlerinde, kayma gerilmesi değerleri x/D_p boyunca, boyutsuz kayma hızının maksimum kayma hızına oranı (U_*/U_{*maks}) cinsinden değerlendirilmiş ve bu değişimler, en küçük pervane çapı ve en düşük

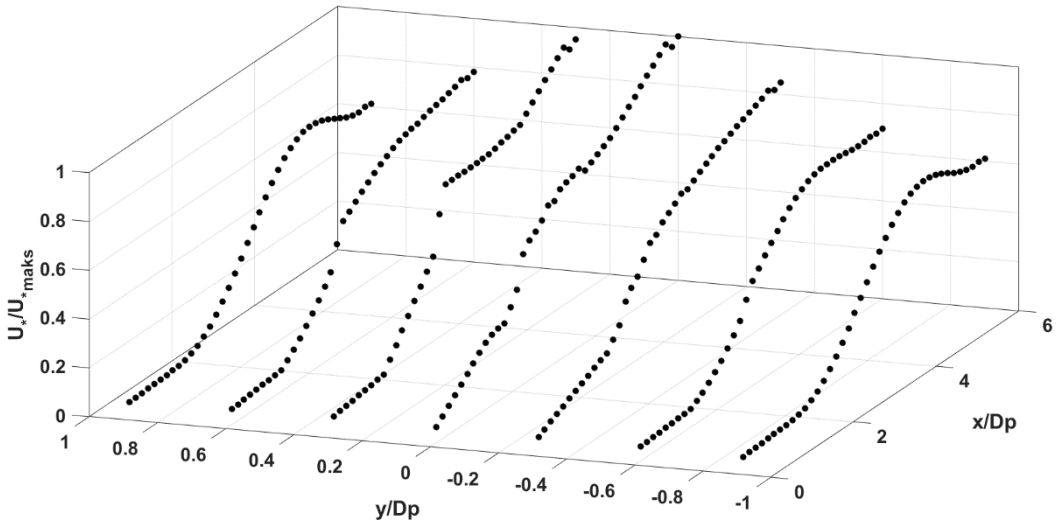
devir sayısından başlanarak akım yönünde pozitif en büyük eksen konumuna kadar elde edilen verilerle birlikte Şekil 4.152-Şekil 4.169 arasında sunulmuştur.



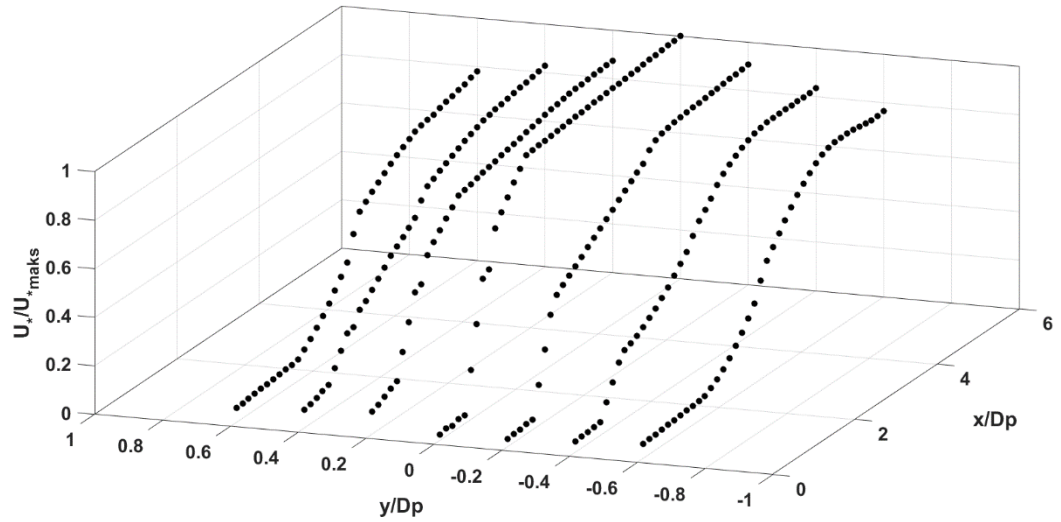
Şekil 4.152 D=6.5 cm, Rpm =590, G= 10 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi



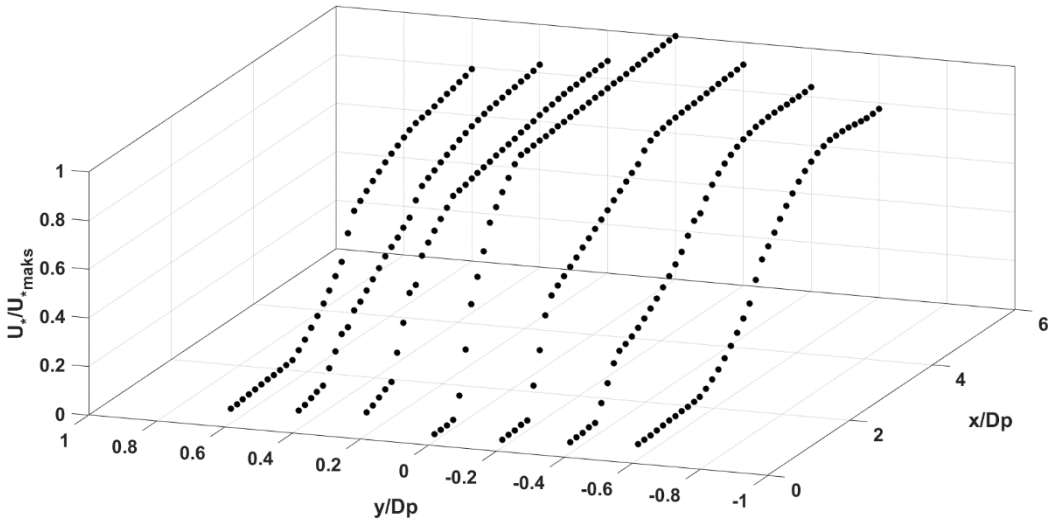
Şekil 4.153 D=6.5 cm, Rpm =670, G= 10 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi



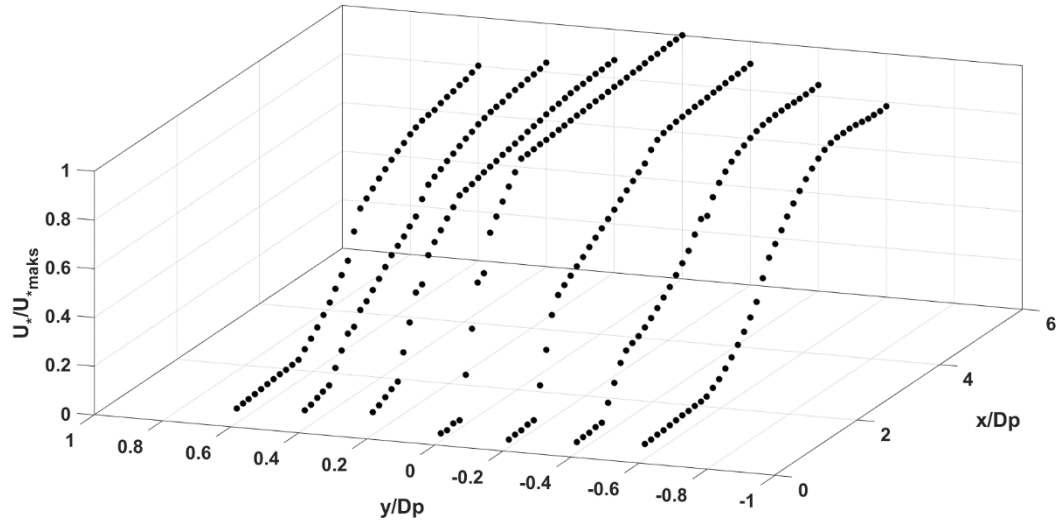
Şekil 4.154 D=6.5 cm, Rpm =745, G= 10 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi



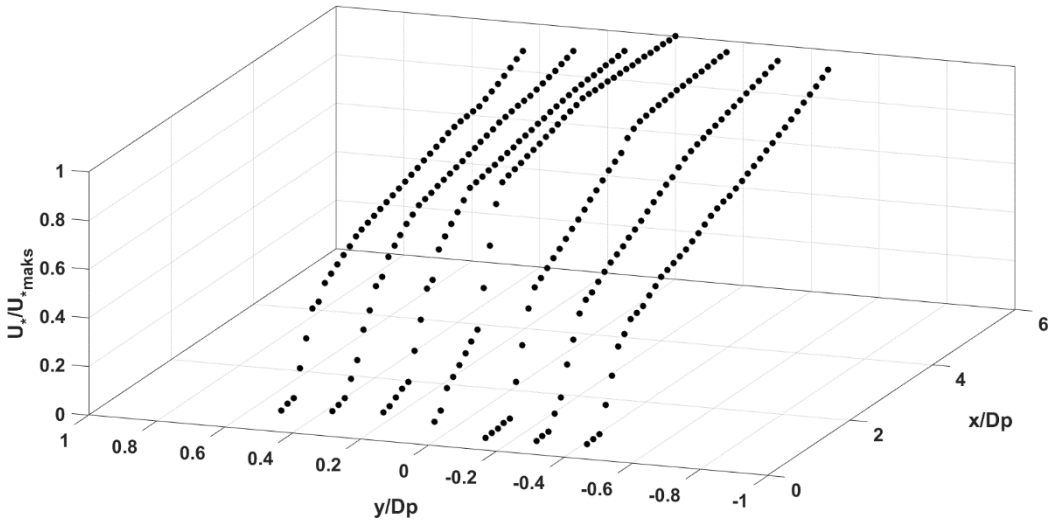
Şekil 4.155 D=10 cm, Rpm =590, G= 10 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi



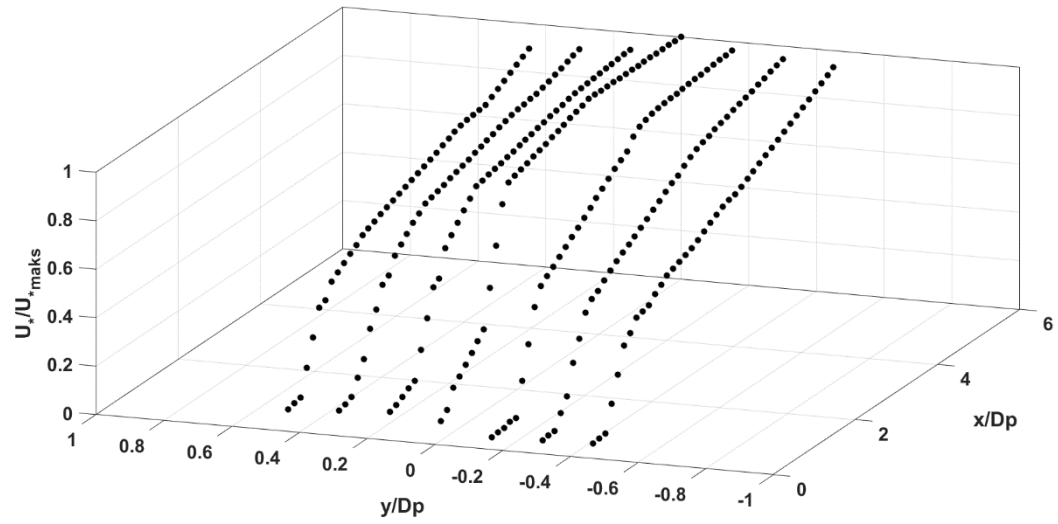
Şekil 4.156 D=10 cm, Rpm =670, G= 10 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi



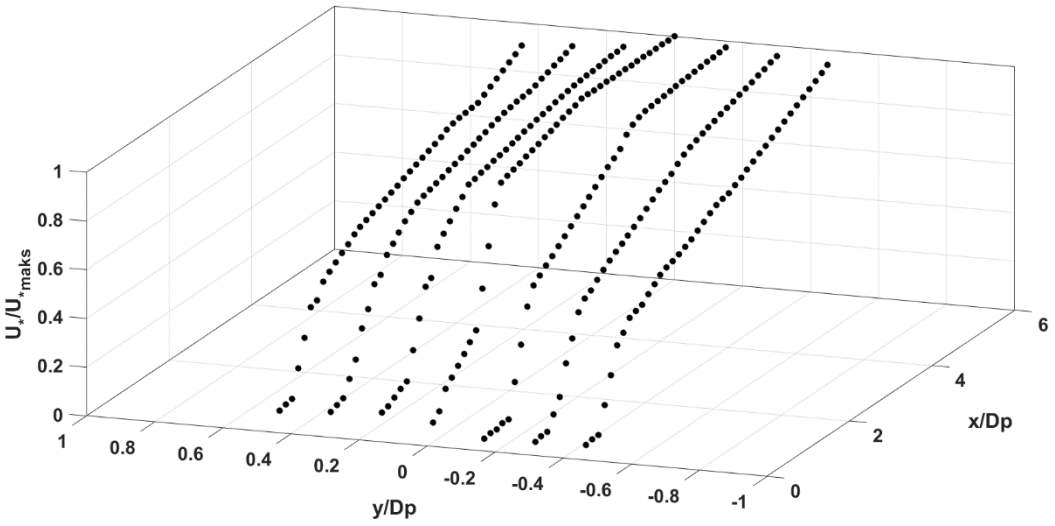
Şekil 4.157 D=10 cm, Rpm =745, G= 10 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi



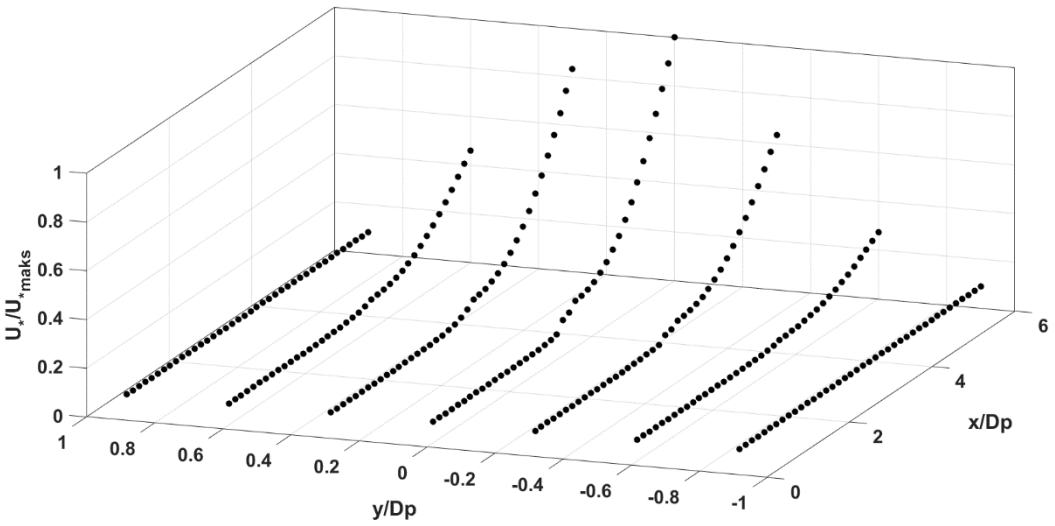
Şekil 4.158 D=13 cm, Rpm =590, G= 10 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi



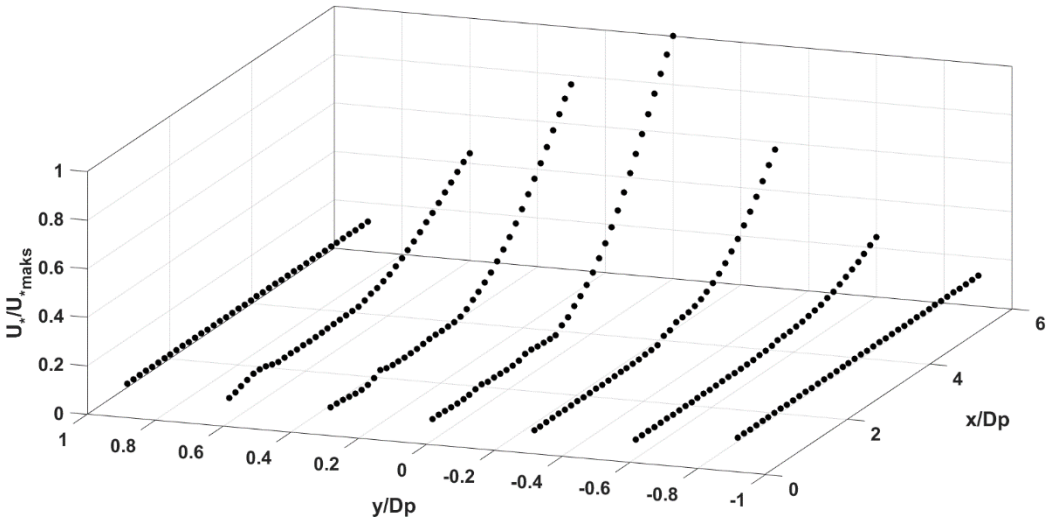
Şekil 4.159 D=13 cm, Rpm =670, G= 10 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi



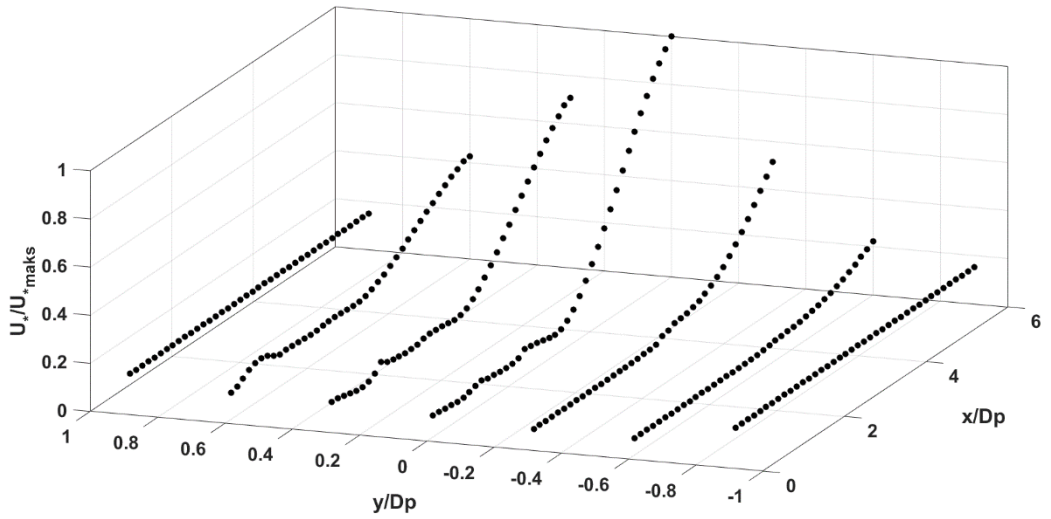
Şekil 4.160 D=13 cm, Rpm =745, G= 10 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi



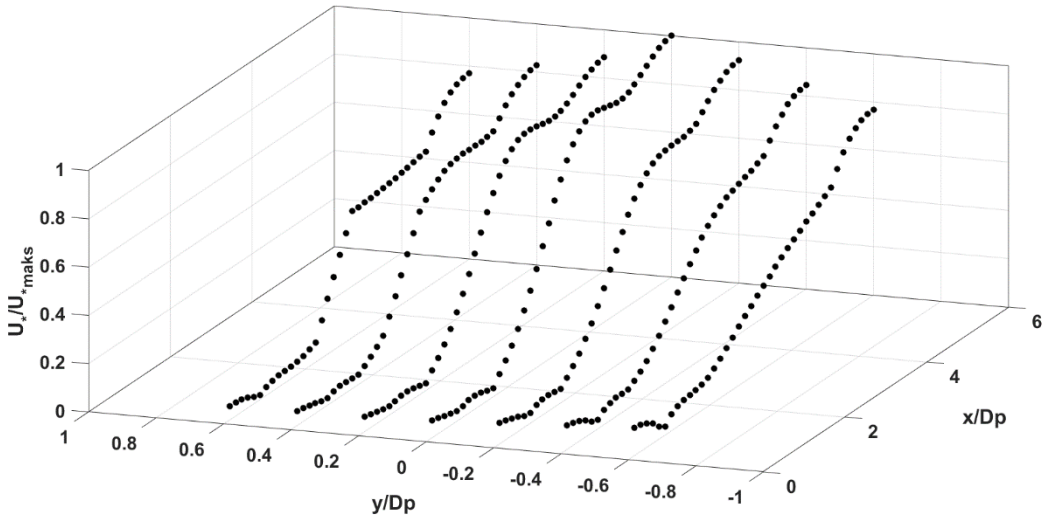
Şekil 4.161 D=6.5 cm, Rpm =590, G= 15 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi



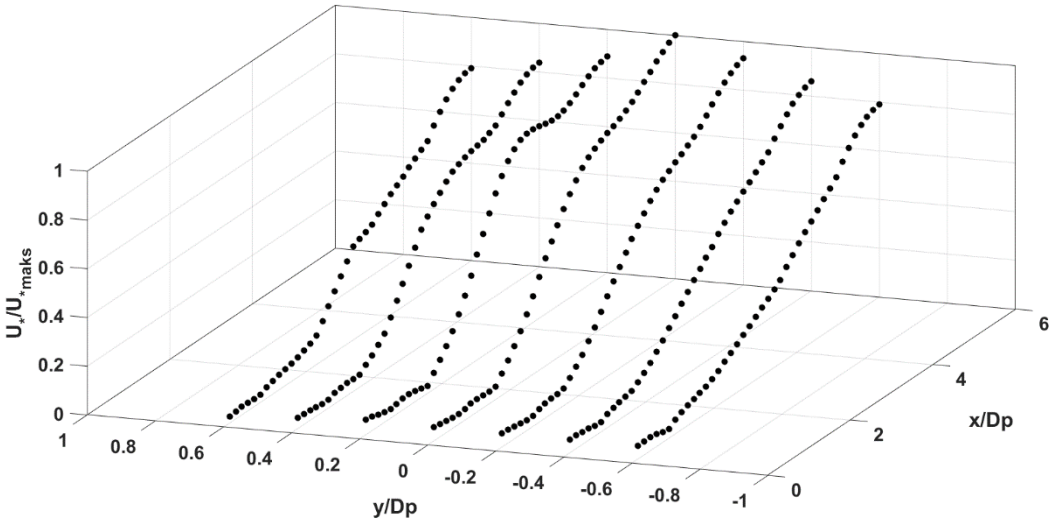
Şekil 4.162 D=6.5 cm, Rpm =670, G= 15 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi



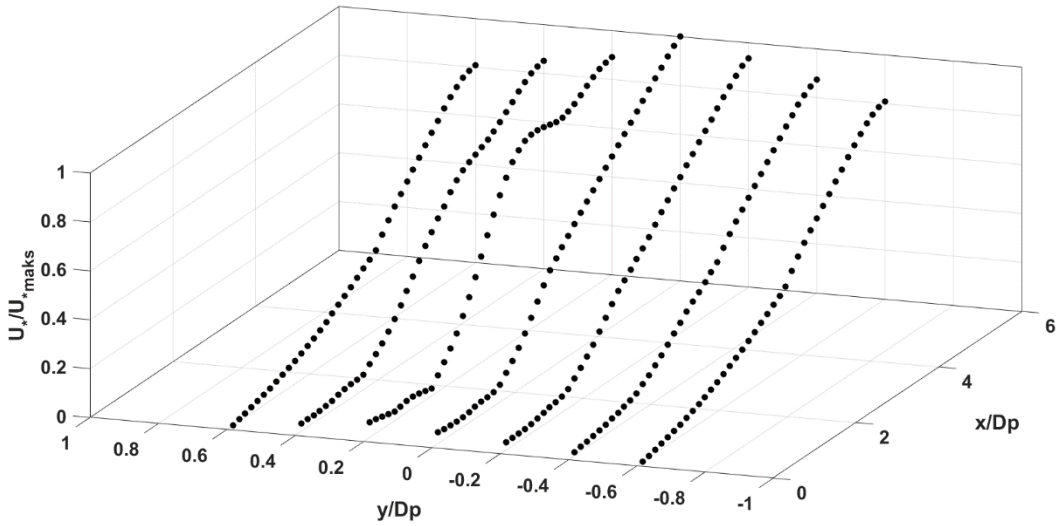
Şekil 4.163 D=6.5 cm, Rpm =745, G= 15 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi



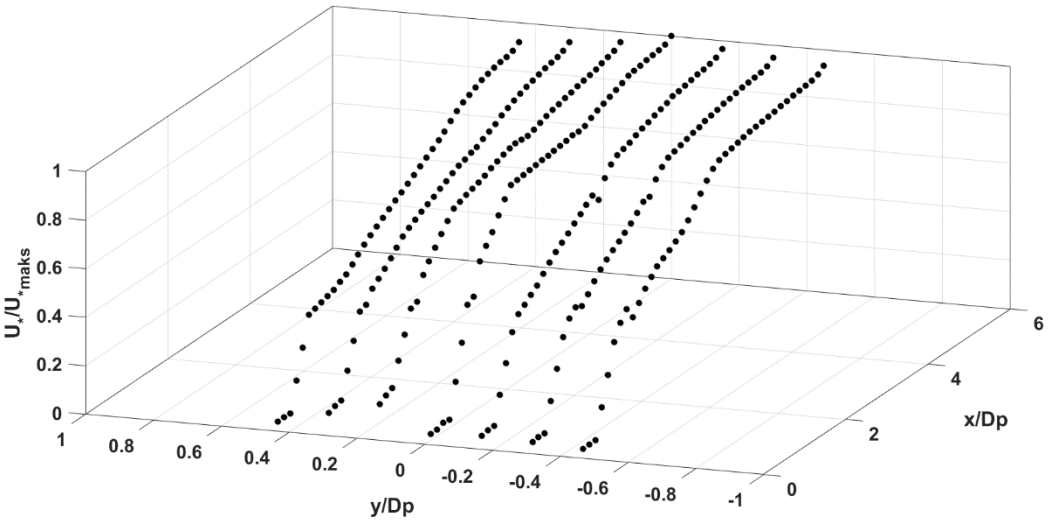
Şekil 4.164 D=10 cm, Rpm =590, G= 15 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi



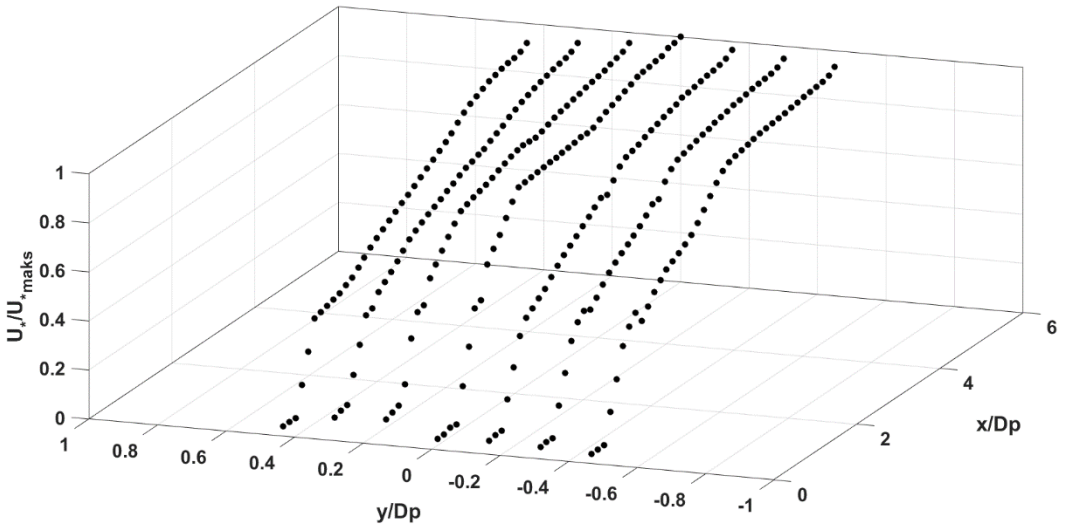
Şekil 4.165 D=10 cm, Rpm =670, G= 15 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi



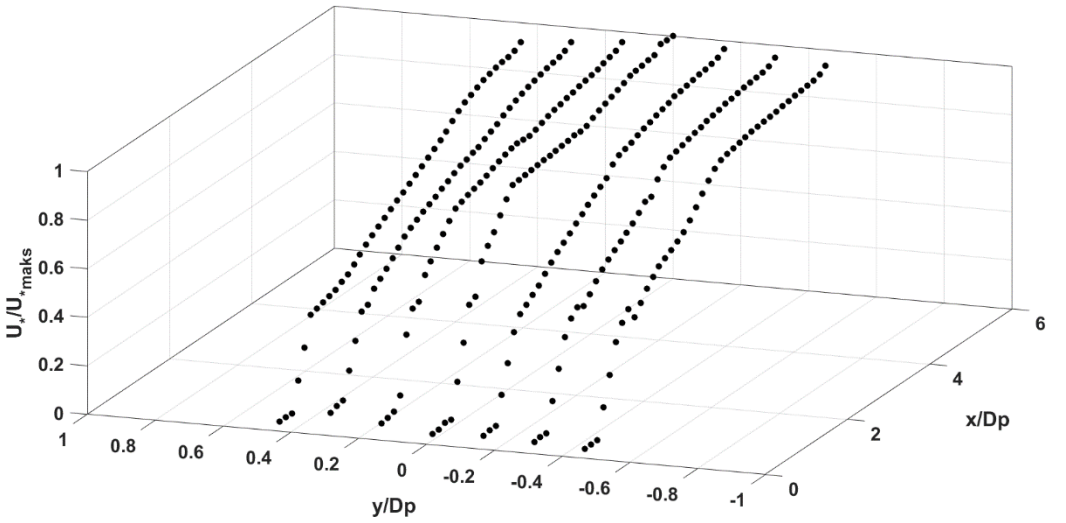
Şekil 4.166 D=10 cm, Rpm =745, G= 15 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi



Şekil 4.167 D=13 cm, Rpm =590, G= 15 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi



Şekil 4.168 D=13 cm, Rpm =670, G= 15 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi



Şekil 4.169 D=13 cm, Rpm =745, G= 15 cm için boyutsuz kayma hızının x/D_p boyunca değişimi

Pervane jet akımı gelişim sürecinde taban üzerindeki kayma gerilmesi geçiş bölgesine kadar monoton bir şekilde artmaktadır. Jetin tabanla etkileşime geçtiği bölgede, serbest jet bölgesine kıyasla kayma gerilmesinde daha belirgin bir artış gözlenmiştir. Ancak gözlem sınırları içerisinde yer alan $x = 6\ D_p$ konumu, kayma gerilmesinin pik değerini tespit etmek için yetersiz kalmaktadır. Çünkü bu konumda, merkez düzlemde ($y = 0\ D_p$) boyutsuz kayma hızının maksimum kayma hızına oranı (U_*/U_{*maks}) bir değerine ulaşmış; buna rağmen kayma gerilmesinde bir

azalma gözlenmemiştir. Duvar jeti bölgesinin izlendiği Şekil 4.158–Şekil 4.160 ve Şekil 4.167–Şekil 4.169 ölçümlerinde, kayma gerilmesi maksimum değerine gözlem sınırından önce ulaşmakta ve bu bölgeden itibaren sabitlenmektedir. Bu durum, pervane jetinin oluşturduğu potansiyel bir oyulma derinliğinin, kayma gerilmesinin birden fazla artarak maksimuma ulaştığı konum ile çakıştığını göstermektedir. Bu gözlem, Tan (2019) tarafından benzer pervane akım koşulları altında yapılan deneysel çalışmalarla tutarlılık göstermektedir. Ayrıca, kayma gerilmesinin gelişimindeki yavaşlama veya duraksama, Wei vd. (2017) tarafından duvar jeti bölgesi için yapılan gözlemlerle de örtüşmektedir.

Pervane tarafından oluşturulan vorteks nedeniyle, taban kayma gerilmesi dağılımında pervanenin dönüş yönüne bağlı olarak taban üzerinde hafif sapmalar gözlenmiştir. Pervane kanatlarının tabana doğru hareket ettiği bölgede D_p = 6.5 cm ve 13 cm için y/D_p'nin negatif, Dp = 10 cm için ise y/D_p'nin pozitif olduğu konumlarda – kayma gerilmesi diğer taraflara kıyasla daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu bölgelerde daha yüksek gerilmelerin oluşması, potansiyel olarak daha derin oyulma çukurlarının meydana gelebileceğini göstermektedir. Ancak pervane jet akımı kaynaklı oyulma üzerine yapılan çalışmalarda, Tan (2019) her ne kadar asimetrik bir oyulma çukuru gözlemlemiş olsa da, oyulma derinliğinin pervane dönüş yönünün ters tarafında daha fazla olduğunu tespit etmiştir. Bu gözlemler arasındaki tutarsızlık, rijit taban yüzeyinin pervane jet akımı üzerindeki kısıtlayıcı etkileri ile açıklanabilmektedir.

Şekil 4.152-Şekil 4.169 arasında kullanılan U_{*maks} değerleri Tablo 4.9'da sunulmuştur.

Tablo 4.9 U_{*maks} değerleri

Şekil No.	Dp (cm)	G (cm)	n (rpm)	U_{*maks} (m/s)
4.152	6.5	10	590	0.025
4.153	6.5	10	670	0.027
4.154	6.5	10	745	0.030
4.155	10	10	590	0.071
4.156	10	10	670	0.078
4.157	10	10	745	0.084
4.158	13	10	590	0.146
4.159	13	10	670	0.158

Tablo 4.10 U_{*maks} değerleri (devamı)

4.160	13	10	745	0.178
4.161	6.5	15	590	0.014
4.162	6.5	15	670	0.015
4.163	6.5	15	745	0.017
4.164	10	15	590	0.041
4.165	10	15	670	0.046
4.166	10	15	745	0.051
4.167	13	15	590	0.079
4.168	13	15	670	0.086
4.169	13	15	745	0.093

4.5.3.2 Maksimum kayma gerilmesi

Belirli senaryolarda maksimum taban kayma gerilmesinin tahmin edilmesi, kısıtlı taban açıklığına sahip bir geminin oyulma potansiyelini değerlendirmek için bir ölçüt olarak kabul edilmektedir. Kayma gerilmesi bilindiğinde, hareketli tabanın stabilitesi hesaplanan Shields parametresi ile taban malzemesinin kritik Shields sayısının doğrudan karşılaştırılmasıyla değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, bir taban malzemesinin üzerindeki anlık kuvvetin, türbülanslı hız bileşenlerinde olduğu gibi zamanla değişkenlik gösterdiği bilinmektedir. Sabit akım koşulları altında ortalama taban kayma gerilmesi, genellikle ampirik bir sürtünme katsayısı (C_f) kullanılarak serbest akım hızının karesiyle ilişkilendirilmekte ve bu ilişki eşitlik (4.3) ile ifade edilmektedir. Blaauw ve Kaa (1978), pervane jetlerinden kaynaklanan ortalama taban kayma gerilmesini elde etmek için ilk kez 0.06 ile 0.11 arasında bir sürtünme katsayısı önermiştir.

Zaman ortalamalı taban kayma gerilmesinin pervane dönüş hızının bir fonksiyonu olarak da tahmin edilebileceği, dolayısıyla deneysel koşullara bağlı olarak farklı ayarlamalarla çıkış hızına bağlı şekilde de öngörülebileceği anlaşılmaktadır. Literatürde, pervane jetleri nedeniyle taban yakınındaki maksimum hızı elde etmek için, çıkış hızı ve taban açıklığının bir fonksiyonu olarak çeşitli ifadeler mevcuttur. Pervane düzleminden herhangi bir mesafede maksimum eksenel hız bilindiğinde, eksenel simetrik akım ve dinamik olarak benzer bir difüzyon süreci varsayımı altında, hız dağılımı eşitlik (4.5) formundaki bir Gauss dağılım fonksiyonu ile karakterize edilmektedir. Geçmiş çalışmalarda tabana yakın hız ölçümleri zorluğu sebebiyle, sınır koşullarına bağlı olarak bir katsayı kullanılmaktadır ve eşitlik (4.4),

içerisinde yer alan C_1 katsayısı yaygın biçimde tabana yakın hızın tahmini amacıyla kullanılmaktadır.

Maynord (2000), eşitlik (4.4) ile hesaplanan tabandaki maksimum hızın ve çap-taban açıklığı oranının bir fonksiyonu ($C_f = 0.01(\frac{G}{D_p})^{-1}$) olarak geçen bir geminin en yüksek taban kayma gerilimini tahmin etmek için eşitlik (4.3) kullanılmasını önermektedir. Bu çalışmada, pervane jetlerinden kaynaklanan taban kayma gerilimini doğrudan ölçmek için bir dizi PIV ölçümü gerçekleştirilmiştir, bu ölçümleri tahmin etmek için eşitlik (4.6) verilmiştir.

$$\tau = \rho U_*^2 = \frac{1}{2} C_f \rho U_x^2 \tag{4.3}$$

$$U_b = C_1 U_0 \left(\frac{G}{D_p}\right)^{-1} \tag{4.4}$$

$$U_{x,r} = U_0 \frac{1}{2c} \frac{D_0}{x} e^{-\frac{1}{2c^2}\frac{r^2}{x^2}} \tag{4.5}$$

burada;

c = 0.19 kanal ile çerçevelenmemiş pervane durumunda

G = Taban açıklığı (m)

$C_1 = 0.42$

C_f = Sürtünme katsayısı

D_p = Pervane çapı (m)

D_0 = Daralma düzlemindeki pervane çapı (m)

r = Pervane ekseninden radyal mesafe (m)

U_* = Sürtünme hızı (ms^{-1})

U_x = Jet akımının eksenel hızı (ms^{-1})

U_b = Tabandaki maksimum hız (ms^{-1})

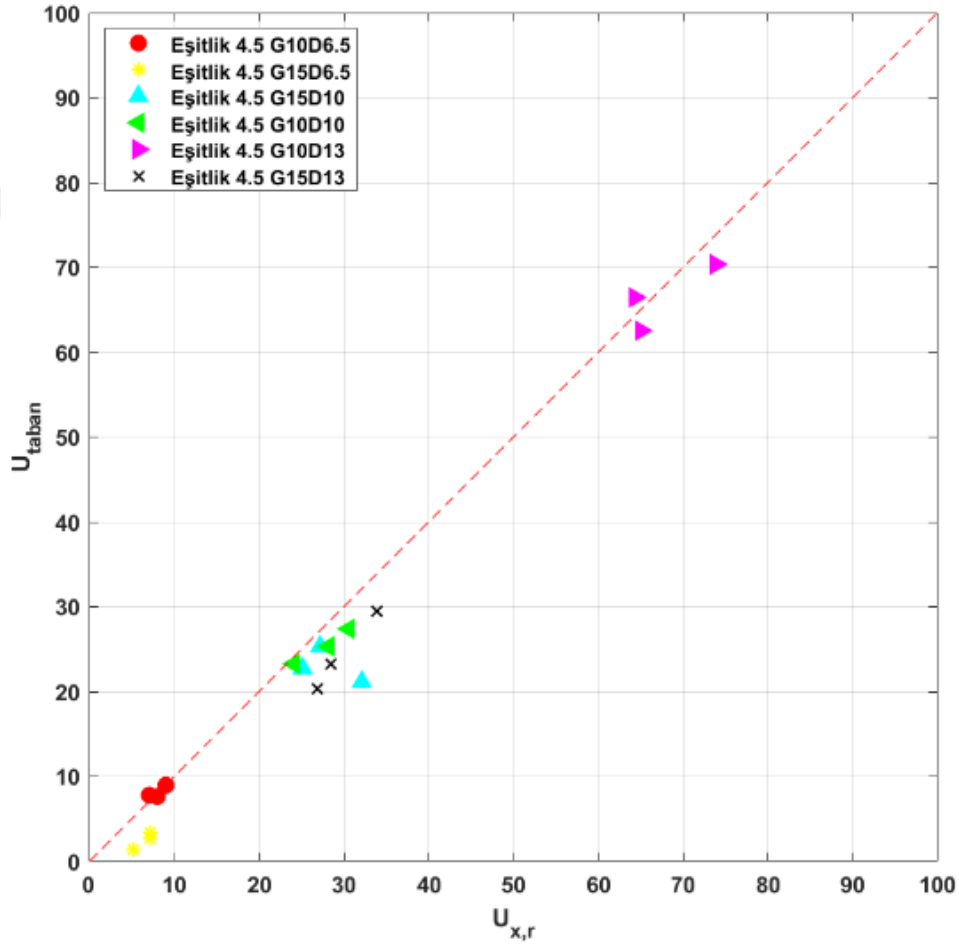
U_0 = Akım hızı (ms^{-1})

$U_{x,r}$ = Hız profili boyunca herhangi bir konumdaki eksenel hız (ms^{-1})

x = Pervane düzleminin aşağısındaki eksenel mesafe (m)

τ= Kayma gerilmesi (Nm^{-2})

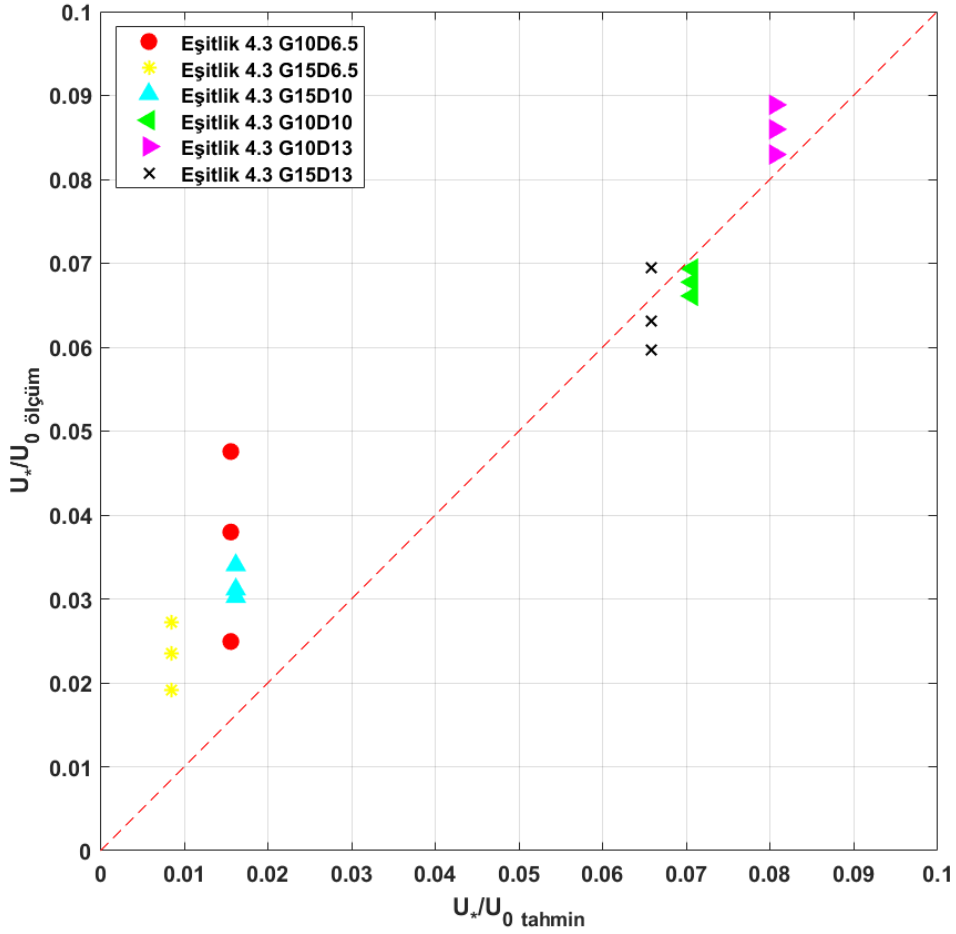
Pervane düzleminden belirli bir mesafede maksimum eksenel hız bilindiğinde, eksenel simetrik ve dinamik akım koşullarında benzer bir difüzyon süreci varsayımıyla, hız dağılımı Eşitlik (4.5)'te verilen Gauss tipi bir dağılım fonksiyonu ile tanımlanabilmektedir. Bu yaklaşım, taban yakınında elde edilen hız ölçümleri ile karşılaştırıldığında, söz konusu bölgedeki hız dağılımını makul bir doğrulukla tahmin etmektedir ve sonuçlar Şekil 4.170'de sunulmuştur.



Şekil 4.170 Deney sonuçları eksenel taban hız değerleri (U_{taban}) ile eşitlik (4.5) kullanılarak tahmin edilen taban hız değerleri karşılaştırması

Maynord (2000), önerdiği modelin uygulama sınırını $G/D_p = 1.2$ olarak belirlemiş ve düşük taban açıklığı durumunda ($G/D_p<1$), pervane kaynaklı taban kayma gerilmesinin tahmin edilmesi için G/D_p, U_0 ve C_f'nin bir fonksiyonu olarak kullanılmasını önermiştir. Bu öneriye dayanarak taban kayma gerilmesi değerleri hesaplanmış ve Şekil 4.171'te boyutsuz (U/U_0) parametrelerine göre sunulmuştur.

Ancak, Maynord'un (2000) önerilerine uygun yapılan hesaplamalar, $G/D_p > 1.2$ koşulunda taban kayma gerilmesinin önemli ölçüde düşük tahmin edilmesine ve belirgin uyuşmazlıklar gözlemlenmesine yol açmıştır.



Şekil 4.171 Boyutsuz kayma hızı değerlerinin deneysel ve teorik (Eşitlik 4.3) karşılaştırması

Ölçülen taban kayma gerilmesinin taban üzerindeki akım koşullarıyla ilişkilendirilmesi, U_0 ve zaman ortalamalı U_b değerleri arasında doğrusallık beklenmesi nedeniyle, ölçüm sonuçlarının tahmini için uygun bir yaklaşım sunmaktadır. Eşitlik (4.6) kullanılarak oluşturulan model, kayma gerilmesinin yakın bir şekilde tahmin edilmesine olanak tanımaktadır. Bu modelin doğruluğu, boyutsuz (U_*/U_0) parametre değeri ile deneysel sonuçlar arasındaki ilişkiyi Şekil 4.172'te göstermektedir ve önerilen ampirik ifade, deneysel verilerle iyi bir uyum sergilemektedir.

$$\tau = \frac{1}{2}\,\rho\,\frac{C_f U_0^2 \left(\frac{U_b}{U_0}\right)^{0.2}}{\left(\frac{C_h}{D_p}\right)^2} \tag{4.6}$$

$$U_b = U_0\ 0.2\ \left(\frac{G}{D_p}\right)^{-3} \tag{4.7}$$

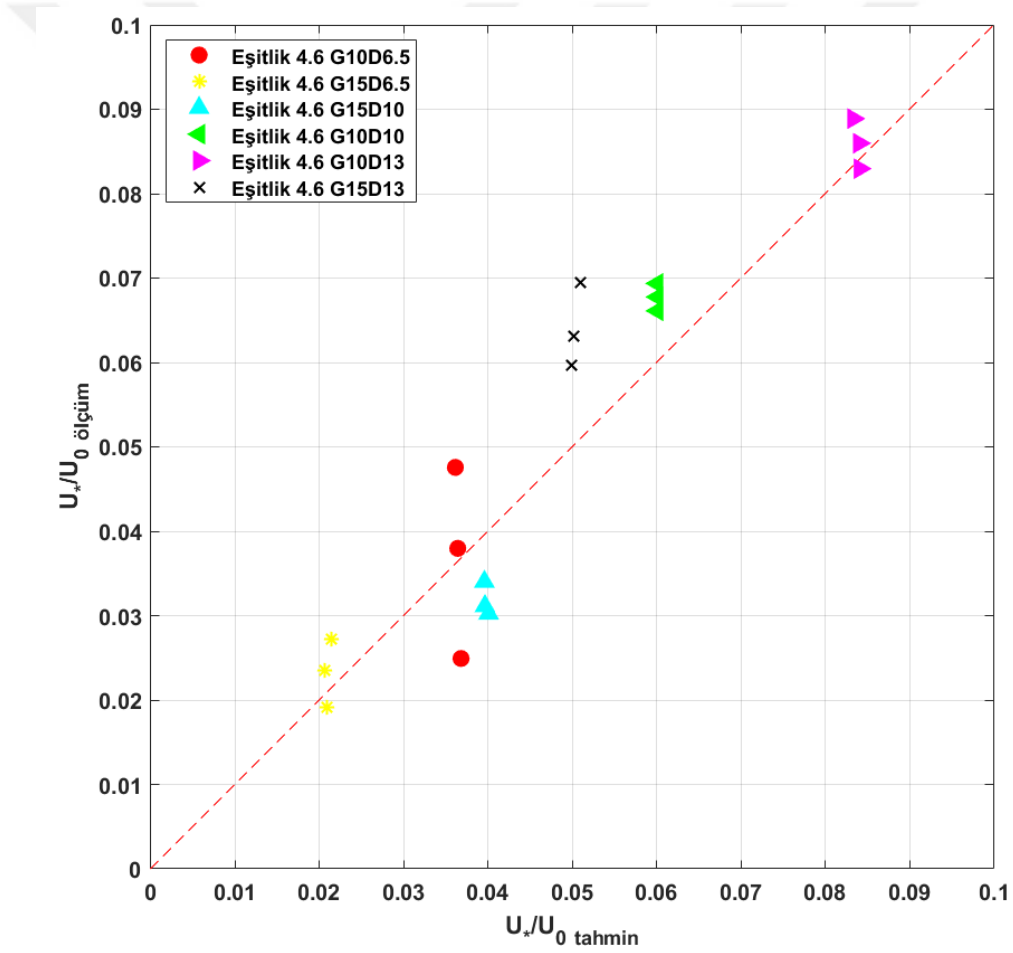
$$C_f = 0.01 \tag{4.8}$$

burada;

C_f = Sürtünme katsayısı

G = Pervane açıklığı (m)

U_b = Tabandaki maksimum hız (ms^{-1})



Şekil 4.172 Boyutsuz kayma hızı değerlerinin deneysel ve teorik (Eşitlik 4.6) karşılaştırması

Şekil 4.172'te, sonuçlar eşitlik (4.6)'ya göre sunulmuştur. Bu sonuçlar, pervane kaynaklı kayma gerilmesinin bu deney koşulları altında tahmin edilmesi için makul bir seçenek olarak değerlendirilmektedir.

Wei vd. (2020), yatay bir sınırla kısıtlanan pervane jetinin özelliklerini ölçmek için PIV ile deneysel bir çalışma gerçekleştirmiş ve taban kayma gerilmelerini ölçmüşlerdir. Bu araştırma Hseih vd. (2016), Wei vd. (2017) ve Guan vd. (2019) ile uyumludur. Burada aynı sistem vizkoz alt tabadaki doğrusal hız gradyanını ve dolayısıyla kayma gerilmesini elde etmeyi sağlayan yüksek çözünürlüklü hız ölçümleri elde etmek için kullanılmıştır. Çalışmalarında, $U_0 = 0.4$ ms^{-1} ile $D_p = 7.5$ cm'lik küçük ölçekli bir pervane için 0.2 ve 0.3 Nm^{-2} arasında kayma gerilmeleri elde etmişlerdir. Ölçümler hidrolik cilalı bir yüzey üzerinde ve $G = 1$ D_p'de gerçekleştirilmiş olup, Maynord (2000) tarafından önerilen eşitlik (4.3) ve U_b'yi eşitlik (4.4) ile hesaplanabilir ve bu şekilde elde edilen sonuçlar doğrudan karşılaştırılabilmektedir. Bu koşullarda Wei vd. (2020) sonuçlarıyla uyumlu olarak yaklaşık $\tau = 0.2$ Nm^{-2} değerinde bir taban kayma gerilmesi elde edilmektedir. Bu çalışmadaki değerler eşitlik (4.6) ile hesaplandığında yine aynı değer elde edilmektedir. Bu denklemlerin uygulanabilirliği $G=1$ D_p durumunda görülmüştür. Marroig (2022), yatay bir sınıra sahip pervane özelliklerini, farklı pervane hızlarında ve tabanda belirli mesafede yerleştirilen kesme plakası ile kayma gerilmesi ölçümleri yaparak incelemiştir. Çalışmada, 5 farklı pervane dönüş hızı, 2 farklı pervane açıklığı ve 2 farklı kesme plakası konumunda ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Kayma gerilmesinin taban oyulmasını etkileyen başlıca sebep olduğu yaygın olarak kabul edilmektedir ve bu nedenle taban üzerindeki gerilme kuvvetlerinin güvenilir bir şekilde tahmin edilmesi, bir geminin düşük taban açıklığı ortamlarında seyrederken oluşabilecek oyulma gibi potansiyel hasarları tespit etmek için gereklidir. Eşitlik (4.6)'da önerilen model ile U_b, U_0 ve pervane açıklığının bir fonksiyonu olarak ortalama kayma gerilmesi elde edilmektedir.

5
SONUÇ

Bu çalışmada, serbest dönen bir gemi pervanesinin rijit bir taban üzerinde oluşturduğu jet akımının üç boyutlu yapısı kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Araştırma kapsamında; pervane kaynaklı akım yapısının eksenel ve yanal bileşenleri, boyutsuz Reynolds gerilmesi dağılımları, eşdeğer türbülans yoğunlukları ile birlikte, taban üzerinde meydana gelen kayma gerilmesi değerleri detaylı olarak değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar, laboratuvar ortamında fiziksel modelleme yöntemiyle gerçekleştirilmiş olup, farklı geometrik ve hidrodinamik parametrelerin etkileri sistematik biçimde incelenmiştir.

Çalışma kapsamında iki farklı açıklık yüksekliği (10 cm ve 15 cm), üç farklı pervane çapı (6.5 cm, 10 cm ve 13 cm) ve üç farklı pervane dönüş hızı (590 rpm, 670 rpm ve 745 rpm) kullanılarak toplamda on sekiz farklı deney konfigürasyonu oluşturulmuştur. Her bir durumda, zaman ortalamalı hız alanları, Reynolds gerilmeleri ve kayma gerilmesi değerleri hem yatay düzlemde hem de düşey eksende analiz edilerek pervane jet akımının gelişimi, bozunma özellikleri ve tabanla etkileşim bölgeleri değerlendirilmiştir.

Elde edilen deneysel bulgular, farklı pervane geometrisi ve çalışma koşullarının, akımın türbülans yapısı ve taban üzerindeki gerilme dağılımı üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda ulaşılan temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Bir düzlem sınırın varlığında, pervane tarafından oluşturulan jet akımı, gelişim sürecine bağlı olarak üç farklı akım bölgesine ayrılmaktadır: Bunlar sırasıyla; pervane düzlemine yakın bölgede karakterize edilen serbest jet bölgesi, jetin taban yüzeyine yaklaştığı ve akım yapısında belirgin bir dönüşümün gözlendiği temas (geçiş) bölgesi, ve akımın taban yüzeyi boyunca yayıldığı duvar jeti bölgesidir. Her bir bölge, hız dağılımı, türbülans karakteristikleri ve kayma gerilmesi açısından kendine özgü akım özellikleri göstermektedir.

- Pervane jet akımının genişleme açısı ile pervane dönüş hızı (rpm) arasında doğrusal bir ilişki gözlenmiştir: Deneysel bulgular, artan pervane devir sayısının jetin yayılma (divergence) eğilimini artırdığını ve jetin çevresel yayılım açısında belirgin bir genişlemeye yol açtığını ortaya koymaktadır. Bu durum, yüksek rpm değerlerinde türbülanslı difüzyonunun ve ortamdaki akışkanın jete katılım etkisinin daha belirgin hale geldiğini göstermektedir.
- Açıklık yüksekliği ile normalize edilmiş mesafe oranı olan G/D_p parametresine bağlı olarak akım gelişimi farklılık göstermektedir: $G/D_p > 1$ durumlarında, jetin serbestçe geliştiği ve geçiş ile duvar jeti bölgelerinin sınırlı olduğu, dolayısıyla daha uzun menzilli bir serbest jet davranışı sergilediği belirlenmiştir. Buna karşın, $G/D_p < 1$ durumlarında, pervane jet akımının sınırlı bir ortamda geliştiği, jetin tabanla erken etkileşime girerek serbest jet, çarpma bölgesi ve duvar jeti bölgesinin tamamının belirgin biçimde ortaya çıktığı gözlenmiştir. Bu durum, düşük açıklık koşullarında jetin tabanla olan etkileşiminin daha yoğun olduğunu ve zemin üzerindeki hidrodinamik etkilerin arttığını göstermektedir.
- Akım yönündeki vektör grafiklerinin analizi, pervane jet akımının belirgin şekilde tabana doğru yönlendiğini ortaya koymaktadır: Bu gözlem, klasik üç boyutlu ofset jet akımlarında da rapor edilen jet-sınır etkileşimlerine benzer şekilde, Coanda etkisi ile açıklanabilir. Coanda etkisi, akımın yakındaki bir yüzeye doğru yönelme eğilimi göstermesiyle karakterize edilir ve bu çalışmada pervane jetinin, alt sınır yüzeyine (rijit taban) yapışarak ilerlemesi şeklinde ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, jetin tabana yönelmesinin bir diğer açıklaması da sınır yüzeyinin pervane tarafından oluşturulan üç boyutlu akım yapısını tam olarak geliştirmesini engellemesi ve jet enerjisinin önemli bir kısmının taban yakınındaki akım bölgesine hapsolmasına neden olmasıdır. Bu durum, özellikle pervane etrafında oluşan enine (transvers) akım yapılarının sınırlanması ile ilişkilidir ve sınır yüzeyinin akım üzerindeki yönlendirici etkisini göstermektedir.
- Pervane ekseni boyunca elde edilen eksenel hız profilleri, pervane göbeği (hub) etkisinin belirgin olduğu bölgelerde çift tepeli bir yapı sergilemektedir: Özellikle, $y/D_p \approx \pm 0.2$ konumlarında hız profillerinde lokal

maksimumlar gözlenmiş, bu da akımın pervane göbeği çevresindeki dağılımına işaret etmektedir. Bu çift tepeli yapı, göbek etkisinin hakim olduğu bir bölgeyi tanımlamakta olup, eksenel akım bileşeninin merkez eksende minimum seviyeye indiğini göstermektedir. $y/D_p = \pm 0.2$ mesafesinden itibaren, hız profili tek tepeye dönüşmekte ve klasik Gauss benzeri bir dağılım sergilemektedir. Bu geçiş, pervane göbeği etkisinin $D_h/D_p = 0.2$ oranında sona erdiğini ve akım yapısının göbek dışı bölgelere özgü karakteristiklere evrildiğini ortaya koymaktadır.

- Reynolds gerilmesi dağılımları, eksenel hız gradyanı ($\partial u/\partial z$) ile güçlü bir pozitif korelasyon göstermektedir: Deneysel ölçümler, pervane jet akımı boyunca özellikle akım eksenine yakın bölgelerde Reynolds gerilmesinin, hız gradyanlarının yönüne duyarlı bir şekilde değiştiğini ortaya koymaktadır. Alt akım bölgesinde (tabana yakın kısımlarda) eksenel hızın artış yönünde değişmesi sonucu pozitif $\partial u/\partial z$ değerleri gözlenirken, bu durum Reynolds gerilmesinin de pozitif yönde artmasına neden olmaktadır. Buna karşılık, üst akım bölgesinde (tabandan uzaklaşan bölgelerde) hız gradyanı negatif bir değer almakta ve buna paralel olarak Reynolds gerilmesinde de negatif yönde bir değişim gözlemlenmektedir.
- Pervane düzlemine yakın bölgelerde ($0 \leq x/D_p \leq 0.6$), Reynolds gerilmesi dağılımlarında üst ve alt akım bölgeleri arasında belirgin bir asimetri gözlenmektedir: Pervane cidarına yakın konumlarda, özellikle pervane ekseni boyunca yapılan ölçümlerde, üst akım bölgesinde pozitif Reynolds gerilmeleri, alt akım bölgesinde ise negatif Reynolds gerilmeleri oluşmaktadır. Bu asimetrik dağılım, pervane kanatlarının dönüşüyle birlikte oluşan akımın merkez eksene doğru büzülmesi (vena contracta etkisi) sonucu meydana gelmektedir. Ancak bu etki, pervane eksen düzlemi dışındaki enine kesitlerde önemli ölçüde azalmaktadır ve pervane hub çapına (D_h) karşılık gelen mesafede belirginliğini kaybetmektedir. Bu durum, pervane hub etkisinin lokal bir etki olduğunu ve yalnızca sınırlı bir akım bölgesinde türbülans yapısını etkilediğini göstermektedir.
- Pervane dönüş yönüne bağlı olarak, pozitif hız gradyanının baskın olduğu bölgelerde pozitif Reynolds gerilmesinin; negatif hız gradyanının baskın

olduğu bölgelerde ise negatif Reynolds gerilmesinin daha belirgin olduğu gözlenmektedir.

- Geçiş bölgesinde, enine akım alanı, sınır yüzeyinin dönme kaynaklı akım yapısını önemli ölçüde bozmakta ve ilk vorteksin, merkezi düzlemin her iki tarafında ikincil vorteks çiftine ayrıldığını göstermektedir. Bu durumun bir sonucu olarak, merkezi düzlemdeki akım, duvar jeti bölgesinde yarı-iki boyutlu bir yapıya dönüşmektedir.
- Pervane jet akımı ilerlerken rijit taban ile temas etmesi sonucu jet enerjisi dağılmaktadır ve bu dağılım asimetrik şekilde gerçekleşmektedir. Pervane dönüş yönüne bağlı olarak, eşdeğer türbülans yoğunluğu dağılımında belirgin bir asimetri gözlenmiştir; saat yönünün tersine dönüş durumunda türbülans yoğunluğu pervanenin sol tarafında yoğunlaşırken, saat yönünde dönüşte sağ tarafında yoğunlaşma meydana gelmektedir.
- Pervane dönüş yönüne bağlı olarak yanal hız profilinde S-şekilli bir hız dağılımı gözlenmektedir. Pervane saat yönünün tersine döndüğünde ters S-şekilli yanal hız profili oluşurken, saat yönünde döndüğünde S-şekilli yanal hız profili gözlenmektedir. Duvar jeti bölgesinde hız bileşeni rijit taban tarafından sönümlenmektedir.
- Maksimum eksenel hızdaki azalma, taban sınırının varlığının çevre akışkanla olan karışımı sınırlayarak jet enerjisinin yayılım sürecini yavaşlattığını ortaya koymaktadır. Gelişim bölgesinde jetin tabanla etkileşimi sınırlı olduğunda, maksimum eksenel hız dağılımı yalnızca x/D_p'nin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilmekte ve diğer akım parametrelerinin etkisi ihmal edilebilir düzeye inmektedir. Maksimum eksenel hız $x/D_p=0.5$ civarında pik değerine ulaşmaktadır ve akım ilerledikçe x/Dp=6 mesafesinde %70 oranında azalmaktadır.
- Pervane jet akımının gelişimi sırasında, taban yüzeyinde oluşan kayma gerilmesi, akımın geçiş bölgesine ulaşana dek düzenli ve monoton bir artış göstermektedir. Bu artış, serbest jet bölgesinde jetin genişleyerek tabanla olan etkileşiminin henüz sınırlı olmasıyla ilişkilidir. Ancak, jet akımı tabanla doğrudan etkileşime geçtiği geçiş bölgesinde, kayma gerilmesinde belirgin bir artış gözlemlenmektedir ve bu artış serbest jet durumundan

geçiş bölgesinde kayma gerilmesi değerleri 4 katına kadar artmaktadır. Bu durum, jetin enerjisinin zemine daha yoğun bir şekilde aktarılmasıyla açıklanabilir. Jet akımının ilerleyerek duvar jeti bölgesine ulaşmasıyla birlikte, taban üzerindeki hız dağılımında ve buna bağlı kayma gerilmesinde artış eğilimi durağanlaşmakta, başka bir ifadeyle bu bölgede kayma gerilmesi değerleri görece sabitlenmekte veya değişim hızı azalmaktadır.

- Pervane eksen düzleminde ($y = 0\ D_p$) yapılan ölçümler, maksimum taban kayma gerilmesinin bu merkez doğrultuda meydana geldiğini göstermektedir. Buna karşılık, y/D_p ekseninde pervane düzleminden yatay yönde uzaklaştıkça, kayma gerilmesinde belirgin bir azalma gözlenmektedir. Bu durum, jet akımının enerjisinin merkez eksene yakın bölgelerde yoğunlaşması ve jetin kenar bölgelerinde zayıflamasıyla ilişkilidir. Dolayısıyla, kayma gerilmesinin dağılımı hem akımın simetrik özelliklerini hem de tabanla olan etkileşimin uzamsal karakterini yansıtmaktadır.
- Pervane eksen düzlemi ($y = 0\ D_p$) boyunca yanal eksen yönünde ilerledikçe, tabandaki kayma hızı merkez düzlemine ($y=0\ D_p$) göre $y/D_p = 0.5$ konumunda ulaştığında; D = 6.5 cm çapındaki pervane için G = 10 cm pervane açıklığında kayma hızı %26 oranında azalmakta, G = 15 cm pervane açıklığında ise bu azalma %35'a ulaşmaktadır. Benzer şekilde, D = 10 cm çapındaki pervane için G = 10 cm pervane açıklığında %18, G = 15 cm pervane açıklığında ise %24 oranında kayma hızı azalması gözlemlenmiştir. D = 13 cm çapındaki pervane için ise G = 10 cm pervane açıklığında kayma hızı %10, G = 15 cm mesafede ise %12 oranında azalmaktadır.
- Kayma gerilmesi sonuçları, serbest akım hızının karesi ile sürtünme katsayısı (C_f) arasındaki ilişkiden türetilen teorik beklentilerle uyum göstermektedir. Bu durum, taban üzerindeki ortalama kayma gerilmesinin, akım koşullarıyla ampirik olarak tanımlanan klasik hidrodinamik modeller doğrultusunda güvenilir bir şekilde tahmin edilebileceğini ortaya koymaktadır.

- Maynord (2000) tarafından önerilen model, düşük taban açıklığı koşullarında ($G/D_p < 1.2$) elde edilen deneysel kayma gerilmesi verileriyle iyi bir uyum sergilemektedir. Ancak, daha yüksek açıklık oranlarında ($G/D_p > 1.2$) model, taban üzerindeki kayma gerilmesini sistematik olarak düşük tahmin etmekte ve deneysel bulgularla anlamlı bir sapma göstermektedir.
- Pervane dönüşü kaynaklı, pürüzlü bir taban üzerinde sınırlandırılmamış şekilde gelişen pervane jet akımının oluşturduğu taban kayma gerilmesi ve taban hız değerlerini tahmin edebilmek amacıyla yeni bir ampirik model önerilmiştir. Önerilen modelin başarısını etkileyen temel parametreler; sürtünme katsayısı (C_f), pervane açıklığı oranı (G/D_p) ve pervane jet akımının çıkış hızı (U_0) olarak belirlenmiştir. Önerilen taban kayma gerilmesi denklemi eşitlik 4.6'da ve taban kayma hızı denklemi eşitlik 4.7'de olarak verilmiştir.

$$\tau = \frac{1}{2}\,\rho\,\frac{C_f U_0^2 \left(\frac{U_b}{U_0}\right)^{0.2}}{\left(\frac{C_h}{D_p}\right)^2} \tag{4.6}$$

$$U_b = U_0\ 0.2\ \left(\frac{G}{D_p}\right)^{-3} \tag{4.7}$$

- En yüksek taban kayma gerilmesi değerlerinin, pervane jet akımının duvar jeti bölgesinde meydana gelmektedir. Söz konusu duvar jeti bölgesinin, pervaneden itibaren $X/D_p \approx 3.3G/D_p$ oranındaki mesafede oluştuğu gözlenmiştir. Bu nedenle, kıyı ve liman yapılarının pervane jet etkisinden korunabilmesi için, yapı ile pervane arasında bırakılacak güvenli mesafenin belirlenmesinde bu bölgedeki maksimum gerilme dikkate alınmalıdır.

Gelecekteki çalışmalara yönelik olarak, bu çalışmada elde edilen bulgular doğrultusunda aşağıdaki araştırma önerileri sunulmaktadır:

- Bu çalışmada kullanılan pervane geometrisi, sabit bir göbek (hub) çapı oranına (D_h/D_p) sahip pervaneler ile sınırlıdır. Pervane hub etkisinin eksenel hız profiline ve türbülans yapısına olan etkisini daha detaylı anlayabilmek adına, farklı D_h/D_p oranlarına sahip pervanelerle deneysel çalışmalar gerçekleştirilmelidir. Bu tür çalışmalar, pervane hub geometrisinin jet akım karakteristikleri üzerindeki etkisini ortaya koymak açısından önemlidir.

- Pervane açıklığı bu çalışmada tabana en yakın konumda $G/D_p = 0.7$ seviyesinde sınırlandırılmıştır. Ancak daha düşük açıklık seviyelerinde (örneğin $G/D_p < 0.7$) gerçekleştirilmesi planlanacak deneyler, jet akımının taban ile olan etkileşimini daha hassas şekilde değerlendirme fırsatı sunacaktır. Bu kapsamda, özellikle geçiş ve duvar jeti bölgelerinde kayma gerilmesi dağılımının belirlenmesi, oyulma potansiyelinin tespiti açısından kritik öneme sahiptir.
- Pervane jet akımının farklı zemin türleri (örneğin kum, çakıl, yumuşak kil gibi) üzerindeki etkisinin araştırılması, taban oyulması mekanizmalarının daha gerçekçi koşullarda anlaşılmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca, bu jet-zemin etkileşimi, kıyı ve liman yapıları gibi mühendislik yapılarıyla birlikte ele alınarak, yapıların pervane kaynaklı hasarlara karşı dayanımının değerlendirilmesi gerekmektedir.
- Bu çalışmada yalnızca deneysel yöntemler ile sınırlandırılmamış pervane jet akımı karakterize edilmiştir. Gelecek çalışmalarda, deneysel veriler, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yöntemleriyle desteklenmeli ve farklı türbülans modelleri (örneğin k-ε, k-ω SST, LES) ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmalıdır. Böylelikle deneysel verilerin doğruluğu teyit edilebilirken, aynı zamanda karmaşık jet akım yapılarının sayısal ortamda modellenebilirliği artırılacaktır.

KAYNAKÇA

Albertson, M. L., Dai, Y., Jensen, R., & Rouse, H. (1950). Diffusion of submerged jets. *Transactions of the American Society of Civil Engineers, 115*(1), 639-664.

Beltaos, S. (1976). Oblique impingement of circular turbulent jets. *Journal of Hydraulic Research, 14*(1), 17-36. https://doi.org/10.1080/00221687609499685

Berger, W., Felkel, K., Hager, M., Oebius, H., & Schale, E. (1981). Courant provoqué par les bateaux: Protection des berges et solution pour éviter l'érosion du lit du Haut-Rhin. *Proceedings of the 25th PIANC Congress, Section I-1*. Edinburgh, UK.

Bergh, H., & Cederwall, K. (1981). *Propeller erosion in harbours* (Bulletin No. TRITA-VBI-107). Hydraulics Laboratory, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Bhuiyan, F., Habibzadeh, A., Rajaratnam, N., & Zhu, D. Z. (2011). Reattached turbulent submerged offset jets on rough beds with shallow tailwater. *Journal of Hydraulic Engineering, 137*(12), 1636-1648. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000462

Blaauw, H. G., & Van de Kaa, E. J. (1978). *Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw race of manoeuvring ships* (Publ. No. 202). Delft Hydraulics Laboratory, The Netherlands.

Carlton, J. S. (2007). *Marine Propellers and Propulsion* (2. Baskı). Butterworth-Heinemann, Elsevier.

Çelikoğlu, Y., Cihan, K., Şahin, E., & Yüksel, Y. (2012). Propeller jet flow around a pile type structure. *Proceedings of Copedec 2012*, 1573-1580.

Chait, S. (1987). Undermining of quay walls at South African ports due to the use of bow thrusters and other propeller units. *Bulletin of the Permanent International Association of Navigation Congresses, 58*, 107-110.

Dey, S. (2014). *Fluvial hydrodynamics*, Springer.

Drain, L. E. (1980). *The Laser Doppler Technique*. J. Wiley.

El-Adawy, M., Heikal, M. R., Aziz, A. R., Siddiqui, M. I., & Munir, S. (2017). Characterization of the inlet port flow under steady-state conditions using PIV and POD. *Energies, 10*(12), 1950. https://doi.org/10.3390/en10121950

El-Adawy, M., Heikal, M. R., Aziz, A. R. A., & Opatola, R. A. (2021). Stereoscopic particle image velocimetry for engine flow measurements: Principles and applications. *Alexandria Engineering Journal, 60*(3), 3327-3344. https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.10.051

Felli, M., Di Felice, F., Guj, G., & Camussi, R. (2006). Analysis of the propeller wake evolution by pressure and velocity phase measurements. *Experiments in Fluids, 41*(3), 441-451. https://doi.org/10.1007/s00348-006-0171-4

Fuehrer, M., Romisch, K., & Engelke, G. (1981). Criteria for dimensioning the bottom and slope protections and for applying the new methods of protecting navigation canals. *Proceedings of the XXV PIANC Congress*. Edinburgh, UK, 29-50.

Fuehrer, M., & Romisch, K. (1977). Effects of modern ship traffic on inland and ocean waterways and their structures. *Proceedings of the 24th International Navigation Congress*. Leningrad, 1-3.

de Gijt, J. G., & Broeken, L. (2005). *Handbook of Quay Walls*. Taylor & Francis.

Guan, D., Chiew, Y., Wei, M., & Hsieh, S. (2019). Characterization of horseshoe vortex in a developing scour hole at a cylindrical bridge pier. *International Journal of Sediment Research, 34*(2), 118-124. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.07.001

Hamill, G. A. (1987). *Characteristics of the screw wash of a manoeuvring ship and the resulting bed scour* (Doktora tezi). Queen's University Belfast, Northern Ireland, UK.

Hamill, G.A. and Johnston, H.T., (1993). The decay of maximum velocity within the initial stages of a propeller wash. Journal of Hydraulic Research, 31(5), 605-613

Hamill, G. A., Johnston, H. T., & Stewart, D. P. (1999). Propeller wash scour near quay walls. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 125*(4), 170-175.

Hamill, G., McGarvey, J., & Hughes, D. (2004). Determination of the efflux velocity from a ship's propeller. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Maritime Engineering, 157*(2), 83-91. https://doi.org/10.1680/maen.157.2.83.41085

Hamill, G., Kee, C., & Ryan, D. (2015). Three-dimension efflux velocity characteristics of marine propeller jets. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering, 168*(2), 62-75. https://doi.org/10.1680/jmaen.14.00019

Hamill, G. A., Ryan, D., & Johnston, H. (2009). Effect of rudder angle on propeller wash velocities at a seabed. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering, 162*(1), 27-38. https://doi.org/10.1680/maen.2009.162.1.27

Hamill, G. A., & Kee, C. (2016). Predicting axial velocity profiles within a diffusing marine propeller jet. *Ocean Engineering, 124*, 104-112. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.07.061

Hashmi, H. N. (1993). *Erosion of a granular bed at a quay wall by a ship's screw wash* (Doktora tezi). Queen's University Belfast, Northern Ireland, UK.

Hermsen, B. L. (2019). *Near wake characteristics of a marine propeller in the presence of free stream turbulence* (Trident Scholar Project Report No. 482). United States Naval Academy.

Hong, J. H., Chiew, Y. M., & Cheng, N. S. (2013). Scour caused by a propeller jet. *Journal of Hydraulic Engineering, 139*(9), 1003-1012. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000746

Hong, J. H., Chiew, Y. M., Hsieh, S. C., Cheng, N. S., & Yeh, P. H. (2016). Propeller jet-induced suspended-sediment concentration. *Journal of Hydraulic Engineering, 142*(4), 04015064. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001103

Hsieh, S. C., Chiew, Y. M., Hong, J. H., & Cheng, N. S. (2013). 3-D flow measurements of a swirling jet induced by a propeller by using PIV. *35th IAHR World Congress*.

Hsieh, S.-C., Low, Y. M., & Chiew, Y.-M. (2016). Flow characteristics around a circular cylinder subjected to vortex-induced vibration near a plane boundary. *Journal of Fluids and Structures, 65*, 257-277. https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2016.06.007

Johnston, H. T., Hamill, G. A., Wilson, P. R., & Ryan, D. (2013). Influence of a boundary on the development of a propeller wash. *Ocean Engineering, 61*, 50-55. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.12.033

Kumar, A., & Das, M. K. (2011). Study of a turbulent dual jet consisting of a wall jet and an offset jet. *Journal of Fluids Engineering, 133*(10), 101201. https://doi.org/10.1115/1.4004823

Lam, W., Hamill, G. A., Song, Y. C., Robinson, D. J., & Raghunathan, S. (2011). A review of the equations used to predict the velocity distribution within a ship's propeller jet. *Ocean Engineering, 38*(1), 1-10. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.10.016

Lam, W. H., Hamill, G., Robinson, D., & Raghunathan, S. (2010). Observations of the initial 3D flow from a ship's propeller. *Ocean Engineering, 37*(14-15), 1380-1388. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.07.008

Li, Z., Xiao, Y., Huai, W., & Ding, L. (2021). Velocity characteristics of a round offset jet with different offset ratios in a counterflow. *Flow, Turbulence and Combustion, 107*, 81-104. https://doi.org/10.1007/s10494-020-00220-3

Liepmann, H. W., & Laufer, J. (1947). *Investigations of free turbulent mixing* (NACA-TN-1257). National Advisory Committee for Aeronautics..

Llull Marroig, A. I. (2022). *Ship propeller induced scour of non-cohesive sediment in low bed-clearance conditions* (Doktora tezi). Universitat Politècnica de Catalunya, Departament de Ciència i Enginyeria Nàutiques. https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-363399

Longe, J., Hebert, P., & Byl, R. (1987). Erosion problems at existing quay constructions due to bow thrusters and main propellers of ships when berthing or leaving. *Bulletin of the Permanent International Association of Navigation Congresses [PIANC], 58*.

Macías-Lezcano, J. A., Llull, T., & Aberle, J. (2024). Scouring induced by a confined propeller jet nearby a vertical quay structure: Scale model tests.

Proceedings of the 8th International Symposium on Marine Propulsors (smp 2024), 229-236. https://doi.org/10.15480/882.9368

Massey, B. S., & Ward-Smith, J. (2006). *Mechanics of fluids*. Taylor & Francis.

Maynord, S. T. (2000). *Physical forces near commercial tows* (ENV Report 19). Coastal and Hydraulics Laboratory, U.S. Army Engineer Research and Development Center.

McGarvey, J. A. (1996). *The influence of the rudder on the hydrodynamics and the resulting bed scour of a ship's screw wash* (Doktora tezi). Queen's University Belfast, Northern Ireland, UK.

Oebius, H., & Schuster, S. (1975). *Modelversuche zur Frage der Beschädigung von Flussohlen durch die Schifffahrt* (VWS-Bericht No. 743/75). Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin.

PIANC. (2015). *Guidelines for protecting berthing structures from scour caused by ships* (Report No. 180). The World Association for Waterborne Transportation Infrastructure.

Prosser, M. J. (1986). *Propeller induced scour*. BHRA, Fluid Engineering Centre.

Qurrain, R. M. M. (1994). *Influence of the sea bed and berth geometry on the hydrodynamics of the wash from a ship's propeller* (Doktora tezi). Queen's University Belfast, Northern Ireland, UK.

Robakiewicz, W. (1966). The influence of the action of the jet behind the screw on the bottom. Example of model and field measurements with a trawler B-20. *Rosprawy Hydrotechniczne, 19*, 177-215.

Ryan, D. (2002). *Methods for determining propeller wash induced scour in harbours* (Doktora tezi). Queen's University Belfast, Northern Ireland, UK.

Ryan, D., Hamill, G. A., & Johnston, H. T. (2009). Effect of rudder angle on propeller wash velocities at a seabed. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering, 162*(MA1), 27-38. https://doi.org/10.1680/maen.2009.162.1.27

Stewart, D. P. J. (1992). *Characteristics of a ship's screw wash and the influence of quay wall proximity* (Doktora tezi). Queen's University Belfast, Northern Ireland, UK.

Sumer, B. M., & Fredsøe, J. (2002). *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*. World Scientific.

Tan, R. İ. (2019). *Propeller jet induced erosion around pile supported berth structures* (Doktora tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye. https://doi.org/10.15480/882.9368

Tan, R. İ., Kesgin, E., Aksel, M., & Kuzgun, R. (2023). Numerical investigation of propeller jet flow for the understanding of scouring mechanism. *11th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-11)*. Copenhagen, Denmark. https://doi.org/10.15480/882.9368

Tsinker, G. P. (1995). *Marine Structures Engineering: Specialized Applications*. Chapman & Hall.

Verheij, H. (1983). The stability of bottom and banks subjected to the velocities in the propeller jet behind ships. *Proceedings of the 8th International Harbour Congress, Antwerp*, 1-11.

Wei, M. (2018). *Propeller jet flow and its associated scour hole around open quay structures* (Doktora tezi). Nanyang Technological University, Singapore. https://doi.org/10.32657/10356/73256

Wei, M., Chiew, Y. M., & Hsieh, S. C. (2017). Plane boundary effects on characteristics of propeller jets. *Experiments in Fluids, 58*(10), 141. https://doi.org/10.1007/s00348-017-2425-8

Yoon, J. H., & Lee, S. J. (2002). Direct comparison of 2D PIV and stereoscopic PIV measurements. *Measurement Science and Technology, 13*(10), 1631-1642. https://doi.org/10.1088/0957-0233/13/10/317

Yüksel, Y., Tan, R. İ., & Çelikoğlu, Y. (2018). Propeller jet flow scour around a pile structure. *Applied Ocean Research, 79*, 160-172. https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.08.001

Yüksel, Y., Kayhan, S., Çelikoğlu, Y., & Cihan, K. (2012). Open type quay structures under propeller jets. *Proceedings of the 33rd International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2012)*. Santander, Spain. https://doi.org/10.9753/icce.v33.structures.19

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

Bilmez, Y., Gürek, B., Güner, H. A. A., Çelikoğlu, Y., & Yüksel, Y. (2023). Determination of velocity profiles on a rigid bed under the effect of a propeller jet. *Proceedings of SCACR 2023*, İstanbul, Türkiye, 67-68.

Gürek, B., Bilmez, Y., Güner, H. A. A., Çelikoğlu, Y., & Yüksel, Y. (2023). Rijit tabanda gemi pervane jeti etkisinde hız profillerinin belirlenmesi. *Kıyı Mühendisliği Sempozyumu 2023*, İzmir, Türkiye, 137-143.