İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKTİF AKIŞ KONTROLÜ İÇİN JET VE VORTEKS AKTÜATÖRÜNÜN DENEYSEL VE SAYISAL ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

Sertaç ÇADIRCI

Anabilim Dalı : Makina Mühendisliği

Programı : Makina Mühendisliği

EKİM 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKTİF AKIŞ KONTROLÜ İÇİN JET VE VORTEKS AKTÜATÖRÜNÜN DENEYSEL VE SAYISAL ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

Sertaç ÇADIRCI
(503042009)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Haziran 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 08 Ekim 2010

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hasan GÜNEŞ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Kadir KIRKKÖPRÜ (İTÜ)
Doç. Dr. Okşan ÇETİNER (İTÜ)
Y. Doç. Dr. Hayri ACAR (İTÜ)
Y. Doç. Dr. M. Serdar GENÇ (Erciyes Ü.)

EKİM 2010

Aileme,

ÖNSÖZ

Uzun bir dönem içerisinde özveriyle hazırlamaya çalıştığım tezimin oluşmasında, akademik olarak bilgi ve deneyiminden yararlandığım danışmanım Prof.Dr. Hasan GÜNEŞ'e içten teşekkürlerimi sunarım. Bunun yanında TÜBİTAK-BMBF (Alman Eğitim ve Araştırma Bakanlığı) ortaklığı sonucu gerçekleştirilen uluslararası proje kapsamında yürütülen tezimde, yürütücü hocam Prof.Dr. Hasan GÜNEŞ'e, bana ve proje ekibine verdiği maddi destekten dolayı TÜBİTAK'a; Stuttgart Üniversitesi Aerodinamik ve Gaz Dinamiği Enstitüsü'nde çalışma imkanını sağlayan Stuttgart Üniversitesi öğretim üyesi Prof.Dr.-Ing Ulrich RIST'e ve tezimin deneysel çalışmalarında bana yardımcı olan Dip.Ing. Bernd PETERS'e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca araştırma görevlisi olarak bulunduğum Makina Fakültesi Hidromekanik ve Hidrolik Makinalar Birimi'nde görev yapan hocalarıma, araştırma görevlisi arkadaşlarıma ve benden maddi, manevi desteklerini esirgemeyen aileme minnet duygularıyla teşekkür ederim.

Haziran 2010

Sertaç ÇADIRCI

Makina.Yük. Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
SEMBOL LİSTESİ ..... **xxiii**
ÖZET ..... **xxv**
SUMMARY ..... **xxvii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 1
1.2 Tezin Konusu 2
1.3 Tezin Özgün Değeri ve Katma Değeri 4
1.4 Erişilecek Çıktılar 5
2. AKIŞ KONTROLÜ **7**
2.1 Akış Ayrılması 7
2.2 Akış Kontrol Sistemlerinin Sınıflandırılması 9
2.3 Pasif Akış Kontrolü 11
2.4 Aktif Akış Kontrolü – Fluidik Aktüatörler 11
2.4.1 Net sıfır kütle debili aktüatörler (sentetik jetler) 12
2.4.2 Piezoelektrik kanatlar 13
2.4.3 Darbeli jetler 14
2.4.4 Vorteks üreten jetler (Vortex generator jets-VGJ) 14
2.4.5 Rezonans tüpleri 15
2.5 Fluidik Aktif Akış Kontrol Sistemlerinin Üstünlükleri ve Dezavantajları 15
2.6 Plazma Aktüatörleri 16
2.7 Yanma Esaslı Aktüatörler 17
2.8 Ateşleme Esaslı Aktüatörler 18
2.9 Sentetik Jet Araştırmaları 19
3. HAREKETSİZ SUDA JaVA **23**
3.1 JaVA Düzeneği ve Yöneten Parametreler 23
3.2 Hareketsiz Su Ortamında Akış Görüntüleme Deneyleri 30
3.3 Yöneten Parametrelerin Akış Rejimlerine Etkisi 32
3.3.1 Reynolds sayısı (Re) etkisi 33
3.3.2 Boyutsuz genlik (S_a) etkisi 34
3.3.3 Boyutsuz geniş aralığın (g_w) etkisi 35
3.3.4 Plaka kalınlığının (d) etkisi 36
3.3.5 Plaka konumunun etkisi 37
3.3.6 Parametre etkileri hakkında genel çıkarımlar 38
3.4 Optik Akış Hesabı (OAH) 41
3.5 Kriging Yöntemi 43

3.5.1 Hız ve vortisite alanlarının Kriging ile çözünürlüğünün arttırılması ve düzgünleştirilmesi 50
3.6 Açılı Jet Rejimlerinin Ortalama Optik Akış Alanları 54
3.7 Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) 56
3.8 Açılı Jet Rejimlerinin Zamana Bağlı Davranışları 58
3.9 Sanki-Periyodik ve Kaotik Akış Rejimlerinin Zamana Bağlı Davranışları 61
3.10 Hareketsiz Su Ortamında Parçacık Görüntüleme ile Hız Ölçme (PIV) Deneyi ve Esasları 66
3.10.1 Parçacık görüntüleme ile hız ölçme – (PIV) 66
3.10.2 Hareketsiz su ortamında PIV deney düzeneği 69
3.10.3 PIV verilerinin işlenmesi 71
3.10.4 PIV verilerinin iyileştirilmesi ve zenginleştirilmesi 73
3.11 JaVA Kaynaklı Akış Rejimlerine Ait PIV Deney Sonuçları 74
3.11.1 Açılı jete ait PIV verisinin incelenmesi 74
3.11.2 Vortekse ait PIV verisinin incelenmesi 76
3.11.3 Daimi olmayan düşey jete ait PIV verisinin incelenmesi 78
3.12 JaVA Kaynaklı Akış Rejimlerine Ait Akış Görüntüleme ve PIV Deneylerinin Karşılaştırılması 79
3.12.1 Sağa doğru açılı jetin incelenmesi 79
3.12.2 Serbest düşey jetin incelenmesi 81
3.12.3 Sola doğru açılı jetin incelenmesi 82
3.12.4 Cidar jetinin incelenmesi 83
3.12.5 Açılı jetlerin emme-basma fazlarının bulunması 85
3.13 Proper Orthogonal Decomposition (POD)- Uygun Ortogonal Ayırım 90
3.14 Hareketsiz Su Ortamında JaVA Kaynaklı Akış Rejimlerinin Sayısal Modellemesi 97
3.14.1 Sınır koşulları 97
3.14.2 Açılı jete ait CFD sonuçlarının incelenmesi 99
3.14.3 Vortekse ait CFD sonuçlarının incelenmesi 101
3.15 JaVA Kaynaklı Akış Tiplerinin PIV-CFD Sonuçları Karşılaştırması 103
4. SU KANALINDA JaVA DENEYLERİ 105
4.1 Su Kanalı ve Yardımcı Deney Ekipmanları 105
4.2 Su Kanalında Akış Görüntüleme Deneyleri 111
4.2.1 (A)-konfigürasyonu için elde edilen akışlar 112
4.2.2 (B)-konfigürasyonu için elde edilen akışlar 114
4.3 Su Kanalında PIV Deneyleri 117
4.3.1 PIV deneyinin JaVA yakınında uygulanması 120
4.3.2 PIV deneyinin JaVA ötesinde uygulanması 130
4.3.3 PIV ile sınır tabaka hız profillerinin elde edilmesi 134
4.3.4 Sınır tabaka içinde emme-basma fazlarının bulunması 138
4.3.5 JaVA ötesinde sınır tabaka karakteristiklerinin incelenmesi 142
5. SU KANALI SAYISAL MODELLEMESİ 147
5.1 Akışı Yöneten Denklemler 147
5.1.1 Hareketli hesaplama ağı 149
5.2 Hesaplama Ağı ve Sınır Koşulları 150
5.3 (A) Tipi Montajda Sayısal Modellemeler 155
5.4 (B) Tipi Montajda Sayısal Modellemeler 169
5.5 Sayısal Modellemelerin Frekans Spektrumları 174
5.6 Eğik Düzlemde Sayısal Modellemeler 177
5.7 Eğik Düzlem ve Müteakip Düz Levhada Sayısal Modelleme 182

5.8 Sayısal Modellemelerden Yapılacak Çıkarımlar 187
5.8.1 Boyutsuz ölçeklendirilmiş genliğin etkisi 187
5.8.2 Plaka konumunun etkisi 190
5.8.3 Montaj etkisi 192
5.8.4 Sabit sınır tabaka kalınlığında serbest akım hızının etkisi 193
5.8.5 Farklı sınır tabaka kalınlıklarında serbest akım hızının etkisi 195
5.9 Sayısal Modelleme Sonuçlarının Deneysel Verilerle Karşılaştırılması 196
6. SONUÇLAR 199
KAYNAKLAR 205
EKLER 211
ÖZGEÇMİŞ 223

KISALTMALAR

BLUE : Best Linear Unbiased Estimation (En İyi Yansız Tahmin)
CCD : Charge Couple Device
CFD : Computational Fluid Dynamics (Sayısal Akışkanlar Dinamiği)
IAG : Institut für Aerodynamik und Gasdynamik
FFT : Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Transformu)
fps : Frame per Second (Saniyede Kaydedilen Görüntü)
GOV : Gerçekçi Olmayan Vektör
JaVA : Jet and Vortex Actuator (Jet ve Vorteks Aktüatörü)
OAH : Optik Akış Hesabı
p : Piksel
rms : Root Mean Square (En Küçük Kareler Hatası)
PIV : Particle Image Velocimetry (Parçacık Görüntüleme ile Hız Ölçme)
POD : Proper Orthogonal Decomposition (Uygun Ortogonal Ayırım)
Re : Reynolds Sayısı
SDBD : Single Dielectric Barrier Discharge (Tekil Dielektrik Bariyerli Deşarj)
St : Strouhal Sayısı
VGJ : Vortex Generator Jets (Vorteks Üreten Jetler)
UDF : User Defined Function (Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Farklı aktüatör genişliklerine bağlı olarak geniş aralık oranları 27
Çizelge 3.2 : Farklı akış rejimlerinin özelliklerinin karşılaştırılması.....65
Çizelge 3.3 : İşlenmiş PIV verilerine ait bilgiler (GOV = gerçekçi olmayan vektör) 79
Çizelge 3.4 : Açılı jet rejimlerinin işlenmiş PIV verilerine ait bilgiler (p = piksel) 85
Çizelge 3.5 : İlk 20 POD modu için rms hataları.....96
Çizelge 3.6 : İlk 20 POD modunun toplam enerji içeriği ($\lambda_i/ \Sigma\lambda_i$).....96
Çizelge 4.1 : I plaka konumunda farklı frekanslarda (A) ve (B) montajlarında PIV deney parametreleri (a = 1 mm, b = 25 mm).....123
Çizelge 4.2 : II plaka konumunda farklı frekanslarda (A) ve (B) montajlarında PIV deney parametreleri (a = 1 mm, b = 25 mm).....124
Çizelge 4.3 : III plaka konumunda farklı frekanslarda (A) ve (B) montajlarında PIV deney parametreleri (a = 1 mm, b = 25 mm).....126
Çizelge 4.4 : II ve III plaka konumunda farklı frekanslarda (A) ve (B) montajlarında PIV deney parametreleri (a = 2 mm, b = 25 mm).....129
Çizelge 4.5 : III plaka konumunda farklı frekanslarda (A) montajında PIV deney parametreleri (a = 1 mm, a = 2 mm, b = 25 mm).....133
Çizelge 4.6 : II plaka konumunda ve (A) montajında JaVA kaynaklı akış rejimlerinin sınır tabaka içerisindeki debi ve momentum akısı değerleri.....142
Çizelge 5.1 : Plakanın bağıl konuma göre üst ve alt noktalarının ordinatları [mm] 154
Çizelge 5.2 : Frekansa göre anlık akış alanı sayıları.....155
Çizelge 5.3 : PIV ve CFD sınır tabaka kalınlıkları karşılaştırılması (300 mm öteden) 168
Çizelge 5.4 : PIV ve CFD sınır tabaka kalınlıkları karşılaştırılması (300 mm öteden) 168

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Kanat üzerinde akış ayrılması (Anderson, 2001).....8
Şekil 2.2 : Akış ayrılmasında hız profilinin değişimi (Gad-el-Hak, 2000).....9
Şekil 2.3 : Akış kontrol sistemlerinin sınıflandırılması (Cattafesta ve diğ., 2008)....10
Şekil 2.4 : Kavite üzerindeki akışın pasif kontrolü (Kuo ve diğ., 2001).....11
Şekil 2.5 : Net sıfır kütle debili aktif akış kontrolü (Holman ve diğ., 2005).....12
Şekil 2.6 : Piezoelektrik kanatla aktif akış kontrolü (Kegerise ve diğ., 2002).....14
Şekil 2.7 : Kanat üzerinde VGJ ile aktif akış kontrolü (Cattafesta, 2009).....15
Şekil 2.8 : Termal olmayan plazma aktüatörü (Cattafesta, 2009).....17
Şekil 2.9 : Yanma esaslı aktüatör (Crittenden ve diğ., 2001).....17
Şekil 2.10 : Ateşleme esaslı aktüatör (Grossman ve diğ., 2004).....18
Şekil 2.11 : Jet ve vorteks aktüatörü -JaVA (Lachowicz ve diğ.,1999).....20
Şekil 3.1 : Deneylerde kullanılan JaVA'nın şeması (Güneş ve diğ., 2008 A).....24
Şekil 3.2 : Deneylerde kullanılan JaVA'nın alttan, yandan ve önden görünüşü.....25
Şekil 3.3 : JaVA bileşenleri; (a) gövde, (b) plakalar, (c) step motor, (d) eksantrik diskler.....26
Şekil 3.4 : Durgun su tankında akış görüntüleme ve veri toplama deney düzeneği...30
Şekil 3.5 : Akış görüntüleme esnasında JaVA, step motor ve eksantrik disk.....31
Şekil 3.6 : Aktüatör plakası en üst ve en alt konumları (çizim ölçeksizdir).....32
Şekil 3.7 : Frekansın akış üzerindeki etkisi; (a)-(b) serbest düşey jetler (c)-(d) kaotik düşey jetler.....33
Şekil 3.8 : Genliğin akış üzerindeki etkisi; (a) sağa doğru açılı jet, (b)-(c) kaotik jetler.....34
Şekil 3.9 : Geniş aralığın akış üzerindeki etkisi; (a) zayıf cidar jeti, (b) cidar jeti, (c) vorteks modu.....36
Şekil 3.10 : Plaka kalınlığının akış üzerindeki etkisi; (a) ince plaka, (b) orta kalınlıkta plaka, (c) kalın plaka.....37
Şekil 3.11 : Plaka ortalama konumlarının akış üzerindeki etkisi; (a) sağa açılı jet, (b) serbest düşey jet, (c) sola açılı jet, (d) cidar jeti.....38
Şekil 3.12 : Genlik ve frekansın akış üzerindeki etkisi (b = 25 mm – Konum II).....40
Şekil 3.13 : Genliğin akış üzerindeki etkisi (b = 25.8 mm – Konum II).....40
Şekil 3.14 : Genliğin akış üzerindeki etkisi (b = 26.6 mm- Konum II).....40
Şekil 3.15 : Anlık akış görüntüsü üzerindeki yatay ve düşeyde piksel değerleri.....43
Şekil 3.16 : Deneysel ve model variogram ile bileşenleri (Çekli, 2007).....45
Şekil 3.17 : P noktasındaki bilinmeyen değerin Kriging yöntemiyle tahmin edilmesi (Çekli, 2007).....45
Şekil 3.18 : Varyans hesabının şematik gösterimi-bkz. denklem 3.16 (Çekli, 2007). 46
Şekil 3.19 : Kriging için korelasyon fonksiyonları -bkz. denklem 3.25 (Çekli, 2007). 49
Şekil 3.20 : Düşey jetin bir periyotluk anlık görüntüleri (Güneş ve diğ., 2008 C)....51
Şekil 3.21 : Düşey jetin bir periyoduna ait optik akış alanı; kontürler hız büyüklüğünü vermektedir [cm/s] (Güneş ve diğ., 2008 C).....52

Şekil 3.22 : Düşey jetin optik akış alanlarının Kriging ile çözünürlüğünün arttırılması ve düzgünleştirilmesi [cm/s] (Güneş ve diğ., 2008 C).....53
Şekil 3.23 : Düşey jetin bir periyoduna ait vortisite alanı (Güneş ve diğ., 2008 C)...54
Şekil 3.24 : Sağa doğru açılı jet; sol sütun: ortalama optik akış hız büyüklüğü [cm/s]; sağ sütun: maksimum jet hızlarının dağılımı (Güneş ve diğ., 2008 C)...55
Şekil 3.25 : Serbest düşey jet; sol sütun: ortalama optik akış hız büyüklüğü [cm/s]; sağ sütun: maksimum jet hızlarının dağılımı (Güneş ve diğ., 2008 C)...55
Şekil 3.26 : Sola doğru açılı jet; sol sütun: ortalama optik akış hız büyüklüğü [cm/s]; sağ sütun: maksimum jet hızlarının dağılımı (Güneş ve diğ., 2008 C)...56
Şekil 3.27 : Cidar jeti; sol sütun: ortalama optik akış hız büyüklüğü [cm/s]; sağ sütun: maksimum jet hızlarının dağılımı (Güneş ve diğ., 2008 C).....56
Şekil 3.28 : Sağa açılı jet üzerindeki **A** noktasının (a) *u*-hızı zaman grafiği, (b) *u*-hızı frekans spektrumu, (c) *v*-hızı zaman grafiği, (d) *v*-hızı frekans spektrumu 59
Şekil 3.29 : Düşey jet üzerindeki **B** noktasının (a) *u*-hızı zaman grafiği, (b) *u*-hızı frekans spektrumu, (c) *v*-hızı zaman grafiği, (d) *v*-hızı frekans spektrumu.....60
Şekil 3.30 : Sola açılı jet üzerindeki **C** noktasının (a) *u*-hızı zaman grafiği, (b) *u*-hızı frekans spektrumu, (c) *v*-hızı zaman grafiği, (d) *v*-hızı frekans spektrumu 60
Şekil 3.31 : Cidar jeti üzerindeki **D** noktasının (a) *u*-hızı zaman grafiği, (b) *u*-hızı frekans spektrumu, (c) *v*-hızı zaman grafiği, (d) *v*-hızı frekans spektrumu.....61
Şekil 3.32 : Sanki-periyodik cidar jeti; (a) anlık akış görüntüsü, (b) zaman ortalamalı optik akış hız büyüklüğü [cm/s].....62
Şekil 3.33 : Sanki-periyodik cidar jeti üzerindeki $\mathbf{E_1}$ noktasının (a) *u*-hızı zaman grafiği, (b) *u*-hızı frekans spektrumu, (c) *v*-hızı zaman grafiği, (d) *v*-hızı frekans spektrumu.....63
Şekil 3.34 : Sanki-periyodik cidar jeti üzerindeki $\mathbf{E_2}$ noktasının (a) *u*-hızı zaman grafiği, (b) *u*-hızı frekans spektrumu, (c) *v*-hızı zaman grafiği, (d) *v*-hızı frekans spektrumu.....63
Şekil 3.35 : Vorteks akışının; (a) anlık akış görüntüsü, (b) zaman ortalamalı optik akış hız büyüklüğü [cm/s].....64
Şekil 3.36 : Vorteks üzerindeki $\mathbf{F_1}$ noktasının (a) *u*-hızı zaman grafiği, (b) *u*-hızı frekans spektrumu, (c) *v*-hızı zaman grafiği, (d) *v*-hızı frekans spektrumu.....65
Şekil 3.37 : Vorteks üzerindeki $\mathbf{F_2}$ noktasının (a) *u*-hızı zaman grafiği, (b) *u*-hızı frekans spektrumu, (c) *v*-hızı zaman grafiği, (d) *v*-hızı frekans spektrumu.....66
Şekil 3.38 : Bir kanal akışı içinde iki boyutlu PIV çalışma ilkesi (Lang, 2004).....67
Şekil 3.39 : PIV deney düzeneği – Nd: YAG lazer, güç kaynağı ve zamanlayıcı.....69
Şekil 3.40 : Durgun su ortamında PIV deney düzeneği – CCD kamera ve JaVA.....70
Şekil 3.41 : Zamanlayıcının faz ölçümünde kullandığı tetikleme şeması (Lang, 2004).....70
Şekil 3.42 : PIV deneylerinde elde edilen parçacıklı akış alanları(Δt = 75 ms).....71
Şekil 3.43 : İşlenmiş PIV verisi: (a) piksel/saniye, (b) cm/s olarak vektörel hız dağılımı.....72
Şekil 3.44 : Anlık PIV hız alanının [cm/s] Kriging ile iyileştirilmesi.....73
Şekil 3.45 : Açılı jetin (a) orijinal kontur, (b) orijinal hız vektörü, (c) iyileştirilmiş kontur ve (d) iyileştirilmiş hız vektörü [cm/s].....75

Şekil 3.46 : Açılı jetin (a) 6. orijinal, (b) 6. doldurulmuş, (c) 15. orijinal, (d) 15. doldurulmuş, (e) 25. orijinal ve (f) 25. doldurulmuş anlık hız alanları [cm/s].....76
Şekil 3.47 : Vorteksin (a) t = 0, (b) t = T/6, (c) t = T/3, (d) t = T/2, (e) t = 2T/3, (f) t = 5T/6'deki anlık hız alanları [cm/s].....77
Şekil 3.48 : Daimi olmayan jetin (a) t = 0, (b) t = T/6, (c) t = T/3, (d) t = T/2, (e) t = 2T/3, (f) t = 5T/6'deki anlık hız alanları [cm/s].....78
Şekil 3.49 : Sağa doğru açılı jetin (a) *t* = 0, (b) *t* = T/4, (c) *t* = T/2 ve (d) *t* = 3T/4 anlarında görüntüleri; oklar plaka hareketini temsil etmektedir.....80
Şekil 3.50 : Sağa doğru açılı jetin (a) *t* = 0, (b) *t* = T/4, (c) *t* = T/2 ve (d) *t* = 3T/4 anlarında hız ve vortisite alanları.....80
Şekil 3.51 : Serbest düşey jetin (a) *t* = 0, (b) *t* = T/4, (c) *t* = T/2 ve (d) *t* = 3T/4 anlarında görüntüleri; oklar plaka hareketini temsil etmektedir.....81
Şekil 3.52 : Serbest düşey jetin (a) *t* = 0, (b) *t* = T/4, (c) *t* = T/2 ve (d) *t* = 3T/4 anlarında hız ve vortisite alanları.....82
Şekil 3.53 : Sola doğru açılı jetin (a) *t* = 0, (b) *t* = T/4, (c) *t* = T/2 ve (d) *t* = 3T/4 anlarında görüntüleri; oklar plaka hareketini temsil etmektedir.....83
Şekil 3.54 : Sola doğru açılı jetin (a) *t* = 0, (b) *t* = T/4, (c) *t* = T/2 ve (d) *t* = 3T/4 anlarında hız ve vortisite alanları.....83
Şekil 3.55 : Cidar jetinin (a) *t* = 0, (b) *t* = T/4, (c) *t* = T/2 ve (d) *t* = 3T/4 anlarında görüntüleri; oklar plaka hareketini temsil etmektedir.....84
Şekil 3.56 : Cidar jetinin (a) *t* = 0, (b) *t* = T/4, (c) *t* = T/2 ve (d) *t* = 3T/4 anlarında hız ve vortisite alanları.....84
Şekil 3.57 : Sola açılı jetin zaman ortalamalı (a) emme, (b) basma fazları.....86
Şekil 3.58 : Sağa açılı jetin zaman ortalamalı (a) emme, (b) basma fazları.....86
Şekil 3.59 : Sola açılı jetin Y = 0.7 cm'deki (a) *u*-hızı profili, (b) *v*-hızı profili.....87
Şekil 3.60 : Sola açılı jetin Y = 1.4 cm'deki (a) *u*-hızı profili, (b) *v*-hızı profili.....87
Şekil 3.61 : Açılı jet rejimlerinin ortalama hacimsel debilerinin karşılaştırılması.....88
Şekil 3.62 : Açılı jet rejimlerinin ortalama momentum akılarının karşılaştırılması...89
Şekil 3.63 : (a) Sağa açılı jetin, (b)düşey jetin, (c)sola açılı jetin emme ve basma fazlarının zaman ortalamalı momentum akıları.....89
Şekil 3.64 : Sola açılı jetin *u*-hız bileşeninin modları: (a) M = 1, (b) M = 2, (c)M = 3, (d) M = 4, (e) M = 10, (f) M = 20.....94
Şekil 3.65 : Sola açılı jetin *v*-hız bileşeninin modları: (a) M = 1, (b) M = 2, (c)M = 3, (d) M = 4, (e) M = 10, (f) M = 20.....94
Şekil 3.66 : Sola açılı jetin hız vektörlerinin yeniden oluşturulması: (a) PIV verisi (b) M = 1, (c) M = 2, (d)M = 4, (e) M = 10, (f) M = 20.....95
Şekil 3.67 : Hareketsiz su ortamında JaVA kaynaklı akış tiplerinin sayısal modellemesinde kullanılan hesaplama ağı ve sınır koşulları.....99
Şekil 3.68 : Açılı jetin hız alanının sayısal modellemesi [m/s]: (a)t=0, (b)t=T/8, (c)t=T/4, (d)t=3T/8, (e)t=T/2, (f)t=5T/8, (g)t=3T/4, (h)t=7T/8.....100
Şekil 3.69 : Vorteks hız alanının sayısal modellemesi [m/s]: (a)t=0, (b)t=T/8, (c)t=T/4, (d)t=3T/8, (e)t=T/2, (f)t=5T/8, (g)t=3T/4, (h)t=7T/8.....102
Şekil 3.70 : Düşey jete ait zaman ortalamalı (a) PIV (b) CFD akış alanı [cm/s].....104
Şekil 4.1 : Kapalı devre su kanalı: (a) perspektif, (b) yandan ve üstten görünüş.....105
Şekil 4.2 : Pleksiglas düz levha: (a) ön kenarı, (b) JaVA monte edilmiş hali.....106
Şekil 4.3 : (a) Su kanalı ve veri toplama sistemi (b) su kanalı içinde levha-JaVA montajı.....106
Şekil 4.4 : Pleksiglas düz levha: (a)üstten görünüş, (b)yandan görünüş, (c) JaVA ayrıntısı.....107

Şekil 4.5 : (a) Pitot tüpü, (b) fark-basınç sensörü, (c) hız değerinin belirlendiği sistem 108
Şekil 4.6: JaVA'nın levha üzerindeki konfigürasyonu: (a) A-montajı, (b) B-montajı. 108
Şekil 4.7 : Su kanalı etrafına yerleştirilmiş akış görüntüleme düzeneği ekipmanları 111
Şekil 4.8 : (I) plaka konumunda ve (A) tipi montaj durumunda anlık akış görüntüleri; (a) f = 0.5 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz ve (d) f = 3 Hz.....113
Şekil 4.9 : (II) plaka konumunda ve (A) tipi montaj durumunda anlık akış görüntüleri; (a) f = 0.5 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz ve (d) f = 3 Hz.....113
Şekil 4.10 : Değişik plaka konumunda (I, II ve III) ve (B) tipi montaj durumunda anlık akış görüntüleri; Konum I için: (a) f = 1 Hz, (b) f = 2 Hz, (c) f = 3 Hz ve (d) f = 4 Hz; Konum II için: (e) f = 1 Hz, (f) f = 2 Hz, (g) f = 3 Hz ve (h) f = 4 Hz; Konum III için (i) f = 1 Hz, (j) f = 2 Hz, (k) f = 3 Hz ve (l) f = 4 Hz.....115
Şekil 4.11 : Bir periyot içerisinde jetin zamana bağlı gelişimi (f = 1 Hz).....116
Şekil 4.12 : II plaka konumunda ve (B) tipi montaj durumunda anlık akış görüntüleri; (a) f = 0.5 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz, (d) f = 3 Hz, (e) f = 4 Hz.....117
Şekil 4.13 : Su kanalında PIV deney düzeneği ve veri toplama şeması (ölçeksiz)..118
Şekil 4.14 : Su kanakında (a) PIV deney düzeneği, (b) lazer kaynağı ve çelik kolu 119
Şekil 4.15 : JaVA yakınında PIV deneyi: (a) levha üzerinde JaVA, (b) CCD kamera 121
Şekil 4.16 : I plaka konumunda JaVA yakınında PIV deneyi. Sol sütun (A) montajı: (a) f = 1 Hz, (b) f = 2 Hz, (c) f = 3 Hz; sağ sütun (B) montajı: (d) f = 1 Hz, (e) f = 2 Hz, (f) f = 3 Hz (zaman ortalamalı akış alanları).....122
Şekil 4.17 : II plaka konumunda JaVA yakınında PIV deneyi. Sol sütun (A) montajı: (a) f = 1 Hz, (b) f = 2 Hz, (c) f = 3 Hz; sağ sütun (B) montajı: (d) f = 1 Hz, (e) f = 2 Hz, (f) f = 3 Hz (zaman ortalamalı akış alanları).....124
Şekil 4.18 : II plaka konumunda (A) montajında JaVA yakınında PIV deneyi anlık görüntüleri (a = 1 mm, b = 25 mm, f = 2 Hz, r = 0.96).....125
Şekil 4.19 : III plaka konumunda JaVA yakınında PIV deneyi. Sol sütun (A) montajı: (a) f = 1 Hz, (b) f = 2 Hz, (c) f = 3 Hz; sağ sütun (B) montajı: (d) f = 1 Hz, (e) f = 2 Hz, (f) f = 3 Hz (zaman ortalamalı akış alanları) 126
Şekil 4.20 : II plaka konumunda JaVA yakınında PIV deneyi. Sol sütun (A) montajı: (a) f = 0.5 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz; sağ sütun (B) montajı: (d) f = 0.5 Hz, (e) f = 1 Hz, (f) f = 2 Hz (zaman ortalamalı akış alanları).....127
Şekil 4.21 : II plaka konumunda (A) montajında JaVA yakınında PIV deneyi anlık görüntüleri (a = 2 mm, b = 25 mm, f = 2 Hz, r = 1.92).....128
Şekil 4.22 : III plaka konumunda JaVA yakınında PIV deneyi. Sol sütun (A) montajı: (a) f = 1 Hz, (b) f = 2 Hz, (c) f = 3 Hz; sağ sütun (B) montajı: (d) f = 1 Hz, (e) f = 2 Hz, (f) f = 3 Hz (zaman ortalamalı akış alanları). 130
Şekil 4.23 : JaVA'dan 300 mm ötede PIV deneyi: (a) JaVA, (b) CCD kamera.....131
Şekil 4.24 : a = 1 mm ve b = 25mm ile III plaka konumunda JaVA ötesinde PIV deneyi: (a) f = 1 Hz, (b) f = 2 Hz, (c) f = 3 Hz ve (d) f = 4 Hz (zaman ortalamalı akış alanları).....132

Şekil 4.25 : a = 2 mm ve b = 25 mm ile III plaka konumunda JaVA ötesinde PIV deneyi: (a) f = 0 (b) f = 0.5 Hz, (c) f = 1 Hz ve (d) f = 2 Hz (zaman ortalamalı akış alanları).....133
Şekil 4.26 : a = 2 mm ve b = 21.8 mm ile JaVA ötesinde PIV deneyi. Sol sütun (B) montajı, konum I: (a) f = 0.5 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz; sağ sütun (B) montajı, konum II: (d) f = 0.5 Hz, (e) f = 1 Hz, (f) f = 2 Hz (zaman ortalamalı akış alanları).....134
Şekil 4.27 : a = 1 mm ve b = 25 mm için zaman ortalamalı akış alanlarından elde edilmiş orijinal sınır tabaka hız profilleri: (a) Konum I, (A) tipi, (b) Konum II, (B) tipi, (c) Konum III, (A) tipi montaj; ve düzgünleştirilmiş sınır tabaka hız profilleri: (d) Konum I, (A) tipi, (e) Konum II, (B) tipi, (f) Konum III, (A) tipi montaj.....135
Şekil 4.28 : a = 2 mm ve b = 25 mm için zaman ortalamalı akış alanlarından elde edilmiş sınır tabaka hız profilleri, Sol sütun (A) montajı: (a) Konum I, (b) Konum II, (c) Konum III; Sağ sütun (B) montajı: (d) Konum I, (e) Konum II, (f) Konum III.....135
Şekil 4.29 : a = 2 mm ve b = 21.8 mm için zaman ortalamalı akış alanlarından elde edilmiş sınır tabaka hız profilleri, Sol sütun (A) tipi montaj: (a) Konum I, (b) Konum II, sağ sütun (B) tipi montaj: (c) Konum I, (d) Konum II. 138
Şekil 4.30 : Faz ortalamalı vortisite alanları: (a) a = 1 mm f = 2 Hz-emme, (b) a = 1 mm f = 2 Hz-basma, (c) a = 2 mm f = 2 Hz-emme, (d) a = 2 mm f = 2 Hz-basma.....140
Şekil 4.31 : b = 25 mm, II plaka konumunda ve (A) tipi montajda a = 1 mm ve a = 2 mm için değişik frekanslarda elde edilen ortalama debi (sol sütun) ve momentum akıları (sağ sütun).....141
Şekil 4.32 : a = 1 mm, b = 25 mm III plaka konumunda ve (A) tipi montajda sınır tabaka karakteristikleri: (a) öteleme kalınlığı, (b) momentum kalınlığı, (c) enerji kalınlığı, (d) biçim katsayısı.....144
Şekil 4.33 : a = 2 mm, b = 25 mm III plaka konumunda ve (A) tipi montajda sınır tabaka karakteristikleri: (a) öteleme kalınlığı, (b) momentum kalınlığı, (c) enerji kalınlığı, (d) biçim katsayısı.....145
Şekil 4.34 : a = 2 mm, b = 21.8 mm I plaka konumunda ve (B) tipi montajda sınır tabaka karakteristikleri: (a) öteleme kalınlığı, (b) momentum kalınlığı, (c) enerji kalınlığı, (d) biçim katsayısı.....146
Şekil 5.1 : Su kanalında JaVA'nın şematik görünüşü: (A) tipi montaj.....152
Şekil 5.2 : Su kanalında JaVA'nın şematik görünüşü: (B) tipi montaj.....152
Şekil 5.3 : Su kanalındaki JaVA için hareketli hesaplama ağı ve sınır koşulları.....153
Şekil 5.4 : a = 1 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve III konumunda zaman ortalamalı akış alanları [m/s]: (a) f = 1 Hz, (b) f = 2 Hz, (c) f = 3 Hz, (d) f = 4 Hz.....156
Şekil 5.5 : a = 1 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve III konumunda zaman ortalamalı vortisite alanları: (a) f = 1 Hz, (b) f = 2 Hz, (c) f = 3 Hz, (d) f = 4 Hz.....157
Şekil 5.6 : a = 1 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve III konumunda ortalama sınır tabaka hız profilleri: (a) x = 0.04 m, (b) x = 0.1 m, (c) x = 0.2 m, (d) x = 0.3 m.....158

Şekil 5.7 : a = 1 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve III konumunda ortalama sınır tabaka karakteristikleri: (a) öteleme kalınlığı, (b) mometum kalınlığı, (c) enerji kalınlığı, (d) biçim katsayısı, (e) toplam disipasyon, (f) sürtünme katsayısı.....160
Şekil 5.8 : a = 2 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve III konumunda zaman ortalamalı akış alanları [m/s]: (a) f = 0.5 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz. 161
Şekil 5.9 : a = 2 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve III konumunda zaman ortalamalı vortisite alanları: (a) f = 0.5 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz....162
Şekil 5.10 : a = 2 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve III konumunda ortalama sınır tabaka hız profilleri: (a) x = 0.04 m, (b) x = 0.1 m, (c) x = 0.2 m, (d) x = 0.3 m.....163
Şekil 5.11 : a = 2 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve III konumunda ortalama sınır tabaka karakteristikleri: (a) öteleme kalınlığı, (b) mometum kalınlığı, (c) enerji kalınlığı, (d) biçim katsayısı, (e) toplam disipasyon, (f) sürtünme katsayısı.....164
Şekil 5.12 : a = 2 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve II konumunda zaman ortalamalı akış alanları [m/s]: (a) f = 0.5 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 1.5 Hz, (d) f = 2 Hz.....165
Şekil 5.13 : a = 2 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve II konumunda ortalama sınır tabaka hız profilleri: (a) x = 0.04 m, (b) x = 0.1 m, (c) x = 0.2 m, (d) x = 0.3 m.....166
Şekil 5.14 : a = 2 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve II konumunda ortalama sınır tabaka karakteristikleri: (a) öteleme kalınlığı, (b) mometum kalınlığı, (c) enerji kalınlığı, (d) biçim katsayısı, (e) toplam disipasyon, (f) sürtünme katsayısı.....167
Şekil 5.15 : a = 1 mm, b = 25 mm ve (B) tipi montajda ve I konumunda zaman ortalamalı akış alanları [m/s]: (a) f = 1 Hz, (b) f = 2 Hz, (c) f = 3 Hz, (d) f = 4 Hz.....170
Şekil 5.16 : a = 1 mm, b = 25 mm ve (B) tipi montajda ve I konumunda zaman ortalamalı vortisite alanları: (a) f = 1 Hz, (b) f = 2 Hz, (c) f = 3 Hz, (d) f = 4 Hz.....171
Şekil 5.17 : a = 1 mm, b = 25 mm, (B) tipi montajda ve I konumunda ortalama sınır tabaka hız profilleri: (a) x = -0.04 m, (b) x = -0.1 m, (c) x = -0.2 m, (d) x = -0.3 m.....172
Şekil 5.18 : a = 1 mm, b = 25 mm, (B) tipi montajda ve I konumunda ortalama sınır tabaka karakteristikleri: (a) öteleme kalınlığı, (b) mometum kalınlığı, (c) enerji kalınlığı, (d) biçim katsayısı, (e) toplam disipasyon, (f) sürtünme katsayısı.....173
Şekil 5.19 : a = 1 mm, b = 25 mm, f = 2 Hz, (A) tipi montajda ve II konumunda sınır tabaka içerisindeki noktaların frekans analizleri (hız ve basınç).....175
Şekil 5.20 : a = 1 mm, b = 25 mm, f = 3 Hz, (A) tipi montajda ve II konumunda sınır tabaka içerisindeki noktaların frekans analizleri (hız ve basınç).....176
Şekil 5.21 : Eğik düzlem üzerinde zaman ortalamalı akış alanları [m/s]: (a) f = 0 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz, (d) f = 3 Hz, (e) f = 4 Hz.....178
Şekil 5.22 : Eğik düzlem üzerinde ortalama sınır tabaka hız profilleri: (a) x = 0.04 m, (b) x = 0.1 m, (c) x = 0.2 m, (d) x = 0.3 m.....179
Şekil 5.23 : Eğik düzlem üzerinde sabit frekansta ortalama sınır tabaka hız profilleri: (a) f = 0 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz, (d) f = 3 Hz, (e) f = 4 Hz.....180

Şekil 5.24 : 6º derece eğimli rampa üzerindeki akışta ortalama sınır tabaka karakteristikleri: (a) öteleme kalınlığı, (b) mometum kalınlığı, (c) enerji kalınlığı, (d) biçim katsayısı, (e) toplam disipasyon, (f) sürtünme katsayısı.....181
Şekil 5.25 : Eğik düzlem ve müteakip düz levha üzerinde zaman ortalamalı akış alanları [m/s]: (a) f = 0 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz, (d) f = 3 Hz, (e) f = 4 Hz.....183
Şekil 5.26 : Eğik düzlem ve müteakip düz levha üzerinde ortalama sınır tabaka hız profilleri: (a) x = 0.04 m, (b) x = 0.1 m, (c) x = 0.2 m, (d) x = 0.3 m, (e) x =0.4m.....184
Şekil 5.27 : Eğik düzlem ve müteakip düz levha üzerinde sabit frekansta ortalama sınır tabaka hız profilleri: (a) f = 0 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz, (d) f = 3 Hz, (e) f = 4 Hz.....185
Şekil 5.28 : 3º derece eğimli rampa ve müteakip düz levha üzerindeki akışta ortalama sınır tabaka karakteristikleri: (a) öteleme kalınlığı, (b) mometum kalınlığı, (c) enerji kalınlığı, (d) biçim katsayısı, (e) toplam disipasyon, (f) sürtünme katsayısı.....186
Şekil 5.29: Ortalama sınır tabaka hız profillerinin boyutsuz genlik ile değişimi. Sol sütun: Re_J = 200, $\boldsymbol{r}$ = 0.96; sağ sütun: Re_J = 100, $\boldsymbol{r}$ = 0.48.....189
Şekil 5.30: Ortalama sınır tabaka hız profillerinin boyutsuz genlik ile değişimi; Re_J = 400, $\boldsymbol{r}$ = 1.92.....190
Şekil 5.31: (A) tipi konfigürasyonda JaVA'dan 0.3 m ötede ortalama sınır tabaka hız profillerinin bağıl plaka konumu ile değişimi; S_a = 0.25.....191
Şekil 5.32: (B) tipi konfigürasyonda değişik kesitlerde ortalama sınır tabaka hız profillerinin bağıl plaka konumu ile değişimi; Re_J = 400, $\boldsymbol{r}$ = 1.36.....192
Şekil 5.33: Ortalama sınır tabaka hız profillerinin konfigürasyon ile değişimi. Sol sütun: x = 0.2 m, sağ sütun: x = 0.3 m uzaklıktadır, S_a = 0.50.....193
Şekil 5.34: Değişik kesitlerde sabit sınır tabaka kalınlığında serbest akım hızının hız profiline etkisi, $\boldsymbol{r}$ = 0.96 ve S_a = 0.25.....194
Şekil 5.35: Değişik kesitlerde serbest akım hızının hız profiline etkisi, S_a = 0.25. 195
Şekil 5.36: Ortalama PIV ve CFD sınır tabaka hız profilleri, S_a = 0.25.....197
Şekil 5.37: Ortalama PIV ve CFD sınır tabaka hız profilleri, S_a = 0.50.....198
Şekil A.1 : Bir periyot içerisinde a = 1 mm , b = 25 mm (A) montajı Konum III için anlık vortisite alanları: sol sütun : f = 2 Hz, sağ sütun: f = 4 Hz.....213
Şekil A.2 : Bir periyot içerisinde a = 2 mm , b = 25 mm (A) montajı Konum III için anlık vortisite alanları: sol sütun : f = 1 Hz, sağ sütun: f = 2 Hz.....214
Şekil A.3 : Bir periyot içerisinde a = 1 mm , b = 25 mm (B) montajı Konum I için anlık vortisite alanları: sol sütun : f = 2 Hz, sağ sütun: f = 4 Hz.....215
Şekil A.4 : Bir periyot içerisinde a = 1 mm , b = 25 mm, f = 2 Hz, (A) montajı Konum II için anlık vortisite alanları: sol sütun : 1., 21.,41.,61.,81. akış alanları, sağ sütun : 101., 121.,141.,161.,181. akış alanları.....216
Şekil A.5 : Bir periyot içerisinde a = 1 mm , b = 25 mm, f = 3 Hz, (A) montajı Konum II için anlık vortisite alanları: sol sütun : 1., 22.,43.,64.,85. akış alanları, sağ sütun : 106., 127.,148.,169.,190. akış alanları.....216
Şekil A.6 : Bir periyot içerisinde a = 1 mm , b = 25 mm, f = 2 Hz, (A) montajı Konum II için rampa ve müteakip düz levha üzerindeki 1.,21.,41.,61.,81. ve 101. anlık vortisite alanları.....217

Şekil A.7 : Bir periyot içerisinde a = 1 mm , b = 25 mm, f = 2 Hz, (A) montajı Konum II için rampa ve müeakip düz levha üzerindeki 121.,141.,161.,181. ve 200. anlık vortisite alanları.....218
Şekil A.8 : Bir periyot içerisinde a = 1 mm , b = 25 mm, f = 4 Hz, (A) montajı Konum II için rampa ve müteakip düz levha üzerindeki 1.,21.,41.,61.,81 ve 101. anlık vortisite alanları.....219
Şekil A.9 : Bir periyot içerisinde a = 1 mm , b = 25 mm, f = 4 Hz, (A) montajı Konum II için rampa ve müteakip düz levha üzerindeki 121.,141.,161.,181., 201. ve 221. anlık vortisite alanları.....220
Şekil A.10 : Değişik serbest akım hızlarında a = 1 mm , b = 25 mm, f = 4 Hz, (A) montajı Konum II için düz levha üzerindeki ortalama akış alanları [m/s].....221

SEMBOL LİSTESİ

a : Disk genliği
a_k : Zamana bağlı POD açılım katsayısı
A : Matris
A_j : j yüzeyine ait vektör
A_{ki} : Korelasyon matrisindeki k.özvektörlerin elemanı
b : Aktüatör plakası genişliği
C_{ij} : Korelasyon matrisi
C_f : Sürtünme katsayısı
d : Aktüatör plakası kalınlığı
D : Toplam disipasyon
E_T : Akışa ait toplam enerji
f : Frekans
f_S : Örneklem frekansı
f_N : Kayda ait frekans
g_n : Boyutsuz dar aralık oranı
g_w : Boyutsuz geniş aralık oranı
$g(n)$: Fourier analizine giren fonksiyon
$G(k)$: Fourier analizinden çıkan fonksiyon
h : Mesafe
H : Biçim katsayısı
H_X : x-yönündeki konum adımı
H_Y : y-yönündeki konum adımı
H_T : zaman adımı
I : Görüntü yoğunluğu
J : Momentum akısı
M : Anlık veri sayısı, POD modu
n : Nokta sayısı
N : Örneklem noktası sayısı
N_X : x-yönündeki piksel sayısı
N_Y : y-yönündeki piksel sayısı
p : Basınç
q : Erim noktasının orijine uzaklığı
Q : Birim derinlik için hacimsel debi
r : Ortalama jet hızının serbest akım hızına oranı
R_{II} : Çapraz korelasyon değeri
Re : Reynolds sayısı
Re_J : Jet Reynolds sayısı
Re_x : Akışa ait Reynolds sayısı
S_a : Boyutsuz ölçeklendirilmiş genlik
S_Φ : Φ skalarına ait kaynak terimi
St : Strouhal sayısı

s_e : Tahmin standart hatası
s_{ideal} : İdeal hücre yüksekliği
t : Zaman
T : Periyot
T_N : Toplam kayıt süresi
u : x-yönündeki hız bileşeni
u_g : Hareketli hesaplama ağının hızı
u_{min} : PIV alanı içinde u-hızı alt sınırı
u_{maks} : PIV alanı içinde u-hızı üst sınırı
U : Karakteristik hız
U_∞ : Serbest akım hızı
v : y-yönündeki hız bileşeni
v_{min} : PIV alanı içinde v-hızı alt sınırı
v_{maks} : PIV alanı içinde v-hızı üst sınırı
V : Hız büyüklüğü, Denetim hacmi
V_J : Ortalama jet hızı
V_{maks} : PIV alanı içinde maksimum hız
V_P : Aktüatör plakasının sinüsoidal hızı
w_n : Dar aralık
w_w : Geniş aralık
W_i : Ağırlık oranı
Y_i : n adet noktadaki fonksiyonun değeri
z_i : i konumundaki değişken
Z : Dönüştürme katsayısı
α : Katman bölünme katsayısı
γ : Variogram
Γ : Difüzyon katsayısı
δ : Sınır tabaka kalınlığı
δ_1 : Öteleme kalınlığı
δ_2 : Momentum kalınlığı
δ_3 : Enerji kalınlığı
ΔP : Fark basıncı
Δt : Sabit zaman aralığı
Δx : Yerdeğiştirme
ΔX : Piksel cinsinden yerdeğiştirme
ε : Yüksek mertebeden terimler
ε_P : Tahmin hatası
θ : Düzgünleştirme katsayısı
λ : Özdeğer, Lagrange çarpanı
μ : Dinamik viskozite
ν : Kinematik viskozite
ρ : Yoğunluk
τ : Kayma gerilmesi
$\vec{\phi}$: Hız için özfonksiyon
Φ : Skalar
ω : Vortisite
Ω : Açısal hız

AKTİF AKIŞ KONTROLÜ İÇİN JET VE VORTEKS AKTÜATÖRÜNÜN DENEYSEL VE SAYISAL ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu doktora tezi çerçevesinde aktif akış kontrolü için geliştirilmiş olan jet ve vorteks aktüatörü (JaVA) deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Aktif akış kontrolü uygulamasının hava, kara ve deniz taşıtları ile akım makinalarının aerodinamik performansını ve verimini arttırabileceği ve buna bağlı gürültü ve egzoz emisyonlarını da azaltacağı bilinmektedir. Klasik aktif akış kontrolüne bir örnek olmak üzere cidar yakınındaki sınır tabaka içerisinde hava jeti veya vorteks oluşturarak akışa ilave enerji verilebilir, ve sınır tabakanın cidardan ayrılması geciktirilmiş olur. Böylece akışa karşı koyan direnç kuvvetleri azaltılır, gürültü kaynakları ve istenmeyen daimi olmayan çalkantılar en az düzeye indirgenebilir. Bu bağlamda, JaVA kaynaklı akış tipleri (farklı yönlere doğru gelişen jetler, vorteks ve kaotik akışlar), önce durgun suda sonra su kanalında akış görüntüleme ile gözlemlenmiş ve bu akışlar yöneten boyutsuz parametrelerle ifade edilerek tanımlanmıştır. Daha sonra parçacık görüntüleme ile hız ölçme (PIV) ile deneysel olarak hız vektörleri elde edilmiştir. Deney verileri gereken durumlarda Kriging yöntemi ile iyileştirilmiş ve zenginleştirilmiştir. İşlenmiş PIV verilerine Uygun Ortogonal Ayırım - Proper Orthogonal Decomposition (POD) uygulanmış, akışın modları çıkarılmıştır. Ayrıca durgun sudaki akış görüntüleme sonuçlarına optik akış hesap yaklaşımı uygulanmak suretiyle akış alanları çıkarılmış ve zamana bağlı davranışları incelenmiştir. Deneyler ile gerek durgun su tankında gerekse su kanalında ayrıntılı olarak incelenen JaVA kaynaklı akış tiplerinin, Fluent ticari yazılımı ile sayısal modellemesi yapılmış ve su kanalında JaVA-sınır tabaka etkileşimi değişik parametreler için ortaya konmuştur. Sayısal modelleme ile elde edilen sınır tabaka hız profilleri, deneysel verilerle büyük ölçüde örtüşmüştür. Ayrıca, sayısal modellemeler, akışı yöneten parametrelere bağlı olarak sınır tabaka kalınlığı, öteleme kalınlığı, momentum kalınlığı, sürtünme katsayısı gibi sınır tabaka karakteristiklerinin değişiminin anlaşılmasına ve yorumlanmasına olanak tanımıştır. Su kanalı sayısal modellemesinde JaVA yöneten boyutsuz parametrelerinin ve sınır tabaka kalınlığı ve serbest akım hızının akış ayrılmasını geciktirmedeki ve sınır tabaka hız profilini iyileştirmedeki rolü incelenmiştir. Tezin son kısmında rampa üzerindeki akışların da sayısal modellemeleri yapılmış ve basınç gradyeni etkisi altındaki aktif kontrol edilmeyen durumdaki sınır tabaka hız profilininin JaVA tarafından iyileştirdiği açıkça ortaya konmuştur. Sonuç itibariyle aktif akış kontrolünde kullanılabilecek bir düzenek olan JaVA'ya ait deneysel ve sayısal çalışmalar biraraya getirilerek özgün bir tez ortaya konmuştur.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF JET AND VORTEX ACTUATOR FOR ACTIVE FLOW CONTROL

SUMMARY

In this dissertation, a Jet and Vortex Actuator (JaVA) is investigated experimentally and numerically. It is well known that active flow control (AFC) applications can improve the performance and efficiency of aircrafts, vehicles and submarines as well as turbomachinery. Using AFC, it is also possible to reduce noise and exhaust emissions. A conventional example for active flow control might be to energyze the boundary layer by creating jets or vortices thus delaying flow separation. As a result drag forces, noise and unsteady fluctuations can be decreased to minimum. In this context JaVA induced flows (e.g. various jets, vortices and chaotic flows) are visualized in still water and then in a water channel to obain flow characteristics, then they are characterized by non-dimensional governing parameters. Next step was to obtain vector fields using Particle Image Velocimetry (PIV). PIV data is smoothed and enhanced by Kriging method when needed. Processed PIV data is then analyzed by Proper Orthogonal Decomposition (POD) in order to extract the modes of the flow fields. In addition optical flow approach is applied to flow visualizations to obtain PIV-like vector fields and detailed temporal behavior of JaVA induced flow regimes in still water are demonstrated. After investigating JaVA-induced flow regimes in still water tank as well as in the water channel appropriately, JaVA flows are simulated with a commercial code Fluent to reveal JaVA-boundary layer interaction in the water channel for various governing parameters. Boundary layer velocity profiles obtained from numerical simulations agreed with those of experiments pretty well. On the other hand, numerical modeling allowed us to understand the effect of JaVA and interprete the variation of some boundary layer characteristics such as boundary layer thickness, displacement thickness, momentum thickness and friction coefficient. In addition to that the effects of non-dimensional JaVA parameters, boundary layer thickness and free stream velocity on the delay of flow separation and enhancement of the boundary layer profile are investigated as well. In the last section flow over an inclined surface is simulated numerically and it is observed clearly that actively uncontrolled boundary layer profile affected by the pressure gradient is enhanced by JaVA. As a result a unique dissertation is written by gathering experimental and numerical results of JaVA which can be used as an active flow control device.

1. GİRİŞ

Bu bölümde doktora tezi hakkında açıklayıcı bilgilere yer verilmiştir. Tezin yapılma amacı, ana hatlarıyla konusu, özgün değeri, katma değeri ve tez sonunda erişilecek çıktılar üzerinde durulmuştur.

1.1 Tezin Amacı

Tezin amacı, günümüzde havacılıkta yaygın olarak kullanılan pasif akış ayrılma kontrolü düzeneklerinin yerine kullanılabilecek aktif akış ayrılma kontrolü düzeneği geliştirmektir. Dolayısıyla hedef, sınır tabaka ve akış ayrılmasının aktif kontrolü için geniş bir işletim esnekliğine sahip Jet ve Vorteks Aktüatörü (JaVA) olarak adlandırılan yeni bir aktüatör geliştirmektir.

Pasif kontrol, akışın kontrolü için sabit düzeneklerin kullanılması anlamına gelir. Sabit vorteks üreteci buna bir örnektir. Bu tip düzenekler basit olmalarına ve üretimlerinin düşük maliyette olmasına karşın iki önemli dezavantajları vardır: Öncelikle çoklu uçuş koşullarına (yere inme, kalkış, manevra) göre optimize edilemezler ve ikinci olarak ihtiyaç duyulmadıkları daimi seyir koşullarında ilave direnç etkisi yaratırlar.

Aktif kontrol ile bu olumsuzlukların üstesinden gelinir ve uçuşun genel performansının arttırılması sağlanır. JaVA, sistem aktif değilken sadece ihmal edilebilir bir direnç yaratır ve net sıfır kütle debili bir sistem olması nedeniyle dışarıdan akışkana ihtiyacı olmaz.

JaVA geniş bir genlik ve frekans aralığında çalışabildiği için farklı akış rejimleri elde edilebilir. Sınır tabakayla olan etkileşimin tam olarak kavranması ile JaVA'nın başarılı bir uygulaması; verimli uçuş kontrol sistemi ve böylelikle daha düşük maliyet, manevra kabiliyeti, ve daha geniş bir uçuş yelpazesi anlamına gelecektir.

1.2 Tezin Konusu

Doktora tezi çerçevesinde aktif akış kontrolü için geliştirilmiş aktif akış kontol düzeneği olan jet ve vorteks aktüatörü- Jet and Vortex Actuator (JaVA) deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Özellikle hava taşıtlarında sık kullanılan pasif akış kontrol düzeneklerinin aksine, aktif akış kontrol düzeneklerinin avantajı; ihtiyaç durumunda kullanılmaları ve böylelikle akış kontrolünün gerekli olmadığı çalışma koşullarında akışa zararlı etkileri bertaraf etmeleridir. Günümüzde kullanım alanı giderek artan aktif akış kontrol mekanizmaları hava taşıtlarının yanında kara ve deniz taşıtlarında da performansı ve verimi arttırabileceği için akış ayrılmasının kontrolünde kullanılmaktadır. Uçak kanatları veya türbomakinalarda sınır tabakanın aktif yöntemlerle kontrolü önem arzeder, zira hava taşıtlarında cidar yakınındaki sınır tabaka içerisinde hava jeti veya vorteks oluşturarak akışa enerji ilave etmek suretiyle sınır tabaka ayrılması engellenir veya sınır tabakanın cidardan ayrılması geciktirilmiş olur. Aynı zamanda akışa karşı koyan direnç kuvvetleri azaltılır, gürültü en az düzeye indirgenir.

Hava taşıtlarında seyir durumuna göre aktif akış kontrolü sağlayan aktüatörlerin farklı koşullarda çalıştırılmaları talebi gözönünde tutularak, Jet ve Vorteks Aktüatörü (JaVA) modeli ve bileşenleri birbirinden tamamen farklı çalışma modları elde edilebilmek üzere tasarlanmış ve üretilmiştir. İleride üzerinde ayrıntılı bir şekilde durulacak olan JaVA dışarıdan akışkana ihtiyaç duymayan net sıfır kütle debili bir mekanizmadır. JaVA'nın esas bileşeni pleksiglastan imal edilmiş içi boş yeterince büyük bir dikdörtgenler prizması olup, gövde ağzına asimetrik olarak yerleştirilen aktüatör plakası, eksantrik bir disk tarafından düşey doğrultuda hareket ettirilmektedir. JaVA kaynaklı akışlar diskin plakaya düşey hareket vermesi esnasında plaka ve gövde arasında oluşan yarıktan akışkan ortamına jet veya vorteks olarak pompalanmaktadır.

Bu birbirinden farklı akış tiplerine örnek olarak; aktüatör plakasının alt cidarına dik, açılı ve paralel olarak gelişen jetler ile saat yönünde veya saat yönüne ters yönde oluşan büyük vorteksler verilebilir. Akış tiplerindeki bu çeşitlilik bu tip bir aktif akış kontrolü sağlayan aktüatörün tasarımını ilginç kılmaktadır. Bu durumda meydana gelen JaVA kaynaklı akış rejimlerinin gerek durgun suda gerekse su kanalında sınır

tabaka içerisinde detaylı olarak araştırılması ve oluşan akış tiplerinin sınır tabakasına etkilerinin deneysel ve sayısal olarak kapsamlı olarak değerlendirilmesi; optimize edilmesi ve pratik uygulamaya hazır hale getirilmesi bu tez çalışmasının konusudur.

Deneylerin hava yerine suda yapılmış olması, akışın daha yavaş gerçekleşmesine ve kullanılan modellerin daha büyük boyutlarda olmasına olanak vermiştir. Ayrıca daimi olmayan akışlar daha düşük çalışma frekanslarında detaylıca incelenebilmiştir.

Aktüatörün çalışma prensibinin ve etkisinin iyi anlaşılması deneyler sonucunda toplanan verilerin değerlendirilmesine bağlıdır. Bu bağlamda hiçbir dış etki olmaksızın sadece JaVA kaynaklı akış rejimlerini tesbit etmek ve bu akış tiplerinin aktüatör parametreleri (JaVA'ya ait geometrik özellikler ve çalışma koşulları) tarafından nasıl etkilendiğini anlamak için, JaVA kaynaklı akış tipleri hareketsiz su ortamında incelenmiştir. Farklı çalışma koşullarında (farklı çalışma frekansı, aktüatör plakası genişliği, eksantrik disk genliği ve plaka konumu gibi) akış görüntüleme deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmalar; hangi genlik, frekans, aktüatör pozisyonu ve ölçülerde en fazla enerjiye sahip jet ve vortekslerin üretildiğini açıklamada yardımcı olmuştur. Akış tiplerinin karakterize edilmesinde kolaylık sağlaması ve akış tipinin birkaç boyutlu parametre yerine tek bir boyutsuz parametre ile ifade edilmesi için yöneten parametrelerden boyutsuz parametreler türetilmiştir. Bunlar üzerinde ilerideki bölümlerde ayrıntılı bir şekilde durulacaktır.

JaVA kaynaklı akış tipleri hakkında bilgi edindikten sonra aynı parametre kombinasyonlarında parçacık görüntüleme ile hız ölçme - Particle Image Velocimetry (PIV) deneyleri yapılmış ve akış alanlarına ait hız vektörleri deneysel olarak bulunmuştur.

Deneysel çalışmalara paralel olarak yürütülen sayısal çalışmalarda JaVA modelinin oluşturduğu akış tiplerinin görüntüleri optik akış hesaplaması adı verilen bir yaklaşımla ele alınarak akışa ait hız vektörleri çıkarılmış ve akış tiplerinin zamana bağlı davranışları incelenebilmiştir. Kriging interpolasyonu ile zenginleştirilen ve iyileştirilen PIV veri seti kullanılarak Uygun Ortogonal Ayırım ya da Proper Orthogonal Decomposition-(POD) yöntemiyle akışa ait modlar elde edilmiştir.

Sayısal çalışmaların önemli bir kısmını hareketsiz su ortamında aktüatör akışının sonlu hacimler tabanlı ticari yazılım olan Fluent ile sayısal modellemesi oluşturmaktadır.

Doktora tezinin içeriğinde aktüatörün su kanalında düşük Reynolds sayılarında daha önce bulunan aktüatör parametrelerine ek olarak farklı akış koşullarında (farklı kanal akış hızı, sınır tabaka kalınlığı, basınç gradyeni vs.) test edilmesi de vardır. Bu bağlamda su kanalında yapılan akış görüntüleme ve PIV deneyleriyle, sınır tabakayı istenen şekilde etkileyecek olan akış rejiminin jet mi yoksa vorteks mi olduğunu ortaya çıkmış, hangi parametrelerin sınır tabaka hız profilini iyileştirdiği görülmüştür. Doktora tezine temel teşkil edecek bu çalışmalar aynı zamanda aktif akış kontrolünün etkilerinin araştırılmasında ve gelecek vaadeden bu teknolojinin geliştirilmesinde önem arzetmektedir.

Aynı şekilde su kanalında aktüatör yakınında ve yeterince uzağında sınır tabaka üzerinde yapılan PIV deneylerinin sonuçları JaVA-sınır tabaka etkileşimi hakkında bilgi verirken, su kanalı için geliştirilen sayısal modellemelerden elde edilen bilgiler ışığında sınır tabaka kalınlığı, momentum kalınlığı gibi sınır tabaka karakteristikleri ile de JaVA'nın sınır tabakadaki etkisi rahatlıkla ortaya konabilmiştir.

1.3 Tezin Özgün Değeri ve Katma Değeri

Tezin özgün değeri, aktif akış kontrolü alanındaki deneysel ve sayısal gelişmeleri bir araya getirerek, bunları özgün bir aktif akış kontrol aktüatörüne uygulamaktır. Teknolojik avantajı, pasif akış ayrılma kontrolünün yerine kullanılabilecek yeni bir düzenek olmasıdır, çünkü pasif kontrol sistemleri seyir koşullarında ilave bir direnç kuvveti yaratırlar. Çalışmanın temel amacı, uçuş kontrol sistemlerine kolaylıkla entegre edilebilen ve daha büyük bir uçuş aralığı, manevra kabiliyeti, kararlılık ve gelişmiş performans sağlayan etkin, verimi yüksek aktüatör geliştirilmesidir. Ekonomik faydası ise akışın bu şekilde kontrol edilmesinin verim ve performansta sağlayacağı gelişmelerdir. Bunun yanında bu tür bir düzenek günümüzde hava taşıtlarının yanında kara taşıtları hatta denizaltılara da uygulanabilmektedir.

Jet ve vorteks aktüatörünün (JaVA) ürettiği akış tiplerinin hareketsiz suda ve su kanalında akış görüntüleme ile elde edilmesi ve sonuçların tekrarlanabilirliği sağlandıktan sonra akış hız alanına ait vektör dağılımının PIV ile deneysel olarak elde edilmesi, bu alanda şimdiye kadar daha önce yapılmadığından çalışmalara özgün bir değer katmaktadır. Tez çalışmaların önemli bir kısmı Stuttgart Üniversitesi Aerodinamik ve Gaz Dinamiği Enstitüsü'nde (IAG) yapılmıştır. Deneylerde kullanılacak olan teknoloji IAG'daki laboratuarlarda bulunan deney düzenekleriyle

ilişkilidir. Sayısal yöntemler içerisinde optik akış hesaplaması, Kriging interpolasyonu, POD ve Fluent ile sayısal modelleme yer almaktadır, dolayısıyla bu tez çalışması sonunda aktif akış kontrol düzeneği olan JaVA'nın akış ayrılmasındaki etkisi deneysel ve sayısal çalışmalarla etraflıca ortaya konmaktadır ve konuyla ilgili literatürdeki boşluğu doldurmaktadır.

Bu tez çalışması esnasında uluslararası bilimsel birikime doğrudan katkı sağlanmıştır. Bununla birlikte ülkemizde aktif akış ayrılması kontrolü konusunda sayısal ve deneysel olarak yapılan araştırma açığını kapamış ve bu bağlamda konuya ilişkin yurtdışında yapılan araştırmaların benzerinin ve geliştirilmişinin ulusal bilimsel birikime katkısı sağlanmıştır. Bu da arzulanmakta olan bilimsel altyapının gelişmesine uluslararası ortak çalışma ile yardım etmiştir. Teknik ve bilimsel faydasını takiben ekonomik faydası da ileride bu düzeneğin daha da geliştirilmesi ve hava taşıtlarında uygulanabilirliğinin sağlanması ile verim ve performansta meydana getireceği önemli gelişmelerdir.

1.4 Erişilecek Çıktılar

Bu tez çalışması, TÜBİTAK-BMBF (Alman Eğitim ve Araştırma Bakanlığı) ortaklığı çerçevesinde gerçekleştirilmiş 107M644 numaralı ve "Aktif Akış Kontrolü için Jet ve Vorteks Aktüatörünün (JaVA) Geliştirilmesi ve Test Edilmesi" başlıklı uluslararası projenin ürünüdür. Türk araştırmacılar, Stuttgart Üniversitesi Aerodinamik ve Gaz Dinamiği Enstitüsü'nde (IAG) bulunan deney düzeneklerinden faydalanmışlar, kendi alanlarındaki birikimleri aktarmışlar ve böylelikle iki ülke araştırmacıları için karşılıklı bir bilgi-deneyim paylaşımı sağlanmıştır. Bu çalışmanın bu anlamda hem Alman araştırmacılara hem de Türk araştırmacılara bilimsel açıdan katkısı önemlidir. Alman araştırmacılar için bu çalışma sonucu elde edilecek çıktılar LuFo-IV-projesi kapsamında kullanılacak olup, Türk araştırmacılar açısından da bu çalışma, tamamen yeni bir inceleme alanı olacaktır. Alman araştırmacılar, LuFo-IV-projesi kapsamında kullanacakları bir aktif akış kontrol düzeneğine erişmiş olacaklar ve Türk araştırmacılar da bu alanda bilgi sahibi olacaklar, bu araştırmalar neticesinde sözkonusu doktora çalışmasını ve bununla ilişkili bilimsel yayınları ortaya çıkaracaklardır.

2. AKIŞ KONTROLÜ

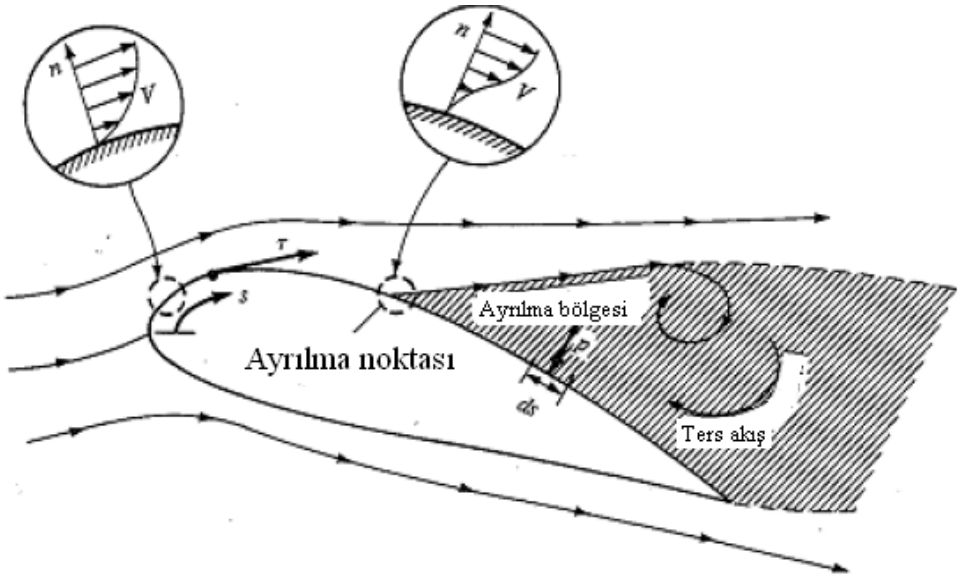
Çalışmanın esas hedefinde, sınır tabakadaki akış ayrılmasını engelleyici veya geciktirici bir aktif akış kontrol sistemi geliştirmek olduğu için, bu bölümde genel hatlarıyla akış ayrılması, akış ayrılmasını geciktirici pasif ve aktif kontrol düzenekleri ve bu alanda yapılmış araştırmalara yerverilmiştir.

2.1 Akış Ayrılması

Akış ayrılmasını çok kısa tarif etmek gerekirse, akışkanın üzerinde aktığı katı yüzeyden kopması demektir. Sınır tabaka ayrılması, büyük enerji kayıplarıyla ilişkilidir, bu nedenledir ki sınır tabakaya enerji veya momentum kazandırmak suretiyle akış ayrılması önlenebilir veya geciktirilebilir. Akış ayrılması pekçok mühendislik uygulamasında arzu edilmeyen bir durum olduğundan, araştırmacılar akış ayrılmasının şiddetini; direnç kuvvetini azaltmak, kanat üzerindeki kaldırma kuvvetini arttırmak, tutunma kaybı etkisini veya difüzör yardımıyla basınç dağılımını iyileştirmek gibi yöntemlerle belirgin ölçüde azaltmaya çalışmışlardır. Ancak akış ayrılmasının bazı durumlarda faydalı olabildiği de gözlemlenmiştir. Örneğin delta kanatların ön kenarında vorteks oluşumu ve ayrılması sağlanarak, yüksek kaldırma kuvveti etkisi yaratılabilmektedir (Gad-el-Hak ve Bushnell, 1991).

Akış ayrılması, akışı yöneten momentum ve enerji denklemleriyle açıklanır. Akışkan parçacığı iyi huylu basınç gradyeni ile akış içerisinde ivmelenir, ancak ters basınç gradyeni ve cidar kayma gerilmesi akışkan parçacığının hareketini yavaşlatan doğrultuda etki eder, bu bağlamda akışkan ters basınç gradyeni ve cidar kayma gerilmesine karşı koyamaz. Aynı şekilde parçacık hareket esnasında iyi huylu basınç gradyeni ile kinetik enerji kazanır fakat cidar kayma gerilmesi bunu azaltıcı bir etki yaratır. Sonuçta kinetik enerjinin bir kısmı ters basınç gradyeni ve cidar kayma gerilmesi ile potansiyal enerjiye dönüşür ve parçacığın sahip olduğu kalan kinetik enerjisi ters basınç gradyeni ve sürtünmenin negatif etkilerini bastıramaz hale gelir.

Şekil 2.1’de kanat üzerinde sınır tabaka içerisinde akış ayrılma noktasından önceki ve sonraki durum gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Kanat üzerinde akış ayrılması (Anderson, 2001).

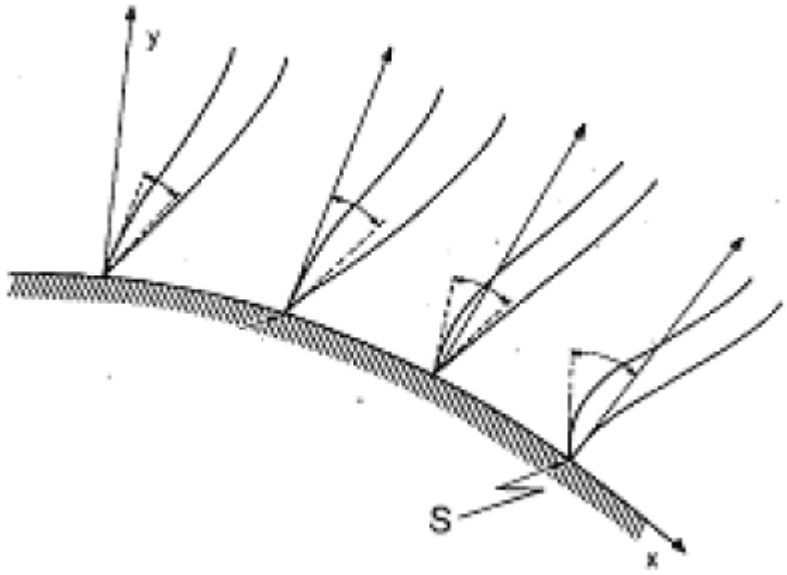
İki boyutlu daimi akışlarda, akış ayrılmasının ana kriteri cidar kayma gerilmesinin kaybolmasıdır. Laminer, daimi ve sıkıştırılamaz sınır tabaka için momentum denklemleri incelendiği zaman, ayrılma noktası öncesinde hız gradyeni pozitif, ayrılma noktasında sıfır ve ayrılma sonrasında negatif olduğu görülür. Ancak iki boyutlu daimi olmayan sınır tabakada ise yüzeyden kopma doğrudan hız gradyeni terimini içeren sıfır cidar kayma gerilmesi ile ilişkili olmak zorunda değildir. Cidar kayma gerilmesi, durma noktası etrafındaki ters akış ile sıfır değerine ulaşır (Cattafesta ve diğ., 2009).

Daimi olmayan akış ayrılması noktası, sınır tabakada cidar kayma gerilmesi ve hızın eş zamanlı kaybolması ile açıklanabilir (Gad-el-Hak ve Bushnell, 1991). Ayrılma noktasındaki hızın önceden bilinmemesi ayrılma noktasının tayinini de güçleştirmektedir.

Daimi olmayan akış ayrılması iki sınıfa ayrılabilir: birinci olarak titreşimli akışlarda basınç gradyeninin hem büyüklük hem de şekil itibariyle değiştiği ve dinamik tutunma kaybı etkisi yarattığı durum, ikinci olarak da serbest akış hızının periyodik değişmesi sonucu basınç gradyeninin büyüklüğünün değiştiği ancak şeklinin değişmediği durum (Gad-el-Hak, 2000).

Bu yaklaşımlar ışığında akış ayrılması, serbest akış hızının yarattığı titreşimler boyunca kayma gerilmesinin sıfır ve negatif değerler arasında değiştiği en uzak noktada (S) meydana gelir (bkz. Şekil 2.2) (Gad-el-Hak, 2000). Sonuç olarak

ayrılma, akışkanın katı cidar üzerinde sürünmeyi bıraktığı ve arkasında türbülanslı izler bırakarak cidardan koptuğu yer olarak da ifade edilmektedir.



Şekil 2.2 : Akış ayrılmasında hız profilinin değişimi (Gad-el-Hak, 2000).

2.2 Akış Kontrol Sistemlerinin Sınıflandırılması

Aktif akış kontrolü, mühendislikte akış ayrılmasının olduğu pekçok sahada kullanılmaktadır. Hava taşıtlarındaki gaz türbinlerinde ve itki sisteminin girişinde oluşan yanma gibi iç akışlarda veya kanat üzerindeki dış akışlarda sıklıkla kullanılmaktadır.

Akış kontrol sistemleri, genel olarak pasif ve aktif olmak üzere ikiye ayrılır. Pasif kontrol dışarıdan enerjiye ihtiyaç duymaz; nitekim sabit vorteks üreteçleri, araç üzerine yerleştirilen sabit spoiler ve rampalar bu gruba girer. Pasif kontrol sistemleri hareketsiz durduklarından doğrudan üzerlerine çarpan akışkanın enerjisini kullanırlar. Aktif akış kontrol sistemlerine enerji mutlaka dışarıdan verilmektedir. Sentetik jetler, piezoelektrik kanatlar, darbeli jetler/mikrojetler ve plazma aktüatörleri bu sınıflandırmaya girerler.

Aktif akış kontrol sistemleri de açık-çevrimli ve kapalı çevrimli olmak üzere ikiye ayrılırlar. Açık çevrimli aktif akış kontrol sistemlerinde frekans ve genlik manuel olarak ayarlanır ve bu kontrol tipinde herhangi bir geri besleme şeması yoktur.

Kapalı çevrimli aktif akış kontrol sistemlerinin ortak özelliği belli bir akışkan miktarının doğrudan algılanması ile geri besleme şeması üzerinden kontrol sinyalinin değiştirilmesidir. Uygulandıkları alanda akış dinamiğinde değişiklik yaratarak taşıt performansını iyileştirmeleri, enerji tasarrufu sağlamaları en önemli avantajlarıdır. Kapalı çevrimli aktif akış kontrol sistemleri, kendi içerisinde sanki-statik ve dinamik geri besleme yapan sistemler olarak da ikiye ayrılır. Sanki-statik kapalı çevrimli kontrol, doğrusal olmayan akışkanlar dinamiği özelliği gösteren sistemlerde bir başka deyişle geri besleme zaman ölçeğinin sistemin cevap verme zaman ölçeğinden büyük olduğu sistemlerde kullanılır. Dinamik kapalı çevrimli kontrolda ise bu her iki zaman ölçeği birbirine eşit kabul edilebilir. Şekil 2.3'de akış kontrol sistemlerinin sınıflandırması görülmektedir (Cattafesta ve diğ., 2008).



Şekil 2.3 : Akış kontrol sistemlerinin sınıflandırılması (Cattafesta ve diğ., 2008).

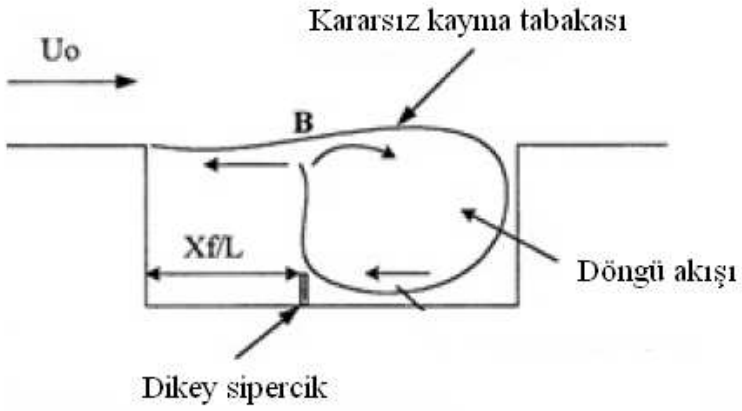
Genel olarak aktüatörlerin verimleri giriş ve çıkış hesabıyla ortaya konabilir. Burada giriş verilen elektrik sinyalidir, çıkış ise buna karşılık akışa verilen rahatsızlıktır. Aktüatörlerin birincil çıkışı yerdeğiştirmedir, ikincil çıkışı ise momentumdaki ve vortisite alanında meydana gelen değişikliktir. Aktüatörün stroku, lineerliği, kazancı (çıkış/giriş), bant genişliği (çalışma frekansı aralığı) önemli parametreleri arasındadır. Uygulamaya göre kullanılacak aktüatörün yapısı belirlenebilir, ancak frekans aralığı ve strok arasında tercih yapmak zorunda kalınabilir. Dolayısıyla ideal aktüatör karakteristikleri arasında yeterli kontrol sağlayabilme yetisi, yüksek bant genişliği, ucuz olması, düşük güç, verimlilik, uygun ve ölçeklendirilmiş tasarım sayılabilir (Cattafesta ve diğ., 2008).

2.3 Pasif Akış Kontrolü

Pasif akış kontrolü, genellikle bir kavite üzerinde meydana gelen kayma akışının karakteristiğinin değiştirilmesi ilkesine göre çalışır. Pasif sistemlerin hareketli parçaları bulunmaz ve çok ucuza üretilebilirler. Pasif kontrolün en önemli dezavantajı, değişik çalışma koşullarına adapte edilememesi ve tasarım dışı noktalarda her zaman iyi sonuç vermemesidir. Düşük Reynolds sayılı kavite akışı sağlayan yapılar, uç kenar şeklindeki basamaklar, sınır tabaka içerisine yerleştirilmiş silindirler, sipercikler ve spoilerler bu gruba girerler.

Sipercik kayma tabakası kalınlığını arttırarak kararsız frekans bölgesini daha düşük değerlere getirir. Şekil 2.4'de kavite üzerindeki akışın bir sipercik ile pasif olarak kontrolü gösterilmiştir. Sipercik genellikle savaş uçaklarında silahlara ait kapaklar açıldığında rezonansı azaltmak için başvurulan bir yöntemdir.

Sabit spoiler ve rampa, ayrılan akım çizgilerini esas akış bölgesine kadar çıkararak kavite sonrası uç kenarda akış birleşmesine neden olur.



Şekil 2.4 : Kavite üzerindeki akışın pasif kontrolü (Kuo ve diğ., 2001).

Sınır tabaka içerisine yerleştirilen silindirler arkalarında iz (wake) oluşturup ortalama kayma tabakasının gelişmesine neden olarak pasif kontrol sağlarlar. Bunlar yüksek frekanslarda çalışan vorteks üreteçleridir ve arkalarında Karman caddesi oluşturarak akış dinamiğini etkilerler.

2.4 Aktif Akış Kontrolü – Fluidik Aktüatörler

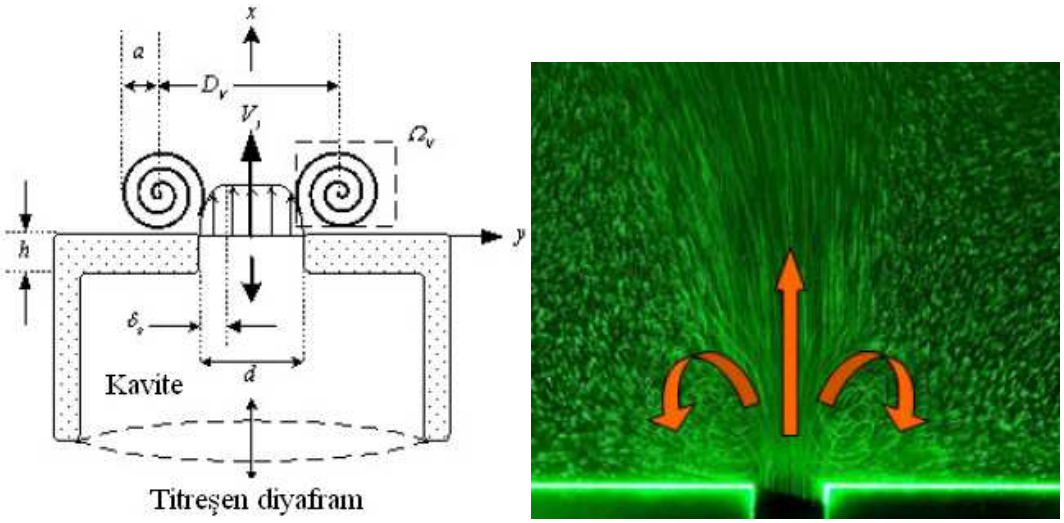
Daha önce de belirtildiği üzere aktif akış kontrol düzenekleri açık çevrimli veya kapalı çevrimli olabilir ve bu özellikleri geri besleme olmasıyla ilişkilidir.

Aktüatörler tiplerine göre tasnif edilebilecekleri gibi (fluidik-akışkan, termal, plazma vb.), tahrik mekanizmasına göre de incelenebilirler (mekanik, piezoelektrik, elektrodinamik, elektrostatik, vb.). Akışkan esaslı aktif akış kontrol yaklaşımları arasında; net sıfır kütle debili aktüatörler, piezoelektrik aktüatörler, titreşimli (darbeli) jetler, darbeli mikrojetler, jet ve vorteks üreteçleri ilk akla gelenlerdir.

2.4.1 Net sıfır kütle debili aktüatörler (sentetik jetler)

Bu tezin ilgi alanına giren Jet ve Vorteks Aktüatörü (JaVA), mekanik yolla tahrik edilen net sıfır kütle debili, fluidik yani akışkan esaslı bir aktif kontrol düzeneğidir.

Net sıfır kütle debili aktüatörler "sentetik jet" olarak da adlandırılır ve pekçok akış uygulamasında karşımıza çıkmaktadır. Genel çalışma ilkesi, bir piston veya diyafram vasıtasıyla periyodik titreşim sağlanması ve akışkanın bir yarık veya orifis bulunduran kaviteden içeriye ve dışarıya pompalanmasıdır. Bunun sonucunda vorteks çiftleri oluşur (Ingard ve Labate, 1950; Smith ve Glezer, 1998; Holman ve diğ., 2005). Bu vorteks çiftleri, toplamda sıfır net kütle debi transferi olmak suretiyle bir jet şeklinde birleşirler, dolayısıyla momentum çevredeki akışkandan elde edilir. Şekil 2.5'de orifisi olan diyaframlı net sıfır kütle debili mekanik tahrikli akış kontrol sisteminin şeması ve akış görüntüleme deneyi görülmektedir.



Şekil 2.5 : Net sıfır kütle debili aktif akış kontrolü (Holman ve diğ., 2005).

Net sıfır kütle debili aktif akış kontrolünün günümüzde çok başvurulan bir sistem olmasının nedeni, dışarıdan akışkana ihtiyaç duymaması ve çeşitli tahrik mekanizmaları (mekanik, piezoelektrik, kapasitif, elektrodinamik vb.) kullanarak karmaşık akış yapıları oluşturmasıdır.

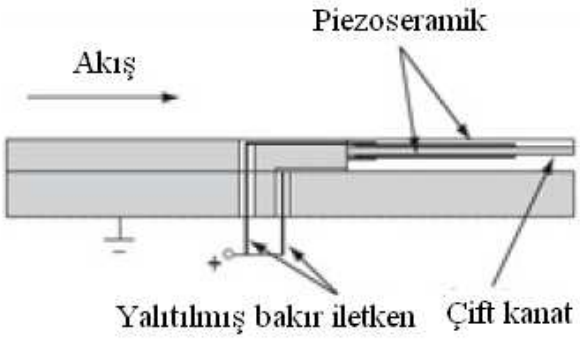
Piezoelektrik net sıfır kütle debili sistemin (piezoelektrik sentetik jet) en belirgin avantajları, piezoseramiğin kapasitif özelliğinden dolayı düşük elektrik gücüne ihtiyaç duyması, geniş bir çalışma frekans aralığı ve birkaç kHz'e varabilen veri çıkışıdır; ancak oluşturdukları jetlerin düşük hızda olması ve pekçok uygulamada rezonansa girmesinin gerekmesi dezavantajlarıdır.

Kapasitif sentetik jet düzenekleri rahatlıkla mikro boyutta üretilebilirken, piezoelektrik ve elektrodinamik düzenekler daha sofistike bir şekilde üretilmelidir (Coe ve diğ., 1994; Madou, 1997). Elektrodinamik sentetik jet aktüatöründe piston, bir sargıdan elektrik akımı geçirilerek oluşturulan manyetik alanın kuvveti ile hareket ettirilir. Bu sistemlerde transdüser, piezoelektrik diyaframın yerini almaktadır. Kapasitör gibi çalışan piezoelektrik ile karşılaştırıldığında sargı bir rezistör ve indüktör görevi görmektedir (Cattafesta ve diğ., 2008).

Elektrodinamik düzenekler düşük frekanslı uygulamalarda daha çok tercih edilir, ancak düşük yerdeğiştirme kabiliyetleri, mıknatıs dolayısıyla ağır çeken gövdeleri ve sargı nedeniyle ısınması tasarımını güç kılmaktadır (McCormick, 2000; Agashe ve diğ., 2008).

2.4.2 Piezoelektrik kanatlar

Mekanik tahrik mekanizmalarına alternatif olarak kullanılan piezoelektrik düzenekler, net sıfır kütle debili kontrol sistemlerine uygulanabileceği gibi kanat çiflerine de uygulanır. Şekil 2.6'da çift seramik kanatlı piezoelektrik kontrol düzeneğinin şeması görülmektedir. Etraftaki akışkan ile rezonansa giren kanat çifti kompozit malzemedendir. Piezoseramik titreşimli kanatlar, geçiş ve ayrılma bölgesinin kontrolünde, titreşimli kavite akışların kontrolünde kullanılabilirler. Düşük güç ihtiyacı, kompakt tasarımı, hassas dinamik modeli iyi yönleridir. Aktüatörün yaşlanması ve bozulabilmesi negatif yönleri arasındadır.



Şekil 2.6 : Piezoelektrik kanatla aktif akış kontrolü (Kegerise ve diğ., 2002).

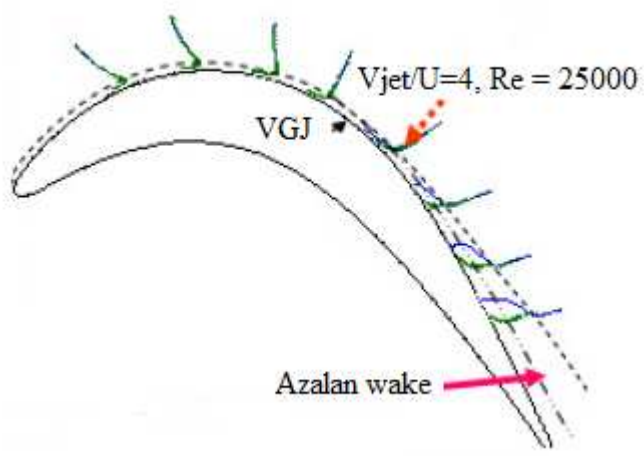
2.4.3 Darbeli jetler

Darbeli jetlerin net sıfır kütle debili aktüatörlerden farkı, dışarıdan akışkana ihtiyaç duymalarıdır. Darbeli jetler daimi olmayan kuvvetlerin oluşturabileceği olumsuzluklar nedeniyle daimi kuvvet altında tahrik edilerek, daimi darbeli jet olarak da adlandırılır, dolayısıyla bu jetlerin zamana bağlı davranışları değişmez (Greenblatt ve Wyganski, 2000). Darbeli jetlerin çalışma aralığı, tahrik mekanizmasındaki yatakların sürtünme ile ısınması nedeniyle yüksek çalışma frekansları ile sınırlandırılmıştır.

Darbeli mikrojetler de daimi akış özelliğine sahiptir ve akış ayrılması kontolünde, süpersonik jetlerin gürültü kontolünde ve akışın yarattığı titreşimlerin kontrolünde başvurulan bir sistemdir. Jetlerin mikro boyutlarda olması, kütlesel debi ihtiyacının azaltılmasına, ve çok yakın mesafelerde özdeş mikrojetlerin oluşturulabilmesine olanak vermektedir (Cattafesta, 2009).

2.4.4 Vorteks üreten jetler (Vortex generator jets-VGJ)

Daimi VGJ ve darbeli vorteks üreten jetler, özellikle türbomakina uygulamalarında kullanılmaktadır. Sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akışlarda tutunma kaybı etkisini bastırmak aynı zamanda sınır tabakada momentum transportunu iyileştirmek amacıyla vorteks üreten jetler kullanılmaktadır (Mc. Manus ve diğ., 1997). Şekil 2.7'de görüldüğü üzere vorteks üreten jet yardımıyla akışın kanat cidarına yakınlaştırılması ile kanat üzerindeki sınır tabaka ayrılma bölgesi daraltılarak aktif kontrol sağlanmıştır (Bons ve diğ., 2002).



Şekil 2.7 : Kanat üzerinde VGJ ile aktif akış kontrolü (Cattafesta, 2009).

2.4.5 Rezonans tüpleri

Darbeli jet aktüatörleri, sınırlı cevap verme süreleri ve fiziksel bazı kısıtlamalar nedeniyle yüksek frekanslı kararsız mekanizmalarda yetersiz kalırlar. Bu nedenle yüksek frekanslı kuvvetler altında çalıştırılarak akustik rezonansın avantajını kullanmak suretiyle fluidik esaslı rezonans tüpleri kullanılmaktadır. Çalışma ilkesi, belli bir uzunluktaki kapalı tüp ile eş eksenli olan yakınsak bir lüle ile oluşturulan jet oluşturmaya dayanmaktadır. Tüp içerisinde jet tarafından yaratılan kompresyon dalgaları ilerleyerek tüp sonunda çarparak kompresyon dalgası olarak yansır. Bu dalgalar sonra tüp girişinde ekspansiyon dalgaları olarak yansıyarak tüp boyunca ilerler ve tüp sonunda yine ekspansiyon dalgaları olarak yansır ve tüp girişine ulaştığında tekrar kompresyon dalgası olarak ilerler ve çevrim bu şekilde kendini yeniler (Raman ve diğ., 2001). Bu aktüatörler, net sıfır kütle debili olmamakla beraber yüksek hızların sözkonusu olduğu yüksek frekanslı uygulamalarda kullanılırlar.

2.5 Fluidik Aktif Akış Kontrol Sistemlerinin Üstünlükleri ve Dezavantajları

Aktif akış kontrol sistemleri, kontrolde kullanılan akışkan tiplerine göre fluidik (akışkan esaslı), plazma esaslı, yanma esaslı ve ateşleme esaslı olabilir. Yukarıdaki bölümlerde hepsi fluidik esaslı kontrol düzeneklerine giren net sıfır kütle debili sistemler veya sentetik jetler, piezoeletrik kanatlar, darbeli jetler ve mikrojetler, vorteks üreten jetler ve rezonans tüpleri anlatılmıştır, bu bölümde üstünlükleri ve dezavantajları üzerinde kısaca durulacaktır.

Net sıfır kütle debili sistemler bir başka deyişle sentetik jetler kendi içlerinde farklı tahrik mekanizmasına sahip (mekanik, piezoelektrik, kapasitif, elektrodinamik vb.) olabilirler. Sentetik jetlerin en belirgin üstünlüğü dışarıdan akışkana ihtiyaç duymamalarıdır. Ayrıca çok farklı tahrik mekanizmaları ile kullanılabilmeleri ve değişik boyutlarda imal edilebilmeleri diğer avantajlarıdır. Ancak pik hızların sesaltı bölgeyle kısıtlanması, yüksek hızlı uygulamalarda kullanımlarını engeller.

Piezoelektrik kanatlar basit tasarımları ve çok geniş bir frekans aralığında çalıştırılabilmeleri ile ön plana çıkarlar. Akış yönünde vorteks oluşturabilmesi diğer bir üstünlüğüdür. Ancak kanatların maksimum yerdeğiştirmesi ile frekans aralığının çarpımının sabit kalması ve akışkan yüküne karşı koyamaması kullanımlarını sınırlandırabilir.

Darbeli jetler, daimi kuvvetler altında çalışarak genellikle yüksek frekanslı uygulamalarda kullanılabilirler, ancak frekans ve cevap verme süresinin kısıtlı olması geri beslemeli kontrola uygun olmadığını gösterir ayrıca darbeli jetlerin dışarıdan akışkana ihtiyaç duyması da bir dezavantajdır.

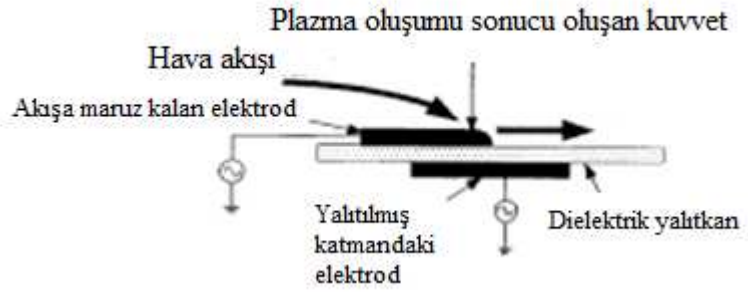
VGJ'ler, mekanik yolla üretilen jet ve vortekse benzerler ayrıca darbeli akış uygulamalarında da kullanılabilirler. Momentum oranı, jete ait açılar gibi pekçok ayarlanması gereken parametre olması optimize edilmelerini güçleştirir.

Rezonans tüpleri çok yüksek hızlı uygulamalarda geniş pertürbasyon sağlaması nedeniyle tercih edilir ancak geri besleme kontolü için uygun olmaması ve dışarıdan akışkana ihtiyaç duyması dezavantajları arasındadır (Cattafesta, 2009).

2.6 Plazma Aktüatörleri

Plazma aktüatörlerinin aktif akış kontolündeki en belirgin avantajı hareketli parçalarının bulunmaması ve kontol yüzeyinde atmosterik koşullara yakın koşullarda modifiye edilebilmeleridir. En çok kullanılan plazma aktüatörü, termal olmayan tekil dielektrik bariyerli deşarj aktüatörüdür (Single Dielectric Barrier Discharge – SDBD). Şekil 2.8'de şeması görülen aktüatörde dielektriği oluşturan kaplamalı elektrodlardan biri akış yüzeyinde tutulurken, ikinci elektrod diğerinden akış yönünde az bir mesafe ileride yalıtılmış bir katmanda tutulur. Yüksek doğru akımlı giriş gerilimi elektrodlara verilir, asimetrik bir elektrik alanı oluşturulur ve atlama geriliminin üzerindeki bir değerde hava iyonize olunca gözle görülen bir plazma

meydana gelir. Bir gazın atlama gerilimi, gazın basıncı ile elektrodlar arasındaki mesafenin çarpımına eşittir. Ancak atmosfer dışı koşullarda kullanılan taşıtlarda, elektrodlar arasındaki mesafenin hacimsel iyonizasyon için 7.5 μm'yi geçememesi bir dezavantajdır (Kanda ve diğ., 1991).

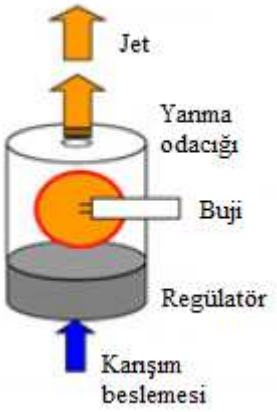


Şekil 2.8 : Termal olmayan plazma aktüatörü (Cattafesta, 2009).

Plazma aktüatörleri kolaylıkla monte edilebilirler. Akış yönünde vorteks oluştururlar. Ancak yüksek gerilim değerine ihtiyaç duyması ve belli hız limitlerinde çalışma zorunluluğu dezavantajlarıdır.

2.7 Yanma Esaslı Aktüatörler

Yanma esaslı aktütörler, yeni, yüksek verimli, küçük ölçekli ve tahrik mekanizması yanma ile çalıştırılan, yanma-fluidik ilkeli aktif akış kontrol düzenekleridir (Crittenden ve diğ., 2001, 2004; Cutler ve diğ., 2005). Bu aktüatörün jeti, küçük bir yanma odasında gaz fazındaki yakıtın yakılması ile meydana getirilir. Oksitleyici-gaz karışımı yanma odacığına püskürtülür, ve milisaniye mertebesinde yanma gerçekleşir. Şekil 2.9'da bu aktüatörün basit bir şeması görülmektedir.

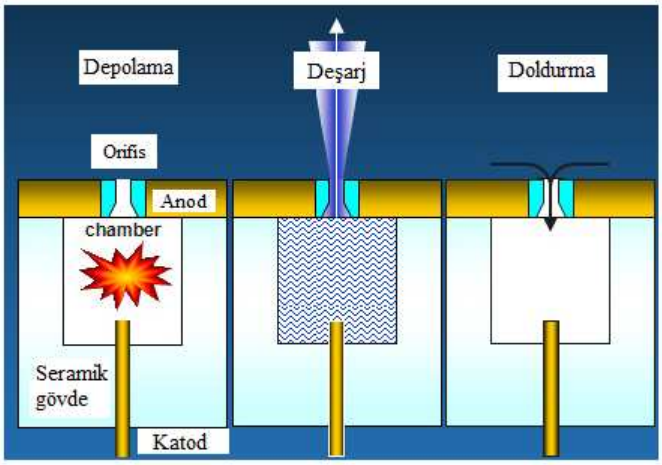


Şekil 2.9 : Yanma esaslı aktüatör (Crittenden ve diğ., 2001).

Yanma odacığında ani bir basınç artışı olur ve orifisten yüksek hızda darbeli bir jet çıkar, daha sonra boşalan odacığa tekrar karışım doldurulur ve bu şekilde jet akışı tekrarlanır. Bu aktüatörler de rezonans tüpleri gibi çok yüksek hızlı uygulamalarda geniş pertürbasyon sağlaması nedeniyle tercih edilir, ancak çalışma frekans aralığının sınırlı olması ve yanma işleminin zorunluluğu kullanımını güçleştirir.

2.8 Ateşleme Esaslı Aktüatörler

Ateşlemeli aktüatörler, herhangi bir yakıta ihtiyaç duymaz. Seramik gövde elektriğe karşı yalıtılmıştır ve aktüatörde bir anod, bir katod ve bir kafes olmak üzere üç tane değiştirilebilir parça mevcuttur. Elektrik akımı katoddan anoda akar ve ateşlemeli aktüatör içerisinde gazın aniden ısınması ile yüksek bir basınç oluşur. Yüksek basınçtaki gaz, yüksek bir hızla orifisten dışarı atılır. Bu bağlamda çalışma ilkesi üç aşama içerir. Birinci aşamada anod ve katod arasındaki kapasitif eleman gerilimin arttırılması atlama gerilimine erişilerek enerji depolanır, ikinci aşamada deşarj için gerekli olan gerilim değerine gelinir ve odacıktaki gazın sıkıştırılması ile gaz orifisten püskürtülür ve son aşamada odacık soğutulur ve taze hava ile doldurulur. Şekil 2.10'da bu aşamalar gösterilmiştir.



Şekil 2.10 : Ateşleme esaslı aktüatör (Grossman ve diğ., 2004).

Katı fazlı bir düzenek olması ve yakıt bulundurmaması yüksek hızlı akışlarda geniş bir pertürbasyon imkanı verir, ancak çalışma frekansı için kısıtlama olması bir dezavantajdır (Grossman ve diğ., 2004).

2.9 Sentetik Jet Araştırmaları

Bu bölümde önceki bölümlerde tanıtılan aktif akış kontrol yaklaşımlarından olan sentetik jetler ve darbeli jetler ile ilgili araştırmalara ve tez çalışmasının konusu olan JaVA ile ilgili temel teşkil edebilecek bazı çalışmalara, hedeflerine ve sonuçlarına yerverilmiştir.

Geleneksel pasif vorteks üreteçleri basit olmasına ve birçok akış ayrılması probleminin üstesinden gelebilmesine rağmen (Taylor, 1948); hem laminar hem de türbülanslı sınır tabakadaki akış ayrılmalarında en etkin rezonans hafifletici düzeneklerin aktif vorteks üreteçleri olduğu sonucuna varılmıştır (Karadogan ve Rockwell, 1983).

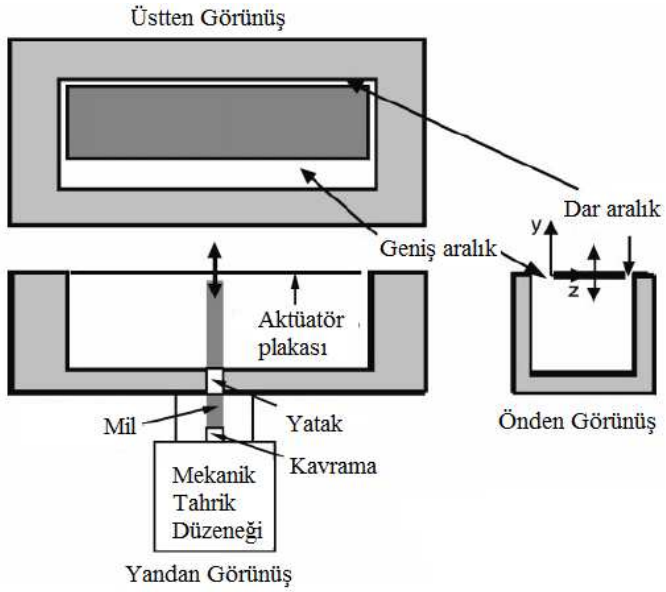
Sıfır basınç gradyenli laminar sınır tabaka içerisinde sentetik jet ile iki boyutlu silindir üzerinde oluşan sınır tabakada akış ayrılmasını geciktirici vorteks tipleri oluşturulmuştur. Aktüatör çalışma koşullarına göre meydana gelen farklı vorteks yapıları birbirinden şiddetleri, şekilleri ve cidar yakınında ortaya çıkma süreleri ile ayrılmaktadır. Bu farklı jet akışlarının hızlarının serbest akım hızına oranına göre silindir üzerindeki akış ayrılmasını geciktirici özelliklerinin değiştiği görülmüştür (Jabbal ve Zhong, 2008).

Piezoelektrik sentetik jet aktüatörülerinin akış kontrolünde verimli olabilmesi için yeteri kadar hızlı bir jet veya vorteks akışı üretebilmesi gerekmektedir. Piezoelektrik sentetik jet aktüatörlerinin, ters basınç gradyenli sınır tabakadaki akış ayrılmasının ve türbülans derecesinin kontrolünde etkin düzenekler olarak kullanıldığı gösterilmiştir (Lee ve diğ., 2003). Türbülanslı sınır tabaka içerisinde ters basınç gradyeni olması halinde darbeli jet-vorteks üretecinin etkisi de incelenmiş ve ortalama cidar kayma gerilmesindeki artışın, aktüatör tarafından püskürtülen net kütlesel debiye bağlı olduğu gösterilmiştir (Kostas ve diğ., 2007).

Sentetik jetin veriminin belirlenmesinde jetin maksimum hızı, aktarılan kütle akısı ve momentum transportu dikkate alınır. Bu bağlamda sentetik jet aktüatörü tam bir uçuş koşulu skalasında denenmiş ve aktüatör performansının optimize edilmesinde lazım olabilecek parametrik bağıntılar geliştirilmiştir (Tang ve Zhong, 2007).

Ayrıca sentetik jet aktüatörlerinin, bütün uçuş koşullarında maksimum kontrol verimini sağlaması için vorteks yapılarının oluşumunda rol oynayan boyutsuz parametrelerin iyi anlaşılması ve buna bağlı olarak aktüatör geometrisi ve çalışma koşullarının iyileştirilmesi gerekir (Zhong ve Jabbal, 2006). Sıfır net kütle debili darbeli jet akışları, parametre (frekans, jet hızı, püskürtmenin sapma açısı) optimizasyonu ve karalılık analizi için kompresör kaskadına başarıyla uygulanmış ve iyi sonuçlar alınmıştır (Skamnakis ve Papailiou, 2007). Ayrıca mikro boyutta hava jeti üreten darbeli aktüatörler, orta ve büyük boy kara taşıtlarında geniş bir çalışma aralığında akış ayrılması kontrolünde başarıyla kullanılmıştır (Warsop ve diğ., 2006).

Net sıfır kütle debili "jet ve vorteks aktüatörü (JaVA)" farklı akış rejimlerinde kullanılabilen özel bir aktif akış kontrol düzeneğidir (Lachowicz ve diğ.,1999). Lachowicz ve diğ., JaVA ile hareketsiz hava ortamında yaptıkları deneysel çalışmalarda aktüatör tarafından üretilen akış tiplerinin farklı açılarda gelişen jetler (serbest jet, açılı jet, cidar jeti) ve vorteks akışları olduğunu göstermiş ve JaVA kaynaklı akış tipleri için yöneten parametreleri boyutlu ve boyutsuz olarak belirlemiştir. Bu bağlamda Şekil 2.11'de şeması verilen düzenek kullanılarak yapılan deneyler sonucunda temel akış rejimlerinin boyutsuzlaştırılmış genlik, Reynolds sayısı ve jetin çıktığı yarığın genişliği (geniş aralık) ile değiştiği ortaya konmuştur.



Şekil 2.11 : Jet ve vorteks aktüatörü JaVA (Lachowicz ve diğ.,1999).

Cidar jeti aktüatör plakası yüzeyine yakın yerde gelişen jet, serbest jet ise geniş aralıktan çıkan ve plakaya dik jet olarak olarak tanımlanmıştır.

Aktif akış kontrolü ile ilgili şimdiye kadar yapılan çalışmalar göstermiştir ki, hiçbir akış kontrol düzeneği tekbaşına bütün akış uygulamalarında istenen performansı sağlayamaz. Sıfır net kütle debili aktüatörler, geniş çalışma frekansı aralığı ve hızlı cevap verme kabiliyeti nedeniyle kapalı çevrim için uygundur ancak yüksek hızın olduğu bazı uygulamalarda yetersiz kalabilen kontrol hakimiyeti ve frekans sınırları ile kullanıcının beklentilerini karşılayamayabilir. Rezonans tüpü gibi kontrol tipleri de yüksek frekanslı uygulamalarda tercih edilir ancak onlarda geri besleme için gerekli olan frekans aralığının ve cevap verme süresinin kontrol altında tutulabilmesi özelliği yoktur.

Bu bağlamda akış kontrolü ile ilgili çalışmalara devam edilmeli ve kontrol kabiliyetleri, sınırlamaları ve maliyetleri tam olarak belirlenmelidir. Maliyet, aktüatörün harcadığı güç veya giriş kontrol değerlerinin büyüklüğü ile ilgilidir (Cattafesta, 2009).

Bu tez kapsamında ele alınan fluidik esaslı, mekanik tahrikli sentetik jet olan JaVA, Lachowicz ve diğ. (1999) tarafından ortaya atılan modele benzer şekilde fakat daha ayrıntılı, deneylerde kolaylık sağlayacak ve yukarıda değinilen istekleri maksimum derecede karşılayacak şekilde tasarlanmış, üretilmiş ve incelenmiştir.

3. HAREKETSİZ SUDA JaVA

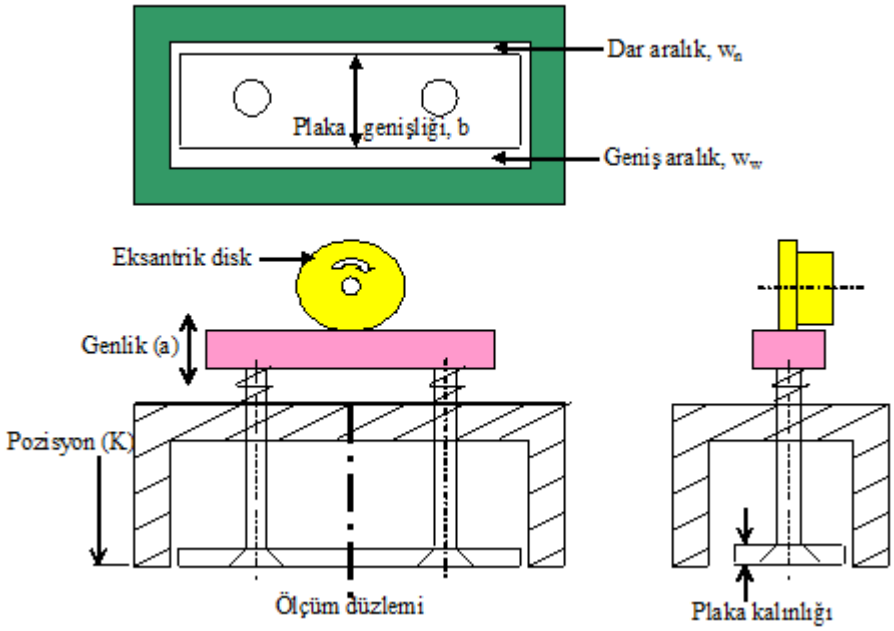
Bu bölümde tezin deneysel çalışmalarında kullanılan ve Şekil 2.11'de verilen düzeneğin bir benzeri olan, Stuttgart Üniversitesi Aerodinamik ve Gaz Dinamiği Enstitüsü (IAG) atölyesinde üretilmiş Jet ve Vorteks Aktüatörü (JaVA) ile hareketsiz su ortamında yapılmış deneysel ve sayısal çalışmalara yerverilmiştir.

3.1 JaVA Düzeneği ve Yöneten Parametreler

Laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş bölgesindeki sınır tabaka ayrılmasının kontrolü ve geciktirilmesi amacına yönelik sıfır net kütle debili Jet ve Vorteks Aktüatörü (JaVA) adı verilen bir aktif akış kontrol düzeneği deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada ele alınan JaVA modeli, (Lachowicz ve diğ., 1999) tarafından gerçekleştirilen çalışmadan esinlenerek, önce büyük bir akvaryum içerisinde (durgun suda) ve sonra su kanalında test edilmek üzere daha büyük boyutlarda tasarlanmış ve imal edilmiştir (Güneş ve diğ, 2008).

JaVA'nın ana bileşeni akış görüntülemeye imkan sağlaması açısından plaksiglastan imal edilmiş dikdörtgenler prizması (47.8 x 80 x 125 mm) şeklinde içi boş bir gövdedir. Şekil 3.1'de şeması verilmiş olan JaVA'nın diğer bileşenleri, $\boldsymbol{b}$ [mm] genişliğindeki aktüatör plakası ve bu plakaya düşey doğrultuda hareket veren $\boldsymbol{a}$ [mm] genliğindeki eksantrik silindirik döner bir disktir. Aktüatör plakası, JaVA gövdesinin alt yüzeyine asimetrik olarak yerleştirilmiş olup plaka ve gövde arasında bir geniş ($\boldsymbol{w_w}$) bir de dar aralık ($\boldsymbol{w_n}$) oluşmaktadır. Lachowicz ve diğ. (1999) tarafından kullanılmış deney düzeneğinin tahrik mekanizmasında yapılan bazı değişikliklerle (mekanik ossilatör yerine eksantrik diskler ve onları döndüren step motor kullanılmıştır) yeni bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Aktüatör hareketini sağlayan disk, bir step motor tarafından 1 ila 4 Hz arasında değişen düşük çalışma frekansı ($\boldsymbol{f}$) değerlerinde döndürülmektedir. Deneylerde sistem parametrelerini değiştirebilmek için çeşitli genişliklerde plakalar ve farklı genliklerde diskler üretilmiştir. JaVA ile ilgili geometrik büyüklükler olan geniş ve dar aralık mesafelerine, ($\boldsymbol{w_w}$ ve $\boldsymbol{w_n}$), aktüatör plakası genişliğine ($\boldsymbol{b}$), disk genliğine ($\boldsymbol{a}$) ve step motor tarafından diske

aktarılan çalışma frekansına (***f***) bağlı olarak farklı akış rejimleri elde edilmiştir. Bunun yanında bu tez çalışmasında daha önceki JaVA ile ilgili araştırmalarda incelenmemiş olan iki yeni ve önemli parametrenin etkisi üzerinde de durulmuştur. Bunlardan bir tanesi aktüatör plakasının kalınlığı (***d***) (bkz. Şekil 3.1), bir diğeri de daha sonraki bölümlerde JaVA akışları üzerindeki etkisine ayrıntılı bir şekilde değinilecek olan aktüatör plakası ortalama konumudur.

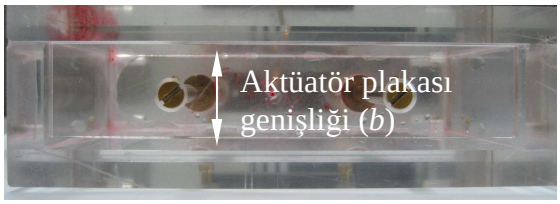


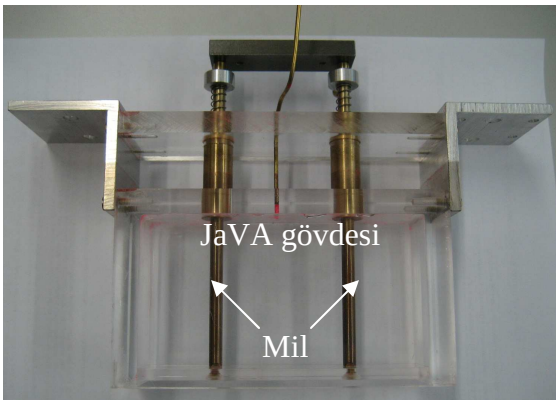
Şekil 3.1 : Deneylerde kullanılan JaVA'nın şeması (Güneş ve diğ., 2008 A).

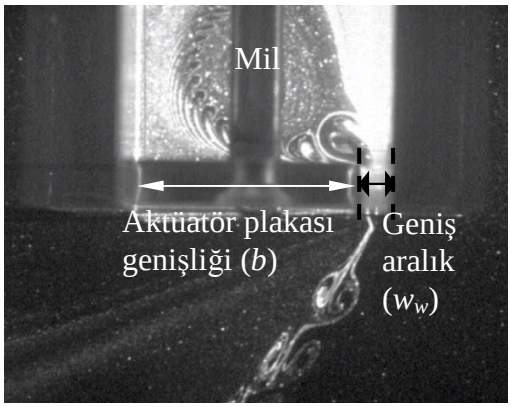
Şekil 3.1'den anlaşılacağı üzere plaka genişliği (*b*) ile JaVA kaynaklı akışın akışkan ortamına jet veya vorteks olarak pompalandığı geniş aralık (w_w) ve genellikle herhangi bir akışın oluşmadığı dar aralık (w_n) toplamı sabit kalmaktadır ve bu toplam gövde genişliğinden 10 mm'lik et kalınlıkları düşülürse 27.8 mm olarak bulunur. Bütün deneylerde dar aralık sabit tutulmuş olup, 0.3 mm'dir. JaVA gövdesine asimetrik olarak yerleştirilen plakanın genişliği arttıkça, geniş boşluk (w_w) mesafesi azalacak, dolayısıyla farklı bir akış rejimi elde edilecektir. Oluşacak akış rejimini disk genliği, çalışma frekansı ve plakanın bağıl pozisyonu da etkilemektedir, ancak geniş aralığın boyutunun azalması durumunda çeşitli açılarla çıkan jet akışları yerini genellikle vorteks ve kaotik akışlara bırakmaktadır. Deneylerde üretilmiş beş farklı genişlikte plakanın (*b* = 21.8 / 23.7 / 25.0 / 25.8 / 26.6 mm) etkisi incelenmiştir. Bu bilgiden hareket ile farklı aktüatör plakası genişlikleri için elde edilen geniş aralık boyutlarının sayısal değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Şekil 3.2'de; b = 25 mm genişliğindeki aktüatör plakasının takılmış olduğu durumda durgun su içerisinde elde edilmiş bir akış görüntüleme sonucu (önden görünüşe tekabül eder) ile JaVA'nın su dışında alttan ve yandan görüntüsü verilmiştir.

ALTTAN GÖRÜNÜŞ





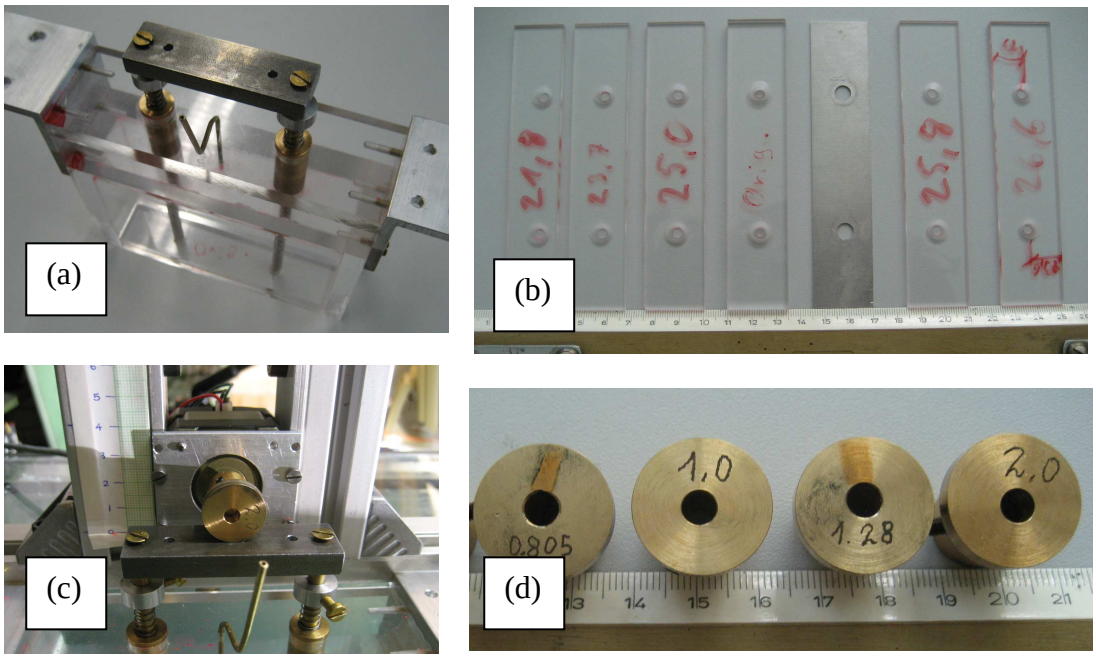


YANDAN GÖRÜNÜŞ ÖNDEN GÖRÜNÜŞ

Şekil 3.2 : Deneylerde kullanılan JaVA'nın alttan, yandan ve önden görünüşü.

JaVA kaynaklı akışı etkileyen bir diğer boyutlu parametre olan disk genliği (a)'nın etkisini deneysel olarak anlayabilmek için farklı genliklerde ($\boldsymbol{a}$ = 0.4 / 0.5 / 0.64 / 1.0 / 2.0 mm) pirinç diskler üretilmiş ve bunlar bir step motor ile düşük frekanslarda döndürülmüştür. Eksantriklikten dolayı aktüatör plakasına sinüsoidal bir fonksiyonla ifade edilebilecek bir düşey hareket kazandırılmaktadır ve bu hareket Şekil 3.3(a)'da gösterilmiş bir yatay parça ve yaylı miller üzerinden diskten plakaya aktarılmaktadır. Şekil 3.3(b)'de farklı genişlikteki aktüatör plakaları ve Şekil 3.3(c)'de diskin monte edildiği step motor ve Şekil 3.3(d)'de farklı genlikteki diskler görülmektedir.

Aktüatör plakaları da pleksiglastan imal edilmiş olup, kalınlıkları 3.0 mm'dir. Sadece genişliği 25 mm olan plaka üç farklı kalınlıkta imal edilmiştir (ince olan metal plakanın kalınlığı 1.0 mm, orta kalınlıkta 3.0 mm ve kalın olan 5.0 mm). Ayrıca plaka bağıl pozisyonunu ayarlayabilmek için step motor ölçekli bir kızak üzerinde yukarı-aşağı hareket ettirilebilmektedir (bkz. Şekil 3.3(c)).



Şekil 3.3 : JaVA bileşenleri; (a) gövde, (b) plakalar, (c) step motor, (d) eksantrik diskler.

JaVA modeli ile beraber incelenmek üzere seçilen parametreler, boyutlu parametreler (hız, genlik, frekans, plaka geometrisi) ve bu boyutlu parametrelerden Buckingham π- teorisi ile elde edilecek boyutsuz parametrelerdir (Reynolds sayısı (*Re*), boyutsuz ölçeklendirilmiş genlik (S_a) vb.). Boyutsuz parametrelerin akışa olan etkisi de akış tipini tanımlamada ve oluşacak akış rejiminin uygun frekans aralığında kalıp kalmadığını anlamada faydalı olacaktır. JaVA'nın geometrik tasarımı tamamlandıktan ve uygun boyutlarda bir modeli oluşturulduktan sonra, akış görüntüleme deneyleri ile ilgili boyutsuz parametrelerin akış rejimine olan etkileri gözlemlenmiştir. JaVA'nın yöneten boyutlu parametreleri şunlardır;

- Aktüatör genliği: $\boldsymbol{a}$ [mm]
- Aktüatör plakası genişliği: $\boldsymbol{b}$ [mm]
- Aktüatör frekansı: $\boldsymbol{f}$ [Hz]
- Karakteristik hız: $\boldsymbol{U}$ [mm/s]
- Geniş aralık: $\boldsymbol{w_w}$ [mm]
- Dar aralık: $\boldsymbol{w_n}$ [mm]
- Kinematik viskozite (su): $\boldsymbol{\nu}$ [mm^2/s].

Bu boyutlu parametrelerden boyutsuz parametreler türetilir. Bu parametreler aşağıdaki gibidir (Lachowicz ve diğ., 1999);

- Reynolds sayısı: $Re = (U)b/v = (2\pi af)b/v$
- Boyutsuz ölçeklendirilmiş genlik: $S_a = 2\pi a/b$
- Boyutsuz geniş ve dar aralık oranları: $g_w = w_w/b$ ve $g_n = w_n/b$

Çizelge 3.1 : Farklı aktüatör genişliklerine bağlı olarak geniş aralık oranları.

Aktüatör plakası genişliği (b) [mm]	Geniş aralık (w_w) [mm]	Dar aralık (w_n) [mm]	Boyutsuz geniş aralık oranı (g_w)	Boyutsuz dar aralık oranı (g_n)
21.8	5.7	0.3	0.261	0.0137
23.7	3.8	0.3	0.160	0.0126
25.0	2.5	0.3	0.100	0.0120
25.8	1.7	0.3	0.066	0.0116
26.6	0.9	0.3	0.033	0.0111

Yukarıdaki bağıntıda verilen Reynolds sayısı, aktüatör plakası Reynolds sayısı olarak da adlandırılabilir. Dikkat edilecek olursa aktüatör Reynolds sayısının tanımında kullanılan hız terimi genliğe ve çalışma frekansına bağlı olup; karakteristik hız ile ifade edilmektedir, dolayısıyla deneylerde aktüatör plakası *Re* ile jet akışının *Re* arasında bir ilişki kurmak gerekir.

Plaka hareketine bağlı tanımlanan Reynolds sayısı (*Re*) yanında, jet hızına (V_J) bağlı olarak da bir Reynolds sayısının (Re_J) veya bir başka deyişle JaVA kaynaklı akışın Reynolds sayısın hangi parametre kombinasyonun bir fonksiyonu olduğunun anlaşılması gerekir. Zamana bağlı jet (vorteks) çıkış hızının yarım periyot ya da basma periyodu üzerinden zaman ortalamalı integrali alınırsa **(3.1)**'deki debi ifadesi elde edilecektir (Tang H., Zhong S., Jabbal M., Garcillan L., ve diğ., 2007):

$$Q = \frac{2}{T}\int_0^{T/2} V_J(t)dt = \frac{2ab}{T/2} = 4abf \qquad \textbf{(3.1)}$$

Aktüatör plakasının süpürdüğü hacim, birim derinlik için ($2a \times b$ mm^3) olacak ve bir tam periyot emme ve basma fazlarından oluştuğundan, emme veya basma hareketi için yarım periyotluk (T/2) süreçte; hacimsel debi **(3.1)**'deki gibi ifade bulacaktır.

Denklem **(3.1)**'deki ifadede Q [mm^3/s] birim derinlik için hacimsel debiyi, a [mm] ve b [mm] sırasıyla JaVA'nın parametreleri olan disk genliğini ve plaka genişliğini, T [s] ise emme ve basma fazlarını içeren tam periyodu göstermektedir. Hacimsel debiden yola çıkarak JaVA kaynaklı jetin ortalama hızı denklem **(3.2)**'deki gibi bulunabilir. Elde edilen bağıntı [mm/s] cinsinden jet veya vorteksin geniş aralıktan ortalama çıkış hızını vermektedir.

$$V_J = \frac{Q}{w_w} = \frac{1}{w_w}\left[\frac{2}{T}\int_0^{T/2} v_j(t)\,dt\right] = \frac{4abf}{w_w} \qquad \textbf{(3.2)}$$

Ortalama jet hızı bilindiğine göre, jet akışının Reynolds sayısı da bulunabilir. Geniş aralık w_w [mm] karakteristik uzunluk ve ν [mm^2/s] suyun kinematik viskozitesi olmak üzere, denklem **(3.3)** yazılabilir:

$$Re_J = \frac{V_J\, w_w}{\nu} \qquad \textbf{(3.3)}$$

Yukarıdaki ifadede denklem **(3.2)** kullanılır ve frekansın, periyodun tersi olduğu yani $f = 1/T$ [Hz] bağıntısı hatırlanırsa, jet akışının Reynolds sayısı bulunur **(3.4)**.

$$Re_J = \frac{4abf}{\nu} \qquad \textbf{(3.4)}$$

Burada dikkat edilmesi gereken husus, jet Reynolds sayısı (Re_J) ile aktüatör plakası Reynolds sayısı (Re) arasında bir ilişki olduğudur. Daha önce ifadesi verilen Re ile Re_J birbirine oranlandığında **(3.5)**'deki gibi bir bağıntı ortaya çıkar:

$$\frac{Re}{Re_J} = \frac{2\pi abf/\nu}{4abf/\nu} = \frac{\pi}{2} \qquad \textbf{(3.5)}$$

Demek oluyor ki, aktüatör plakasının Reynolds sayısı, JaVA kaynaklı akış rejiminin Reynolds sayısının π/2 katıdır. Bununla beraber JaVA kaynaklı akış rejiminin Strouhal sayısı (St) ise denklem **(3.6)**'daki gibi ifade edilir. Denklem **(3.6)**'daki U terimi aktüatör plakasının sinüsoidal hareketine bağlı olarak maksimum hıza sahip olduğu konumdaki hızıdır.

$$St = \frac{f\,b}{U} \qquad \textbf{(3.6)}$$

Buradan hareketle, *U* plaka hızı için aktüatör plakası Reynolds sayısının tanımında başvurulan genelleştirilmiş ($U = 2\pi af$) ifadesi kullanılarak Strouhal sayısı denklem **(3.7)**'deki gibi yazılır.

$$St = \frac{f\,b}{2\pi a f} \tag{3.7}$$

Bu şekilde elde edilen *St* ifadesinde plaka genişliği karakteristik uzunluk olarak alınmıştır ve plakanın sinüsoidal hareketinden yola çıkılarak maksimum plaka hızı kullanılmıştır. Sonuçta Strouhal sayısı genliğin ve plaka genişliğinin bir fonksiyonu olarak denklem **(3.8)**'deki gibi tanımlanabilir.

$$St = \frac{b}{2\pi a} = \frac{1}{S_a} \tag{3.8}$$

Yukarıdaki ifade aynı zamanda boyutsuz ölçeklendirilmiş genlik olan $S_a = 2\pi a/b$ ifadesiyle benzerlik göstermektedir, zira Strouhal sayısı boyutsuz ölçeklendirilmiş genliğin tersidir. Bu nedenle akış tiplerini karakterize ederken *St* yerine onun tersi olan boyutsuz ölçeklendirilmiş genlik değerini vermek *St* hakkında bir fikir verecektir.

Burada dikkat edilemesi gereken nokta, genliğinin maksimumdan minimuma göre tarif edilemesinde yani bir tam periyot esnasında plakanın en üst konumdan en aşağıdaki konuma gelmesi sürecinde katedilen mesafenin ($2a$) olmasıdır. Buradan yola çıkarak tam periyodun yarısına tekabül eden emme ve basma fazları için *Re*, Re_J ve S_a değerleri hesaplanırken formülasyonda yeralan genlik değeri için (a) kullanılması daha doğru olacaktır. JaVA ile ilgili hareketsiz su ortamında yapılmış deney sonuçlarını yorumlarken ve akış rejimlerini karakterize ederken temel boyutsuz parametrelerden, aktüatör plakası *Re* ile S_a yeterli olmaktadır. Sonuç olarak elde edilen boyutsuz sayıların hangi parametrelerin fonksiyonu olduğu denklem **(3.9)** ve **(3.10)**'da sırasıyla verilmiştir.

$$Re = f\left(a, b, f\right) \tag{3.9}$$

$$St = f\left(a, b\right) \tag{3.10}$$

3.2 Hareketsiz Su Ortamında Akış Görüntüleme Deneyleri

JaVA ile ilgili hareketsiz su ortamında akış görüntüleme deneyleri yapılarak, önceki bölümde açıklanan boyutsuz parametreler ile farklı akış rejimleri karakterize edilmiş ve JaVA kaynaklı temel akış tipleri belirlenmiştir.

JaVA model deneyleri yeterince büyük bir akvaryum içerisinde (durgun suda) gerçekleştirilmiştir. JaVA merkezinden geçen ve hızlı kamera ile 90º açı yapan bir lazer ışın düzlemi oluşturularak iki boyutlu olarak görüntülenen JaVA akış tipleri, yüksek hızlı bir kamera vasıtısıyla, akış sürekli rejime girdikten sonra saniyede 30 - 60 - 125 - 256 görüntü (fps) alınarak kaydedilmiştir. Hızlı kamera ve (IIIb) sınıfı sürekli lazerden oluşan görüntü alma sistemi yardımıyla farklı akış rejimleri, florasan boya çözeltisi kullanılarak parçacık izleme metodu ile görüntülenmiştir. Akış görüntüleme deney düzeneğinin bileşenleri:

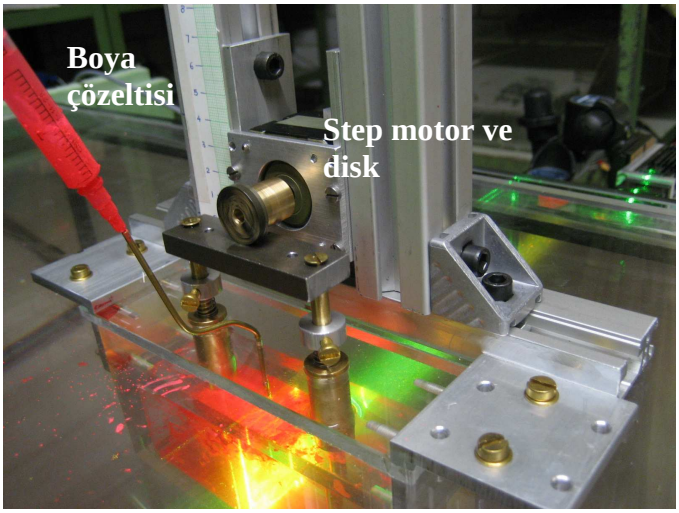
- Yeteri kadar büyük olan akvaryum,
- IIIb sınıfı yeşil renkte akış görüntüleme lazeri (532 nm dalgaboyu),
- Hızlı kamera,
- Alınan görüntülerin kaydedildiği bir bilgisayar.

Bu bileşenler topluca Şekil 3.4'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan hızlı kamera ile, aktüatör plakasının hızına bağlı olarak (1 Hz mertebesinde) genellikle 30 ve 60 fps'da kayıt yapılmıştır. Deneyler hava yerine durgun suda yapıldığı için çok daha düşük frekanslarda çalışma imkanı sağlanmıştır.



Şekil 3.4 : Durgun su tankında akış görüntüleme ve veri toplama deney düzeneği.

Şekil 3.5'de akış görüntüleme esnasında yakından çekilen bir fotoğraf görülmektedir. Anlaşılacağı üzere, boya çözeltisi pirinçten yapılmış ince bir boru içerisinden içi tamamen suyla dolu olan JaVA gövdesi boşluğuna homojen bir şekilde enjekte edilmektedir. Eksantrik disk boşta dönmemesi için step motor miline sıkıca bağlanmış olup, sürtünmeyi azaltmak için silikon ile yağlanmıştır. Step motor, bir skalaya göre, genliğe bağlı olarak aşağı ve yukarı hareket ettirilebilmektedir.



Şekil 3.5 : Akış görüntüleme esnasında JaVA, step motor ve eksantrik disk.

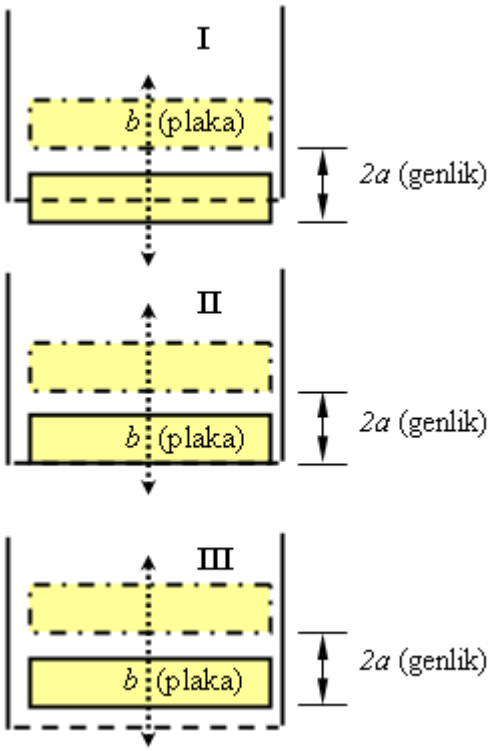
Akış görüntüleme deneylerinde boyutlu parametreler belirlenirken, ilave bir parametre olarak bu tez çalışması sırasında belirlenen aktüatör plakası ortalama konumu da netleştirilmelidir. Bu bağlamda, aktüatör plakasının ortalama konumu – bir başka deyişle plakanın hareketsiz haldeki sıfır pozisyonu, JaVA gövdesine göre bağıl olarak ifade edilebilir. Üç farklı ortalama konum vardır (bkz. Şekil 3.6):

- Aktüatör plakasının, diskin genliğine bağlı olarak hareketsiz haldeki sıfır konumunda kısmen JaVA gövdesi dışına taşması (Konum I).
- Aktüatör plakasının, diskin genliğine bağlı olarak hareketsiz haldeki sıfır konumunda JaVA gövdesi ile aynı hizaya gelmesi (Konum II).
- Aktüatör plakasının, diskin genliğine bağlı olarak hareketsiz haldeki sıfır konumunda JaVA gövdesinin içinde kalması (Konum III).

Bu üç farklı ortalama plaka konumu, akış görüntüleme deneylerinde, birbirinden farklı yönlerde ve şiddetlerde gelişen jet akışları veya kaotik akışlar oluşmasına neden olmaktadır. Konum I ve III, elde edilmek istenen akışa göre, geometri ve çalışma frekansı elverdiği müddetçe istenildiği gibi belirlenebilir. Konum II, özel bir

durumdur, zira bu konumda (parametre kombinasyonuna göre) emme ve basma fazlarını ve vorteks çiftleri halinde oluşan akış rejimleri mükemmel şekilde görüntülenmiştir.

Plaka genişliği, genlik ve çalışma frekansı sabit tutulduğu takdirde bir başka deyişle sabit *Re* ve S_a değerlerinde, plaka ortalama konumu değiştirilerek akış üzerindeki etkisi rahatlıkla incelenebilir. Bunun üzerinde ilerideki bölümlerde durulacaktır.



Şekil 3.6 : Aktüatör plakasının en üst ve en alt konumları (çizim ölçeksizdir).

Hareketsiz su ortamında çeşitli parametre kombinasyonları ve plaka konumlarında yeterince uzun bir süre aralığında (örneğin 30 fps ile en az 500 kare almak üzere yaklaşık 17s) akış görüntüleme yapılmış ve çeşitli akışlar için elde edilen bu deneysel veri optik akış yöntemi ile hız alanı bulmada ve akışa ait bazı önemli çıkarımlar yapmada yardımcı olmuştur.

3.3 Yöneten Parametrelerin Akış Rejimlerine Etkisi

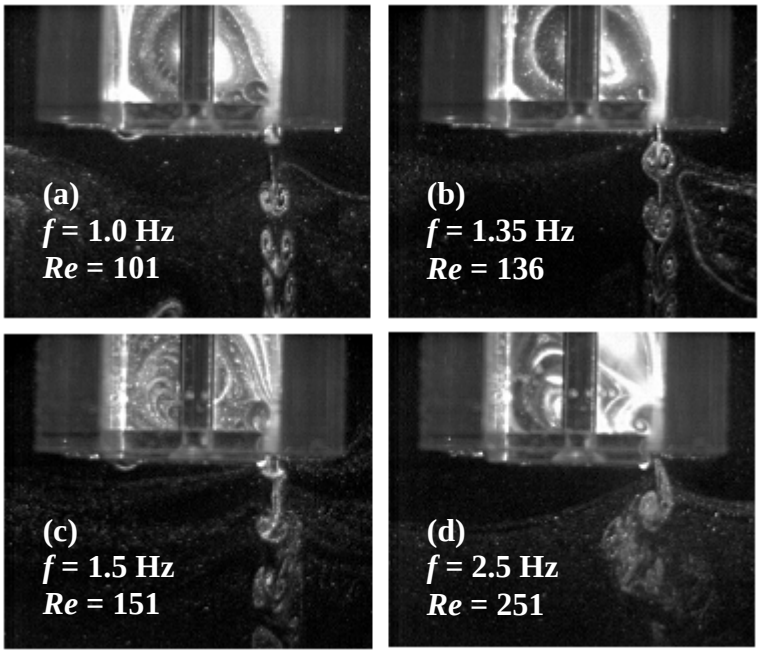
Bu bölümde durgun su ortamında çeşitli yöneten parametrelere göre değişen JaVA kaynaklı akış rejimlerinin genel bir tanıtımı yapılmıştır. Daha önce belirtildiği gibi JaVA kaynaklı akış rejimleri; açılı jetleri (sağa veya sola), plaka ile 90º açı yaparak çıkan serbest düşey jeti, plaka yüzeyine paralel gelişen cidar jeti, saat yönünde veya

ters saat yönünde dönen vorteksleri ve jet yapısında ancak daimi olmayan kaotik jetleri içerir.

3.3.1 Reynolds sayısı (*Re*) etkisi

Bölüm 3.1'de bahsedildiği üzere Reynolds sayısı, frekansa, genliğe ve plaka genişliğine bağlı olarak tanımlanmıştır. Reynolds sayısının akış üzerindeki etkisini araştırmak için *Re* ifadesinde plaka genişliği (b = 25 mm), kalınlığı (d = 5 mm) ve eksantrik disk genliği (a = 0.64 mm) sabit tutulmuş ancak frekans değiştirilmiştir ve ölçeklendirilmiş boyutsuz genlik S_a = 0.16'dır.

Bu şekilde Konum I'e göre, yani plakanın sıfır konumunda gövde dışına 2 mm taşması durumunda f = 1.0 Hz'de meydana gelen serbest düşey jetinin arttırılan frekans ile değişimi incelenmiş ve artan frekansla serbest düşey jetin daimi olmayan kaotik bir karakter aldığı gözlemlenmiştir (bkz. Şekil 3.7).



Şekil 3.7 : Frekansın akış üzerindeki etkisi; (a)-(b) serbest düşey jetler (c)-(d) kaotik düşey jetler.

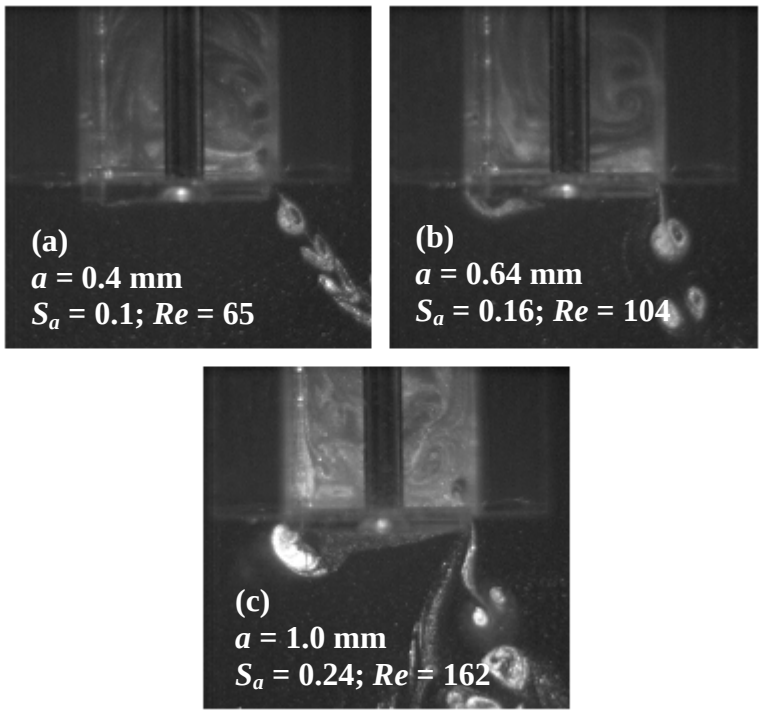
Şekil 3.7(a) ve (b)'de düşük frekanslarda seçilmiş anlık akış görüntülerinde vorteks çiftleri olarak pompalanan jet akışının, Şekil 3.7(c) ve (d)'de yüksek frekanslarda karmaşık ve kaotik bir karakter aldığını görülmektedir. Kısaca frekans dışında plaka konumu ve kalınlığı da dahil diğer bütün parametreler sabit tutulduğunda, akış kaotik bir karakter almaktadır.

Şekil 3.7(c) ve (d)'de görüldüğü gibi vorteks çiftlerinin kaviteden atım mesafesi ve akışın hızı belli oranda artmaktadır.

3.3.2 Boyutsuz genlik (S_a) etkisi

JaVA kaynaklı akış rejimleri üzerinde genliğin etkisini incelemek üzere plaka genişliği, çalışma frekansı ve plaka ortalama konumu sabit tutulmuş ve farklı genlikte diskler kullanılmıştır.

Düşük frekansta (f = 1.0 Hz), plaka genişliği b = 25.8 mm olan plaka (d = 3 mm) kullanılarak akış görüntüleme deneyleri yapılmıştır. Plaka ortalama konumu Şekil 3.8'den anlaşılacağı üzere Konum I'e göre ayarlanmıştır, dolayısıyla plaka hareketsiz konumunda JaVA gövdesinden taşmaktadır. Burada genlik hem S_a'ya hem Re'a etki etmektedir, dolayısıyla oluşan jete ait Re de değişecektir. Genliğin artması, plakanın biraz daha aşağıdan harekete başlaması anlamına geleceği için, genlik etkisinin araştırıldığı bu deneylerde plakanın hep aynı pozisyondan harekete başlaması için step motorun konumu ve hatta plaka kalınlığı da dikkate alınarak konum ayarlanmıştır.



Şekil 3.8 : Genliğin akış üzerindeki etkisi; (a) sağa açılı jet, (b)-(c) kaotik jetler.

Şekil 3.8(a)'da genliğin 0.4 mm olduğu durumda, sağa doğru açılı jet oluşmaktadır. Jet, vorteks çiftleri olarak geniş aralıktan çıkmaktadır; ancak plakanın en aşağıdaki

konumunda neredeyse tamamen gövde dışına taşması (2.5-2.8 mm), jetin yönünü belirlemektedir. Şekil 3.8(b)'deki gibi genliğin artması, jetin şiddetini de arttırmakta ve vorteks çiftlerinin birbirlerinden kopma ve dağılma sürecini hızlandırmaktadır. Nihayet Şekil 3.8(c)'de görüldüğü üzere genliğin 1 mm olması durumunda ise akış tamamen kaotik olmakta ve başlangıçtaki jeti oluşturan birbirlerine yakın ilerleyen vorteks yapıları şekillerini çabuk kaybeden fakat daha güçlü ve kaviteden daha uzağa atılan yapılar haline gelmektedir.

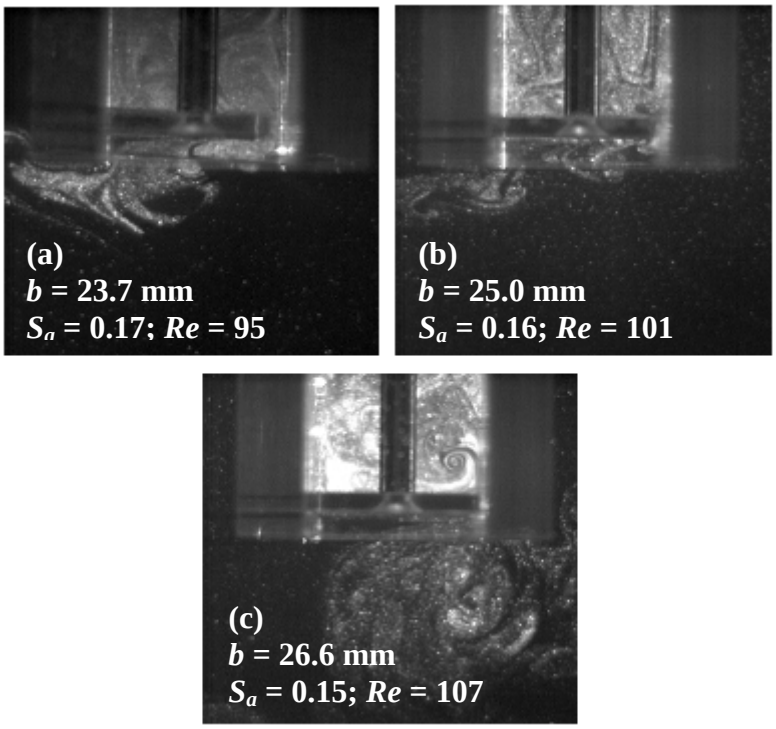
3.3.3 Boyutsuz geniş aralığın (g_w) etkisi

JaVA kaynaklı akış rejimleri üzerinde plaka ile gövde arasında kalan boşluğun (w_w) etkisini incelemek üzere farklı genişlikte plakalar denenmiştir (bkz. Çizelge 3.1). Geniş aralığı değiştirmenin tek yolu plaka genişliğini değiştirmektir, bu durumda g_w boyutsuz sayısı değişir, ancak plaka genişliğine bağlı olan diğer tüm boyutsuz parametreler de değişmektedir. Dolayısıyla Şekil 3.9'da gösterildiği gibi g_w etkisi araştırılıken, *Re* ve S_a'nın da akış üzerinde yarattığı farklılıkları gözönünde tutmak gerekir. Şekil 3.9'da aktüatör plakası pozisyonu Konum III'e göre ayarlanmıştır, yani sıfır konumunda tamamen kavite içerisinde kalmaktadır ve genlik 0.64 mm, çalışma frekansı 1 Hz'dir.

Şekil 3.9(a)'da görüldüğü üzere genişliği fazla olmayan plaka kullanıldığında zayıf ve ilerleme kabiliyeti yeterli olmayan bir cidar jeti oluşmaktadır. Bunun nedeni, genişliği az olan plakanın, yeterli momentum transferini sağlayacak nitelikte bir jetin meydana gelmesi için gerekli geniş aralık mesafesini oluşturamamasıdır. Bu durum Şekil 3.9(b)'de daha geniş bir plakanın kullanılması ile nispeten aşılmaktadır, hatta plakanın konumuna göre istenen özellikte bir cidar jeti meydana gelmektedir. Daha da geniş bir plaka ile JaVA kaynaklı akış rejimi jet akışından vorteks akışına dönüşmekte ve plaka altında saat yönünde oldukça büyük bir vorteks oluşmaktadır (bkz. Şekil 3.9(c)).

Akış görüntüleme deneylerinde JaVA akışlarının hemen hemen tamamı, geniş aralıktan çıkmakta, dar aralığın sabit tutulması nedeniyle plaka konumuna bağlı çok özel bir kaç durum haricinde dar aralıktan gövde dışına akış olmamaktadır.

Burada yapılacak genel bir çıkarım, plaka genişliğinin arttırılması veya geniş aralığın azaltılması ile akış rejiminin hızının artması sonucu vorteks oluşmasıdır.



Şekil 3.9 : Geniş aralığın akış üzerindeki etkisi; (a) zayıf cidar jeti, (b) cidar jeti, (c) vorteks.

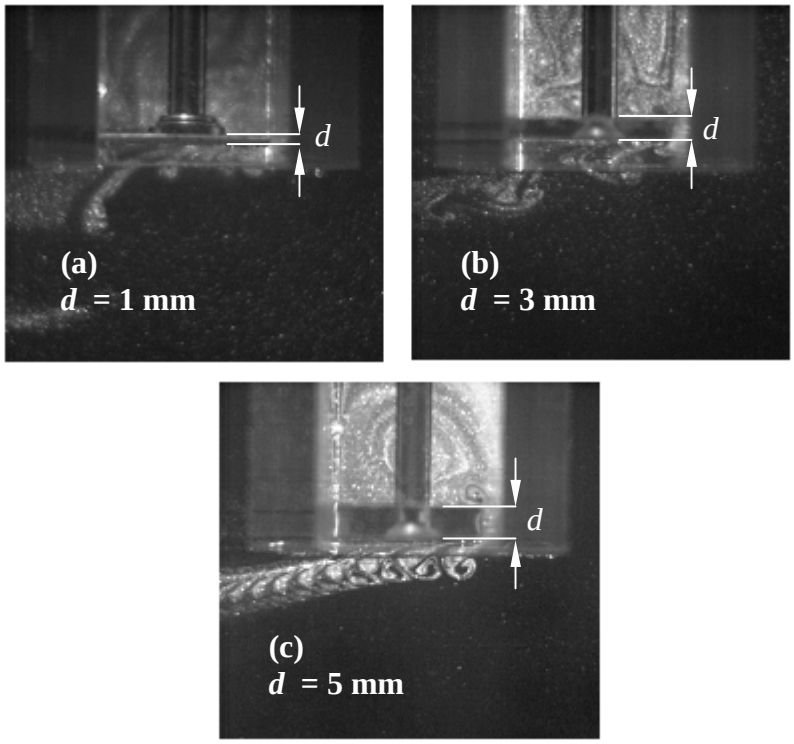
3.3.4 Plaka kalınlığının (*d*) etkisi

Jet ve vorteks aktüatörü ile ilgili daha önce yapılmış araştırmalarda hiç ele alınmamış bir konu aktüasyon için kullanılan plakanın kalınlığıdır. Akış görüntüleme deneylerinde plaka kalınlığı etkisi de ilave bir parametre olarak incelenmiş ve yöneten bütün diğer parametreler sabit kalmak üzere b = 25 mm için üretilmiş üç farklı kalınlıktaki plaka deneysel olarak test edilmiştir. Gözlemlenen sonuç, kalın bir plaka ile akış kararlılığı daha fazla, düzgün vortekslerden meydana gelen kuvvetli bir jet akışı oluşmasıdır. Bütün bu akış rejimlerinde Re = 101 ve S_a = 0.16 değerleri ortaktır, plaka sıfır pozisyonu Konum III'e göredir ve oluşan bütün rejimler cidar jetidir.

Şekil 3.10(a) ve (b)'de plaka kalınlığının yeterli olmaması sebebiyle aktüatör gövdesine emme-basma fazlarında etraftaki akışkandan yeterli besleme olmaması cidar jetlerinin kuvvetli olmamasına neden olmaktadır.

Şekil 3.10(c)'de görüldüğü gibi en kalın plakada ise en düzgün strüktürdeki cidar jeti doğmaktadır, bunun nedeni; emme ve basma fazlarında akışkanın kaviteye girmesi ve kaviteden çıkması esnasında plaka kalınlığının oluşacak vorteks çiflerinin olgunlaşmasında rol oynamasıdır. Her durumda bütün rejimlerde jet hızları birbirine

çok yakındır ancak sınır tabaka içerisinde çabuk dağılan ve nüfuz kabiliyeti zayıf jet akışları arzu edilmemektedir, dolayısıyla kalın plaka kullanımı genellikle tercih edilmiştir.



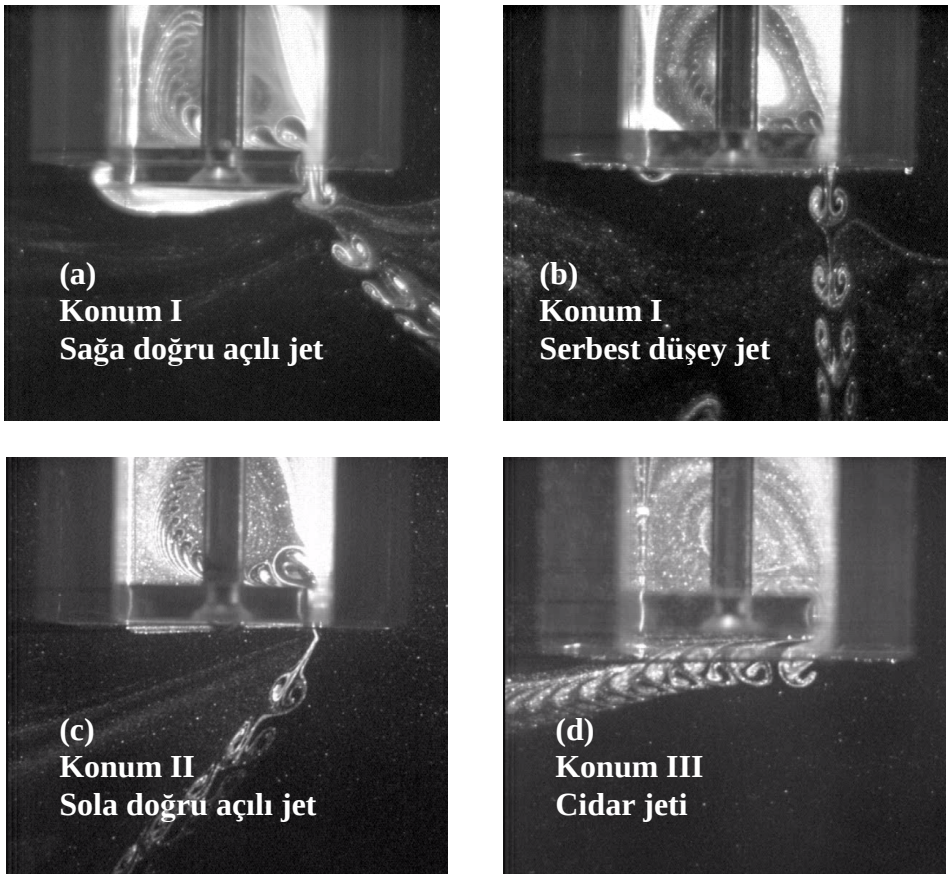
Şekil 3.10 : Plaka kalınlığının akış üzerindeki etkisi; (a) ince plaka, (b) orta kalınlıkta plaka, (c) kalın plaka.

3.3.5 Plaka konumunun etkisi

Şekil 3.6'da gösterilen aktüatör plakasının JaVA gövdesine göre belirlenen bağıl konumu, oluşan akış rejimlerini etkilemektedir. Plaka konumu dışında bütün diğer parametreler sabit tutulursa, Konum I'e göre plaka yaklaşık 3.0 mm dışarıda olduğu zaman harekete başladığı takdirde sağa doğru açılı jet ve yaklaşık 2.0 mm dışarıdayken serbest düşey jet oluşmaktadır. Plaka ve gövde aynı hizadayken harekete başlarsa, sola doğru açılı jet meydana gelir (Konum II). Plaka yaklaşık 2.0 mm gövde içerisine çekilirse plakaya paralel gelişen bir cidar jeti oluşmaktadır. Farklı plaka konumlarının değişik açılarda jet akışları oluşturması, sınır tabaka ayrılmasını geciktirmede farklı üstünlükleri olan akış rejimlerinin incelenmesini ilginç kılmaktadır. Bu bağlamda bu üç farklı plaka konumuna ait farklı akış rejimleri (a = 0.64 mm; b = 25 mm; f = 1 Hz; Re = 101; S_a = 0.16) ayrıntılarıyla incelenmiştir.

Şekil 3.11(a)-(b)-(c)-(d)'de sırasıyla sağa doğru açılı jet, serbest düşey jet, sola doğru açılı jet ve cidar jeti oluşmaktadır. Plaka kalınlığı d = 5 mm'dir.

Plaka konumuna bağlı olarak meydana gelen jetin açısı, aktüatörün sınır tabaka içerisindeki etkinliğini ve sınır tabakaya aktaracağı enerji ve momentum derecesini belli ölçüde etkileyecektir, zira daha ileride anlatılacağı üzere JaVA-sınır tabaka etkileşiminde plaka konumunun etkisi sınır tabaka hız profillerinin iyileştirilmesinde önemli rol oynamıştır.



Şekil 3.11 : Plaka ortalama konumlarının akış üzerindeki etkisi; (a) sağa açılı jet, (b) serbest düşey jet, (c) sola açılı jet, (d) cidar jeti.

3.3.6 Parametre etkileri hakkında genel çıkarımlar

Yöneten boyutsuz parametreler JaVA kaynaklı akışların fiziksel özelliklerini dolayısıyla sınır tabaka içerisindeki etkinliklerini önemli ölçüde değiştirmektedir. Reynolds sayısı, disk genliği (*a*), plaka genişliği (*b*) ve frekansa (*f*) bağlı olarak değişmektedir dolayısıyla, aynı plaka konumunda *a* ve *b* sabit tutularak frekansın değiştirilmesi suretiyle akış rejimleri üzerinde *Re* etkisi daha rahat irdelenmektedir. Bu bağlamda yüksek frekanslarda daimi olmayan jetler veya vorteksler oluşmaktadır.

Genliğin etkisini incelemek içinse, plaka genişliği, frekans ve plaka konumu sabit tutulmuştur. Boyutsuz ölçeklendirilmiş genlik arttığı zaman akış daimi ve düzgün jet akışından daha karmaşık ve kuvvetli bir jete dönüşmektedir ki, bu gelişme genliğin

akış üzerindeki etkisinin en az frekans kadar önemli olduğunu hatta sınır tabaka içerisinde yüksek genlik değerlerinde oluşan JaVA kaynaklı akışların daha etkin olacağını haber vermektedir.

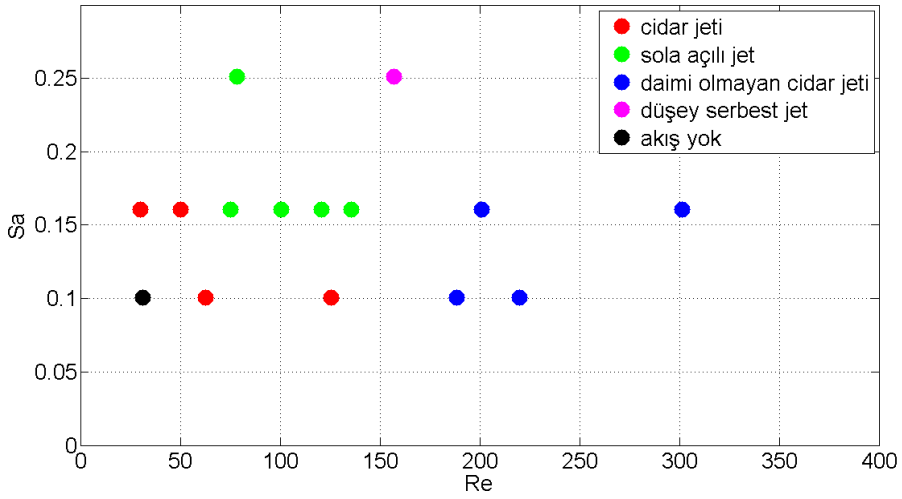
Geniş aralık etkisine bakılırken, plaka kalınlığı değiştirildiğinden bütün boyutsuz parametrelerin etkisinin gözönünde tutulması gerekir, dolayısıyla sadece g_w'nin akışı nasıl etkileyeceği hakkında birşey söylemek zordur, ancak genel kanı g_w'nin azalması ile akışın karmaşık yapıdaki vortekse dönüştüğü yönündedir.

İlave parametrelerden olan plaka kalınlığı arttırıldığında, aynı çalışma koşulları altında izlenen akış rejimlerinde, kalın plaka kullanılması halinde akışın düzgün ve istenilen özellikte olduğudur.

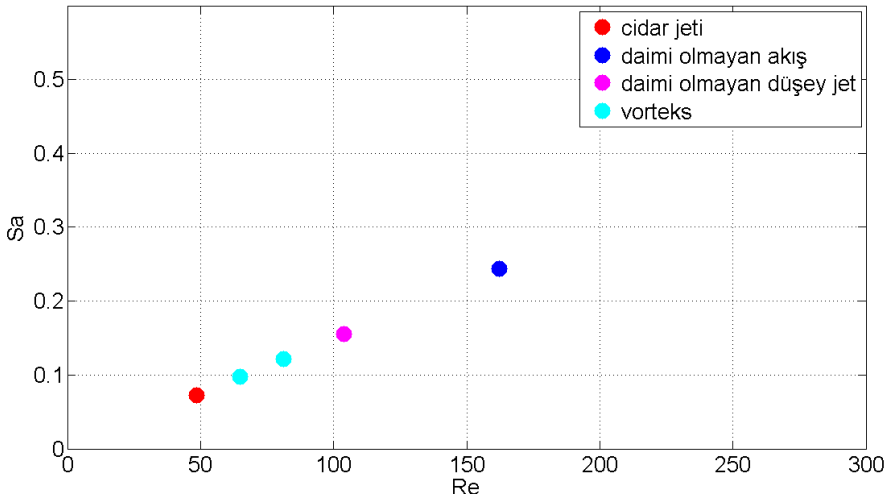
JaVA gövdesine göre tanımlanan plaka konumu ise aynı çalışma koşulları altında ele alınan akış tiplerine oldukça tesir etmekte ve oluşan jet akışlarının yönünü belirlemektedir. Bu nedenledir ki, sadece plaka konumunu değiştirerek istenen yönde jet akışı elde edilebilir.

Şekil 3.12'de farklı genlik ve frekanslarda 25 mm genişliğindeki plakanın kullanılması durumunda plaka ve gövdenin aynı hizada olduğu konumda (Konum II) oluşan akış rejimlerinin dağılımı verilmiştir. Akış tiplerinin S_a – Re uzayındaki genel dizilimi artan Reynolds sayısında sırasıyla cidar jeti, sola açılı jet ve daimi olmayan akıştır.

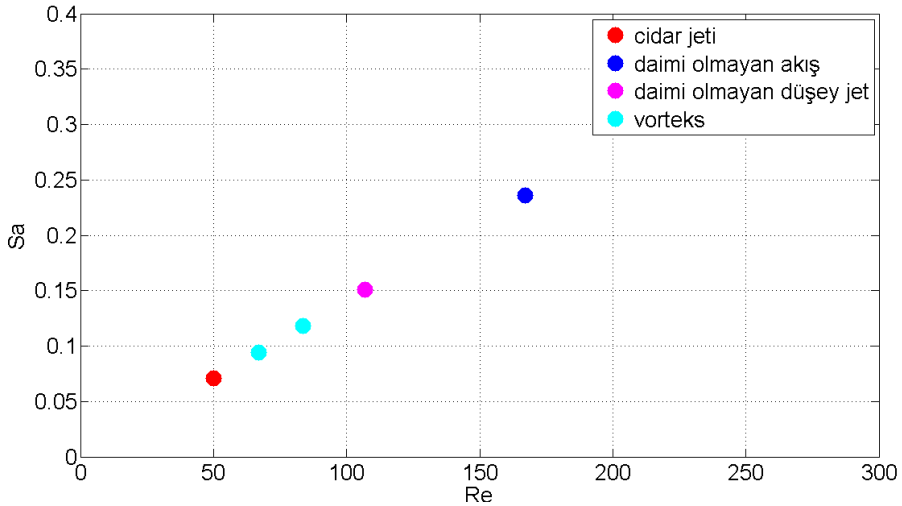
Şekil 3.13'de farklı genliklerde 25.8 mm genişliğindeki plakanın kullanılması durumunda plaka ve gövdenin aynı hizada olduğu konumda (Konum II), f = 1 Hz'lik çalışma frekansında oluşan akış rejimlerinin dağılımı verilmiştir. Akış tiplerinin S_a – Re uzayındaki genel dizilimi artan Reynolds sayısı ve boyutsuz ölçeklendirilmiş genlik değerlerinde sırasıyla cidar jeti, daimi olmayan akış ve vortekstir. Şekil 3.14'de benzer bir durum vardır, ancak plaka genişliği 26.6 mm'dir.



Şekil 3.12 : Genlik ve frekansın akış üzerindeki etkisi (*b* = 25 mm – Konum II).



Şekil 3.13 : Genliğin akış üzerindeki etkisi (*b* = 25.8 mm – Konum II).



Şekil 3.14 : Genliğin akış üzerindeki etkisi (*b* = 26.6 mm- Konum II).

3.4 Optik Akış Hesabı (OAH)

Optik akış hesabı yaklaşımı, akışın anlık dijital görüntülerinden bir başka ifadeyle gri-skaladaki değişim değerlerinden hız alanının elde edilmesi yöntemidir. Ancak dijital görüntüden tek bir bağımsız ölçüm değeri elde edilmesi ve hızın iki bileşeninin olması sebebiyle ikinci bir kısıt gerekmektedir. (Horn ve Schunk, 1981).

Akış görüntüleme ile, akışa ait belirli bir zaman dilimi içerisinde anlık bir görüntü seti elde oluşturulmuştur. Görüntüdeki renk tonları 0 ila 255 arasında sayısal değerlerle ifade edilir. Optik akış hesabı, dijital görüntüsü alınmış olan akış alanından sayısal hız dağılımının elde edilmesi olduğu için görüntü dizisinde, seçilen zaman dilimi içerisinde belirgin bir hareket gözlemlenmelidir. Bu bağlamda optik akış hesabı gri tonların değerlerindeki değişime bağlıdır. Optik akış hesabı, türev tabanlı yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Burkhardt, 1994). Gradyen tabanlı bu yaklaşımda sabit bir aydınlatma yoğunluğu ve hareket eden elemanların sabit parlaklığı olduğu kabül edilir. Görüntü yoğunluğu I , **(3.11)**'i sağlar. Burada u, hızın x yönündeki bileşeni, v ise y yönündeki bileşenidir.

$$I(x,y,t) = I(x+u\delta t, y+v\delta t, t+\delta t) \tag{3.11}$$

Bu denklemin sağ tarafı (x,y,t) noktası etrafında Taylor serisine açılırsa **(3.12)** elde edilir.

$$I(x,y,t) = I(x,y,z) + \delta x\frac{\partial I}{\partial x} + \delta y\frac{\partial I}{\partial y} + \delta t\frac{\partial I}{\partial t} + \varepsilon \tag{3.12}$$

Burada ε, ikinci ve daha yüksek mertebeden ihmal edilebilir terimleri içermektedir. δt zaman aralığının sıfıra yaklaştığı durumda **(3.12)**, yeniden düzenlenirse **(3.13)** halini alır:

$$\frac{dI}{dx}u + \frac{dI}{dy}v + \frac{dI}{dt} = 0 \tag{3.13}$$

Burada uzayda ve zamanda ayrıklaştırma yapılır. Lineer yaklaşımla problem iteratif olarak çözülmelidir. Daha önce belirtildiği gibi sistem görüntüdeki tek bir nokta için çözülemez dolayısıyla bazı kısıtların uygulanması gerekmektedir. Küçük bir alandaki hücre için komşu hücreleriyle arasında hızın sabit olduğu kabülü yapılır.

$$\begin{bmatrix} \frac{dI}{dx}(1,1) & \frac{dI}{dy}(1,1) \\ \frac{dI}{dx}(1,2) & \frac{dI}{dy}(1,2) \\ . & . \\ . & . \\ \frac{dI}{dx}(N_1,N_2) & \frac{dI}{dy}(N_1,N_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{dI}{dt}(1,1) \\ -\frac{dI}{dt}(1,2) \\ . \\ . \\ -\frac{dI}{dt}(N_1,N_2) \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.14)}$$

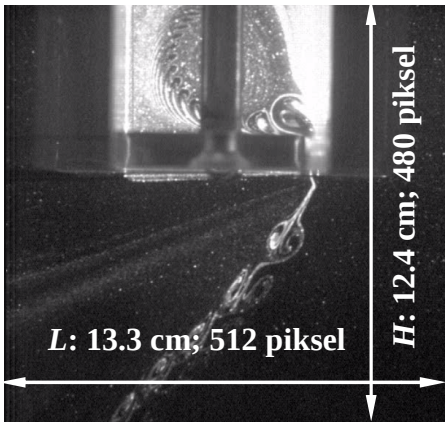
Yukarıdaki denklem takımı en küçük kareler yaklaşımı 'Pseudo Invers' yöntemiyle çözülür. t_i ve t_{i+1} zamanlarındaki birbirini takip eden görüntüden iki alt hız alanı elde edilir. Denklem **(3.14)**'de N_1 ve N_2 seçilen alt alanlar için iki konumsal doğrultudaki piksel sayısını ifade eder. Bu alt alanlarda bütün piksellerin aynı hıza sahip olduğu kabülü yapılır. Ancak dikkat edilmesi gereken husus, çok küçük bir alt alan seçildiyse düzgünleştirme etkisi de az olacak ve bu da parazitik etkiye (gürültü) neden olacaktır. Çok büyük bir alt alan seçildiyse de kötü bir ortalama alınacak ve bu da hızların birbirinden farklı olmaması anlamına gelecektir. (Lucas ve Kanade, 1981). Gradyenler için **(3.15)**'deki sonlu fark formülleri kullanılabilir. Akış görüntüleme sonuçlarından optik akış hesaplama yöntemi kullanılarak hız vektörleri elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} \left.\frac{\partial I}{\partial x}\right|_i &= \frac{1}{6h}\left\{I(x_{i-2},y_i,t_i) - 6I(x_{i-1},y_i,t_i) + 3I(x_i,y_i,t_i) + 2I(x_{i+1},y_i,t_i)\right\}\ i = 3,..,M-1 \\ \left.\frac{\partial I}{\partial x}\right|_1 &= \frac{1}{6h}\left\{-11I_1 + 18I_2 - 9I_3 + 2I_4\right\} \\ \left.\frac{\partial I}{\partial x}\right|_n &= \frac{1}{6h}\left\{11I_n - 18I_{n-1} + 9I_{n-2} - 2I_{n-3}\right\}. \end{aligned} \quad \textbf{(3.15)}$$

Optik akış hesabının pekçok uygulama alanı vardır. Gradyen tabanlı bir yaklaşım kullanarak kılcal damarlardaki kan akışında alyuvar hücrelerinin hızı modellenmiştir (Umetani ve diğ., 1989). Buna benzer şekilde bir aracın hareketini içeren görüntüler, konumsal filtreleme yöntemi ile gürültüden arındırılmış ve bu veri seti hız alanlarına ait değişimleri ortaya koymuştur (Latip ve diğ., 2002).

Bu tez çalışmasında akış görüntüleme ile elde edilen anlık görüntülere OAH uygulanırken kayıt esnasındaki toplam görüntü sayısı, kayıt hızı (*fps*) ve kaydedilen görüntünün çözünürlüğünü ifade eden piksel sayısı kullanılmaktadır. Uygulamanın rahat anlaşılması için Şekil 3.15'de sola doğru açılı jetin bir adet anlık görüntüsü

üzerinde açıklama yapılmıştır. Saniyede 30 kare almak üzere (30 *fps*) N = 500 adet anlık görüntü kaydedilmiştir ki bu yaklaşık 17 s'lik bir kayıt anlamına gelir, yani zaman adımı H_T = 1/30 olarak tesbit edilir. Bu görüntünün çözünürlüğünün N_X **x** N_Y (512**x**480) piksel olduğu bilindiğine göre, bu bilgi kayıt süresi esnasında, homojen aydınlatılan boya parçacığının x ve y yönlerinde ne kadar mesafe katettiğini bulmada kullanılabilir. Bunu gerçekçi bir şekilde hesaplayabilmek için, aktüatör plakasının gerçek genişlik veya kalınlık değeri; görüntü üzerindeki sayısal değerlerine oranlanarak, görüntüdeki H ve L uzunluklarının hangi gerçek değerlere tekabül ettiği bulunur. Bu değerler ile parçacığın x ve y doğrultusundaki adımları $H_X = H / N_X$ -1; $H_Y = H / N_Y$ -1 bulunmuştur. Zaman ve konum adımları (H_T , H_X , H_Y) **(3.15)**'de verilen denklemler ile görüntü sayısı (N) ve piksel sayılarına (N_X, N_Y) göre yapılandırılan bir döngü içerisinde kullanılarak OAH için gerekli gradyenler bulunur ve bu gradyenler **(3.14)**'de verilen denklem takımında kullanılarak x ve y yönündeki hız bileşenleri elde edilir.



Şekil 3.15 : Anlık akış görüntüsü üzerindeki yatay ve düşeyde piksel değerleri.

3.5 Kriging Yöntemi

Kriging jeo-istatistik alanında yaygın olarak kullanılan, mevcut bilinen değerler kullanılarak oluşturulan bir variogram yardımı ile bilinmeyen değerlerin en doğru bir şekilde tahmin etme yöntemidir. Bu yöntem ismini geliştiricisi olan Güney Afrikalı maden mühendisi Prof. Daniel G. Krige'den almaktadır (Krige, 1951). İlk olarak maden kaynaklarının daha doğru şekilde tespiti için kullanılmış olup bugün istatistik biliminin önemli bir aracı olmuştur. Son yıllarda ise akışkanlar dinamiği problemlerine de uygulanmaya başlamıştır (Venturi ve Karniadakis, 2004; Gunes ve Rist 2007). Kriging "optimal tahmin" ile eş anlamlı olup, mevcut noktalardaki

bilinen verilerin lineer kombinasyonu ile bilinmeyen noktalardaki değerleri tahmin etme yöntemidir (Journel ve Huijbregts, 1981). Bir çeşit yüksek mertebeden interpolasyon olan bu yöntemde, bilinmeyen nokta veya noktalardaki değerler diğer mevcut bütün noktalardaki verilere ve bu verilerin uzaklıklarına bir variogram ile bağlıdır ve bu ilişki mevcut noktaların istenilen nokta üzerindeki ağırlık katsayıları ile belirlenir.

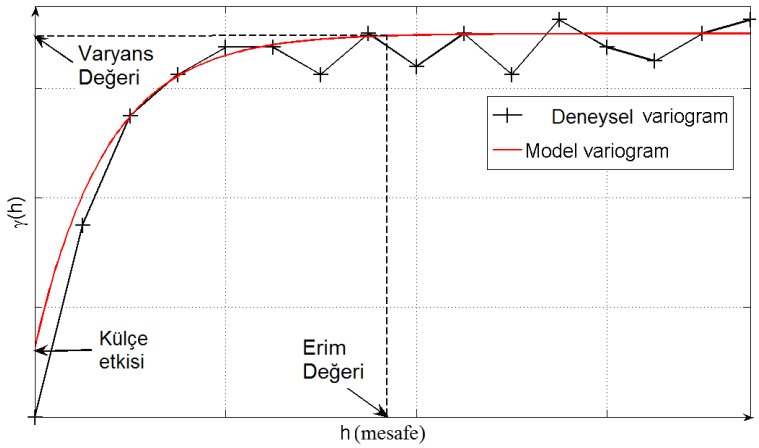
Kriging yönteminde mevcut veri setinden oluşturulan variogram çok önemli bir rol oynar. Variogram bir veri setinin konumsal sürekliliğinin veya düzensizliğinin veya değişiminin, sayısal bir ölçüsünü ifade eder ve **(3.16)** ile hesaplanır.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n}\sum_{i}^{n}\left(z_i - z_{i+h}\right)^2 \qquad \textbf{(3.16)}$$

Burada, z_i değişkenin "*i*" konumundaki değeridir, z_{i+h} değişkenin *i* konumundan *h* uzaklığındaki değeridir ve $\gamma(h)$ varyans değeri; aralıklı nokta çiftlerinin farklarının karelerinin ortalaması olup, *h* mesafe farkı için denklem **(3.16)** ile elde edilir ve bu işlem *h, 2h, 3h, 4h* gibi değişik uzaklıklar için devam eder. Sonuçta mevcut verilere uygun bir "deneysel variogram" elde edilir (bkz. Şekil 3.16). Daha sonra, bu deneysel variogram noktalarına uygun bir eğri uydurularak "model variogram" oluşturulur. Bu eğri lineer, çeşitli mertebeden polinomlar, ekponansiyel fonksiyon, Gauss fonksiyonu, kuvvet serileri, vb. gibi çeşitli model fonksiyonlardan oluşabilir. Hangi modelin seçileceği problemin fiziksel anlamına ve deneysel variogramın karakteristiğine göre belirlenir. Model variogram elde edildikten sonra mevcut verilerin birbirlerine bağlılığı ve istenilen yeni noktalar ve mevcut noktalar arasındaki konumsal bağımlılık belirlenebilir ve bu bağımlılıklardan faydalanılarak belirlenmek istenilen nokta üzerindeki her bir mevcut noktanın ağırlığı hesaplanabilir.

Variogramın belirlenmesi Kriging interpolasyonunun en önemli aşamasıdır, çünkü tahmin hatasına doğrudan etki eder. Şekil 3.16'de tipik deneysel ve buna uydurulmuş model variogram gösterilmiştir. Ayrıca, tipik bir variogramda görüldüğü gibi noktalar arasında herhangi bir korelasyonun olmadığı mesafeyi belirten erim değeri, bu değere karşılık gelen varyans değeri ile gürültü içeren verileri düzgünleştirme amacıyla kullanılan külçe etkisi gösterilmiştir. Çeşitli variogram modelleri ve bu modellerin Kriging modeline olan etkileri hakkında ayrıntılı bilgi için, (Davis, 2002;

Deutsch ve Journel, 1992; Isaak ve Srivastava, 1989; Gunes and Rist, 2007; Cekli, 2007) ve bu yayınlarda verilen kaynaklara başvurulabilir.

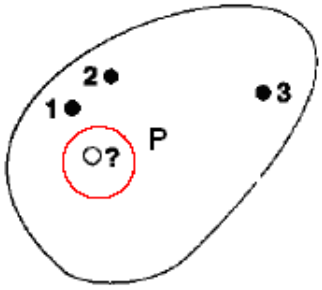


Şekil 3.16 : Deneysel ve model variogram ile bileşenleri (Çekli, 2007).

Kriging yönteminde, Şekil 3.17'de verilmiş olan tahmin edilmek istenen P noktasındaki fonksiyonun değeri $Y_{E,P}$, bilinen n adet noktadaki fonksiyonun değeri Y_i, ve P noktasının bu bilinen noktalara göre olan ağırlıklarını olan W_i'nin belirlenmesi suretiyle **(3.17)**'deki gibi hesaplanır.

$$Y_{E,P} = \sum_{i=1}^{n} W_i Y_i \qquad \textbf{(3.17)}$$

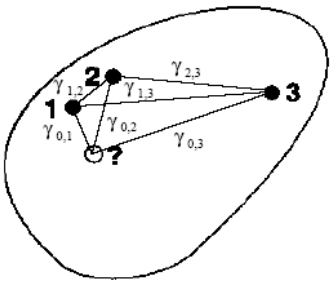
Tahminin doğruluğu ve yapılan hata, ağırlık katsayılarının belirlenme yöntemine bağlıdır. Minimum hata için Kriging optimum ağırlıkları verir. Optimum ağırlıklar yansız tahmin ve minimum hata üretirler ve **(3.18)**'de verilen bir dizi denklem sisteminin çözülmesi ile elde edilirler. Kriging yöntemine göre bu ağırlıklar (W_1 , W_2 ,…,W_n) **(3.18)**'deki denklem sistemini sağlarlar.



Şekil 3.17 : P noktasındaki bilinmeyen değerin Kriging yöntemiyle tahmin edilmesi (Çekli, 2007).

$$
\begin{aligned}
&W_1\gamma(h_{11})+W_2\gamma(h_{12})+...+W_n\gamma(h_{1n})=\gamma(h_{1P})\\
&W_1\gamma(h_{21})+W_2\gamma(h_{22})+...+W_n\gamma(h_{2n})=\gamma(h_{2P})\\
&\quad:\qquad\quad:\qquad\quad:\qquad\quad:\\
&W_1\gamma(h_{n1})+W_2\gamma(h_{n2})+...+W_n\gamma(h_{nn})=\gamma(h_{nP})
\end{aligned}
\qquad \textbf{(3.18)}
$$

Burada $\gamma(h_{ij})$ i ve j noktaları arasındaki uzaklığa bağlı varyansın değeridir. $h_{ij} = h_{ji}$ olduğundan sol taraftaki katsayılar matrisi simetrik olup köşegen terimleri sıfırdır. Varyans değerleri deneysel variograma uygun olarak seçilen variogram modelinden belirlenir. Bunun için öncelikle mevcut noktalardaki değerlerden konumsal bağımlılığın ölçüsünü ifade eden deneysel variogram belirlenir. Varyans hesabı Şekil 3.18'de gösterilmiştir.



Şekil 3.18 : Varyans hesabının şematik gösterimi -bkz. denklem 3.16 (Çekli, 2007).

Çok çeşitli Kriging uygulaması mevcut olup, en çok tercih edilen doğal Kriging (ordinary Kriging) uygulamasında, ağırlık katsayılarının toplamının 1'e eşit olması şartı aranır **(3.19)**.

$$
\sum_{i=1}^{n} W_i = 1 \qquad \textbf{(3.19)}
$$

Bununla beraber minimum tahmin hatasını sağlamak için Langrange Çarpanı (λ) adı verilen yeni bir değişkene ihtiyaç vardır. Sonuç olarak, ağırlık katsayılarını veren lineer denklem sistemi açık olarak aşağıdaki **(3.20)**'deki gibi ifade edilir.

$$
\begin{aligned}
&W_1\gamma(h_{11})+W_2\gamma(h_{12})+...+W_n\gamma(h_{1n})+\lambda=\gamma(h_{1P})\\
&W_1\gamma(h_{21})+W_2\gamma(h_{22})+...+W_n\gamma(h_{2n})+\lambda=\gamma(h_{2P})\\
&W_1\gamma(h_{n1})+W_2\gamma(h_{n2})+...+W_n\gamma(h_{nn})+\lambda=\gamma(h_{nP})\\
&W_1+W_2+...+W_n=1
\end{aligned}
\qquad \textbf{(3.20)}
$$

(3.20)'deki denklem sistemi **(3.21)**'deki gibi matris formunda yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \gamma(h_{11}) & \gamma(h_{12}) & \dots & \gamma(h_{1n}) & 1 \\ \gamma(h_{21}) & \gamma(h_{22}) & \dots & \gamma(h_{2n}) & 1 \\ : & : & \dots & : & : \\ \gamma(h_{n1}) & \gamma(h_{n2}) & \dots & \gamma(h_{nn}) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ : \\ W_n \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(h_{1P}) \\ \gamma(h_{2P}) \\ : \\ \gamma(h_{nP}) \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow [A].[W] = [B] \qquad \textbf{(3.21)}$$

(3.21)'de verilen *A* ve *B* matrisindeki değerler model variogram yardımıyla hesaplanır. **(3.21)**'in çözümünde, sayısal hesaplama açısından dikkat edilecek önemli hususlardan biri, *A* matrisinin boyutunun mevcut veri sayısına bağlı olduğu (tahmin edilmesi istenen noktadan bağımsız olduğu), *B* matrisinin ise hem mevcut hem de tahmin edilmesi istenen noktaya bağlı olduğudur. Dolayısıyla, *A* matrisi üzerinde bir defa LU ayrımı (triangular decomposition-üçgenlere ayırma) yönteminin uygulanması ile en fazla hesaplama zamanı gerektiren bu ayırma işlemi tahmin edilecek nokta sayısından bağımsız olarak yalnızca bir defa uygulanır. Daha sonra her bir nokta için tahmin değeri, L ve U matrisi ve "Geriye Yerleştirme Algoritması" kullanılarak her bir nokta için ağırlık katsayıları etkin ve hızlı bir şekilde hesaplanabilir. Ağırlık katsayıları, W_i belirlendikten sonra veri alanı içerisindeki istenilen bir nokta için tahmin **(3.17)** kullanılarak kolayca yapılabilir.

Kriging yönteminin diğer interpolasyon yöntemlerine göre önemli bir avantajı, yapılan tahminin hata aralığını da vermesidir. Genel olarak, P noktası için tahmin edilen $Y_{E,P}$ değeri bu noktanın gerçek değeri olan $Y_{A,P}$ değerinden farklı olup tahmin hatası **(3.22)**'deki gibi ifade edilebilir.

$$\varepsilon_P = \left(Y_{E,P} - Y_{A,P}\right) \qquad \textbf{(3.22)}$$

Tahmin varyansı ise **(3.23)**'deki gibi belirlenebilir.

$$s_e^2 = W_1\gamma(h_{1P}) + W_2\gamma(h_{2P}) + \dots + W_n\gamma(h_{nP}) \qquad \textbf{(3.23)}$$

Tahmin varyansının karekökü, tahmin standart hatası olarak **(3.24)**'deki gibi ifade edilir.

$$s_e = \sqrt{s_e^2} \qquad \textbf{(3.24)}$$

Kriging yönteminin en belirgin avantajları, tahmin varyansının minimum olması, tahminlerinin yansız olması ve tahminler için bir hata değeri belirlenebilmesidir. Kriging bir BLUE (Best Linear Unbiased Estimator) yöntemdir. Kriging doğrusaldır çünkü tahmini değerler belirli değerlerin lineer kombinasyonu ile ağırlıklaştırılmıştır. (Davis, 2002; Deutsch ve Journel,1992).

Akış alanlarının interpole edilmesi çok çeşitli alanlarda gerekli olmaktadır. Örneğin meteorolojide konumları rastgele seçilmiş rüzgar gözlemlerinden vortisite hesabını doğrudan yapan bir interpolasyon yaklaşımı geliştirilmiştir (Schaefer ve diğ., 1979).

Gürültü içeren sistemlere Kriging tabanlı yaklaşımların uygulanmasındaki güçlükler nedeniyle tam olmayan veri setine uygulanabilecek bir Kriging optimizasyonu geliştirilmiş ve gürültü etkisinin azaltıldığı verimli sonuçlar elde edilmiştir (Sakata ve diğ., 2007).

Gauss eliminasyon algoritması kullanılarak Kriging interpolasyon denklemlerinde yeralan ağırlıklar **(3.18-3.20)** hızlı bir şekilde çözülebilir. Bu ağırlıkların normalde yavaş çözülebilmesi nedeniyle kovaryans matrisindeki modifikasyonlarla Gauss eliminasyon algoritması iyileştirilmiş ve daha verimli hızlı çalışan bir sistem oluşturulmuştur (Carr, 1990).

Ampirik ortogonal fonksiyonlar Kriging ile birleştirilerek, lineer ağırlıklandırmalı Kriging yerine kullanılabilecek bir meta-algoritma geliştirilmiş ve bilinmeyen bölgelerin tahmininde faydalanılmıştır (Hisdal ve diğ., 1992).

Kara kutu olarak tabir edilen bilinmeyen bölgelerin tahmini ve global optimizasyonu için geliştirilen Kriging meta-modeli, global optimal sonuçların bulunmasında mükemmel bir verim ve üstünlük sağlamıştır (Huang ve diğ., 2006).

Sayısal verilerden yola çıkarak tasarlanan Kriging meta-modelleri, fonksiyonların yapısal analizinde verimli bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bağlamda tasarım ile ilgili bilginin hazır olduğu durumlarda sonlu elemanlar yöntemi ile birleştirilmiş Kriging meta-modeller kullanılmıştır (Rijpkema ve diğ., 2002).

Kriging yöntemi, deneysel olarak elde edilen akış bilgilerindeki hataların giderilmesi, deneysel verilerin çözünürlüğünün arttırılması, kayıp verilerin en uygun şekilde tahmini gibi amaçlarla kullanılmaktadır (Gunes ve Rist, 2007). Kriging yöntemi farklı korelasyon fonksiyonlarını kullanır. Bunlardan belli başlıları Gauss, üstel, küresel ve kübik korelasyon modelleridir. Fiziksel modelin anlamına ve

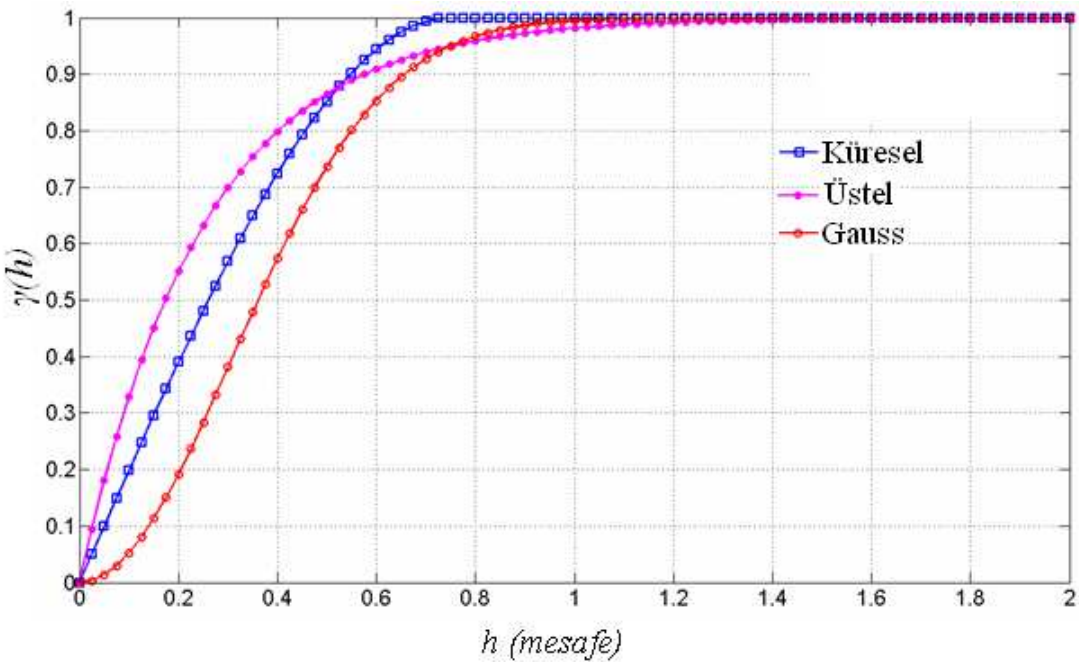
gereksinimlerine uygun olarak seçilen düzgünleştirme faktörleriyle (θ) gürültü içeren akış alanları iyileştirilebilir, veya boşluk içeren akış ve vortisite alanları gerçeğe uygun bir şekilde doldurulabilir. Denklem **(3.25)**'de verilen korelasyon modellerinde h mesafeyi, $\gamma(h)$ varyansı ve q varyansın mesafe ile değişiminin sona erdiği erim noktasının koordinat sisteminde orijine olan uzaklığıdır, θ ise düzgünleştirme katsayısıdır. (bkz. Şekil 3.16). Bu korelasyon modelleri Şekil 3.19'daki variogram modelinde özetlenmiştir.

$$\gamma_{GAUSS}(h) = 1 - e^{-\theta\left(\frac{h}{q}\right)^2}$$

$$\gamma_{ÜSTEL}(h) = 1 - e^{-\theta\left(\frac{h}{q}\right)}$$

$$\gamma_{KÜRESEL}(h) = 1.5\left(\frac{h}{q}\right) - 0.5\left(\frac{h}{q}\right)^3 \quad ; h < q \; ; \frac{h}{q} = min\left(1; \frac{h}{q}\theta\right) \qquad \textbf{(3.25)}$$

$$\gamma_{KÜBİK}(h) = 3.0\left(\frac{h}{q}\right)^2 - 2.0\left(\frac{h}{q}\right)^3 \quad ; \frac{h}{q} = min\left(1; \frac{h}{q}\theta\right)$$



Şekil 3.19 : Kriging için korelasyon fonksiyonları -bkz. denklem 3.25 (Çekli, 2007).

Şekil 3.19'dan anlaşılacağı üzere Gauss korelasyonu eğrisi, orijin yakınında yatay eksene teğet geçerken, genel olarak parabolik bir karakter sergiler. Üstel ve küresel korelasyon eğrileri orijin yakınında doğrusaldır ancak kısa mesafelerde kararsızdır.

3.5.1 Hız ve vortisite alanlarının Kriging ile çözünürlüğünün arttırılması ve düzgünleştirilmesi

Florasan boya çözeltisi ve hızlı kamera kullanılarak Bölüm 3.3'de belirtilen akış rejimleri, akış görüntüleme deneylerinde dijital olarak kaydedilmiş ve görüntüler Bölüm 3.4'de anlatılan optik akış hesabı (OAH) adı verilen türev tabanlı sayısal yaklaşımla işlenerek hız ve vortisite alanları oluşturulmuştur.

Lachowicz ve diğ., (1999) tarafından elde edilen bütün akış rejimleri deneysel olarak görüntülenmiştir. Deney sonuçları daha detaylı olup sayısal analiz için gerekli olan anlık hız alanlarını vermektedir. OAH ile oluşturulan hız büyüklükleri, farklı akış rejimlerinin oluşumunda etkili olan akış alanlarını daha anlaşılır bir şekilde ortaya koymuş ve farklı çalışma koşullarının karşılaştırılmasında etkin bir rol oynamıştır.

Dijital görüntülerden OAH ile x ve y doğrultusundaki hız bileşenleri bulunduktan sonra hem hız alanının hem de vortisite alanının çözünürlüğünü arttırmak için, yüksek mertebeden bir interpolasyon yöntemi olan Kriging interpolasyonu kullanılmıştır. Aynı zamanda Kriging yöntemi ile uygun düzgünleştirme faktörleri seçilerek çözünürlüğü arttırılmış hesaplama ağında vortisite değerleri düzgünleştirilip daha hassas sonuçlar elde edilmiştir.

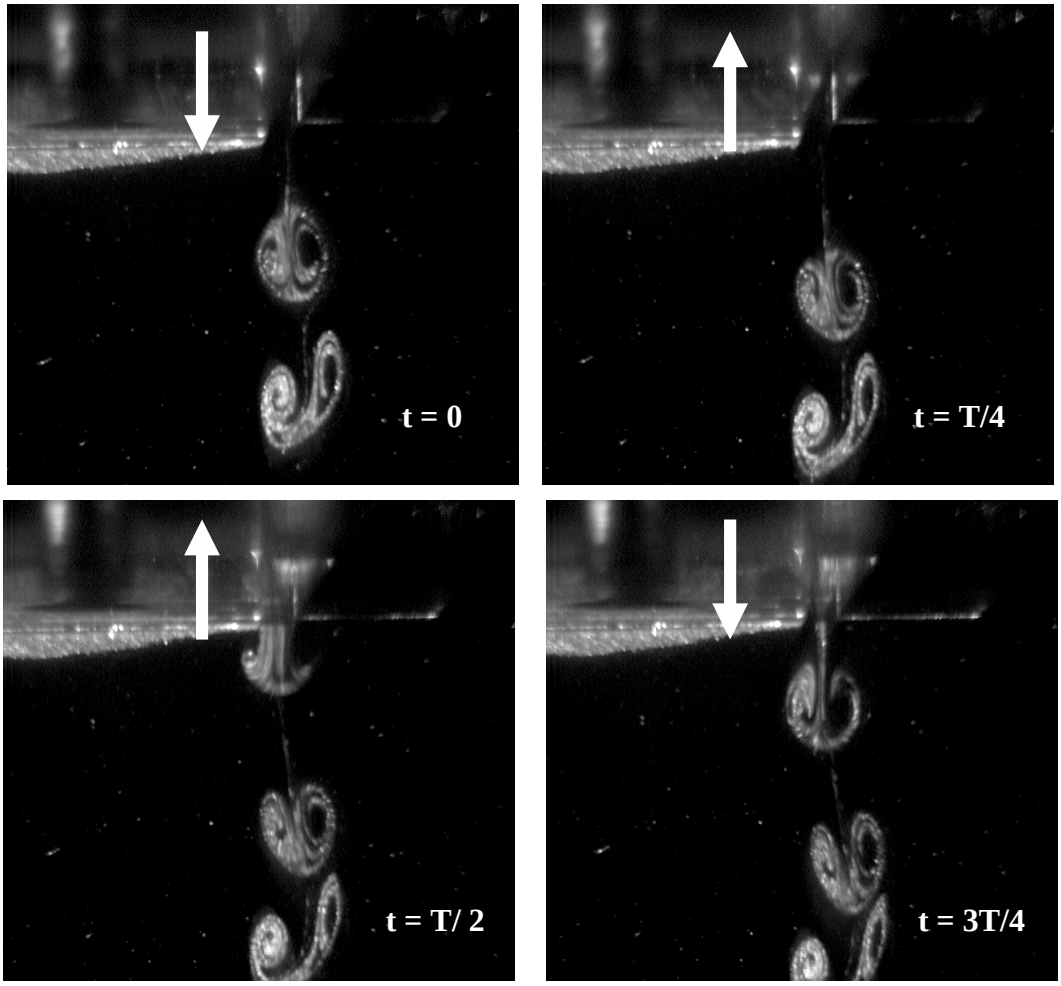
Bu bağlamda Şekil 3.20'de verilen yakından çekilmiş serbest düşey jete ait akış görüntüleme deneyleri OAH ile işlenerek akış ve vortisite alanları çıkarılmıştır. Akış alanında x ve y doğrultusundaki hız bileşenlerinden hız büyüklüğü (V-magnitüdü) **(3.26)** ile bulunmuş ve vortisite (ω_z) **(3.27)** ile hesaplanmıştır.

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \qquad \textbf{(3.26)}$$

$$\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \qquad \textbf{(3.27)}$$

Şekil 3.20'de verilmiş düşey jet, a = 0.64 mm, b = 25 mm (d = 5 mm), f = 1 Hz ve Konum I parametre kombinasyonunda oluşmuştur (bkz. Şekil 3.7). Plaka üzerinde gösterilen oklar plakanın bir tam periyot içerisinde (T) o andaki hareket yönünü göstermektedir. Buna göre, ilk görüntüde t = 0 anında aktüatör plakası aşağı doğru hareket etmekte yani emme hareketi yaparak akışkan JaVA içerisine girmektedir. Bir sonraki görüntüde ise, plaka aşağı doğru hareketini tamamlamış ve yukarı doğru hareketine başlamış olarak görülmektedir. Basma hareketi olarak adlandıracağımız

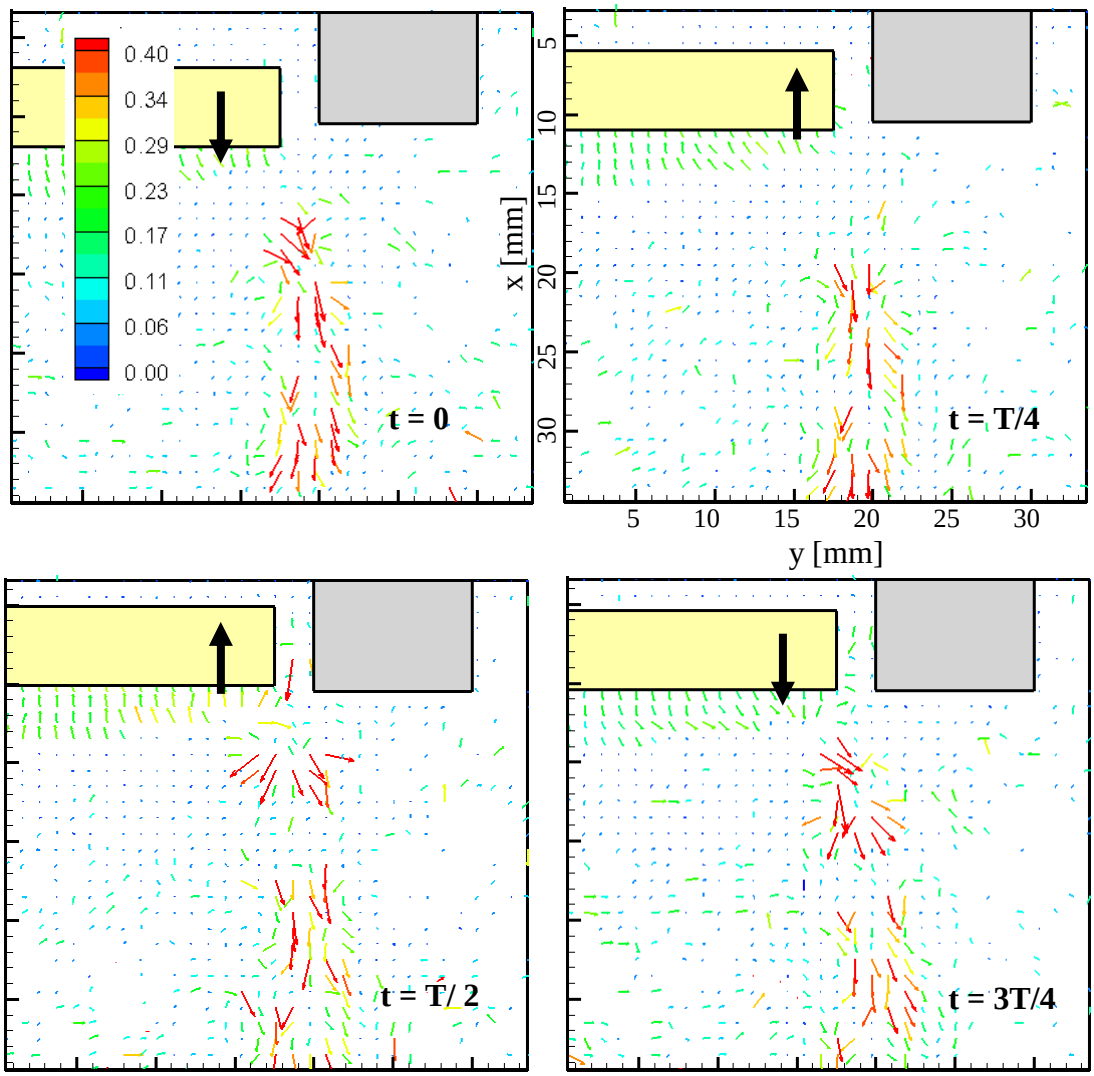
bu hareket bir sonraki görüntüde de devam etmekte, bu görüntüde akışkan bir jet oluşturup geniş aralıktan hızla çıkmak üzereyken görülmektedir. Basma hareketi tamamlandığında iki yana doğru vorteks oluşturmuş bir şekilde çıkan akışkan kütlesi ilerlemiş olup, tekrar son görüntüde emme hareketi başlamış olarak görülmektedir. Akış bundan sonra periyodik olarak hareketine devam etmektedir (Güneş ve diğ., 2008 C).



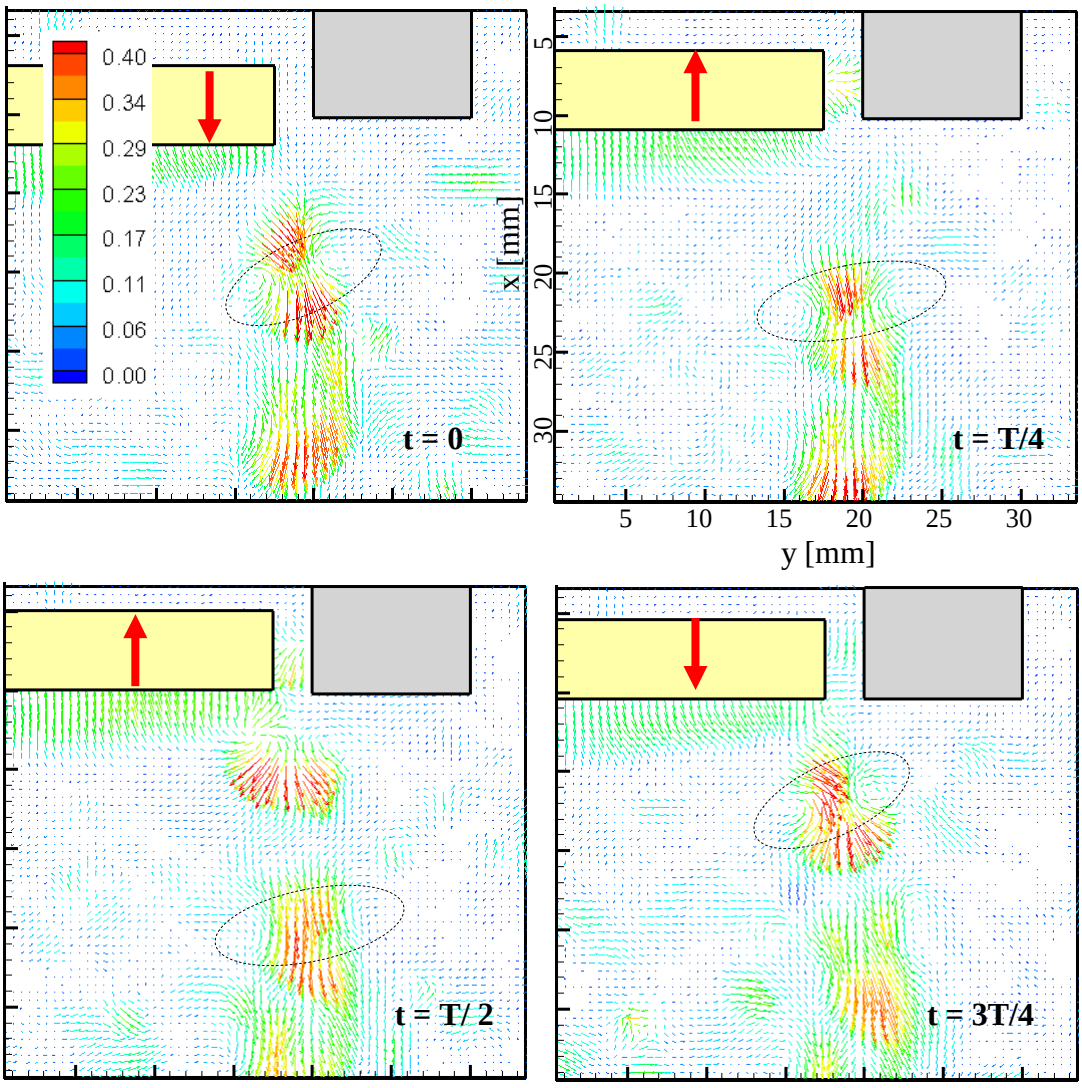
Şekil 3.20 : Düşey jetin bir periyotluk anlık görüntüleri (Güneş ve diğ., 2008 C).

Şekil 3.21'de ise, Şekil 3.20'de verilen anlık görüntülere ait anlık optik hız alanları verilmiştir. Optik akış hesabında, 30 fps kayıt hızıyla kaydedilen 512**x**480 piksel içeren 546 adet görüntü için 32**x**32'lik hesaplama ağı kullanılmıştır. Elde edilen hız vektörlerinden aktüatör plakası emme ve basma hareketleri açık olarak görülmekte olup, akışa enjekte edilen özel kırmızı boya ile jet oluşumu ve bunun etrafında akış görüntülerinde "mantar" şeklinde ortaya çıkan vorteks yapıları seçilebilmektedir. Bununla beraber, optik akış alanında, gerek 512**x**480 piksel olan akış görüntüleme çözünürlüğün yeterli olmaması gerekse de optik akış hesabı sırasında ortaya çıkan

sayısal hatalar dolayısıyla, Şekil 3.21'de gösterilen hız alanları gürültü içermekte olup, jet ve vorteks yapıları net olarak gözükmemektedir. Bu kapsamda, Bölüm 3.5'de anlatılan Kriging yöntemi uygulanarak Şekil 3.21'de verilen vektör alanlarının çözünürlüğü arttırılmış (64**x**64'lık hesaplama ağı) ve veriler üzerinde düzgünleştirme işlemi yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 3.22'da verilmiş olup, bir önceki şekil ile karşılaştırma yapıldığında oluşan jet ve elips içine alınmış vorteks çiftleri net bir şekilde ortaya çıkmıştır. Ayrıca, düzgünleştirilmiş ve çözünürlüğü arttırılmış akış alanında oluşan jetin zamana bağlı hareketinin takibi de çok daha kolay ve doğru olarak yapılabilmektedir. Dolayısıyla, Kriging yönteminin özellikle düşük çözünürlüklü ve gürültü-hata içeren veriler için çok kullanışlı bir yöntem olduğu da bir kez daha teyit edilmiştir.

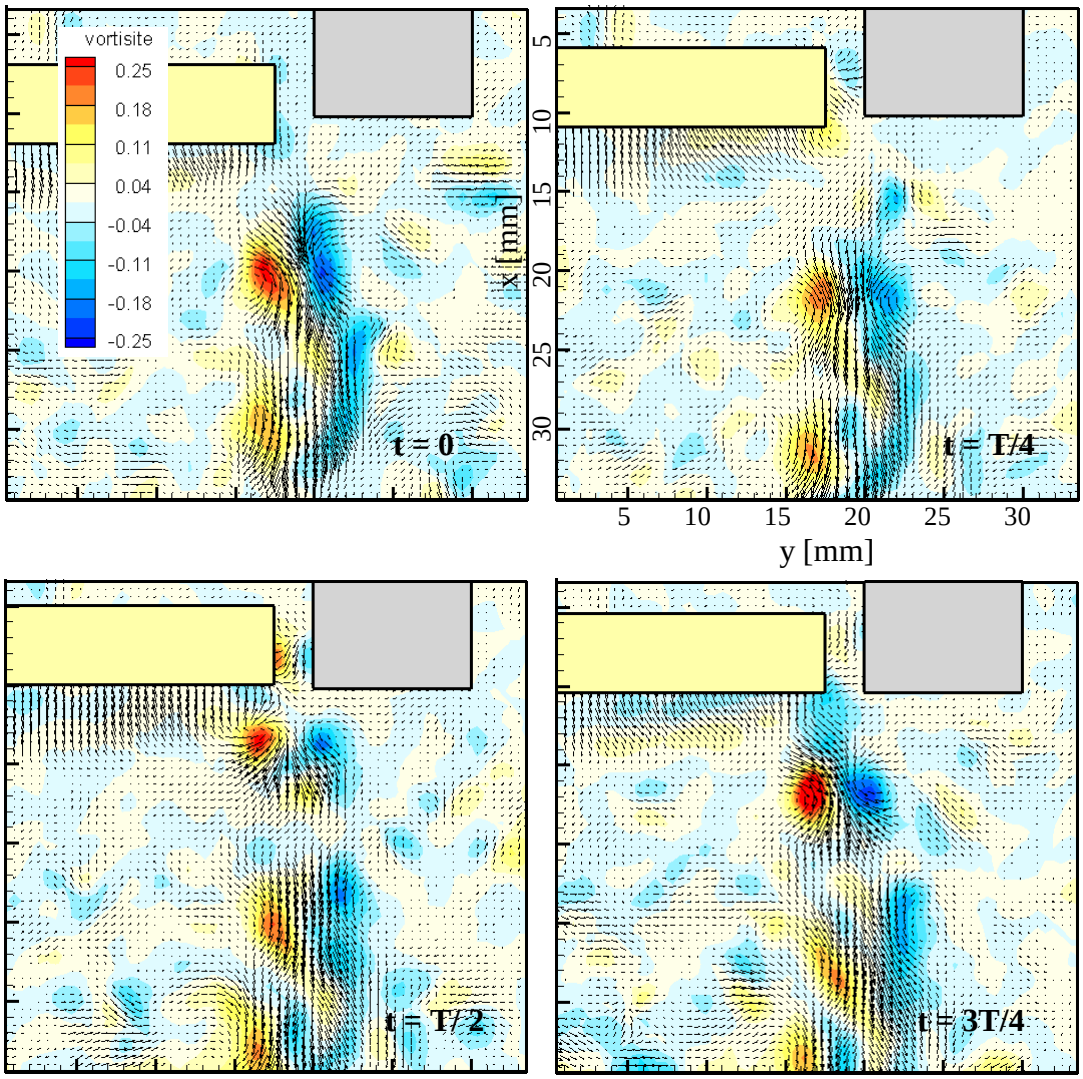


Şekil 3.21 : Düşey jetin bir periyoduna ait optik akış alanı; kontürler hız büyüklüğünü vermektedir [cm/s] (Güneş ve diğ., 2008 C).



Şekil 3.22 : Düşey jetin optik akış alanlarının Kriging ile çözünürlüğünün arttırılması ve düzgünleştirilmesi [cm/s] (Güneş ve diğ., 2008 C).

Düşey serbest jet akışına ait (akış iki boyutlu olduğu için skaler bir büyüklük olan) vortisite alanı hesaplanmış **(3.27)** ve Şekil 3.23'de gösterilmiştir. Yine hesaplamalar sonucunda ortaya çıkan vortisite alanı Kriging yöntemi ile düzgünleştirilmiştir. Şekil 3.23'de gösterilen vortisite alanında, jet çıkışında kuvvetli ve birbirine zıt yönde olan iki vorteks yapısının oluştuğu ve bu yapının bir periyot içerisinde zamanla aşağı akım yönünde şiddetini azaltarak ilerlediği görülmektedir. Dolayısıyla, düşey jet akışının aşağı akım yönündeki etkisi, gittikçe zayıflamakla beraber durgun akışkan halinde oldukça fazla (plaka genişliğinin birkaç katı) olduğu görülmüştür.



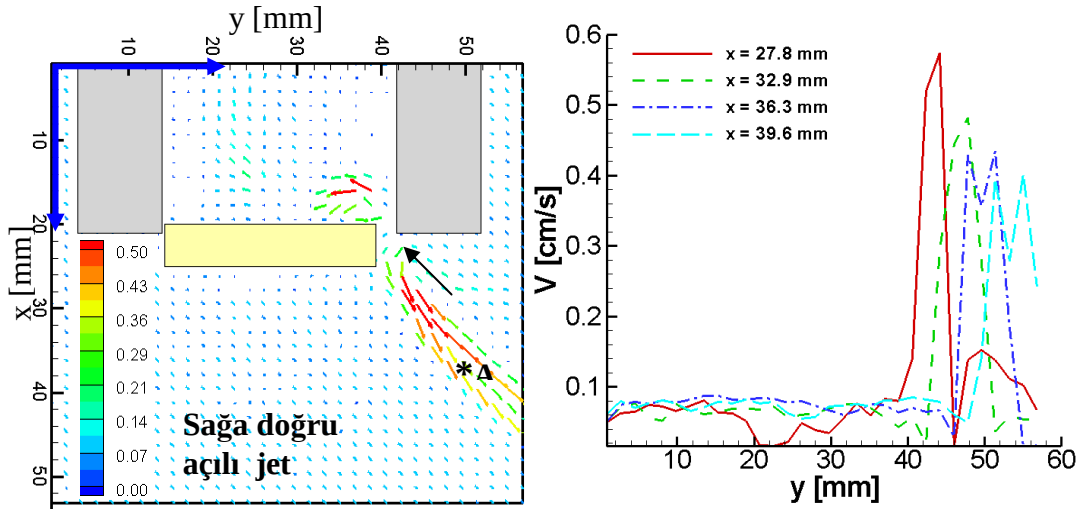
Şekil 3.23 : Düşey jetin bir periyoduna ait vortisite alanı (Güneş ve diğ., 2008 C).

3.6 Açılı Jet Rejimlerinin Ortalama Optik Akış Alanları

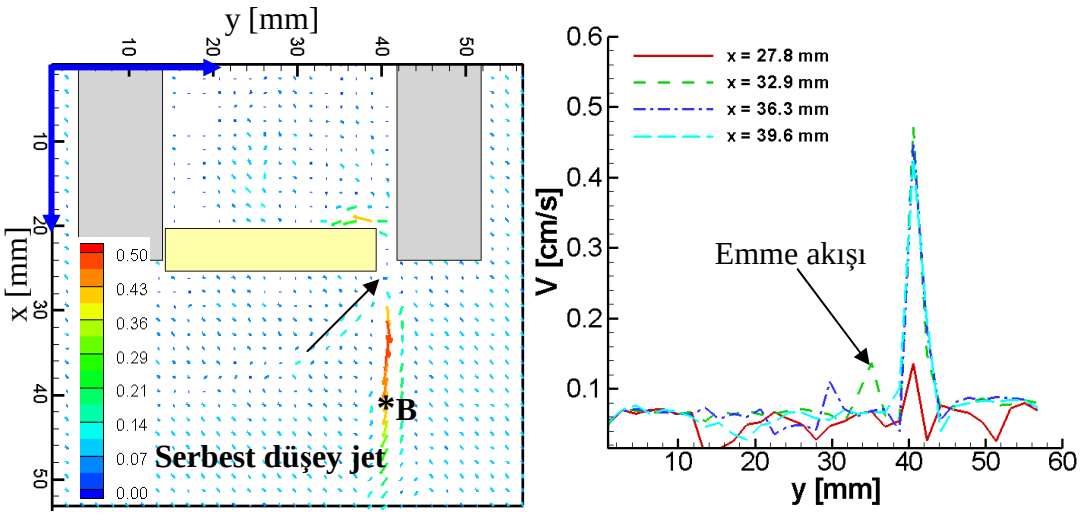
Bölüm 3.3.5'de aktüatör plaka konumuna göre farklılık gösteren akış rejimlerinin (Re = 101; S_a = 0.16) akış görüntüleme sonuçları kullanılarak OAH ile bir periyot içerisinde yeralan optik akış alanları elde edilmiş ve kayıt hızına bağlı olarak her akış rejimi için zaman ortalamalı akış alanı hesaplanmıştır. Akış alanları Kriging ile uygun parametreler kullanılarak düzgünleştirilmiştir. Elde edilen ortalama akış alanlarından istenen kesitlerde hız dağılımı bulunmuştur.

JaVA gövdesi içerisine boya enjekte edildiğinden plakanın basma hareketinde oluşan jet akışları net bir şekilde ortaya çıkmakla beraber, JaVA bir sıfır-net kütle debili sistem olduğundan, emme hareketi süresince de (yarım periyot) JaVA içerisine akışkan girişi olmaktadır. Bu girişler Şekil 3.24, 3.25, 3.26 ve 3.27 üzerinde oklar ile gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar durgun akışkan içerisinde geçerli olmasına

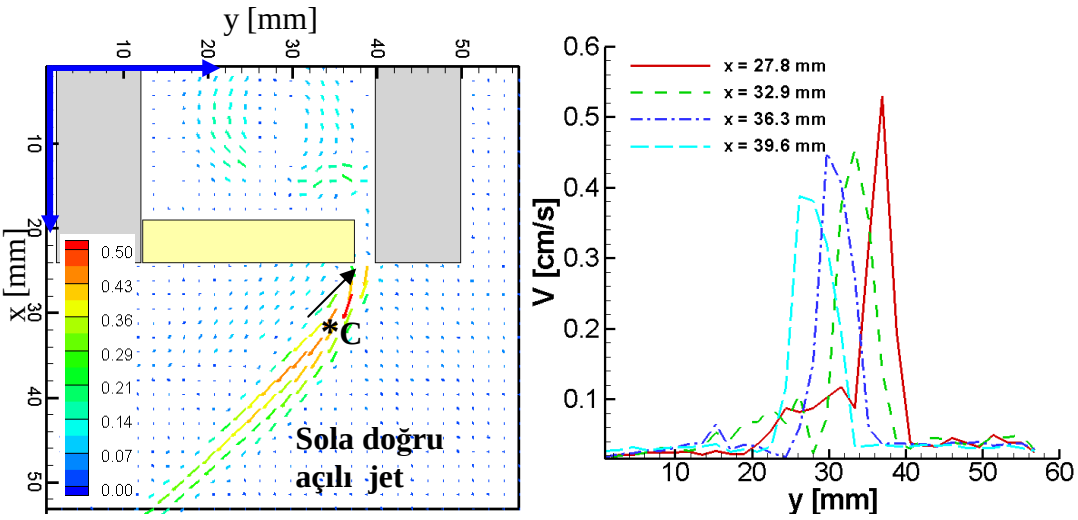
rağmen bize önemli bilgiler vermektedir. Örneğin, uçak kanadı üzerindeki akış hali gibi bir akış içerisinde, kanat yüzeyine yerleştirilecek uygun büyüklük ve konstrüksiyondaki JaVA sistemi ile, Şekil 3.27'deki gibi bir cidar jeti oluşturularak sınır tabaka içerisinde cidara çok yakın bölgedeki düşük momentuma sahip akışkanın momentumu arttırılabilir dolayısıyla çeperden ayrılma geciktirilebilir. Bunun için, serbest akım hızı, sınır tabakası kalınlığı gibi ilave parametreler gözönüne alınmalıdır.



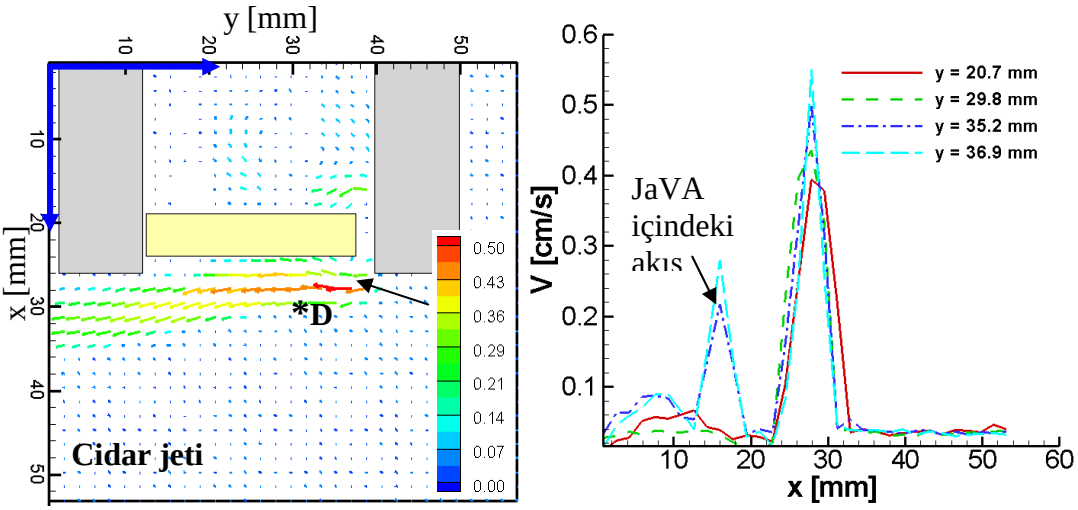
Şekil 3.24 : Sağa doğru açılı jet; sol sütun: ortalama optik akış hız büyüklüğü [cm/s]; sağ sütun: maksimum jet hızlarının dağılımı (Güneş ve diğ., 2008 C).



Şekil 3.25 : Serbest düşey jet; sol sütun: ortalama optik akış hız büyüklüğü [cm/s]; sağ sütun: maksimum jet hızlarının dağılımı (Güneş ve diğ., 2008 C).



Şekil 3.26 : Sola doğru açılı jet; sol sütun: ortalama optik akış hız büyüklüğü [cm/s]; sağ sütun: maksimum jet hızlarının dağılımı (Güneş ve diğ., 2008 C).



Şekil 3.27 : Cidar jeti; sol sütun: ortalama optik akış hız büyüklüğü [cm/s]; sağ sütun: maksimum jet hızlarının dağılımı (Güneş ve diğ., 2008 C).

Optik hız alanlarından elde edilen sonuca göre, cidar jetinin sınır tabaka akışında çeperden ayrılmaları önleme açısından potansiyel olarak kullanılabilirliği ortaya çıkmıştır. Düzgünleştirilmiş zaman ortalamalı akış alanları üzerinde harflerle işaretlenmiş noktalar, oluşan jet akışlarının zamana bağlı davranışlarını ve frekans spektrumlarını çıkarmak için seçilmiştir (bkz. Bölüm 3.8).

3.7 Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT)

Bir fonksiyonun veya sinyalin frekans analizine Fourier analizi denir. Fourier analizi uygulanacak sinyal sürekliyse buna sürekli Fourier analizi denir. Analiz edilecek olan veri zamana bağlı iken, çıkan sonuçtaki değişken frekanstır.

Ayrık Fourier transformu, hızlı Fourier transformunun (FFT) temelini teşkil eder. Burada analize giren fonksiyon *g(n)* ile ve analizden çıkan fonksiyon *G(k)* ile temsil edilecek olursa, *g(n)*'nin toplam kayıt süresi (T_N), örneklem noktalarının sayısı (N) ile her bir noktanın kayıt zamanları arasındaki sabit farkın (Δt) çarpımı ile elde edilir **(3.28)**.

$$T_N = N \cdot \Delta t \qquad \textbf{(3.28)}$$

Örnekleme frekansı $f_S = 1/\Delta t$ şeklinde, kayda ait frekans $f_N = 1/T_N$ ile ifade edilir. Ayrık Fourier transformu bu değişkenler kullanılarak **(3.29)**'daki gibi ifade edilir. Nyquist kriterine göre örnekleme frekansı, gerçekleşen fiziksel olayın frekansının en az iki katı olmalıdır, dolayısıyla 30 *fps* kayıt hızı 1 ila 2 Hz mertebesinde gerçekleşen JaVA akışı için oldukça güvenilirdir (Liakopoulos, 1990).

$$G(k) = \sum_{n=0}^{N-1} g(n) \cdot e^{2\pi ikn/N} \quad n = 0,1,2,.....N-1 \qquad \textbf{(3.29)}$$

FFT, ayrık Fourier transformunun bir türevi olup daha verimli ve hızlı bir şekilde frekans analizi yapılmasını sağlar. FFT aslında bir Fourier transformu olmayıp daha çok bir hesaplama şemasıdır. FFT algoritması kullanımının en önemli getirisi hızlı çalışmasıdır (Thrane, 1990). Deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen dijital görüntülerden oluşturulan akış alanları içerisinde seçilecek noktaların zamana bağlı davranışı tam olarak bir fonksiyon şeklinde ifade edilemeyen sayısal bir dizi olduğu için, bu verilerin dönüşümü de sayısal olarak yapılmalıdır. *N* adet veri değerinden oluşan örneklemin FFT'si **(3.30)**'da verilmiştir (Arifoğlu, 2005).

$$G(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g(n) \cdot e^{-i\frac{2\pi kn}{N}} \quad n = 0,1,2,.....N-1 \qquad \textbf{(3.30)}$$

Ölçüm sayısının çok olduğu işlemlerde hızlı Fourier dönüşümü (FFT) tercih edilmelidir. FFT algoritmasının uygulanabilmesi için veri sayısının 2^n olması gereklidir. Bu bağlamda jet akışı üzerinde seçilen noktanın bir kayıt süresi içerisindeki sayısı (500); FFT analizi için gerekli olan şartları yerine getirmek üzere bir boyutlu doğrusal Kriging interpolasyonu ile 2^{12} (4096)'ya çıkarılmıştır (bkz. Bölüm 3.7). Bu sayının 512 yerine 4096 seçilmesi hata mertebesini çok etkilememekdir ve pik genliğin yakalanmasında yeterli görülmüştür.

FFT yapıldığı zaman örnekleme sayısının yarısı kadar harmonik ve bunların genlikleri incelenir. Dolayısıyla aranılan gerçek harmonik değerlerine ulaşmak için harmonik genlik değerlerini $n/2$ sayısına bölmek gerekir (Arifoğlu, 2005). Bu şekilde optik akış hesabı ile elde edilen hız zaman grafiklerinin FFT ile frekans spektrumları bulunmuştur. FFT'nin avantajı, frekans ve genlik için çok iyi bir doğrusallık sağlaması, geniş bir dinamik aralıkta uygulanabilmesi, kararlılığı, geçiş bölgelerinde kolaylıkla uygulanabilmesi ve dijital ölçüm aletlerinde kullanılabilirliğidir (Thrane, 1990).

3.8 Açılı Jet Rejimlerinin Zamana Bağlı Davranışları

Bölüm 3.3.5'de anlık akış görüntüleri verilen ve Bölüm 3.6'da OAH ile zaman ortalamalı hız alanları oluşturulan jet akışlarının üzerinde seçilen noktaların dinamik davranışı ve frekans spektrumu incelenmiştir. Bu akış görüntüleme deneylerinde toplam 500 anlık görüntü kaydedilmiş olup, kayıt hızı 30 fps'dır, dolayısıyla elimizde 17 periyodu içeren veri kümesi mevcuttur. Şekil 3.24-3.27'de dikkat edilecek olursa y-ekseni yatayda pozitif doğrultuda, x-ekseni ise düşeyde negatif doğrultudadır, dolayısıyla ilgili jet tipleri üzerinde seçilen noktaların hız bileşenlerinin zamana bağlı değişimlerinde bu koordinat sistemi gözönünde tutulmalıdır

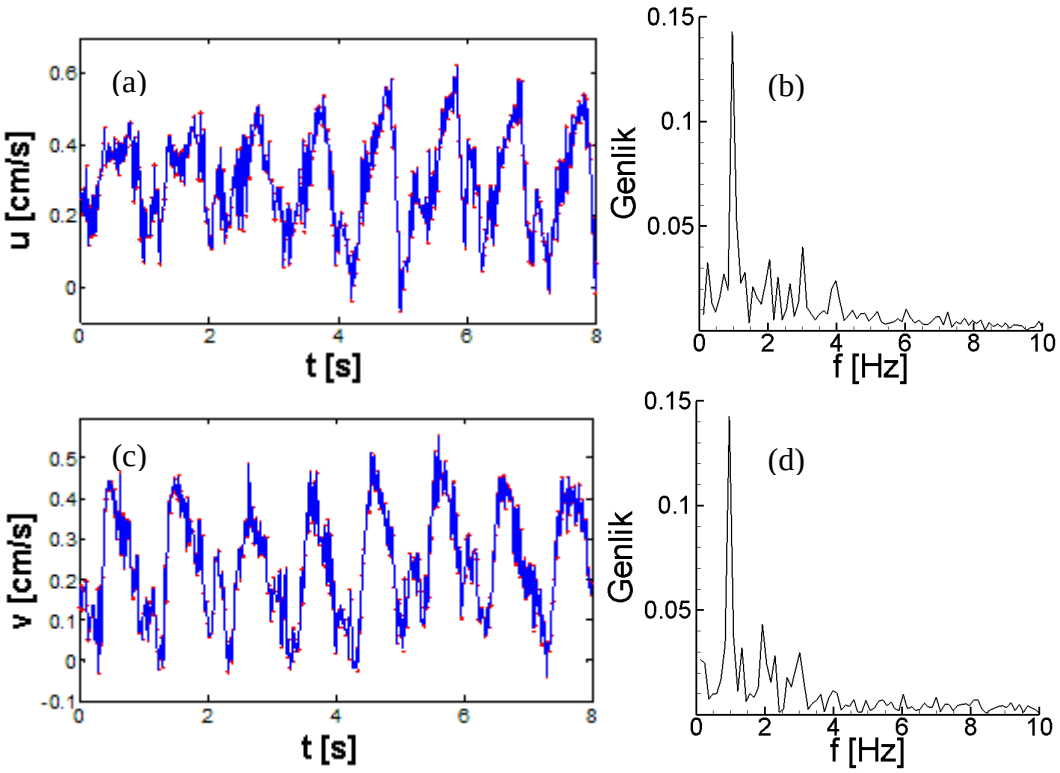
Şekil 3.24'de gösterilen, aktüatör plakasının gövde dışında olması durumunda (Konum I) meydana gelen sağa doğru açılı jet üzerinde seçilen **A** (x = 36.3, y = 49.6) noktasının u ve v hız bileşenlerinin zamana bağlı değişimi ve bu hız-zaman sinyallerinin FFT analizi yapılmıştır. Bu jet tipinde maksimum hız büyüklüğü yaklaşık 0.64 cm/s olarak bulunmuştur. Her iki hız bileşeni parazitik etki içermektedir, ancak sinyallerin frekans analizinde pik genlik beklenen frekansta bulunmuştur (bkz. Şekil 3.28).

Şekil 3.25'deki serbest düşey jetin üzerindeki **B** (x = 39.7, y = 40.6) noktasının hız bileşenlerinin dinamik davranışı sağa doğru açılı jetinkine benzemektedir ve her iki hız bileşeni de gürültü içermektedir. Bu durumda oluşan jet daha zayıf olup maksimum değeri 0.37 cm/s'dir. Her iki jet tipinde pik genlik net bir şekilde ortaya çıkmıştır. **B** noktasının u-hızı bileşeninin frekans analizinde f = 2 Hz civarında kuvvetli bir alt-harmonik değeri saptanmıştır (bkz. Şekil 3.29).

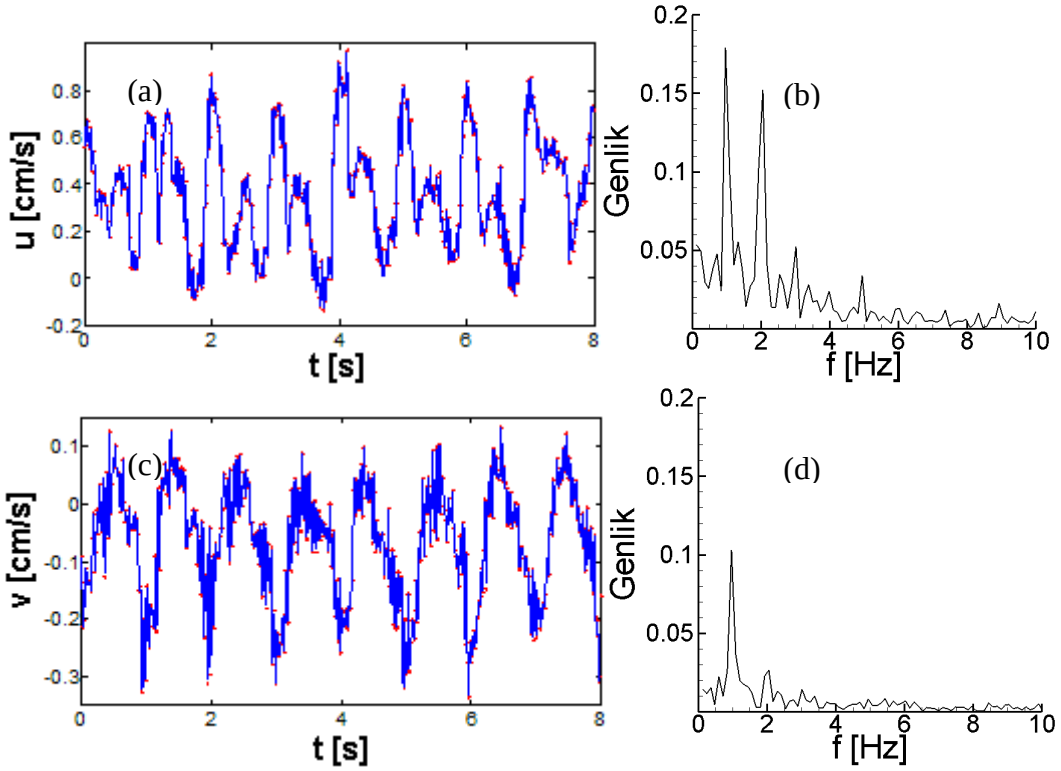
Şekil 3.25'deki sola doğru açılı jet üzerindeki **C** (x = 31.2, y = 33.4) noktasının hareketi incelendiğinde her iki yönde de periyodik olduğu göze çarpmaktadır ve gürültüsüz bir sinyal elde edilmektedir (bkz. Şekil 3.30). Noktasal hareketin özelliği, x-yönündeki hız bileşeni değerlerinin pozitif, y-yönündeki hız bileşeni değerlerinin negatif olması ile doğrulanmaktadır. Maksimum hız büyüklüğü 0.52 cm/s'dir.

Şekil 3.24'deki cidar jetinin üzerindeki **D** (x = 29.5, y = 29.8) noktasının hareketi ise her iki yönde tam periyodik olup, sağa açılı ve düşey jet tiplerinde gözlemlendiği gibi parazitik etki içermemektedir ve maksimum hız büyüklüğünün değeri 0.55 cm/s'dir. u-hız bileşeninin pik genliği, v-hız bileşenininkinden daha belirgindir (bkz. Şekil 3.31).

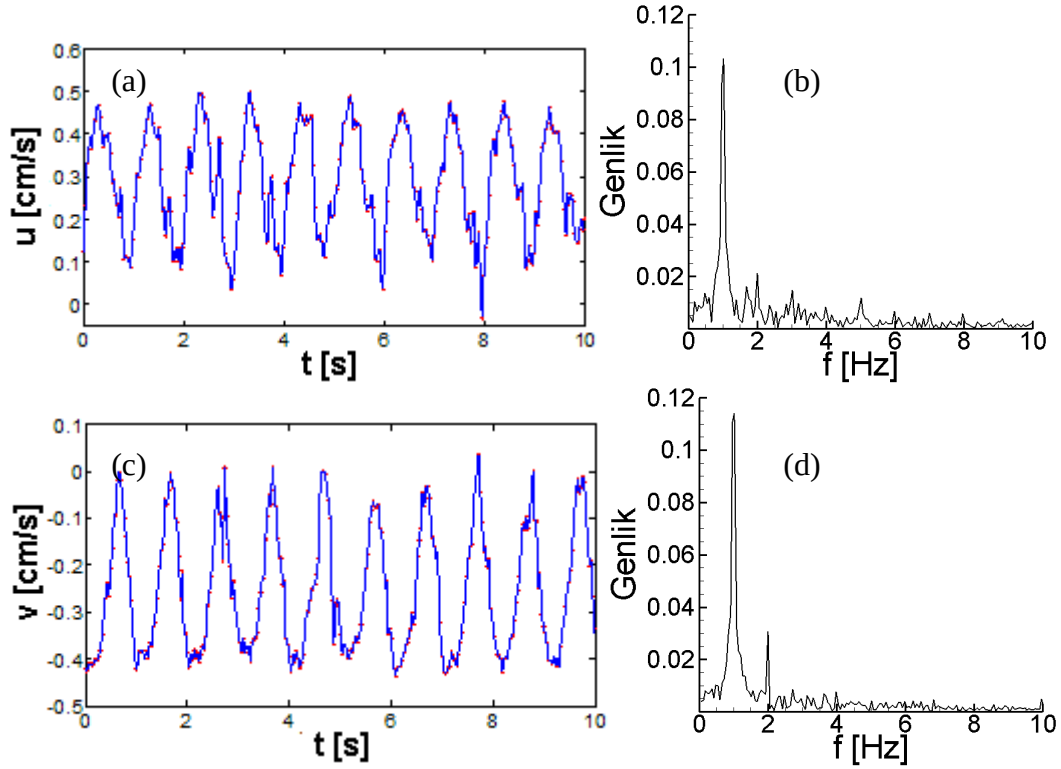
Re = 101; S_a = 0.16 boyutsuz sayılarıyla karakterize edilen açılı jet akışlarının FFT analizi sonucu, pik genlik f = 1.02 Hz civarında olup deney esnasında step motor tarafından ayarlanan çalışma frekansına çok yakındır. Bu sonuç, OAH'nın dijital görüntülerden akış alanlarını tahmin etmede güvenilebilir bir yöntem olduğunu ve başarıyla uygulanabileceğini ispat etmiştir. Aktüatör plakasına yakın noktalarda frekans genliği, hızın her iki bileşeni için yeterince belirgindir. (Gunes ve diğ., 2008 B).



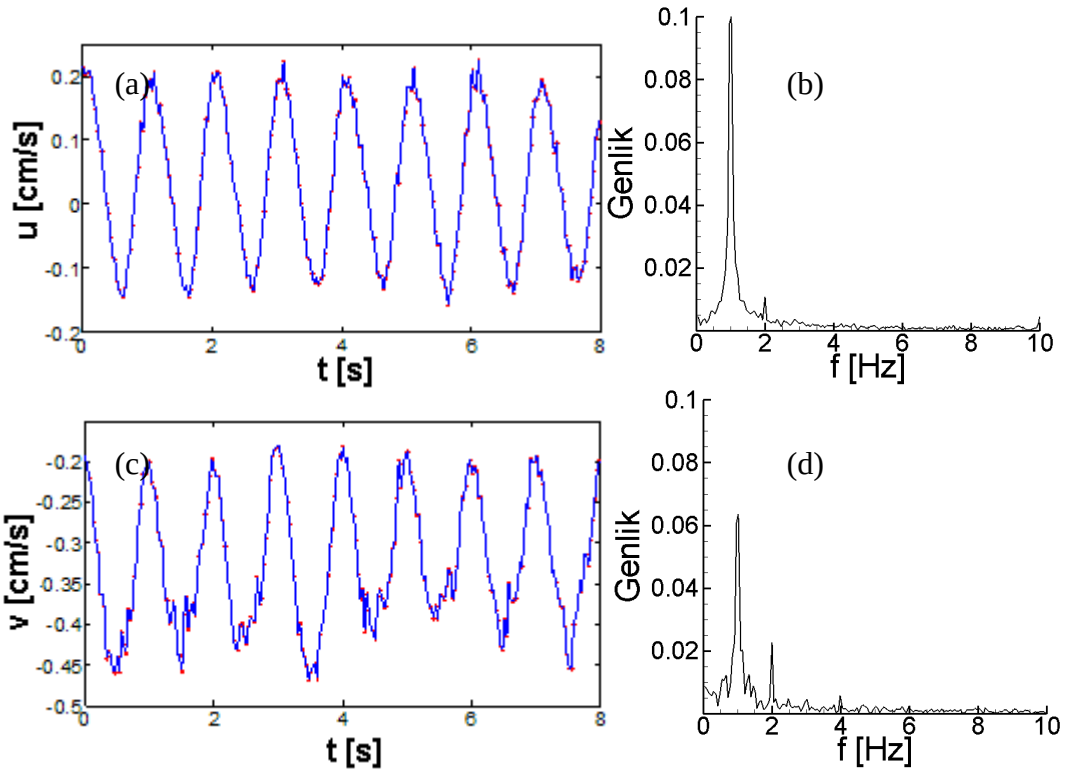
Şekil 3.28 : Sağa açılı jet üzerindeki **A** noktasının (a) u-hızı zaman grafiği, (b) u-hızı frekans spektrumu, (c) v-hızı zaman grafiği,(d) v-hızı frekans spektrumu.



Şekil 3.29 : Düşey jet üzerindeki **B** noktasının (a) *u*-hızı zaman grafiği, (b) *u*-hızı frekans spektrumu, (c) *v*-hızı zaman grafiği, (d) *v*-hızı frekans spektrumu.



Şekil 3.30 : Sola açılı jet üzerindeki **C** noktasının (a) *u*-hızı zaman grafiği, (b) *u*-hızı frekans spektrumu, (c) *v*-hızı zaman grafiği,(d) *v*-hızı frekans spektrumu.



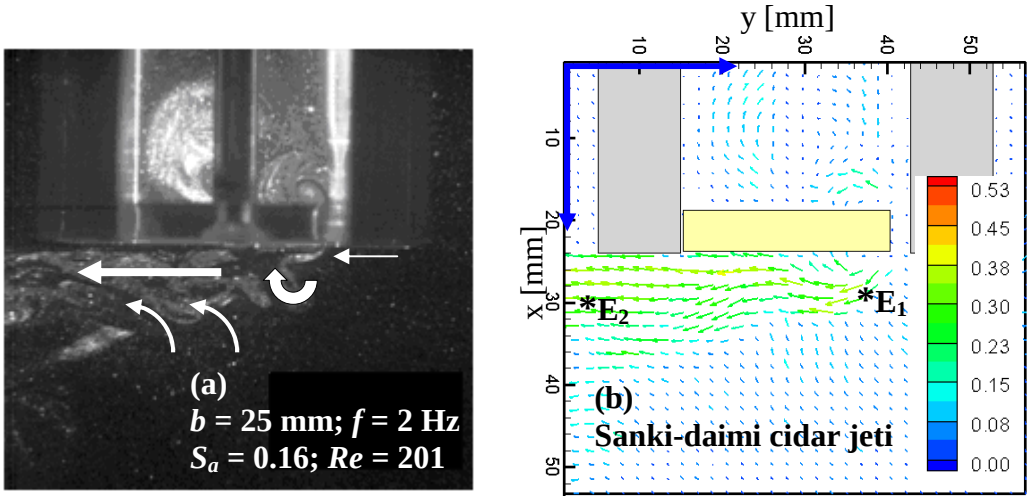
Şekil 3.31 : Cidar jeti üzerindeki **D** noktasının (a) *u*-hızı zaman grafiği, (b) *u*-hızı frekans spektrumu, (c) *v*-hızı zaman grafiği, (d) *v*-hızı frekans spektrumu.

3.9 Sanki-Periyodik ve Kaotik Akış Rejimlerinin Zamana Bağlı Davranışları

Daimi olmayan JaVA kaynaklı akış kapsamında ele alınacak rejimler, sanki-periyodik cidar jeti ile vorteks akışıdır. İncelenecek vorteks akışı Şekil 3.9(c)'de verilmiştir. Yöneten parametrelerin akış tiplerine nasıl etki ettikleri ve hangi çalışma koşulları altında sanki-periyodik akış tipleri veya vorteks akışları oluştuğu bilinmektedir. Şekil 3.11(c)'de anlık görüntüsü, Şekil 3.26'da zaman ortalamalı optik akış alanı verilen sola açılı jet akışında frekans dışındaki boyutlu parametreler sabit tutularak, çalışma frekansı f = 2 Hz'e çıkarıldığında ve plaka konumu değiştirilmediğinde (Konum II), Şekil 3.32(a)'da anlık akış görüntüsü verilmiş cidar jeti oluşmaktadır. Şekil 3.32(a)'da jetin hareketi oklar ile belirtilmiş olup, Şekil 3.32(b)'de zaman ortalamalı optik akış alanı görülmektedir.

Akış görüntüleme ile elde edilen anlık görüntüde plakanın hemen altında geniş aralıkta 2 Hz'lik çalışma frekansında periyodik karakterde tanımlanabilecek sanki-periyodik bir akışkan enjeksiyonu (basma) gerçekleşmektedir. Bu esnada sola doğru kıvrılan oklarla belirtilen akış cidar jetine katılmakta ve jetin akış doğrultusunda momentum transportunu kuvvetlendirmektedir. JaVA'nın sıfır net kütle debili bir

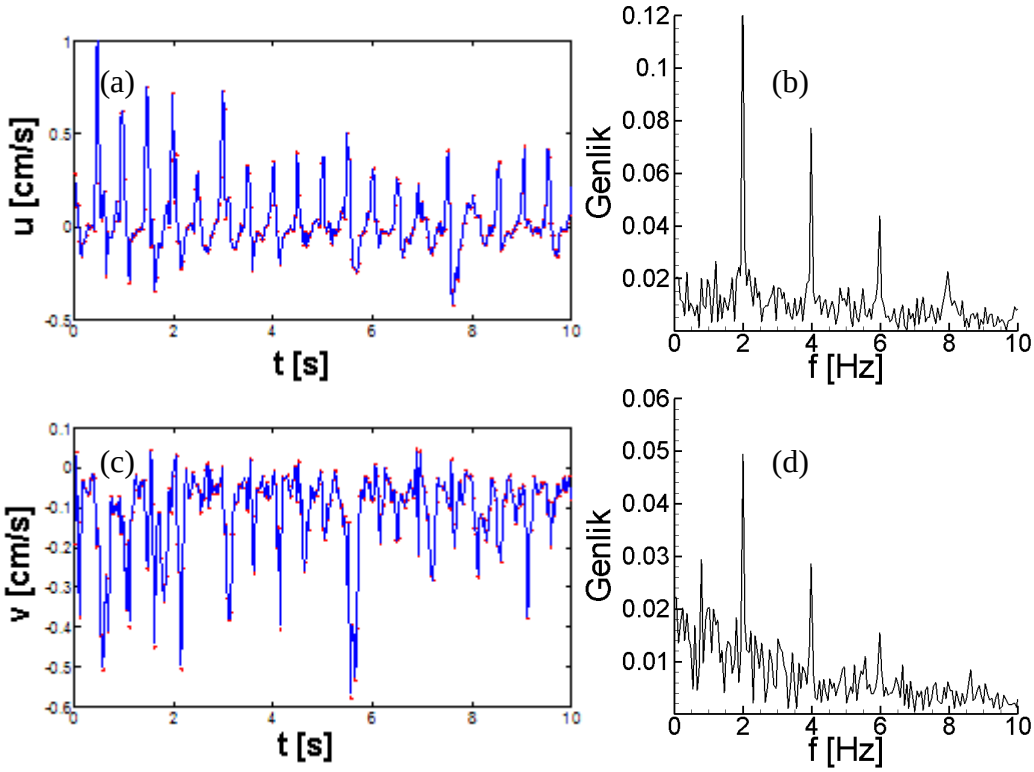
aktüatör olmasından dolayı, geniş aralık civarında ortamdaki akışkan emilmektedir ve bu ince bir okla belirtilmiştir. Önceki bölümde kapsamlı şekilde anlatıldığı gibi 500 adet görüntü OAH ile işlenerek optik hız alanları elde edilmiş ve jet akışı üzerinde ilgi çeken iki noktanın dinamik davranışı ve frekans analizi yapılmıştır.



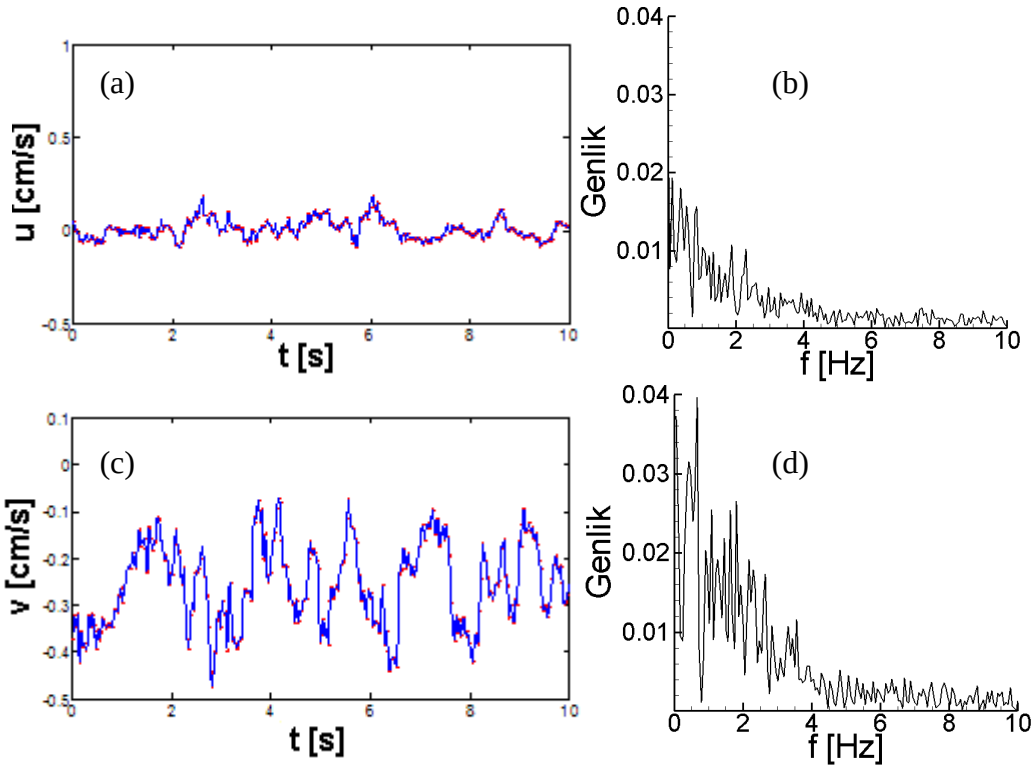
Şekil 3.32 : Sanki-periyodik cidar jeti; (a) anlık akış görüntüsü, (b) zaman ortalamalı optik akış hız büyüklüğü [cm/s].

Geniş aralığın hemen dışındaki E_1 noktasının (x = 27.8, y = 38.8) hareketi incelendiğinde, Şekil 3.33(a) ve Şekil 3.33(b)'de görüleceği gibi x yönündeki hız bileşeninin periyodik bir karakter taşıdığı, ve frekans analizinde f = 2 Hz'de pik genliğin bulunduğu ve pik genliğin tam katları olan değerlerde (4 Hz ve 6 Hz) ise alt-harmonikler ortaya çıktığı göze çarpmaktadır. Aynı noktanın y yönündeki hız bileşeni periyodik olmamakla beraber, frekans spektrumunda benzer özellikler taşımaktadır. Deneydeki çalışma frekansında pik genlik yakalanmaktadır ve iki katı bir değerde alt-harmonik oluşmaktadır (bkz. Şekil 3.33(c)-(d)).

Jetin en sol tarafındaki bir bölgede seçilen E_2 noktasının (x = 29.5, y = 2.7) FFT analizlerine de yansıyan kaotik bir hareketi vardır. Bu bölgede parçacık periyodikliğini kaybetmektedir ve salınım frekansı tam kestirilemeyen bir durum ortaya çıkmaktadır. Her iki noktaya ait hız-zaman grafikleri (Şekil 3.33(a)-(c) ile Şekil 3.34(a)-(c)) incelendiğinde u-hız bileşeninin akış doğrultusunda şiddetinin azaldığı ancak v-hız bileşeninin akış doğrultusunda şiddetinin arttığı görülmektedir. Bu nedenle bu akış rejiminin aktüatör yüzeyinde gelişecek bir sınır tabakayı enerjilendirme potansiyeli mevcuttur. Elde edilen maksimum hız büyüklüğü 0.40 cm/s'dir (Gunes ve diğ., 2008 A).

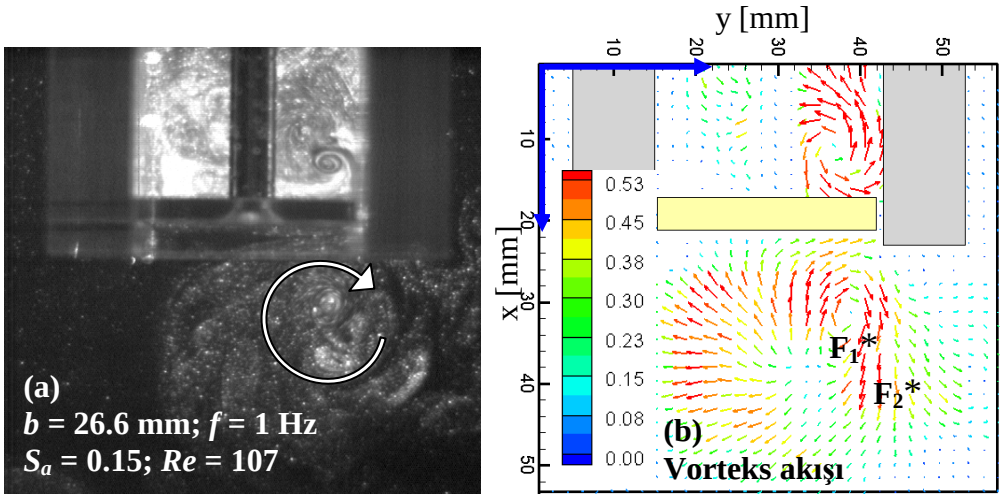


Şekil 3.33 : Sanki-periyodik cidar jeti üzerindeki $\mathbf{E_1}$ noktasının (a) *u*-hızı zaman grafiği, (b) *u*-hızı frekans spektrumu, (c) *v*-hızı zaman grafiği, (d) *v*-hızı frekans spektrumu.



Şekil 3.34 : Sanki-periyodik cidar jeti üzerindeki $\mathbf{E_2}$ noktasının (a) *u*-hızı zaman grafiği, (b) *u*-hızı frekans spektrumu, (c) *v*-hızı zaman grafiği, (d) *v*-hızı frekans spektrumu.

Kaotik akış katagorisine giren vorteks akışı (bkz. Bölüm 3.3.3 ve Şekil 3.9(c)), plaka genişliğinin fazla olması ve geniş aralığın daralması (w_w = 0.9 mm) ile basma esnasındaki hızın artması nedeniyle oluşmaktadır, dolayısıyla maksimum hız büyüklüğü 0.86 cm/s'dir. Plakanın gövde içerisinde yeralmasının da vorteks oluşumunda etkisi olmaktadır. Plaka genişliğinin değişmesi hem *Re* hem de S_a boyutsuz parametrelerini değiştirmektedir ve daimi olmayan saat yönünde dönen bir vorteks akışı meydana gelmektedir dolayısıyla kayıt hızı 60 fps seçilerek toplam 8 periyotluk bir kayıt alınmıştır. Şekil 3.35(a)'da anlık akış görüntüsü, Şekil 3.35(b)'de ise zaman ortalamalı hız alanı verilmiştir.



Şekil 3.35 : Vorteks akışının; (a) anlık akış görüntüsü, (b) zaman ortalamalı optik akış hız büyüklüğü [cm/s].

Vorteks üzerinde seçilen F_1 noktasının (x = 35, y = 38.8) hareketi incelendiğinde u-hızının kaotik davranış sergilediği ve belli bir pik genliğinde olmadığı görülmektedir (bkz. Şekil 3.36(a)-(b)). v-hızının daha periyodik olduğu ve çalışma frekansı olan f = 1 Hz'de pik genliğe ulaştığı aşikardır (bkz. Şekil 3.36(c)-(d)).

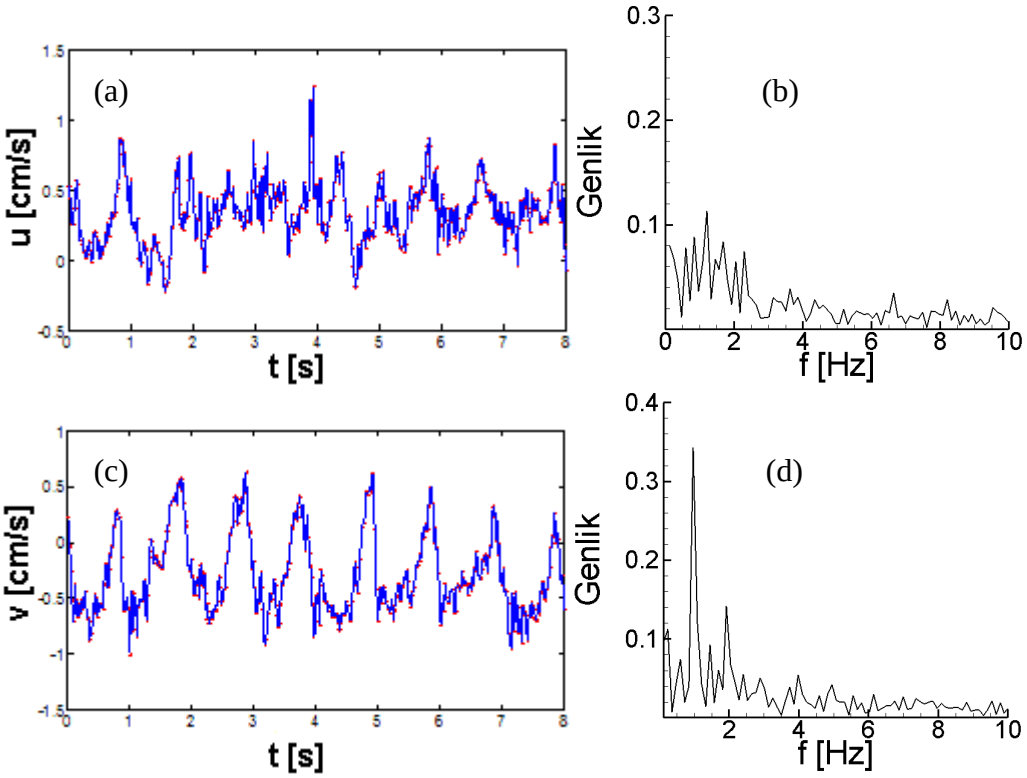
Vorteks üzerindeki F_2 noktasının (x = 39.7, y = 46) hareketinin her iki yöndeki hız bileşeni de karmaşık olduğu hem noktanın zamana bağlı sinyalinden hem de FFT analizlerinden anlaşılmaktadır (bkz. Şekil 3.37(a)-(b)-(c) ve (d)).

Vorteks akışı, Bölüm 3.8'de ele alınan sola açılı jet ve Bölüm 3.9'da ele alınan sanki-daimi cidar jetiyle karşılaştırıldığında, ortalamada en yüksek hız değerine sahiptir. Bölüm 3.8'de ele alınan sola açılı jet (f = 1 Hz) ve Bölüm 3.9'da ele alınan sanki-daimi cidar jet (f = 2 Hz) arasında bir kıyaslama yapıldığında, cidar jeti akış alanında basma hızının iki katına çıkmasına rağmen ortalama hız alanında oldukça düşük bir hız değerine eriştiği görülmektedir. Bunun nedeni sanki-daimi cidar jetinin üzerinde

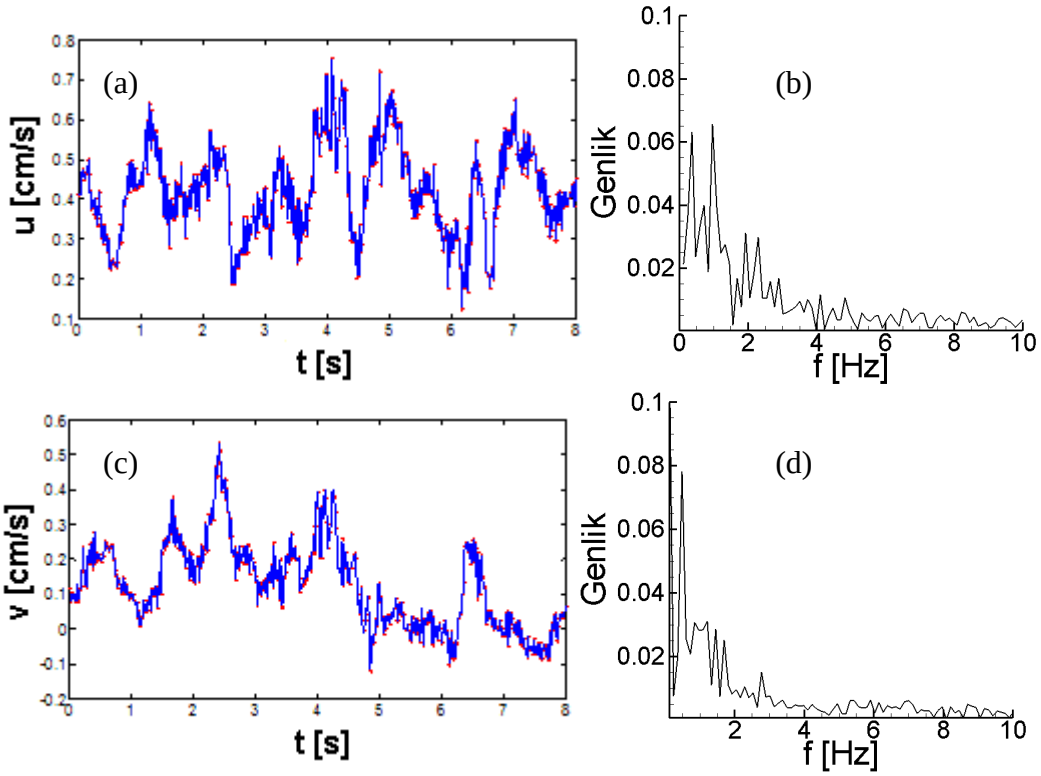
ilerlediği titreşen plaka olabilir, öte yandan ortalama hız alanlarındaki maksimum hız büyüklüklerinden başka emme ve basma yönlerinin akışkanın momentumunu arttırmada etkisi olduğu da bir gerçektir. JaVA kaynaklı akışların sınır tabaka ile etkileşimi ve sağlamlığı uygun ve etkili bir rejimin seçimine bağlıdır. OAH ile incelenen akış rejimlerine ait bir özet Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Farklı akış rejimlerinin özelliklerinin karşılaştırması.

Akış rejimi	**Konum**	***a*** **[mm]**	***b*** **[mm]**	***f*** **[Hz]**	***Re***	S_a	V_{maks} **[cm/s]**
Sağa açılı jet	I	0.64	25	1	101	0.16	0.64
Düşey jet	I	0.64	25	1	101	0.16	0.37
Sola açılı jet	II	0.64	25	1	101	0.16	0.52
Cidar jeti	III	0.64	25	1	101	0.16	0.55
Sanki-per. j.	II	0.64	25	2	201	0.16	0.40
Vorteks	III	0.64	26.6	1	107	0.15	0.86



Şekil 3.36 : Vorteks üzerindeki $\mathbf{F_1}$ noktasının (a) *u*-hızı zaman grafiği, (b) *u*-hızı frekans spektrumu, (c) *v*-hızı zaman grafiği, (d) *v*-hızı frekans spektrumu.



Şekil 3.37 : Vorteks üzerindeki $\mathbf{F_2}$ noktasının (a) *u*-hızı zaman grafiği, (b) *u*-hızı frekans spektrumu, (c) *v*-hızı zaman grafiği, (d) *v*-hızı frekans spektrumu.

3.10 Hareketsiz Su Ortamında Parçacık Görüntüleme ile Hız Ölçme (PIV) Deneyi ve Esasları

Tez çalışmasının bir kısmını, akış görüntüleme deneylerini müteakip yapılmış olan Parçacık Görüntüleme ile Hız Ölçme – Particle Image Velocimetry (PIV) deneyleri oluşturmaktadır. Hareketsiz su ortamında yöneten parametrelerin akış üzerindeki etkisi belirlendikten ve deneylerin tekrarlanabilirliği sağlandıktan sonra iki boyutlu PIV tekniği ile geniş bir hız alanında yüksek kalitede deneysel ölçümler yapılmıştır. Bu görüntülerin sayısal işlenmesi IAG'da bulunan özel bir PIV yazılımı ile gerçekleştirilmektedir. Bölüm 3.10 altında PIV tekniği ve deneylerde kullanılan düzenek ve akış alanlarının sayısal olarak işlenmesi yeralmaktadır.

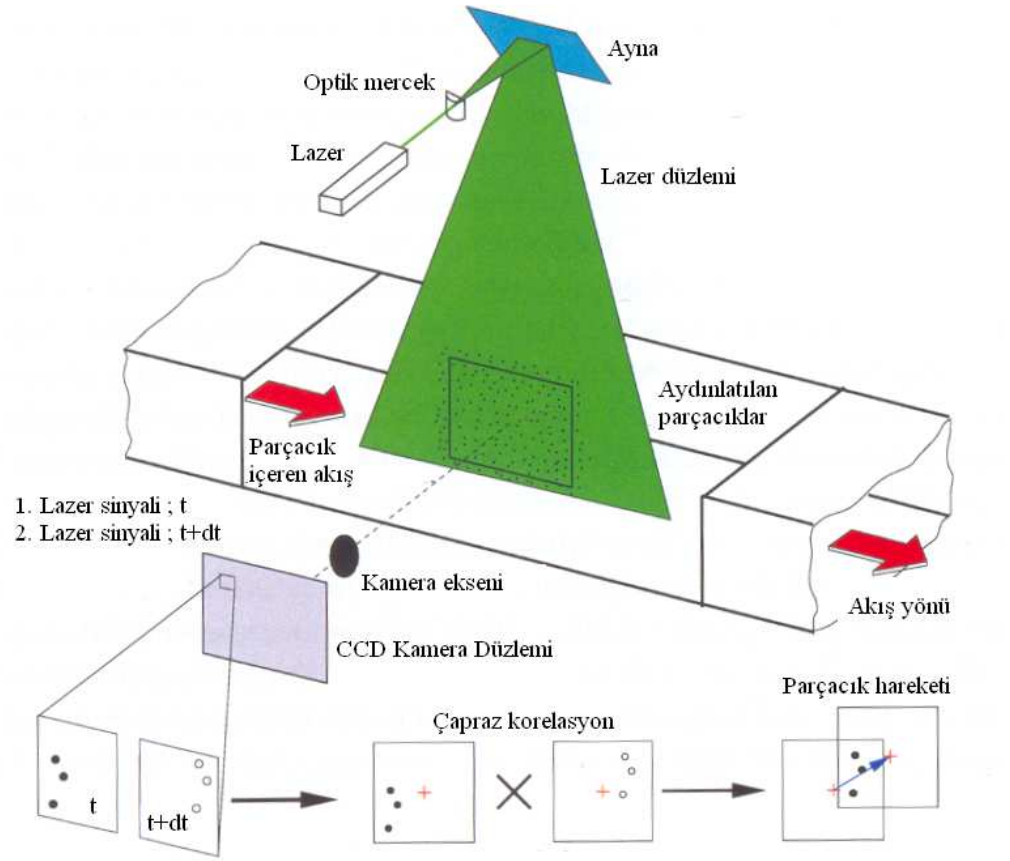
3.10.1 Parçacık görüntüleme ile hız ölçme – (PIV)

PIV yöntemi son yirmi yılda karmaşık akış alanlarının incelenmesinde başvurulan etkili bir araç olmuştur. PIV'de akış alanı içinde kalan bir düzlem içerisinde hızın konumsal dağılımı ölçülür, başka bir deyişle belli bir zaman aralığında hareket eden parçacıkların yerdeğiştirmesi ile dolaylı olarak akış hızı ölçülür. Arka arkaya Δt

zaman aralığı farkıyla lazer ışın düzlemi tarafından aydınlatılan parçacıkların ayrı ayrı kaydedilmiş görüntülerinden çapraz korelasyon ile yersel yerdeğiştirmeleri belirlenir. **(3.31)**'deki gibi yerdeğiştirme (Δx); zaman aralığı olan Δt'ye bölünerek hız alanının birinci mertebeden bir tahmini yapılır (Kähler, 2003).

$$\int_{t}^{t+\Delta t} u(t')dt' \approx \int_{t}^{t+\Delta t} u_p(t')dt' \approx \Delta x \quad ve \quad u \approx \frac{\Delta x}{\Delta t} \tag{3.31}$$

Şekil 3.38'de bir kanal içerisindeki akış için yapılan PIV deneyinin temsili düzeneği gösterilmiştir (Lang, 2004).



Şekil 3.38 : Bir kanal akışı içinde iki boyutlu PIV çalışma ilkesi (Lang, 2004).

Parçacık görüntüleme ile hız ölçme ile bir akış alanı içerisinde istenen bir düzlemde çok kısa zaman aralıkları mertebesinde anlık hız alanları oluşturulur. PIV özellikle akışın konumsal değişiminin görsel ve kantitatif olarak anlaşılmasında faydalıdır. Lazer kaynağından çıkan ışın demeti optik mercek ile düzlem haline getirilerek parçacık içeren akışkan ortamına projeksiyonu sağlanır. Yüksek güçlü lazer kaynağından *t* ve *t'* anlarında gönderilen lazer ışın düzlemi, incelenen akış ortamını aydınlatır, bu esnada *t* ve *t'* anlarının görüntüleri kamera tarafından kaydedilir.

Ardışık görüntülerde homojen bir hız vektörü dağılımı sağlanabilmesi için birbirini takip eden lazer sinyalleri arasındaki zaman aralığı Δt, kullanılan optik enstrümanın dönüştürme faktörü ve varsa ortalama akış hızı ile uyumlu olmalıdır. PIV deneylerinde parçacık içeren akışkan düzlemine gönderilen ışın düzlemi, CCD (Charge Couple Device) kameraya gelir, ve bilgisayar ortamına kaydedilir. Kaydedilen görüntülerin kalitesi; ışın düzlemi içerisindeki parçacık dağılımına, kullanılan optik enstrümanlara ve dönüştürme faktörüne bağlıdır.

PIV ölçüm ilkesi; parçacık hızının, yerdeğiştirmenin zaman aralığına bölümü ile bulunmasına dayanmaktadır. İki boyutlu hız alanının hesaplanmasında (t ve $t + \Delta t$ anlarında) kamera tarafından kaydedilen ardışık her iki resim alt pencerelere veya sorgulama percerelerine ayrılır ve çapraz korelasyon ile parçacığın yerdeğiştirme miktarı bulunur. Hız alanının vektörel ifadesi için yatayda ve düşeyde K**x**L boyutlarındaki pencere baz alınırsa **(3.32)**'deki bağıntı ile çapraz korelasyon değeri $R_{II}(x,y)$ hesaplanabilir (Raffel ve diğ., 1998).

$$R_{II}(x,y) = \sum_{i=-\frac{K}{2}}^{\frac{K}{2}} \sum_{j=-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} I(i,j)\, I'(i+x, j+y) \qquad \textbf{(3.32)}$$

(3.32)'deki I ve I' değerleri sırasıyla ardışık t ve t' anlarındaki sorgulama pencerelerinin (alt pencerenin) görüntü yoğunluğudur. Çapraz korelasyon esnasında (bkz. Şekil 3.38) birinci sorgulama penceresindeki I değeri, ikinci sorgulama penceresindeki I' değerine kaydırılır, dolayısıyla ikinci sorgulama penceresinin boyutları birincinin iki katı olur. Kaydırma esnasında üstüste gelen birinci sorgulama penceresinin (i,j) konumundaki I görüntü yoğunluklarının, ikinci sorgulama penceresinin $(i+x,j+y)$ konumundaki I' görüntü yoğunlukları ile çarpımlarının toplamı; ilgili korelasyon değerini $R_{II}(x,y)$ verir. **(3.32)**'de verilen sınırlar içerisinde kalmak üzere en büyük değeri ortalama parçacık hareket miktarına karşılık gelen bir korelasyon düzlemi oluşturulur (Lang, 2004).

Vektör alanının çapraz korelasyonla hesaplanmasında homojen parçacık dağılımı esas kabul edilir. Seçilecek sorgulama penceresinin boyutu konumsal çözünürlüğü belirlediğinden, akış içerisindeki hızın skaler bileşenleri ile uyumlu olmalıdır. Elde edilen yüksek çözünürlüklü resimlerdeki vektörel alanın ($\Delta X/\Delta t$) birimi; ΔX piksel olarak verildiğinden piksel/s'dir. Hız bileşenleri (u,v) optik enstrümanın (kameranın)

dönüştürme faktörü (Z) ve ardışık resimler arasındaki bilinen zaman farkı Δt kullanılarak **(3.33)**'deki gibi boyutlu hale getirilir (Kähler, 2003).

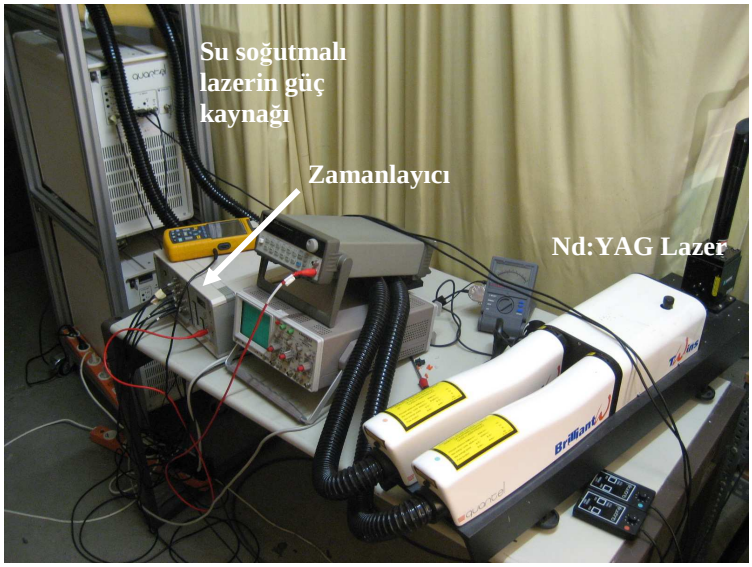
$$u \approx \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta X}{Z \cdot \Delta t} \qquad \textbf{(3.33)}$$

Optik enstrümanın (CCD kameranın) dönüştürme faktörü, PIV deneylerinin başında ışın düzlemine yerleştirilen boyutları bilinen bir ızgara ile yapılan kalibrasyondan elde edilir. Hız alanı vektörel olarak boyutlu bir şekilde oluşturulur (Lang, 2004).

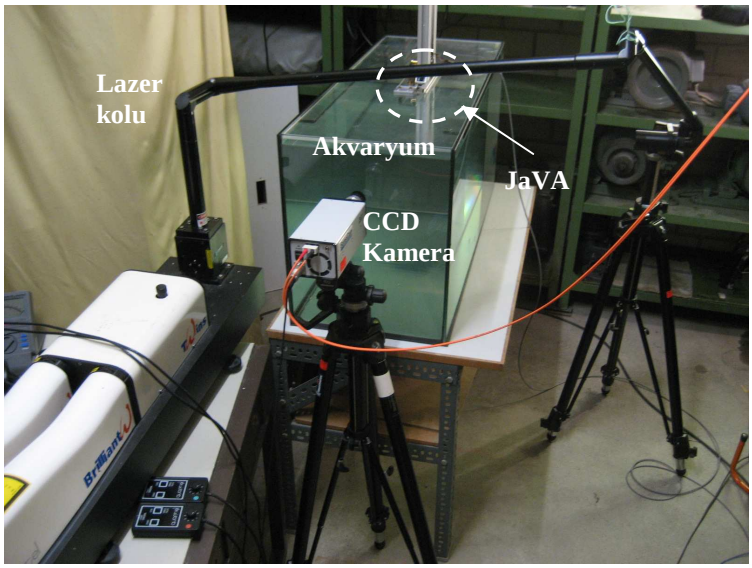
3.10.2 Hareketsiz su ortamında PIV deney düzeneği

JaVA kaynaklı akış rejimleri durgun suda akış görüntüleme deneyleri ile belirlenmiş ve OAH yaklaşımı ile jet veya vorteks üzerinde seçilen noktaların zamana bağlı davranışı ve frekans analizleri incelenmiştir (bkz. Bölüm 3.8 ve 3.9).

Daha önceden yapılmış olan akış görüntüleme sonuçlarından yola çıkarak değişik akış rejimleri için PIV deneyleri yapılmış ve hız vektörleri iki boyutlu olarak elde edilmiştir. PIV deney düzeneğinde, ölçüm süresini ayarlayan zamanlayıcı, akış alanını aydınlatmada kullanılan lazer kaynağı, görüntüleri kaydeden CCD kamera, ve kameradan gelen görüntülerin sayısal olarak işlendiği bilgisayar yeralmaktadır. Şekil 3.39 ve 3.40'da durgun sudaki akış rejimleri için hazırlanmış deney düzeneği görülmektedir.

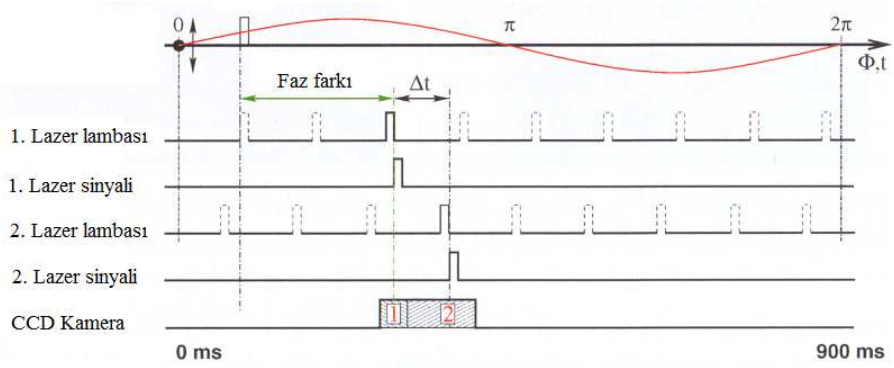


Şekil 3.39 : PIV deney düzeneği – Nd:YAG lazer, güç kaynağı ve zamanlayıcı.



Şekil 3.40 : Durgun su ortamında PIV deney düzeneği – CCD kamera ve JaVA.

Deney ekipmanında yeralan zamanlayıcı lazer sinyalleri arasındaki zaman farkını ve lazer frekansını ayarlamada ve lazer kaynağının durdurulmasında veya devreye sokulmasında rol oynayan sisteme dışarıdan bağlanan programlanabilir bir cihazdır. Şekil 3.41'de görüldüğü üzere PIV ölçümünde zamanlayıcı; sabit aralıklarla yanan lazer lambalarını (flashlamps) ve Δt zaman aralığı ile gönderilen ardışık lazer sinyallerini (Q-switch) ayarlamakta dolayısıyla CCD kameranın bu zaman aralığını baz alarak görüntüleri kaydetmesinde rol oynamaktadır. Programlanmış bir zamanlayıcı tetikleme ile devreye sokulup istendiği takdirde faz ölçümünde de kullanılabilir (Lang, 2005).



Şekil 3.41 : Zamanlayıcının faz ölçümünde kullandığı tetikleme şeması (Lang, 2004).

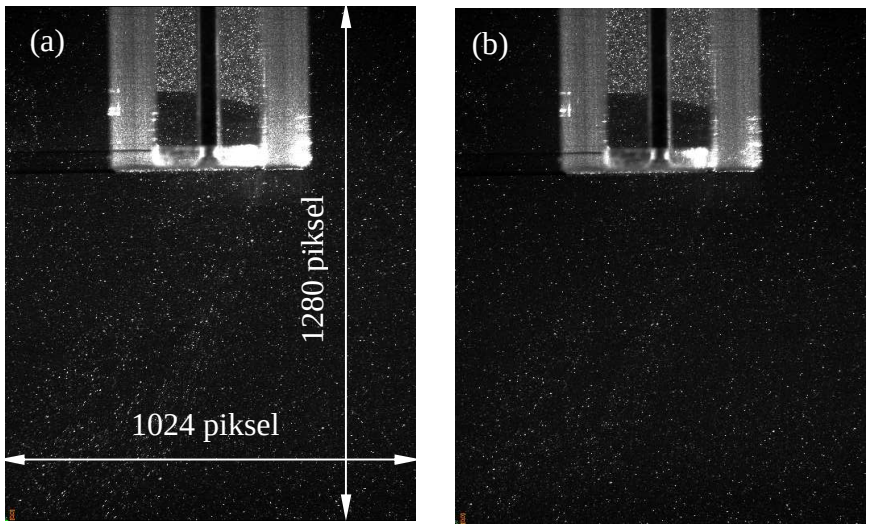
Homojen olarak parçacık içeren akışkan düzlemini aydınlatmada Δt zaman aralığı ile ardışık iki sinyal gönderen Nd:YAG lazer kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan lazerin dalga boyu 532 nm olup 10 Hz'lik sabit bir frekans ile çalıştırılmaktadır ve her bir lazer sinyalinin maksimum gücü 150 mJ'dur. Özellikle JaVA kaynaklı akış

rejimine ait frekans ile lazer frekansının çakışması hep aynı akış alanının aydınlatılması anlamına geleceğinden, ya zamanlayıcı ile ya da step motor ile her iki frekans arasında kaydırma yapılarak bu durum engellenmiştir, dolayısıyla incelenen akışkan düzleminin lazer frekansından bağımsız olarak iki kez aydınlatılması mümkün kılınmıştır. JaVA kaynaklı akış rejimlerinin frekansının 1 Hz mertebesinde olduğu gözönünde tutularak, zamanlayıcı ile lazer frekansı ayarlanarak 1 Hz'in tam katı olmamasına dikkat edilmiştir. Lazer ışın demeti, bir çelik kol içerisinden geçmektedir ve kolun eklemlerinde bulunan aynalardan yansıyarak akışkan düzlemini aydınlatmaktadır. Lazer ışınını ileten kol ucunda bulunan optik mercek ile lazer demeti düzlem haline getirilmektedir. Flurosan boya çözeltisi içeren akış rejimlerine ait görüntüler çapraz korelasyona olanak sağlayan bir CCD kamera tarafından kaydedilir. Her bir vektör alanı için iki lazer sinyaline karşılık gelen parçacık içeren iki ardışık siyah-beyaz görüntü alınır. Her iki görüntüde de belirli eş büyüklükte sorgulama pencereleri oluşturularak çapraz korelasyon yapılır. Deney sonucu elde edilen görüntülerin sayısal işlenmesi Bölüm 3.10.3'de anlatılmıştır.

3.10.3 PIV verilerinin işlenmesi

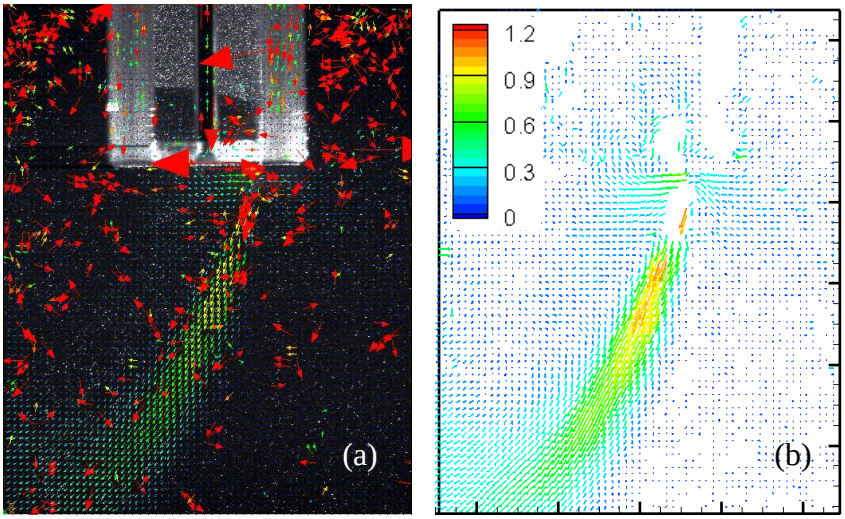
İçerisinde homojen parçacık dağılımı olan hareketsiz su ortamında JaVA kaynaklı akış rejimi lazer düzlemi ile aydınlatıldıktan sonra CCD kamera tarafından kaydedilen görüntüleri işlerken aşağıda verilen yol takip edilmektedir.

İki adet sorgulama penceresinden oluşan çift resim iki tane sorgulama penceresine ayrılır. (bkz. Şekil 3.42). Tüm resmin ölçüsü 1024**x**1280 piksel boyutlarındadır.



Şekil 3.42 : PIV deneylerinde elde edilen parçacıklı akış alanları (Δt = 75 ms).

Bölüm 3.10.1'de anlatıldığı gibi bu iki sorgulama penceresi üzerinde parçacıkların yerdeğiştirmesi esas alınarak Levenberg-Marquardt yaklaşımı ile çapraz korelasyon yapılır ve parçacık hareketi korelasyon düzlemi üzerinde vektörel olarak elde edilir. Tek bir resim üzerinde piksel/saniye olarak vektörel hız alanı ve boyutlu hız alanı Şekil 3.43(a) ve (b)'de görülmektedir. Buradaki büyük kırmızı oklar gerçekçi olmayan ve ayıklanması gereken vektörlerdir.



Şekil 3.43 : İşlenmiş PIV verisi: (a) piksel/saniye, (b) cm/s olarak vektörel hız dağılımı.

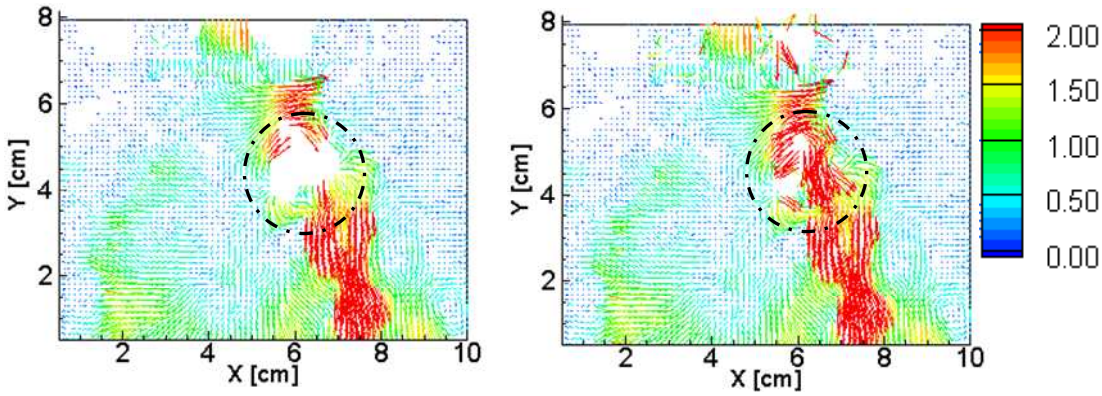
Şekil 3.43'de gösterilen akış alanı çapraz korelasyon ile elde edildikten sonra kırmızı renkteki gerçekçi olmayan vektörler için sınırlar belirlenir. Makul ölçüde bir vektör dağılımı sağlamada u ve v hız bileşenleri için kabul edilebilecek üst ve alt sınırlar (sırasıyla; u_{maks}, u_{min}, v_{maks}, v_{min}) ve gradyenler (*grad*) belirlenerek bu sınırlar dışında kalan gerçekçi olmayan vektörler atılır. Her bir PIV ölçmesi toplam 30 adet vektör alanından oluşmaktadır ve deney verisinin sayısal işlenmesi esnasında her bir anlık akış alanı için gerçekçi olmayan vektörlerin sınırları belirlenir. Bu örnekte birinci vektör alanına ait sınırlar, u_{maks} = 3 piksel/s; u_{min} = -10 piksel/s; v_{maks} = 4 piksel/s; v_{min} = -6 piksel/s ve grad = 3'dür. Bu örnekteki birinci vektör alanında gerçekçi olmayan vektörlerin toplam vektör sayısına oranı % 12 olarak tespit edilmiştir.

Sınırlar dışında kalan vektörler belirlendikten ve ayıklandıktan sonra onların yerine interpolasyonla yeni vektörler yerleştirilir. Ele alınan sola açılı jet örneğinde iki lazer sinyali arasındaki zaman farkı Δt = 75 ms alınmıştır. CCD kameranın kalibrasyon sırasında dönüştürme faktörü Z = 97.82 piksel/cm olarak belirlenmiştir. Bu değerler kullanılarak pikselden boyutlu büyüklüklere geçilerek (77**x**61)'lik bir sayısal hesaplama ağında vektörel hız alanı [cm/s] cinsinden oluşturulur (bkz. Şekil 3.43(b)).

3.10.4 PIV verilerinin iyileştirilmesi ve zenginleştirilmesi

Kriging interpolasyonu, PIV verilerinin işlenmesinde etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Gerçekçi olmayan vektörler (outliers) atıldıktan sonra Kriging interpolasyonu, akış alanı içersinde bulunan eksik kalmış bölgelerin doldurulup iyileştirilmesinde, düzgünleştirilmesinde başarıyla uygulanmıştır (Venturi ve diğ., 2004; Gunes ve diğ., 2006; Gunes ve Rist U., 2007). Gerçekçi olmayan vektörler çıkarıldıktan ve interpolasyonla doldurulduktan sonra hala gerçeğe aykırı vektörler varsa, uygun korelasyon fonksiyonları ve düzgünleştirme faktörleri seçerek Kriging interpolasyonu ile akış alanları iyileştirilebilir. Bütün akış alanlarını temsil etmesi açısından ortalama akış alanı da hesaplanabilir.

Şekil 3.44'de daimi olmayan düşey jetin PIV ile elde edilen anlık akış alanının Kriging interpolasyonu ile iyileştirilmesi görülmektedir.



Şekil 3.44 : Anlık PIV hız alanının [cm/s] Kriging ile iyileştirilmesi.

Verilen örnekteki jetin boyutlu parametreleri: disk genliği a = 1 mm, plaka genişliği b = 26.6 mm, frekans f = 1 Hz olup, plaka sıfır konumu gövde ile aynı hizadadır. Şekil 3.44'de daimi olmayan düşey jete ait hız vektörleri gösterilmiştir, zaman aralığı Δt = 20 ms'dir. Çapraz korelasyon sonrası vektör dağılımı, boyutları 10 cm x 8 cm olan bir pencerede incelenmektedir.

Akış merkezinde vorteksler bulunması deney esnasında o bölgede gerçekçi olmayan vektörlerin oluşmasına neden olmuştur. Şekil 3.44'deki PIV akış alanı elde edilirken gerçekçi olmayan vektörler için sınırlar -15 piksel/cm < u < 15 piksel/cm ve -20 piksel/cm < v < 15 piksel/cm olarak belirlenmiş ve dönüştürme faktörü Z = 125 piksel/cm alınmıştır. Bu anlık PIV vektör alanında gerçekçi olmayan vektörlerin toplam vektörlere oranı % 2.7'dir. Şekil 3.44'de noktalı çember içine alınan bölgede gerçekçi olmayan vektörler atıldıktan sonra üstel korelasyon fonksiyonu kullanılarak

düzeltme faktörü θ = 1.0 alınarak boşluklu bölgeler Kriging interpolasyonu ile gerçeğe uygun bir biçimde doldurulmuştur (bkz. Bölüm 3.5, denklem 3.25).

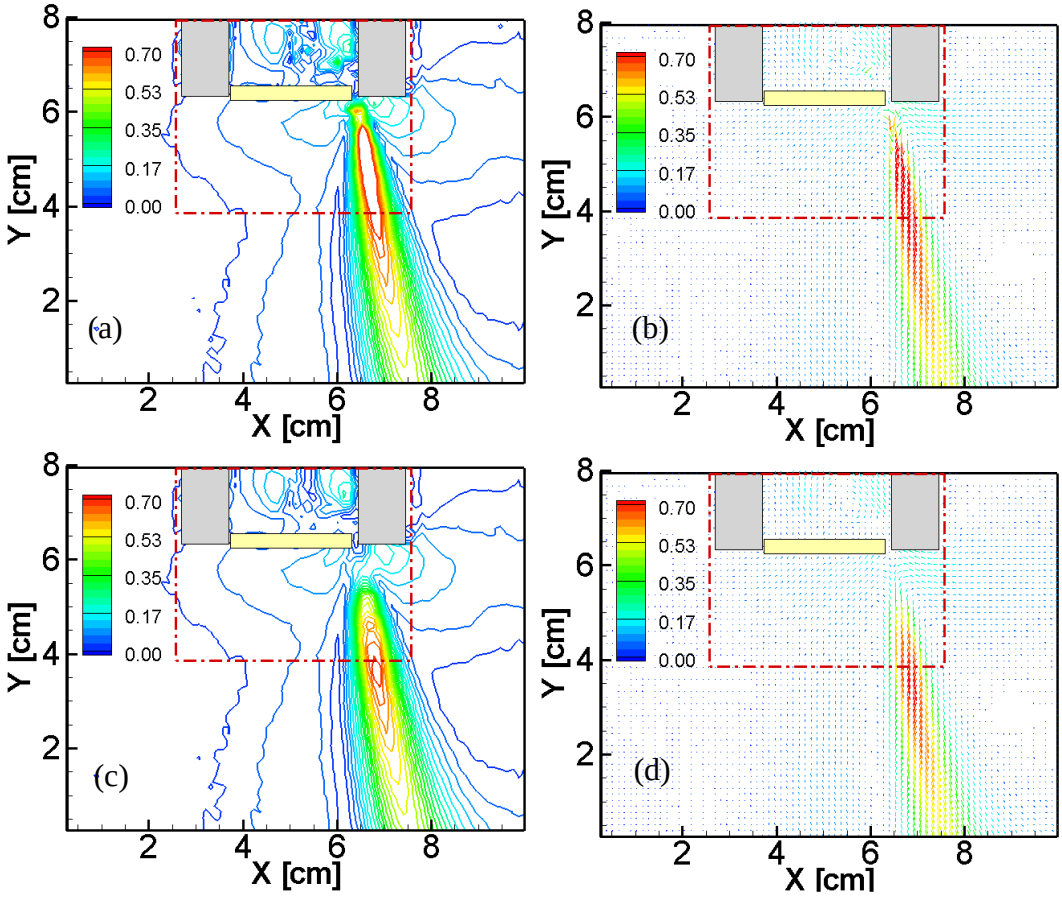
3.11 JaVA Kaynaklı Akış Rejimlerine Ait PIV Deney Sonuçları

Hareketsiz su ortamında yapılmış akış görüntüleme deneyleri ile belirlenen JaVA kaynaklı akış tiplerinin PIV deneyleri neticesinde akış alanları elde edilmiş ve plaka hareketine bağlı emme ve basma fazlarının vektörel hız dağılımları açıkça ortaya konmuştur. Aynı parametre uzayında kalmak kaydıyla tekrarlanan PIV deneylerinde akış alanları çok ihtiyaç duyulmadıkça boyutları 10 cm x 8 cm olan bir pencerede incelenmiştir. Bu alan akış görüntüleme deneylerindeki pencereden daha büyük olup, jet akışlarının nasıl ilerlediği hakkında daha ayrıntılı bilgi vermektedir. Ayrıca, temel akış tipleri olarak kabul edilen açılı jet tipleri için CCD kamerayı akvaryuma yaklaştırmak ve yeniden kalibre etmek suretiyle yakından (zoom) PIV deneyleri tekrarlanmıştır. Bu deneylerde emme ve basma hareketleri ayrıntılı olarak ele alınmış ve akış tiplerinin sınır tabaka içerisinde nasıl bir katkı sağlayacağı üzerinde durulmuştur. Son olarak bu akış alanlarının POD analizi yapılmıştır ve ileride açıklanacaktır.

3.11.1 Açılı jete ait PIV verisinin incelenmesi

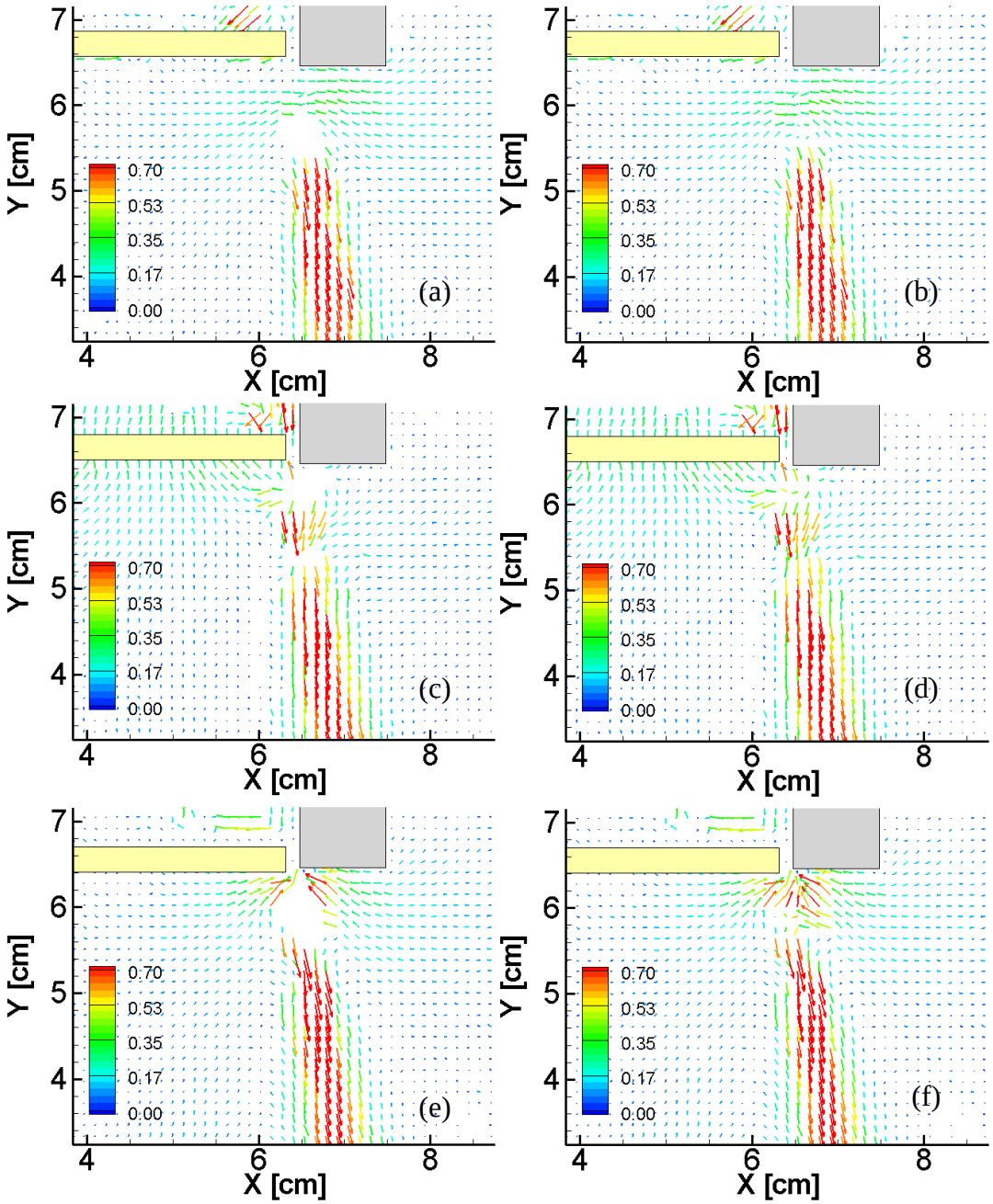
Daha önceki bölümlerde değinildiği gibi açılı jet, parametre kombinasyonuna bağlı olarak oluşan temel JaVA kaynaklı akış rejimlerindendir. Bu bölümde boyutlu parametreler olan disk genliği a = 0.4 mm, plaka genişliği b = 25.8 mm ve çalışma frekansı f = 1 Hz seçilmiş durumda oluşan jet akışına ait PIV akış alanı incelenmiştir. Genliğe ve plaka kalınlığına (d = 3 mm) bağlı olarak plakanın sıfır konumu aktüatör gövdesinin dışındadır (Konum III). Şekil 3.45 (a) ve (b)'de hafif sağa doğru açılı jete ait PIV veri setindeki hız bileşenlerinden hız büyüklükleri bulunmuş ve anlık akış alanı sayısına bölünerek zaman ortalamalı hız büyüklüğü dağılımı hesaplanmıştır. Gerçekçi olmayan vektörler atılarak Kriging yöntemi ile doldurulmuş ortalama hız alanı sırasıyla kontur ve vektör olarak verilmiştir. Şekilde kesik kırmızı çizgilerle çerçeve içine alınan bölge akış görüntülemedeki görsellenen alana karşılık gelmektedir. Şekil 3.45 (c) ve (d)'de ise ortalama akış alanında halen bulunan boşluklar düzgünleştirme katsayısı θ = 1 olmak üzere üstel korelasyon fonksiyonunu

kullanan Kriging interpolasyonu ile iyileştirilmiştir. Sonuç olarak Kriging ile işlenen akış alanı çok daha iyi ve zengin bir deneysel veri sunmaktadır.



Şekil 3.45 : Açılı jetin (a) orijinal kontur, (b) orijinal hız vektörü, (c) iyileştirilmiş kontur ve (d) iyileştirilmiş hız vektörü [cm/s].

Şekil 3.45'deki zenginleştirilmiş ortalama hız alanı akış rejiminin genel yapısı hakkında doyurucu bilgi vermektedir. Ancak Kriging interpolasyonunun etkinliğini sınamak ve herbir anlık akış alanını nasıl iyileştirdiğini yorumlayabilmek maksadıyla bir periyot içerisinden anlık akış alanları seçilmiş ve geniş aralık bölgesine yakın bir yere odaklanarak orijinal hız vektörleri ile Kriging ile iyileştirilen hız vektörleri karşılaştırılmıştır. Şekil 3.46 (a), (c) ve (e)'de sırasıyla orijinal 6.,15. ve 25. anlık akış alanları verilmiştir. Bu akış alanlarında gerçekçi olmayan vektörler ayıklanarak yerlerine yenileri konmuştur ve etkisiz hale getirilen vektörlerin toplam vektörlere oranı sırasıyla % 1.2; %1.7 ve % 1.4'tür. Bütün akış alanında (77**x**61) bu oranlara karşılık gelen boşluklar da Kriging ile anlamlı bir şekilde doldurulmuştur (bkz. Şekil 3.46 (b), (d) ve (f)).

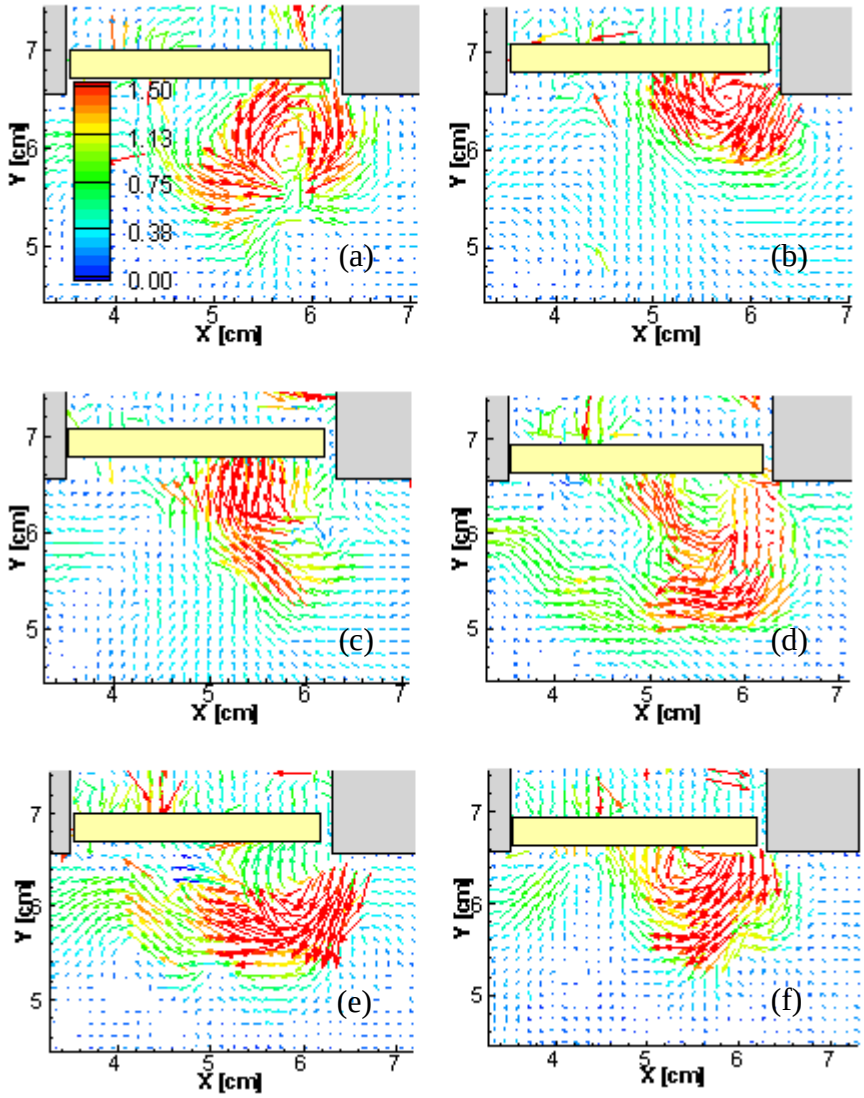


Şekil 3.46 : Açılı jetin (a) 6. orijinal, (b) 6. doldurulmuş, (c) 15. orijinal, (d) 15. doldurulmuş, (e) 25. orijinal ve (f) 25. doldurulmuş anlık hız alanları [cm/s].

3.11.2 Vortekse ait PIV verisinin incelenmesi

Bölüm 3.3.3, ve Bölüm 3.9'da incelenen vorteks akışına ait PIV verisi de Kriging interpolasyonu ile iyileştirildiği takdirde, bu akış rejimine ait detaylı bilgi sunmaktadır. Özellikle bu akış rejiminin karmaşık yapıda olması ve hız bileşenlerinin tek bir yönde ilerlememesinden dolayı parçacık hareketinin tahmin edilememesi, Δt zaman aralığının daha düşük tutulmasını gerektirmektedir. Bununla birlikte diğer akış rejimlerine kıyasla ortaya çıkma ihtimali daha fazla olan gerçekçi olmayan

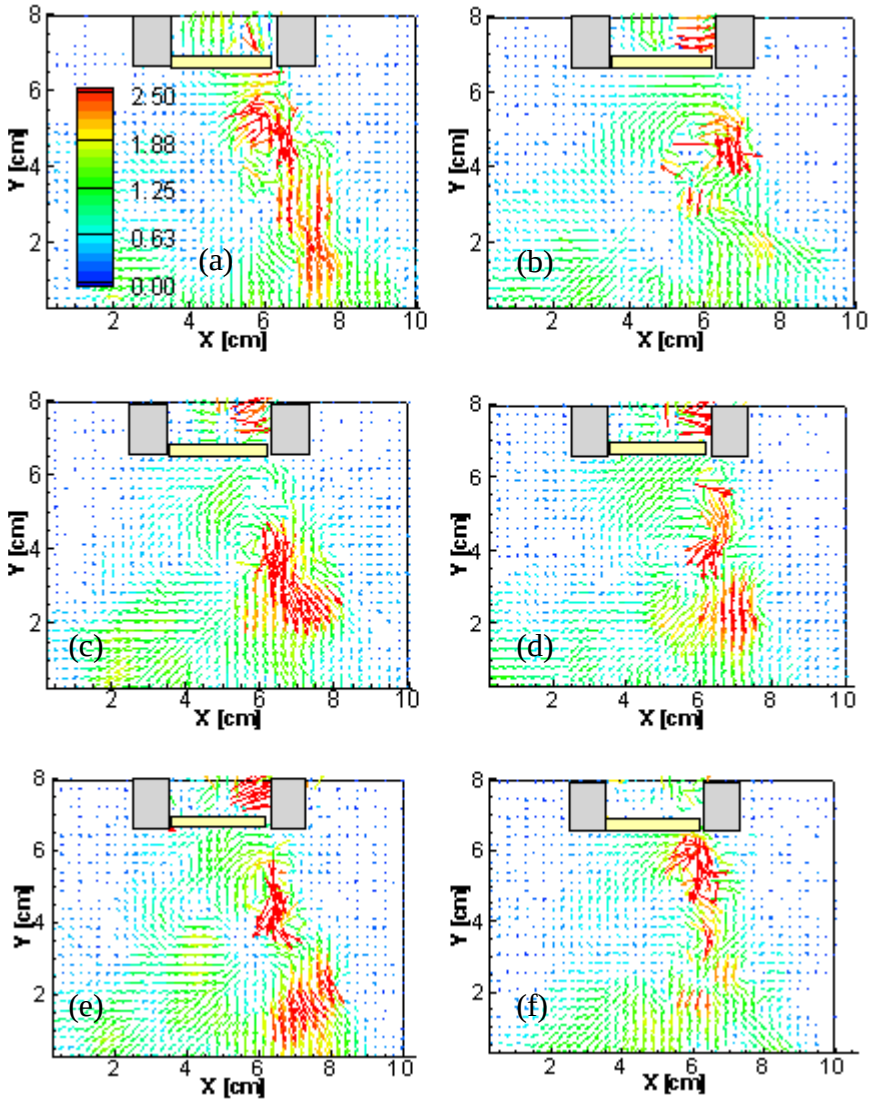
vektörlerin ayıklanması için belirlenen alt ve üst sınırların da birbirine yakın olması, akış alanını bir bakıma daha homojen kılacaktır. Bu örnekte vorteks merkezinde oluşan gerçekçi olmayan vektörleri minimumda tutmak için gradyen sınırı da *grad* = 6 olarak belirlenmiştir. Unutulmamalıdır ki, vorteks merkezinde boya çözeltisi yoğunluğunun fazla olması, lazer demetinin gelmesi esnasında yansımaya yol açmakta ve bu engellenmesi güç durum o bölgede istenmeyen gerçekçi olmayan vektör sayısının artmasına neden olmaktadır. Şekil 3.47 (a)-(f)'de vorteks akışına ait bir periyot içerisinde iyileştirilmiş anlık akış alanları görülmektedir.



Şekil 3.47 : Vorteksin (a) t = 0, (b) t = T/6, (c) t = T/3, (d) t = T/2, (e) t = 2T/3, (f) t = 5T/6'deki anlık hız alanları [cm/s].

3.11.3 Daimi olmayan düşey jete ait PIV verisinin incelenmesi

Bölüm 3.10.4'de kısaca anlatılmış olan düşey jet, hem disk genliğinin hem de plaka genişliğinin artmış olması sebebiyle daimi olmayan kaotik bir yapıya sahiptir. Bu akış rejiminin vorteks akışından farklı, büyük ve tekil vortekslerin aktüatör gövdesinden dışarı pompalanandıktan sonra bir jet gibi akışkan ortamında ileriye doğru atılmasıdır. Halbuki vorteks dendiğinde genellikle saat yönünde dönen ve plakanın hemen altında gelişen ve yeri hemen hemen sabit kalan bir akış tipinden bahsedilmektedir (bkz. Şekil 3.47). Şekil 3.48'de görülen anlık PIV akış alanlarında jet üzerindeki vorteks çekirdeklerinde gözlenen gerçekçi olmayan vektörlerin bulunduğu boşluklu bölgeler doldurulmuş ve akış alanı iyileştirilmiştir.



Şekil 3.48 : Daimi olmayan jetin (a) t = 0, (b) t = T/6, (c) t = T/3, (d) t = T/2, (e) t = 2T/3, (f) t = 5T/6'deki anlık hız alanları [cm/s].

Çizelge 3.3'de irdelenmiş akış rejimlerine ait toparlayıcı bilgiler yeralmaktadır.

Çizelge 3.3 : İşlenmiş PIV verilerine ait bilgiler (GOV = gerçekçi olmayan vektör).

Akış rejimi	Re	S_a	**Akış alanı sayısı**	Δt **[ms]**	Z **[p/cm]**	u_{maks} u_{min} **[p/s]**	v_{maks} v_{min} **[p/s]**	**G.O.V. [%]**
Açılı jet (Ş. 3.45)	65	0.10	28	75	125	9/-9	12/-12	1.36
Vorteks (Ş. 3.47)	107	0.15	32	30	125	7/-7	9/-9	3.70
D.olmy. j. (Ş. 3.48)	167	0.24	32	20	125	15/-15	15/-20	2.27

3.12 JaVA Kaynaklı Akış Rejimlerine Ait Akış Görüntüleme ve PIV Deneylerinin Karşılaştırılması

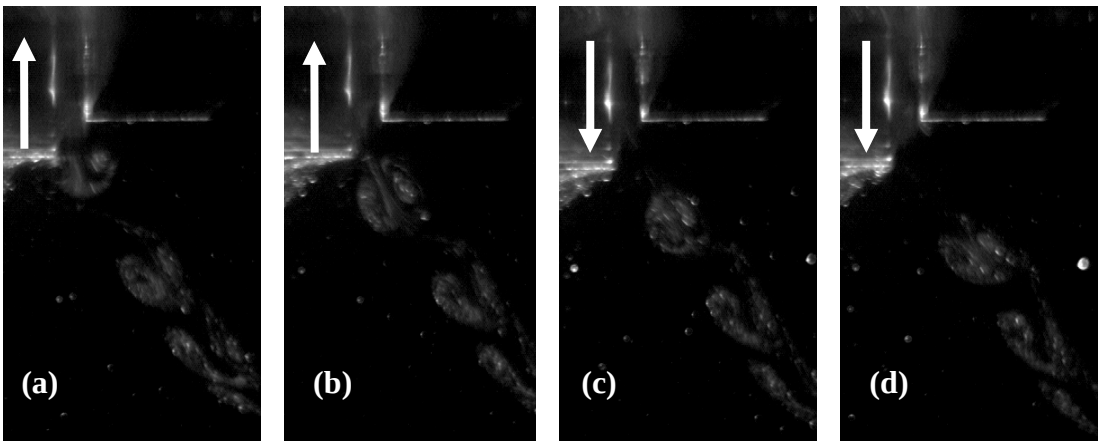
Bu bölümde temel JaVA kaynaklı akış tiplerinden olan ve Bölüm 3.3.5 ve Bölüm 3.6'da üzerinde durulan açılı jetlerin ve cidar jetinin yakından alınmış akış görüntüleme deneyleri ve PIV ölçümlerinin sonuçları karşılaştırılmış ve bir periyot içerisinde alınan anlık görüntüler üzerinden yorumlar yapılmıştır. PIV verileri ile zaman ortalamalı hız ve vortisite alanları oluşturulmuştur.

Bununla beraber akışkan davranışı plaka hareketine bağlı olarak incelenmiş ve hangi JaVA kaynaklı akış rejiminin sınır tabaka içerisinde en verimli şekilde akış ayrılmasını geciktirici yönde etki ettiği hareketsiz su ortamında yakından alınan PIV verileri yardımıyla ortaya konabilmiştir.

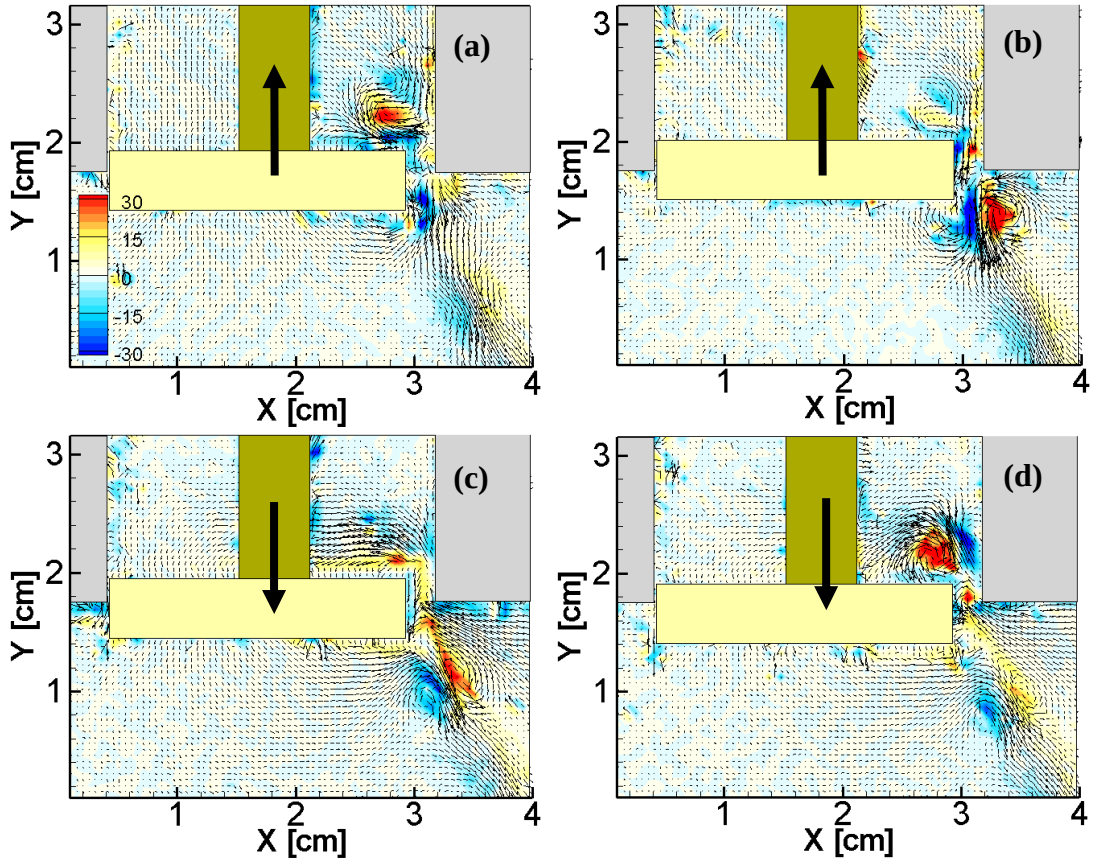
3.12.1 Sağa doğru açılı jetin incelenmesi

Aktüatör plakası konumunun JaVA gövdesinden yaklaşık 3 mm taşması durumunda (Konum I), JaVA kavitesinden sağa doğru açılı bir jet çıkmaktadır. Şekil 3.49(a)-(d)'de görüleceği gibi bir periyot (t = T) içerisinde ele alınan anlık akış görüntüleme deneyinde başlangıçta yani t = 0 anında aktüatör plakası yukarı hareket etmektedir ve akışkan geniş aralıktan dışarıya basılmaktadır. Çeyrek periyot geçtiği zaman t = T/4 anında plaka yukarı doğru hareketine devam etmekte ve bu esnada birbirine zıt yönde dönen bir vorteks çifti geniş aralıktan çıkmaktadır. Periyodun yarısına gelindiğinde yani t = T/2 anında plaka aşağı doğru hareketine başlamıştır ve plaka alt yüzeyinde biriken akışkan gövde içine emilmektedir. Periyot içerisinde t = 3T/4 anına gelindiğinde emme fazı neredeyse tamamlanmıştır ve bir sonraki adımda gövde içerisinde plaka üzerinde beliren büyük bir vorteks ile basma fazı yeniden

başlayacaktır. Sağa doğru açılı jetin PIV deneyi sonucu elde edilen hız ve vortisite dağılımı Şekil 3.50 (a)-(d) arasında verilmiştir (Gunes ve diğ., 2009).



Şekil 3.49 : Sağa doğru açılı jetin (a) *t* = 0, (b) *t* = T/4, (c) *t* = T/2 ve (d) *t* = 3T/4 anlarında görüntüleri; oklar plaka hareketini temsil etmektedir.



Şekil 3.50 : Sağa doğru açılı jetin (a) *t* = 0, (b) *t* = T/4, (c) *t* = T/2 ve (d) *t* = 3T/4 anlarında hız ve vortisite alanları.

Renkler vortisiteyi belirtmekte olup, anlık vektörler akış yapısını ayrıntılı olarak göstermektedir. Saat yönündeki döngüler mavi (negatif vortisite), saatin ters yönündeki döngüler ise kırmızı (pozitif vortisite) olarak gösterilmiştir. Vorteks

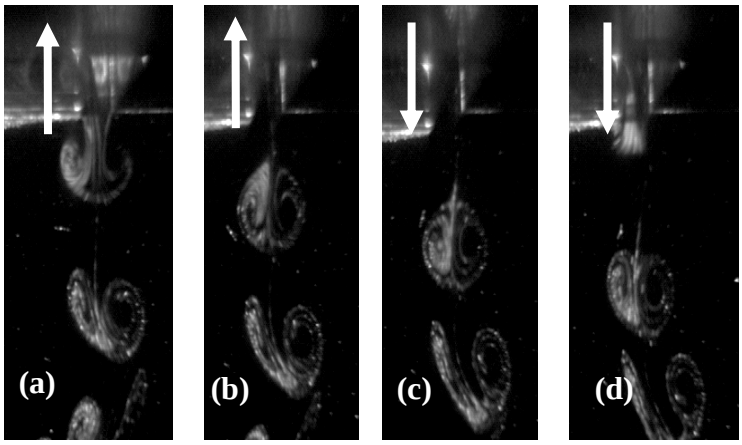
çiftinin jet üzerinde ilerlediği ve jetin momentumunun azalması ile renklerinin soluklaştığı (vortisitenin azaldığı) açıkça belli olmaktadır.

Vorteks alanı denklem **(3.27)**'ye göre hesaplanmış olup, akış dinamiği ve jet üzerindeki vorteks çiftleri hakkında ayrıntılı bilgi vermektedir.

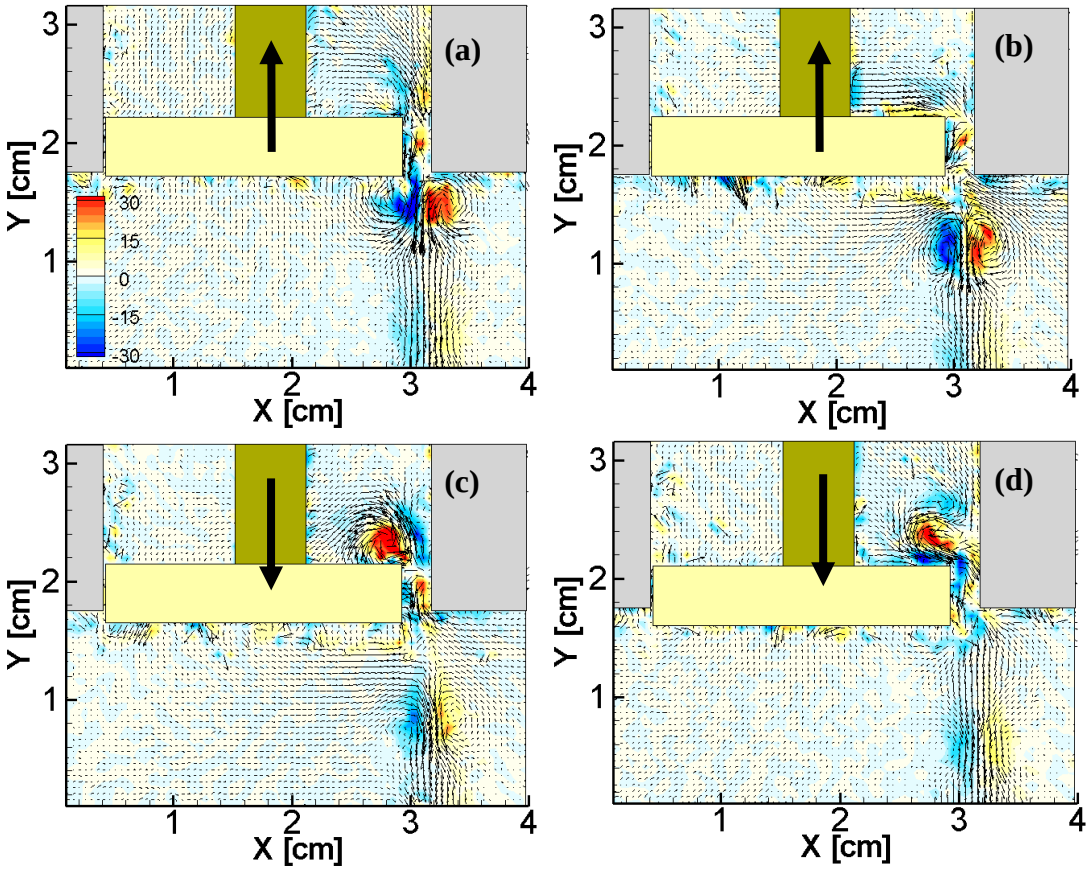
3.12.2 Serbest düşey jetin incelenmesi

Aktüatör plaka konumu Bölüm 3.12.1'de anlatılan duruma göre yaklaşık 2 mm içeri çekilirse (Konum I), serbest düşey jet oluşmaktadır (bkz. Bölüm 3.5.1). Bu durumda emme ve basma fazlarındaki akışkan hareketleri sağa doğru açılı jet ile benzerdir. Şekil 3.51 (a)-(d) arasında verilen anlık akış görüntülerinde bu hareketler rahatlıkla takip edilebilmektedir. Benzer şekilde vorteks çiftleri jet üzerinde plakaya dik açı yaparak ilerlemektedir ve akış bir periyot geçince kendini tekrar etmektedir.

Bu akış tipi Bölüm 3.5.1'de verilen anlık görüntüleri verilen akış tipinin aynısıdır, ancak bu bölümde incelenmek üzere seçilen periyodun birinci yarısında plaka yukarı hareket etmek suretiyle basma hareketi, ikinci yarısında plaka aşağı hareket etmek suretiyle emme hareketi yapmaktadır. Bu şekilde bir periyot içerisinde emme ve basma fazları gruplandırılarak olayın daha kolay anlaşılması sağlanmıştır. Şekil 3.52(a)-(d)'de bu akış alanlarına ait PIV hız ve vortisite alanları görülmektedir.



Şekil 3.51 : Serbest düşey jetin (a) t = 0, (b) t = T/4, (c) t = T/2 ve (d) t = 3T/4 anlarında görüntüleri; oklar plaka hareketini temsil etmektedir.



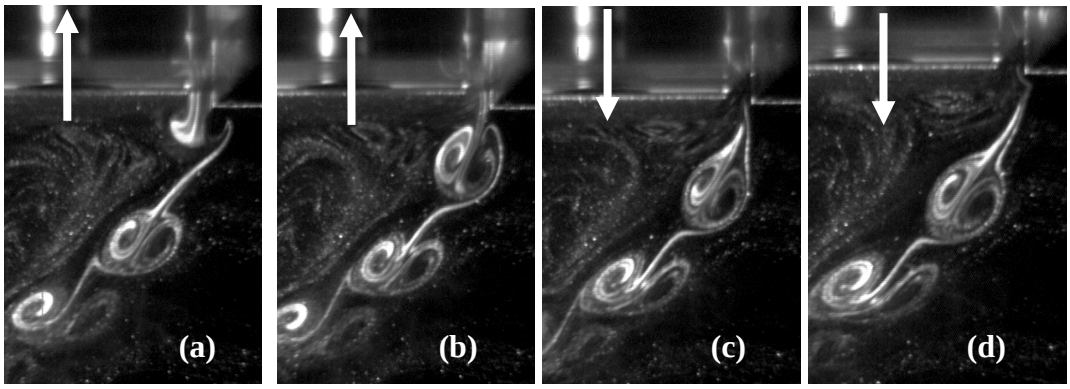
Şekil 3.52 : Serbest düşey jetin (a) *t* = 0, (b) *t* = T/4, (c) *t* = T/2 ve (d) *t* = 3T/4 anlarında hız ve vortisite alanları.

3.12.3 Sola doğru açılı jetin incelenmesi

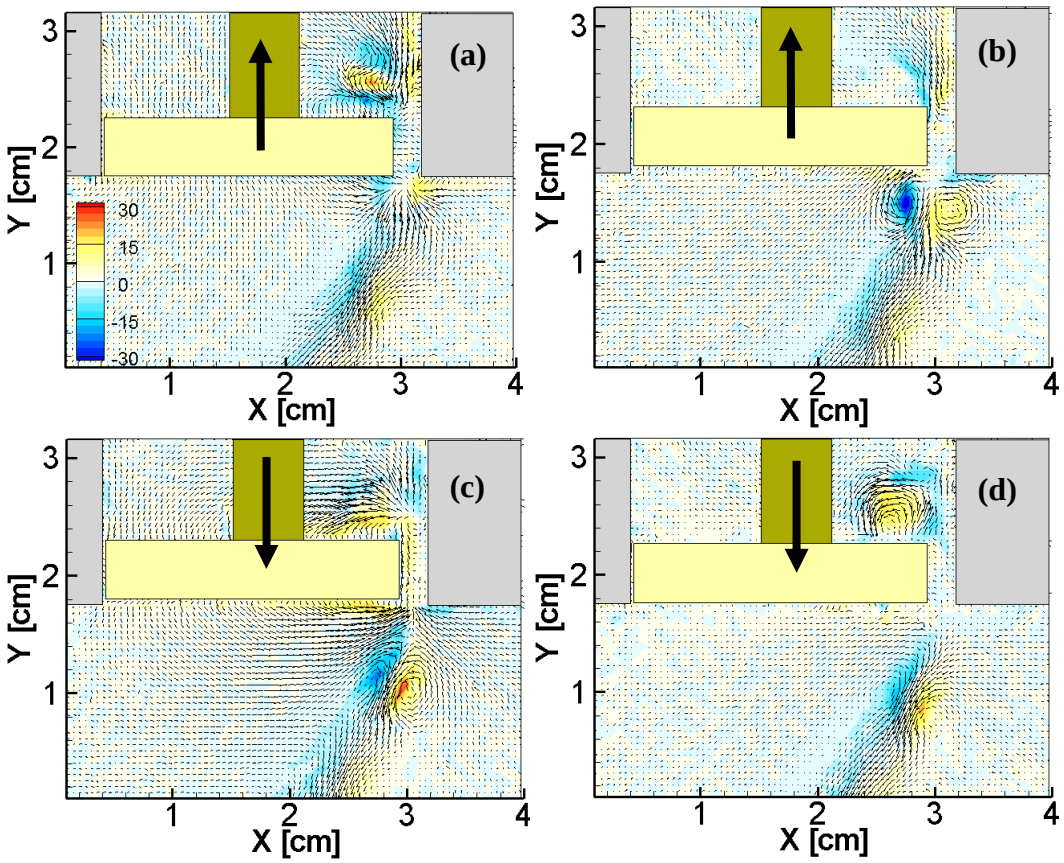
Plaka serbest düşey jet örneğindeki duruma göre biraz daha içeri çekilirse ve plaka sıfır konumu gövde ile aynı hizaya getirilirse, sola açılı jet oluşmaktadır.

Başlangıçta *t* = 0 anında, plakanın yukarı hareketi esnasında akışkan JaVA gövdesinden dışarı pompalanmaktadır. Bunu takip eden *t* = T/4 anında plaka yukarı ilerlemeye devam etmektedir ve vorteks çiftlerinin oluşumu tamamlanarak durgun akışkan ortamına atılmaktadır. Bu basma fazı *t* = T/2 anında sonlanmaktadır ve plaka aşağı hareketini sürdürüp emme fazını gerçekleştirmektedir.

Akışkanın yukarıda bahsedilen hareketleri sırasıyla Şekil 3.53 (a)-(d) ve Şekil 3.54 (a)-(d) akış görüntüleme deneylerinde ve PIV hız-vortisite alanlarında görülmektedir.



Şekil 3.53 : Sola doğru açılı jetin (a) t = 0, (b) t = T/4, (c) t = T/2 ve (d) t = 3T/4 anlarında görüntüleri; oklar plaka hareketini temsil etmektedir.



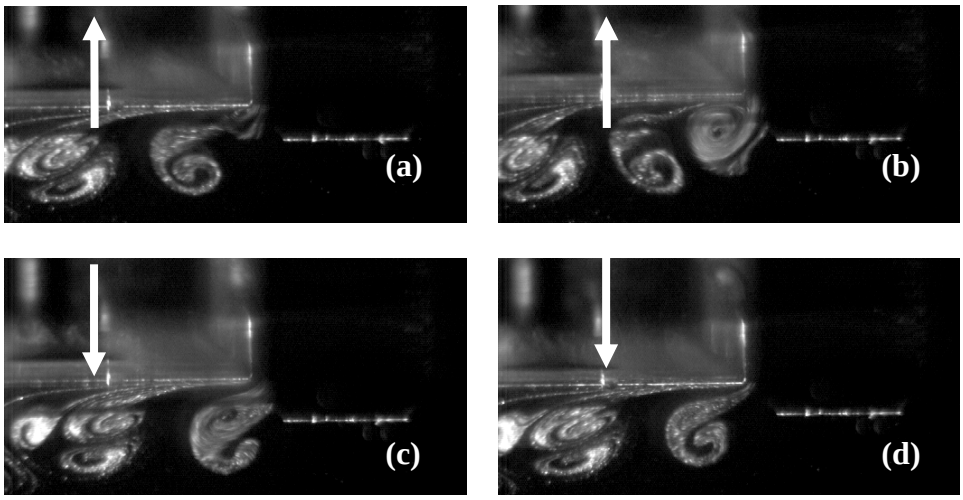
Şekil 3.54 : Sola doğru açılı jetin (a) t = 0, (b) t = T/4, (c) t = T/2 ve (d) t = 3T/4 anlarında hız ve vortisite alanları.

3.12.4 Cidar jetinin incelenmesi

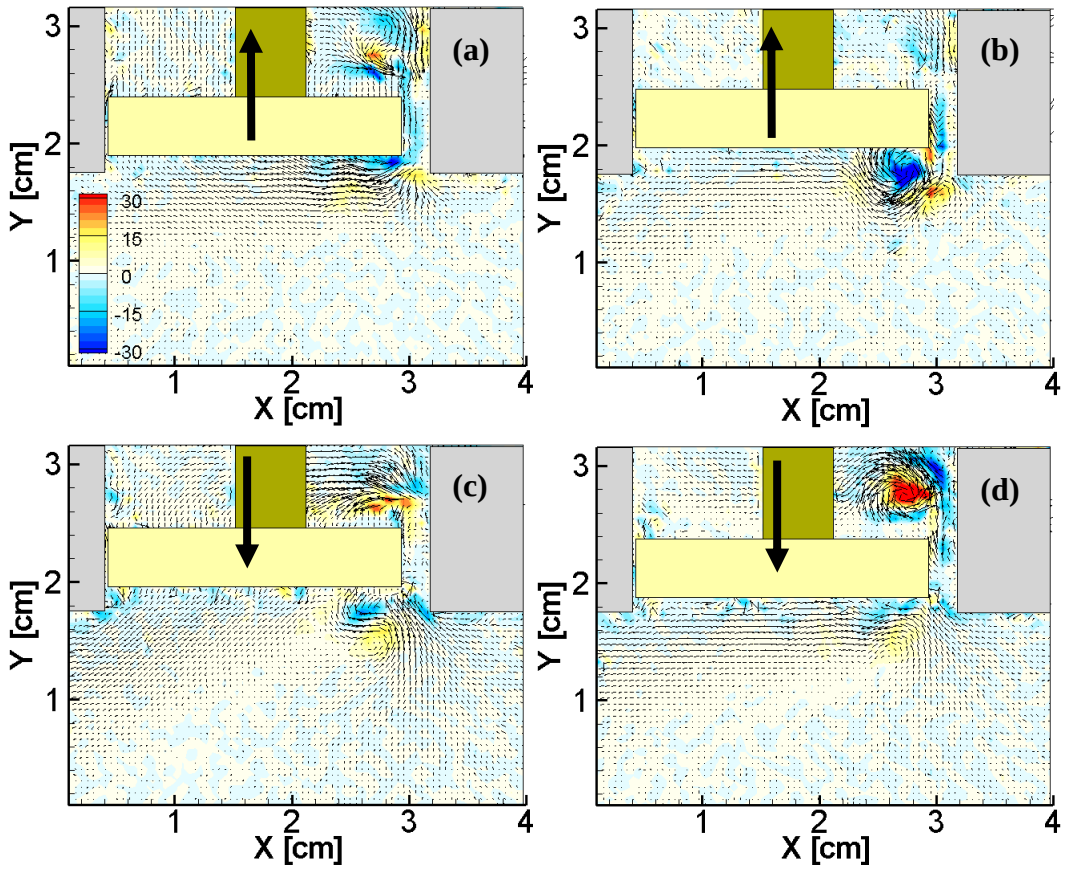
Sola açılı jetin oluştuğu durumdaki plaka konumu yaklaşık 2 mm daha gövde içine alınırsa ve plaka sıfır konumu tamamen gövde içerisinde olusa (Konum III), cidar jeti oluşmaktadır. Diğer açılı jetlerden farklı olarak plaka alt yüzeyinde yatay doğrultuda gelişen ve plakanın salınım hareketinden doğrudan etkilenen bu akış rejiminde diğer akış rejimlerinde gözlemlenen hareketler görülmektedir ancak jet akışını doğuran zıt

yönde dönen vorteks çiftileri değildir. Bu akış rejiminde geniş aralık çıkışında tekil vorteksler oluşmakta ve cidar jetini meydana getirmektedir.

Akışkanın yukarıda bahsedilen hareketleri sırasıyla Şekil 3.55 (a)-(d) ve Şekil 3.56 (a)-(d) akış görüntüleme deneylerinde ve PIV hız-vortisite alanlarında görülmektedir.



Şekil 3.55 : Cidar jetinin (a) t = 0, (b) t = T/4, (c) t = T/2 ve (d) t = 3T/4 anlarında görüntüleri; oklar plaka hareketini temsil etmektedir.



Şekil 3.56 : Cidar jetinin (a) t = 0, (b) t = T/4, (c) t = T/2 ve (d) t = 3T/4 anlarındaki hız ve vortisite alanları.

Bir periyot içerisinde sayısal hız ve vortisite alanları, akışkanın plaka hareketine bağlı olarak gövde içine emilmesini veya gövde dışına basılmasını mükemmel bir şekilde ortaya koymuştur. Bu bağlamda tek bir periyot bir basma bir de emme fazından oluşmaktadır ve aktüatörün emme ve basma esnasında hangi jet rejiminde sınır tabaka içerisinde maksimum momentumu sağlayacağı ancak bir periyot dahilinde bu fazların kendi içinde gruplandırılması ile mümkündür.

İncelenen akış rejimleriyle ilgili özetleyici bilgi Çizelge 3.4'de verilmiştir. Burada bütün akış rejimlerinde boyutlu parametreler aynı olduğu için *Re* ve S_a aynıdır. Bir periyot 33 adet anlık PIV akış alanından oluşmaktadır ve akış doğrultusuna uygun bir şekilde hız bileşenleri için alt ve üst sınırlar belirlenmişitir. PIV verisinin işlenmesinde gradyen değerleri de 6'dır. Toplam akış alanları içinde (77**x**61) yaklaşık % 20 oranında gerçekçi olmayan vektör bulunması bu PIV akış alanlarının yakından alınmış olmasından kaynaklanmaktadır, çünkü gerçekçi olmayan vektör oluşumuna neden olan yansımaların olduğu aktüatörün mil, plaka ve gövde kısımları yakın çekimde büyümekte ve akış alanında yaklaşık % 20'lik bir alana tekabül etmektedir.

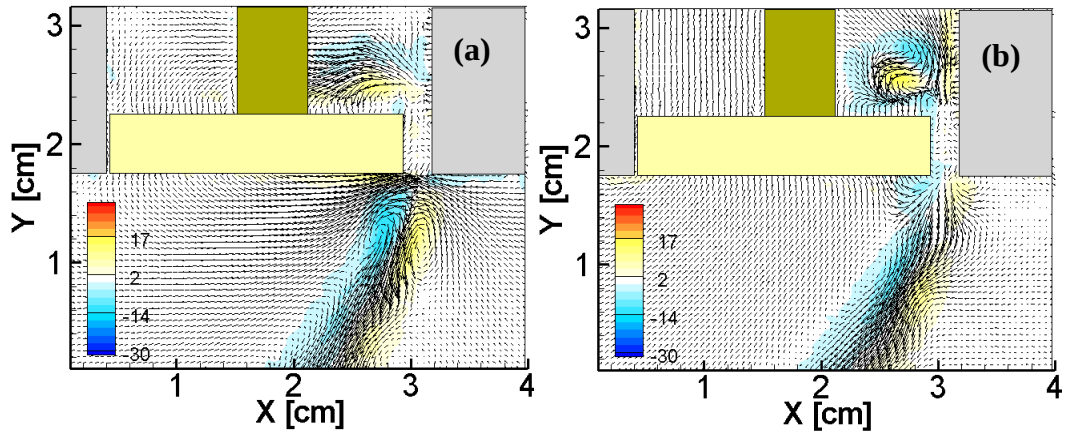
Çizelge 3.4 : Açılı jet rejimlerinin işlenmiş PIV verilerine ait bilgiler (p = piksel).

Akış rejimi	***Konum***	***Re***	S_a	**Akış alanı sayısı**	Δt **[ms]**	Z **[p/cm]**	u_{maks} u_{min} **[p/s]**	v_{maks} v_{min} **[p/s]**	**G.O.V. [%]**
Sağa aç. jet	I	101	0.16	33	10	314	11/-11	11/-15	20.43
Düşey jet	I	101	0.16	33	10	314	11/-11	11/-15	19.05
Sola aç. jet	II	101	0.16	33	10	314	9/-11	11/-11	20.30
Cidar jeti	III	101	0.16	33	10	314	9/-20	13/-13	16.72

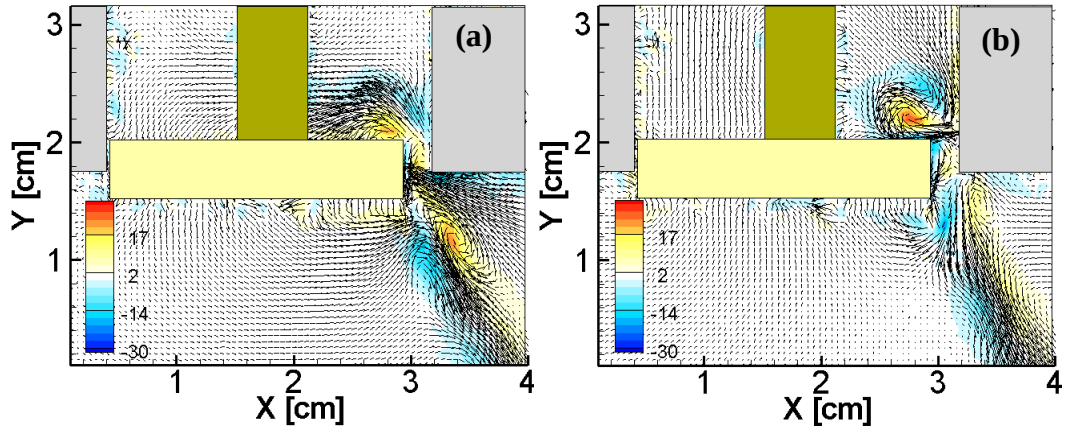
3.12.5 Açılı jetlerin emme-basma fazlarının bulunması

Bölüm 3.12.4'de detaylarıyla açıklanan ve bir periyot içerisinden belli anlarda ikişer adet seçilerek gösterilen emme ve basma fazları daha yakından incelenmiştir. Bu bağlamda 33 adet PIV akış alanında emme ve basma fazları kendi aralarında gruplandırılıp, hız ve vortisite alanlarının zaman ortalamaları hesaplanmıştır. Sola açılı jetin akış alanında 17 adet emme, 16 adet basma hareketi mevcuttur. Bu fazların zaman ortalamaları alınmıştır ve sırasıyla Şekil 3.57(a) ve (b)'de gösterilmiştir. Emme ve basma fazları hız vektörleriyle ortaya konmuştur. Net sıfır kütle debili aktüatörün yarattığı sıkıştırılamaz akışta kütlenin korunumu ilkesi uyarınca geniş aralıkta net kütlesel debinin sıfır olduğu açıkça görülmektedir (Gunes ve diğ., 2009).

Şekil 3.58(a) ve (b)'de ise sağa açılı jete ait zaman ortalamalı emme ve basma akış alanları verilmiştir.



Şekil 3.57 : Sola açılı jetin zaman ortalamalı (a) emme, (b) basma fazları

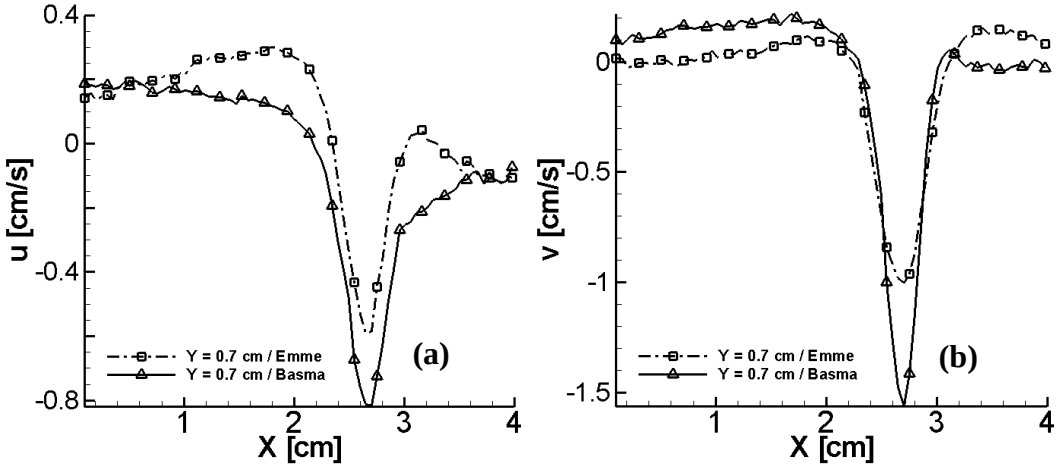


Şekil 3.58 : Sağa açılı jetin zaman ortalamalı (a) emme, (b) basma fazları.

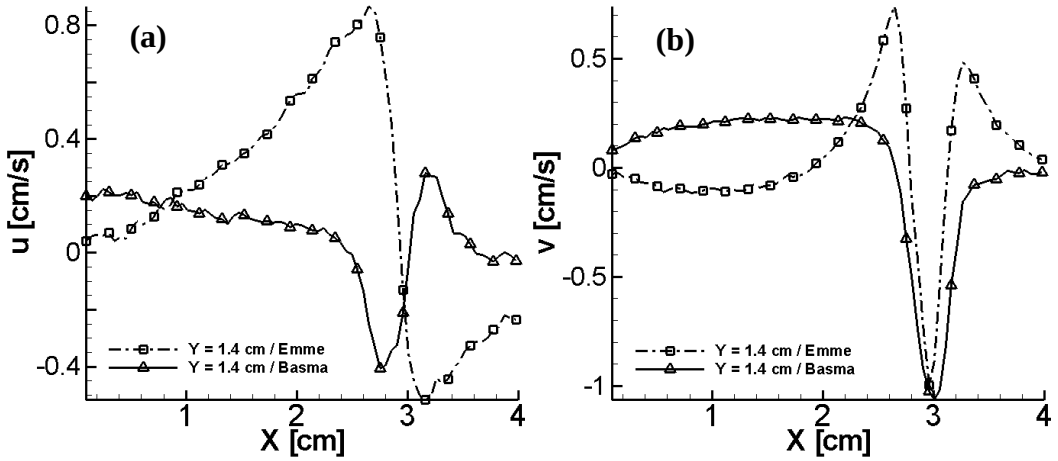
Faz ortalaması alınmış akış alanlarının hesaplama ağında düşey eksen boyunca alınan kesitlerdeki hız dağılımları incelenmiştir. Sola doğru açılı jet üzerinde Y = 0.7 cm ve Y = 1.4 cm kesitleri üzerinde hız bileşenlerinin değişimi incelenmiştir. Şekil 3.59 (a) ve (b)'de *u* ve *v*-hız bileşenlerinin Y = 0.7 cm'deki değişimi, Şekil 3.60(a) ve (b)'de ise *u* ve *v*-hız bileşenlerinin Y = 1.4 cm'deki değişimi verilmiştir.

Burada jetin etkili olduğu bölge dikkate alınmış ve sadece o bölge içindeki değişim gözlemlenmiştir. Y = 1.4 cm'den alınan kesit, geniş aralığa yakın olduğundan emme ve basma hız profilleri arasında önemli ölçüde bir fark vardır, ancak Y = 0.7 cm'deki değişim kesidin geniş aralığa göre konumunun uzak olması nedeniyle daha az belirgindir. Şekil 3.60(a)'da Y = 1.4 cm'deki kesitten alınan hız profilinde X = 3 cm civarında emme ve basma fazlarında *u*-hızının profilleri sanki-simetriktir ancak aynı kesitte jet ilerledikçe emme ve basma fazlarının şiddeti azalmakta ve hız profilleri

birbirine yaklaşmaktadır. Şekil 3.59(a)'da hız profili, yatay eksende orijine doğru gidildikçe yaklaşık 0.2 cm/s gibi pozitif bir değerde sonlanmaktadır, bunun nedeni ana jetin aşağıya doğru ilerlemesi esnasında plaka altındaki akışkan kütlesinden yukarı doğrultudaki besleme hareketidir (bkz Şekil 3.57 (a) ve (b)). Diğer bir deyişle aktüatörden akışkana iletilen mekanik enerji, yoğunlaştırılmış bir kütle debisi ve jet momentumu içeren jet hızı profili doğurmaktadır.



Şekil 3.59 : Sola açılı jetin Y = 0.7 cm'deki (a) *u*-hızı profili, (b) *v*-hızı profili.

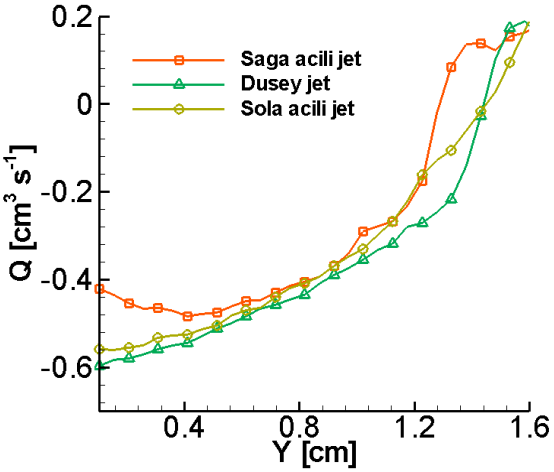


Şekil 3.60 : Sola açılı jetin Y = 1.4 cm'deki (a) *u*-hızı profili, (b) *v*-hızı profili.

Sola açılı, düşey ve sağa açılı jetlerin kantitatif karşılaştırmasını yapmak için jet debisi ve momentum akısı hesaplanmıştır. Birim derinlik başına debi $Q(y)$, **(3.34)**'deki gibi hesaplanmaktadır. PIV sayısal akış alanında jetin etkin olduğu bölgenin sınırları [c, d] gözönünde tutularak jet hızının düşey doğrultuda alınan integrali jet akışının sağladığı debiyi verecektir.

$$Q(y) = \int_{c}^{d} v(x,y)\,dx \qquad \textbf{(3.34)}$$

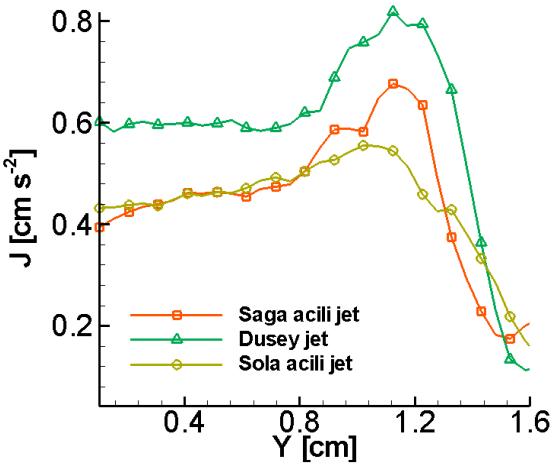
Cidar jeti dışında kalan açılı jetlerin ilerledikleri doğrultu dikkate alınarak integral sınırları belirlenmiştir. Bu sınırlar sağa doğru açılı jet için [c = 2.6 cm, d = 4.0 cm]; düşey jet için [c = 2.6 cm, d = 3.8 cm] ve sola doğru açılı için ise [c = 1.8 cm, d = 3.5 cm] olarak belirlenmiştir. Şekil 3.61'de jet rejimlerinin ilgili intervaller içerisinde kalmak suretiyle **(3.34)** uyarınca hesaplanması ile elde edilen ortalama debileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Eğrilerin negatif değerleri göstermesi jet akışlarının yönünden kaynaklanmaktadır. Her üç durumda da jetin ilerleme yönünü takiben (azalan Y-yönünde) jetin durgun suyu harekete geçirmesi ile jetin hacimsel debisi artmaktadır. Sağa açılı jetin debisinin Y = 0 ile 0.6 cm arasındaki bölgede azalmasının nedeni; akışın fiziği ile ilgili olmayıp, jetin bu bölgede PIV ölçüm penceresinin dışına taşarak tam olarak gözlemlenememesidir, dolayısıyla sağa açılı jetin debisinin de izleyeceği yol sola açılı jetinki ile benzer olacaktır. Bu tablodan çıkan sonuç, serbest düşey jetin izlediği yolun diğerlerininkine oranla daha kısa olmasından ötürü, bütün açılı jetler içinde en fazla debiyi sağladığıdır.



Şekil 3.61 : Açılı jet rejimlerinin ortalama hacimsel debilerinin karşılaştırılması.

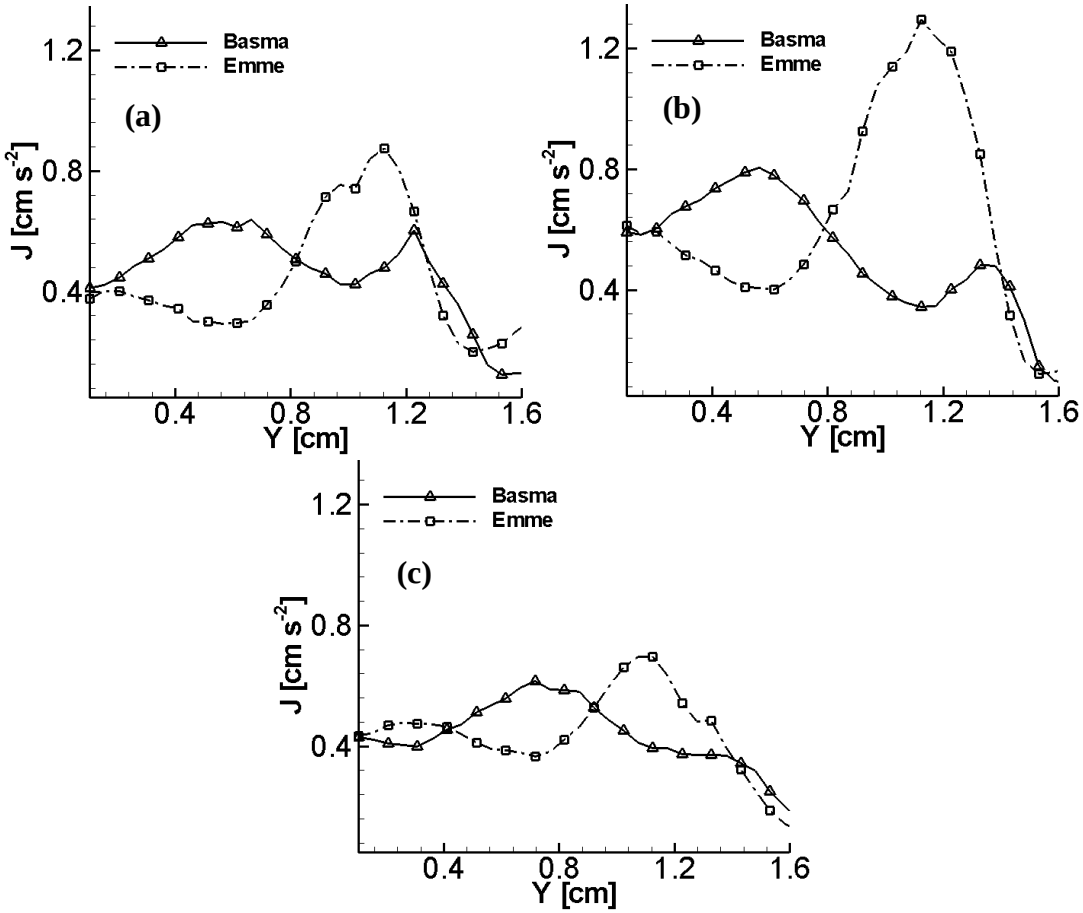
Jetlere ait momentum akıları da benzer şekilde ilgili jetlerin akış alanlarının sınırları içinde kalmak üzere **(3.35)**'deki gibi hesaplanır. Burada $J(y)$, momentum akısını vermektedir. Şekil 3.62'de her üç akış rejimi için karşılaştırmalı olarak ortalama momentum akıları bir başka deyişle birim kütle başına sağladıkları kuvvetler verilmiştir. Ortalama momentum akısı, emme ve basma fazlarının momentum akılarının ortalaması alınarak bulunmuştur.

$$J(y) = \int_{c}^{d} \rho v^2 (x,y)\, dx \qquad \textbf{(3.35)}$$



Şekil 3.62 : Açılı jet rejimlerinin ortalama momentum akılarının karşılaştırılması.

Şekil 3.62'deki karşılaştırmadan görüldüğü üzere serbest düşey jetin sağladığı momentum akısı maksimumdur. Sağa açılı, düşey ve sola açılı jet rejimlerinin zaman ortalamalı emme ve basma fazlarının momentum akıları sırasıyla Şekil 3.63 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir.



Şekil 3.63 : (a) Sağa açılı jetin, (b)düşey jetin, (c)sola açılı jetin emme ve basma fazlarının zaman ortalamalı momentum akıları.

Jet momentum akılarının emme ve basma için Y-doğrultusunda faz kaymalı olduğu görülmektedir. Bütün jet rejimleri için genel çıkarsama, geniş aralık altındaki bir bölgede jet momentum akısı artmaktadır ancak şiddeti salınım yaparak azalmaktadır. Jetin yeterince ilerlemesi durumunda, jet akışlarının emme ve basma fazlarının momentum akıları belli bir değerde birleştirmektedir.

3.13 Proper Orthogonal Decomposition (POD)- Uygun Ortogonal Ayırım

POD; çok boyutlu sistemlerin daha düşük boyutlarda yaklaşık olarak ifade etmede kullanılabilecek güçlü bir yöntemdir. Bu veriler genellikle deneylerden ve sayısal simülasyonlardan gelen verilerdir. Bu yöntem, çok boyutlu sistemin baskın bileşenlerinin bulunmasında etkili bir araçtır ve mod setini kullanarak akış alanının istenen hassaslıkta gösterilmesine olanak verir. Böylece POD ile, bir akış alanının modellenmesi ve kontrolü düşük boyutlu bir şekilde gerçekleştirilebilir. Ayrıca, POD bir deney veri setinin çözünürlüğünün arttırılmasında ve parazitik etkinin (gürültü) filtre edilmesinde kullanılabilir.

Lumley (1967); POD'yi ilk olarak akışkanlar mekaniğinde türbülanslı akışların temel yapılarının çıkarılmasında kullanmıştır. Bu yöntem, akış alanının en enerjitik yapılarını (özdeğer fonksiyonlarını) çıkarmada başarıyla kullanılmıştır.

POD uygulaması yüksek çözünürlükteki akış alanlarının eksikliğinden dolayı senelerce gerçekleştirilemedi. POD uygulamasının gecikmesindeki bir diğer neden de iki ve üç boyutlu akış alanlarında özdeğer fonksiyonlarının hesaplanmasının çok zaman alıcı olmasıydı. Günümüzde PIV ve DNS gibi sayısal ölçüm sistemlerinin gelişimiyle yüksek çözünürlükte veri setleri elde edilebilmekte ve böylelikle karmaşık akış alanları için POD uygulaması yapılabilmektedir.

POD özdeğer fonksiyonları (eigenfunctions) akışın esas dinamiğini yansıtmakta olup, akış fiziğinin anlaşılmasına ve kararsızlıkların ortaya çıkarılmasına imkan sağlar. Bir başka deyişle POD, akış alanına ait anlamlı (coherent) yapıların ortaya çıkarılmasında kullanılacak optimal temel fonksiyonların elde edilmesi için başvurulabilecek bir metodolojidir. POD ile en enerjitik özdeğer modları (eigenmodes) tanımlanır ve deneysel veri seti mod sayısına göre sıkıştırılabilir. Dolayısıyla POD modları, zamana bağlı değişim gösteren akış alanlarının dinamik

davranışları hakkında bir fikir verdiği gibi konum-zaman ilişkili anlamlı yapıları da meydana getirir (Sahan ve diğ., 1996).

Türbülanslı akış kontrolünde POD, anlamlı yapıların ortaya çıkarılmasında kullanılabilmektedir. Türbülanslı akışlarda kararlılık analizinde gözönünde tutulması gereken düzenli yapıların türbülansın içine gömülü olması nedeniyle, bu yapıların tanımlanması ve filtre edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle deneysel verilerden elde edilen akış yapısına göre farklı yaklaşımlarla anlamlı yapılar elde edilebilir (Bonnet, 2009).

PIV'yi de içeren akış görüntüleme deneylerinden sağlanan verilerin incelenmesinde koşullu ve koşulsuz yaklaşımlar mevcuttur. PIV verilerinin koşullu incelenmesinde çalkantı seviyeleri, değişken integrasyonu, zaman-konum ortalamalı akış alanları, akış görüntüleme, vorteks çekirdeği tanımlama fonksiyonları gibi yaklaşımlar mevcuttur. Bunun yanında konum-zaman korelasyonu ve frekans spektrumu analizi, filtreleme ve POD gibi koşulsuz yaklaşımlarla da PIV verileri incelenebilir (Bonnet, 2009).

Karlhunen-Loeve yöntemi olarak da adlandırılan POD'nin akışkanlar mekaniği ile ilgili araştırmalarda pekçok başarılı uygulaması mevcuttur. Rempfer ve diğ., (1993), POD ile düz bir plaka üzerindeki türbülanslı sınır tabakanın içerisinde gizli olan üç boyutlu düzenli anlamlı yapıları ortaya çıkarmış ve bu anlamlı yapıların özdeğer fonksiyon çiftleri şeklinde gösterilebileceğini ortaya koymuştur.

Berkooz ve diğ., (1993), POD ile türbülanslı akışın analizini yapmış ve kendini tekrarlayan bir şekilde konumsal özellik gösteren anlamlı yapıların çıkarılmasında rasyonel bir yöntem olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Reichert ve diğ., (1994), POD'yi kare kesitli bir kanal içerisindeki sıkıştırılamaz türbülanslı akışa uygulamış ve modal enerji seviyesinin tek bir baskın özdeğer fonksiyonuna göre yavaş yavaş azaldığını göstermiştir. POD yöntemi ile akış alanındaki boşluklu alanlar en küçük kareler yöntemi ile tahmin edilebilmiştir (Everson ve Sirovich, 1995). POD-Kriging meta-algoritması içeren yöntemler, veri iyileştirilmesinde ve boşluklu alanların doldurularak akış alanının zenginleştirilmesinde başarıyla uygulanmıştır (Gunes ve diğ., 2006). Sirovich (1987) tarafından geliştirilen anlık (snapshot) POD adı verilen versiyon iki ve üç boyutlu akış alanlarının analizinde etkin bir şekilde uygulanmaktadır (Venturi ve diğ., 2004).

Deneysel ve sayısal yoldan elde edilen anlık veriler POD'nin başlangıç noktasını oluşturur. Zamana bağlı hız alanlarının anlık verilerinin sayısı (*M*), genellikle bir periyot için eşit zaman aralıklarında alınır. Zamana göre değişen hız bileşenleri lineer bir şekilde birleştirilerek, hız için özfonksiyon ifadesi **(3.36)**'daki gibi oluşturulur. Bu denklemde *M*, toplam anlık akış alanı sayısını; A_{ki} ,**(3.37)**'de verilen *C* korelasyon matrisinin *k.* özvektörlerinin elemanlarını ifade eder. **(3.37)**'deki λ ise özdeğerdir.

$$\vec{\phi}_k(x,y) = \sum_{i=1}^{M} A_{ki}\vec{V}(x,y,t_i) \qquad \textbf{(3.36)}$$

(3.37)'de verilen *C* matrisleri, hız alanına ait vektörel değerler kullanılarak **(3.38)**'deki şekli alır.

$$CA = \lambda A \qquad \textbf{(3.37)}$$

$$C_{ij} = \frac{1}{M}\iint \vec{V}(x,y,t_j)\vec{V}(x,y,t_j)\,dxdy \qquad \textbf{(3.38)}$$

Hız alanları için oluşturulan *C* matrisleri simetrik ve pozitif belirli olduklarından dolayı özdeğerler gerçek pozitif sayılardır. Bu nedenle *C* matrisinin bütün özdeğerlerini büyükten küçüğe doğru sıralamak mümkündür. Berkooz ve diğ., (1993); bu özdeğerlerin toplamının akışa ait toplam enerjiye karşılık geldiğini ve her bir özdeğerin ilgili özfonksiyonun toplam enerjiye katkısını temsil ettiğini göstermiştir. Bu sıralama ve bağıntı **(3.39)** ve **(3.40)**'da sırasıyla verilmiştir.

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \ldots\ldots \geq \lambda_M \geq 0 \qquad \textbf{(3.39)}$$

$$\sum_{i=1}^{M} \lambda_i = E_T \qquad \textbf{(3.40)}$$

Bu nedenle, POD en enerjik özdeğer fonksiyonlarının tanımlanması için objektif bir yöntemdir. POD ile elde edilmiş özfonksiyonlar bir seri açılımında kullanılarak, hız alanlarının bileşenleri Denklem **(3.41)**'deki gibi ifade edilir. Burada *N* seri açılımlarında alınan en enerjik özfonksiyon sayılarını gösterir ve genellikle $N<<M$ bağıntısı geçerlidir. Özfonksiyonların ortonormal olmasından faydalanarak, **(3.41)**'de POD ile elde edilen özfonksiyonların zamana bağlı açılım katsayısı hesaplanabilir. Zamana bağlı açılım katsayısının genel ifadesi **(3.42)**'de verilmiştir, bu ifade yeniden oluşturma (reconstruction) denklemi olarak adlandırılır.

$$\vec{V}(x,y,t) = \sum_{k=1}^{N} a_k(t)\vec{\phi}_k(x,y) \quad \textbf{(3.41)}$$

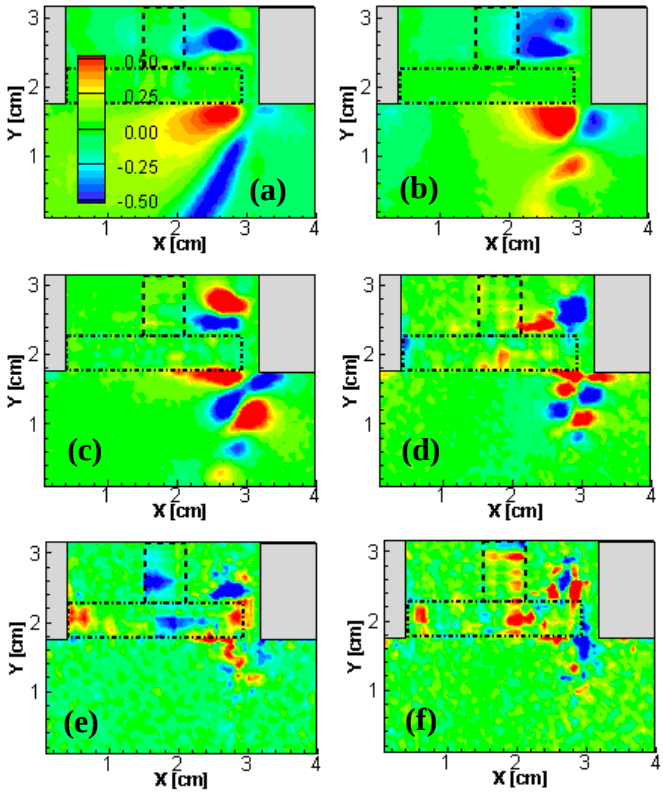
$$a_k(t) = \iint \vec{V}(x,y,t)\vec{\phi}_k(x,y)\,dxdy \quad k = 1,2,..N \quad \textbf{(3.42)}$$

Bu tez kapsamında pekçok PIV verisine POD uygulanmış ve sonuçları incelenmiştir. Ancak bu veritabanının POD ile sayısal olarak işlenebilmesi için akış alanlarındaki gerçekçi olmayan vektörlerin atılması ile oluşan boşluklar Kriging interpolasyonu ile doldurulmuştur. Aynı parametre kombinasyonunda elde edilen bir periyot içerisinde eşit zaman aralıklı M = 33 adet anlık akış alanı elde edilmiştir. POD analizi temel açılı jet akışlarına uygulanmış ve bu kapsamda herbir akış rejiminin açılım katsayıları, yüzdelik enerji içerikleri ve *rms*-hataları hesaplanmıştır, ancak *u* ve *v*-hızı bileşenlerinin POD modları ve yeniden oluşturma sonuçları sadece sola açılı jet için temsili olarak gösterilmişitir.

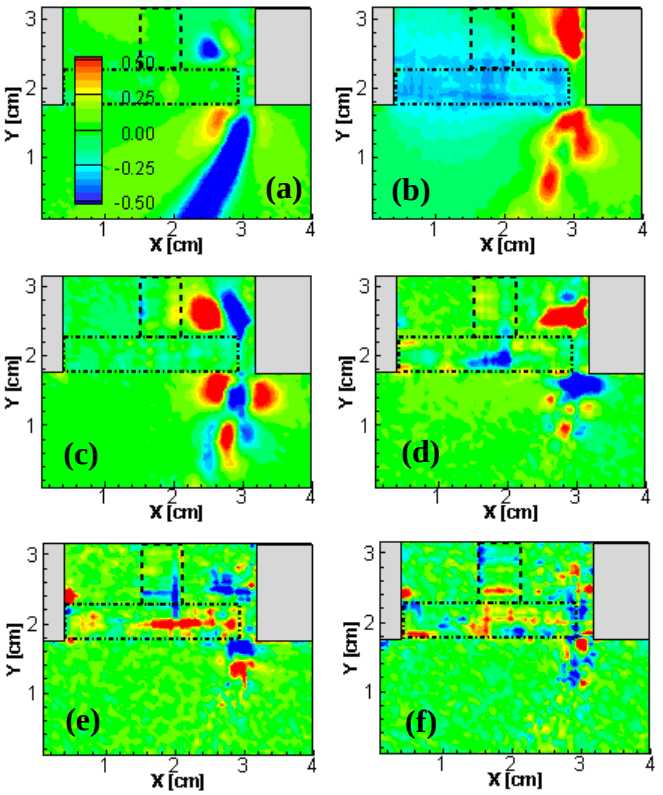
Burada dikkat edilmesi gereken husus, POD analizinin akış alanına doğrudan mı yoksa akış alanına ait çalkantı bileşenine mi uygulandığıdır. POD, akışın dinamik yapısını inceleme ve modelleme amacı ile genellikle çalkantı bileşine uygulanır. Bu durumda zaman-ortalamasının göz önüne alınması gerekli değildir. Ancak, akışı yeniden oluşturma ve modelleme amacı güttüğümüzden, akış alanına doğrudan uygulamak yeterli olacaktır. Bu durumda, akışa ait 1. POD modu, akışın zaman-ortalamasıdır; mod sayısı arttıkça, akışa ait detaylı yapılar ortaya çıkmaktatır. Sonuç olarak POD her açılı jet rejimine başarıyla uygulanmış ve yeniden oluşturma ile seçilen anlık görüntü oluşturulmuştur.

Şekil 3.64 (a)-(f)'de *u*-hız bileşeninin POD modları ve Şekil 3.65 (a)-(f)'de *v*-hız bileşeninin POD modları verilmiştir. POD modları 33 tane anlık akış alanını kullanarak elde edilmektedir ve her birinde plaka konumu farklıdır dolayısıyla JaVA'nın plaka ve mil kısmı için noktalı çizgilerle temsili bir gösterim yapılmıştır.

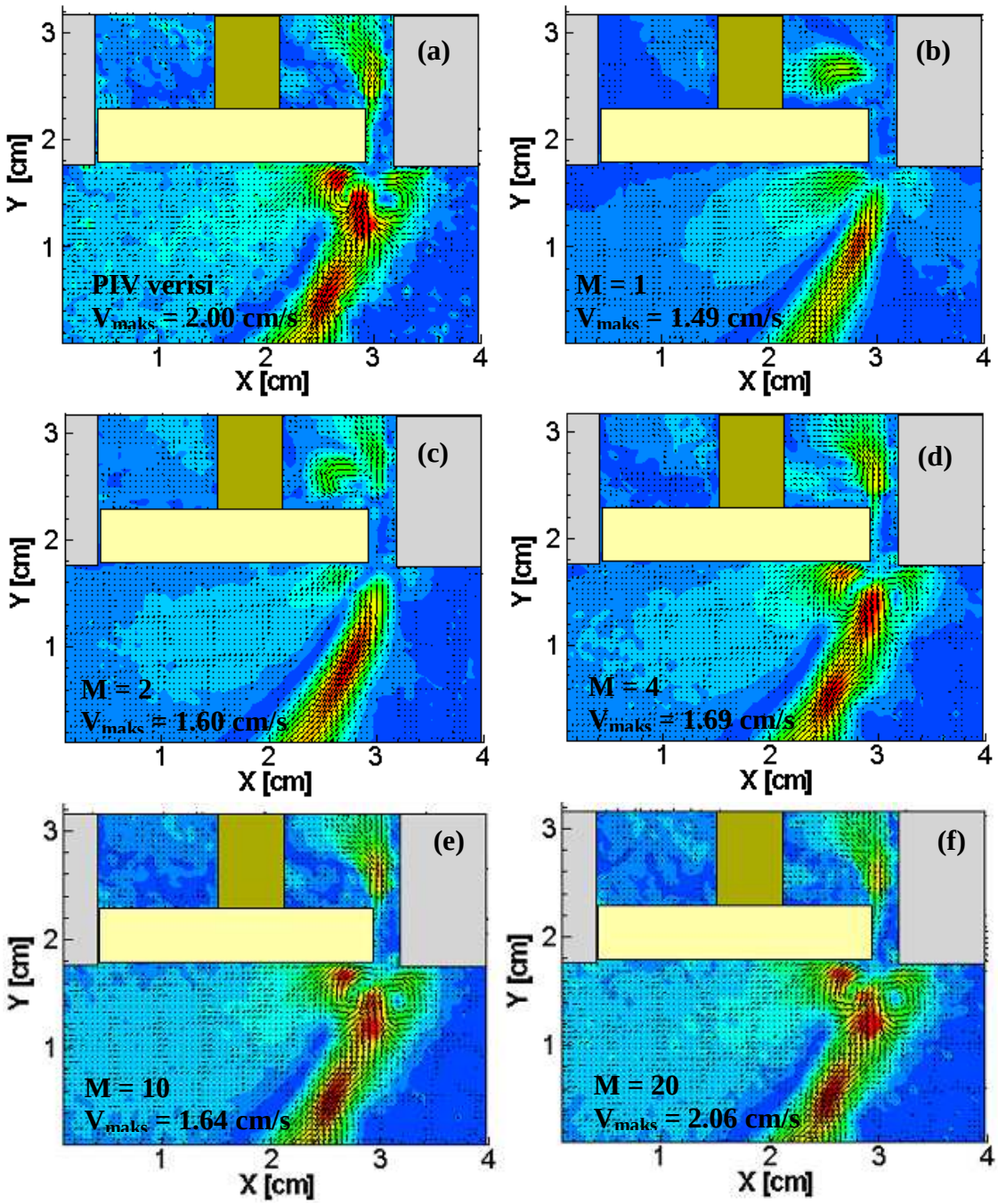
Yeniden oluşturma formülasyonu ile veri tabanı içerisinde yeralan herhangi bir akış alanı tekrar oluşturulabilir, dolayısıyla 25. anlık akış alanına tekabül eden (t = 3T/4) anındaki akış alanı tekrar oluşturma ile elde edilmiştir. Şekil 3.66'da artan mod sayıları için 25. anlık akış alanının tekrar oluşturma sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 3.64 : Sola açılı jetin *u*-hız bileşeninin modları: (a) M = 1, (b) M = 2, (c)M = 3, (d) M = 4, (e) M = 10, (f) M = 20.



Şekil 3.65 : Sola açılı jetin *v*-hız bileşeninin modları: (a) M = 1, (b) M = 2, (c)M = 3, (d) M = 4, (e) M = 10, (f) M = 20.



Şekil 3.66 : Sola açılı jetin hız vektörlerinin yeniden oluşturulması: (a) PIV verisi (b) M = 1, (c) M = 2, (d)M = 4, (e) M = 10, (f) M = 20.

Yeniden oluşturmada ortaya çıkan en küçük kareler hatası (*rms*) mod numarası arttıkça azalmakta ve yeniden oluşturulan hız alanları M = 20 olduğunda pratik olarak aynen elde edilmektedir. *Rms* hataları Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Özdeğer fonksiyonlarında kullanılan özdeğerler incelendiğinde, ilk mod için olan özdeğerin en büyük olduğu ve bu değerlerin giderek azaldığı görülmüştür. Bir başka ifade ile yüzdelik enerji içeriği mod numarası arttıkça azalmaktadır. Her durumda ilk

20 modda kümülatif enerjinin % 88'den fazlasına ulaşılmaktadır. Açılı jetlere ait kümülatif enerji içerikleri yüzde olarak Çizelge 3.6'da verilmiştir.

PIV verisine uygulanan POD analizi ile akış rejimine ait anlamlı yapılar mod sayısına bağlı olarak elde edilebilir ve yeniden oluşturma denklemleri kullanılarak veri seti içinde bulunan herhangi bir akış alanı tekrar oluşturulabilir.

Çizelge 3.5 : İlk 20 POD modu için rms hataları.

	Sağa açılı jet		**Düşey jet**		**Sola açılı jet**		**Cidar jeti**	
Mod	**rms(u)**	**rms(v)**	**rms(u)**	**rms(v)**	**rms(u)**	**rms(v)**	**rms(u)**	**rms(v)**
1	0,312	0,441	0,292	0,410	0,211	0,203	0,267	0,313
2	0,314	0,429	0,262	0,390	0,186	0,168	0,256	0,290
3	0,296	0,363	0,227	0,351	0,126	0,125	0,204	0,234
4	0,297	0,361	0,229	0,347	0,125	0,125	0,207	0,227
5	0,302	0,353	0,215	0,334	0,095	0,112	0,196	0,221
6	0,302	0,350	0,218	0,326	0,095	0,112	0,195	0,219
10	0,245	0,272	0,212	0,306	0,094	0,111	0,177	0,203
15	0,154	0,175	0,201	0,262	0,085	0,100	0,155	0,174
20	0,114	0,130	0,132	0,166	0,076	0,086	0,133	0,154

Çizelge 3.6 : İlk 20 POD modunun toplam enerji içeriği ($\lambda_i / \Sigma\lambda_i$).

Mod	**Sağa açılı jet (%)**	**Düşey jet (%)**	**Sola açılı jet (%)**	**Cidar jeti (%)**
1	30,8	30,4	46,3	31,0
2	48,3	49,3	75,8	53,2
3	55,7	57,3	83,0	61,7
4	60,6	62,1	85,1	65,1
5	63,6	65,1	86,5	67,7
6	66,2	67,6	87,5	70,2
7	68,4	70,1	88,5	72,3
8	70,4	72,2	89,4	74,2
9	72,3	74,0	90,1	76,1
10	74,2	75,6	90,8	77,7
11	75,9	77,1	91,4	79,2
12	77,6	78,6	92,0	80,5
13	79,2	80,0	92,5	81,9
14	80,7	81,4	93,1	83,1
15	82,1	82,7	93,6	84,4
16	83,4	84,0	94,1	85,5
17	84,7	85,2	94,5	86,6
18	86,0	86,5	95,0	87,7
19	87,2	87,6	95,4	88,7
20	88,3	88,7	95,8	89,7

3.14 Hareketsiz Su Ortamında JaVA Kaynaklı Akış Rejimlerinin Sayısal Modellemesi

JaVA kaynaklı akış tiplerinin, durgun su tankında yapılmış akış görüntüleme ve PIV deneylerinden yola çıkarak Sayısal Akışkanlar Dinamiği – Computational Fluid Dynamics (CFD) yaklaşımı ile yapılmış sayısal modellemelerinde gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Sayısal modellemeler, sonlu hacimler yöntemini kullanan *Fluent* adlı ticari yazılım ile yapılmıştır. Basınç terimi için ikinci mertebeden, momentum denklemleri için üçüncü mertebeden çözüm şemaları seçilmiştir. Hesaplama zamanından tasarruf etmek ve deneylerde gözlemlenen akışlarla birebir karşılaştırma yapabilmek için akış iki boyutlu kabul edilmiştir. Bu kabulun temeli, düşük Reynolds sayılarında yapılan deneyler esnasında akışın, aktüatörün ön ve arka uçları dışında geniş aralık boyunca iki boyutlu olarak gelişmesidir.

Akış görüntüleme ve PIV deneylerinden toplanan bilgiler ışığında, hareketsiz su ortamında JaVA kaynaklı akış rejimlerinin bütün özelliklerini yansıyan yeterince sık bir hesaplama ağı oluşturulmuştur. Hesaplama hatalarını en az düzeye indirgemek ve gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek için hesaplama ağı, jet çıkışının olduğu geniş aralık bölgesi ve JaVA gövdesinin iç kısmında zamana bağlı çözümü de gözönünde tutarak daha da sıklaştırılmıştır (Cadirci ve diğ., 2010).

Hesaplama ağı sıklığının çözüme etkisi araştırılmıştır ve aktüatör plakasının konumuna ve kalınlığına bağlı olarak değişiklik gösteren hesaplama ağında yaklaşık 200 000 hücre bulunmasının ideal bir çözüme ulaşmada yeterli olduğu görülmüştür. Kararlı daimi akış durumunu sağlamak için frekansa bağlı olarak 50 ila 200 arasında çevrimi içeren hesaplama yapılmıştır. Her iterasyonda zaman ilerleme adımı, akış dinamiğine uygun olarak 0.003125 saniye olarak belirlenmiş ve en az 30 saniye geçmesi beklenmiştir.

3.14.1 Sınır koşulları

Uygun sınır koşullarının seçilmesi ve deneylerde kullanılan boyutlu parametrelerin girilmesi koşuluyla, hareketsiz su ortamında meydana gelen jet ve vorteks akışkarı gerçeğe yakın bir şekilde modellenebilmiştir. Daimi olmayan akış olarak çözülen problemlerde, genlik ve frekansın sayısal değerleri, User Defined Function (UDF)

kodlarında girilmiştir, dolayısıyla akış tipine etki eden boyutlu parametrenin doğrudan kullanıcı tarafından kontrolü sağlanmıştır. Aktüatör plakasının hareketi periyodik olduğu için plakanın düşey doğrultudaki hareketi disk genliği ve çalışma frekansı terimlerini içeren trigonometrik bir fonksiyon ile tanımlanmıştır. Plaka hareketinin açısal hızı Ω, **(3.43)**'deki gibi frekansa bağlı olarak tanımlanır. Bu terim plakanın düşey hareketini ifade eden **(3.44)**'deki UDF kodunda kullanılır. Burada, V_P plaka hareketinin sinüsoidal hızını, *a* disk genliğini, *t* zamanı belirtmektedir.

$$\Omega = 2\pi f \tag{3.43}$$

$$V_P = a \cdot \Omega \cdot \cos\left(\Omega \cdot t\right) \tag{3.44}$$

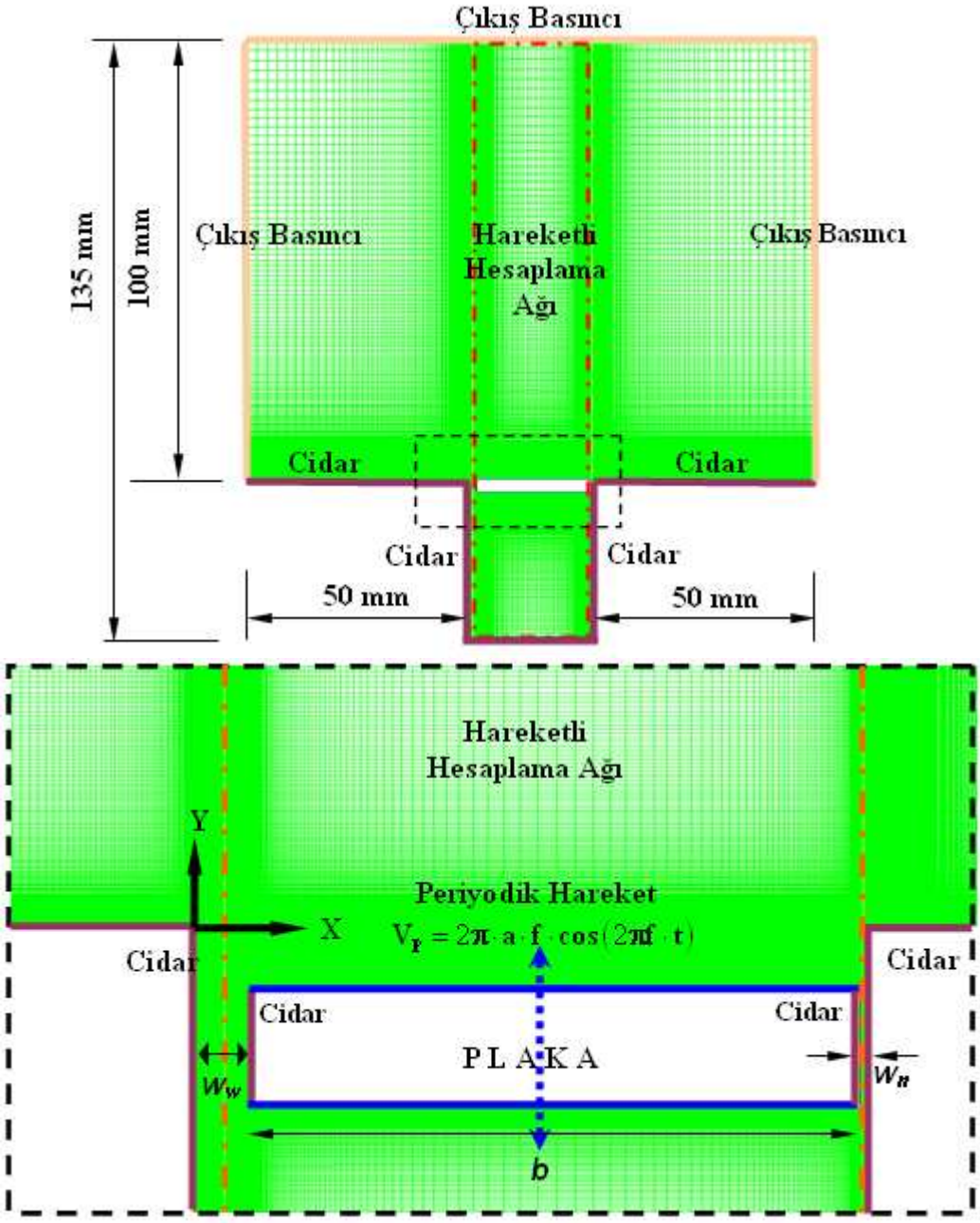
UDF sınır koşulları ile hareketi tanımlanan aktüatör plakası düşey hareketini "hareketli hesaplama ağı" ile yapabilmektedir. Şekil 3.67'de kırmızı noktalı çizgiler ile belirtilmiş arayüz üzerinde hareket eden hareketli hesaplama ağı akışkan olarak tanımlanmıştır ve plakanın hareketini sağlayarak geniş aralıkta jet veya vorteks oluşumunu başlatmaktadır.

JaVA boşluğunu temsil eden bölge "cidar" sınır koşulları ile çevrelenmiş olup, hesaplama ağının altında yeralmaktadır. Hesaplama ağının orijini eksen takımının yerleştirildiği noktadadır. JaVA kaynaklı akışın yeterince hesaplama süresi geçtikten sonra gelişimini ne kadar tamamladığını takip edebilmek açısından hesaplama ağı geniş tutulmuş ve bu bölge için hareketsiz su ortamı gözönünde tutularak gösterge basıncının sıfır olarak kabul edildiği "çıkış basıncı" sınır koşulu uygun görülmüştür.

Aktüatör plakasının alt ve üst yüzeyleri için UDF ile tanımlanan "periyodik hareket" sınır koşulu ve sağ ve sol kenarları için "cidar" sınır koşulu verilerek hareketli hesaplama ağı içerisindeki hareketi zamana bağlı olarak tanımlanmıştır.

Şekil 3.67'de durgun suda çalışan JaVA'nın yarattığı akış rejimlerinin modellendiği hesaplama ağının bütünü ile çerçeve içine alınmış bölgenin yakından gösterilmiş hali ilgili sınır koşulları ile verilmiştir.

Şekil 3.67'deki hesaplama ağında yapılmak istenen geometrik değişiklikler özellikle plaka genişliği ve kalınlığı veya plaka konumu ile ilgili olup, deneylerdeki parametre ve plaka konumu değişikliklerine sadık kalarak yapılmıştır.

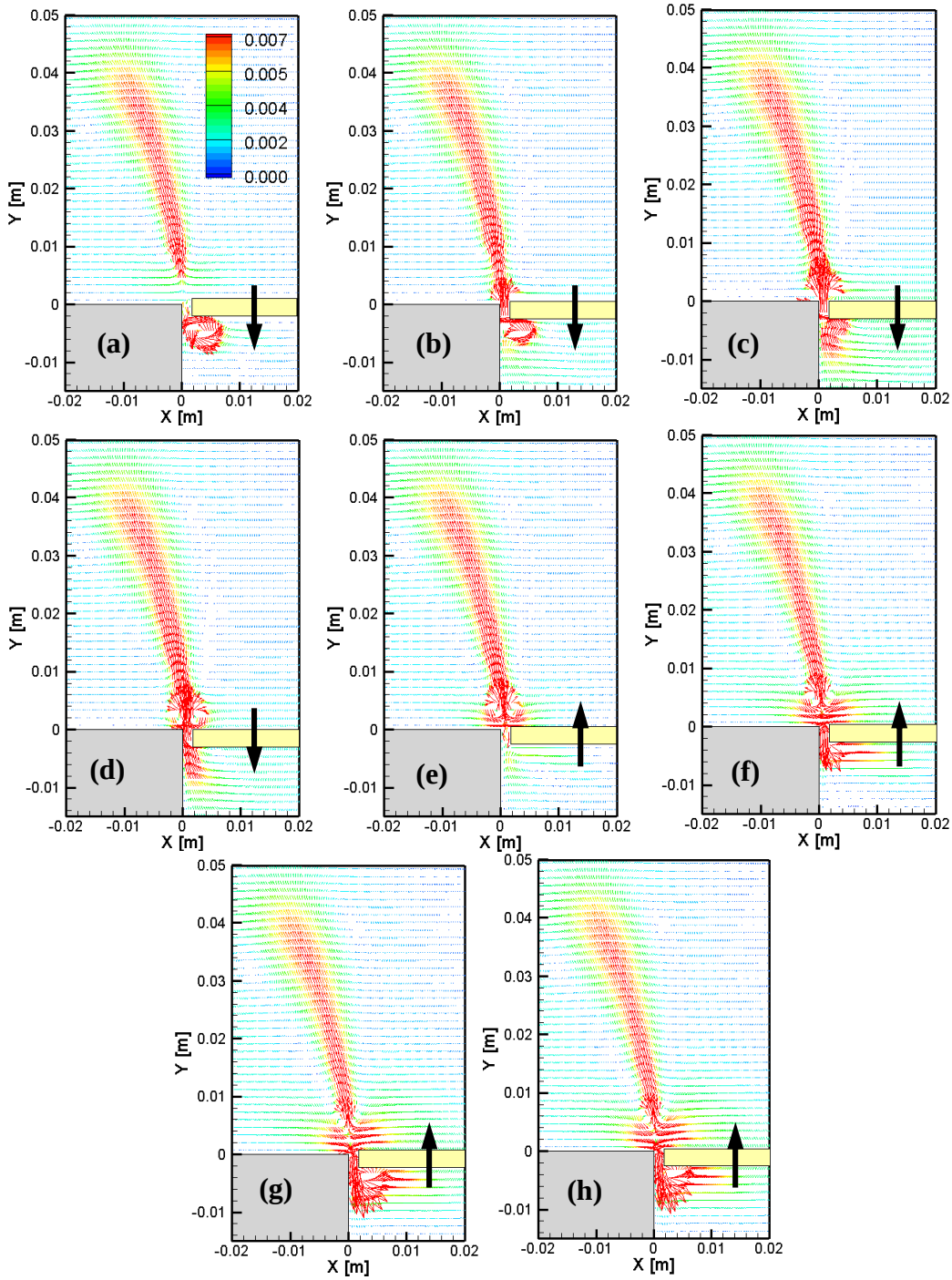


Şekil 3.67 : Hareketsiz su ortamında JaVA kaynaklı akış tiplerinin sayısal modellemesinde kullanılan hesaplama ağı ve sınır koşulları.

3.14.2 Açılı jete ait CFD sonuçlarının incelenmesi

Bölüm 3.11.1'de PIV deney verileri incelenmiş açılı jetin sayısal modellemesi yapılmış ve deneysel sonuçlara yakın simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Bir periyot içerisinde 32 adet anlık akış alanı olduğundan T/8'lik artımla emme ve basma fazları incelendiğinde Şekil 3.68'deki anlık akış alanları bulunur. Özellikle emme ve basma hareketine bağlı olarak gövde içinde ve plaka üzerinde meydana gelen vorteks yapıları açıkça seçilmektedir.

Plaka boyutlarının (b = 25 mm, d = 3mm) ve hareketsiz haldeki sıfır konumunun (Konum I) deneylerdeki gibi ayarlanmış olması, jetin şiddetini, özelliğini ve yönünü değiştirmemiştir. Geometri ile ilgili bu değişiklikler hesaplama ağında yapılmıştır. Plaka hareketini belirleyen disk genliği (a = 0.4 mm) ve çalışma frekansı (f = 1.0 Hz) gibi parametreler ise UDF kodlarında tanımlanarak sınır koşullarına dahil edilmiştir.



Şekil 3.68 : Açılı jetin hız alanının sayısal modellemesi [m/s]: (a)t=0, (b)t=T/8, (c)t=T/4, (d)t=3T/8, (e)t=T/2, (f)t=5T/8, (g)t=3T/4, (h)t=7T/8.

Sayısal modelleme sonuçlarının yakınsamasını iyileştirmek için uygun rahatlatma faktörleri seçilmiştir. CFD simülasyonlarında akış alanları m/s cinsinden elde edilmiş olup, geniş aralıktan çıkan jetin ilerlediği bölge yakından incelenmiştir. Bu bağlamda Şekil 3.68 (a),(b),(c) ve (d)'de plakanın basma hareketine ve (e),(f),(g) ve (h)'de emme hareketine göre jetin davranışını ve vorteks çiftlerinin oluşumunu en iyi temsil eden anlık sayısal akış alanları seçilmiş ve gösterilmiştir.

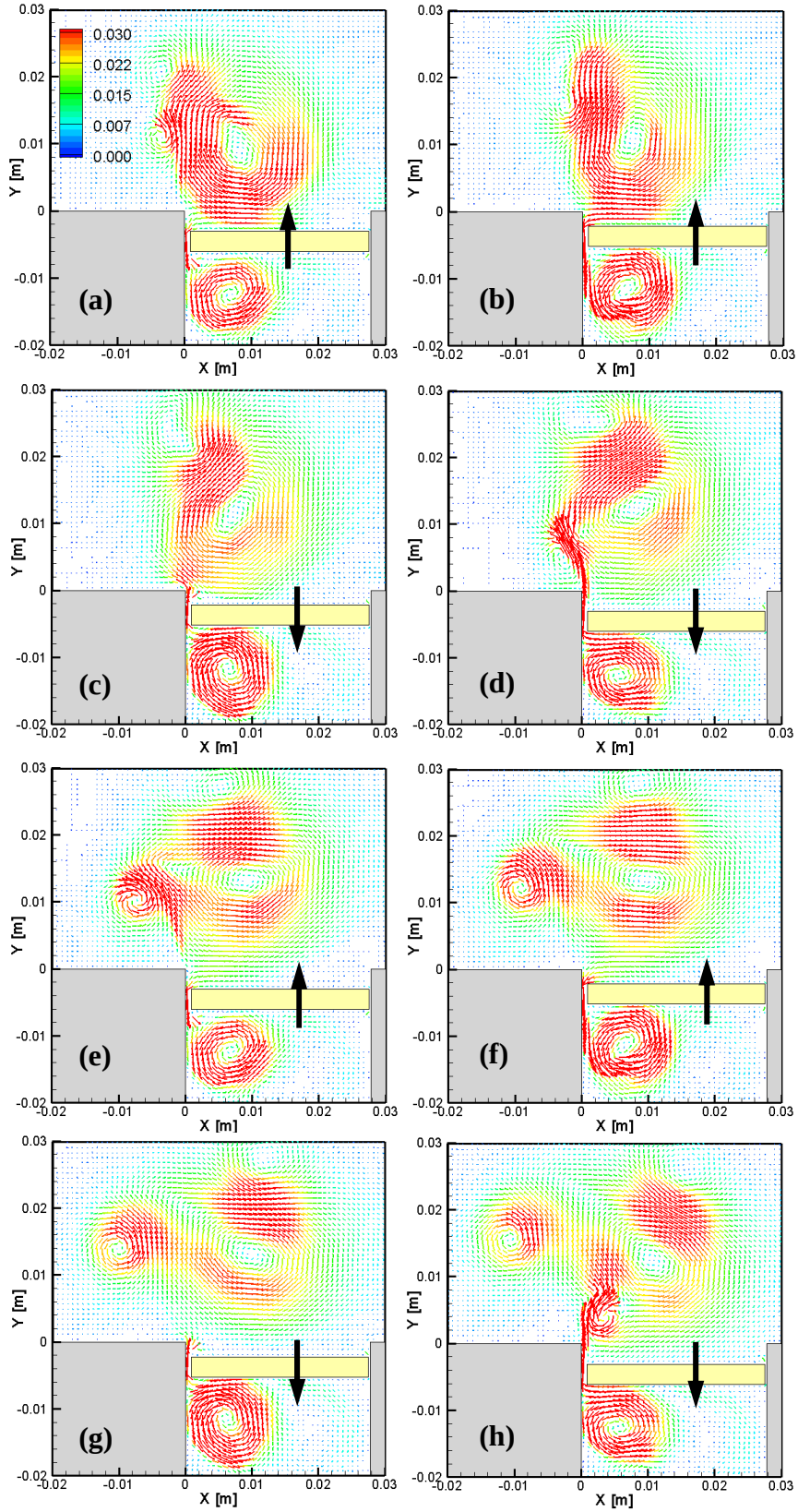
3.14.3 Vortekse ait CFD sonuçlarının incelenmesi

Bölüm 3.11.2'de deneysel sonuçları irdelenmiş olan vorteks akışının sayısal modellemesi yapılmış ve anlık akış alanları incelenmiştir. Akış görüntüleme ve PIV deneylerinden kazanılan tecrübe ile hangi parametre kombinasyonunda ve plaka konumunda saat yönünde dönen büyük bir vorteks oluştuğu bilinmektedir. Şekil 3.67'de tanıtılan hesaplama ağında plaka genişliği arttılarak (b = 26.6 mm) ve plakanın hareketsiz haldeki sıfır konumu gövde içine alınarak (Konum III) deneylerdeki çalışma koşulları oluşturulmuştur. Disk genliğ a = 0.64 mm olup, frekans f = 1.0 Hz'dir. Şekil 3.69'da vorteksin etkili olduğu bölgeye odaklanarak elde edilmiş vektörel anlık hız alanları verilmiştir.

Vorteksin durgun su ortamında ne kadar genişlediğini görmek ve emme-basma fazlarına bağlı olarak gerek aktüatör gövdesi içinde gerekse plaka üzerinde vorteks oluşumunu rahatça inceleyebilmek için akış alanı penceresi daha geniş tutulmuştur. PIV ölçümlerinde alınan deney setinde incelenen alan geniş aralık çıkışındaki vorteks çekirdeğidir ancak aynı akış rejiminin CFD sonucunda daha geniş bir alanın ele alınması hız büyüklüğü skalasını da daha geniş bir aralıkta tutmayı gerektirmiştir.

Şekil 3.69'da birbirini takip eden emme-basma faz çiftleri bir periyot içerisinde verilmiş olup, vortekse neden olan jetin geniş aralığa girişi ve geniş aralıktan çıkışı rahatça izelenebilmektedir.

Sayısal modellemeler aynı şekilde su kanalındaki akış rejimleri için de yapılmıştır. Sınır tabaka için yöneten denklemler ve hareketli hesaplama ağına ait ayrıklaştırılmış korunum denklemleri üzerinde Bölüm 5'de etraflıca durulacaktır.



Şekil 3.69 : Vorteks hız alanının sayısal modellemesi [m/s]: (a)t=0, (b)t=T/8, (c)t=T/4, (d)t=3T/8, (e)t=T/2, (f)t=5T/8, (g)t=3T/4, (h)t=7T/8.

3.15 JaVA Kaynaklı Akış Tiplerinin PIV-CFD Sonuçları Karşılaştırması

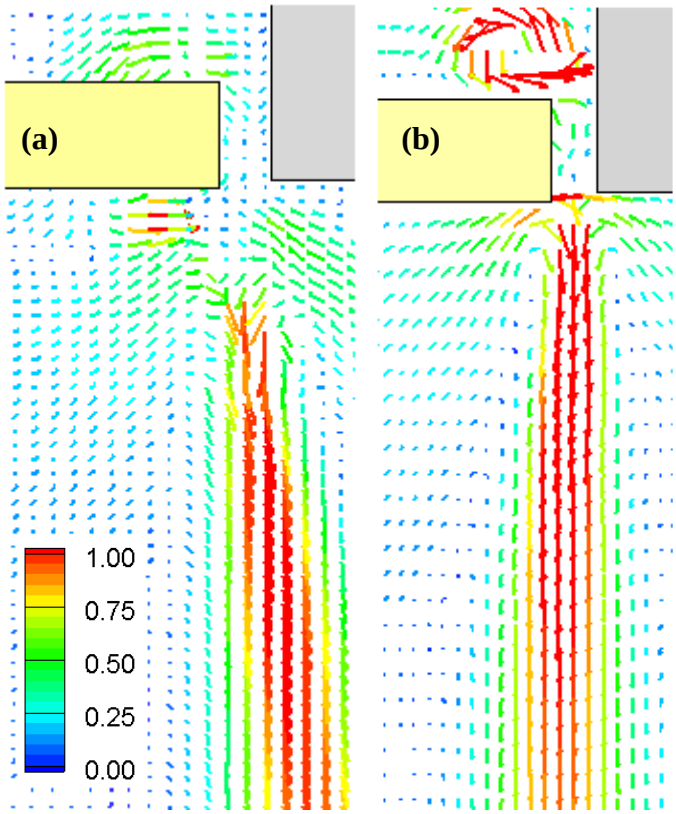
Açılı jet ve vorteks akış rejimi özelliği gösteren JaVA kaynaklı akış tiplerinin pekçoğunun hareketsiz su ortamındaki CFD modellemelerinin validasyonu, akış görüntüleme ve PIV deneyleriyle sağlanmıştır. Deneysel veriler, hem CFD çalışmalarına zengin bir altyapı sunmuştur hem de sayısal modellemelerin geçerliliğini ıspatlamıştır. Bu nedenle sayısal modelleme sonuçlarının deneysel sonuçlarla benzerlik göstermesi gerekmektedir.

Benzer şekilde disk genliği a = 0.64 mm, plaka genişliği b = 25 mm, çalışma frekansı f = 1.0 Hz olan parametre kombinasyonunda plakanın ortalama konumunun gövde dışında olması durumunda ortaya çıkan düşey jetin zaman ortalamalı PIV ve CFD hız alanları aynı kontur aralığında kalmak üzere sırasıyla Şekil 3.70 (a) ve (b)'de verilmiştir.

Görüldüğü gibi zamana bağlı yürütülen CFD çalışmalarında jet akışının olgunlaşması için yeterli süre beklendiğinde ve yüksek mertebeden ayrıklaştırma şemaları uygun rahatlatma faktörleri ile kullanıldığı zaman hareketli hesaplama ağı içerisinde deneysel verilere çok yakın sonuçlar elde edilmektedir. CFD sonucu düzgün ve zengin bir akış alanı sunmaktadır ve deneysel çalışmalarda gözlemlenmesi imkansız bazı ayrıntıları ortaya çıkarmaktadır.

Deney esnasında akış rejimine göre zaman aralığının yeterince küçük seçilmesine ve ham deneysel verinin işlenmesi esnasında uygun sınırlar arasında kalınmasına dikkat edildiği sürece PIV verisi de akış rejimleri hakkında doyurucu ve güvenilir bilgi sunmaktadır.

Bu deneysel ve sayısal çalışmalar JaVA'nın hareketsiz su ortamındaki davranışını çok detaylı ve açık bir şekilde ortaya koyduğu gibi ilerideki bölümlerde üzerinde durulacak olan su kanalında yapılmış deneysel çalışmalara ve bu deneylerin sayısal modellemelerine zemin hazırlamıştır.



Şekil 3.70 : Düşey jete ait zaman ortalamalı (a) PIV (b) CFD akış alanı [cm/s].

4. SU KANALINDA JaVA DENEYLERİ

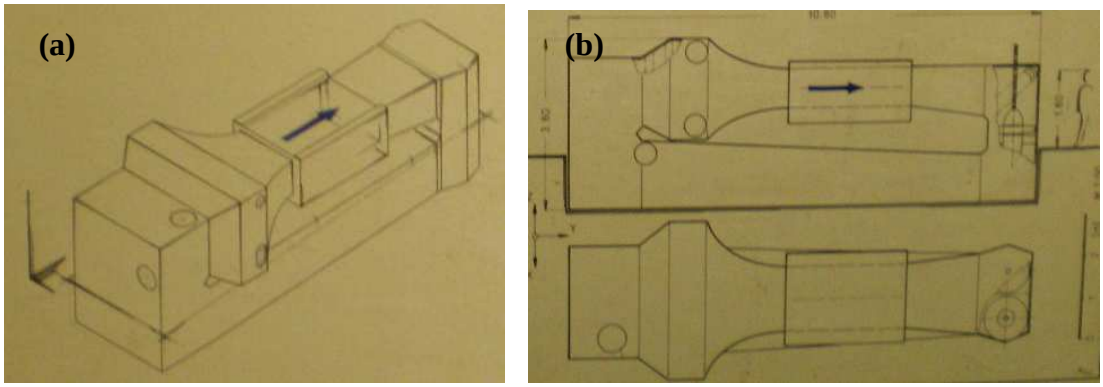
Bu bölümde, serbest akım hızı ile JaVA kaynaklı akış tiplerinin etkileşiminin incelendiği su kanalında yapılan akış görüntüleme çalışmalarına, PIV deneylerine ve bunların sonuçlarına yer verilmiştir.

4.1 Su Kanalı ve Yardımcı Deney Ekipmanları

Durgun su tankında JaVA kaynaklı akış tiplerinin akış dinamikleri ve hangi yöneten parametreler tarafından nasıl etkilendikleri hakkında ayrıntılı bilgi edindikten sonra, JaVA mekanizması düz büyük bir levha üzerine monte edilmiş ve bu sistem su kanalı içine yerleştirilmiştir.

Şekil 4.1'de teknik resmi verilmiş olan ve IAG Laboratuvarı'nda akış görüntüleme ve PIV deneylerinde kullanılan su kanalının teknik özellikleri aşağıdaki gibidir:

- Kapalı devre, serbest yüzeye sahip bir su kanalıdır, akış yatay doğrultudadır.
- Deney bölgesi uzunluğu : 2.8 m
- Deney bölgesi kesidi : 1.4 **x** 0.75 m^2
- Maksimum su kanalı hızı : 2.5 m/s
- Güç : 23 kW



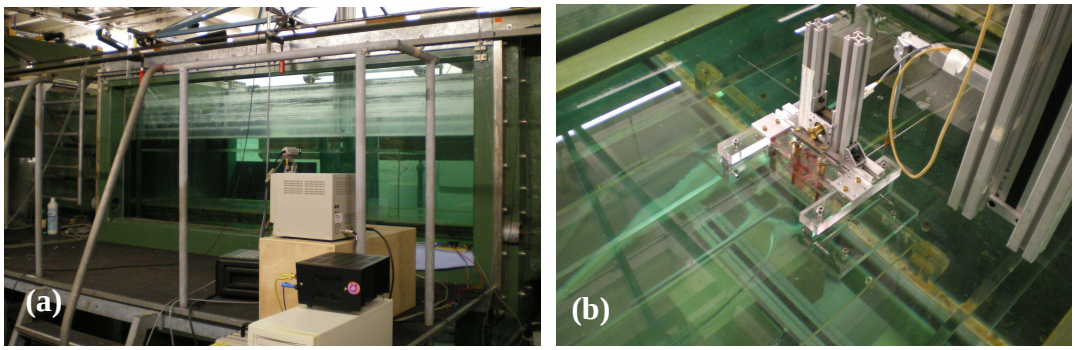
Şekil 4.1 : Kapalı devre su kanalı: (a) perspektif, (b) yandan ve üstten görünüş.

Su kanalı içerisine alt yüzeyinde sınır tabaka oluşturmak üzere pleksiglastan büyük bir levha yerleştirilmiştir. Toplam uzunluğu 2.15 m; genişliği 0.7 m ve su kanalı tabanından olan yüksekliği 0.4 m olan 2.0 cm kalınlığındaki pleksiglastan imal edilmiş geniş düz levha uygun bir şekilde su kanalının içerisine yerleştirilmiş ve üzerine serbest akışın başladığı kenardan 1.57 m uzaklığa aktüatörün konması için bir pencere açılmıştır. Oluşacak akışın yapısının bozulmaması ve sınır tabaka hız profilinin olumsuz yönde etkilenmemesi için, su kanalı içerisine yerleştirilen düz pleksiglas levhanın ön kenarına (leading edge) yarım elips şekli verilmiştir (bkz. Şekil 4.2(a)).

Şekil 4.2(b)'de levha su kanalına indirilmeden önce üzerine sabitlenmiş JaVA mekanizması ile birlikte görülmektedir. Şekil 4.3 (a) ve (b)'de sırasıyla su kanalının genel görünüşü ve kanal içine indirilmiş levha-JaVA montajı gösterilmiştir.



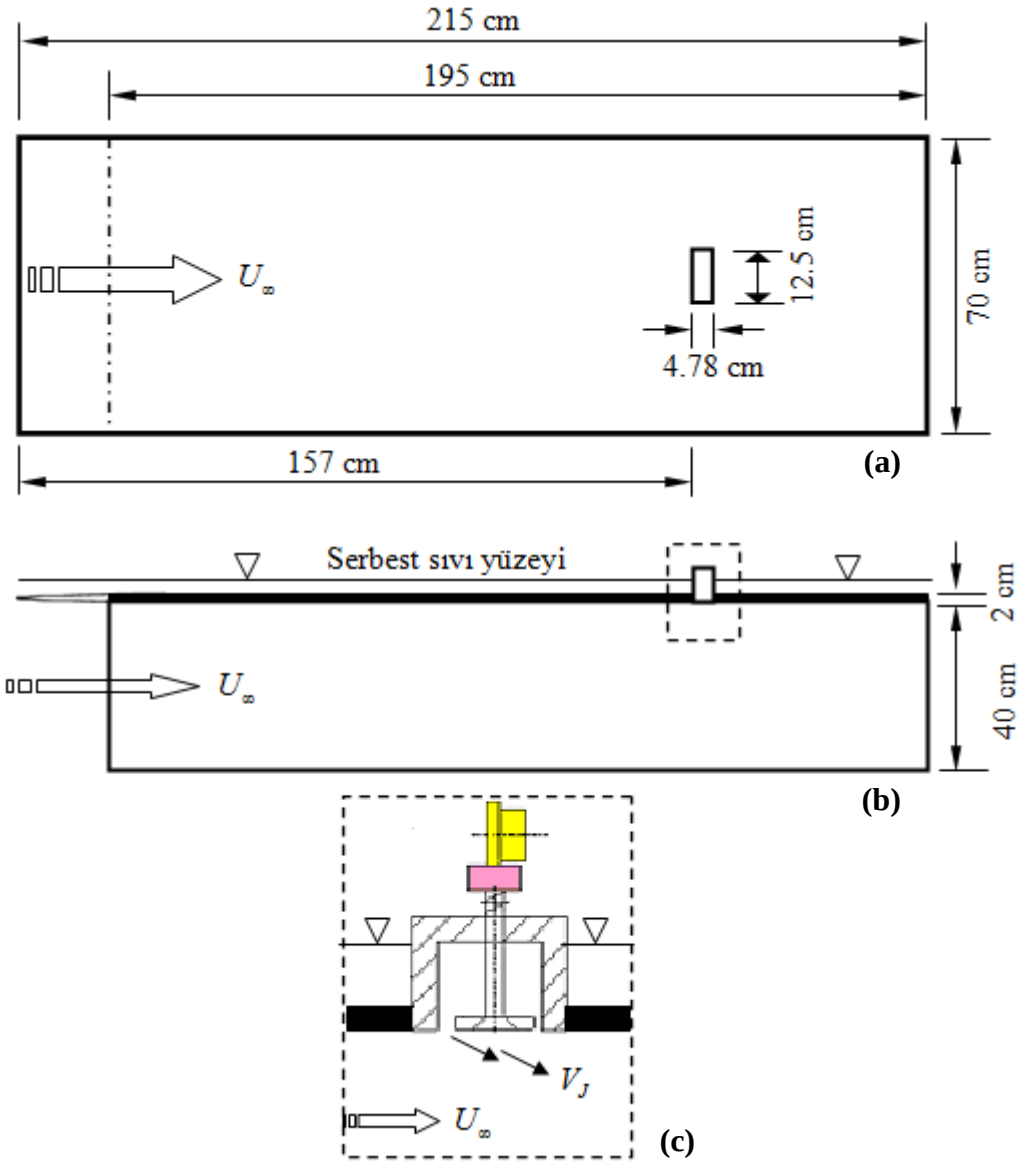
Şekil 4.2 : Pleksiglas düz levha: (a) ön kenarı, (b) JaVA monte edilmiş hali.



Şekil 4.3 : (a) Su kanalı ve veri toplama sistemi, (b) su kanalı içinde levha-JaVA montajı.

JaVA kaynaklı akış rejimlerinin levha alt yüzeyinde gelişen sınır tabaka ile olan etkileşimi, değişik parametre kombinasyonlarında incelenmiştir. Deneylerde JaVA düzeneği gövdesinin, oluşacak sınır tabakayı rahatsız etmemesi için JaVA gövdesinin alt yüzeyi ile sınır tabakanın gelişeceği plaksiglas düz levhanın alt yüzeyi aynı düzlemde tutulmuş ve JaVA gövdesinin sınır tabaka içine taşması engellenmiştir. Böylelikle plaka bağıl konumu da daha sağlıklı olarak

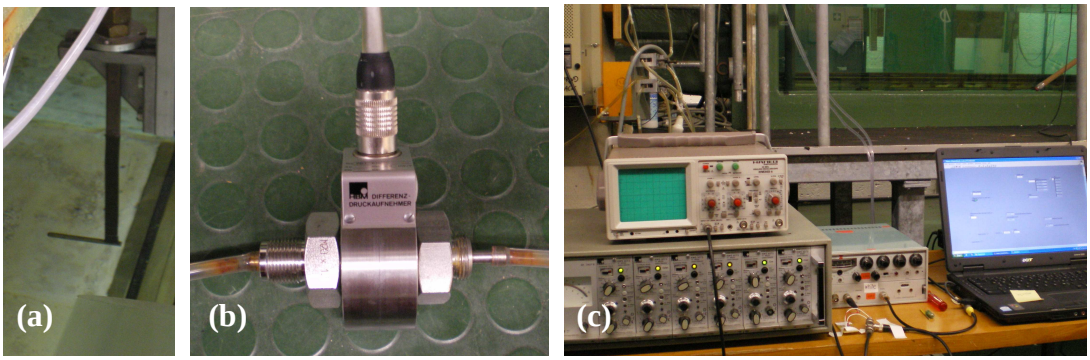
incelenebilmiştir. Şekil 4.4(a), (b) ve (c)'de sırasıyla pleksiglas düz levhanın üstten, yandan görünüşü ve levha-JaVA montajı ayrıntısının temsili resmi verilmiştir.



Şekil 4.4 : Pleksiglas düz levha: (a) üstten görünüş, (b)yandan görünüş, (c) JaVA ayrıntısı.

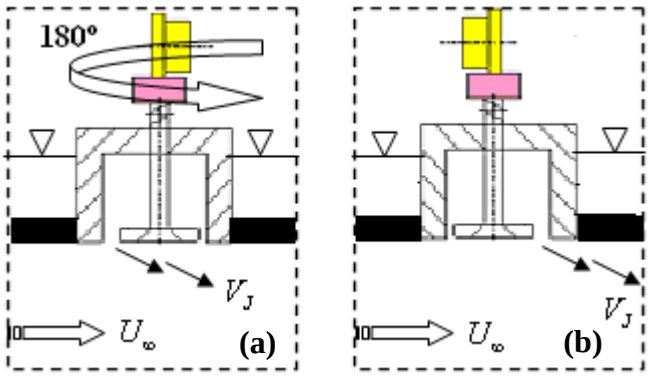
Su kanalının serbest akım hızı (U_∞), kontrol panelinden akış görüntüleme deneyine başlamadan önce ayarlanmaktadır, ancak bu serbest akım hızının büyüklüğü, Pitot tüpü ve fark basınç sensöründen oluşan bir hız ölçüm düzeneği ile tam olarak belirlenmektedir. Plaksiglas levhanın ön tarafına yerleştirlen Pitot tüpü ile fark basıncı alınmış ve bu değer uygun ölçme aralığındaki (yaklaşık ΔP = 5 Pa) fark basınç sensörü ile LabView programı bulunan bir bilgisayara aktarılmıştır. Bu durumda boyutlu yöneten parametrelere ek olarak artık su kanalının serbest akım hızının da etkisi gözönünde tutulmalıdır. Su kanalında serbest akım hızını ölçmede

kullanılan yardımcı ölçme aletleri olan Pitot tüpü, fark basınç sensörü ve sensörün bağlı olduğu ve kontrol panelinde ayarlanan hızın gerçek değerinin alındığı bilgisayar Şekil 4.5(a), (b) ve (c)'de sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 4.5 : (a) Pitot tüpü,(b) fark-basınç sensörü, (c) hız değerinin belirlendiği sistem.

Su kanalında serbest akım hızının JaVA kaynaklı akış rejimlerine etkisini daha etraflıca incelemek ve oluşan sınır tabakanın plakanın salınımından etkilenip etkilenmediğini anlamak için, JaVA 180º döndürülerek pencereye ters konulmuş ve aynı parametre uzayında kalmak üzere deneyler bu durum için de tekrarlanmıştır. Aktüatörün geniş aralığının (w_w) levha ön kenarına yakın olduğu ve jetin plaka üzerinden geçtiği konfigürasyon "A" montajı; geniş aralığın levha ön kenarına yaklaşık plaka genişliği b kadar daha uzak kaldığı ve geniş aralıktan çıkan jetin aktüatör plakasına çarpmadan serbest akım yönünde ilerlediği konfigürasyon ise "B" montajı olarak adlandırılmıştır. Her iki durum hem akış görüntüleme ve PIV hem de sayısal modellemelerde kapsamlıca ele alınmış ve sonuçları irdelenmiştir. Bu durumlar Şekil 4.6(a) ve (b)'de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4.6 : JaVA'nın levha üzerindeki konfigürasyonu: (a) A-montajı, (b) B-montajı.

Deneyler A ve B durumlarında uygun serbest akım hızlarının seçilmesi suretiyle çeşitli yöneten parametre kombinasyonlarında yapılarak, sınır tabakanın levha ön

kenarından yaklaşık 1.58 m ötede (1.57 m'lik mesafeye aktüatör et kalınlığı olan 10 mm eklenirse) aktüatör tarafından nasıl etkilendiğini göstermiştir.

Deneylerde sağlıklı sonuçlar elde etmek için serbest akım hızının uygun seçilmesi gerekmektedir. Bu hız belirlenirken hem laminer sınır tabakası bölgesinde kalmaya dikkat edilmeli hem de kullanılan ölçüm aletlerinin ölçme aralığı içinde kalmaya özen gösterilmelidir. Bu bağlamda fark basıncı sensörünün Pitot tüpü yardımıyla yarım elips şekli verilmiş levha ön kenarının hemen önünden alacağı fark basıncı **(4.1)**'e göre hesaplanabilir. Burada ΔP fark basıncını veya dinamik basıncı, ρ_{su} suyun yoğunluğunu göstermektedir. Kullanılan sensörün ölçme aralığı yaklaşık 5 Pa olduğuna göre, serbest akım hızının 0.1 m/s mertebesinde olması gerekir.

$$\Delta P = \frac{1}{2}\rho_{su} U_{\infty}^{2} \qquad \textbf{(4.1)}$$

Laminer sınır tabaka bölgesinde sınır tabaka kalınlığını veren ifade **(4.2)**'deki gibidir. Burada δ sınır tabaka kalınlığını, Re_x Reynolds sayısını, ν ise suyun kinematik viskozitesidir. Mesafeye bağlı olarak değişen Reynolds sayısı tanımı ise **(4.3)**'de verilmiştir. Suyun yoğunluğu 10^3 kg/m^3, ve kinematik viskozitesi 10^{-6} m^2/s alınmıştır.

$$\delta = \frac{5x}{\sqrt{\mathrm{Re}_x}} = 5\sqrt{\frac{\nu x}{U_{\infty}}} \qquad \textbf{(4.2)}$$

$$\mathrm{Re}_x = \frac{U_{\infty} x}{\nu} \qquad \textbf{(4.3)}$$

Serbest akım hızı 0.1 m/s alındığında, levha ön kenarından x = 1.58 m uzaklıkta sınır tabaka kalınlığı yaklaşık 20 mm bulunur. Deneylerde kullanılan aktüatör plaka genişliği b = 21.8 – 26.6 mm arasında olduğu hatırlanırsa, sınır tabaka kalınlığının plaka genişliği ile yakın mertebede olması makul bir serbest akım hızının seçildiğini gösterir.

Eğimsiz düz levha üzerindeki su akışında laminar sınır tabaka bölgesinde kalma şartı olan $Re_x < 5\mathbf{x}10^5$ gözönünde tutulursa, **(4.3)**'deki bağıntıdan yola çıkarak x = 1.58 m'de serbest akım hızının 0.31 m/s'yi geçmemesi gerekir. Serbest akım hızı 0.1 m/s mertebesinde alınırsa, Re_x değeri $1.58\mathbf{x}10^5$ olarak hesaplanır ki, bu değer laminer sınır tabaka bölgesinde çalışıldığını göstermektedir.

Akış görüntüleme ve PIV deneylerinde büyük eksantrik disk genlikleri (a), su kanalının serbest akım hızına karşı koyabilmesi açısından tercih edilmiştir. Genliğin 0.4 mm olması durumunda durgun su tankında gözlemlenmiş akış tipleri, su kanalında hemen hiç etkili olmamaktadır. Genliğin 0.5 mm, 0.64 mm ve 1.0 mm olması durumunda frekansa da bağlı olarak gelişen rejimler düz levhanın alt yüzeyinde oluşan sınır tabakayı etkileyebilmekte ve istenmekte olan momentum transportunu cidar yakınındaki akışa aktararak, sınır tabakadaki ayrılmayı geciktirmektedir. Bu bağlamda en etkin aktüatör parametresi olarak karşımıza çıkan 1.0 mm'lik genlik, özellikle mümkün olan en yüksek frekanslarda çalıştırma durumunda akışı gözle görülür biçimde etkilemektedir. PIV deneylerinde 2.0 mm'lik disk genliği de tercih edilmiştir.

Aktüatör plakasının genişliği de ortaya çıkan akışların fiziğini değiştirmektedir. Plaka genişliğinin (b) büyük olması bir başka deyişle geniş aralığın (w_w) küçük olması; jet akışının çıkış hızının artmasına ve sınır tabakayı daha geniş ölçekte etkilemesine neden olmaktadır.

Serbest akım hızının JaVA kaynaklı akış rejimlerine etki eden önemli bir parametre olması, yeni bir boyutsuz parametre tanımlama ihtiyacı doğurmuştur. Bu bağlamda **(3.8)**'de tanımlanan teorik ortalama jet hızının serbest akım hızına (U_∞) oranlanması ile aktüatörün sınır tabakadaki momentum transportununa katkısı hakkında bir fikir edinilebilir. Bu oran ***r*** ile ifade edilirse **(4.4)**'deki bağıntı bulunur.

$$r = \frac{V_J}{U_\infty} = \frac{4abf}{w_w U_\infty} \qquad \textbf{(4.4)}$$

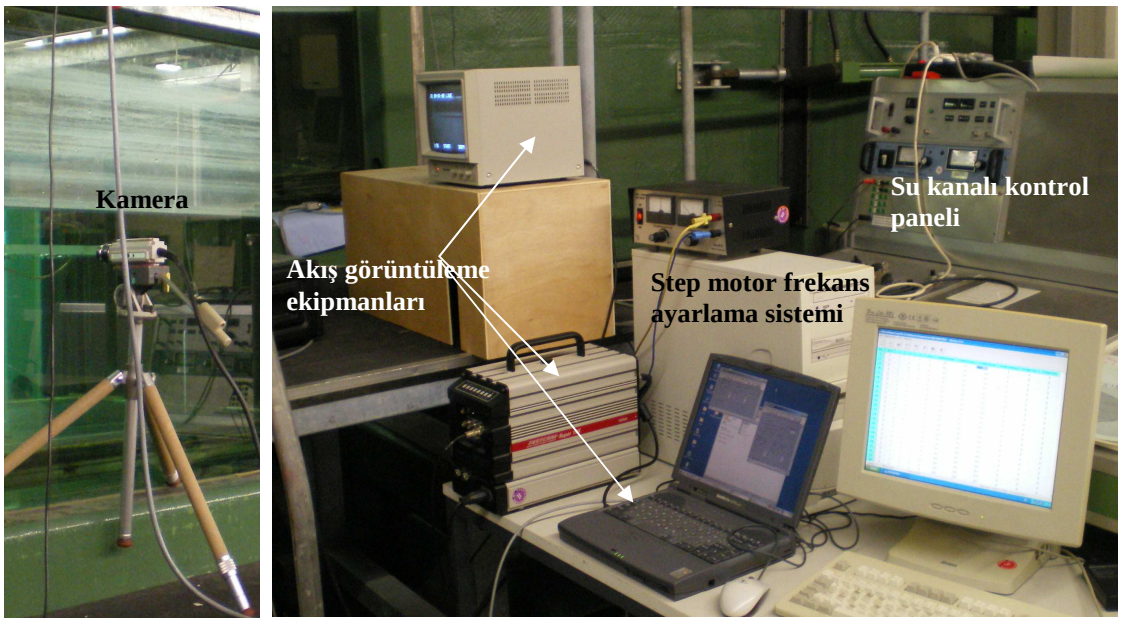
Tanımlanan bu oran, JaVA ile ilgili bütün parametrelere ve serbest akım hızına bağlı olarak değişir. Bu oranın bire yakın olması JaVA kaynaklı akışın sınır tabakaya enerji aktarmada yeterli olduğunu, birden büyük olması JaVA kaynaklı akış rejiminin sınır tabakaya sağladığı momentum ve enerji aktarımının akış ayrılmasını önemli ölçüde engellediği ve sınır tabaka hız profilini iyileştirdiğini göstermektedir. Birden çok küçük değerler ise aktüatörün aktif akış kontrolünde yetersiz kaldığını, genlik veya frekansın arttırılması gerektiğini göstermektedir. Bu oran bir bakıma aktüatörün sınır tabakayı enerjilendirmedeki verimi olarak da düşünülebilir.

4.2 Su Kanalında Akış Görüntüleme Deneyleri

Genel hatlarıyla su kanalında düz levha üzerinde laminer bir sınır tabaka oluşumu sağlandıktan sonra aktüatörün sınır tabakaya olan etkisini belirlemek için, akış görüntüleme deneyleriyle çeşitli parametre kombinasyonlarında Şekil 4.6'da izah edilen A ve B konfigürasyonları (montaj) için JaVA kaynaklı akış rejimleri sınır tabaka içerisinde incelenmiştir.

Düz levha pleksiglastan imal edildiği için akış görüntülemeye elverişlidir. Hızlı kamera ve IIIb sınıfı lazerden oluşan akış görüntüleme düzeneği, su kanalı etrafında akışın en uygun şekilde gözlemlenebileceği yerlere konulmuştur. Lazer kaynağı, su kanalının altına, lazer düzlemi aşağıdan yukarıya doğru JaVA gövdesinin ortasına gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Hızlı kamera, kanalın yanına lazer demetiyle 90º yapacak şekilde konmuştur. JaVA'nın 1 ila 4 Hz gibi düşük frekanslarda çalıştırıldığı ve serbest akım hızının 0.1 m/s'yi fazla geçmediği göz önünde tutulmalıdır, aksi takdirde izlenen parçacıkların hemen dağılması yüzünden jet akışının görüntülenmesi zorlaşacaktır.

Şekil 4.7'de akış görüntüleme ekipmanları olan hızlı kamera, monitör, hızlı kameranın hızının ayarlandığı ve anlık görüntülerin kaydedildiği cihaz ve resimlerin aktarıldığı bilgisayar görülmektedir.



Şekil 4.7 : Su kanalı etrafına yerleştirilmiş akış görüntüleme düzeneği ekipmanları.

4.2.1 (A)-konfigürasyonu için elde edilen akışlar

Su kanalı etrafına en uygun konumlara yerleştirileren akış görüntüleme deney düzeneği ile değişik yöneten parametre kombinasyonlarında (serbest akım hızı U_∞ da dahil) sistem çalıştırılmıştır. Su kanalı daimi hıza ulaştıktan sonra, JaVA çalıştırılmış ve serbest akımına karşı koyabilmesi için büyük eksantrik disk genlikleri (a) tercih edilmiştir.

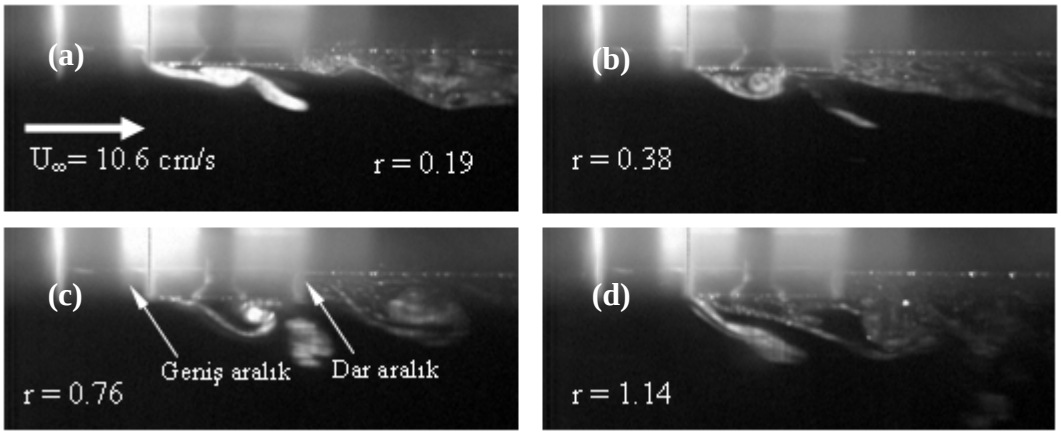
Levhanın alt yüzeyinde oluşan sınır tabaka, özellikle frekans ve disk genliği gibi aktüatör parametrelerinden etkilenmektedir, bu nedenle sınır tabakadaki ayrılmayı geciktirmek için gerekli olan momentum transportunu en etkin aktüatör parametrelerinde sağlamak için uygun frekanslarda ve uygun serbest akım hızlarında çalışmak akışı gözle görülür biçimde etkilemektedir.

Şekil 4.8 ve 4.9'da farklı çalışma frekanslarında, disk genliğinin (a) 1 mm, plaka genişliğinin (b) 25 mm olması halinde; plakanın gövdeye göre sırasıyla I ve II konumlarında oluşan JaVA-kaynaklı akış rejimlerinin U_∞ = 10.6 cm/s serbest akım hızına maruz kalmaları incelenmiştir. Bu iki durumda da düz levha-JaVA montajı (A)-durumu olarak ele alınmıştır, bir başka deyişle geniş aralık serbest akımın JaVA ile ilk buluştuğu yerdedir ve dolayısıyla jet, aktüatör plakasının genişliği boyunca serbest akım yönünde seyretmektedir. Şekillerde verilen anlık görüntüler basma fazlarıdır.

İncelenen frekanslar 0.5, 1, 2 ve 3 Hz olup, frekansın arttırılmasının sınır tabakayı nasıl etkilediği açıkça ortaya konmuştur. Bu bağlamda farklı çalışma koşullarında aktüatörün momentum transportuna katkısını temsil eden $\boldsymbol{r}$ oranları incelenirse, sabit serbest akım hızında ve aynı tutulan diğer aktüasyon parametrelerinde yüksek $\boldsymbol{r}$ oranları, ele alınan akış durumlarında aktüatör etkinliğinin arttığına işaret etmektedir.

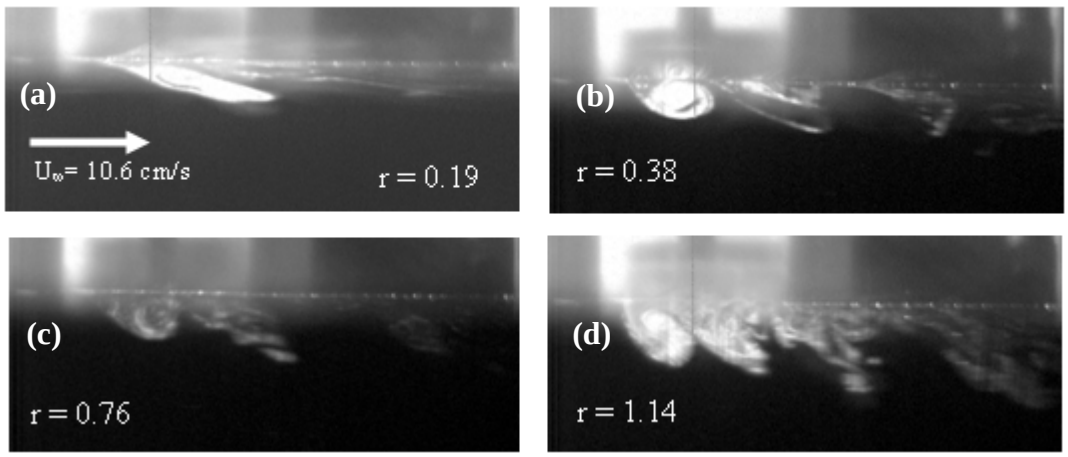
Serbest akım hızının 10.6 cm/s olması halinde (4.4) denkleminden yola çıkılırsa ve aktüasyon parametreleri değerleri yerlerine konursa, $\boldsymbol{r}$ oranının yüksek çalışma frekanslarında 1 değerine yakın veya 1'den büyük olduğu görülür. Hesaplamada dikkat edilecek husus, 1 mm'lik disk genliğinin emme ve basma fazlarını içerdiği dolayısıyla bir periyot için plakanın düşey doğrultudaki hareketinin 2 mm olduğudur. Reynolds sayısı ve boyutsuzlandırılmış genlik hesaplarında olduğu gibi $\boldsymbol{r}$ oranınındaki genlik değerinde de bir faz gözönüne alınarak hesaplama yapılmıştır.

Bu bağlamda Şekil 4.8'de JaVA'nın çalışma frekansının, sınır tabaka üzerindeki etkisi anlık görüntüler ile görülmektedir. Aktüatör plakası konumunun gövde dışında olması da sınır tabaka içerisindeki JaVA kaynaklı akışın yapısını değiştirmektedir. Aktüatör plakasının (I) konumu olarak da adlandırılan bu konumunda, plakanın gövdenin dışına taşması, dar aralıktan da (w_n) akış olmasına neden olabilmektedir; ancak geniş aralıktan (w_w) pompalanan jet akışı daha kuvvetli ve belirgindir.



Şekil 4.8 : (I) plaka konumunda ve (A) tipi montaj durumunda anlık akış görüntüleri; (a) f = 0.5 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz ve (d) f = 3 Hz.

Şekil 4.9'da aktüatör plakası konumunun gövde ile aynı olması incelenmiştir. Aktüatör plakasının (II) konumu olarak da adlandırılan bu konumunda, JaVA kaynaklı jet akışı geniş aralıktan (w_w) pompalanmaktadır. Levha-JaVA montajı (A) durumuna göre ayarlanmış olmasına rağmen, aktüatör plakasının gövde ile aynı hizada olması (II-konumu); JaVA kaynaklı rejimin plaka üzerinden geçerek akış yönünde ilerlemesi esnasında bu montajdan fazla etkilenmemesini sağlamaktadır.



Şekil 4.9 : (II) plaka konumunda ve (A) tipi montaj durumunda anlık akış görüntüleri; (a) f = 0.5 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz ve (d) f = 3 Hz.

Şekil 4.9'daki akış görüntüleme deneylerinden anlaşılacağı üzere, frekansın artması aktüatör plakasının altında akış doğrultusunda gittikçe zayıflayan vortekslerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu vorteksler, sınır tabakayı enerjilendirmekte ve akış kontrolünü sağlamaktadır.

Daha önce de belirtildiği gibi, oluşacak JaVA kaynaklı akış rejimi, JaVA'nın geometrik özelliklerine bağlıdır, örneğin büyük bir plaka genişliği (***b***) seçilmesi durumunda, geniş aralık (w_w) azalacak ve jet akışının çıkış hızı buna bağlı olarak artacak dolayısıyla vorteks veya kaotik bir akış tipi ortaya çıkacaktır. Bu akış rejimi de sınır tabaka üzerinde daha etkili olabilecektir. JaVA-sınır tabaka etkileşimi (A) tipi levha-JaVA montajında ele alınmış ve aktüatörün sınır tabakaya etkisi, aktüatör yakınında plakanın (I) ve (II)-konumlarında incelenmiştir.

4.2.2 (B)-konfigürasyonu için elde edilen akışlar

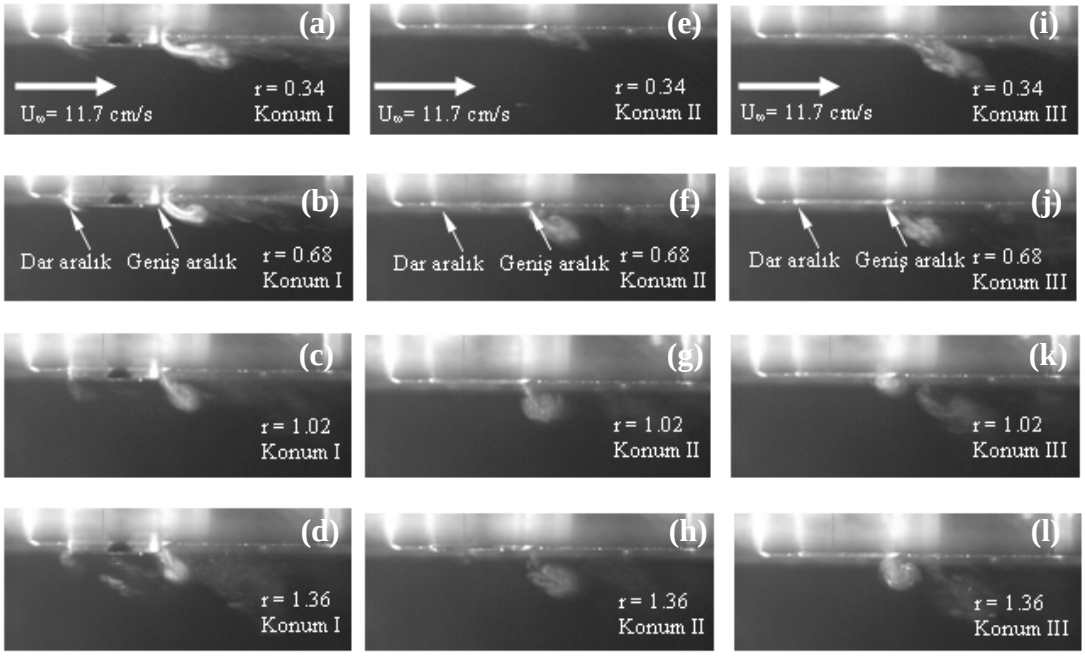
Akış görüntüleme deneylerinde ayrıca geniş aralığın yerinin akışa ne derecede etki ettiğini anlamak açısından JaVA 180º çevrilerek levha üzerine monte edilmiş ve geniş aralıktan çıkan jet, aktüatör plakasına çarpmadan serbest akım yönünde ilerlemiştir. Şekil 4.6'da şeması izah edilen ve (B)-durumu olarak adlandırılan bu montajda geniş aralıktan çıkan jet rejimi, serbest akım yönünde herhangi bir engelle karşılaşmadan ilerlemektedir. (B)-tipi montajda da aktüatörün sınır tabaka üzerindeki etkisinin gözlemlenebileceği uygun serbest akım hızlarında, çeşitli aktüatör parametrelerinde ve plaka konumlarında deneyler tekrarlanmıştır.

Anlık görüntüleri Şekil 4.10'de verilmiş olan örnekte; JaVA, 1.0 mm genliğindeki disk ve 25 mm genişliğindeki aktüatör plakası ile değişik bağıl aktüatör plakası konumlarında (I, II ve III konumları) U_∞= 11.7 cm/s'lik serbest akıma maruz kalacak şekilde f = 1, 2, 3 ve 4 Hz'lik frekanslarda çalıştırılmıştır. Bu örnekte serbest akım hızına bağlı olarak JaVA yakınında sınır tabaka kalınlığı yaklaşık 18 mm çıkmaktadır. JaVA'nın sınır tabakaya aktardığı momentum transportunu temsil eden ***r*** oranları da yine frekansa bağlı olarak değişmektedir.

Şekil 4.10'daki JaVA kaynaklı akış rejimlerinin geniş aralıktan çıkış anına (basma) göre seçilmiş olan anlık akış görüntülerine bakılacak olursa, aktüatör plakasının konumu sabit kalmak üzere, frekans arttırıldığında, jetin yatayla yaptığı açı artmakta dolayısıyla 18 mm kalınlığındaki sınır tabaka içerisine nüfuz etme kabiliyeti ve buna bağlı olarak sınır tabakayı enerjilendirme potansiyali artmaktadır. Jet hızının, serbest

akım hızına oranları incelendiğinde, bu oranın 0.5'in üstündeki değerlerinde bir başka deyişle 2 Hz, 3 Hz ve 4 Hz çalışma frekanslarında geniş aralıktan çıkan vorteks çiftlerinin sınır tabakadaki difüzyonu daha hızlı gerçekleşmekte ve JaVA'nın etkisinin sadece aktüatör yakınındaki bölgede değil, aynı zamanda sınır tabakanın akış doğrultusunda ilerleyen bölgelerinde de etkisini gösterdiği anlaşılmaktadır.

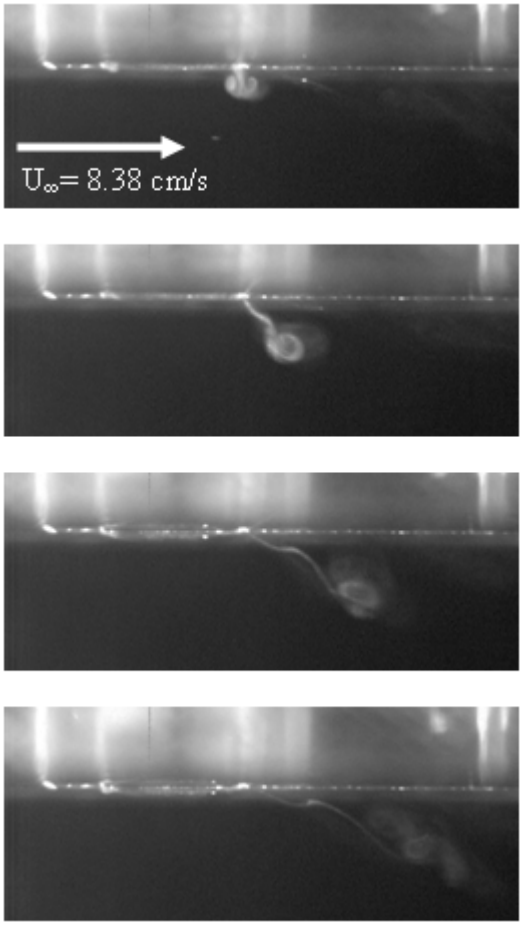
Bu çalışmalarda kullanılan 25 mm genişliğindeki plaka, durgun suda daha önce yapılan akış görüntüleme deneylerinden elde edilen tecrübe ile 5 mm kalınlığında seçilmiş, dolayısıyla daha kuvvetli ve sınır tabakaya nüfuz eden bir jet akışı oluşturulmuştur.



Şekil 4.10 : Değişik plaka konumunda (I, II ve III) ve (B) tipi montaj durumunda anlık akış görüntüleri; Konum I için: (a) f = 1 Hz, (b) f = 2 Hz, (c) f = 3 Hz ve (d) f = 4 Hz; Konum II için: (e) f = 1 Hz, (f) f = 2 Hz, (g) f = 3 Hz ve (h) f = 4 Hz; Konum III için (i) f = 1 Hz, (j) f = 2 Hz, (k) f = 3 Hz ve (l) f = 4 Hz.

Şekil 4.11'de (B)-tipi montajda, II plaka konumunda 1.0 mm genliğindeki disk, 25 mm genişliğindeki aktüatör plakası ve 1 Hz'lik çalışma frekansı kullanılarak U_∞= 8.38 cm/s'lik serbest akımda elde edilen akış görüntüleme deneyinde bir periyot içerisinde emme ve basma fazlarına tekabül eden anlık görüntüler verilmiştir. Durgun suda daha önce yapılan PIV ve CFD çalışmalarında ortaya konan ve Şekil 3.70'de karşılaştırmalı olarak verilen açılı jetin sınır tabaka içerisindeki davranışı su kanalındaki akış görüntüleme deneyi ile ortaya konmuştur. 30 fps kayıt hızıyla

alınmış bir periyot içerisinden seçilen dört anlık görüntünün iki tanesi emme iki tanesi basma fazına aittir ve jetin sınır tabakadaki gelişimi rahatlıkla görülmektedir.

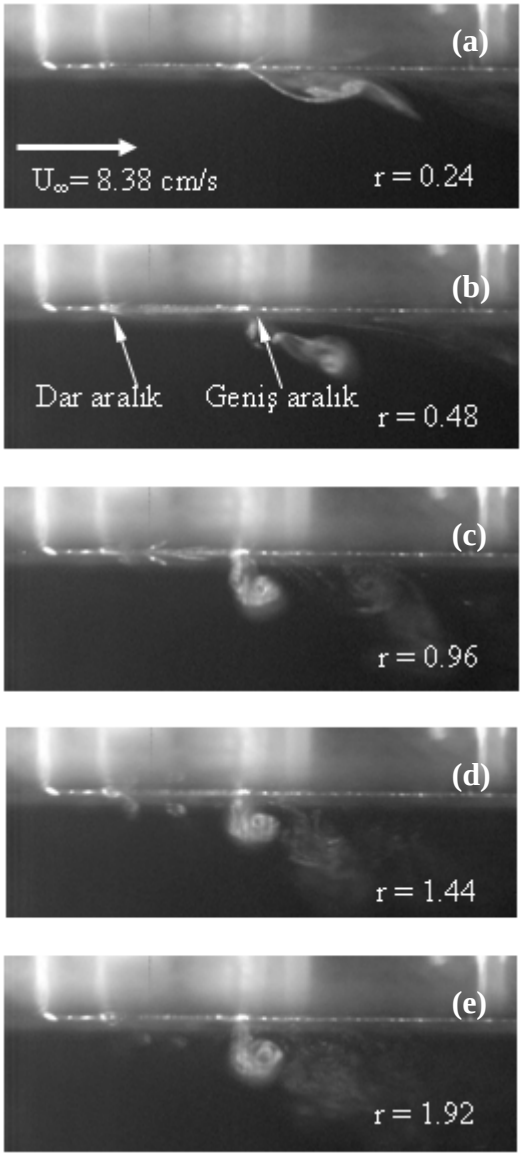


Şekil 4.11 : Bir periyot içerisinde jetin zamana bağlı gelişimi (f = 1 Hz).

Şekil 4.12'de ise Şekil 4.11'de anlık görüntüleri verilen akış rejiminin parametrelerinde ve U_∞= 8.38 cm/s'lik serbest akımda elde edilen akış, değişik frekanslarda incelenmiş ve su kanalı içerisindeki gerek PIV gerekse CFD çalışmaları için bilgi veren nitelikte görüntüler alınmıştır.

Şekil 4.12'de artan frekansta jetin davranışı Şekil 4.10'daki örneğe benzemektedir, ancak serbest akım hızının daha düşük olması JaVA kaynaklı akış rejiminin düşük frekanslarda dahi yatayla yaptığı açının artmasına ve yaklaşık 21 mm kalınlığındaki sınır tabakaya daha iyi nüfuz etmesini sağlamaktadır.

Sonuç olarak su kanalındaki akış görüntüleme deneyleri, hareketsiz suda yapılan daha önceki çalışmalarla tanımlanan akış rejimlerinin sınır tabaka içerisindeki farklı çalışma koşullarındaki davranışının anlaşılmasını sağlamış aynı zamanda hem PIV hem de CFD çalışmalarına zemin oluşturmuştur.



Şekil 4.12 : II plaka konumunda ve (B) tipi montaj durumunda anlık akış görüntüleri; (a) f = 0.5 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz, (d) f = 3 Hz, (e) f = 4 Hz.

4.3 Su Kanalında PIV Deneyleri

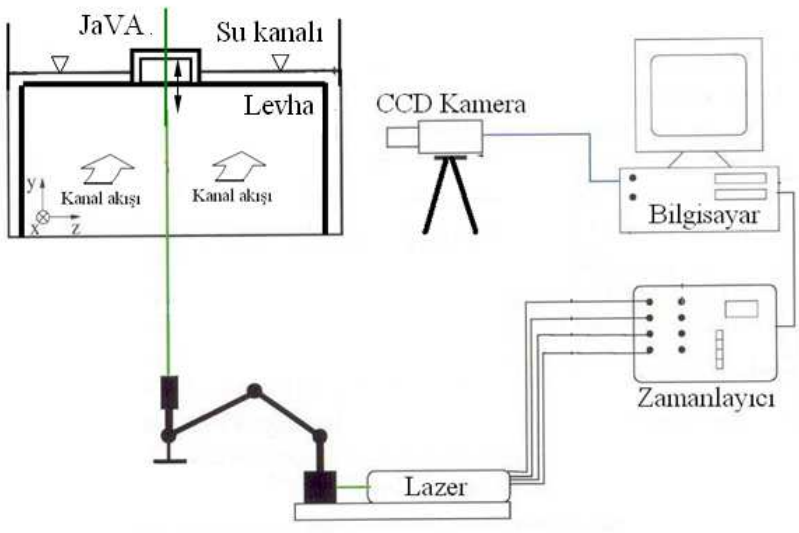
Daha önce hareketsiz su tankında JaVA kaynaklı akış rejimlerinin vektörel hız alanlarını bulmak için yapılan PIV deneyleri, aynı deney düzeneği kullanılmak üzere su kanalında düz plaksiglas levha üzerine yerleştirilmiş JaVA'nın sınır tabaka üzerindeki etkisini araştırmak üzere aynı çalışma ilkeleri doğrultusunda tekrarlanmıştır.

PIV deneylerinde sınır tabaka üzerinde aktüatör etkisini düşük frekanslarda daha rahat gözlemlemek açısından, genliği a = 2 mm olan yeni bir disk de deneylere dahil edilmiştir. JaVA kaynaklı akışlar genellikle geniş aralıktan (w_w) ortaya çıktığı için

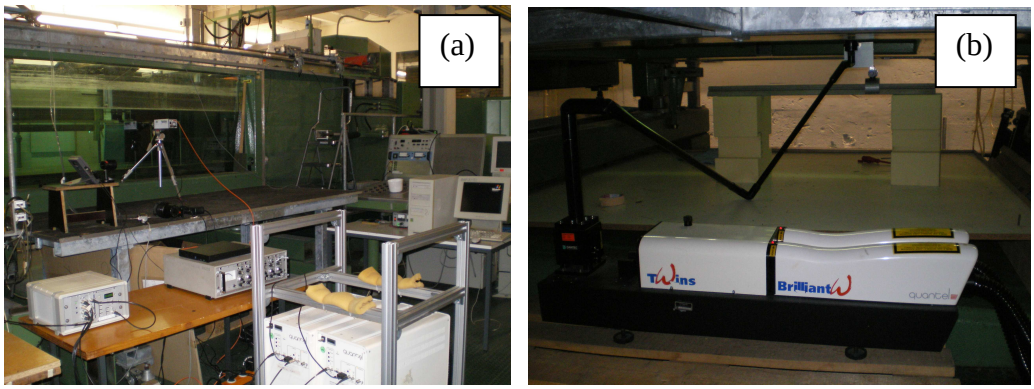
plaka genişliği akışın jet veya vorteks olmasını belirleyen önemli bir parametredir. Bu bağlamda su kanalındaki PIV deneylerinde en sık kullanılan b = 25 mm genişliğindeki ve 5 mm kalınlığındaki aktüatör plakası kullanılarak deneyler yapılmış, ancak daha az plaka genişliğinin ne gibi sonuçlar doğurduğunu görmek açısından b = 21.8 mm genişliğindeki plakaya da su kanalındaki PIV deneylerinde başvurulmuştur.

Su kanalında yapılan PIV deneylerinin çalışma ilkeleri, akış görüntüleme deneylerinde uygulanan ilkelere benzerlik göstermektedir. Levha-JaVA montajı (A) ve (B) durumlarında ele alınmış ve seçilen uygun aktüatör parametrelerinde ve farklı plaka konumlarında düşük serbest akım hızlarında deneyler yapılmıştır.

Su kanalında yapılan akış görüntüleme deneyleri ile JaVA kaynaklı akış tiplerinin sınır tabakaya etkisi; JaVA gövdesi yakınından alınan görüntülerle ortaya konmuştur. Aynı şekilde PIV deney düzeneği elemanları su kanalı etrafında ve altında uygun yerlere konularak, önce aktüatör yakınında sonra da aktüatör geniş aralığından 300 mm mesafeden hız vektörleri alınmıştır. Düz plaksiglas levha üzerinde aktüatör sonrasında gelişen ve aktüatörden 300 mm mesafeden alınan PIV hız alanları, özellikle farklı çalışma frekanslarında laminar sınır tabakadaki hız profili değişimini ortaya koymaktadır. Şekil 4.13'de su kanalı etrafındaki PIV deney düzeneği ekipmanları gösterilmiştir. Şekil 4.14(a)'da su kanalında yapılan PIV deneylerinde kullanılan deney ekipmanları Şekiş 4.14(b)'de ise su kanalı altında JaVA hizasına yerleştirilmiş lazer kaynağı görülmektedir.



Şekil 4.13 : Su kanalında PIV deney düzeneği ve veri toplama şeması (ölçeksiz).



Şekil 4.14 : Su kanalında (a) PIV deney düzeneği, (b) lazer kaynağı ve çelik kolu.

Lazer kaynağı, Nd-Yag IV. sınıf lazerdir, görüntüler ise hassas bir kamera olan CCD kamera tarafından bilgisayar ortamına kaydedilmektedir. Lazer ışını, bir çelik kol içerisinden geçirilerek, eklem yerlerindeki aynalar ile istenen bölgeye demet halinde verilmiştir. Lazer kaynağı ve kolu, su kanalının altına yerleştirilmiş olup, görüntüleri kaydeden CCD kamera ile 90 derecelik açı yapmaktadır.

Deney düzeneği, kalibre edildikten sonra, daha önce belirlenen JaVA parametreleri ile deneyler yapılmıştır. Su kanalına izlenecek parçacık olarak beyaz renkli yoğun bir naylon çözeltisi boşaltılmıştır. Elde edilen PIV sonuçları, IAG'da bulunan bir yazılım ile işlenmiştir. Deney esnasında 1.5 ms, 3 ms veya 6 ms aralıklarla çekilmiş iki adet görüntüden, çapraz korelasyonla hız vektörleri elde edilmiştir. Vektörel hız alanları yaklaşık 6 **x** 5 cm^2'lik bir alan içinde hesaplanmıştır. Bölüm 3.10.3'de ayrıntıları verilen yöntemle pikselden boyutlu büyüklüklere geçilmiş ve hız vektörleri elde edilmiştir. Deney esnasında oluşan gerçekçi olmayan hatalı vektörler silinmiş ve bu vektörlerin yerine Kriging interpolasyonu ile uygun korelasyon fonksiyonu seçmek suretiyle (Gauss), yeni vektörler oluşturulmuştur.

Su kanalında basınç gradyeni yaratmayan, yere paralel yeterince uzun düz bir levha üzerinde gelişen laminer sınır tabakanın aktüatör tarafından enerjilendirilmesinin deneysel olarak incelenmesinde PIV üstünlükleri olan bir yöntemdir. PIV, sınır tabakayı rahatsız edecek Pitot tüpü ve sıcak film sondası benzeri mekanik ve elektriksel ölçüm aletlerinin kullanıldığı deney yöntemlerinden daha sağlıklı sonuç veren optik bir ölçüm yöntemidir. Pitot tüpü ne kadar küçük olursa olsun, sınır tabaka içerisinde levhaya yakın noktaların hızının ölçümünde yetersiz kalmaktadır.

Bu dezavantajı dolayısıyla sınır tabaka hız profilinde orijine yakın noktalarda gerçekçi olmayan veriler elde edilmektedir. Sıcak film anenometresi ile sınır tabaka içerisinde noktasal ölçüm yapılabilmesi nedeniyle anlık hız çalkantılarının etkisi altında kalınması da bu yöntemin bir kusurudur.

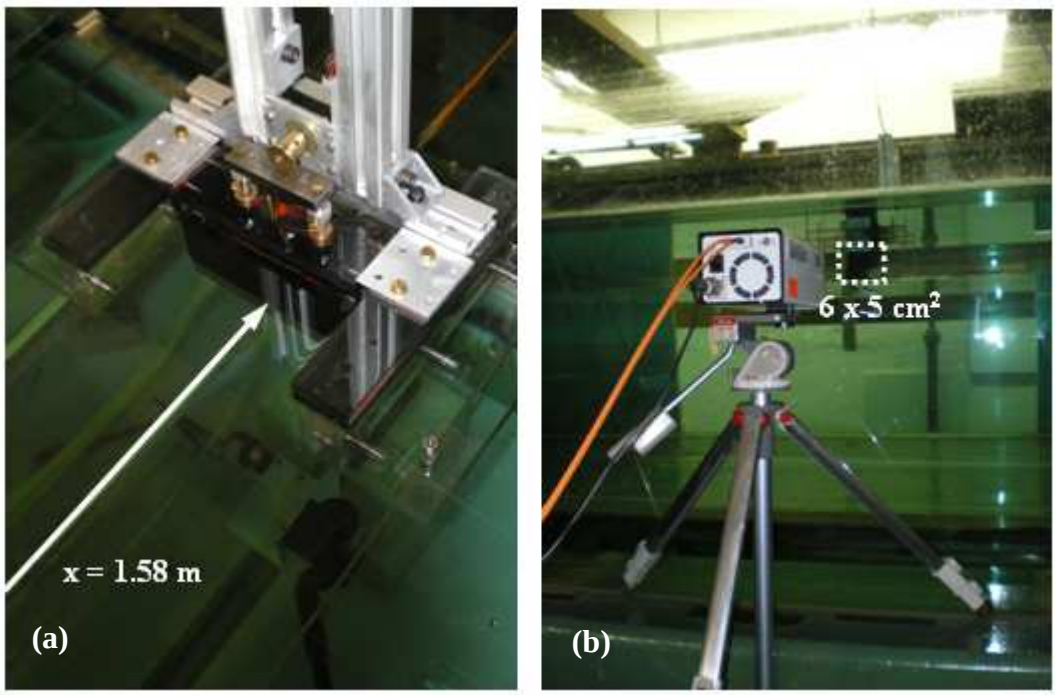
Yukarıda özetlenen bilgiler ışığında optik ölçüm yöntemi olan PIV ile daha sağlılı deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca PIV ile vektörel hız alanlarının da elde edilmesi, deneysel çalışmalara paralel yürütülen sayısal çalışmaların validasyonunu da mümkün kılmaktadır.

4.3.1 PIV deneyinin JaVA yakınında uygulanması

Akış görüntüleme deneylerinde ortaya çıkarılan JaVA-sınır tabaka etkileşimi, frekansın veya plaka bağıl konumunun değiştirildiği farklı çalışma koşullarında, jet akışının sınır tabaka üzerindeki etkisini ortaya koymada faydalı olmuştur ve hangi aktüatör parametrelerinde aktüatör jet akışının serbest akım hızını kontrol etmede başarılı olduğunu göstermiştir. JaVA kaynaklı akış rejimlerinin sınır tabaka ile etkileşiminin başlangıç aşamasının deneysel yoldan hız alanlarını elde etmek için lazer kolunun optik merceği aktüatörün tam ortasında lazer düzlemi oluşturacak şekilde konumlandırılmıştır. Emme ve basma fazlarının izlendiği bu akış alanlarından jet rejimini meydana getiren vorteks çiftleri rahatlıkla gözlemlenebilmektedir.

Aktüatör gövdesi, yansımayı ve buna bağlı aktüatör gövdesi etrafında oluşabilecek gerçekçi olmayan vektörleri engellemek için siyaha boyanmıştır. Şekil 4.15(a)'da jet akışının görüntülenmesi için JaVA'nın altına yerleştirilmiş çelik kolun optik merceğinin bulunduğu ucu görülmektedir. Şekil 4.15(b)'de ise bu konumda ayarlanmış deney düzeneğinde görüntü almak için optik ekseni lazer demetine dik açıyla bakan CCD kamera verilmiştir.

PIV deneylerinde serbest akım hızı 8.38 cm/s değerinde tutulmuş ve aktüatör plakası genişliği 21.8 ve 25 mm alınmıştır. Plakaya düşey doğrultuda hareket veren eksantrik diskin genliği a = 1 mm ve a = 2 mm olarak alınmıştır. Genliğe göre eğer a = 1 mm'lik disk kullanılmış ise, çalışma frekansı f = 1, 2, 3 ve 4 Hz seçilmiştir. Eğer a = 2 mm'lik disk kullanılmış ise, çalışma frekansı f = 0.5, 1 ve 2 Hz seçilmiştir. Bu şekilde aynı serbest akım hızı için iki farklı genlikte disk ile çalışılsa bile her iki durumdaki $\boldsymbol{r}$ oranlarının aynı olması sağlanmıştır.

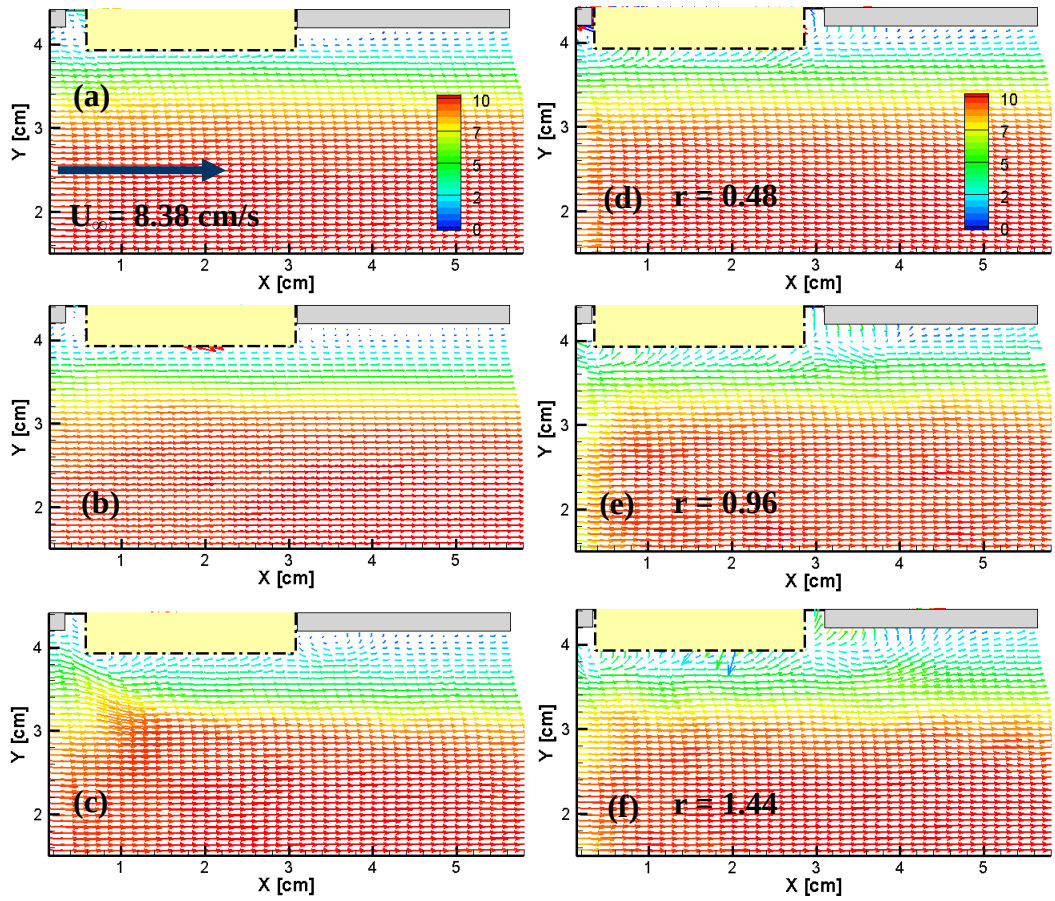


Şekil 4.15 : JaVA yakınında PIV deneyi: (a) levha üzerinde JaVA, (b) CCD kamera.

Su kanalında yapılan PIV deneylerinde çapraz korelasyon sonunda bir periyoda ait 50 adet anlık akış alanı elde edilmiştir. Bazı durumlarda zaman ortalamalı akış alanını iyileştirmek için iki periyodu içeren 100 tane anlık akış alanı da kaydedilmiştir. PIV lazerinin frekansının 1 Hz olduğu gözönünde tutularak, step motor ile aktüatör çalışma frekansı hassas bir şekilde ayarlanarak 1 Hz'in tam katı olması engellenmiş ve böylelikle lazer demetinin periyodik emme-basma fazları içerisinde hep aynı anlık görüntüyü aydınlatmasının önüne geçilmiştir. Bu şekilde JaVA'nın bir periyodu içerisindeki emme ve basma fazlarına ait 25 farklı plaka konumunda 50 akış alanı tesbit edilmiştir. Bazen aktüatörün düşük çalışma frekanslarında, PIV lazerini kontrol eden zamanlayıcının programında yapılan değişiklerle, lazer frekansı 2 Hz'e çıkarılarak, toplam kayıt süresinde aktüatörün 0.5 Hz'lik çalışma frekansında bir periyot içerisinde 4 farklı plaka konumu, 1 Hz'lik çalışma frekansında bir periyot içerisinde 2 farklı plaka konumu içeren 50 akış alanı oluşturulmuştur. Bu durumda aktüatör frekansı tam değerinde tutulmuş ve lazer frekansının aktüatör frekansının tam katı olması nedeniyle hep aynı zaman diliminde görüntü alınması sağlanmıştır. Bu çalışma prensibi ile akışın emme ve basma fazları farklı zaman dilimlerinde sınıflandırılabilmişitir.

Şekil 4.16'da JaVA yakınında farklı frekanslarda ve I plaka konumunda ve (A) ve (B) montajlarında alınmış zaman ortalamalı PIV akış alanları görülmektedir. Burada

disk genliği a = 1 mm, plaka genişliği b = 25 mm ve serbest akım hızı U_∞= 8.38 cm/s olarak seçilmiştir. Şekil 4.16'da verilen zaman ortalamalı akış alanları Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da biraz daha yüksek serbest akım hızında yapılmış akış görüntüleme deneyleri ile karşılaştırılabilir. Şekil 4.16'daki zaman ortalamalı akış alanları uygun korelasyon katsayılarının seçilmesi ile (θ = 0.7) belirlenen Gauss fonksiyonu tabanlı Kriging interpolasyonu ile düzgünleştirilmiş ve iyileştirilmiştir. Bu işlem esnasında gerçekçi olmayan vektörlerin yerine uygun vektörler yerleştirilmekte ve orijinal akış alanı çok az bir değişim ile düzgünleştirilmektedir.



Şekil 4.16 : I plaka konumunda JaVA yakınında PIV deneyi. Sol sütun (A) montajı: (a) f = 1 Hz, (b) f = 2 Hz, (c) f = 3 Hz; sağ sütun (B) montajı: (d) f = 1 Hz, (e) f = 2 Hz, (f) f = 3 Hz (zaman ortalamalı akış alanları).

Çizelge 4.1'de (A) ve (B) tipi montajda yapılmış PIV deney setine ait özetleyici bilgiler verilmiştir. Hareketsiz sudakine benzer şekilde PIV ham verisinin işlenmesi esnasında kullanılan kısıtlar ve dönüştürme faktörü değerleri ifade edilmiştir. Hareketsiz suda herbir anlık akış alanına ait GOV'ların ortalaması verilmiştir, ancak Çizelge 4.1'deki GOV yüzdesi ortalama akış alanına ait rakamdır.

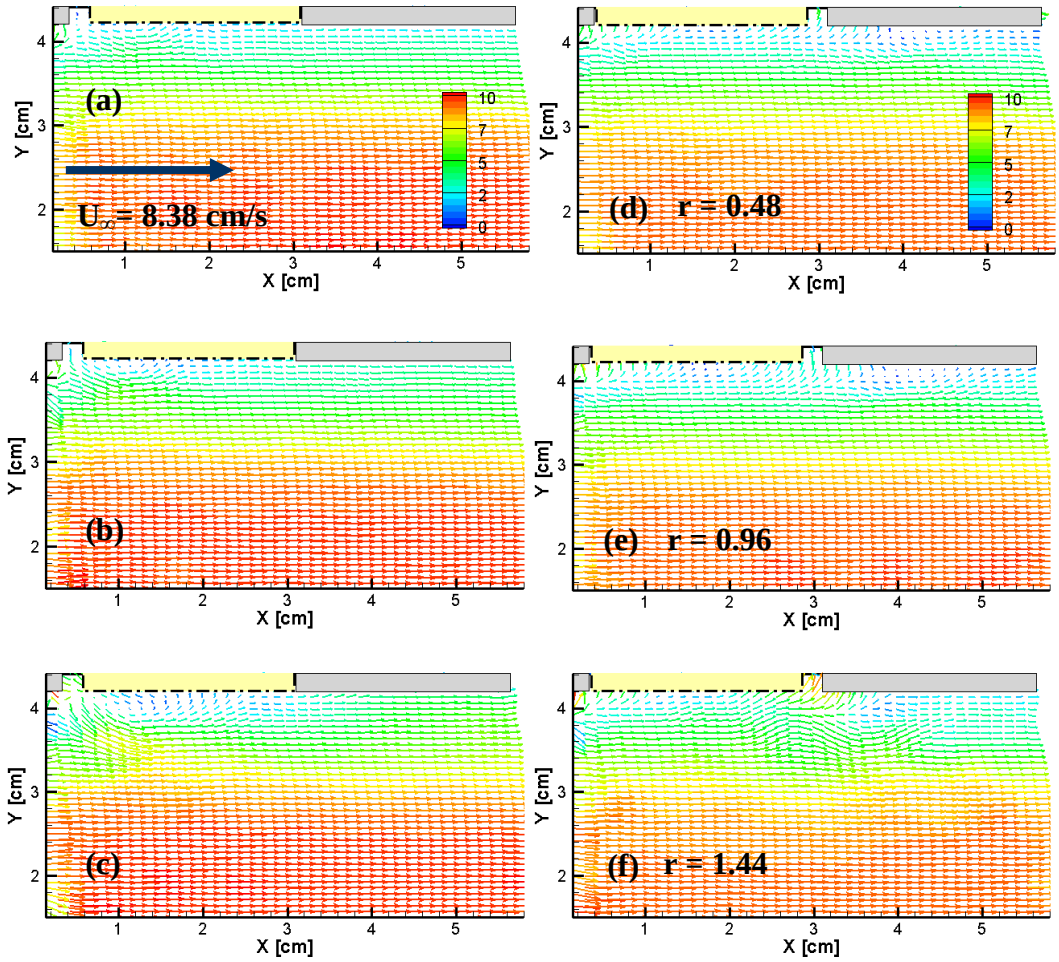
Çizelge 4.1 : I plaka konumunda farklı frekanslarda (A) ve (B) montajlarında PIV deney parametreleri (a = 1 mm, b = 25 mm).

Konum I ve (A)- Montajı								
f **[Hz]**	U_∞ **[cm/s]**	r	**Akış alanı sayısı**	Δt **[ms]**	Z **[p/cm]**	u_{maks} u_{min} **[p/s]**	v_{maks} v_{min} **[p/s]**	**G.O.V. [%]**
1	8.38	0.48	50	3	225	10/-4	4/-4	11.62
2	8.38	0.96	50	3	225	10/-4	4/-4	9.37
3	8.38	1.44	50	1.5	225	10/-4	4/-4	8.07
Konum I ve (B)- Montajı								
1	8.38	0.48	50	3	225	10/-4	4/-5	8.58
2	8.38	0.96	50	3	225	10/-4	5/-5	6.66
3	8.38	1.44	50	3	225	10/-4	5/-5	10.73

Şekil 4.16'da verilen örnekte gövde dışındaki plakanın JaVA gövdesi içine çekilmesiyle akış alanında daha önce hareketsiz su ortamında gözlemlenen değişiklikler, sınır tabaka üzerinde kendini göstermektedir. Bu bağlamda Şekil 4.17'de II plaka konumunda farklı frekanslarda elde edilen zaman ortalamalı akış alanları verilmiştir.

Şekil 4.17'den anlaşılacağı üzere frekansın artması sonucu, geniş aralığın bulunduğu yere göre, (A) tipi montajda aktüatör plakası altında ve (B) tipi montajda geniş aralığı takip eden levhanın cidar bölgesinde sınır tabakaya olan momentum transportu rahatlıkla gözlemlenebilmektedir. Bu örnekte plaka konumunun aktüatör gövdesi ile aynı hizada olması sebebiyle, akış herhangi bir engelle karşılaşmamaktadır, dolayısıyla sınır tabakanın herhangi bir nedenle rahatsız edilmemesi, JaVA kaynaklı akış rejiminin sınır tabakaya etkisinin yalın bir şekilde görülmesini sağlamaktadır. Çizelge 4.2'de (A) ve (B) tipi montajda II plaka konumunda yapılmış PIV deney setine ait özetleyici bilgiler verilmiştir.

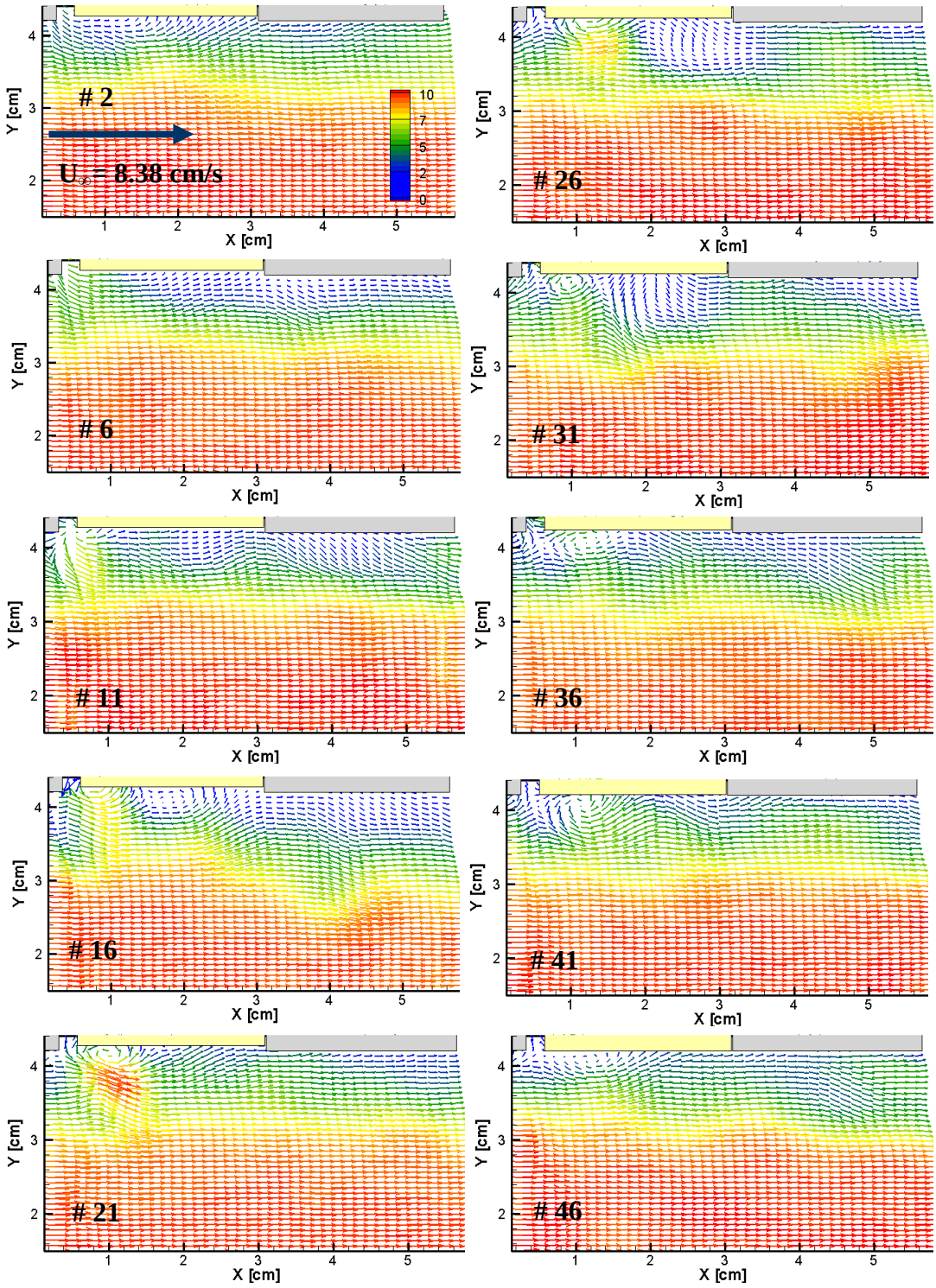
Anlık PIV akış alanlarının zaman ortalaması alındıktan sonra Kriging interpolasyonu ile düzgünleştirilmesi sonucu, zaman ortalamalı akış alanında emme ve basma fazlarını belirgin kılan vorteks çiftleri görülememektedir. Bu bağlamda Şekil 4.17(b)'deki akış alanının bir periyot içerisindeki anlık akış alanları Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Bu şekilde Kriging interpolasyonu ile düzgünleştirilmiş anlık akış alanlarında plaka hareketine bağlı emme ve basma fazları ve sınır tabakadaki çalkantılar açıkça görülmektedir.



Şekil 4.17 : II plaka konumunda JaVA yakınında PIV deneyi. Sol sütun (A) montajı: (a) f = 1 Hz, (b) f = 2 Hz, (c) f = 3 Hz; sağ sütun (B) montajı: (d) f = 1 Hz, (e) f = 2 Hz, (f) f = 3 Hz (zaman ortalamalı akış alanları).

Çizelge 4.2 : II plaka konumunda farklı frekanslarda (A) ve (B) montajlarında PIV deney parametreleri (a = 1 mm, b = 25 mm).

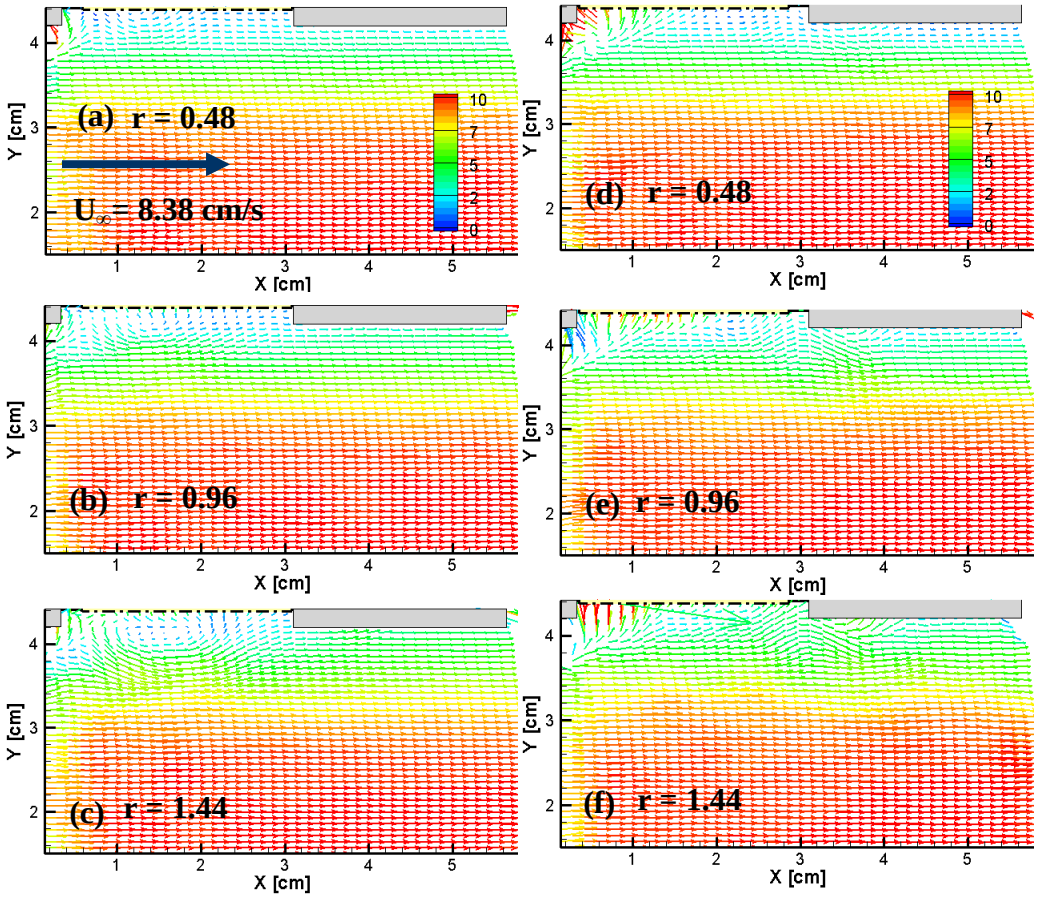
Konum II ve (A)- Montajı								
***f* [Hz]**	**U_∞ [cm/s]**	***r***	**Akış alanı sayısı**	**Δt [ms]**	***Z* [p/cm]**	**u_{maks} u_{min} [p/s]**	**v_{maks} v_{min} [p/s]**	**G.O.V. [%]**
1	8.38	0.48	50	3	225	10/-4	6/-5	2.90
2	8.38	0.96	50	1.5	225	5/-2	2/-2	2.49
3	8.38	1.44	50	1.5	225	10/-4	6/-5	4.09
Konum II ve (B)- Montajı								
1	8.38	0.48	50	3	225	9/-6	3/-3	5.22
2	8.38	0.96	50	3	225	10/-4	3/-3	5.41
3	8.38	1.44	50	1.5	225	10/-4	3/-3	3.39



Şekil 4.18 : II plaka konumunda (A) montajında JaVA yakınında PIV deneyi anlık görüntüleri (a = 1 mm, b = 25 mm, f = 2 Hz, r = 0.96).

Plakanın gövde içinde olması (konum III), JaVA'nın performansı açısından oldukça iyi sonuçlar doğurmaktadır. Özellikle JaVA'dan 300 mm sonra alınan PIV verilerinden yola çıkılarak bu kanıya varmak mümkündür. Şekil 4.19'da bu montaja ait zaman ortalamalı akış alanları, Çizelge 4.3'de ise ilgili akış rejimlerinin PIV verilerinin işlenmesi esnasında kullanılan parametreler verilmiştir.

Bu üç örnekte üç plaka konumunun iki farklı levha-JaVA montajında etkisi incelenmiştir. Yüksek frekanslarda sınır tabakada gözle görülür bir enerjilenme sözkonusudur. Bu montaj şekillerinin ve plaka konumlarının gelişen sınır tabakayı nasıl etkilediğini ve sınır tabaka hız profilini nasıl iyileştirdiğini anlamak için JaVA'dan belli bir mesafede alınan PIV sonuçları incelenmelidir.



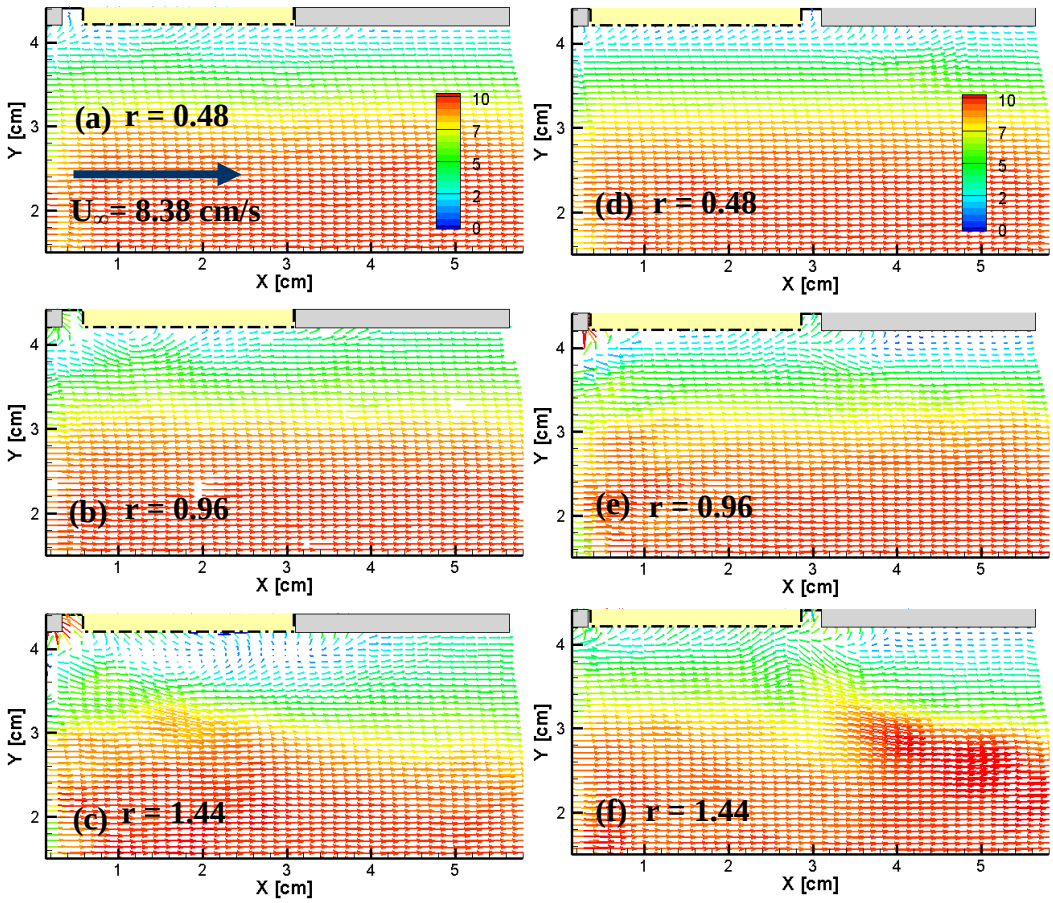
Şekil 4.19 : III plaka konumunda JaVA yakınında PIV deneyi. Sol sütun (A) montajı: (a) f = 1 Hz, (b) f = 2 Hz, (c) f = 3 Hz; sağ sütun (B) montajı: (d) f = 1 Hz, (e) f = 2 Hz, (f) f = 3 Hz (zaman ortalamalı akış alanları).

Çizelge 4.3 : III plaka konumunda farklı frekanslarda (A) ve (B) montajlarında PIV deney parametreleri (a = 1 mm, b = 25 mm).

Konum III ve (A)- Montajı								
f [Hz]	**U_∞ [cm/s]**	**r**	**Akış alanı sayısı**	**Δt [ms]**	**Z [p/cm]**	**u_{maks} u_{min} [p/s]**	**v_{maks} v_{min} [p/s]**	**G.O.V. [%]**
1	8.38	0.48	50	3	225	10/-4	3/-3	4.22
2	8.38	0.96	50	3	225	10/-4	5/-5	4.60
3	8.38	1.44	50	3	225	10/-4	5/-5	7.98
Konum III ve (B)- Montajı								
1	8.38	0.48	50	3	225	10/-4	5/-5	6.73
2	8.38	0.96	50	3	225	10/-4	7/-10	6.49
3	8.38	1.44	50	3	225	10/-6	10/-11	8.52

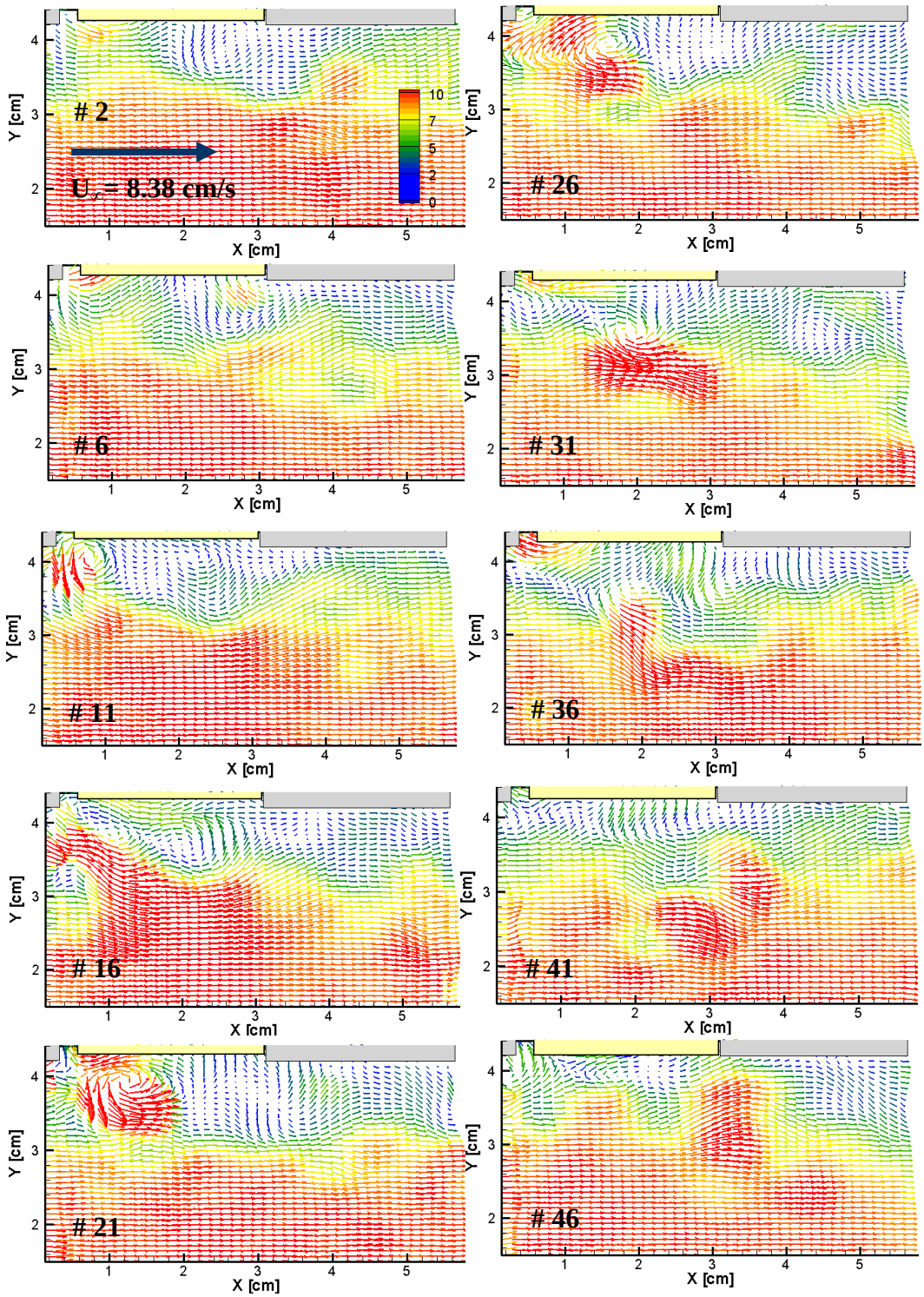
Su kanalı içerisinde yapılan PIV deneylerinde, JaVA'nın etkisini aynı zamanda jet hızının serbest akım hızına oranını arttırmak için, disk genliğinin arttırılması başarılı sonuçlar vermiştir. Ancak step motor ile belirli bir frekans aralığında kalınması ve JaVA'nın tasarımından kaynaklanan kısıtlamalar nedeniyle, disk genliğinin 2 mm olması durumunda f = 2 Hz'in üstünde pek çalışılamamıştır. Mümkün olan en yüksek frekansla çalışma durumunda da özellikle aktüatör plakasının levha ile sınırı olan noktalarda bazı gerçekçi olmayan vektörlerin önüne geçmek zorlaşmaktadır.

Disk genliğinin 2 mm olması durumunda basma fazında jet akışının geniş aralıktan çıkma hızı, aynı frekanslar ve çalışma koşullarında 1 mm genliğinde disk kullanıldığı zaman çıkan jet hızının iki katıdır, bu bağlamda oluşacak jetin gözlemlenebilmesi için yeteri derecede geniş bir pencere gereklidir. 6 **x** 5 cm^2'lik PIV çerçevesi, JaVA yakınındaki vorteks ve çalkantıları izlemek için yeterlidir. Şekil 4.20'de 2 mm disk genliği ile II plaka konumunda (A) ve (B) tipi JaVA-levha montajında yapılmış PIV deneylerinin farklı frekanslardaki zaman ortalamalı akış alanları verilmiştir.



Şekil 4.20 : II plaka konumunda JaVA yakınında PIV deneyi. Sol sütun (A) montajı: (a) f = 0.5 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz; sağ sütun (B) montajı: (d) f = 0.5 Hz, (e) f = 1 Hz, (f) f = 2 Hz (zaman ortalamalı akış alanları).

Şekil 4.21'de Kriging interpolasyonu ile düzgünleştirilmiş anlık akış alanlarında plaka hareketine bağlı emme ve basma fazları, disk genliğinin de akış kontrolündeki rolünü ortaya koymaktadır.



Şekil 4.21 : II plaka konumunda (A) montajında JaVA yakınında PIV deneyi anlık görüntüleri (a = 2 mm, b = 25 mm, f = 2 Hz, r = 1.92).

Yüksek disk genliğinin etkisiyle, basma fazında geniş aralıktan enjekte edilen vorteks ve bunu takip eden emme fazında bu oluşan vorteksin sınır tabaka içerisinde ilerlemesi anlık görüntülerden anlaşılmaktadır. Özellikle f = 2 Hz'de montaj tipine bağlı olarak, 50 anlık akış alanı üzerinden zaman ortalaması alınmış jet akışı, JaVA'nın bulunduğu bölgede kalınlığı yaklaşık 21 mm olan sınır tabakanın dışına taşmaktadır. Burada ***r*** oranının 1.92 olması, jet akışının serbest akım hızının yaklaşık iki katı olduğunu, dolayısıyla JaVA'dan beklenen momentum transportunun veriminin çok yüksek olduğunu göstermektedir.

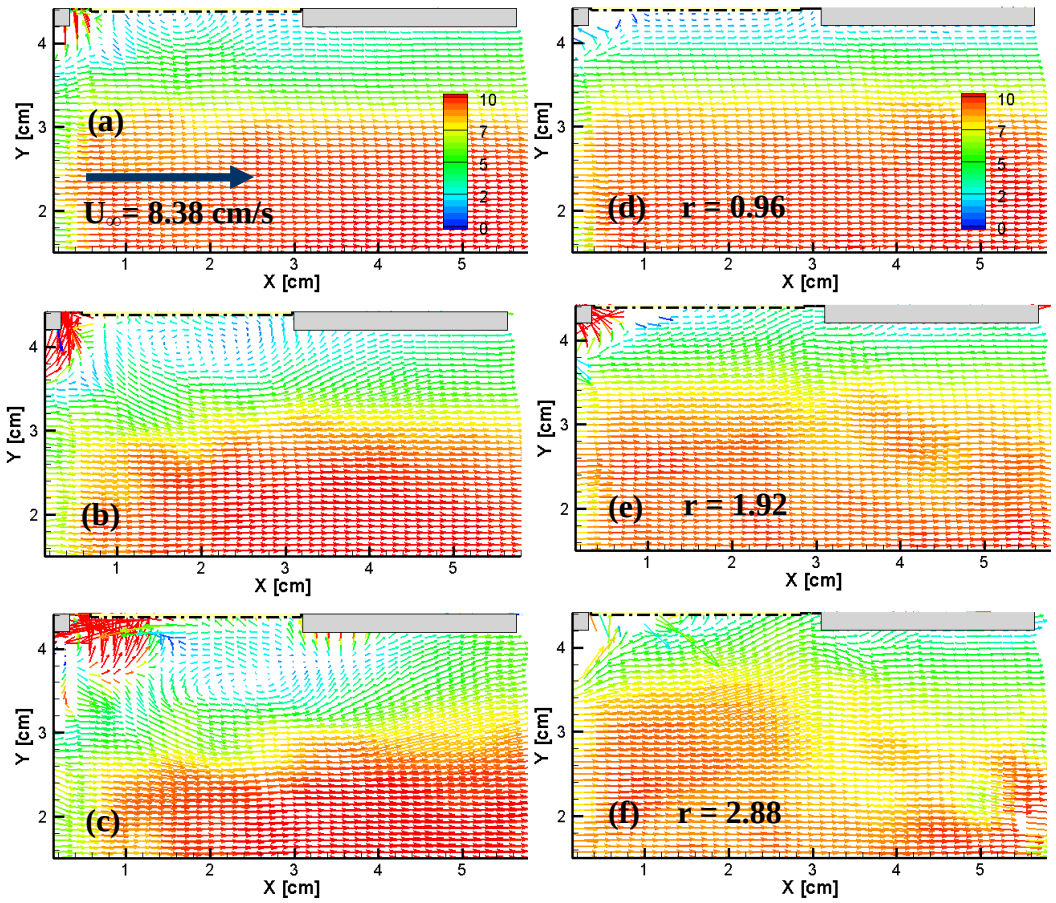
Plakanın gövde içerisine çekilmesiyle tekrarlanan PIV deneyinde Şekil 4.22'deki zaman ortalamalı akış alanları elde edilir. Burada 3 Hz'lik frekans ile çalışılması durumunda genliğin de yüksek olması nedeniyle kaotik bir akış oluşmakta ve bu ortalama akış alanına da yansımaktadır.

Çizelge 4.4'de II ve III plaka konumlarında a = 2 mm genliğindeki disk ile yapılan deneylere ait verilerin işlenmesinde kullanılan kısıtlar ve işlem sonunda zaman ortalamalı akış alanındaki GOV yüzdesi verilmiştir.

Çizelge 4.4 : II ve III plaka konumunda farklı frekanslarda (A) ve (B) montajlarında PIV deney parametreleri (a = 2 mm, b = 25 mm).

Konum II ve (A)- Montajı								
f **[Hz]**	U_∞ **[cm/s]**	***r***	**Akış alanı sayısı**	Δt **[ms]**	***Z*** **[p/cm]**	u_{maks} u_{min} **[p/s]**	v_{maks} v_{min} **[p/s]**	**G.O.V. [%]**
0.5	8.38	0.48	50	6	225	20/-4	6/-5	10.20
1	8.38	0.96	50	3	225	20/-8	9/-9	6.34
2	8.38	1.92	50	1.5	225	10/-4	6/-8	2.94
Konum II ve (B)- Montajı								
0.5	8.38	0.48	50	6	225	20/-7	9/-9	5.66
1	8.38	0.96	50	3	225	12/-4	6/-9	4.32
2	8.38	1.92	50	1.5	225	13/-4	8/-12	3.15
Konum III ve (A)- Montajı								
f **[Hz]**	U_∞ **[cm/s]**	***r***	**Akış alanı sayısı**	Δt **[ms]**	***Z*** **[p/cm]**	u_{maks} u_{min} **[p/s]**	v_{maks} v_{min} **[p/s]**	**G.O.V. [%]**
1	8.38	0.96	50	3	225	10/-4	6/-5	11.62
2	8.38	1.92	50	3	225	10/-6	8/-10	9.37
3	8.38	2.88	50	3	225	16/-9	9/-12	8.07
Konum III ve (B)- Montajı								
1	8.38	0.96	50	3	225	10/-4	6/-5	7.22
2	8.38	1.92	50	3	225	14/-4	9/-13	8.13
3	8.38	2.88	50	3	225	14/-4	9/-13	17.42

Kullanılan parametre kombinasyonlarında en yüksek değere ulaşılmasıyla özellikle basma esnasında, geniş aralıkta meydana gelen jet akışı gerçekçi olmayan vektörlere neden olabilmektedir. Sonuç itibariyle JaVA yakınında yapılan PIV deneyleri, a = 1 mm'lik disk genliği için hareketsiz suda yapılan PIV ve CFD çalışmaları ışığında (bkz. Bölüm 3.15) ulaşılan bilgilerin su kanalındaki etkilerini anlamak açısından önemlidir. Bunun yanında a = 2.0 mm genliğindeki diskin sınır tabakayı enerjilendirmedeki üstünlüğü ispatlanmıştır.

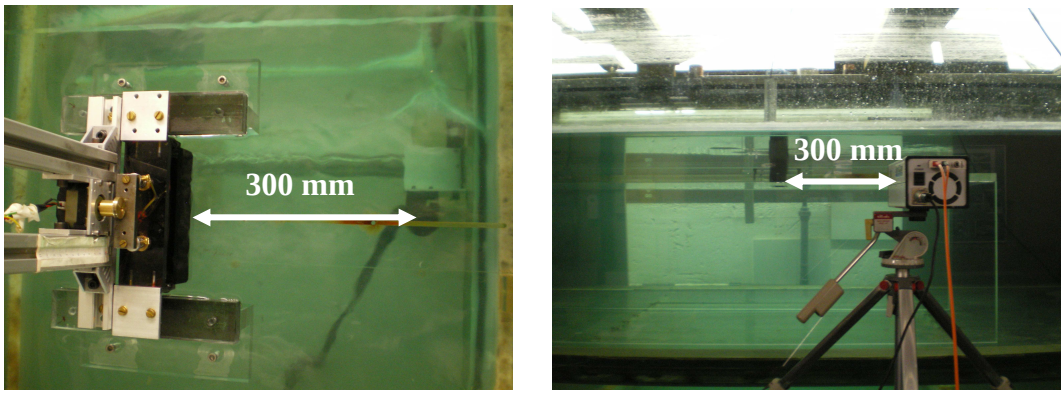


Şekil 4.22 : III plaka konumunda JaVA yakınında PIV deneyi. Sol sütun (A) montajı: (a) f = 1 Hz, (b) f = 2 Hz, (c) f = 3 Hz; sağ sütun (B) montajı: (d) f = 1 Hz, (e) f = 2 Hz, (f) f = 3 Hz (zaman ortalamalı akış alanları).

4.3.2 PIV deneyinin JaVA ötesinde uygulanması

JaVA yakınında yapılan PIV deneyleri, değişen frekanslarda sınır tabakaya momentum transportunu incelemek açısından faydalı olmuştur, ancak sınır tabakanın aktüatör yakınında gerek çalkantılardan gerek plaka hareketinden dolayı rahatsız edilmesi nedeniyle belli bir mesafede sınır tabaka hız profili alınması; JaVA'nın etkinliğini yorumlamak için daha faydalı olacaktır.

PIV ölçme yöntemi kullanarak değişik parametre kombinasyonlarında (a, b, f ve plaka bağıl konumu) elde edilen JaVA kaynaklı akış tiplerinin, akış yönünde aktüatörün 300 mm ilerisinde alınan hız alanları aktüatör-sınır tabaka etkileşimi hakkında ve hangi parametrelerde sınır tabakaya etkin bir şekilde momentum transportu sağlanarak istenen özelliklerde sınır tabaka hız profili sağlandığı konusunda fikir vermektedir. JaVA-sınır tabaka etkileşimi; aktüatör plakası konumu bağlamında jetin çıktığı geniş aralıktan 300 mm mesafede düz plaksiglas levha üzerinde incelenmiştir. Hepsinde kanal hızı (U_∞ = 8.38 cm /s) sabit tutulmuş fakat plakaya düşey doğrultuda hareket veren eksantrik diskin genliği a = 1 mm ve a = 2 mm olarak alınmıştır. Plaka genişliğinin de etkisini incelemek için b = 21.8 mm ve 25 mm (5 mm kalınlığındaki) genişliğindeki plakalar kullanılmıştır. PIV ile çalışma ilkeleri Bölüm 4.3.1'de üzerinde durulduğu gibidir. Şekil 4.23(a)'da sınır tabakanın görüntülenmesi için JaVA'dan 300 mm öteye yerleştirilmiş çelik kolun optik merceğinin bulunduğu ucu görülmektedir. Şekil 4.23(b)'de ise bu konuma ayarlanmış CCD kamera verilmiştir.



Şekil 4.23 : JaVA'dan 300 mm ötede PIV deneyi: (a) JaVA, (b) CCD kamera.

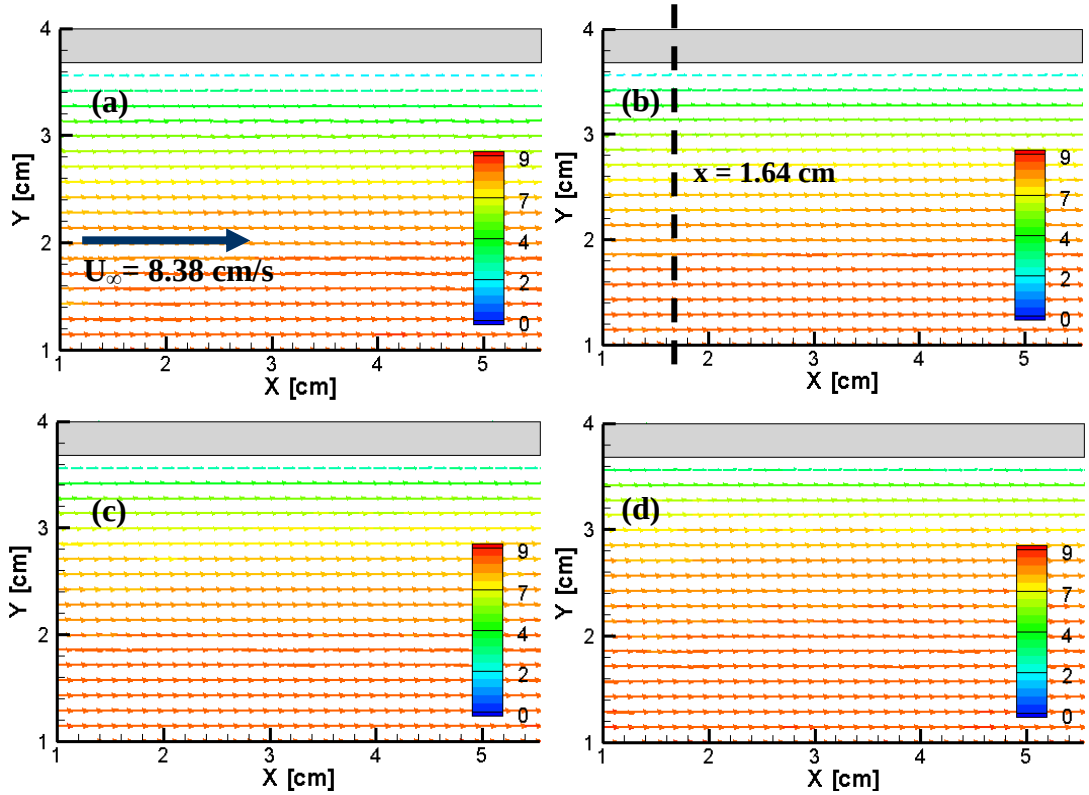
Pekçok örnekten yola çıkarak, aynı çalışma koşullarında yüksek disk genliğinin daha iyi ve istenen bir sınır tabaka hız profili verdiği bulunmuştur. Ele alınan örneklerde aktüatör plakasının farklı bağıl konumlarında aktüatörün çalıştırılmadığı ($\boldsymbol{f}$ = 0) ve değişik frekanslarda çalıştırıldığı durumlarda; aktüatörün geniş aralığından 300 mm mesafede düz levha üzerinde oluşan sınır tabakaya ait PIV hız alanları deneysel yoldan elde edilmiştir.

İncelenen pekçok örnek içerisinden temsili olarak iki durum için PIV akış alanları verilmiştir. Şekil 4.24'de; (A) tipi montajda ve aktüatör plakasının III konumunda, JaVA'nın disk genliği a = 1 mm ve plaka genişliği b = 25 mm ile f = 1, 2, 3 ve 4 Hz frekanslarında çalıştırıldığı durumlarda; belirtilen mesafede düz levha üzerinde

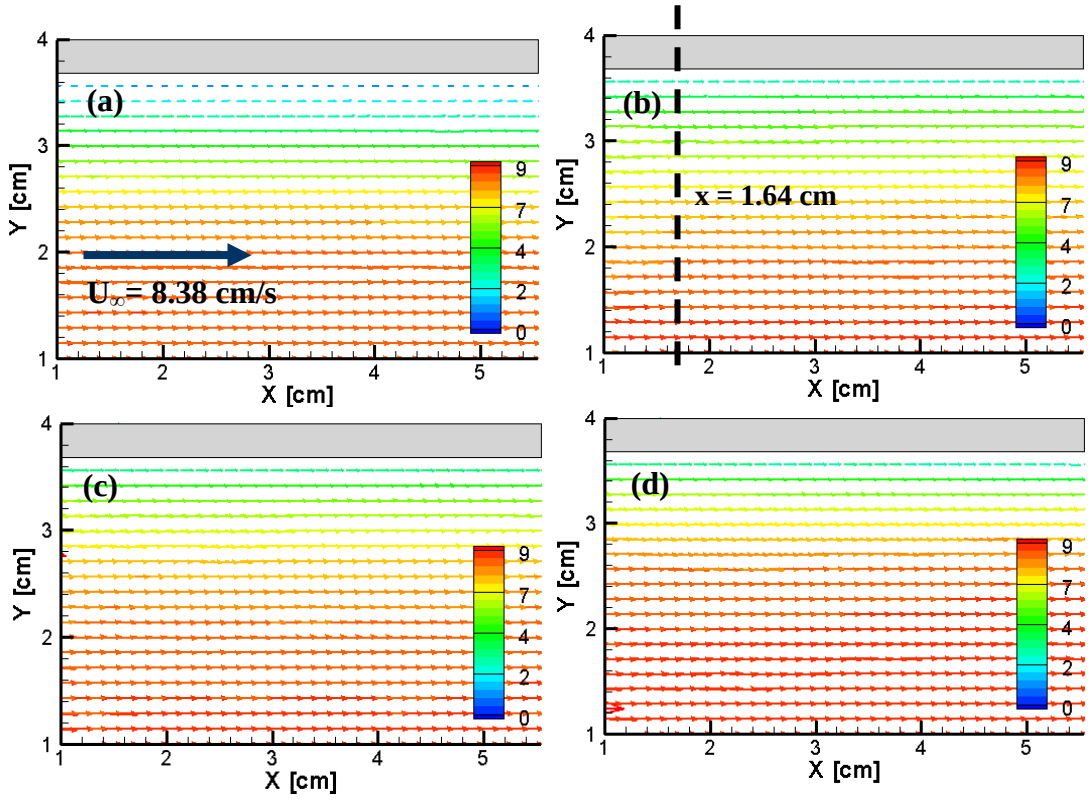
oluşan sınır tabakaya ait zaman ortalamalı hız alanları verilmiştir. Şekil 4.25'de; (A) tipi montajda ve III plaka konumunda yani aktüatör plakasının gövde içinde kalması halinde, disk genliği a = 2 mm ve plaka genişliği b = 25 mm için aktüatörün çalıştırılmadığı (f = 0) ve f = 0.5, 1 ve 2 Hz frekanslarında çalıştırıldığı durumlarda; aktüatörün geniş aralığından 300 mm mesafede düz levha üzerinde oluşan sınır tabakaya ait ortalama hız alanları verilmiştir.

PIV deneyinin bir dezavantajı, aynı anda hem JaVA yakınında hem de JaVA'dan istenen uzaklıkta deneysel akış alanının elde edilememesidir. Bunun bir nedeni PIV penceresi boyutunun kısıtlı olması, diğer bir nedeni de lazer ile aynı anda iki farklı kesidin aydınlatılamamasıdır. Bu nedenle JaVA ötesinden akış alanları alınırken, mümkün mertebede daha önce yapılan boyutlu akış parametrelerine ve plaka konumuna sadık kalınmıştır.

Çizelge 4.5'de JaVA ötesinde yapılan PIV deney sonuçlarının işlenmesi esnasında kullanılan hız bileşenleri kısıtları ve gradyen değerleri verilmiştir. Bu akış alanları Kriging interpolasyonu ile (θ = 5.0) düzgünleştirme faktörü seçilerek iyileştirilmiştir.



Şekil 4.24 : a = 1 mm ve b = 25mm ile III plaka konumunda JaVA ötesinde PIV deneyi: (a) f = 1 Hz, (b) f = 2 Hz, (c) f = 3 Hz ve (d) f = 4 Hz (zaman ortalamalı akış alanları).

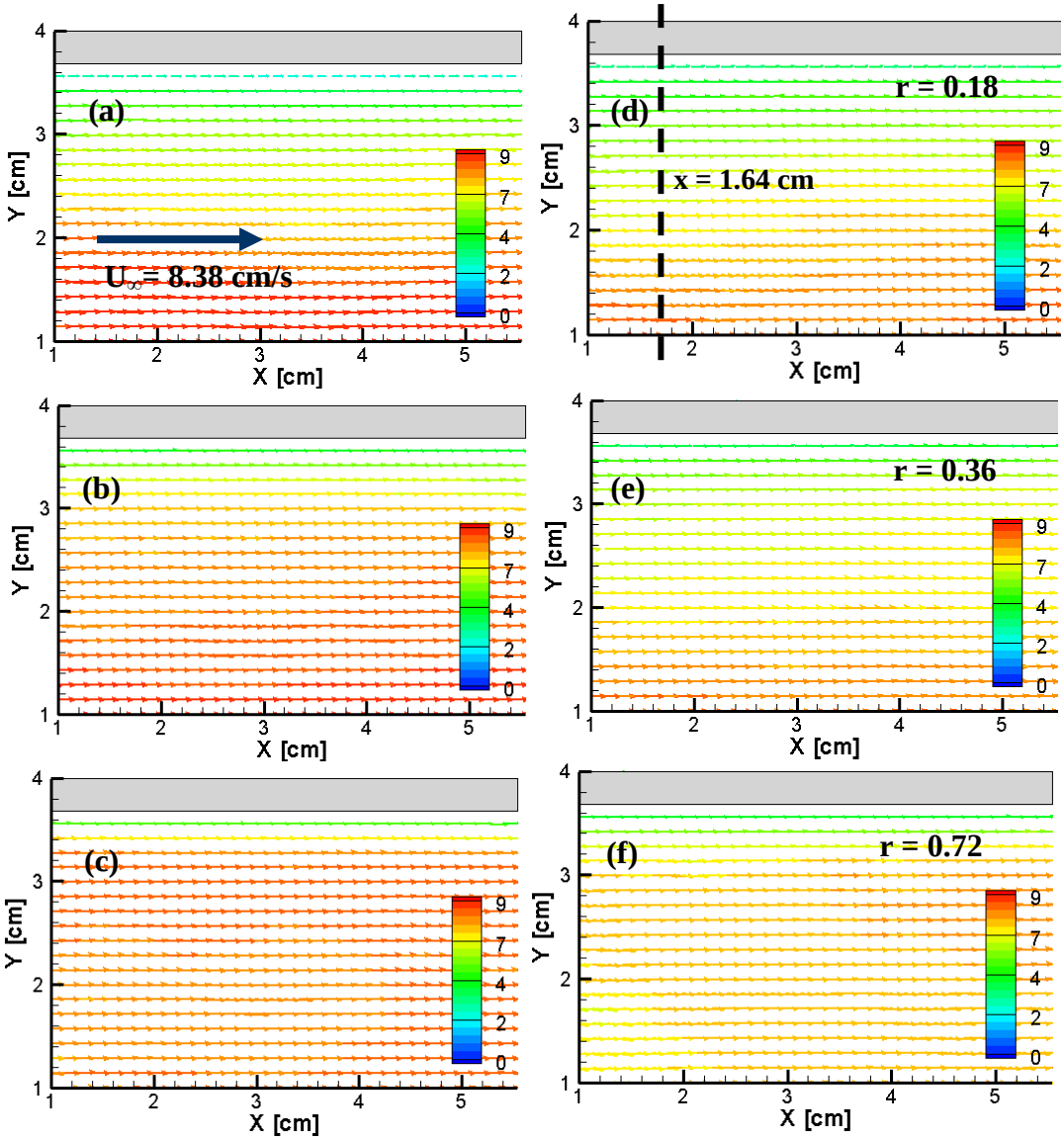


Şekil 4.25 : a = 2 mm ve b = 25 mm ile III plaka konumunda JaVA ötesinde PIV deneyi: (a) f = 0 (b) f = 0.5 Hz, (c) f = 1 Hz ve (d) f = 2 Hz (zaman ortalamalı akış alanları).

Çizelge 4.5 : III plaka konumunda farklı frekanslarda (A) montajında PIV deney parametreleri (a = 1 mm, a = 2 mm, b = 25 mm).

a = 1 mm, Konum III ve (A)- Montajı								
***f* [Hz]**	**U_∞ [cm/s]**	***r***	**Akış alanı sayısı**	**Δt [ms]**	***Z* [p/cm]**	**u_{maks} u_{min} [p/s]**	**v_{maks} v_{min} [p/s]**	**Gradyen**
1	8.38	0.48	50	3	225	10/-6	5/-6	4
2	8.38	0.96	50	3	225	10/-6	5/-6	4
3	8.38	1.44	50	3	225	10/-6	5/-6	4
4	8.38	1.92	50	3	225	10/-6	5/-6	4
a = 2 mm, Konum III ve (A)- Montajı								
0.5	8.38	0.48	50	3	225	10/-6	5/-6	4
1	8.38	0.96	50	3	225	10/-6	5/-6	4
2	8.38	1.92	50	3	225	10/-6	5/-6	4

Şekil 4.26'da; sol sütünda (B) tipi JaVA-levha montajında, I plaka konumunda yani aktüatör plakasının gövde dışına çıkması halinde, disk genliği a = 2 mm ve plaka genişliği b = 21.8 mm için aktüatörün çalıştırılmadığı (f = 0) ve f = 0.5, 1 ve 2 Hz frekanslarında çalıştırıldığı durumlarda; elde edilmiş anlık PIV akış alanlarının zaman ortalamaları verilmiştir. Şekil 4.26'da sağ sütunda ise yine (B) montajında ve aynı JaVA parametrelerinde plaka konumunun II olması durumu ele alınmıştır.

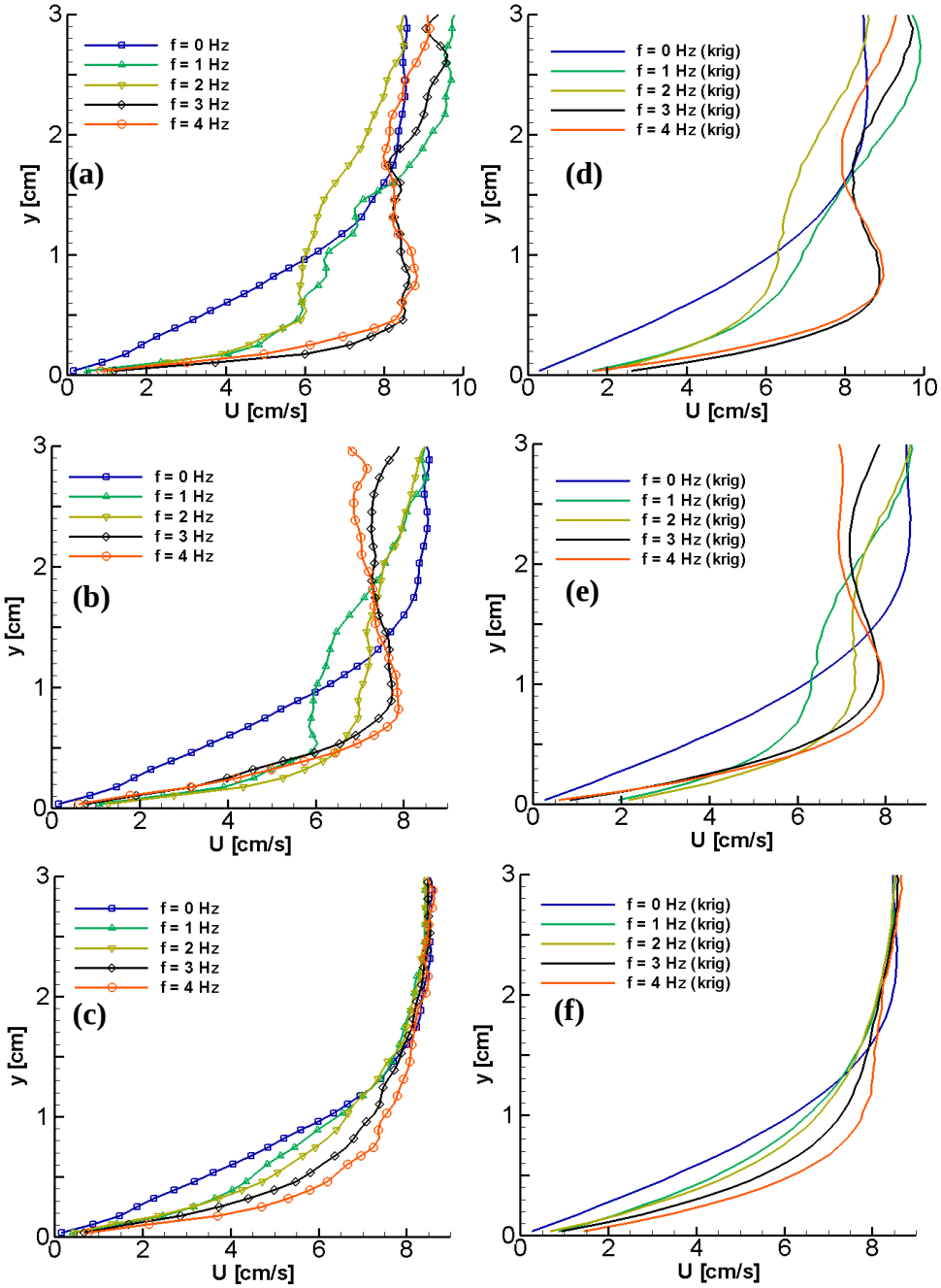


Şekil 4.26 : *a* = 2 mm ve *b* = 21.8 mm ile JaVA ötesinde PIV deneyi. Sol sütun (B) montajı, konum I: (a) *f* = 0.5 Hz, (b) *f* = 1 Hz, (c) *f* = 2 Hz; sağ sütun (B) montajı, konum II: (d) *f* = 0.5 Hz, (e) *f* = 1 Hz, (f) *f* = 2 Hz (zaman ortalamalı akış alanları).

4.3.3 PIV ile sınır tabaka hız profillerinin elde edilmesi

Anlık PIV akış alanlarının ortalaması alındıktan sonra hız vektörlerinin hesaplandığı pencere içinde 300 mm'ye karşılık gelen yatay pozisyonda (pencere orjininden x = 1.64 cm öteden) kesit alınmış ve elde edilen deneysel sınır tabaka hız profilleri bir boyutlu Kriging interpolasyonu veya doğrusal Kriging ile (Gauss fonksiyonu, düzgünleştirme faktörü θ = 0.001) düzgünleştirilmiştir. Bilindiği üzere Kriging interpolasyonu, deneysel verilerin düzgünleştirilmesinde ve gerçekçi olmayan deney verilerinin atılıp yerine mantıklı değerlerin konmasında verimli şekilde kullanılabilen bir sayısal yöntemdir. Grafiklerde değişik renklerdeki şekiller ile gösterilmiş orijinal

deneysel verilerden interpolasyon ile sınır tabaka hız profili elde edilmiştir. Şekil 4.27'de çeşitli plaka konumları ve JaVA-levha montajlarında a = 1 mm ve b = 25 mm parametrelerinde deneysel verilerden elde edilmiş sınır tabaka hız profilleri ve Kriging ile düzgünleştirilmiş grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.27 : a = 1 mm ve b = 25 mm için zaman ortalamalı akış alanlarından elde edilmiş orijinal sınır tabaka hız profilleri: (a) Konum I, (A) tipi, (b) Konum II, (B) tipi, (c) Konum III, (A) tipi montaj; ve düzgünleştirilmiş sınır tabaka hız profilleri: (d) Konum I, (A) tipi, (e) Konum II, (B) tipi, (f) Konum III, (A) tipi montaj.

Aktüatör plakasının I konumunda sınır tabaka JaVA'nın çalışmadığı durum ile kıyaslanırsa, aktüatörün sınır tabakaya momentum kattığı ve sınır tabaka hız profilini iyileştirici yönde çalıştığı anlaşılmaktadır, ancak plakanın düşey hareketi esnasında sınır tabakayı rahatsız etmesi ve akış yönünde plaka ardında oluşan döngüler JaVA'dan 300 mm ötedeki kesidinde çalkantılara yol açmakta ve bu durum f = 1 Hz ve f = 2 Hz'deki hız profillerine yansımaktadır.

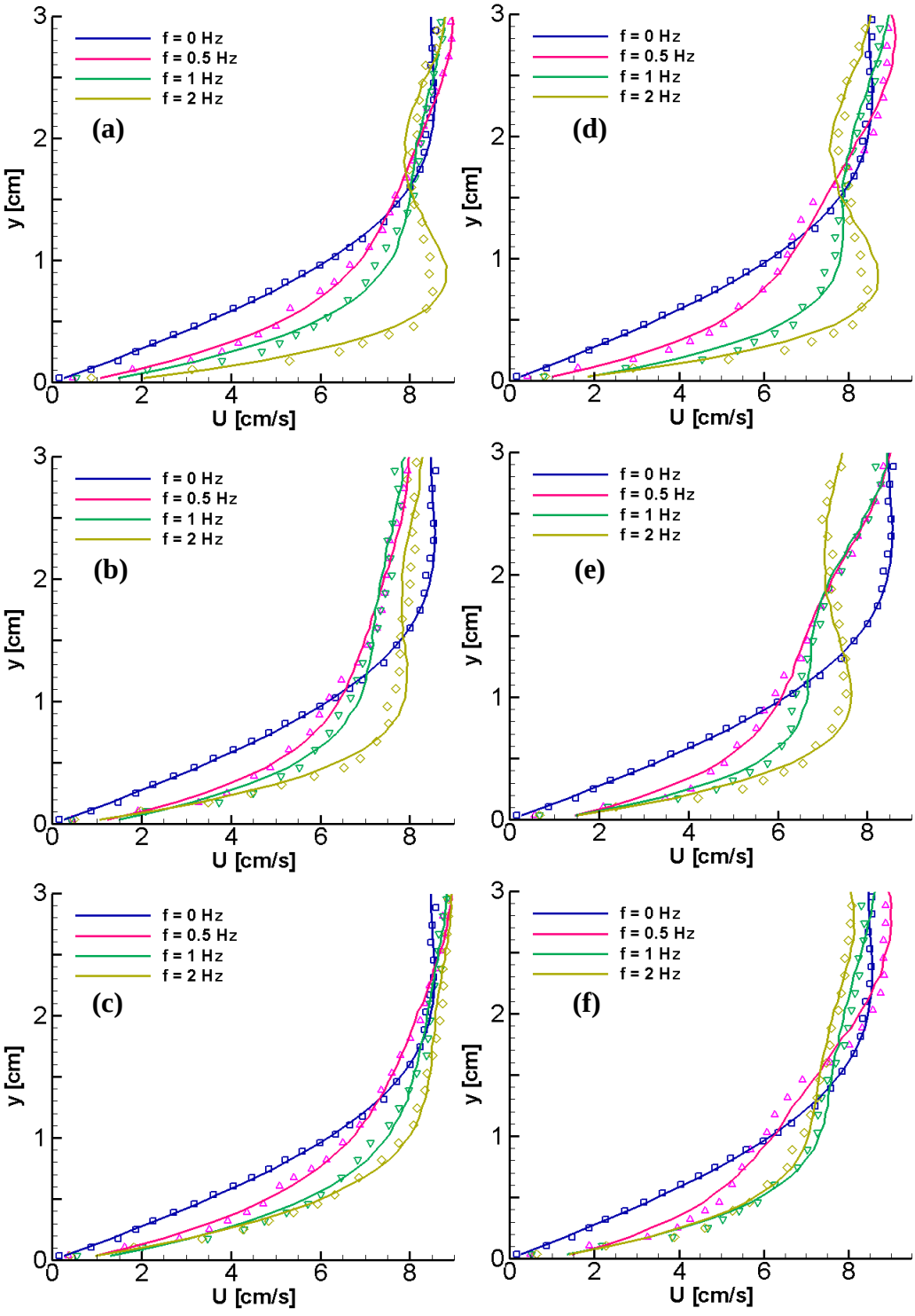
II plaka konumunda hız profilleri biraz daha düzelmektedir ve bu üç grafik ışığında beklenen en iyi hız profili, III plaka konumunda oluşmaktadır. Artan frekansla hız profili beklenen şekilde iyileşmektedir, hatta orijinal deney verisini düzeltmeksizin bu yargıya varmak mümkündür.

Frekansın arttırılması hız profilini nasıl iyileştiriyorsa, genliğin de bu yönde etkisinin olduğu üzerinde daha önceki bölümlerde durulmuştur. Değişen frekanslarda a = 2 mm'lik disk genliğinin kullanıldığı ve (A) ve (B) tipi JaVA-lavha montajlarında bütün plaka bağıl konumları denenerek oluşturulan akış rejimlerine ait orijinal sınır tabaka hız profili verileri ve düzgünleştirilmiş değerleri aynı grafik üzerinde Şekil 4.28'de verilmiştir.

Yüksek genlikte I plaka konumunda a = 2 mm olması halindeki sınır tabaka hız profilinden daha iyi sonuçlar alınmaktadır, artan frekanslarda ve yüksek genlikte sınır tabaka hız profilinin iyileşmesi hakkında varılan genel kanı aynıdır.

Üzerinde durulması gereken bir başka konu aktüatör plakası genişliğinin sınır tabakadaki akış ayrılması üzerindeki etkisinin ne olduğudur. Aktüatör plakasının b = 21.8 mm genişliğinde olması, geniş aralık mesafesinin artması (w_w = 5.7 mm) anlamına gelmektedir. Bu şekilde oluşan jet akışının hızı azalacak dolayısıyla JaVA'nın etkisini arttırmak için yüksek genlik değerleri (a = 2 mm) ile çalışılması gerekecektir, ancak $\boldsymbol{r}$ oranının tanımından yola çıkılırsa U_∞ = 8.38 cm/s serbest akım hızında ($r = 4abf/w_wU_\infty = 0.36\,f$) yüksek çalışma frekanslarında dahi $\boldsymbol{r}$ değerlerinde % 70 oranına ancak ulaşılmaktadır. Belirtilen a = 2 mm ve b = 21.8 mm parametrelerinde çalışıldığı zaman, çok etkin bir akış kontrolü sağlanamasada, sınır tabaka hız profili iyileştirilmektedir.

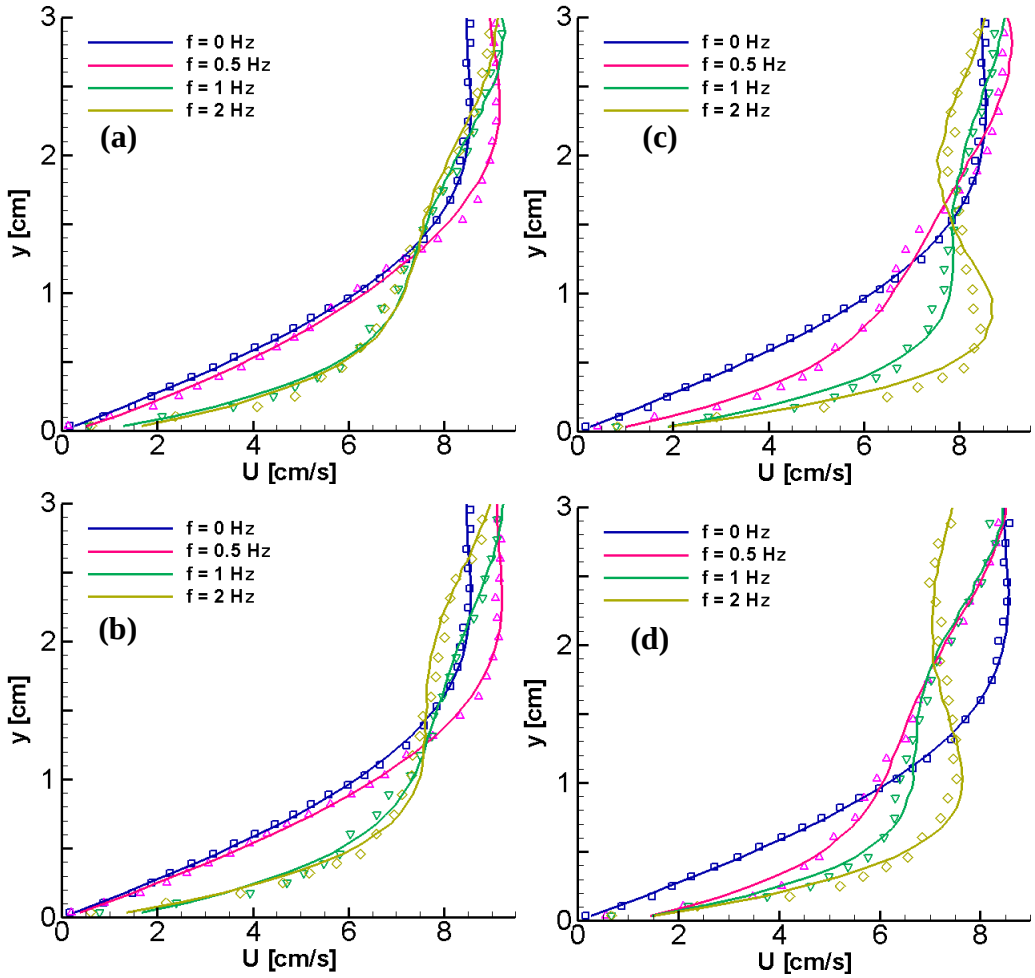
Şekil 4.29'da sol sütun (A) tipi ve sağ sütun (B) tipi montajlarda olmak üzere a = 2 mm ve b = 21.8 mm değerlerinde I ve II plaka konumunda elde edilen hız profilleri gösterilmiştir.



Şekil 4.28 : *a* = 2 mm ve *b* = 25 mm için zaman ortalamalı akış alanlarından elde edilmiş sınır tabaka hız profilleri, Sol sütun (A) montajı: (a) Konum I, (b) Konum II, (c) Konum III; Sağ sütun (B) montajı: (d) Konum I, (e) Konum II, (f) Konum III.

Sonuç olarak iki farklı genişlikte aktüatör plakasının iki farklı genlikteki eksantrik disk ile birlikte farklı plaka konumlarında çalıştırılması sonucu elde edilen JaVA kaynaklı akış rejimleri, iki farklı aktüatör-lavha montajında incelenmiş ve zaman

ortalamalı hız alanlarında istenen kesitten alınan sınır tabaka hız profilleri yorumlanmıştır.



Şekil 4.29 : *a* = 2 mm ve *b* = 21.8 mm için zaman ortalamalı akış alanlarından elde edilmiş sınır tabaka hız profilleri, Sol sütun (A) tipi montaj: (a) Konum I, (b) Konum II, sağ sütun (B) tipi montaj: (c) Konum I, (d) Konum II.

PIV deneyleri, akış görüntüleme deneylerinde elde edilen bulgular üzerine inşa edilmiştir ve JaVA'nın aktif akış kontrol düzeneği olarak çalıştırıldığı parametre kombinasyonuna bağlı olarak sınır tabaka hız profilini iyileştirici rolünü farklı performanslarla yaptığı ispat edilmiştir. Bu deneysel çalışmalar aynı zamanda sayısal çalışmaların validasyonunda da yardımcı olmuştur.

4.3.4 Sınır tabaka içinde emme-basma fazlarının bulunması

JaVA yakınında aktüatör plakasının hareketine göre sınıflandırılan emme ve basma fazlarına ait anlık PIV akış alanlarından biri emme fazını diğeri basma fazını temsil eden iki adet zaman ortalamalı akış alanı bulunmuştur. Daha önce Bölüm 3.12.5'de üzerinde durulduğu gibi JaVA'nın net sıfır-kütle debili bir aktüatör olarak etraftaki

akışkandan temin ettiği debi ve bu debinin sınır tabaka içerisine basılması sonucu elde edilen momentum akısı (3.34) ve (3.35) denklemlerinde verilen formülasyonlarla hesaplanabilmektedir. Burada JaVA'nın sağladığı hacimsel debi, birim derinlik için (suyun yoğunluğu 1 g/cm^3 alınarak) JaVA kaynaklı jet rejiminin düşey doğrultudaki bileşeninin yatay konuma bağlı integrali alınarak elde edilmektedir. Benzer şekilde momentum akısı veya birim kütle başına akışkanın sağladığı kuvvet, bu hız bileşeninin karesinin, birim derinlik ve uzunluk başına yatay konumda PIV penceresinin yatay doğrultudaki (c-d) sınırları dahilinde integralinin alınmasıyla **(4.5)**'deki bağıntıyla bulunur. Dolayısıyla momentum akısının (J) birimini cm/s^2 olarak yazmak mümkündür.

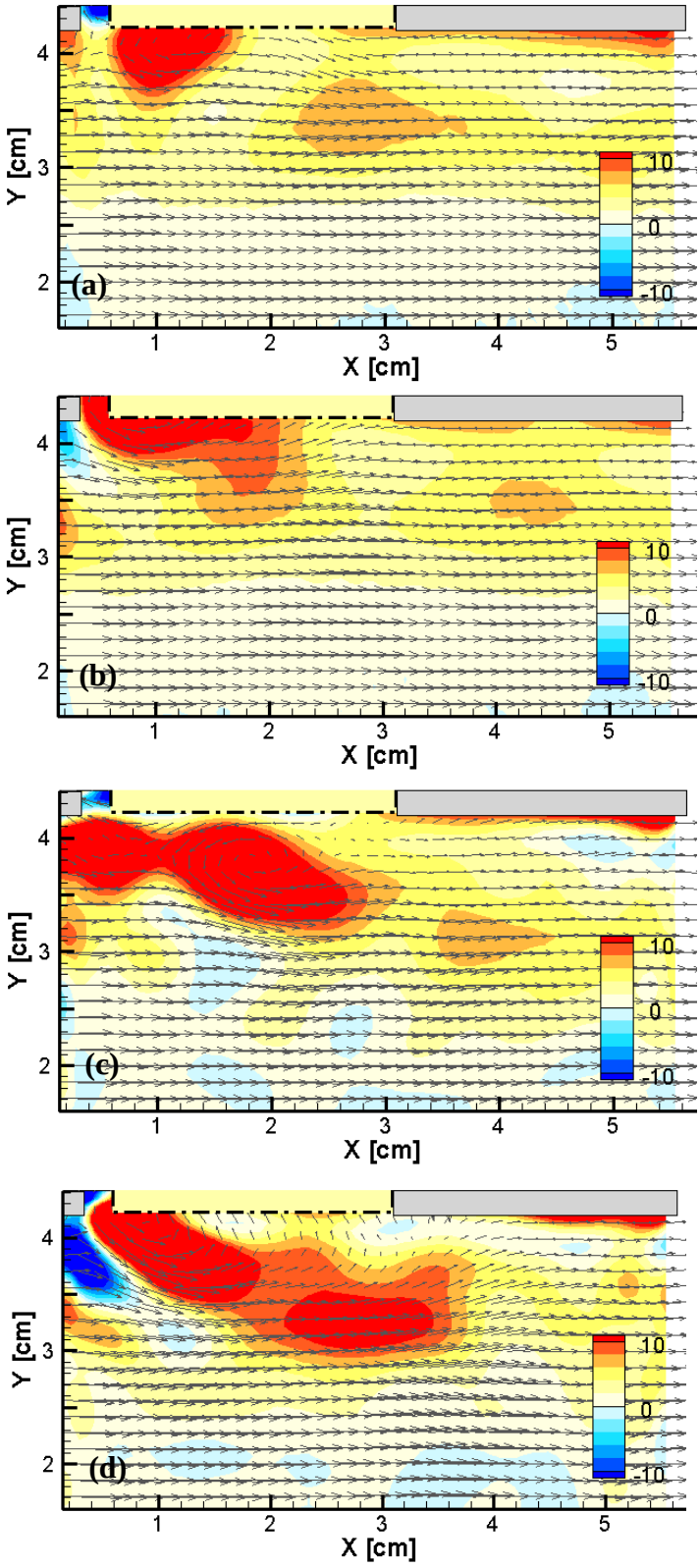
$$J(y) = \int_{c=0.1422}^{d=5.5466} \rho v^2 (x,y)\, dx \qquad \textbf{(4.5)}$$

II plaka konumunda (A) tipi levha-aktüatör montajında a = 1 mm ve a = 2 mm genliğindeki diskler kullanılarak değişik frekanslarda elde edilen PIV akış alanlarının zamana bağlı genel ortalamaları sırasıyla Şekil 4.17 sol sütunda ve Şekil 4.20 sol sütunda verilmiştir. Her iki genlik için U_∞ = 8.38 cm/s serbest akım hızında PIV akış alanlarından f = 2 Hz için faz ortalamalı vortisite alanları Şekil 4.30'da gösterilmiştir.

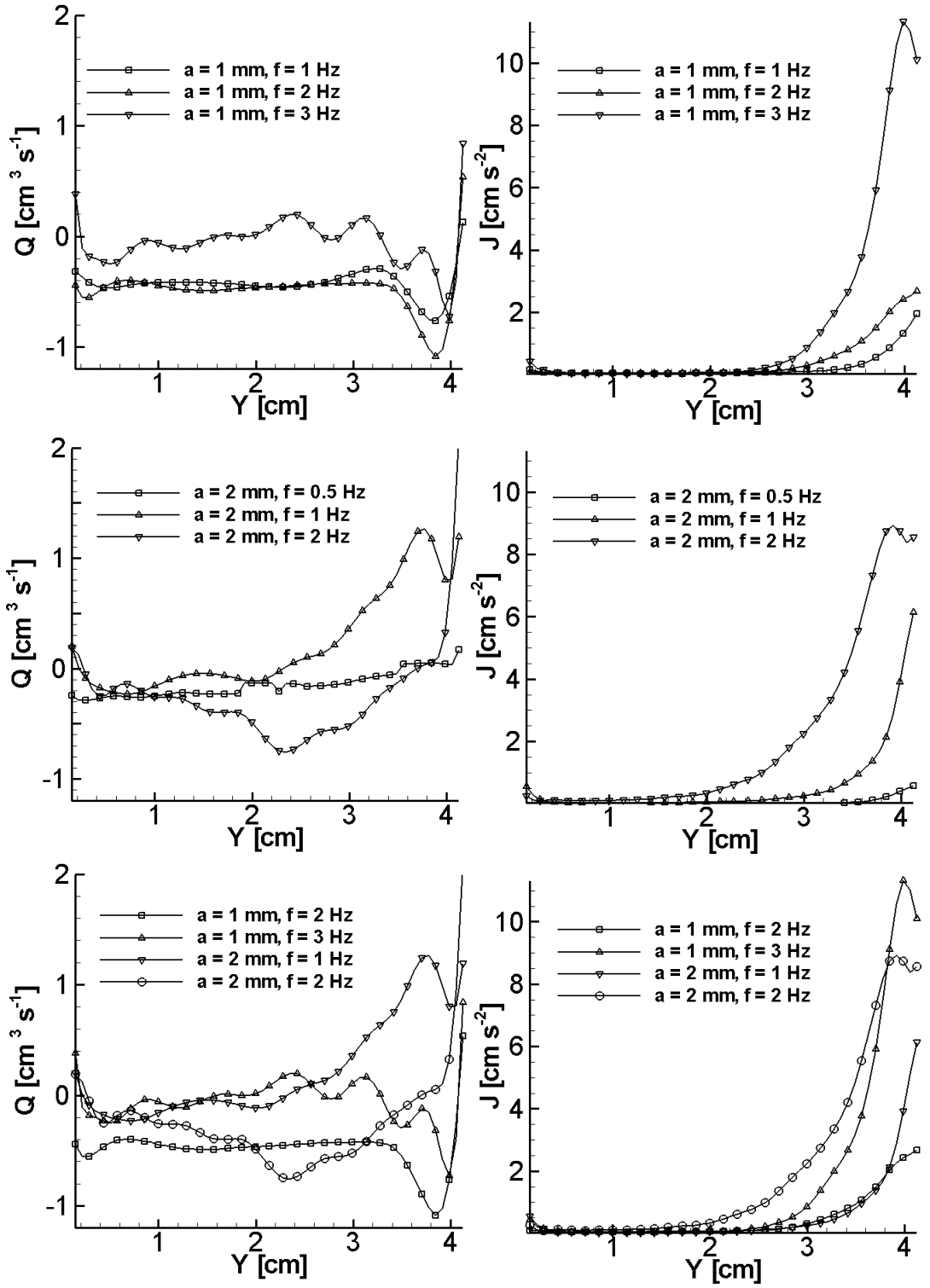
Şekil 4.30'dan anlaşılacağı üzere faz ortalamalı vortisite alanları, jet akışının şiddeti ve etkinliği hakkında bilgi vermektedir. Kırmızı renkteki saat yönünün tersine olan vorteks, geniş aralık altında gelişmekte ve yüksek disk genliğinde etki sahası artmaktadır, ayrıca vektörler emme ve basma fazlarında akışkanın aktüatöre giriş ve çıkışını göstermektedir dolayısıyla daha önce anlık akış alanlarında görülen JaVA-sınır tabaka etkileşimi faz ortalamalarına yansımıştır.

JaVA'nın sınır tabaka içerisinde momentum aktarımına katkısını sayısal değerler ile ifade ederek hangi disk genliği ve frekans kombinasyonlarında JaVA'nın daha etkili olduğu ortaya konmaktadır. Bu bağlamda bir periyot içerisinde oluşturulan iki adet faz ortalamasından çıkarılan debi ve momentum akıları hesaplatılmış ve bu iki faza ait debi ve momentum akısı değerlerinin aritmetik ortalaması değerlendirilmiştir.

Şekil 4.31'de incelenen iki akış rejimine ait grafikler, PIV akış alanında pleksiglas levhanın bulunduğu yerden başlayarak sınır tabaka içerisinde düşey doğrultuda (3.34) ve (3.35) uyarınca alınan integraller sonucu elde edilmiştir.



Şekil 4.30 : Faz ortalamalı vortisite alanları: (a) a = 1 mm f = 2 Hz-emme, (b) a = 1 mm f = 2 Hz-basma, (c) a = 2 mm f = 2 Hz-emme, (d) a = 2 mm f = 2 Hz-basma.



Şekil 4.31 : *b* = 25 mm, II plaka konumunda ve (A) tipi montajda *a* = 1 mm ve *a* = 2 mm için değişik frekanslarda elde edilen ortalama debi (sol sütun) ve momentum akıları (sağ sütun).

Şekil 4.31'deki debi grafikleri incelendiğinde; plaka genişliği, plaka bağıl konumu ve levha-aktüatör montajı aynı tutulduğu zaman belli bir disk genliğinde farklı frekanslarda, hacimsel debi **(3.7)** uyarınca genlik ve frekansın çarpımıyla doğru

orantılı değişmektedir. Bu bağlamda a = 1 mm ve f = 2 Hz kombinasyonu ile a = 2 mm ve f = 1 Hz kombinasyonu akış yönüne göre ters işaretli de olsa, yaklaşık aynı büyüklükte debi sağlamaktadır. Aynı yaklaşım momentum akısı için de geçerlidir, burada genlik ve frekans çarpımı en büyük olan parametre kombinasyonunda en yüksek momentum aktarımı meydana gelmektedir.

Sonuç olarak JaVA yakınında alınan PIV görüntüleri JaVA'nın değişik parametre kombinasyonlarındaki etkiliğini ortaya koymaktadır, bu karşılaştırma Y'nin bazı değerleri için Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6 : II plaka konumunda ve (A) montajında JaVA kaynaklı akış rejimlerinin sınır tabaka içerisindeki debi ve momentum akısı değerleri.

***a* [mm]**	***f* [Hz]**	**Y[cm]**	**Q [cm^3/s]**	**J [cm/s^2]**
1	1	3	-0,3179	0,1168
		3.5	-0,4225	0,2794
		4	-0,5417	1,3265
1	2	3	-0,4257	0,3687
		3.5	-0,5352	0,9306
		4	-0,7672	2,4299
1	3	3	0,1558	1,0981
		3.5	-0,2945	3,1279
		4	-0,7254	11,3322
2	0.5	3	0,0283	0,0191
		3.5	0,0497	0,0500
		4	0,1549	0,3983
2	1	3	0,4438	0,2905
		3.5	0,8533	0,7994
		4	0,8044	3,9160
2	2	3	-0,4791	2,4782
		3.5	-0,1353	4,8088
		4	0,3265	8,7383

4.3.5 JaVA ötesinde sınır tabaka karakteristiklerinin incelenmesi

JaVA yakınında yapılan PIV deneylerinin aktüatörün emme ve basma fazlarından yola çıkılarak hesaplanan momentum transportu hakkında kapsamlı bilgi vermesi gibi, JaVA ötesinde yapılan deneyler de aktüatörün sınır tabaka hız profillerini nasıl etkilediği hakkında bilgi vermektedir. Bunun yanında sınır tabaka karakteristikleri olarak adlandırılabilecek öteleme kalınlığı, momentum kalınlığı da değişik çalışma koşullarına bağlı olarak incelenebilir.

Sınır tabaka içerisinde öteleme kalınlığındaki ve momentum kalınlığındaki değişimler incelenerek JaVA parametrelerinin etkisi ortaya konabilir, hatta bu

deneysel veriler sayısal çalışmaların validasyonunda kullanılabilir. JaVA'nın geniş aralığından 300 mm ötede alınan PIV akış alanları incelenerek bu pencere içerisinde kalan bölgede **(4.6)**'daki denklem ile öteleme kalınlığı hesaplanabilir. Aynı şekilde **(4.7)** ile momentum kalınlığı **(4.8)** ile enerji kalınlığı bulunabilir. Ayrıca öteleme kalınlığının, momentum kalınlığına oranı da biçim katsayısı (shape factor) olarak adlandırılır (4.9).

$$\delta_1 = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u}{U_\infty} \right) dy \qquad \textbf{(4.6)}$$

$$\delta_2 = \int_0^{\infty} \frac{u}{U_\infty} \left(1 - \frac{u}{U_\infty} \right) dy \qquad \textbf{(4.7)}$$

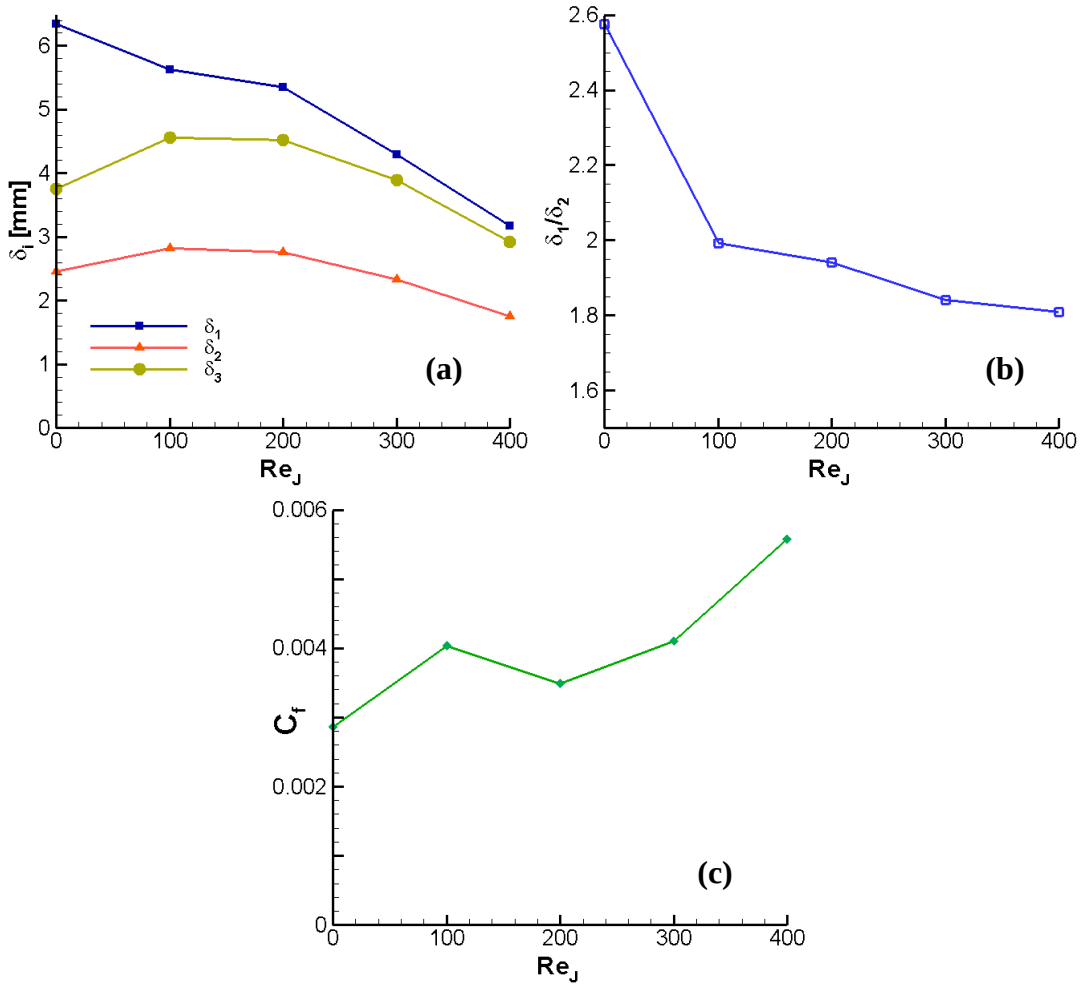
$$\delta_3 = \int_0^{\infty} \frac{u}{U_\infty} \left(1 - \frac{u^2}{U_\infty^2} \right) dy \qquad \textbf{(4.8)}$$

$$H = \frac{\delta_1}{\delta_2} \qquad \textbf{(4.9)}$$

Burada $U_\infty\delta_1$ terimi, sınır tabaka oluşumu nedeniyle debideki azalmayı karşılamak için sınır tabakadaki yerdeğiştirme miktarı olarak tanımlanır. Bunun gibi $\rho U^2{}_\infty\delta_2$ momentumdaki azalmayı, $(½)\rho U^3{}_\infty\delta_3$ de kinetik enerjideki azalmayı ifade eder.

İfadeleri verilen sınır tabaka karakteristikleri Şekil 4.24 ve 4.25'de zaman ortalamalı akış alanları verilmiş olan deney verisinden çıkarılabilir. III plaka konumunda (A) tipi montajda b = 25 mm plaka genişliğinde a = 1 mm ve 2 mm genliklerindeki diskler kullanılarak değişik frekanslarda elde edilen zaman ortalamalı akış alanları; uygun düzgünleştirme faktörü (θ = 5) seçilerek Kriging interpolasyonu ile iyileştirilmiş ve öteleme kalınlığı, momentum ve enerji kalınlıkları ile şekil faktörü hesaplatılmıştır. PIV penceresi içerisinde, JaVA geniş aralığından yaklaşık 300 mm'deki aşağı akım kesidine karşılık gelen x = 1.64 cm'den alınan sınır tabaka hız profili için denklem **(4.6)**, **(4.7)** ve **(4.8)**'de ifade edilen sınır tabaka karakteristikleri hesaplatılmıştır.

Şekil 4.32'de a = 1 mm disk genliği kullanılarak elde edilmiş ortalama sınır tabaka karakteristikleri görülmektedir. Beklendiği gibi frekans arttıkça; öteleme kalınlığı, mometum ve enerji kalınlıkları ile biçim katsayısı azalmaktadır, sürtünme katsayısı ise artma eğilimi göstermektedir.

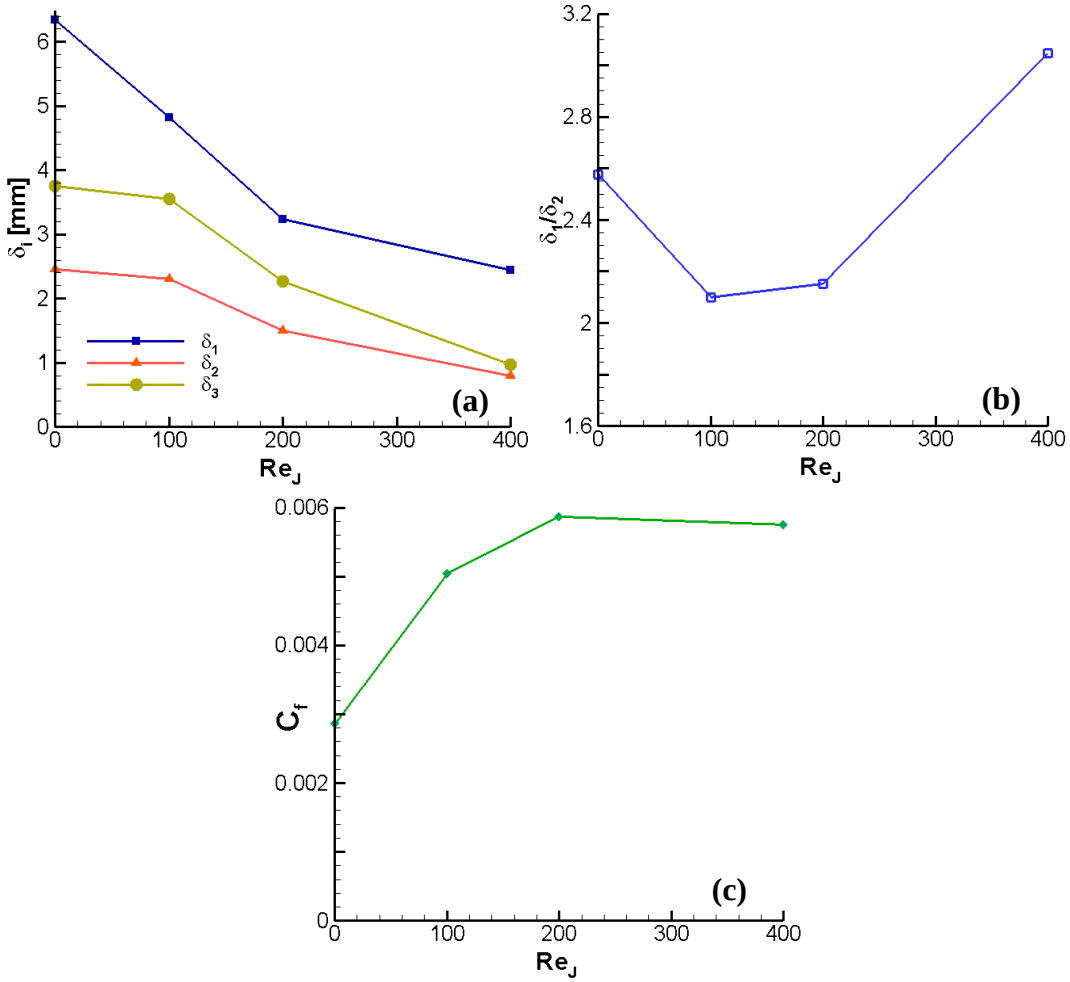


Şekil 4.32 : a = 1 mm, b = 25 mm III plaka konumunda ve (A) tipi montajda sınır tabaka karakteristikleri: (a) öteleme kalınlığı, momentum kalınlığı, enerji kalınlığı, (b) biçim katsayısı, (c) sürtünme katsayısı.

Şekil 4.33'de a = 2 mm disk genliği kullanılarak elde edilmiş ortalama sınır tabaka karakteristikleri verilmiştir. Daha büyük genlik değeri ile çalışmak, hız profilini iyileştirici yönde etki yapmaktadır, nitekim öteleme kalınlıkları a = 1 mm kullanılması durumuna göre daha azalmıştır. Laminer düz levha akışları için geçerli olan biçim katsayısı 2.6 civarındadır (White, 2004). Burada biçim katsayısı da JaVA'nın sınır tabaka üzerindeki etkisi hakkında bilgi vermektedir, nitekim H = 2.6 değeri JaVA'nın çalıştırılmadığı durumlarda korunmaktadır. Dolayısıyla f = 0 Hz'da yani JaVA'nın çalıştırılmaması halinde yaklaşık 2.6 olan biçim katsayısı, aktüatör çalıştırıldığı zaman frekansa bağlı olarak 2.6'nın altındaki değerlere düşmektedir. Bu da JaVA'nın sınır tabaka hız profilini iyileştirdiği ve akış ayrılmasını geciktirdiği anlamına gelmektedir.

Öteleme kalınlığının (4.6)'da verilen formülasyonundan türetilen düz levha akışı için Blasius yaklaşımı ile elde edilen ifadede parametre değerleri yerine konursa (x = 1.83

m ve U_∞ = 0.0838 m/s) δ_1 terimi yaklaşık 8.0 mm bulunur ki, bu değer JaVA'nın çalıştırılmadığı durumlarda ulaşılabilen öteleme kalınlığına yakındır.

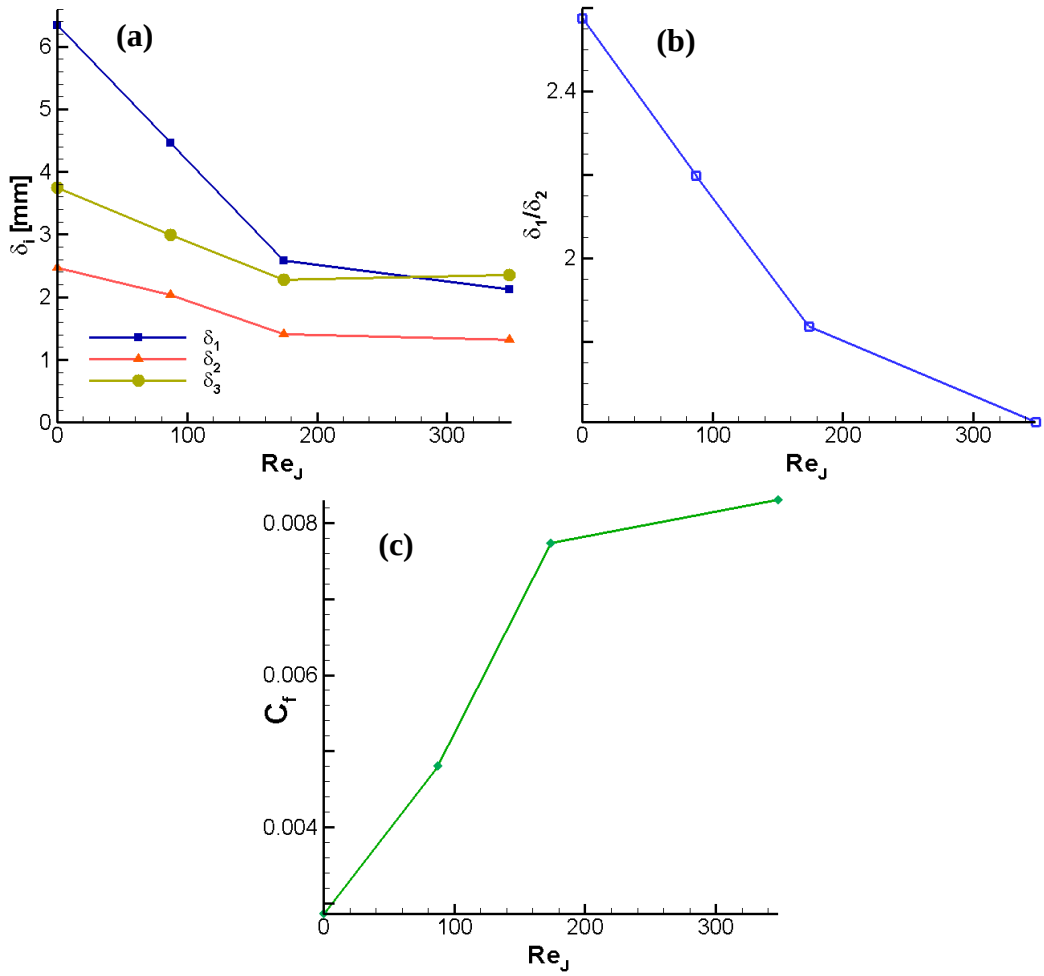


Şekil 4.33 : *a* = 2 mm, *b* = 25 mm III plaka konumunda ve (A) tipi montajda sınır tabaka karakteristikleri: (a) öteleme kalınlığı, momentum kalınlığı, enerji kalınlığı, (b) biçim katsayısı, (c) sürtünme katsayısı.

Verilen örnekler *b* = 25 mm genişliğindeki plakanın III plaka konumunda kullanılmasıyla elde edilmiştir. Aynı şekilde JaVA'nın etkileşimiyle iyileşen sınır tabaka hız profilleri arasından seçilen bir örnek, ve I plaka konumunda (B) tipi montajda *b* = 21.8 mm'lik plakanın *a* = 2 mm disk genliğinde kullanılması halidir. Bu durumda öteleme kalınlığı değerleri, daha geniş aktüatör plakası yani 25 mm genişliğinde plaka kullanılması haline göre biraz daha düşüktür. Plaka genişliğinin azalmasıyla jet akışının çıktığı aralık (w_w) genişlemekte ve jet akışının hızı aynı disk genliğinin (*a* = 2 mm) kullanıldığı fakat *b* = 25 mm'lik plakanın etkisinin incelendiği durumda oluşan jetin hızından daha düşük çıkmaktadır. Nitekim *b* = 25 mm ve *a* = 2 mm parametre kombinasyonundaki anlık PIV akış alanları II plaka konumunda ve *f* = 2 Hz çalışma frekansında Şekil 4.21'de verilmiştir. Burada oldukça yüksek ***r***

oranından dolayı JaVA'nın etkisinin maksimum olduğu ve jet akışının hesaplanan teorik sınır tabaka kalınlığının dışına taşarak özellikle JaVA yakınında basma fazında kuvvetli vorteks çiftleri ile sınır tabakayı enerjilendirdiği gözlemlenmiştir.

Ancak b = 21.8 mm'lik plaka ile yüksek frekanslarda oluşan JaVA kaynaklı jet akışlarının sınır tabaka üzerindeki etkisi daha farklıdır. Burada jet akışının (B) tipi montajdan da etkilendiği ve jet akışının hızının daha düşük olması nedeniyle sınır tabaka içerisinde kalması gözönünde tutulursa Şekil 4.34'deki tablo karşımıza çıkar.



Şekil 4.34 : a = 2 mm, b = 21.8 mm I plaka konumunda ve (B) tipi montajda sınır tabaka karakteristikleri: (a) öteleme kalınlığı, momentum kalınlığı, enerji kalınlığı, (b) biçim katsayısı, (c) sürtünme katsayısı.

Sonuç olarak PIV deneylerinde JaVA'nın sınır tabaka hız profilini iyileştiren ve sınır tabakayı enerjilendiren bir aktif akış kontrol düzeneği olarak çalıştığı ve çalışma parametresine bağlı olarak farklı performanslar sergilediği deneysel olarak başarıyla ispatlanmıştır.

5. SU KANALI SAYISAL MODELLEMESİ

Aktif akış kontrol düzeneği olan JaVA'ya ait araştırmaların son kısmını su kanalında yapılan akış görüntüleme ve PIV deneylerine paralel olarak yürütülen sayısal modelleme çalışmaları oluşturmaktadır.

PIV deneylerinde, ölçüm yapılacak akış alanı penceresi boyutunun kısıtlı olması ve sadece seçilen belli bir bölgede hız ölçümü yapılabilmesi nedeniyle; sayısal modellemeler, ilgili parametrelerde yapılan deneylerde elde edilemeyecek sonuçları vermesi nedeniyle JaVA'nın sınır tabaka üzerindeki akış ayrılmasını geciktirici etkisini yorumlayabilmek açısından daha fazla bilgi sunmaktadır. Hareketsiz su ortamındaki akış tiplerinin sayısal modellemeleri Şekil 3.67'de verilen sayısal hesaplama ağı kullanılarak yapılmıştır. Ancak aktüatör-sınır tabaka etkileşimi sonucu oluşan akış karakteristiklerinin doğru yorumlanabilmesi ve bunlardan gerçekçi çıkarımlar yapılabilmesi için, sayısal hesaplama ağı içerisinde yeralan düz levhanın yeterince uzun olması gerekmektedir. Bu bağlamda yapılan sayısal modellemelerde, uygun sınır koşullarının seçilmesi ve yöneten parametrelerin değiştirilmesi ile gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmektedir.

5.1 Akışı Yöneten Denklemler

Su kanalında deneysel olarak incelenen akış tipinin yeterince uzun düz bir levha üzerindeki iki boyutlu, sıkıştırılamaz viskoz bir sınır tabaka akışı olduğu belirtilmiştir. Su kanalında yapılan akış görüntüleme deneylerinden yapılan çıkarımlar ve PIV deneylerinden elde edilen sınır tabaka karakteristikleri sonuçları da, bu akışın laminar olduğunu göstermiştir, nitekim laminar düz levha akışları için geçerli olan 2.6 civarındaki biçim katsayısı deneysel yoldan bulunmuştur.

Akışkanın kaldırma kuvveti altında, yerçekiminin ihmal edildiği ortamda **(5.1)**'de süreklilik ve **(5.2)**, **(5.3)**'de zamana bağlı x ve y doğrultusundaki momentum (Navier-Stokes) denklemleri aşağıda verilmiştir (White, 2004).

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \qquad \textbf{(5.1)}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \qquad \textbf{(5.2)}$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \qquad \textbf{(5.3)}$$

Ancak bu denklemlerin cidarda kaymama koşulu, giriş ve çıkış sınır koşullarına bağlı olarak çözülmesinin getirdiği zorluk nedeniyle bazı kabuller doğrultusunda sadeleştirmeye gidilir. Reynolds sayısının büyük olması halinde sınır tabakanın çok ince olması gerektiği sonucundan yola çıkarak *u* hızı bileşenin *v* hızı bileşeninden çok büyük olması ayrıca hız bilşenlerinin türevleri arasındaki $\partial u/\partial y > \partial u/\partial x$, $\partial v/\partial y > \partial v/\partial x$ ilişkiler nedeniyle süreklilik ve momentum denklemlerindeki hız terimlerinde basitleştirme yapılabilir.

Dolayısıyla *y*-yönündeki momentum denklemi ortadan kalkar, ve basınç terimi sınır tabaka kalınlığı boyunca değil, uzunluğunca değişmektedir **(5.4)**. Burada *U*, serbest akım hızını ifade etmektedir (White, 2004). Bernoulli denkleminden denklem **(5.4)**

$$\frac{\partial p}{\partial x}=-\rho U\frac{dU}{dx} \qquad \textbf{(5.4)}$$

elde edilir. Sınır tabakada geçerli momentum denklemi gerekli sadeleştirmeler yapıldıktan sonra denklem **(5.5)**'deki hali alır.

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=U\frac{\partial U}{\partial x}+\nu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \qquad \textbf{(5.5)}$$

Yapılan çözümler sonunda elde edilen akış alanlarında JaVA parametrelerinin sınır tabaka ayrılmasını engellemedeki katkısını araştırmak ve deneysel verilerde yapıldığı gibi sınır tabaka karakteristikleri üzerinde fikir yürütmek için **(4.6)**, **(4.7)**, **(4.8)** ve **(4.9)** denklemlerinde verilen yerdeğiştirme kalınlığı, momentum kalınlığı ve enerji kalınlığı ve biçim katsayısı hesaplanmıştır. Bu terimlere ilave olarak üzerinde durulması gereken diğer parametreler, cidar kayma gerilmesinden (τ) türetilen sürtünme katsayısı (C_f) ve disipasyondur. Sınır tabaka için cidar kayma gerilmesi (5.6)'da verilmiştir. Viskozitenin etkisi altında enerjinin dağılmasını ifade eden

disipasyon terimi birim zaman ve birim hacim başına sınır tabaka kesidi boyunca integral alınarak elde edilir (Url-1).

$$\tau = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} \tag{5.6}$$

$$D = \int_0^{\infty} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 dy \tag{5.7}$$

Düz levha üzerindeki laminer akış için momentum denkleminde serbest akım hızının akış doğrultusunda değişiminin sıfır olduğu (dU/dx = 0) kabulüyle u ve v hız bileşenleri için Blasius çözümü elde edilir ve denklem **(4.2)**'de verilen sınır tabaka kalınlığı bulunur. Blasius yaklaşımı ile sınır tabaka kalınlığına benzer şekilde öteleme kalınlığı δ_1, momentum kalınlığı δ_2 ve sürtünme katsayısı denklem **(5.8)**'deki ifadelerden bulunabilir.

$$\delta_1 = 1.72\sqrt{\frac{\nu x}{U_\infty}}; \quad \delta_2 = 0.664\sqrt{\frac{\nu x}{U_\infty}}; \quad C_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} = \frac{0.664}{\sqrt{\mathrm{Re}_x}} \tag{5.8}$$

5.1.1 Hareketli hesaplama ağı

Süreklilik ve sıkıştırılamaz, sabit viskoziteli momentum denklemleri Fluent ticari yazılımı ile sonlu hacimler yöntemine göre çözülür. JaVA plakasının hareketini modellemede kullanılan dinamik hesaplama ağı, çözüm bölgesinin sınırlarının ve şeklinin zamanla değiştiği durumlarda kullanılır. Hesaplama ağının hareketi, rijit cismin ağırlık merkezindeki doğrusal veya açısal hareketi öngören bir şekilde tanımlanabileceği gibi, altıncı mertebeden serbestlik derecesine ait çözücünün yaptığı gibi rijit cisim üzerine etki eden kuvvet dengesinden yola çıkarak doğrusal ve açısal hareketler zamana bağlı olarak çözülebilir.

Fluent ticari yazılımında dinamik hesaplama ağının hareketi tanımlanırken kullanıcı tarafından tanımlanan fonksiyonlar şeklinde ifade edilen sınır koşulları (UDF) kullanılmaktadır. JaVA modelinde hareketli veya hareket etmeyen bölgeler olduğu için (bkz. Şekil 5.3) bu bölgeler hareket başlamadan önce kayar arayüz (sliding interface) şeklinde tanımlanmaktadır (Aqeel, 2010).

Dinamik hesaplama ağında kullanılan korunum denklemleri integral formunda olup V denetim hacmi içerisinde Φ skalarının korunum denkelemi **(5.9)**'da verilmiştir.

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho\Phi dV + \int_{\partial V} \rho\Phi\left(\vec{u}-\vec{u}_g\right).d\vec{A} = \int_{\partial V} \Gamma\nabla\Phi.d\vec{A} + \int_V S_\Phi dV \qquad \textbf{(5.9)}$$

Bu denklemde ρ akışkanın yoğunluğunu, $\vec{u}$ akışın hız vektörünü, $\vec{u}_g$ hareketli hesaplama ağının hız vektörünü ifade etmektedir. Γ difüzyon katsayısı olup S_Φ, Φ skalarına ait kaynak terimidir. Korunum denklemindeki zaman türevi birinci mertebeden geri fark kullanılarak **(5.10)**'daki gibi yazılabilir. Denklem **(5.10)**'daki n ve (n+1) sırasıyla mevcut ve bir sonraki zaman adımlarına ait miktarları ifade eder.

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho\Phi dV = \frac{\left(\rho\Phi dV\right)^{n+1} - \left(\rho\Phi dV\right)^{n}}{\Delta t} \qquad \textbf{(5.10)}$$

Burada (n+1) zaman adımına ait denetim hacmi **(5.11)**'deki gibi hesaplanır. Bu ifadedeki dV/dt denetim hacminin zaman türevidir. Hareketli hesaplama ağındaki korunumu sağlamak için dV/dt için **(5.12)**'deki ifade kullanılmaktadır.

$$V^{n+1} = V^n + \frac{dV}{dt}\Delta t \qquad \textbf{(5.11)}$$

$$\frac{dV}{dt} = \int_{\partial V} \vec{u}_g.d\vec{A} = \sum_j^{n_F} \vec{u}_{g,j}.\vec{A}_j \qquad \textbf{(5.12)}$$

Denklem **(5.12)**'deki n_F, denetim hacmindeki toplam yüz sayısıdır. $\vec{A}_j$ burada *j* yüzü alanına ait vektör olup toplam içerisindeki ifade **(5.13)**'deki gibidir. Bu ifadedeki δV_j, Δt zamanı boyunca *j* denetim hacmi yüzeyince süpürülen hacimdir (Fluent Manuel, 2008).

$$\sum_j^{n_F} \vec{u}_{g,j}.\vec{A}_j = \sum_j^{n_F} \frac{\delta V_j}{\Delta t} \qquad \textbf{(5.13)}$$

5.2 Hesaplama Ağı ve Sınır Koşulları

JaVA modeli, PIV deneylerinde olduğu gibi, düz pleksiglas levha üzerinde (A) tipi montajda Şekil 5.1'de (B) tipi montajda Şekil 5.2'de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir.

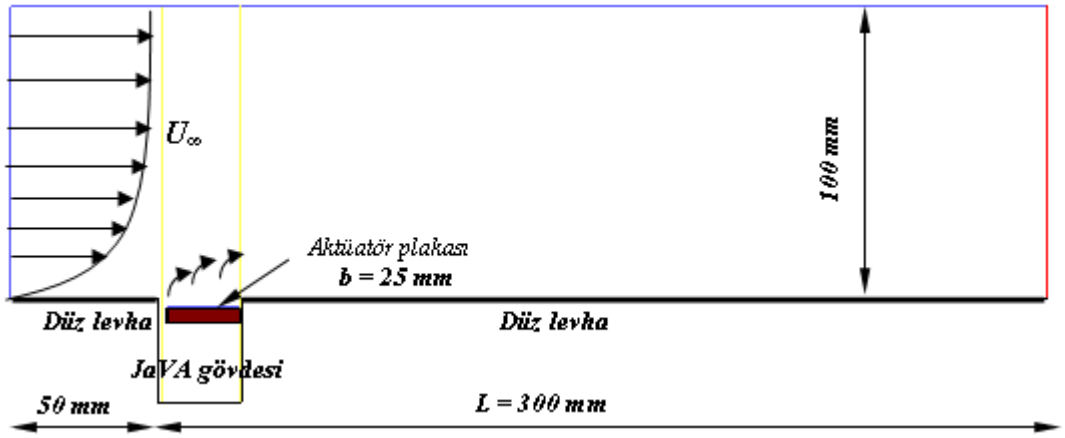
Aktüatör plakasının düşey hareketi denklem (3.43) ve (3.44)'de belirtildiği şeklinde kullanıcı tarafından tanımlanmaktadır. Bu hesaplama ağında elde edilen sayısal sonuçlar zamana bağlı olarak çözdürülmüştür ve anlık akış alanlarının ortalaması alınarak, aktüatör geniş aralığından itibaren 300 mm'lik düz levha üzerinde istenen kesitlerde (100 mm, 200 mm ve 300 mm öteden) sınır tabaka hız profili alınmış ve sınır tabaka karakteristikleri değişimi incelenmiştir.

Deneysel veriler ışığında yapılan sayısal modellemelerde kullanılan akış çözücüsü sonlu hacimler yaklaşımı ile **(5.1)** ila **(5.5)** arasında verilen yöneten denklemlerin ayrıklaştırılmasında yakınsamayı hızlandırması için basınç için ikinci mertebeden, momentum denklemleri için üçüncü mertebeden çözüm şemaları kullanılmıştır. Durgun suda yapılan deneylerde Reynolds sayısının düşük olduğu durumlarda akışın iki boyutlu olduğu gözlemlenmiştir, bu nedenle sayısal modellemelerde hesaplama zamanını da azaltmak için akış iki boyutludur.

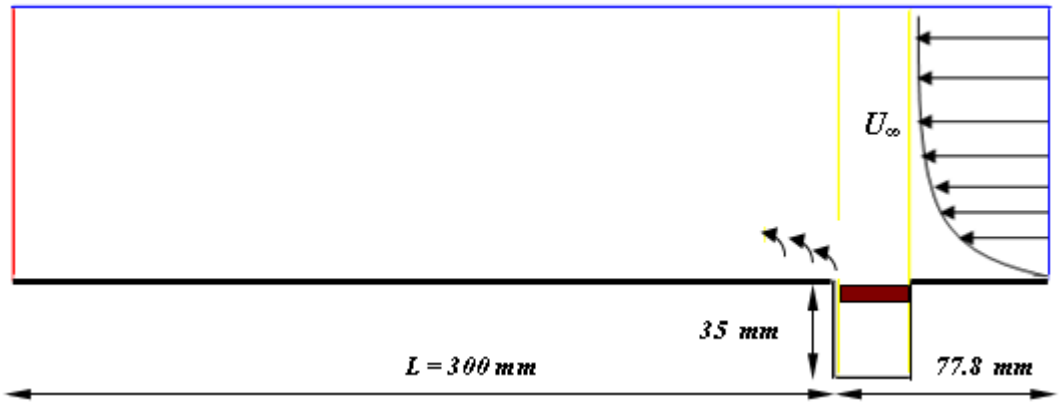
Daha önce verilen aktüatör geometrisine bağlı olarak, JaVA kavitesi ve su kanalı için yaklaşık 400.000 hücre içeren bir hesaplama ağı oluşturulmuştur. Hesaplama ağındaki hücreler kartezyendir. Hareketli hesaplama ağında şekil değiştiren bölgenin hareketi dinamik katmanlama ile sağlanır. Dinamik katmanlama hareket eden her sınırda ideal bir katman yüksekliği tanımlanmasını sağlar. Hareket eden sınıra komşu hücre katmanı, katman yüksekliğine bağlı olarak komşu katmanın hücreleriyle bölünür. Katmandaki hücreler genişliyorsa, minimum hücre yüksekliği ile ideal hücre yüksekliği arasında $s_{MİN} > (1+\alpha) s_{İDEAL}$ şartı sağlanana kadar hücre yüksekliği genişler. Burada α katman bölünme katsayısıdır. Bu şart sağlanırsa, hücreler tanımlanan katmalama seçeneğine bağlı olarak (sabit hücre yüksekliği) bölünürler (Aqeel, 2010).

Dinamik hesaplama ağında kullanılan arayüz hareket esnasında kaymaktadır. Kayan arayüz, zamana bağlı olan akış çözümlerinde özellikle iyi sonuçlar vermektedir. Şekil 5.3'de görüldüğü üzere hareketli hesaplama ağı yanında yeralan bloklar kayar arayüzler ile birleşmektedir. Her zaman adımında hareketli hesaplama ağı iki bloğa göre bağıl bir hareket yapar. Hareketli hesaplama ağına ait arayüzlerde oluşan akının her zaman adımında hesaplanmasında, iki arayüz bölgesinin kesişimindeki nokta ve yüzlerden kullanılır. Bu ilke çerçevesinde daimi olmayan akışlar çözdürülerek JaVA kaynaklı akış rejimlerinin sınır tabaka etkileşimi incelenmiştir.

Bütün akış alanında daimi duruma ulaşabilmek için (bu çalışma frekansına bağlı olarak 50 ila 120 çevrime karşılık gelir), en az 30 s'lik bir hesaplama süresine ihtiyaç duyulmuştur. Her saniye ise 320 adımda kat edilmiştir, bu da zaman adımının Δt = 1/320 s olması demektir.



Şekil 5.1 : Su kanalında JaVA'nın şematik görünüşü: (A) tipi montaj.



Şekil 5.2 : Su kanalında JaVA'nın şematik görünüşü: (B) tipi montaj.

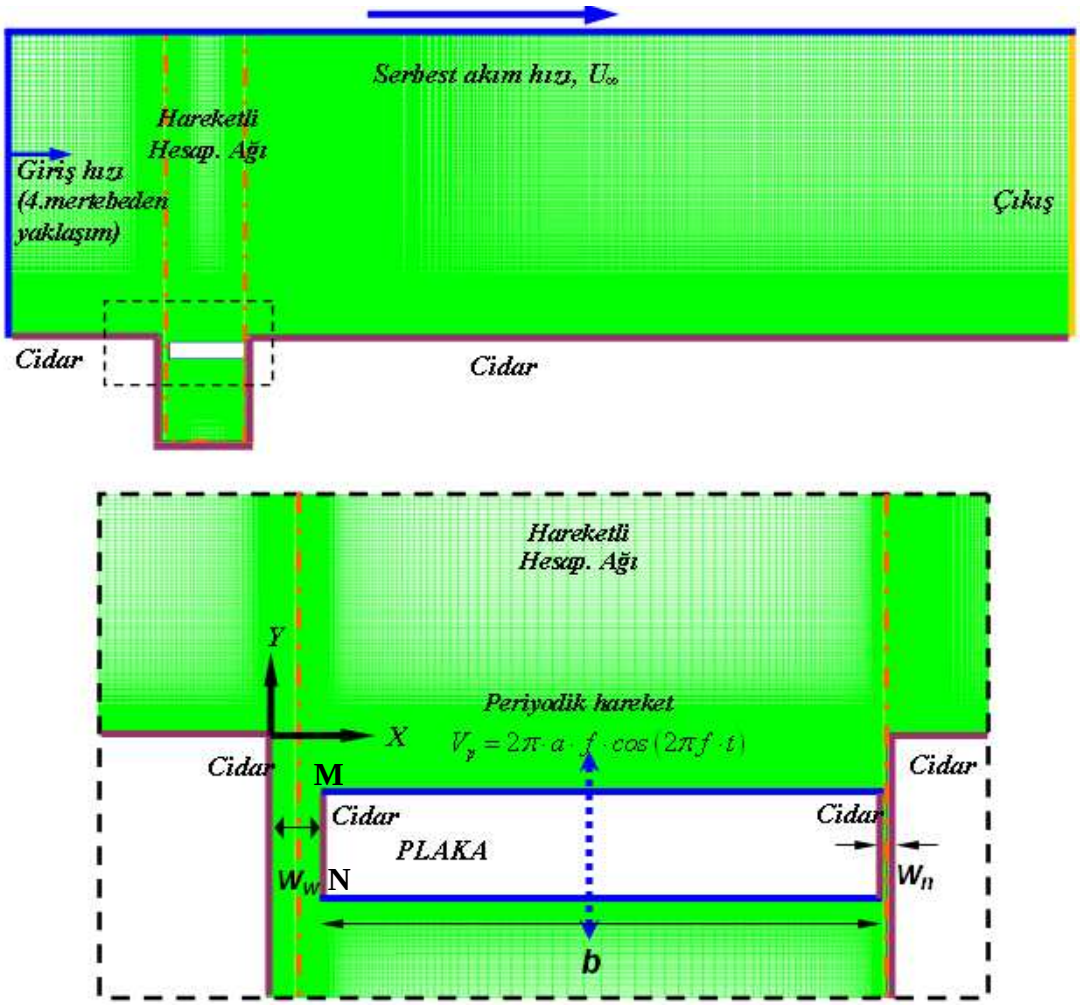
Çözümlerde kullanılan sınır koşulları, Şekil 5.3'de gösterilmiştir. Hareketsiz su ortamındaki modellemelerde kullanılan hesaplama ağında ve sınır koşullarında yapılan modifikasyonlar ile çözümlemeler yapılmıştır. Giriş hızının tanımlandığı kenarda Blasius hız profiline benzetilen 4. mertebeden bir polinom kullanılmıştır **(5.14)**. Aktüatör plakasının hareketi sinusoidal bir fonksiyon ile hareketli hesaplama ağı ile sağlanmıştır.

$$\frac{u}{U_\infty} = \left[2\left(\frac{y}{\delta}\right) - 2\left(\frac{y}{\delta}\right)^2 + \left(\frac{y}{\delta}\right)^4 \right] \qquad \textbf{(5.14)}$$

Burada y düşey doğrultudaki konumu vermektedir; δ ise sınır tabaka kalınlığı olup; **(4.2)** ifadesine göre hesaplanır. Buradaki x değeri, plaksiglas levhanın elips şekli

verilmiş olan ve sınır tabakanın başladığı ucundan aktüatör geniş aralığına kadar olan 1.53 m'lik yatay mesafeyi ifade etmektedir dolayısıyla U_∞ = 8.38 cm/s'lik serbest akış hızı için sınır tabaka kalınlığı yaklaşık 21 mm olarak bulunur.

Şekil 5.3'da görüldüğü üzere, kanalın üst tarafında, hız profili değişim göstermediği için, sabit serbest akış hızı alınmıştır. Kanal çıkışında herhangi bir basınç gradyeni olmaması nedeniyle çıkış sınır koşulu kullanılmıştır.Yapılan sayısal modellemelerde, aktüatör plakası genişliği b = 25 mm ve 21.8 mm alınmıştır.



Şekil 5.3 : Su kanalındaki JaVA için hareketli hesaplama ağı ve sınır koşulları.

JaVA gövdesi ve sınır tabakanın gelişeceği düz levha üzerince yeterince sık bir hesaplama ağı oluşturulurduktan sonra çeşitli JaVA parametreleri için çözümler yapılmıştır. JaVA yöneten parametrelerinden olan disk genliği ve çalışma frekansı kullanıcı tarafından UDF kodlarında tanımlanarak sınır koşullarına dahil edilmiştir. Aynı şekilde Blasius hız profiline benzetilen dördüncü mertebeden serbest akım hızı profili levha-JaVA montajına bağlı olarak işaretine dikkat ederek, kanal girişinde

UDF kodu ile sınır koşulu olarak dahil edilmiştir. Eğer Şekil 5.1'deki (A) tipi montaj için çözümleme yapılacaksa, **(5.9)**'daki ifadede serbest akım hızı pozitif işaretli, Şekil 5.2'deki (B) tipi montaj için negatif işaretli alınmıştır. Denklem **(5.9)**'daki sınır tabaka kalınlığı hesaplanırken serbest akım hızı büyüklüğü ve JaVA geniş aralığı ile levha ön-kenarı arasındaki mesafe olan (1.58 m'lik uzunlıktan hesaplama ağındaki 50 mm'lik mesafe düşülerek) x = 1.53 m dikkate alınmıştır. Dolayısıyla (A) ve (B) tipi JaVA-levha montajları için iki ayrı hesaplama ağı oluşturulmuş ve sınır koşulları serbest akım hızının yönü dikkate alınarak verilmiştir.

Aktüatör plakasının üç farklı bağıl konumu için bu iki hesaplama ağında plakanın sıfır konumu değiştirilmiştir. Plakanın düşey hareketi ve stroku disk genliğinden etkilendiği için hesaplama ağında yapılan modifikasyonlarda Şekil 5.3'de tanımlanan koordinat sistemi baz alınarak plakanın üst M kenarının koordinatına göre plakanın durgun haldeki pozisyonu bir başka deyişle sıfır pozisyonu belirlenmiştir. Ayrıca plakanın alt N noktasının koordinatı da plaka kalınlığına bağlı olarak (d = 5 mm veya 3 mm) değiştirilmiştir. Bu bağlamda PIV deneylerinde seçilen parametrelerde sayısal modellemeler yapılmış ve sınır tabaka hız profili ve karakteristik büyüklüklerini incelemek üzere zaman ortalamalı akış alanları hesaplatılmıştır. Çizelge 5.1'de her üç plaka bağıl konumunda iki farklı plaka genişliği ve disk genliği için hazırlanan sayısal hesaplama ağlarına ait M ve N noktalarının Şekil 5.3'de tanımlanan koordinat sistemine göre tanımlanmış ordinatları verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Plakanın bağıl konuma göre üst ve alt noktalarının ordinatları [mm].

	b = 25 mm, d = 5 mm			b = 21.8 mm, d = 3 mm		
Genlik	I	II	III	I	II	III
a = 1 mm	3.5	-1.0	-2.5	3.5	-1.0	-2.5
	-1.5	-6.0	-7.5	-0.5	-4.0	-5.5
a = 2 mm	2.5	-2.0	-3.5	2.5	-2.0	-3.5
	-2.5	-7.0	-8.5	-0.5	-5.0	-6.5

Çizelge 5.1'den anlaşılacağı üzere a = 1 mm'lik disk kullanıldığı zaman b = 25 mm'lik plakanın üst noktası referans alınan koordinat sistemine göre sıfır pozisyonunda orijinin 1 mm altındadır. Plaka hareketinin stroku 2 mm'dir, dolayısıyla akışa ait Reynolds sayısı ve boyutsuzlaştırılmış genlik gibi boyutsuz yöneten parametrelerin hesabında kullanılan emme ve basma fazlarına ait etkin genlik disk genliğinin yarısı yani 1 mm'dir. Plaka hareketine düz levha hizasından 1 mm aşağıdan başlarsa II plaka konumunda plaka hareketinin en üst noktasında JaVA

gövdesi ile aynı hizaya gelecektir. Bu çalışma ilkesine göre diğer plaka konumlarına ait absis değerleri de yorumlanabilir.

Yapılan sayısal modellemelerde daimi olmayan akış çözdürüldüğü için, yeterince küçük olan bir zaman adımı $\Delta t = 1/320$ s = 0.003125 s seçilerek çalışma frekansına ve kaydetme sıklığına göre akışın gelişmesini tamamladığı süre içerisinde anlık akış alanları sayısı belirlenmiştir. Bu anlık akış alanları, ortalama akış alanının hesaplanmasında kullanılmıştır. Çizelge 5.2'de frekansa bağlı olarak kullanılan anlık akış alanı sayıları verilmiştir.

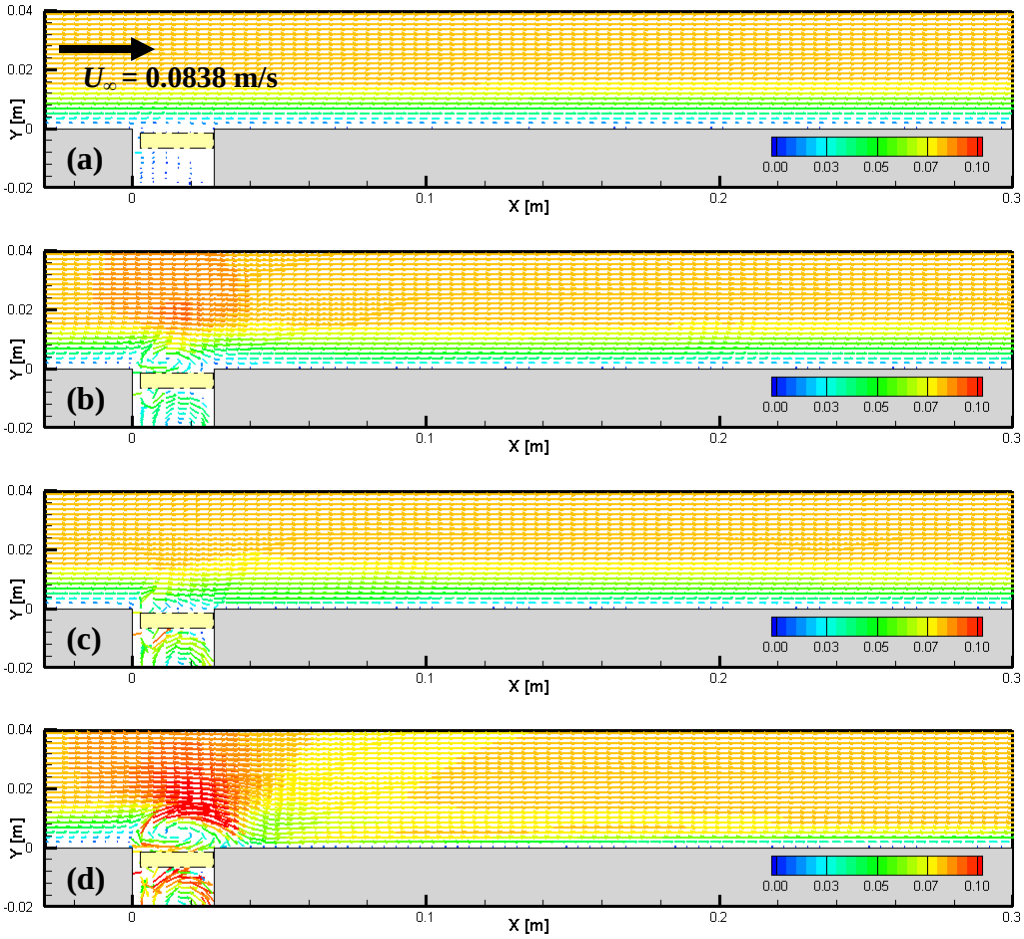
Çizelge 5.2 : Frekansa göre anlık akış alanı sayıları.

f [Hz]	Kayıt sıklığı	Zaman adımı sayısı	Anlık akış alanı sayısı	Gerçek süre [s]
1	16	3200	200	10
2	8	1600	200	5
3	10	1920	192	6
4	8	1920	240	6

5.3 (A) Tipi Montajda Sayısal Modellemeler

Geniş aralıktan çıkan jet rejiminin plaka üzerinden geçerek serbest akım yönünde sınır tabaka içerisinde ilerlediği konfigürasyon olan (A) tipi levha-JaVA montajında incelenen durumlarda özellikle plaka bağıl konumuna göre JaVA performansı değişiklik göstermektedir. Bu bağlamda JaVA'nın U_∞ = 0.0838 m/s'lik serbest akım hızına maruz bırakıldığı durumlardan a = 1 mm disk genliğinin kullanılması halinde iyi sonuç alınan III plaka konumunda farklı frekanslar için oluşturulmuş Çizelge 5.2'de belirtilen anlık akış sayısı üzerinden yapılan zaman ortalamalı akış alanları Şekil 5.4 verilmiştir.

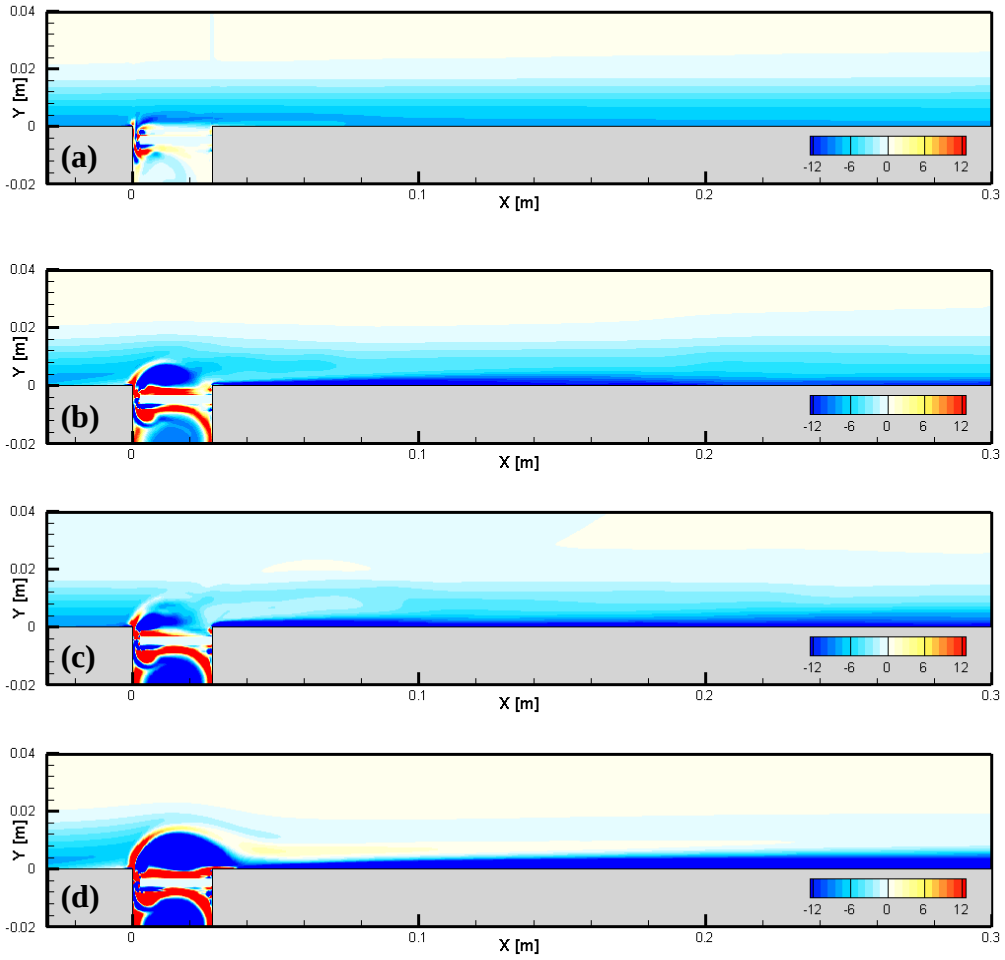
Özellikle farklı frekanslarda JaVA'nın sınır tabaka içerisinde oluşturduğu vorteks etkisinin artışı ve sınır tabaka ayrılmasını geciktirmesi görülmektedir. Çok alınan anlık akış alanı sayısı, bütün anlık akış alanlarını temsil eden genel bir tablo ortaya koymaktadır aynı zamanda JaVA sonrasında incelenen alanın yeterince uzun olması sınır tabaka hız profillerinin JaVA yakınında ve JaVA ötesinde nasıl değiştiğini daha sağlıklı bir şekilde ortaya koymaktadır. Ancak JaVA kaynaklı akış rejiminin zaman içerisinde emme ve basma fazlarına göre nasıl bir akış dinamiği sergilediğini incelemek için anlık akış alanlarına ve vortisite alanlarına da bakılmalıdır.



Şekil 5.4 : a = 1 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve III konumunda zaman ortalamalı akış alanları [m/s]: (a) f = 1 Hz, (b) f = 2 Hz, (c) f = 3 Hz, (d) f = 4 Hz.

Bu bağlamda Ek A'da Şekil A1'de yukarıda zaman ortalamalı akış alanları verilen akışlardan f = 2 Hz ve f = 4 Hz için JaVA yakınında anlık vortisite alanları bir periyot içerisinde verilmiştir. Burada genliğe bağlı şiddeti değişen emme ve basma fazlarına ait ters yönde dönen vorteksler renklerinden anlaşılmaktadır.

Akış görüntüleme ve PIV deneylerinde görüldüğü üzere, yüksek çalışma frekanslarında aktüatör plakası üzerinde büyük vorteksler oluşmaktadır. Sayısal modellemeler sonucu elde edilen anlık vortisite alanları, JaVA kaynaklı vorteks çiftlerinin sınır tabakaya nasıl aktarıldığını ve etkilediğini ortaya koymaktadır. Aktüatör-sınır tabaka arasındaki etkileşim, çalışma frekansına ve plaka bağıl konumuna göre belirgin bir şekilde değişim göstermektedir. Şekil 5.5'de a = 1 mm alınması ve plakanın tamamen gövde içinde kalması durumundaki akış alanlarının değişen frekanslar için elde edilen vortisite alanlarının zamana bağlı ortalamaları verilmiştir.

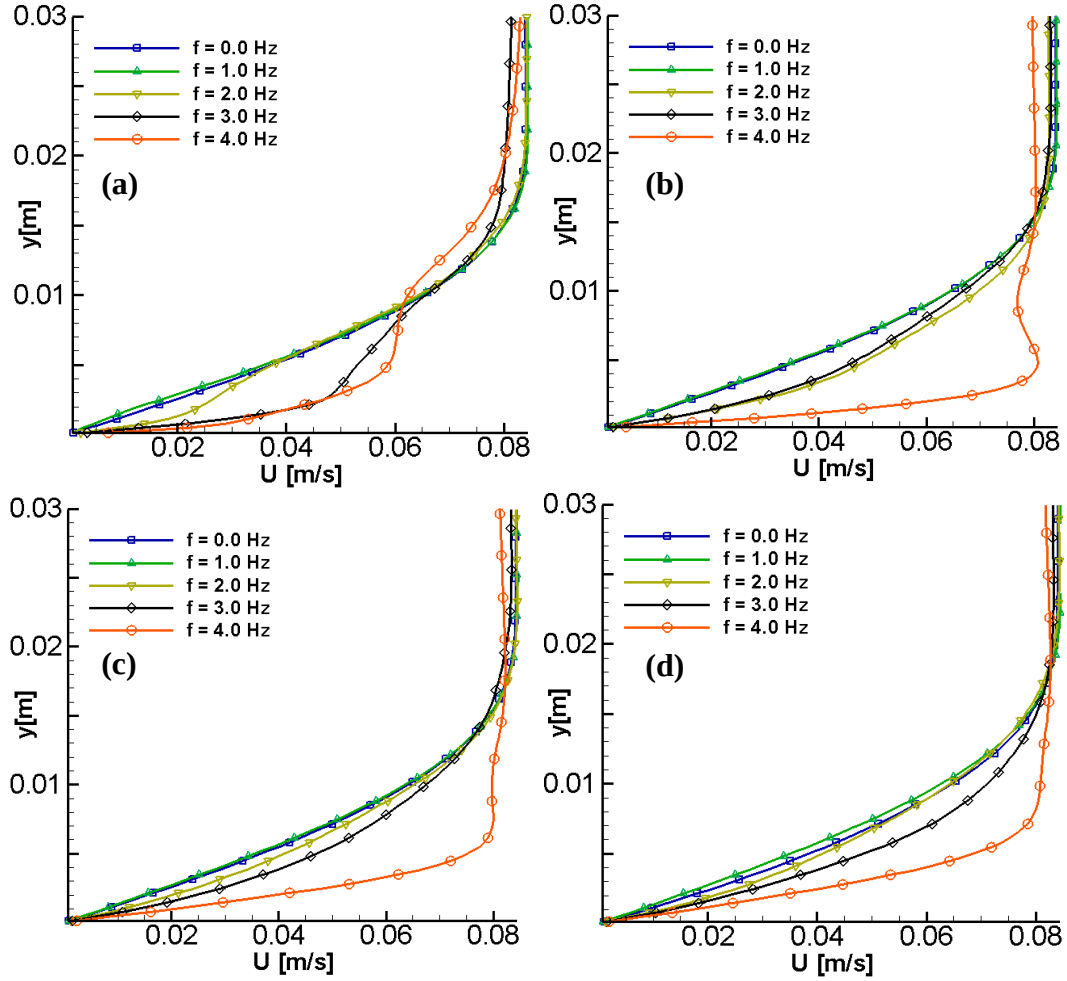


Şekil 5.5 : a = 1 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve III konumunda zaman ortalamalı vortisite alanları: (a) f = 1 Hz, (b) f = 2 Hz, (c) f = 3 Hz, (d) f = 4 Hz.

Şekil 5.5(a)'dan anlaşılacağı üzere düşük frekanslarda sınır tabaka içerisinde vortisite yoğunluğu yüksek frekanslara göre daha azdır. Bu nedenle Şekil 5.5(d)'deki gibi bir sınır tabakadan elde edilecek sınır tabaka hız profilinde iyileşme gözlemlenecektir, bu da sınır tabaka karakteristiklerini aktif akış kontrolünde olması gereken şekilde değiştirecektir.

İncelenen bu sette; a = 1 mm, b = 25 mm alındığına göre, Re_J sadece çalışma frekansı ile değişmektedir. Jet akışı ve vorteksler, genişliği 2.5 mm olan geniş aralıktan (w_w) çıkmaktadır; ölçeklendirilmiş genlik $S_a = 2\pi a / b$ ise sadece geometrik büyüklüklere bağlı olduğundan Şekil 5.4'de verilen bütün akış alanları için 0.25'dir. Plakanın kavite içinde olmasından dolayı, geniş aktüatör aralığından çıkan vorteks çiftleri düz levhanın yakınından geçmekte ve sınır tabakaya enerji vererek sınır tabaka hız profilini iyileştirmektedir. Bu durum Şekil 5.5'de verilen düz levha üzerinde yoğunluğu artan ortalama vortisite alanlarından anlaşılmaktadır. Frekansın

arttırılması ile, aktüatör sonrası düz levha üzerinde vortisite yoğunluğu kalınlaşmakta ve bu da sınır tabaka içerisinde momentum transferini sağlamaktadır. Sonuç olarak artan frekans ile, sınır tabaka hız profilinin ayrılmaya karşı direnci artmakta ve bu da ortalama akış alanı içerisinde seçilen kesitlerdeki hız profillerinde görülmektedir. Şekil 5.6'da (A) tipi levha-aktüatör konfigürasyonunda JaVA sonrasında ilgilenilen kesitlerde alınan hız profilleri gösterilmiştir.



Şekil 5.6 : a = 1 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve III konumunda ortalama sınır tabaka hız profilleri: (a) x = 0.04 m, (b) x = 0.1 m, (c) x = 0.2 m, (d) x = 0.3 m.

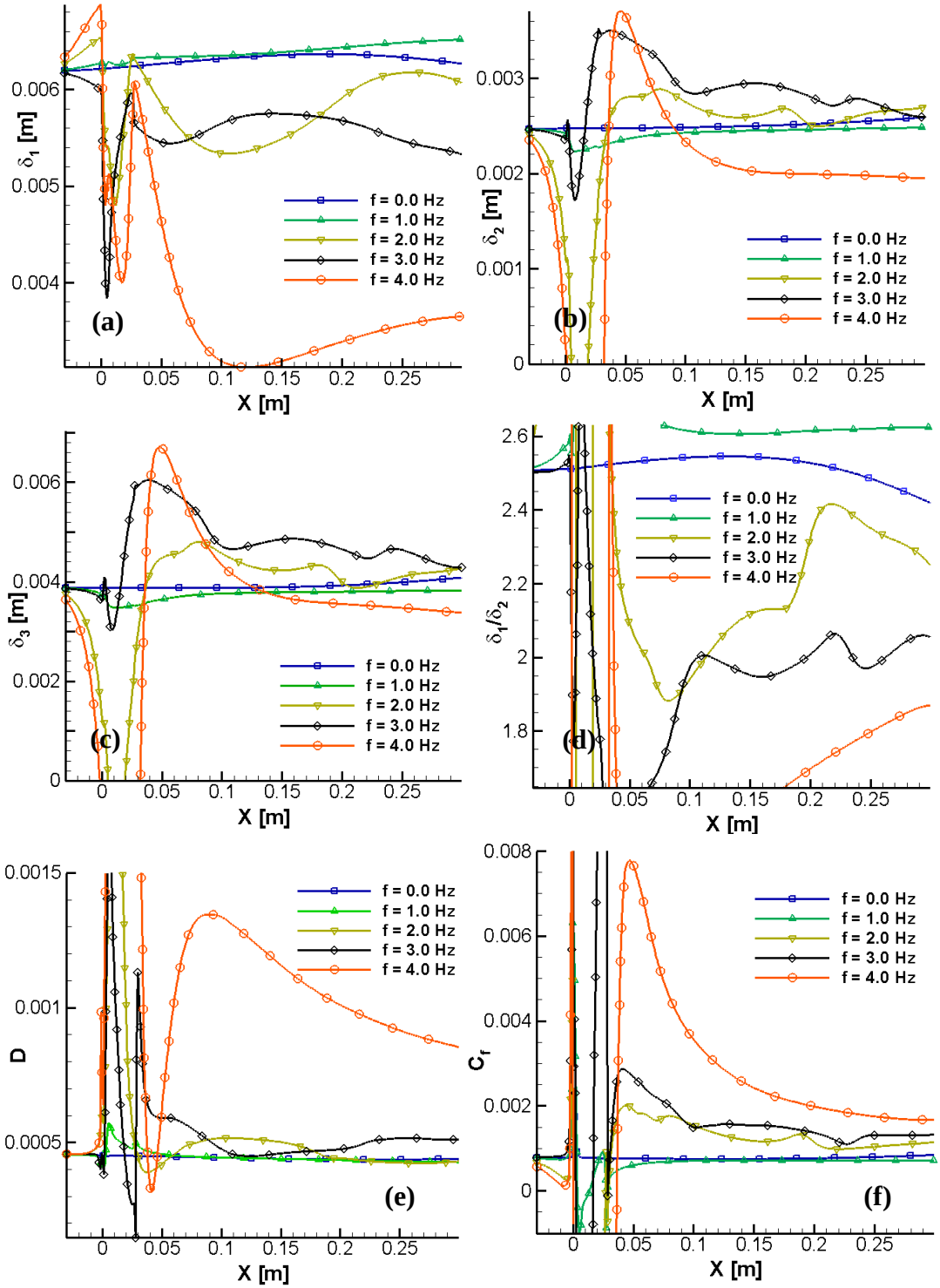
Şekil 5.6'dan anlaşılacağı üzere, JaVA geniş aralığından 0.04 m uzaklıkta alınan kesitte JaVA kaynaklı vortekslerden dolayı yüksek frekanslarda kararsız bir sınır tabaka ortaya çıkmamaktadır. Ancak levha üzerinde akış doğrultusunda ilerlendiği zaman düzgün olmayan sınır tabaka yerini daha düzgün ve çeperden ayrılmaya karşı koyabilen bir sınır tabakaya bırakmaktadır. JaVA'nın sınır tabaka hız profilini nasıl etkilediğini anlamak için sınır tabaka karakteristiklerine de bakılmalıdır.

Akış ayrılması ile ilgili yapılan araştırmalar, sınır tabaka özelliklerini iyileştirmede gözenekli bir levha üzerinde sınır tabakayı emmek suretiyle sınır tabakanın hem daha uzun süre laminer kaldığını hem de türbülanslı sınır tabakada ayrılmanın önlendiğini veya geciktirildiğini ortaya koymuştur (Eppler, 1963).

Ancak bu tez çalışmasında gözenekli ortamda sınır tabakayı emmek yerine aktif akış kontolü ile aynı veya benzer etki yaratılmaya çalışılmıştır. Dolayısıyla JaVA'nın belli parametre kombinasyonlarında öteleme kalınlığı ve momentum kalınlığı ve bunların oranı olan biçim katsayısı incelenerek sınır tabakanın nasıl etkilendiği üzerinde fikir yürütülmüştür. Laminer sınır tabakanın ayrılması yok olan cidar kayma gerilmesi ile açıklanabilir, bu bağlamda JaVA sonrasında gelişen aktif olarak kontrol edilen sınır tabakaya ait sürtünme katsayısı (bkz. denklem 5.8) önemli bir kontrol parametresidir. Bunun yanında toplam disipasyon (bkz. denklem 5.7) özellikle sayısal modelleme sonuçlarından elde edilen verinin düzgün olması bir başka deyişle gerçekçi olmayan vektörler gibi iyileştirilmeye muhtaç akış bölgeleri içermemesi nedeniyle türev ifadelerinin karesinin alınması durumunda dahi doğru yorumlanabilecek grafikler vermesi itibariyle sınır tabakanın aktif akış kontrolü etkisi altında nasıl değiştiği hakkında bilgi vermektedir.

Bu bağlamda Şekil 5.7(a), (b), (c), (d), (e) ve (f)'de sırasıyla a = 1 mm, b = 25 mm ve (A) tipi montaj konfigürasyonunda ve III plaka bağıl konumunda Şekil 5.4'de verilen ortalama akış alanlarında yatay eksen boyunca sırasıyla öteleme kalınlığının, momentum kalınlığının, enerji kalınlığının, biçim katsayısının, toplam disipasyonun ve sürtünme katsayısının değişimi farklı çalışma frekanslarında gösterilmiştir.

Şekil 5.7 (a)'da öteleme kalınlığı daha önce PIV deney verisinden elde edilen sınır tabaka özelliklerinde olduğu gibi artan frekansla azalmaktadır. Denklem **(5.8)** ile JaVA'dan 300 mm ötedeki kesitte (x = 1.83 m) U_∞ = 0.0838 m/s için hesaplanan teorik öteleme kalınlığı değeri 8.0 mm'dir ve deneysel verilerde frekans arttıkça aktif olarak kontrol edilen sınır tabakada bu değerin altına düşülmektedir. Aynı parametrelerdeki akışın sayısal modellemesinde düşük frekanslarda bu teorik değere yakın sonuçlar bulunmuştur. Öteleme ve momentum kalınlığına bağlı olarak PIV deney verisinde biçim katsayısı, aktif kontrolün sağlandığı laminer sınır tabaka bölgesinde teorik değeri olan 2.6'nın altındadır. Sayısal modellemesinde ise f = 1 Hz dışında kalan frekanslarda bu değerin altına düşüldüğü görülmektedir (bkz. Şekil 5.7(d)).

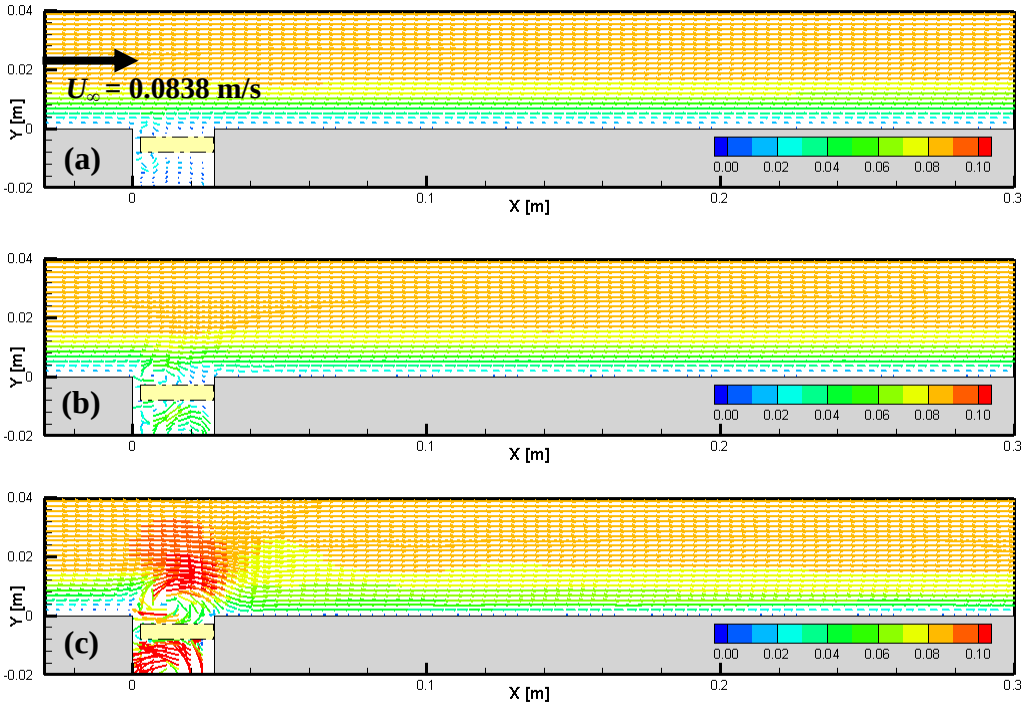


Şekil 5.7 : a = 1 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve III konumunda ortalama sınır tabaka karakteristikleri: (a) öteleme kalınlığı, (b) mometum kalınlığı, (c) enerji kalınlığı, (d) biçim katsayısı, (e) toplam disipasyon, (f) sürtünme katsayısı.

Bu özelliklerden farklı olarak Şekil 5.7(f)'de verilen cidar kayma gerilmesi ile ilişkili sürtünme katsayısı, artan frekansla artmaktadır. Bu değişim yok olan cidar kayma

gerilmesinin ve sürtünme katsayısının neden olduğu sınır tabaka ayrılmasının aktif akış kontrolü ile engellendiğini veya geciktirildiğini göstermektedir.

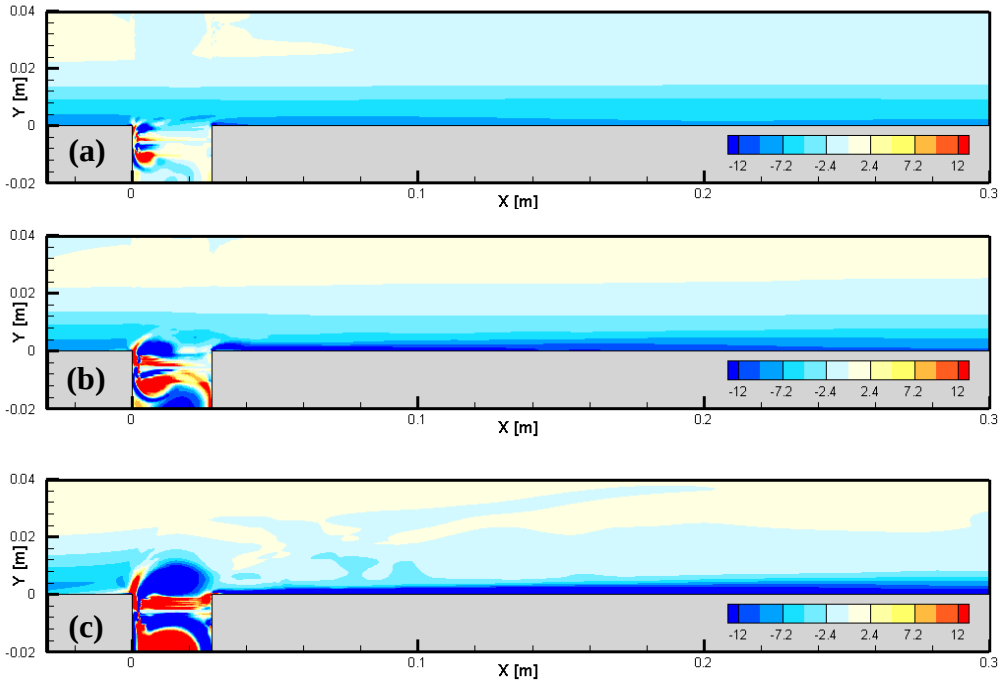
Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de verilen grafikler daha yüksek disk genliği için yapılan sayısal modellemeler sonucunda da incelenmiştir. Aynı aktüatör parametre uzayında ve serbest akım hızında kalmak üzere, disk genliğinin a = 2 mm olması durumunda farklı frekanslarda elde edilen zaman ortalamalı akış alanlarında daha önce incelenen kesitlerde sınır tabaka hız profilleri oluşturulmuş ve sınır tabaka karakteristikleri incelenmiştir. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da zaman ortalamalı hız ve vortisite alanları verilmiştir.



Şekil 5.8 : a = 2 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve III konumunda zaman ortalamalı akış alanları [m/s]: (a) f = 0.5 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz.

Şekil 5.8(c)'den anlaşılacağı üzere yüksek disk genliğinde çalışılması durumunda f = 2 Hz'de en belirgin kontrol sağlanmaktadır. Akış alanı içerisinde plaka üzerinde ve kavite içerisinde plakanın düşey hareketinin sağladığı yüksek hız sayesinde oluşan kırmızı renkli maksimum hız büyüklüğü alanı eldeki parametreler ile erişilebilecek en kuvvetli jeti ifade etmektedir. Bu jet akışı sınır tabakaya önemli ölçüde momentum kazandırmaktadır ve bu zaman ortalamalı vortisite alanlarına da yansımaktadır.

Şekil 5.9'da verilen zaman ortalamalı vortisite alanlarından anlaşılacağı üzere çalışma frekansı arttıkça plaka üzerinde saat yönünde dönen yani negatif, kavite içerisinde ise saat yönünün tersine dönen yani pozitif çevrimler oluşmaktadır. Daha önce incelenen örnektekinden daha belirgin olarak, artan frekansla cidar üzerinde kalınlaşan vorteks tabakası artan momentum ve enerji kalınlıklarını ifade etmekte olup, a = 2 mm disk genliğinde daha rahat görülmektedir.

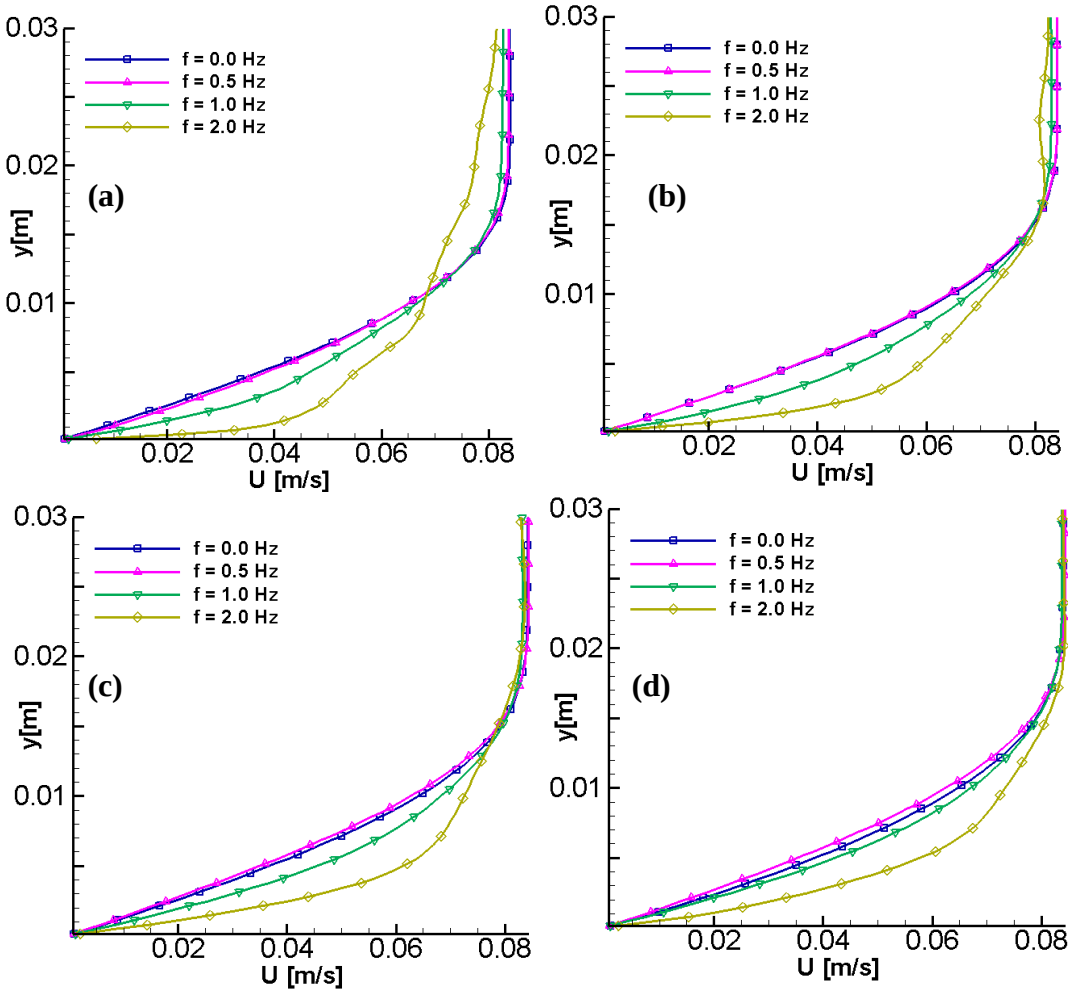


Şekil 5.9 : a = 2 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve III konumunda zaman ortalamalı vortisite alanları: (a) f = 0.5 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz.

Şekil 5.10'da aktüatör yakınından başlayarak çıkış sınır koşulunun tanımlandığı keside kadar dört farklı kesitte sınır tabaka hız profilleri alınmıştır. JaVA'nın çalıştırılmadığı durumda oluşan laminar sınır tabaka ile f = 0.5 Hz'de çalıştığı durumda oluşan kontrollü sınır tabaka arasında fazla bir fark göze çarpmamakla beraber, diğer frekanslarda sınır tabaka hız profilleri iyileşmektedir ve ayrılmaya karşı dirençleri artmaktadır.

Şekil 5.11'de a = 2 mm'lik disk genliğinde oluşan sınır tabaka özellikleri verilmiştir. Sınır tabaka karakteristiklerinden momentum kalınlığı incelendiğinde yanlızca a = 1 mm'lik disk genliğinde f = 4 Hz'de ve benzer şekilde a = 2 mm'lik disk genliğinde f = 2 Hz'de geniş aralıktan sonra yaklaşık x = 0.1 m'ye kadar artan ancak bu mesafeden sonra diğer frekanslarda elde edilen grafiklerin altında seyreden bir momentum kalınlığı değişimi sözkonusudur. Bunun nedeni, ilgili disk genliklerinde

en yüksek frekansta çalışıldığı zaman jetin kuvvetli bir şekilde basılması ile JaVA yakınında daha etkili olması ve teorik sınır tabaka kalınlığının dışına taşarak JaVA'dan x = 0.1 m'den daha ötede etkisini yavaş yavaş yitirmesidir. Dolayısıyla Şekil 5.11 (b) ve (c)'de momentum ve enerji kalınlıklarının değişiminde JaVA'nın bu özelliğine dikkat etmek gerekir.

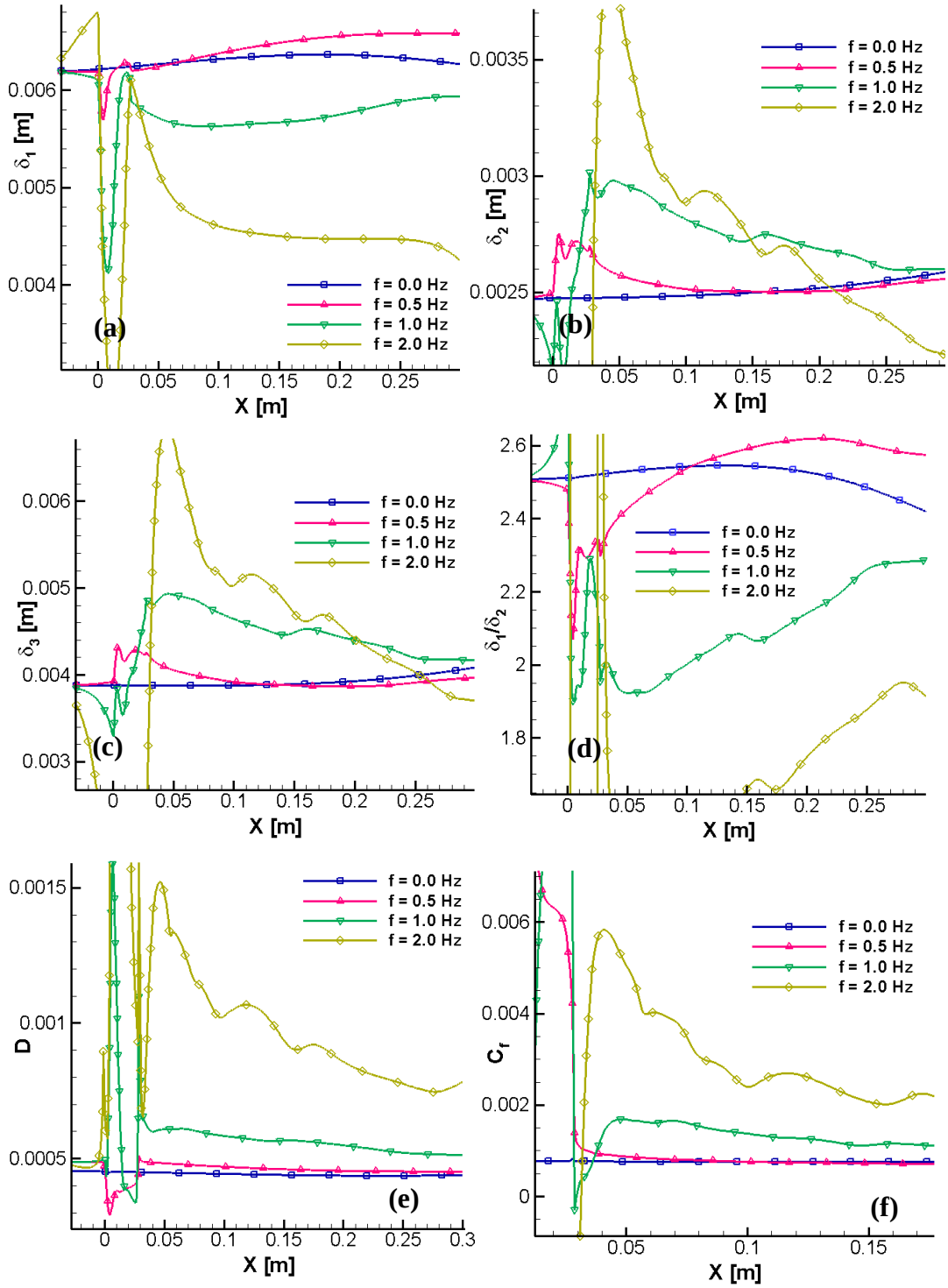


Şekil 5.10 : a = 2 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve III konumunda ortalama sınır tabaka hız profilleri: (a) x = 0.04 m, (b) x = 0.1 m, (c) x = 0.2 m, (d) x = 0.3 m.

Şekil 5.11(a)'da görüldüğü üzere öteleme kalınlığı aktüatör etkinliği ile doğru orantılı olarak azalmaktadır, keza aktüatörün sınır tabakaya enerji kazandırmasıyla momentum ve enerji kalınlıkları da Şekil 5.11(b) ve (c)'de görüldüğü üzere önce artmakta daha sonra çıkışa doğru azalmaktadır. Biçim katsayısı JaVA'nın yüksek çalışma frekanslarında azalmakta ve sürtünme katsayısı ise artmaktadır.

Bu bağlamda iki farklı disk genliğinde ele alınan ve aynı plaka genişliğinin kullanıldığı bu iki örnekte JaVA'nın farklı frekanslarda sınır tabakayı nasıl etkilediği

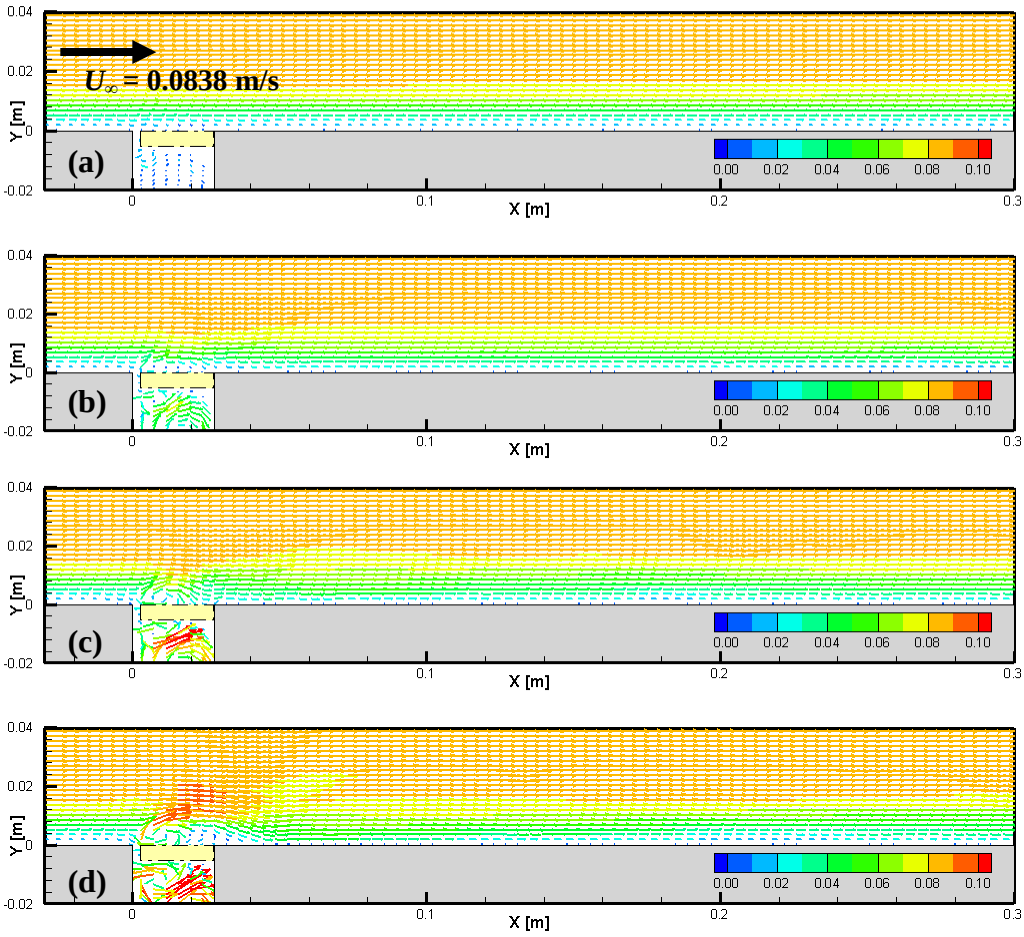
anlaşılmıştır. Bu örneklerde plaka bağıl konumunun kavite içinde kalması da ele alınan örneklerdeki sonuçları olumlu yönde etkilemiştir.



Şekil 5.11 : *a* = 2 mm, *b* = 25 mm, (A) tipi montajda ve III konumunda ortalama sınır tabaka karakteristikleri: (a) öteleme kalınlığı, (b) mometum kalınlığı, (c) enerji kalınlığı, (d) biçim katsayısı, (e) toplam disipasyon, (f) sürtünme katsayısı.

Ek A'da Şekil A2'de a = 2 mm disk genliğinde f = 1 Hz ve f = 2 Hz frekanslarındaki sayısal modellemelerin anlık vortisite alanları verilmiştir. Bu akış alanları JaVA yakınında jet akışlarının nasıl geliştiği ve aktif akış kontrolünü nasıl sağladığı hakkında bilgi vermektedir.

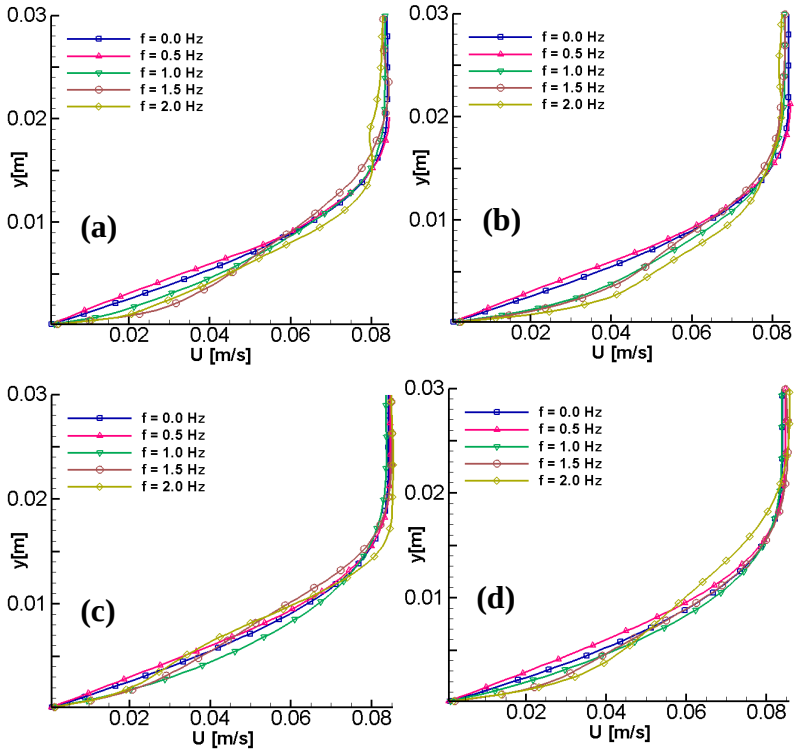
Buraya kadar (A) tipi montajın III plaka konumundaki sınır tabaka-JaVA etkileşimi üzerinde durulmuştur. Plaka bağıl konumu önemli bir parametre olduğu için II plaka konumunda da sınır tabaka içinde jet akışı davranışı incelenmiştir. Yüksek genlik değerinde (a = 2 mm) U_∞ = 0.0838 m/s'lik serbest akım hızına maruz kalan JaVA'nın değişik frekanslardaki zaman ortalamalı akış alanları Şekil 5.12'de verilmiştir.



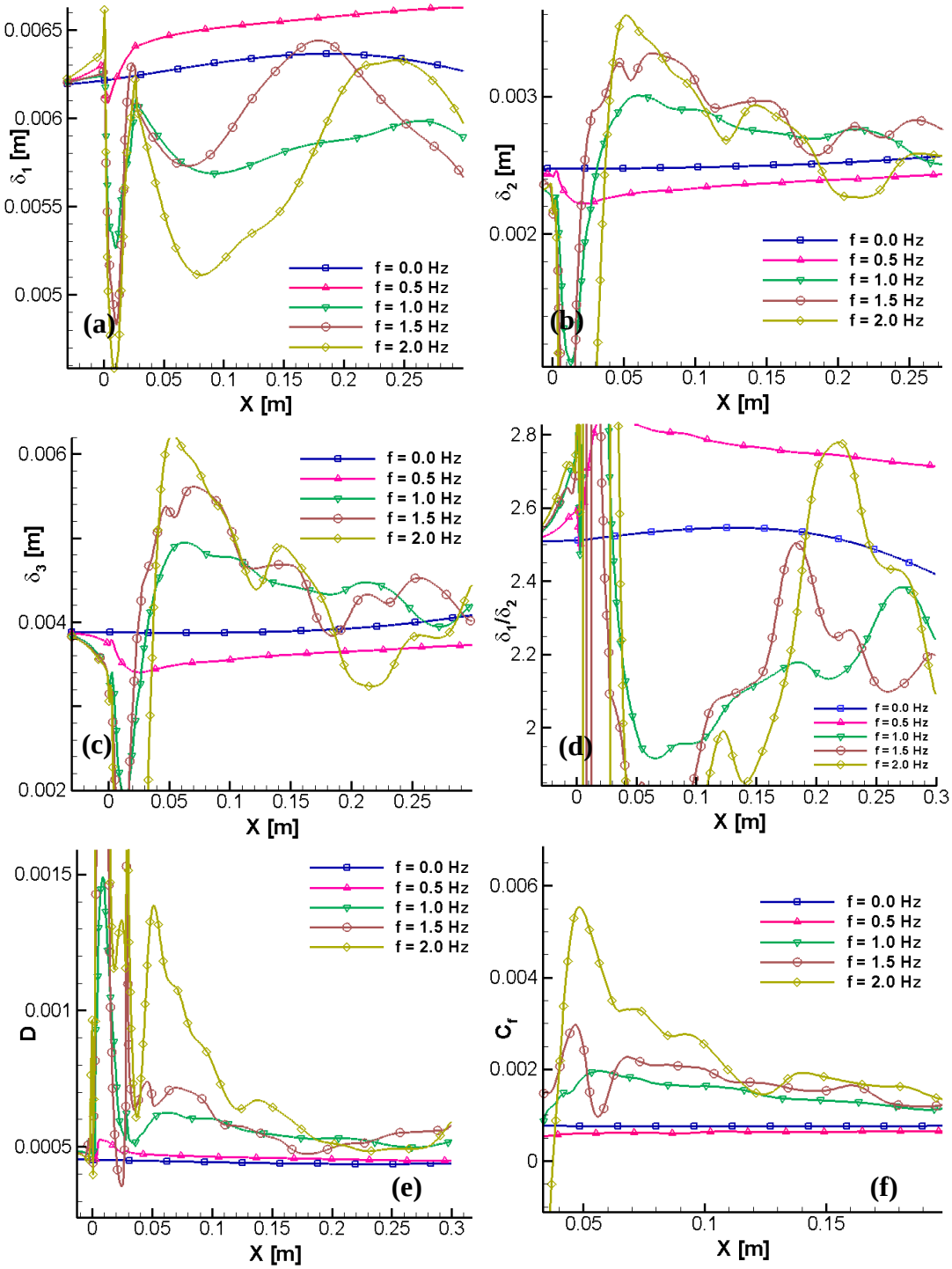
Şekil 5.12 : a = 2 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve II konumunda zaman ortalamalı akış alanları [m/s]: (a) f = 0.5 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 1.5 Hz, (d) f = 2 Hz.

Şekil 5.12 (c) ve (d)'den anlaşılacağı üzere yüksek çalışma frekanslarında geniş aralıktan çıkan jet akışı belirginleşmektedir. Özellikle Şekil 5.12(d)'de plaka üzerinde oluşan vorteks sınır tabakayı enerjilendirmede önemli rol oynamaktadır.

Bu bağlamda daha önceki örneklerde incelenen kesitlerden alınan sınır tabaka hız profilleri aktüatör etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Şekil 5.13'deki hız profillerinde bu etkileşim görülmektedir. Şekil 5.13(b)'ye dikkat edilecek olursa, geniş aralıktan x = 0.1 m öteden alınan hız profilleri diğer kesitlere göre daha iyi çıkmıştır. Şekil 5.13(d)'ye dikkatlice bakılırsa, bütün frekanslardaki ortalama hız profilleri y = 0.01 m'ye kadar beklendiği gibidir, ancak f = 2 Hz için elde edilen akış alanı 0.01 m < y < 0.03 m arasında hız profilinden de anlaşılacağı üzere diğer frekanslarda elde edilen hız profillerinin gerisine düşerek etkisini yitirmektedir. Diğer örneklerde de olduğu gibi f = 0.5 Hz'de aktüatör etkinliği JaVA'nın çalıştırılmadığı durumla hemen hemen aynıdır. Bu bağlamda (A) tipi montajda b = 25 mm genişliğindeki plaka kullanıldığı zaman her iki disk genliğinde elde edilen sayısal modelleme çözümlerinden çıkarılan sınır tabaka hız profilleri ve sınır tabaka karakteristik kalınlıkları III plaka konumunda, II plaka konumu ile kıyaslandığında daha iyi netice vermiştir. Bu bölümde yerverilmiş olmasa da (A) tipi montajda I plaka konumundaki hız profilleri ve sınır tabaka karakteristik kalınlıkları JaVA'nın istenen etkisinin gözlemlenmediği şekildedir. Şekil 5.14'de sınır tabaka karakteristik kalınlıkları ve toplam disipasyon ile sürtünme katsayısının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.13 : a = 2 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve II konumunda ortalama sınır tabaka hız profilleri: (a) x = 0.04 m, (b) x = 0.1 m, (c) x = 0.2 m, (d) x = 0.3 m.



Şekil 5.14 : a = 2 mm, b = 25 mm, (A) tipi montajda ve II konumunda ortalama sınır tabaka karakteristikleri: (a) öteleme kalınlığı, (b) mometum kalınlığı, (c) enerji kalınlığı, (d) biçim katsayısı, (e) toplam disipasyon, (f) sürtünme katsayısı.

Şekil 5.14'den anlaşıldığı üzere öteleme kalınlığı artan frekansla azalmaktadır. Momentum ve enerji kalınlıkları JaVA'nın etkisinin en yüksek olduğu x = 0.1 m'ye kadar yani JaVA yakınında artan frekansla doğru orantılı artmaktadır ancak JaVA'dan uzaklaştıkça bu sıralama bozulmaktadır, nitekim yüksek frekans

değerlerinde momentum ve enerji kalınlıkları daha düşük frekanslardaki sınır tabaka kalınlıklarının altına düşebilmektedir. PIV deney verilerinde geniş aralıktan aşağı akımda 300 mm uzakta değişik frekanslarda elde edilen sınır tabaka karakteristiklerinin değerleri, a = 1.0 mm'lik disk genliğinde yapılan CFD modellemelerinde geniş aralıktan x = 0.3 m öteden elde edilmiş sınır tabaka karakteristiklerine ait değerler Çizelge 5.3'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Bu değerler PIV verisinde Şekil 4.24(b)'de gösterildiği gibi PIV penceresinde orijinden yaklaşık 1.64 cm öteden alınan kesitteki değerler olup, CFD verilerinde ise kanal çıkışına tekabül eden geniş aralıktan 0.30 m öteden alınmış değerlerdir.

Çizelge 5.4'de ise aynı çalışma koşullarında fakat disk genliğinin a = 2 mm olduğu durumda elde edilen değerlerin karşılaştırması verilmiştir.

Çizelge 5.3 : PIV ve CFD sınır tabaka kalınlıkları karşılaştırılması (300 mm öteden).

a = 1 mm, b = 25 mm, (A)-montajı, III plaka konumu; (*****) = Blasius yaklaşımı									
	PIV				**CFD**				(H) –bağıl
f [Hz]	δ_1[mm]	δ_2[mm]	δ_3[mm]	H	δ_1[mm]	δ_2[mm]	δ_3[mm]	H	hata (%)
0 (*****)	8.04	3.10	-	2.59	8.04	3.10	-	2.59	**-**
0	6.34	2.46	3.75	2.57	6.27	2.59	2.42	2.42	**5.8**
1	5.62	2.82	4.55	1.99	6.52	2.48	2.62	2.63	**31.5**
2	5.34	2.75	4.52	1.94	6.07	2.69	2.25	2.26	**16.5**
3	4.29	2.33	3.89	1.84	5.33	2.59	2.05	2.06	**12.0**
4	3.17	1.76	2.92	1.81	3.65	1.95	1.87	1.87	**3.3**

Çizelge 5.4 : PIV ve CFD sınır tabaka kalınlıkları karşılaştırılması (300 mm öteden).

a = 2 mm, b = 25 mm, (A)-montajı, III plaka konumu; (*****) = Blasius yaklaşımı									
	PIV				**CFD**				(H) –bağıl
f [Hz]	δ_1[mm]	δ_2[mm]	δ_3[mm]	H	δ_1[mm]	δ_2[mm]	δ_3[mm]	H	hata (%)
0 (*****)	8.04	3.10	-	2.59	8.04	3.10	-	2.59	**-**
0	6.34	2.46	3.75	2.57	6.27	2.59	2.42	2.42	**5.8**
0.5	4.82	2.30	3.54	2.10	6.58	2.55	3.96	2.58	**22.8**
1	3.23	1.50	2.27	2.15	5.93	2.59	4.17	2.29	**6.5**
2	2.44	0.80	0.97	3.04	4.24	2.22	3.69	1.91	**37.2**

Çizelge 5.3 ve 5.4'den anlaşılacağı üzere, akış ayrılması hakkında fikir yürütmeyi kolaylaştıran biçim katsayısı (H) değerlerinin deneysel ve sayısal değerleri etkin kontrol ile düşmektedir.

Deneysel ve sayısal verilerin sağlıklı bir şekilde karşılaştırılabilmesi için ortak bir kesit ancak her iki veri kümesi için geniş aralığın 300 mm ötesindedir, buna rağmen bazı çalışma koşullarında sınır tabaka karakteristiklerinin deneysel değerleri sayısal eşdeğerlerinden farklıdır. Bunun bir nedeni, deneysel ve sayısal veri kümelerinin

hesaplanmalarında ortaya çıkan içerik farklılıklarıdır. PIV ile sınır tabaka karakteristiklerinin hesabında önemli rol oynayan cidara en yakın tabakadaki (y = 0 civarı) hız değerleri deneysel çalışma koşullarının verdiği bazı olumsuzluklardan etkilenebilir. Bunlar arasında levha yakınında gerçekçi olmayan vektörler oluşması veya sınır tabaka akışının levha üzerindeki tam yerinin tesbitinin zor olması sayılabilir. Bu da veri setinde biraz değişikliğe yol açabilir. Diğer taraftan sayısal modellemelerde elde edilen çözümler, sonlu hacimler yaklaşımında yüksek mertebeden türevlerin ihmal edilmesi ile ortaya çıkan sayısal hataları içermektedir. Ayrıca giriş sınır koşulu olarak kabul edilen Blasius hız profiline benzeyen dördüncü mertebeden hız profili sayısal hesaplamalarda başvurulabilecek en gerçekçi yaklaşım olmakla beraber, deneylerde gerçekleşen Blasius hız profilinden farklı olabilir.

Sınır tabaka karakteristiklerinin entegrasyonla hesabında PIV veri setinde zaman ortalamalı akış alanında sadece JaVA geniş aralığından 300 mm ötedeki hız profili kullanılması, ancak CFD veri setinde ise zaman ortalamalı akış alanında akış doğrultusu boyunca her kesitten alınan hız profillerinin kullanılabilmesi; CFD modellemelerinin PIV ile elde edilemeyecek kapsamda sonuçlar sağlamasını mümkün kılmaktadır.

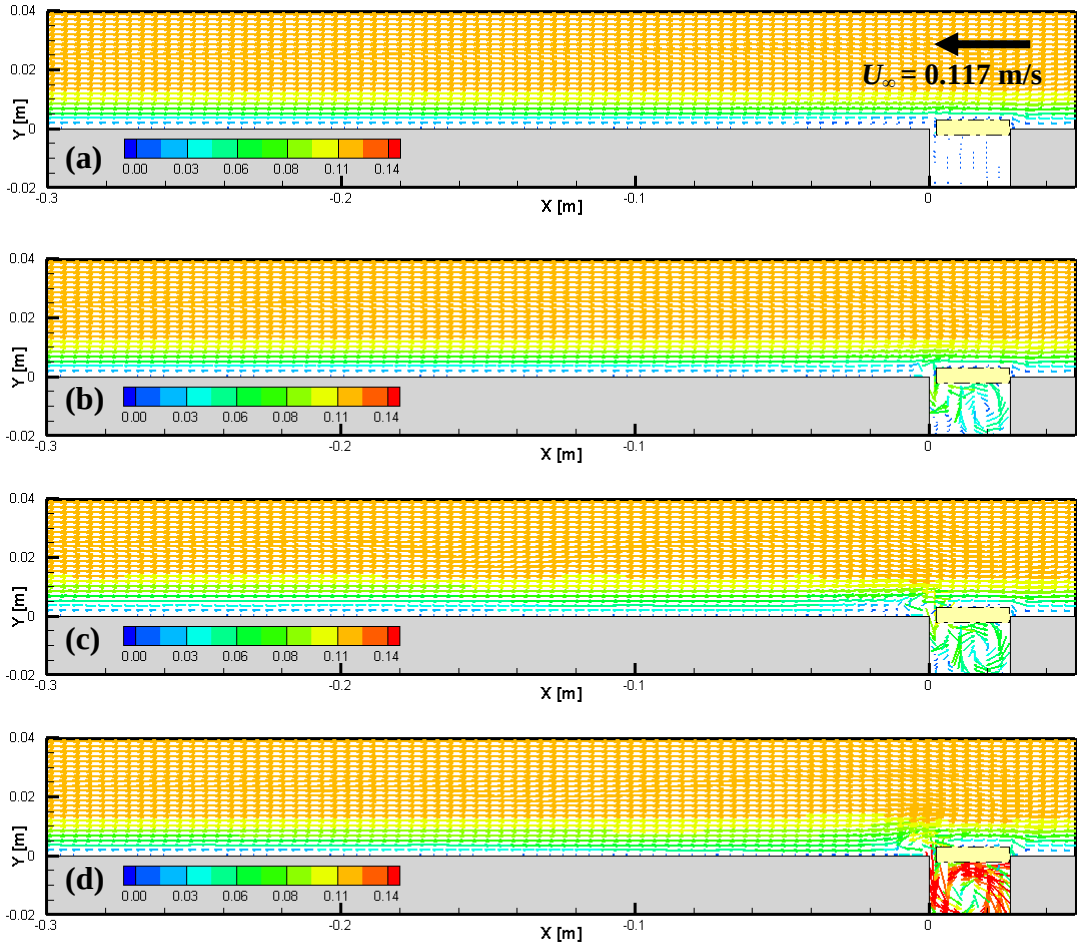
Sonuç itibariyle (A) tipi JaVA-levha konfigürasyonu sayısal modellemelerde iyi sonuç vermiştir ve III tipi plaka konumunda II plaka konumuna göre daha gerçekçi sonuçlara ulaşılmıştır.

5.4 (B) Tipi Montajda Sayısal Modellemeler

Akış görüntüleme ve PIV deneylerinde JaVA modelinin düz levhaya Şekil 4.6(b)'deki gibi yerleştirilmesi ile oluşan konfigürasyon (B) tipi montajda, sayısal modellemeler Şekil 5.2'deki gibi tasarlanan bir hesaplama ağı içerisinde yapılmıştır.

İncelenen akış tipleri içerisinde (B) tipi konfigürasyonda en iyi sonuçlar I plaka konumunda bulunmuştur bunun nedeni plakanın bağıl konumunun gövde dışında olmasıdır. (A) tipi konfigürasyonda yapıldığı gibi zamana bağlı çözdürülen akış rejimlerinden frekansa bağlı olarak hesaplanan zaman ortalamalı akış alanları kullanılarak geniş aralıktan x = 0.04 m, 0.1 m, 0.2 m ve 0.3 m mesafelerde sınır tabaka hız profilleri alınmış ve aynı zamanda akış yönünde düz levha boyunca diğer sınır tabaka kalınlıklarının değişimi incelenmiştir.

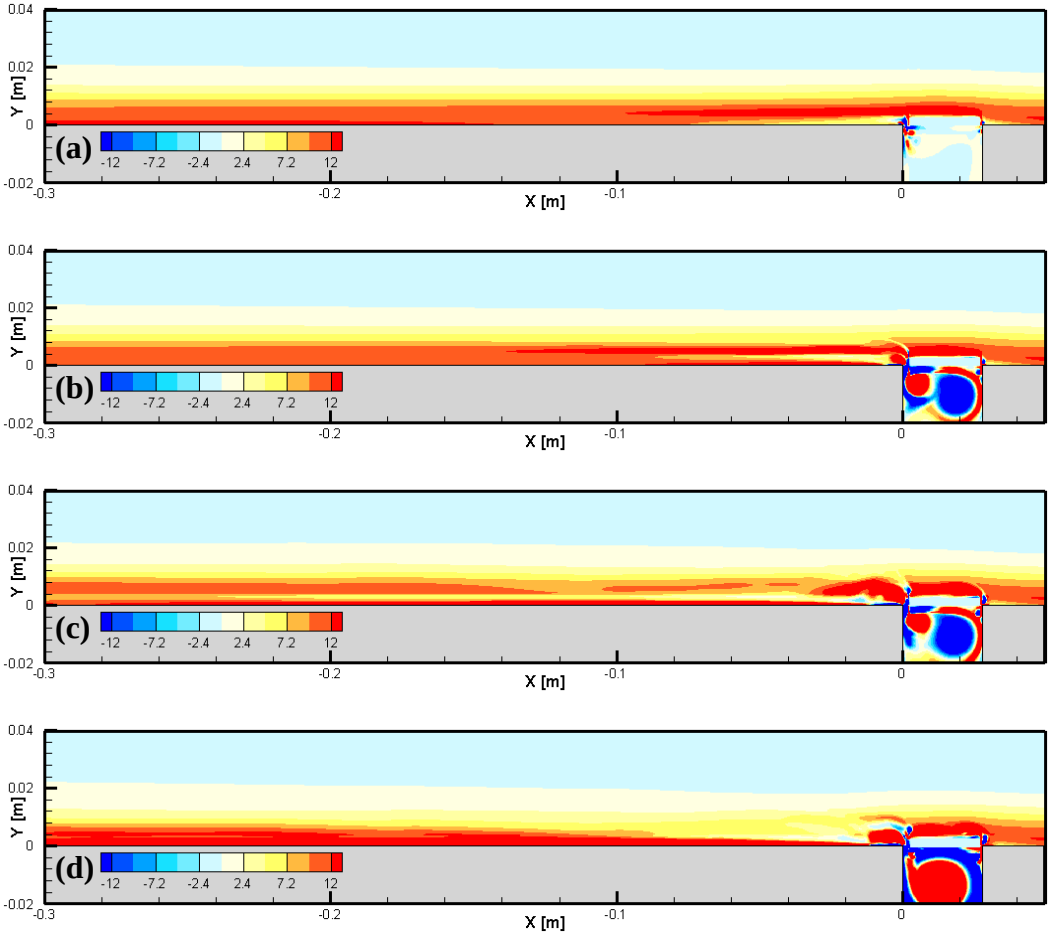
Şekil 5.15'de U_∞ = 0.117 m/s'lik serbest akım hızında I plaka konumunda a = 1 mm, b = 25 mm seçilmiş JaVA parametrelerinde farklı frekanslarda elde edilmiş ortalama akış alanları, Şekil 5.16'da ise aynı parametrelerde ortalama vortisite alanları gösterilmiştir.



Şekil 5.15 : a = 1 mm, b = 25 mm ve (B) tipi montajda ve I konumunda zaman ortalamalı akış alanları [m/s]: (a) f = 1 Hz, (b) f = 2 Hz, (c) f = 3 Hz, (d) f = 4 Hz.

Şekil 5.16(a)'dan anlaşılacağı gibi JaVA kavitesi içinde herhangi bir akış yoktur, plaka altı adeta bir ölü bölge gibidir, dolayısıyla plaka konumuna da bağlı olarak jet akışı sadece geniş aralıktan olmaktadır. Şekil 5.16(b) ve (c)'de artan frekansla kavite içinde zıt yönlü iki vorteks oluşmaktadır, bunlardan saat yönünde dönen daha büyüktür. Özellikle artan frekanslarda oluşan akış rejimlerinde plaka konumunun etkisiyle dar aralıktan da ufak bir jet akışı gerçekleşmektedir. Şekil 5.16(d)'de JaVA kavitesi içerisinde bir tane ve saat yönünün tersine dönen büyük bir vorteks oluşmaktadır. Bu vorteks hız profilini iyileştirici etki yapmaktadır. Ek A, Şekil A3'de bu akış rejimlerinden f = 2 Hz ve f = 4 Hz için anlık vortisite alanları

gösterilmiştir. Şekil A3'de zıt yönlü vorteksler ve dar aralıktan çıkan vorteksler rahatlıkla görülmektedir.

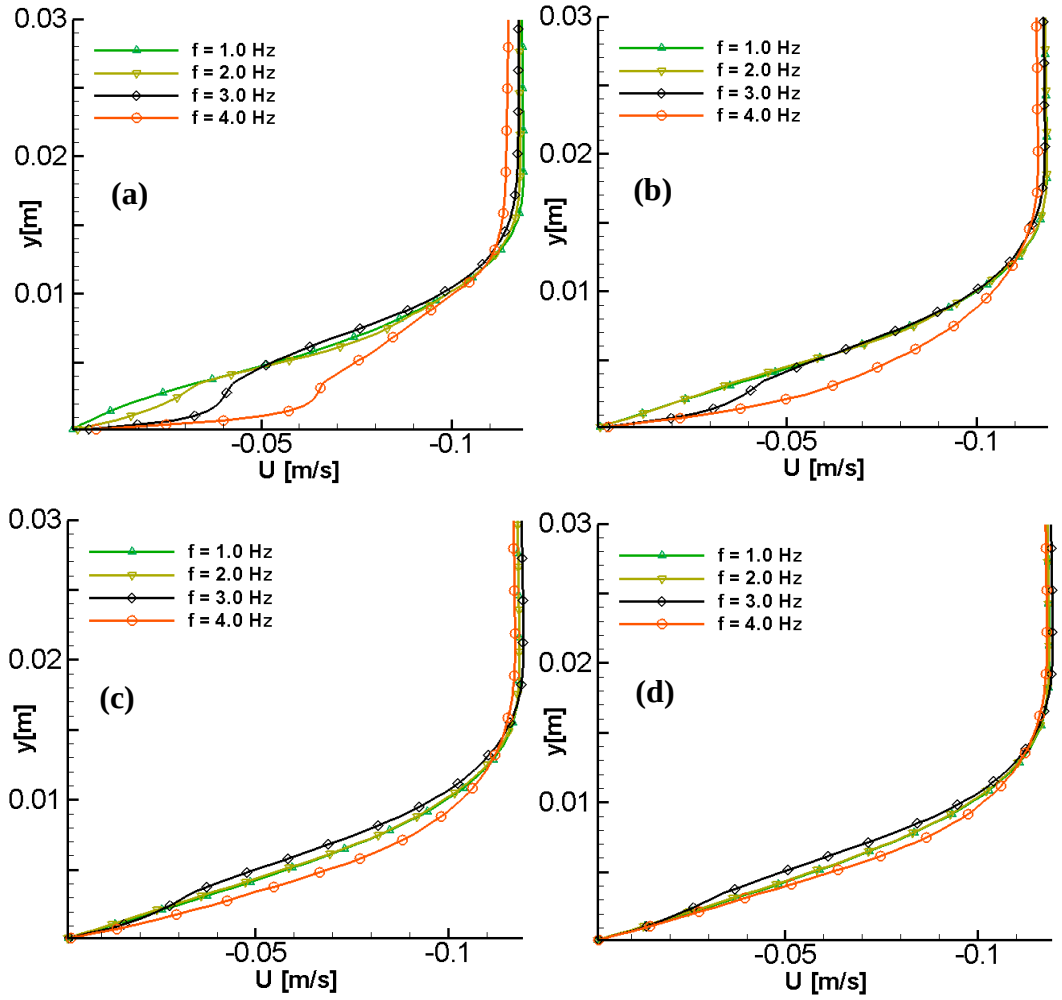


Şekil 5.16 : a = 1 mm, b = 25 mm ve (B) tipi montajda ve I konumunda zaman ortalamalı vortisite alanları: (a) f = 1 Hz, (b) f = 2 Hz, (c) f = 3 Hz, (d) f = 4 Hz.

Bu örnekte negatif yönde daha önce ele alınan kesitlerde yani akış yönünde x = -0.04 m, -0.1 m, -0.2 m ve -0.3 m'lerde hız profilleri alınmış ve diğer sınır tabaka karakteristikleri incelenmiştir. Şekil 5.17'de gösterilen hız profilleri beklendiği gibidir, ancak f = 3 Hz'de bulunan ortalama hız profili daha düşük frekanslarda elde edilenden daha kötü çıkmıştır, bu durum Şekil 5.17(c) ve (d)'de göze çarpmaktadır. JaVA yakınında yani akışa ait Reynolds sayısının daha düşük olduğu yerlerde yüksek frekanslarda hız profilinin akış yönünde daha uzaktan alınan hız profiline göre iyi çıktığı söylenebilir.

Sınır tabaka karakteristikleri beklenen şekilde çıkmıştır. Denklem (4.2) uyarınca (B) tipi montajda incelenen U_∞ = 0.117 m/s'lik serbest akım hızında JaVA'nın bulunduğu bölgede yani levhanın ön kenarından yaklaşık 1.53 m uzakta sınır tabaka

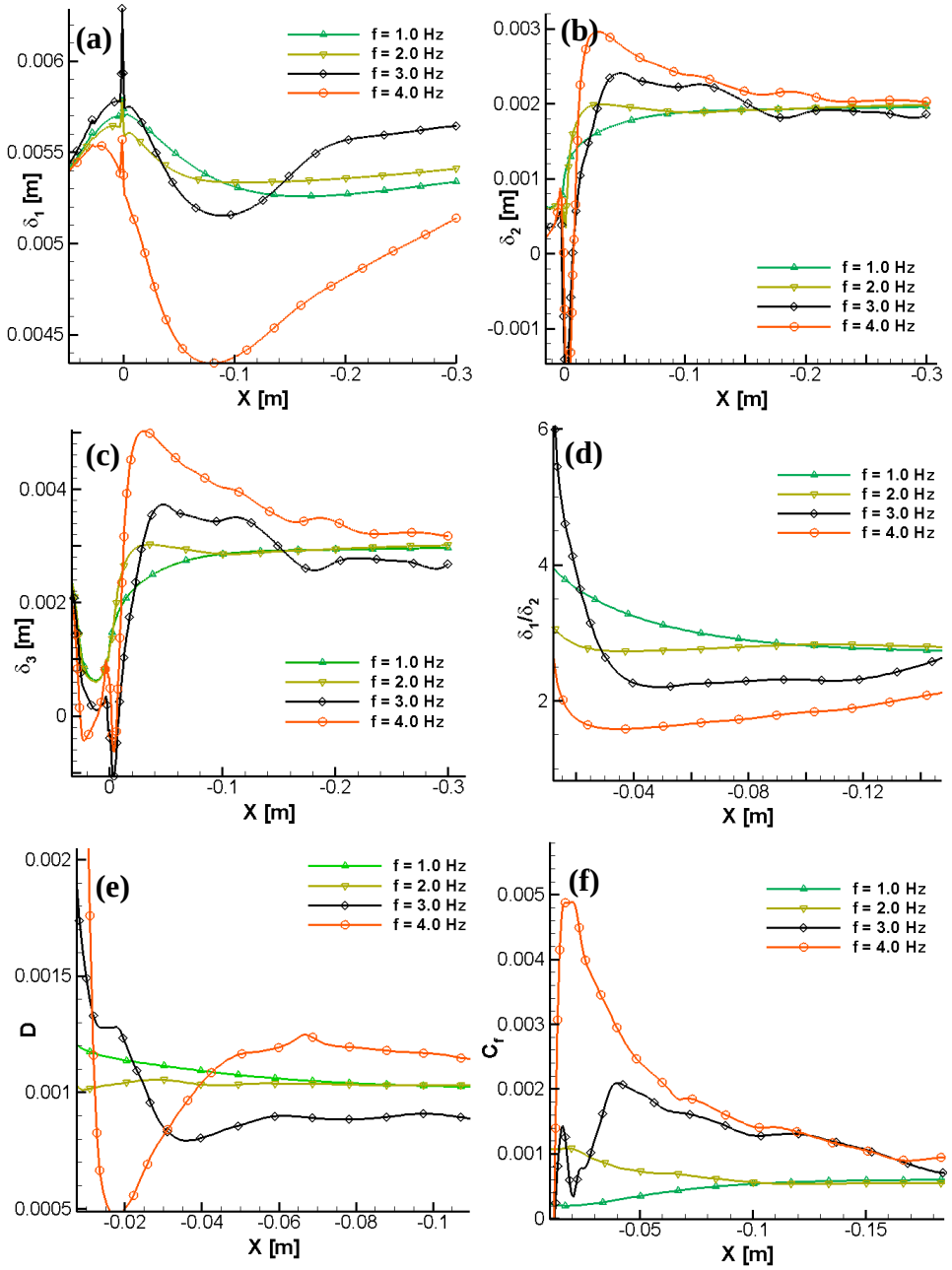
kalınlığı yaklaşık 18 mm'dir, dolayısıyla sayısal modellemede Blasius hız profiline benzetilen dördüncü mertebeden polinomiyal giriş koşulunda δ = 18 mm alınmıştır. Şekil 5.18'de gösterilmiş sınır tabaka karakteristikleri de yatay düzlemin uzunluğu ile değişen Reynolds sayısına (Re_x) bağlıdır (bkz denklem 4.6). Düz levha üzerinde akış, Reynolds sayısına göre laminer veya türbülanslı olabilir. Laminer sınır tabaka düzleme dik doğrultuda düzgün katmanlar halinde gelişen ve cidarda zayıf hız gradyeni ile etkisi az olan bir cidar kayma gerilmesi oluşturan sınır tabaka olarak tanımlanmıştır. Türbülanslı sınır tabakada ise momentum transferi ile cidarda akım yönüne dik doğrultuda oluşan kuvvetli hız gradyeni cidar kayma gerilmesinin dolayısıyla sürtünme direncinin artması demektir.



Şekil 5.17 : a = 1 mm, b = 25 mm, (B) tipi montajda ve I konumunda ortalama sınır tabaka hız profilleri: (a) x = -0.04 m, (b) x = -0.1 m, (c) x = -0.2 m, (d) x = -0.3 m.

Bu bağlamda laminer bölgede çalışan ancak türbülanslı bölgeye girmeden çalışma frekansına bağlı olarak laminer veya geçiş bölgesinde etki eden JaVA, sınır tabakaya

momentum kazandırarak, öteleme kalınlığını azaltmaktadır (bkz. Şekil 5.18(a)). Öteleme kalınlığı düşürülürken, sürtünme katsayısı da artmaktadır. Dolayısıyla öteleme kalınlığının momentum kalınlığına oranı olan biçim katsayısı ile cidar kayma gerilmesinin boyutsuz bir ifadesi olan sürtünme katsayısı Şekil 5.18 (d) ve (f)'de görüldüğü üzere ters orantılı olarak değişmektedir.



Şekil 5.18 : *a* = 1 mm, *b* = 25 mm, (B) tipi montajda ve I konumunda ortalama sınır tabaka karakteristikleri: (a) öteleme kalınlığı, (b) mometum kalınlığı, (c) enerji kalınlığı, (d) biçim katsayısı, (e) toplam disipasyon, (f) sürtünme katsayısı.

5.5 Sayısal Modellemelerin Frekans Spektrumları

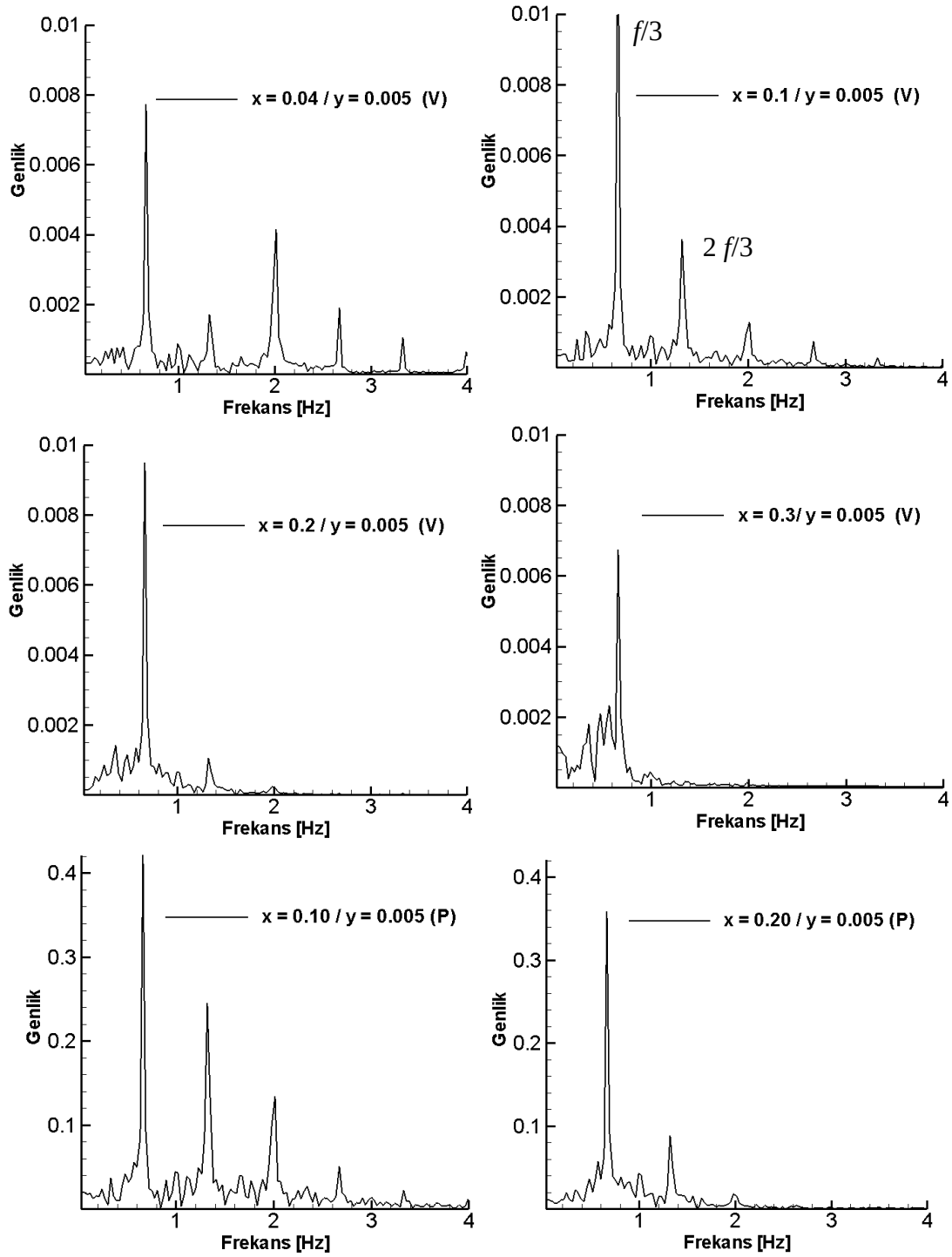
Bölüm 3.8 ve 3.9'da hareketsiz su ortamında oluşturulan çeşitli JaVA kaynaklı akış rejimlerinde akış dinamiği hakkında bilgi verebilecek noktaların hız-zaman grafikleri ve FFT analizleri üzerinde durulmuştur. Su kanalında yapılan sayısal modellemelerde de akış alanı içerisinde seçilen noktalarda hız bileşenlerinin ve basıncın zamana bağlı değişiminden yola çıkarak frekans spektrumları incelenmiştir.

Ek A Şekil A4'de ve Şekil A5'de sırasıyla (A) tipi montajda ve II plaka bağıl konumunda U_∞ = 0.0838 m/s'lik serbest akım hızında a = 1 mm disk genliği, b = 25 mm plaka genişliği kullanılması halinde f = 2 Hz ve f = 3 Hz'lik çalışma frekanslarında elde edilen anlık vortisite alanları siyah-beyaz olarak verilmiştir. Bütün sınır tabakayı içeren bu anlık akış alanlarında zamanla geniş aralıktan çıkan vortekslerin levha üzerinde birbirlerini nasıl takip ettikleri ve birleşerek nasıl yeni vorteksler oluşturdukları gözlemlenebilmektedir. JaVA kaynaklı akışın serbest akım hızına maruz kalmış hareketi akış doğrultusunda sınır tabaka içerisinde kalmak suretiyle dört ayrı nokta için araştırılmıştır. Levha düzleminden y = 0.005 m yükseklikte JaVA yakınından başlayarak x = 0.04 m, 0.1 m, 0.2 m ve 0.3 m'lerde seçilen noktaların hız değerine ve basıncına ait FFT diyagramları f = 2 Hz için Şekil 5.19'da verilmiştir.

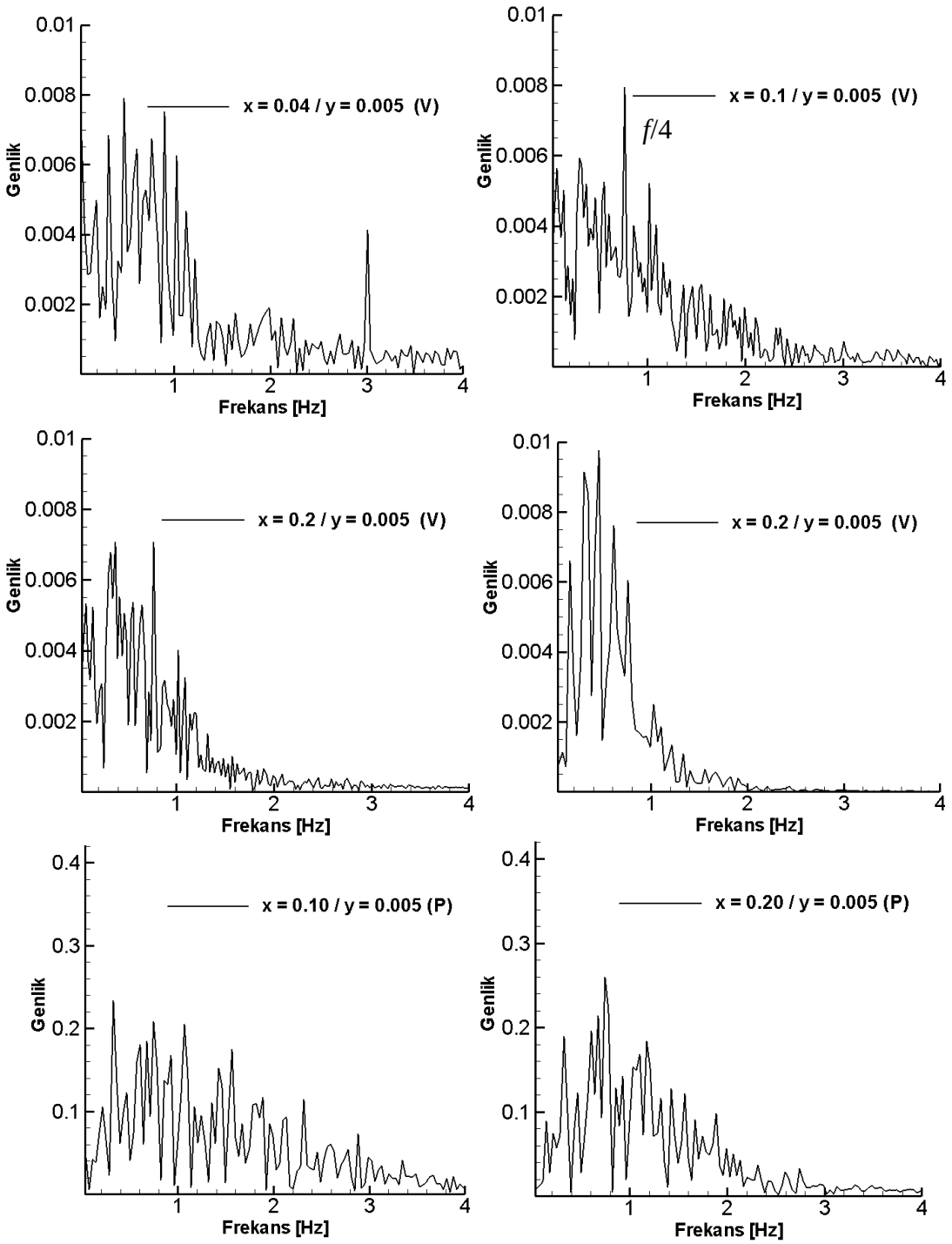
Frekans analizleri, JaVA kaynaklı vortekslerin dinamik davranışı hakkında bilgi vermektedir. FFT analizine göre pik genliğin akışa ait esas frekans olan 2 Hz'de çıkması beklenmektedir, oysa JaVA yakınındaki (x = 0.1 m ve y = 0.005 m) koordinatlı noktanın hız ve basınç bileşenlerinin hız-zaman grafiklerine ait frekans spektrumlarından anlaşıldığı üzere pik genlik yaklaşık 0.66 Hz'de karşımıza çıkmaktadır ve bunu 1.32 Hz'de bir diğer alt-harmonik takip etmektedir. Dikkat edilecek olursa 0.66 Hz, esas çalışma frekansının üçte biridir, 1.32 Hz ise üçte ikisidir. Bu şu anlama gelmektedir; JaVA'nın bir periyot içerisindeki emme ve basma fazları esnasında geniş aralıktan sınır tabaka içine enjekte edilen vorteks ilerlerken, frekans analizi yapılan bölgede kendinden önce oraya gelmiş bir önceki periyoda ait iki adet vorteksle birleşmiştir dolayısıyla harekete ait pik genlik esas frekansın üçte birinde çıkmaktadır.

Aynı yaklaşım f = 3 Hz'de de sözkonusudur. Şekil 5.20'de aynı noktaların hız değerine ve basıncına ait FFT diyagramları verilmiştir. Bu durumda ise bir periyot

içerisinde takip edilen vorteks frekans analizi yapılan noktadan geçerken kendisinden önceki diğer üç vorteksle birleşmekte ve sonuçta (x = 0.1 m ve y = 0.005 m) noktasında pik genlik esas frekans olan 3 Hz'in dörtte biri yani yaklaşık 0.75 Hz çıkmaktadır.



Şekil 5.19 : a = 1 mm, b = 25 mm, f = 2 Hz, (A) tipi montajda ve II konumunda sınır tabaka içerisindeki noktaların frekans analizleri (hız ve basınç).



Şekil 5.20 : a = 1 mm, b = 25 mm, f = 3 Hz, (A) tipi montajda ve II konumunda sınır tabaka içerisindeki noktaların frekans analizleri (hız ve basınç).

Sonuç itibariyle JaVA kaynaklı akışların düz levha üzerinde gelişen sınır tabaka ile olan etkileşimi sayısal modellemelerle ortaya konmuştur ve bu çalışmalar, sadece PIV deneyleriyle elde edilmesi mümkün olmayan zenginlikte bir altyapı sunmuştur.

5.6 Eğik Düzlemde Sayısal Modellemeler

Bu bölüme kadar düz levha üzerinde gelişen sınır tabaka ile farklı çalışma parametrelerinde işletime sokulan JaVA etkileşiminin deneysel ve sayısal araştırılması yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda ele alınmamış ancak sayısal modellemesi yapılmış bir konu da eğik düzlem üzerinde JaVA-sınır tabaka etkileşimidir.

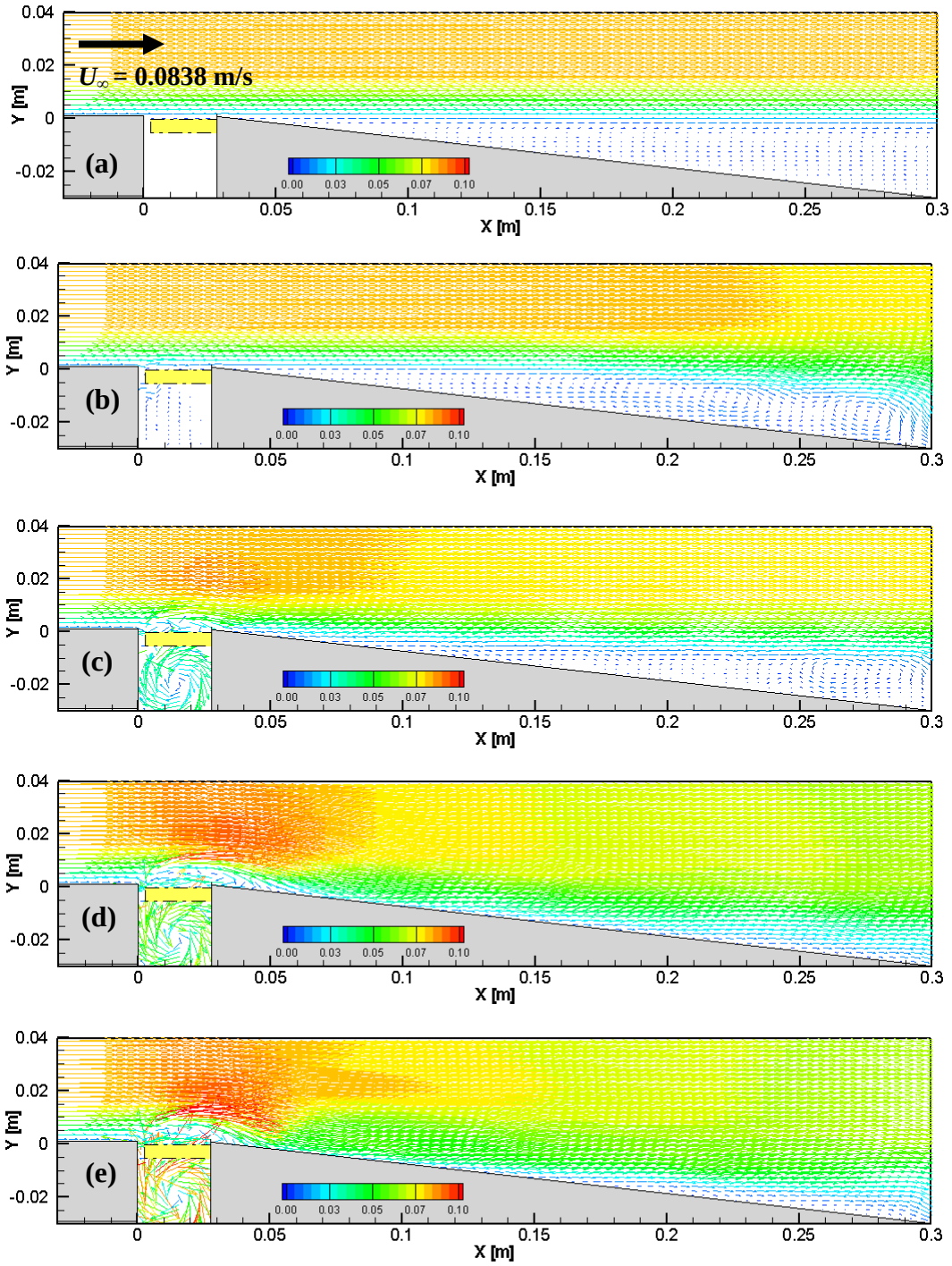
Bir kanat üzerinde direnç kuvvetlerinin etkisini azaltmak için, sınır tabakanın mümkün olduğunca laminer tutulması ve cidar kayma gerilmesinin düşürülmesi gereklidir. Akış yönünde basıncın artmaya başlaması halinde türbülanslı sınır tabaka tercih edilir, çünkü akım yönüne dik momentum transferi ile akış ayrılması riski azalmaktadır. Ancak laminerdan türbülanslı bölgeye geçişte laminer ayrılma baloncukları oluşmaktadır. Pozitif basınç gradyeni etkisi altında laminer sınır tabakanın yavaşlamaya başladığı bölgede ayrılma başgösterir. Bunun sonucunda geçiş bölgesinde ayrılan kayma tabakası meydana gelir (Lang, 2004).

Laminer sınır tabaka, türbülanslı sınır tabakanın aksine yetersiz momentum transportu nedeniyle akış içerisinde çok az bir basınç artışını yenebilir, dolayısıyla ayrılma eğilimindedir. Özellikle düz levha üzerindeki düşük Reynolds sayılı (Re_x < 500000) sınır tabaka akışlarında sınır tabaka öyle kararlıdır ki, basınç artışı durumunda türbülanslı bölgeye geçiş süreci laminer ayrılma ile gerçekleşir. Hava taşıtlarındaki performans kanatlar üzerinde oluşan laminer ayrılma baloncuklarından etkilendiği için küçük ve yavaş taşıtlarda sınır tabaka ayrılmasının büyük problem yarattığı bilinmektedir.

Oldukça yüksek basınç artışında laminer sınır tabaka ayrılmasında cidar yakınında geçiş bölgesinden önce ters akış meydana gelebilir. Bu esnada yavaşlayan akış içerisinde en yüksek kayma gerilmesi bir başka deyişle maksimum vorteks etkisi olan cidara yakın tabaka şiddetle levhadan uzaklaşarak sınır tabaka hız profilinde bir dönüm noktası oluşturur (Lang, 2004).

Bu bağlamda eğik düzlem üzerinde incelenen akışlarda daha önce araştırılan akışlarda pek gözlemlenmeyen bir durum sözkonusudur, lakin sınır tabaka hız profilleri akış ayrılması içerebilmektedir. Bu durumu incelemek için önce 6º eğimli bir rampa üzerinde daha sonra 3º eğimli bir rampa ile düz devam eden levhadan meydana gelen bir profil kullanılarak farklı frekanslarda akış davranışları

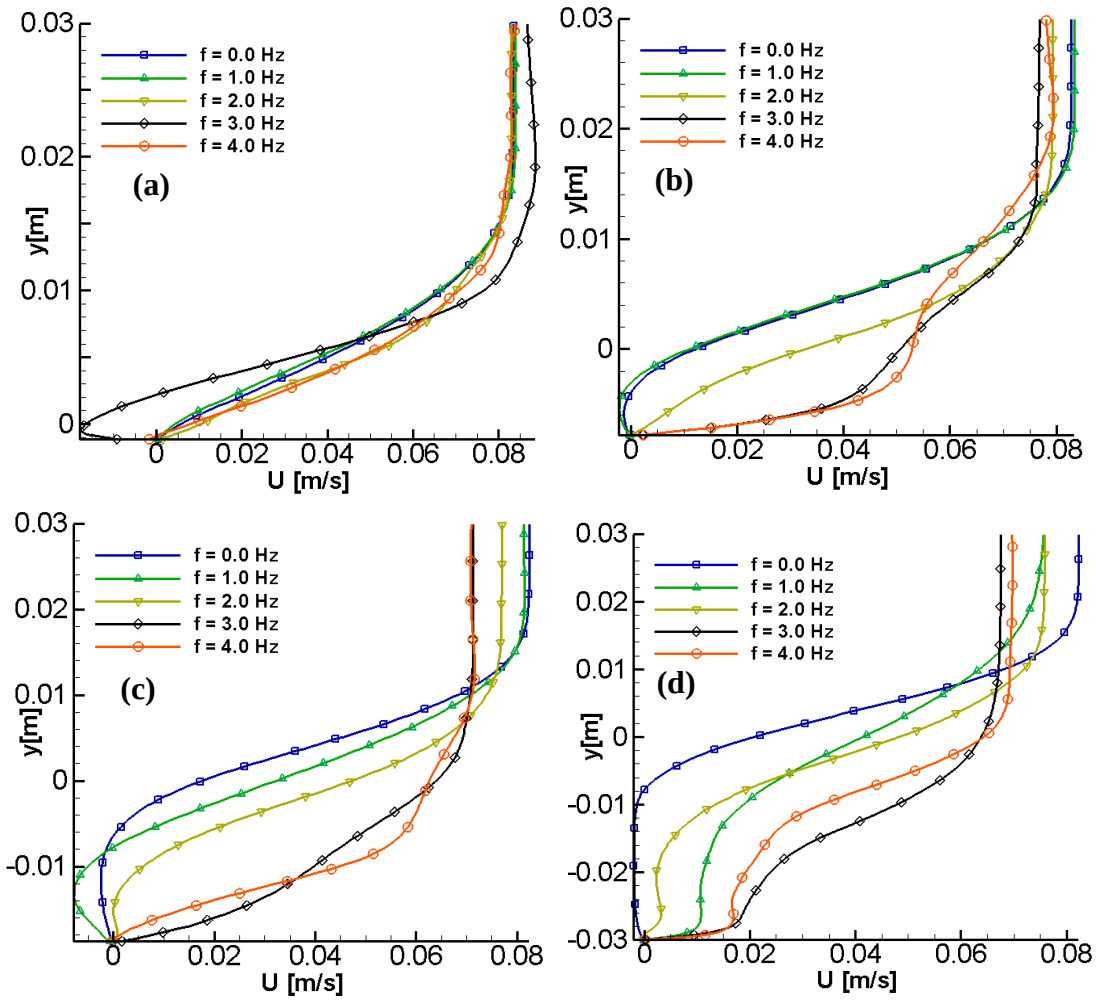
araştırılmıştır. Şekil 5.21'de a = 1 mm, b = 25 mm JaVA parametreleri ile II plaka konumu seçilmesi halinde 6º eğimli bir rampa üzerindeki zaman ortalamalı hız alanları verilmiştir.



Şekil 5.21 : Eğik düzlem üzerinde zaman ortalamalı akış alanları [m/s]: (a) f = 0 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz, (d) f = 3 Hz, (e) f = 4 Hz.

Rampada yapılan sayısal modellemelerde rampadan dolayı oluşacak basınç gradyeni nedeniyle çıkış sınır koşulu basınç çıkışı olarak değiştirilmiştir. Daha önce hız

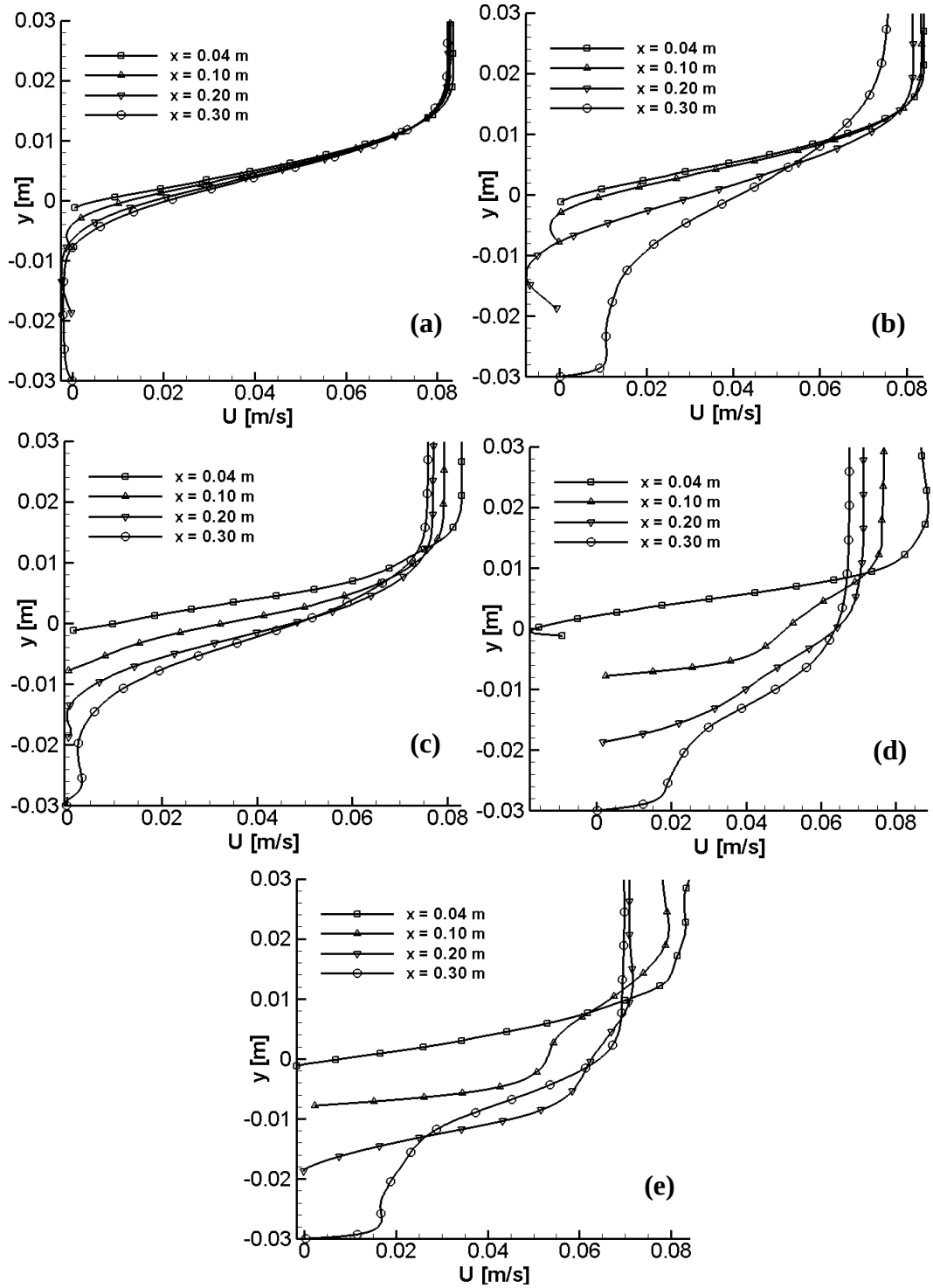
profillerinin alındığı kesitlerde hız profilleri incelenmiş ve rampa üzerinde JaVA'nın akışı daha farklı etkilediği görülmüştür. Kanal kesit alanı arttığı için yüksek frekanslarda çıkışa doğru hız azalmaktadır. JaVA'nın çalışmadığı durum da dahil düşük frekanslarda düzlem üzerinde boşluk oluşmaktadır ve kesit düz levha kullanıldığı hallerdeki gibi değişmemektedir. Ancak yüksek frekanslarda düzlem üzerinde hareket vardır ve hız rampa üzerinde JaVA'ya yakın mesafeden uzaklaştıkça azalmaktadır. Şekil 5.22'de farklı kesitlerdeki hız profilleri gösterilmiştir.



Şekil 5.22 : Eğik düzlem üzerinde ortalama sınır tabaka hız profilleri: (a) x = 0.04 m, (b) x = 0.1 m, (c) x = 0.2 m, (d) x = 0.3 m.

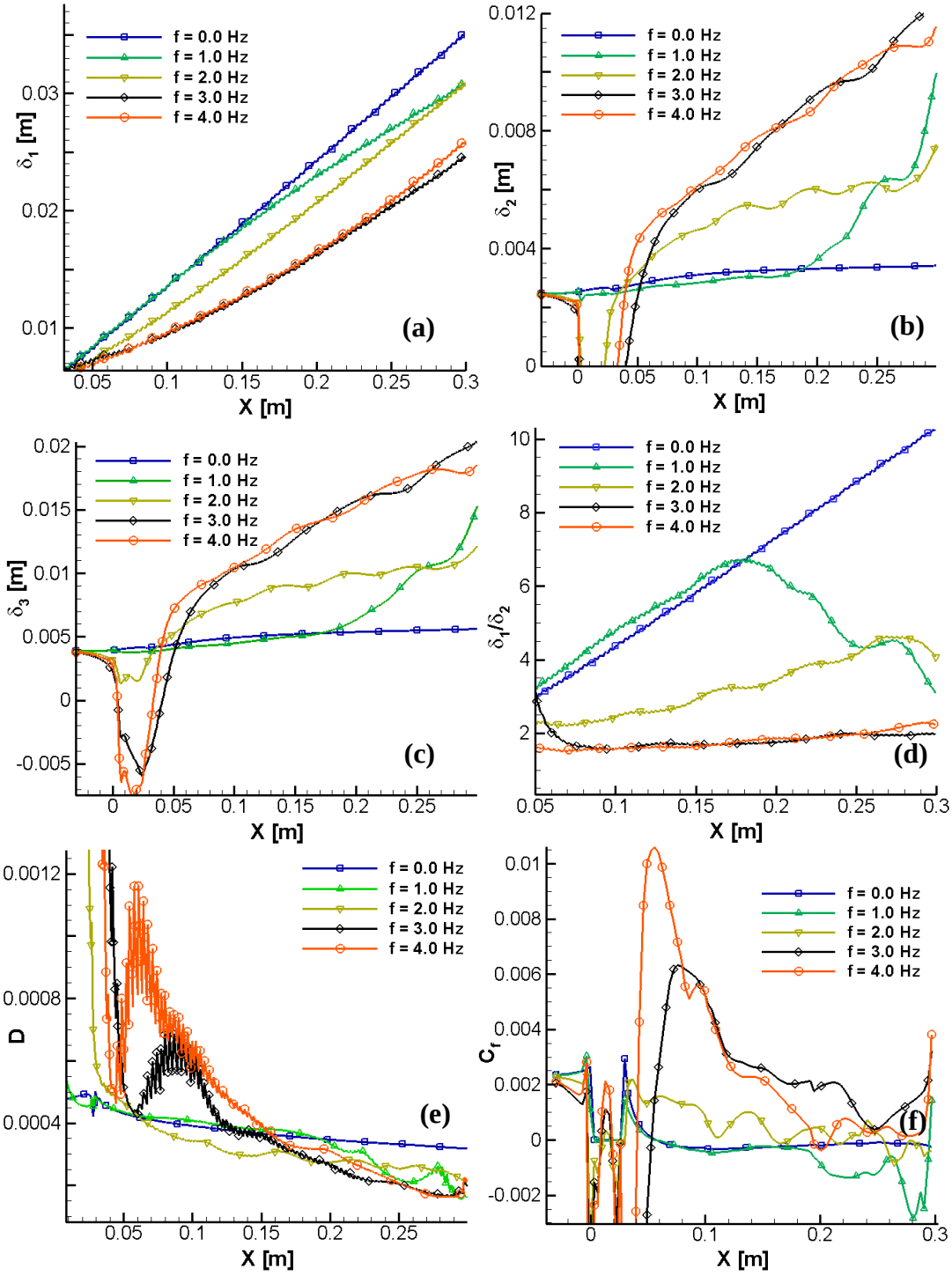
Şekil 5.22'de görüldüğü üzere çıkışa doğru ilerledikçe sınır tabaka hız profilinde önemli ölçüde değişiklikler göze çarpmaktadır. JaVA yakınında x = 0.04 m'den alınan hız kesitlerinde sadece f = 3 Hz'de hız profilinde negatif yönde değişim görülmektedir. Şekil 5.22(d)'de kanal kesidinin maksimum olduğu yerde rampa yüzeyinde frekans arttıkça hız profili iyileşmektedir, ancak hesaplama ağının pozitif

bölgesinde hız profilleri arasındaki sıralama değişmekte ve kanal kesidinin artmasından dolayı yüksek frekanslarda hız değerleri azalmaktadır. Bu örnekte ele alınan kesitlerdeki hız profillerini sabit frekansta karşılaştırmak ilginç bir yaklaşım olabilir, dolayısıyla Şekil 5.23'de JaVA'nın çalıştırılmadığı ve çalıştığı durumlarda ilgili kesitlere ait hız değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 5.23 : Eğik düzlem üzerinde sabit frekansta ortalama sınır tabaka hız profilleri: (a) f = 0 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz, (d) f = 3 Hz, (e) f = 4 Hz.

Rampa üzerinde oluşan sınır tabaka-JaVA etkileşiminde sınır tabaka karakteristikleri incelendiğinde Şekil 5.24'de gösterilmiştir.



Şekil 5.24 : 6º derece eğimli rampa üzerindeki akışta ortalama sınır tabaka karakteristikleri: (a) öteleme kalınlığı, (b) mometum kalınlığı, (c) enerji kalınlığı, (d) biçim katsayısı, (e) toplam disipasyon, (f) sürtünme katsayısı.

Rampa üzerindeki akışın aktif kontolü ile sınır tabaka karakteristikleri daha önce incelenen akışlardaki değişimlere benzer şekilde değişmektedir. Artan frekansla

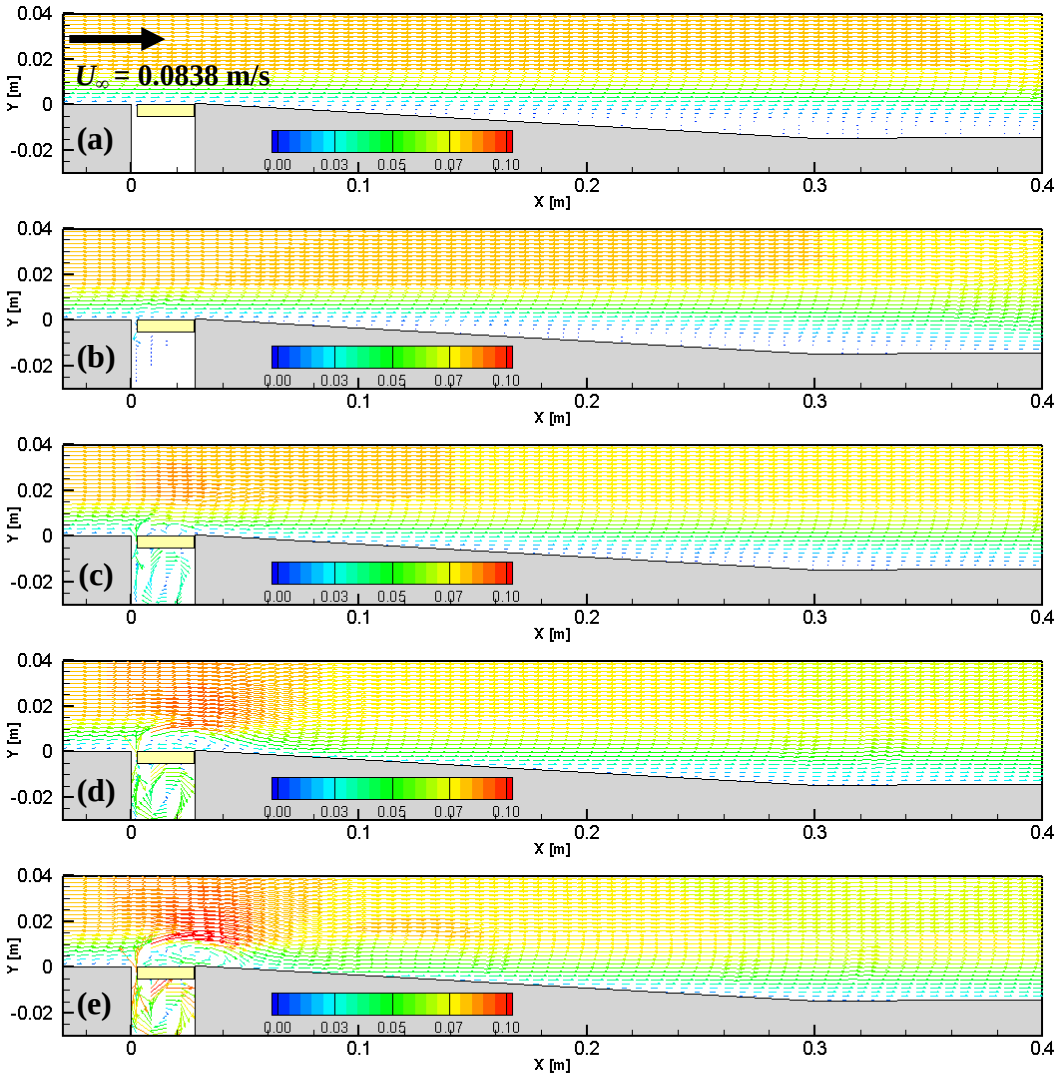
azalan öteleme kalınlığı ve biçim katsayısı ve artan sürtünme katsayısı diğer sayısal modellemelerde elde edilen sonuçlarla uyuşmaktadır. Düz levha üzerindeki sınır tabaka için sürtünme katsayısının teorik formülasyonu denklem **(5.8)**'deki gibidir. Burada U_∞ = 0.0838 m/s'lik serbest akım hızı ve geniş aralığa kadar olan x = 1.83 m'lik mesafe kullanıldığı takdirde, sürtünme katsayısı yaklaşık 0.0017 bulunur ki, bu değer Şekil 5.24(f)'deki sürtünme katsayısının değişimi ile uyumludur.

Az bir basınç gradyeni dahi laminer sınır tabakanın kararlılığını etkiler, dolayısıyla daha önce sayısal modellemeleri yapılmış düz levha akışlarında mümkün olduğunca basınç gradyeni olmayan bir Blasius benzeri sınır tabakası elde edilmeye çalışılmıştır. Ancak sayısal hesaplama ağında yapılan bazı konstrüktif değişiklikler ile yani yere paralel düz levhanın rampa haline getirilmesi ve dolayısıyla çıkış kesidinin artması ile oluşan az bir basınç gradyeni sınır tabakasında ve karakteristiklerinde Şekil 5.22 ve 5.24'de gözlemlenen değişimleri doğurmuştur.

5.7 Eğik Düzlem ve Müteakip Düz Levhada Sayısal Modelleme

Eğik düzlem üzerindeki sınır tabakanın aktif kontrolü ile değişik kesitlerde incelenen hız profilleri ve sınır tabaka karakteristikleri, düz levha üzerinde elde edilen sonuçlara göre aktif akış kontrolünü daha net bir şekilde ortaya koymuştur.

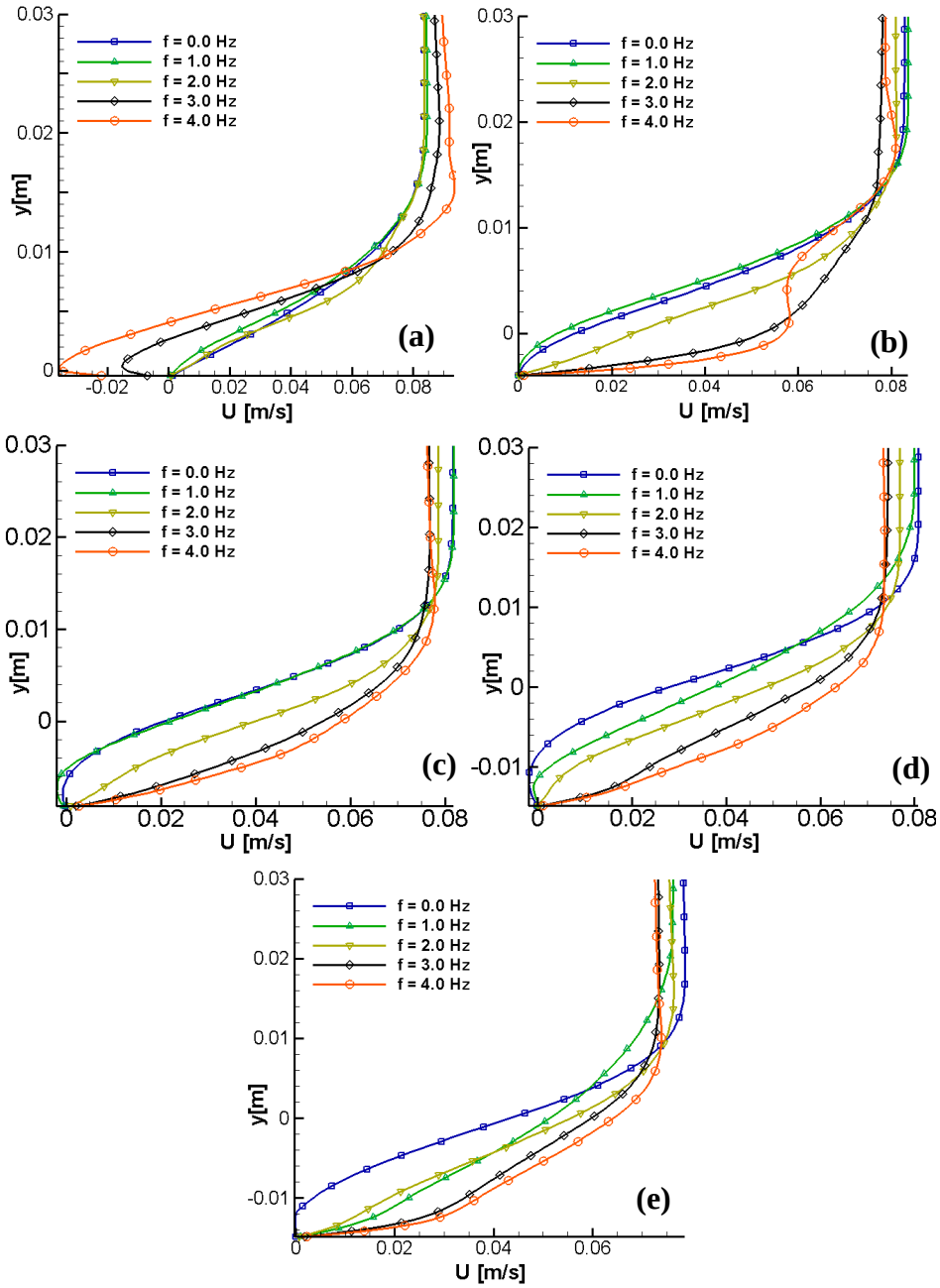
Bölüm 5.6'daki örneğin parametrelerini kullanmak suretiyle rampa eğimini biraz daha azaltarak 3º'ye indirmek ve bu rampayı müteakip düz bir levha koymak hem rampanın hem de düz levhanın sınır tabaka üzerindeki etkisini anlamak açısından düşünülmüş bir yaklaşımdır. Bu hesaplama ağında eğik düzlem x = 0.3 m'de sonlanmaktadır ve bunu x = 0.4 m'ye kadar düz bir levha takip etmektedir, dolayısıyla çıkış basıncı sınır koşulu x = 0.4 m'de verilmiştir. Bölüm 5.6'da incelenen örnekteki çalışma parametreleri ile yapılan sayısal modellemelerin ortalama akışları Şekil 5.25'de gösterilmiştir. Şekil 5.25 ile Şekil 5.21'deki farklı eğimlerdeki ortalama akışlar karşılaştırılırsa, sınır tabakaların her iki hesaplama ağında farklı olduğu göze çarpacaktır. Eğimin daha fazla olduğu rampada aktüatör frekansı arttıkça levha üzerinde özellikle çıkışa doğru etkisini arttıran vorteks yapısı göze çarpmaktadır, halbuki eğimi daha az olan rampa ve bunu takip eden düz levha üzerinde gelişen ortalama akış alanlarında vorteks yapıları görülmemekte tam tersine sınır tabaka hız profilleri belirginleşmektedir. Bunun sonucunda hız profilleri de değişecektir.



Şekil 5.25 : Eğik düzlem ve müteakip düz levha üzerinde zaman ortalamalı akış alanları [m/s]: (a) f = 0 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz, (d) f = 3 Hz, (e) f = 4 Hz.

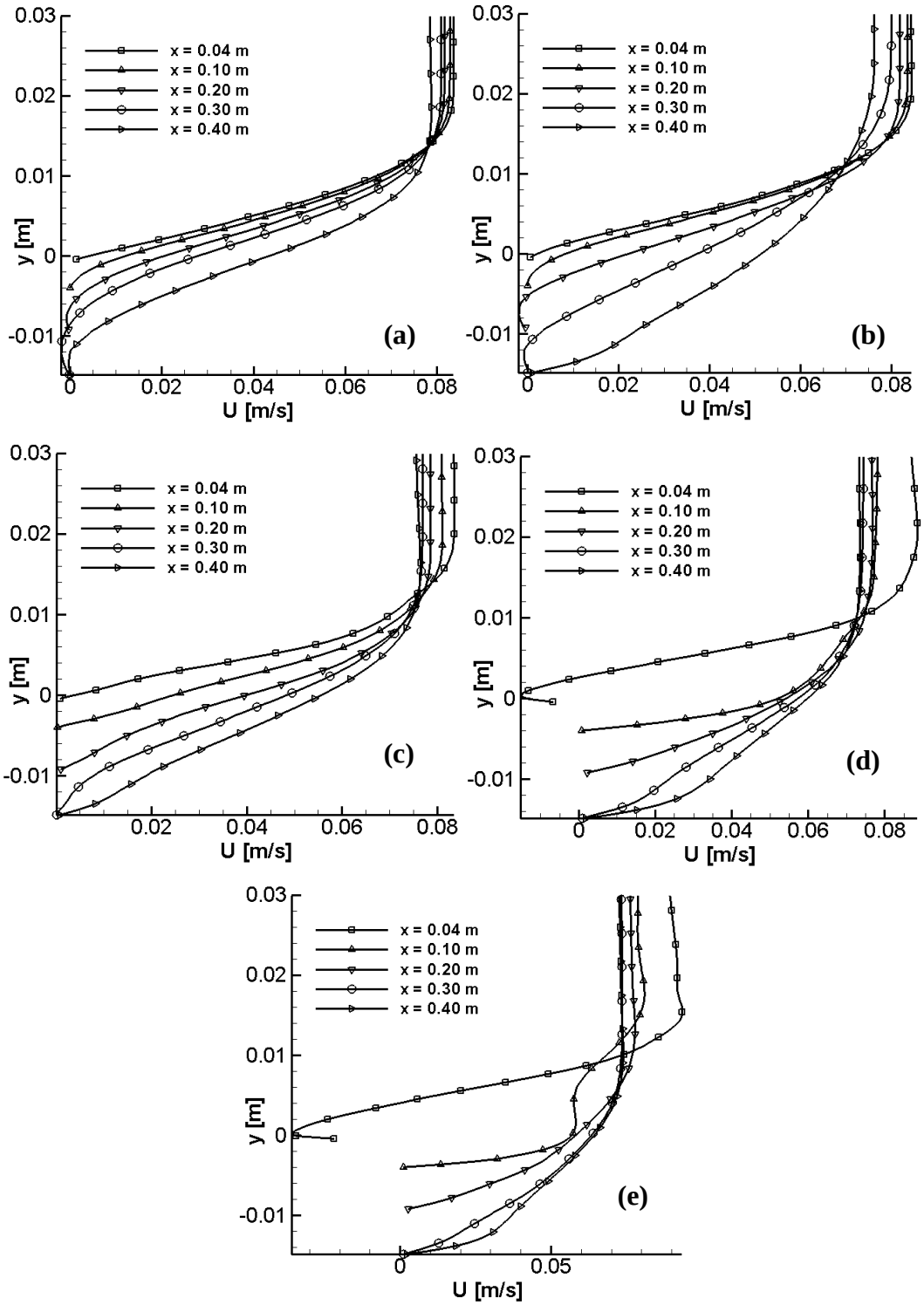
Daha önceki örnekte incelendiği gibi, farklı frekanslarda ve farklı akış kesitlerinde hız profilleri değişimi JaVA'nın durgun halinde ve aktüasyon sırasında sınır tabakayı nasıl etkilediğini göstermektedir. Şekil 5.26'da değişik frekanslarda beş farklı kesitte ortalama hız profilleri gösterilmiştir. JaVA'nın yakınında yani x = 0.04 m'de yüksek çalışma frekanslarında akış ayrılmasını ifade eden bir hız profili sözkonusudur (bkz. Şekil 5.26(a)). Ters akış içeren bu hız profili eğrisi dönüm noktası öncesinde negatif hız değerlerinde seyretmektedir ve bu noktadan sonra pozitif bölgeye geçmektedir. JaVA'dan uzaklaştıkça örneğin x = 0.1 m'de aktif akış kontrolü etkisiyle yüksek frekanslardaki hız profilleri iyileşmektedir ve ters akış ortadan kalkmaktadır. JaVA'dan daha da uzak kesitlerde yüksek frekanslarda elde edilen ortalama hız profillerinde çarpıcı bir değişim gözlemlenmezken, düşük çalışma frekanslarında

yine ters akış meydana gelmektedir. Dolayısıyla Şekil 5.26 (d) ve (e)'de görüldüğü gibi sınır tabakada aktüatörden uzaklaştıkça yüksek frekanslarda akış kontolü daha etkin bir şekilde gerçekleşmektedir.



Şekil 5.26 : Eğik düzlem ve müteakip düz levha üzerinde ortalama sınır tabaka hız profilleri: (a) x = 0.04 m, (b) x = 0.1 m, (c) x = 0.2 m, (d) x = 0.3 m, (e) x =0.4m.

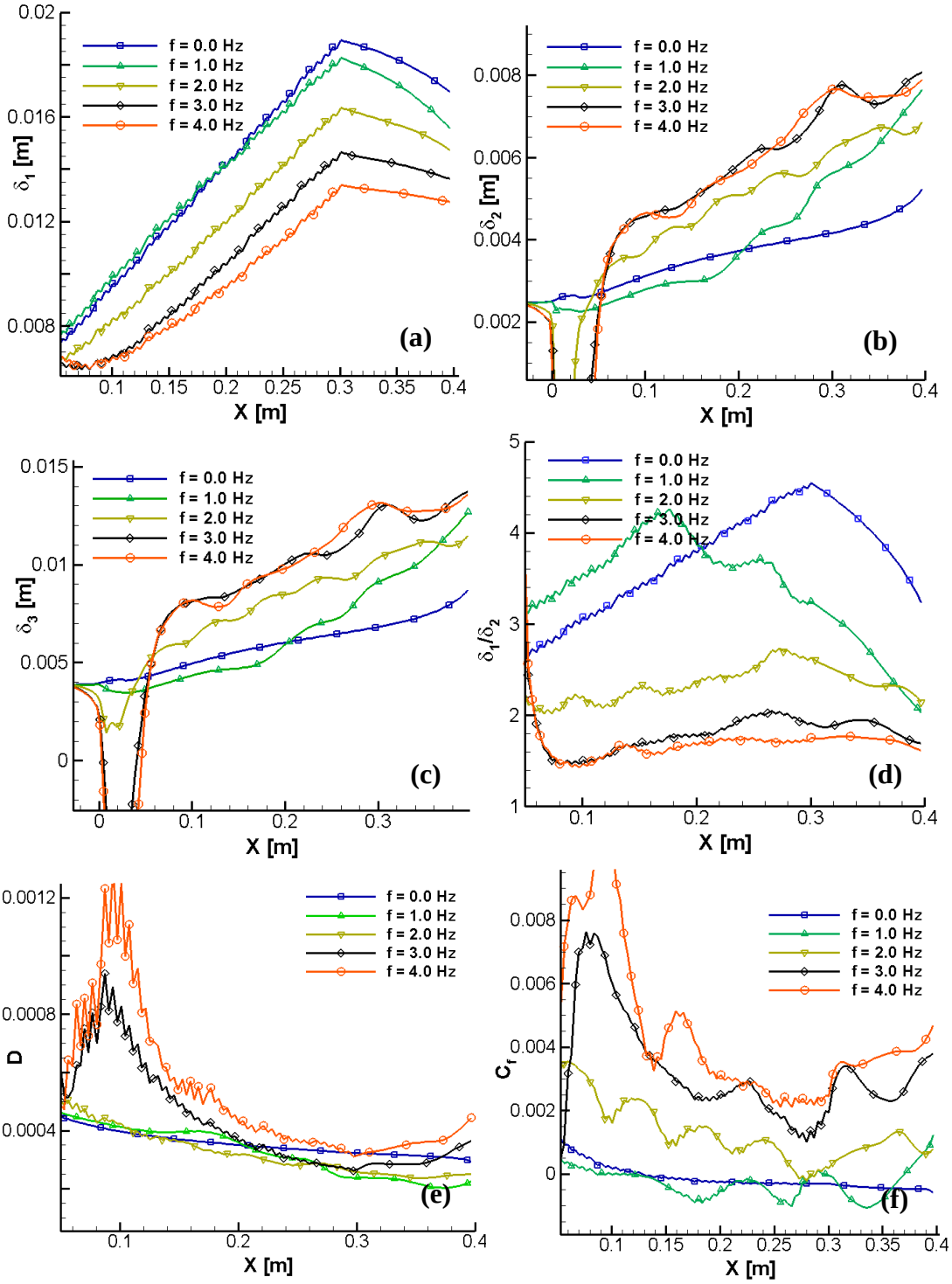
Şekil 5.27'de JaVA'dan olan uzaklığa göre hız profillerindeki değişim daha açık görülmektedir.



Şekil 5.27 : Eğik düzlem ve müteakip düz levha üzerinde sabit frekansta ortalama sınır tabaka hız profilleri: (a) f = 0 Hz, (b) f = 1 Hz, (c) f = 2 Hz, (d) f = 3 Hz, (e) f = 4 Hz.

Şekil 5.27 (d) ve (e)'de x = 0.04 m'de akış dönüşü olan hız profili JaVA'dan uzaklaştıkça iyileşmekte ve bu kesitteki akış ayrılması JaVA'nın kazandırdığı

momentum ile önlenmektedir. Anlık vortisite alanları f = 2 Hz için Ek A, Şekil A6 ve Şekil A7'de f = 4 Hz için Ek A, Şekil A8 ve Şekil A9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.28 : 3º derece eğimli rampa ve müteakip düz levha üzerindeki akışta ortalama sınır tabaka karakteristikleri: (a) öteleme kalınlığı, (b) mometum kalınlığı, (c) enerji kalınlığı, (d) biçim katsayısı, (e) toplam disipasyon, (f) sürtünme katsayısı.

Sonuç olarak JaVA hafif eğimli bir düzlem üzerinde kullanılırsa akış ayrılmasının önüne geçen bir düzenek olarak karşımıza çıkmaktadır (bkz. Şekil 5.26). Rampa üzerindeki akışta Reynolds sayısının daha düşük olduğu JaVA yakınında laminer sınır tabaka ayrılma eğilimindedir, ancak JaVA'dan uzaklaştıkça bu ortadan kalkmaktadır (bkz. Şekil 5.27).

Modifiye edilmiş sayısal hesaplama ağında diğer sınır tabaka karakteristikleri Şekil 5.28'de gösterilmiştir. Grafikler Şekil 5.24'dekilere benzemektedir. Farklı çalışma koşullarına ait öteleme kalınlığı grafikleri rampa boyunca sanki-doğrusal artan bir karakter sergilemektedir. Öte yandan rampayı müteakip düz levha üzerinde ise sıralamada bir değişiklik olmaksızın grafikler negatif bir eğim kazanmaktadır. Şekil 5.28 (b) ve (c)'de görüldüğü gibi JaVA'nın etkisiyle artan frekansla momentum ve enerji kalınlıkları da artmaktadır. Şekil 5.28 (f)'de sürtünme katsayısının değişimi de beklendiği gibidir. JaVA'ya yakın mesafelerde özellikle o bölgedeki yerel Reynolds sayısının da düşük olmasından dolayı akış yavaştır ve hız profillerinde görüldüğü gibi ters akış meydana gelmektedir. Bu esnada hız negatif yönde artmakta, dönüm noktasında sıfır olmakta ve sonra pozitif yönde değişmektedir. Bu durum o bölgede cidar kayma gerilmesinin kaybolmasına ve akış ayrılmasına neden olmaktadır. Ancak JaVA'nın devreye girmesiyle akış ayrılmasının önüne geçilerek yokolan sürtünme katsayısı yeniden tesis edilmektedir ve aktif akış kontolü sağlanmaktadır.

5.8 Sayısal Modellemelerden Yapılacak Çıkarımlar

JaVA-sınır tabaka etkileşimi (A) ve (B) tipi montajlarda ve iki farklı eğimi olan rampa üzerinde incelenmiştir. Sayısal modellemeler sonucu elde edilen sınır tabaka hız profilleri karşılaştırılarak bazı çıkarımlar yapmak mümkündür. Aynı çalışma koşullarında sadece bir parametrenin, JaVA-sınır tabakası etkileşimi üzerindeki etkisini ortaya koymak açısından yapılan karşılaştırmalarda JaVA ile ilgili yöneten boyutsuz parametrelerin etkisi (Reynolds sayısı, ölçeklendirilmiş genlik) ve serbest akım hızı ile sınır tabaka kalınlığının etkileri incelenmiştir.

5.8.1 Boyutsuz ölçeklendirilmiş genliğin etkisi

Boyutsuz ölçeklendirilmiş genliğin akış üzerindeki etkisini araştırmak için $S_a = 2\pi a/b$ tanımından yola çıkarak plaka genişliğini sabit tutup, disk genliğini değiştirmek yeterli olacaktır. Ancak birbiriyle karşılaştırılması gereken rejimlerde jet Reynolds

sayısının ($Re_J = 4abf/\nu$) ve bununla ilintili olan $\boldsymbol{r}$ oranının ($\boldsymbol{r} = 4abf/w_w U_\infty$) sabit tutulması incelenen parametre sayısını sınırlandırmada kolaylık sağlayacaktır. Bu şekilde diğer çalışma koşullarını sabit tutmak kaydıyla, sınır tabakanın hangi genliğin oluşturduğu akış rejimi tarafından daha etkin bir şekilde kontrol edildiğini anlamak mümkün olacaktır.

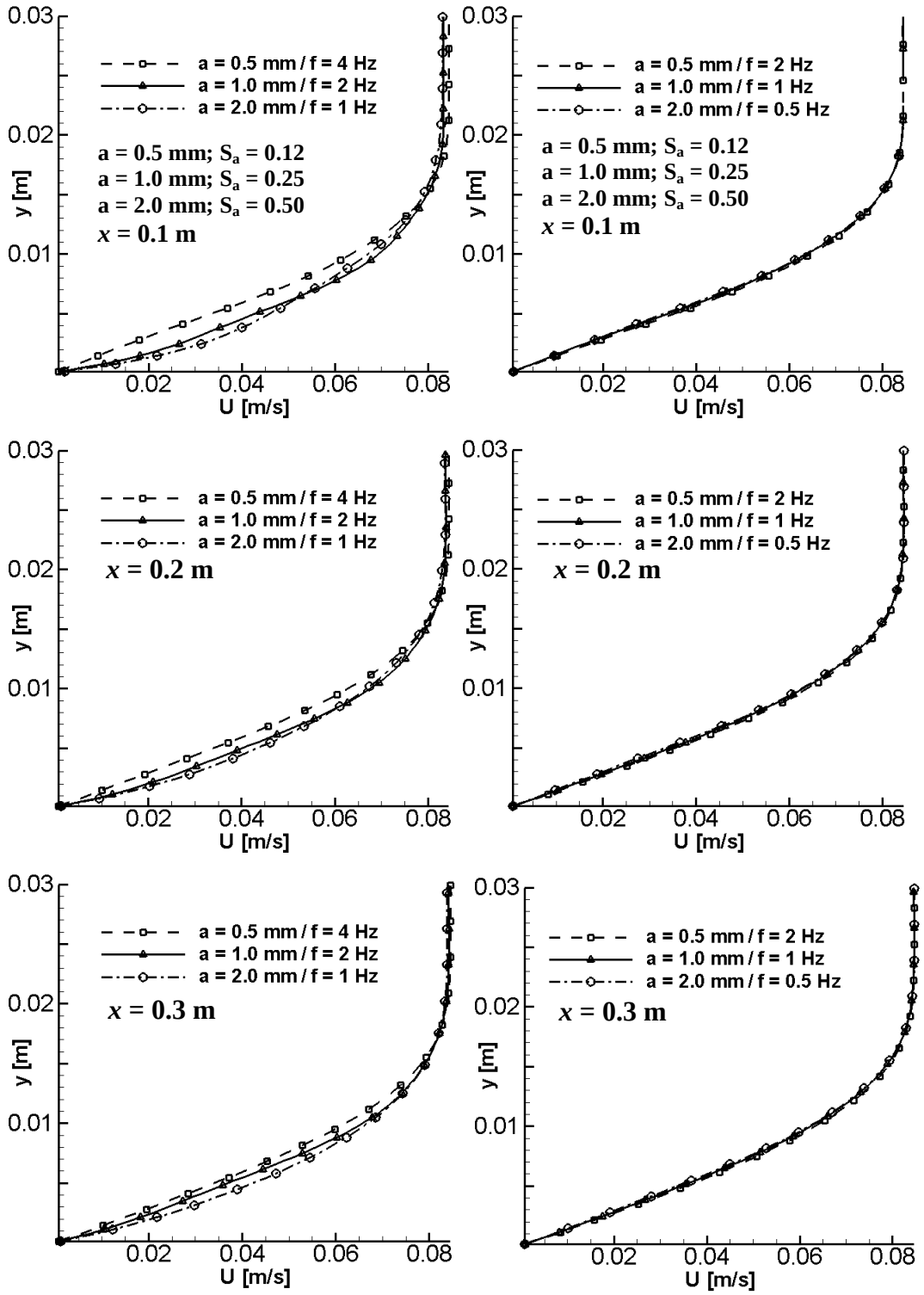
Jet Reynolds sayısını ve $\boldsymbol{r}$ oranını aynı plaka genişliğinde ve serbest akım hızında (U_∞ = 0.0838 m/s) sabit tutmak için disk genliğinin ve çalışma frekansının çarpımının sabit olması, sadece boyutsuz ölçeklendirilmiş genliğin etkisini ortaya çıkarmak açısından faydalı bir yaklaşım olacaktır. Bu bağlamda II plaka konumunda ve (A) tipi konfigürasyonda disk genliğinin a = 0.5 mm ile çalışma frekansının f = 4 Hz; genliğin a = 1 mm ile çalışma frekansının f = 2 Hz ve de genliğin a = 2 mm ile çalışma frekansının f = 1 Hz olması durumunda zaman ortalaması alınmış akış alanı içerisinde aktüatör sonrasında x = 0.1 m, 0.2 m ve 0.3 m'ye karşılık gelen kesitlerde ortalama hız profilleri alınmış ve karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Benzer karşılaştırma aynı disk genliklerini kullanarak frekans değerlerinin yarısını almak suretiyle yapılmıştır.

Şekil 5.29'da bu karşılaştırmalar görülmektedir. Bir periyodun yarısı emme ve diğer yarısı basma fazlarını içerdiği için etkin genlik, disk genliği "a", düşeyde katedilen mesafe 2a'dır. Şekil 5.29'un sol sütununda elde edilen ortalama hız profilleri boyutsuz ölçeklendirilmiş genlik değeri arttıkça iyileşmektedir. Dolayısıyla aynı jet Reynolds sayısını veren akış rejimleri arasındaki karşılaştırmaya göre yüksek disk genliği ve düşük frekans ile oluşturulan jet akışı sınır tabaka içerisinde daha düşük disk genliği ve yüksek frekans ile elde edilen eşdeğer parametre kombinasyonuna göre daha iyi sonuç vermektedir.

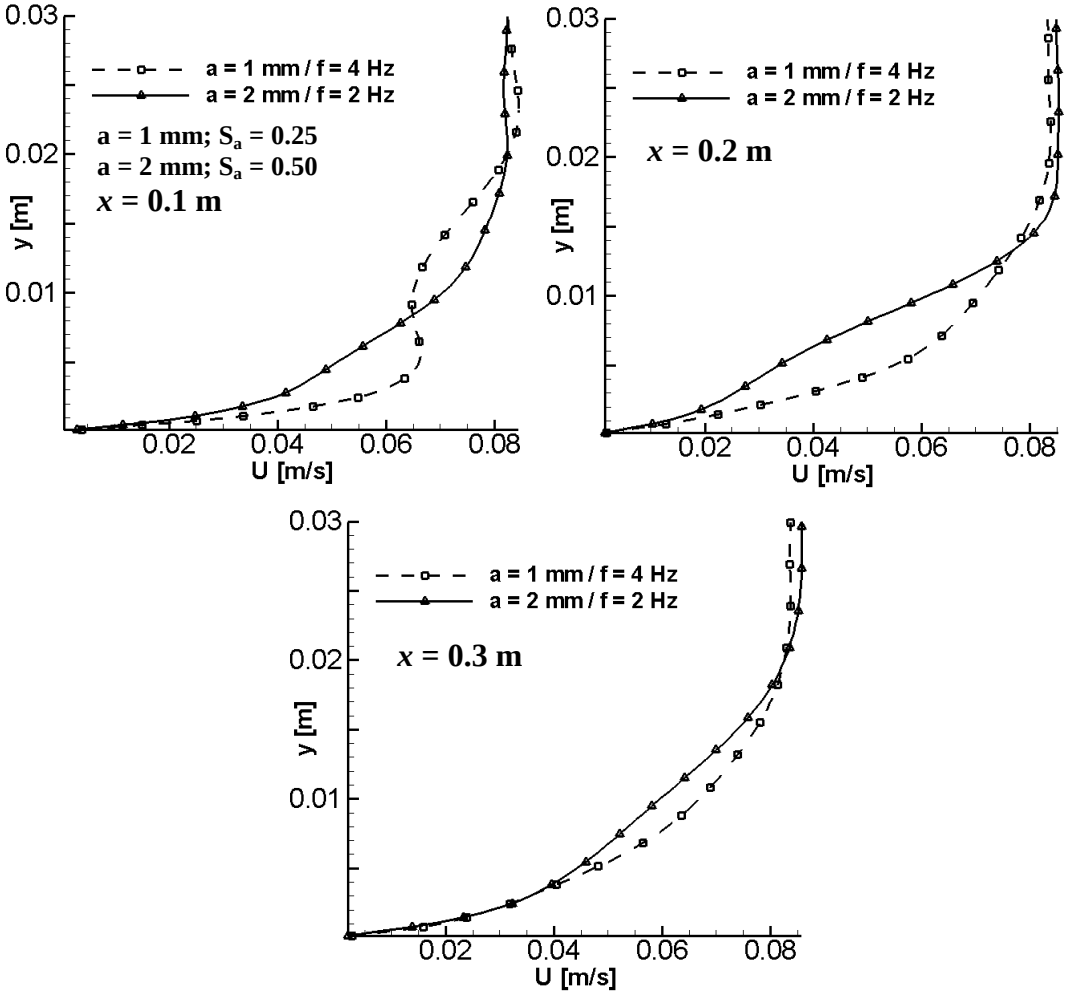
Bu genelleme Şekil 5.29 sağ sütunda verilen grafiklerde geçerli değildir, nitekim frekans değerleri yarıya indirildiğinde aktif kontrol edilen sınır tabaka hız profilleri içerisinde bir değişim gözlemlenmemektedir, sınır tabaka hız profilleri her üç durumda da birbirine yakındır.

Şekil 5.30'da a = 1 mm ile çalışma frekansının f = 4 Hz; genliğin a = 2 mm ile çalışma frekansının f = 2 Hz olması halinde üç farklı kesitte hız profilleri incelenmiştir. İki eşdeğer parametre kombinasyonu kendi içinde değerlendirildiğinde frekans, disk genliğinden daha etkili bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sonuç itibariyle düşük sabit ***r*** oranında elde edilen ortalama hız profilleri arasında hiçbir fark göze çarpmazken, bu oranın iki katına çıktığında yüksek disk genliği hız profilini iyileştirmektedir, dört katına çıkması halinde ise yüksek frekans ön plana çıkan bir parametre olmaktadır.



Şekil 5.29 : Ortalama sınır tabaka hız profillerinin boyutsuz genlik ile değişimi. Sol sütun: Re_J = 200, ***r*** = 0.96; sağ sütun: Re_J = 100, ***r*** = 0.48.

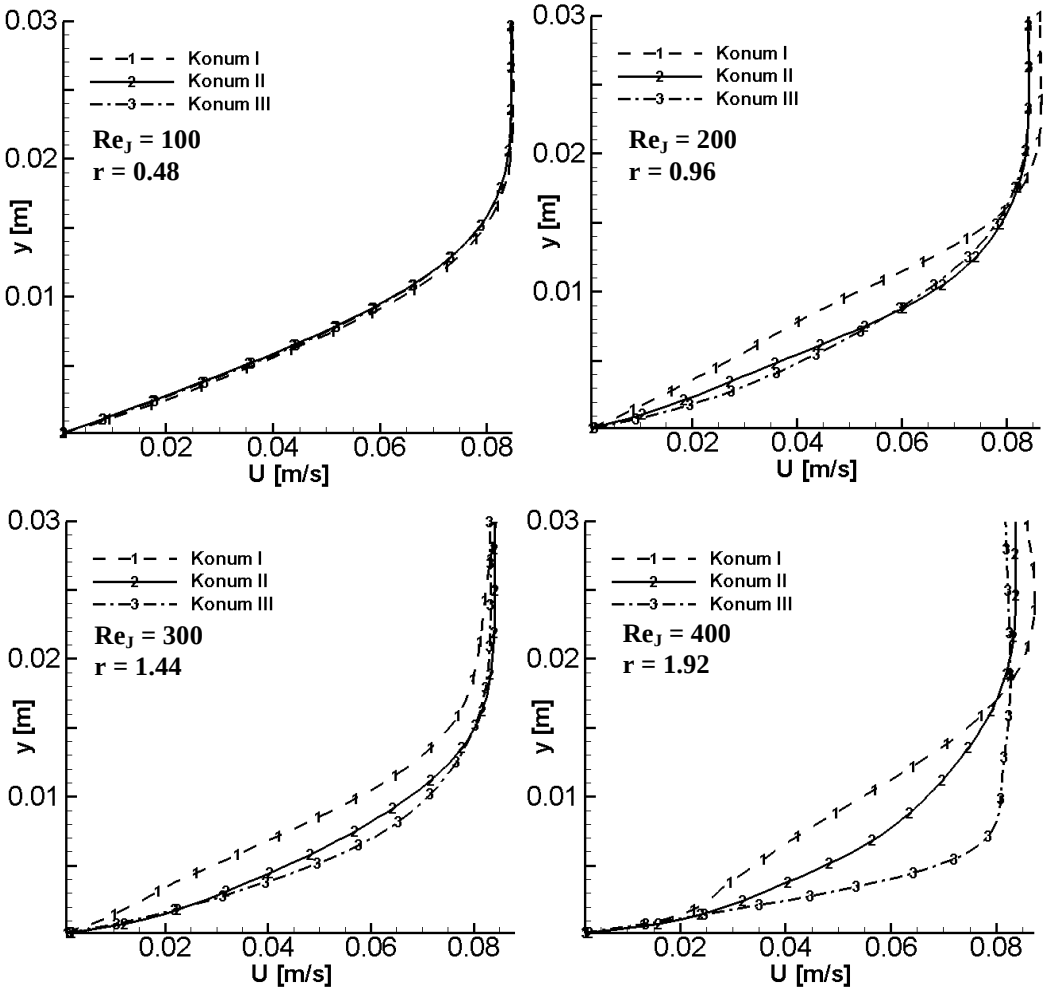


Şekil 5.30 : Ortalama sınır tabaka hız profillerinin boyutsuz genlik ile değişimi; Re_J = 400, $\boldsymbol{r}$ = 1.92.

5.8.2 Plaka konumunun etkisi

Plakanın harekete başlamadan önceki sıfır konumunun gövde dışında (I), gövde ile aynı hizada (II) ve gövde içinde olması (III) durumları (A) tipi konfigürasyonda disk genliği a = 1 mm, plaka genişliği b = 25 mm ve kanal serbest akış hızının U_∞ = 0.0838 m/s alınması ile dört farklı çalışma frekansında (kendi içinde dört farklı sabit jet Reynolds sayısında) ortalama hız alanında x = 0.3 m'den alınan hız profilleri ile incelenmiştir. Hız değerlerinin hesaplama ağı içerisinde çıkış kesidinden alınmasının nedeni bu kesitteki hız profillerinin ters akış içermemesidir bir başka ifadeyle akış ayrılmasının kontrol altına alındığının bilinebileceği JaVA'ya en uzak kesit olmasıdır.

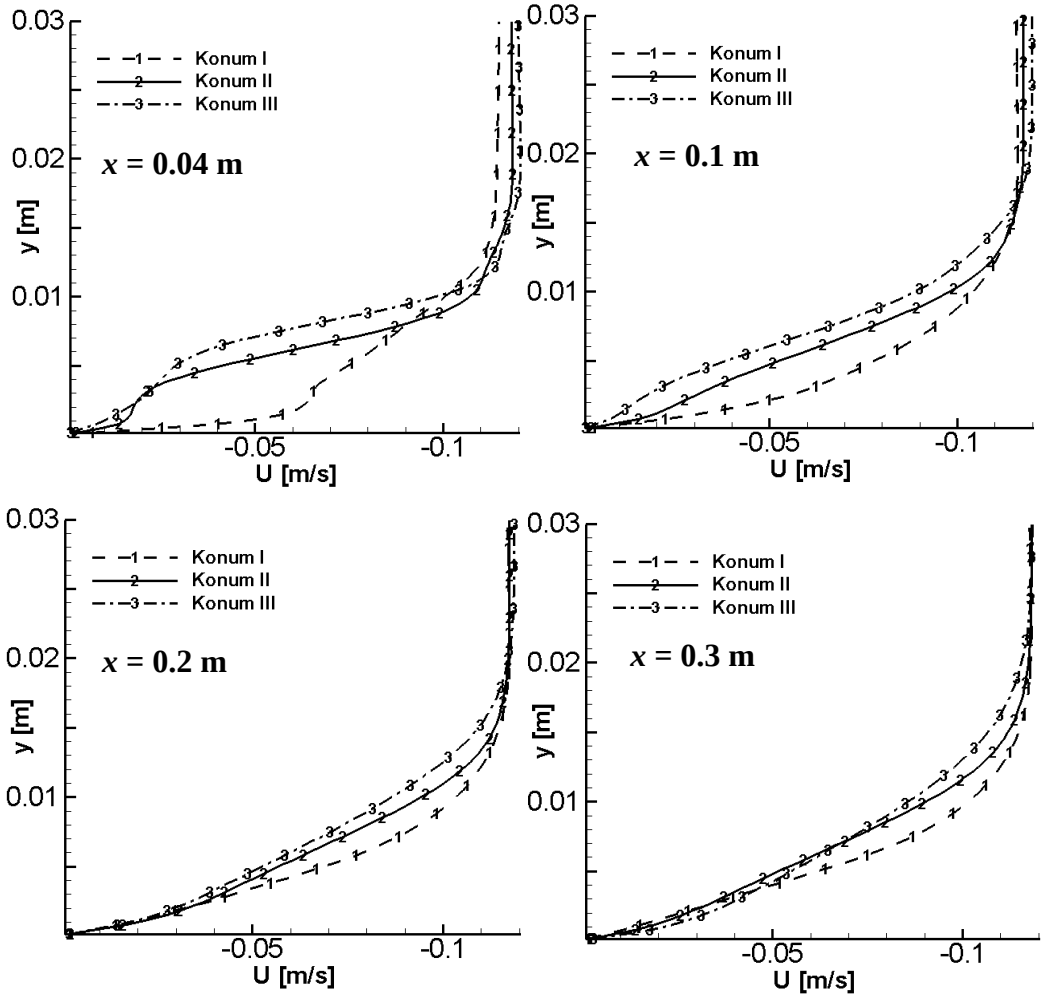
Şekil 5.31'de görüldüğü üzere plakanın bağıl konumunun gövde içinde kalması durumunda yani III plaka konumunda yüksek frekansta veya jet Reynolds sayısında daha da belirginleşmekte olan bir iyileşme göze çarpmaktadır.



Şekil 5.31 : (A) tipi konfigürasyonda JaVA'dan 0.3 m ötede ortalama sınır tabaka hız profillerinin bağıl plaka konumu ile değişimi; S_a = 0.25.

Şekil 5.31'de (A) tipi konfigürasyonda sayısal hesaplama ağının çıkış kesidinde dört farklı frekansta ya da ***r*** oranında aktüatör plaka konumunun hız profili üzerindeki etkisi üzerinde durulmuştur. Sonuçta ***r*** = 1.92'de yani f = 4 Hz'lik çalışma koşulunda konumun akışa etkisi çok rahat bir şekilde yorumlanabilir.

Benzer şekilde (B) tipi konfigürasyonda serbest akım hızının U_∞ = 0.117 m/s alınmasıyla f = 4 Hz'de JaVA yakınında ve ötesinde dört farklı kesitte sınır tabaka hız profillerinin değişimi incelenmiş ve Şekil 5.32'de gösterilmiştir. Şekil 5.32'den anlaşılacağı üzere (B) tipi montajda I plaka konumu diğer plaka konumlarına göre JaVA yakınındaki ve ötesindeki kesitlerde daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu bağlamda akış üzerinde çalışma koşullarının sabit tutulduğu ancak montaj tipinin değiştirildiği durumlarda oluşan akış rejimlerini araştırmakta fayda vardır.

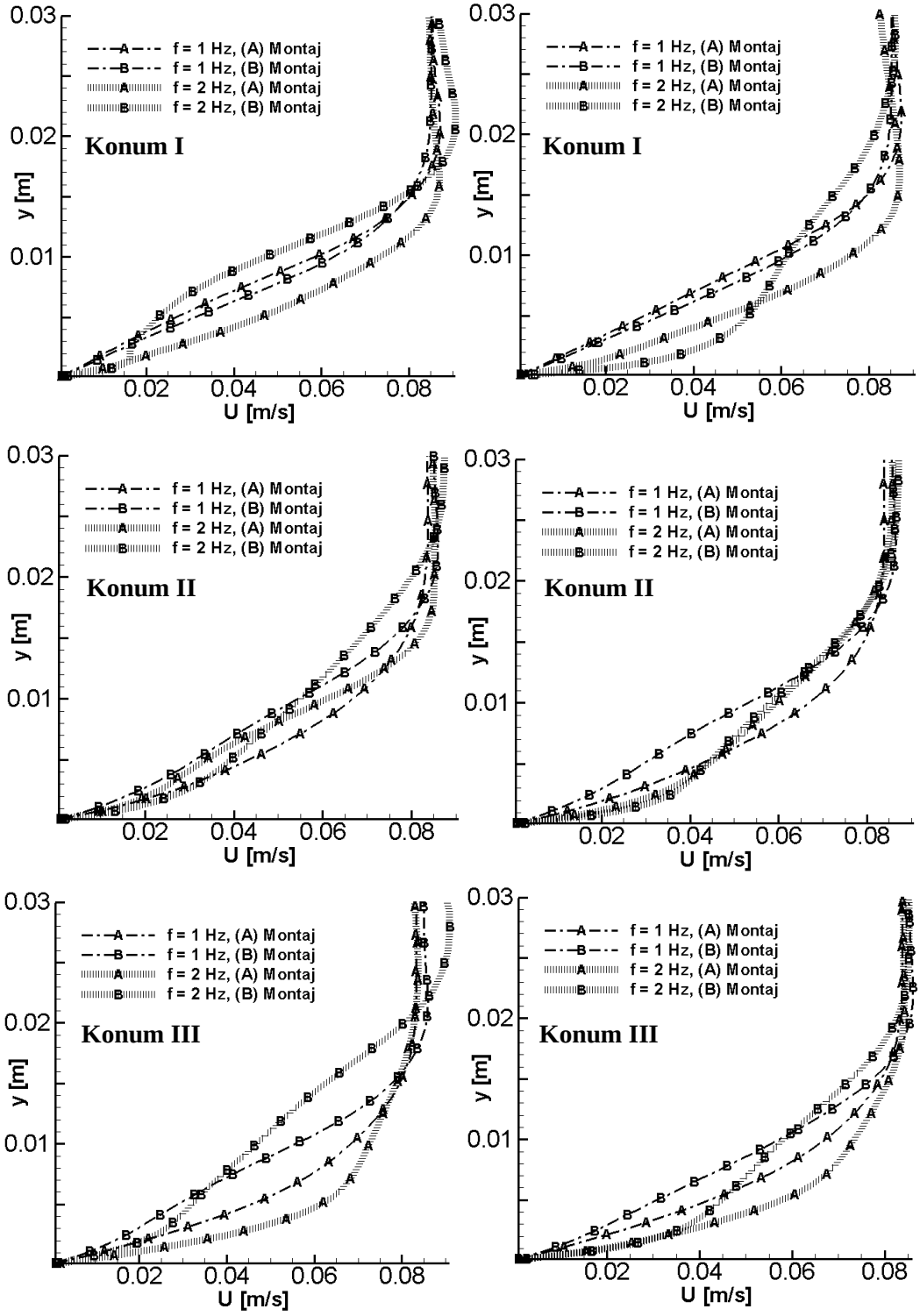


Şekil 5.32 : (B) tipi konfigürasyonda değişik kesitlerde ortalama sınır tabaka hız profillerinin bağıl plaka konumu ile değişimi; Re_J = 400, $\boldsymbol{r}$ = 1.36.

5.8.3 Montaj etkisi

Serbest akım hızı ve boyutsuz ölçeklendirilmiş genlik sabit tutulduğu takdirde, aynı çalışma frekansında veya jet Reynolds sayısında JaVA-levha konfigürasyonunun akış üzerindeki etkisini gözlemlemek için JaVA'dan x = 0.2 m ve 0.3 m uzaktaki kesitlerde üç farklı plaka konumunda (A) ve (B) tipi montajların sınır tabaka hız profilini nasıl değiştirdikleri Şekil 5.33'de verilmiştir.

Disk genliğinin a = 2 mm, plaka genişliğinin b = 25 mm ve kanal serbest akış hızının U_∞ = 0.0838 m/s seçilmesi halinde (A) montaj tipi plaka konumu ile beraber değerlendirilecek olursa, II ve III plaka konumlarında daha iyi sonuç vermekteyken, (B) tipi montaj I plaka konum ile beraber özellikle düşük frekanslarda ve çıkış kesidine doğru daha verimlidir. Sonuçta (A) tipi montaj plaka gövde içerisinde kaldığı müddetçe daha avantajlıdır.

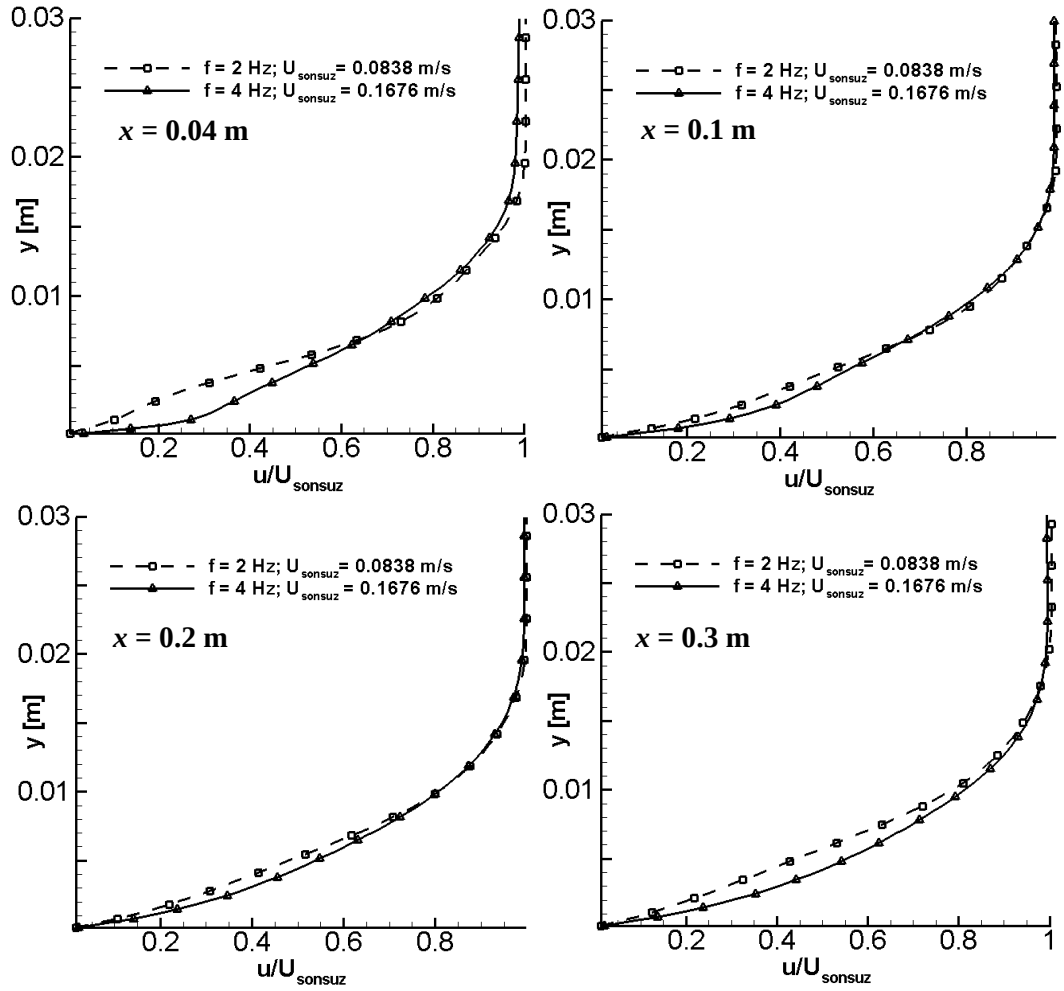


Şekil 5.33 : Ortalama sınır tabaka hız profillerinin konfigürasyon ile değişimi. Sol sütun: x = 0.2 m, sağ sütun: x = 0.3 m uzaklıktadır, S_a = 0.50.

5.8.4 Sabit sınır tabaka kalınlığında serbest akım hızının etkisi

Kanal girişinde Blasius benzetimli polimoniyal hız profili giriş koşulu tanımlanırken, sınır tabaka kalınlığı denklem (4.2) uyarınca serbest akım hızına bağlı olarak hesaplanmaktadır, dolayısıyla sınır tabaka kalınlığı ve serbest akım hızı arasında bir

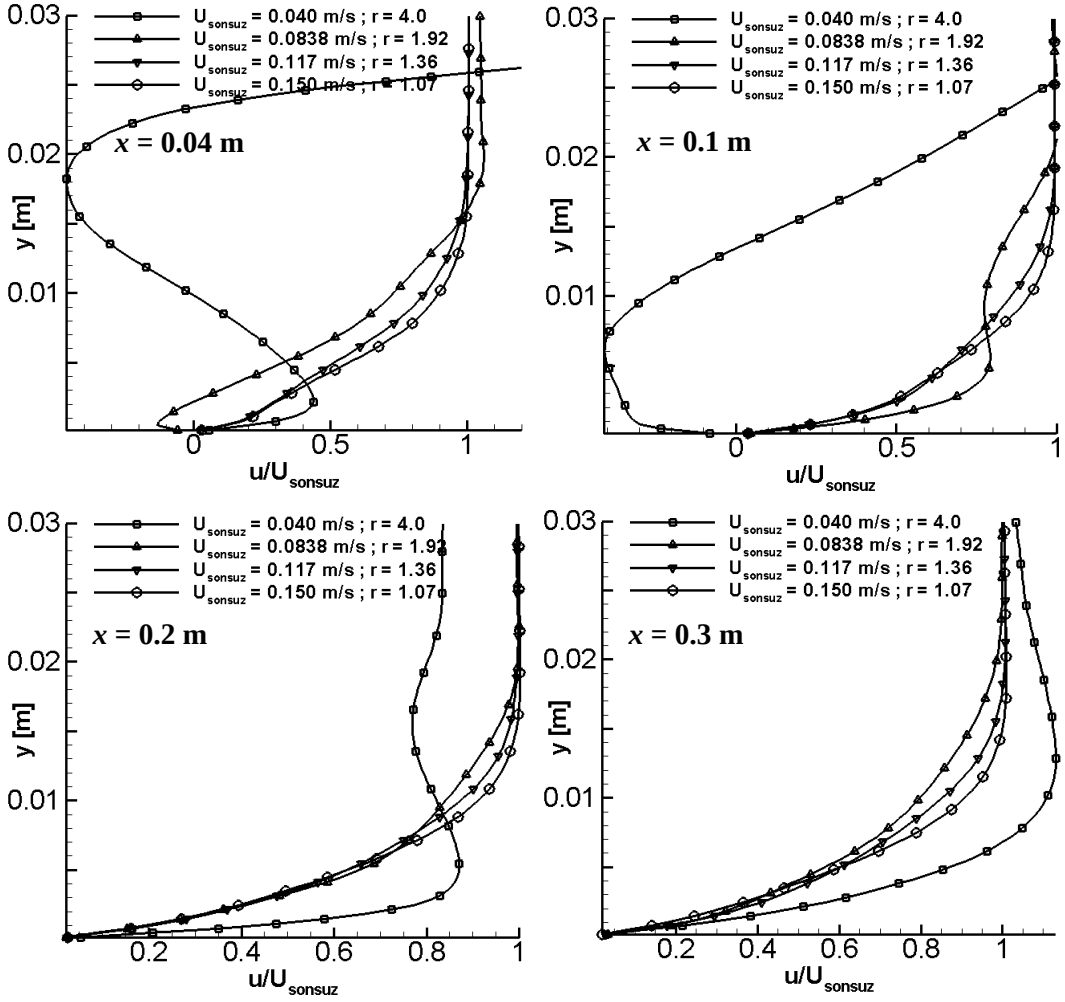
ters orantı vardır. Akım hızının artması, sınır tabaka kalınlığını azaltmaktadır. Ancak U_∞ = 0.0838 m/s'lik kanal hızını referans alarak hesaplanan sınır tabaka kalınlığını (δ = 21 mm) diğer serbest akım hızlarında yapılan sayısal modellemelerde kullanarak sabit sınır tabaka kalınlığında serbest akım hızının etkisi hakkında bir fikir edinilebilir. Bu bağlamda aktüatör jet hızının serbest akım hızına oranını (***r***) sabit tutmak için, referans alınan U_∞ = 0.0838 m/s'lik kanal hızı a = 1 mm'lik disk genliği, b = 25 mm plaka kalınlığı ve f = 2 Hz'lik frekans parametre kombinasyonuna eşdeğer U_∞ = 0.1676 m/s'lik kanal hızı ve f = 4 Hz'lik çalışma frekansı için sayısal modellemeler yapılmıştır. II plaka konumu ve (A) tipi montaj tercih edilmiştir. Kanal hızının iki katına çıkması durumunda teorik olarak hesaplanan δ = 15 mm yerine δ = 21 mm olan sınır tabaka kalınlığı kullanılmıştır. Aktüatör yakınında ve aktüatörden yeterince uzakta hız profilleri alınmış ve Şekil 5.34'de gösterilmiştir. Sonuç olarak sabit ***r*** oranında, yüksek jet Re sayısı hız profilini iyileştirmektedir.



Şekil 5.34 : Değişik kesitlerde sabit sınır tabaka kalınlığında serbest akım hızının hız profiline etkisi, ***r*** = 0.96 ve S_a = 0.25.

5.8.5 Farklı sınır tabaka kalınlıklarında serbest akım hızının etkisi

Disk genliğinin a = 1 mm, plaka genişliğinin b = 25 mm ve çalışma frekansının f = 4 Hz olarak sabit alındığı (sabit ölçeklendirilmiş genlik ve jet Reynolds sayısı) ve aktüatör plakasının gövde ile aynı hizada tutulduğu durumda; serbest akım hızı ve buna bağlı sınır tabaka kalınlığı değiştirildiğinde, aktüatöre yakın ve uzak kesitlerde ortalama hız profilleri alınırsa; yüksek ***r*** oranında sınır tabakaya daha iyi momentum transferi sağlanacağı için belli bir iyileşme olmaktadır. Şekil 5.35'den anlaşılacağı üzere sadece serbest akım hızı ve buna bağlı sınır tabaka kalınlığının değiştirilmesi sonucunda normalize edilmiş hızlarda JaVA yakınında yüksek serbest akım hızının faydası daha fazlayken, JaVA'dan uzaklaştıkça en düşük serbest akım hızında en iyi sonuçlar alınmaktadır. Bu gelişme, düşük serbest akım hızının JaVA yakınlarında ters akış içermesi sebebiyle akış ayrılmasına katkı sağladığı, ancak sınır tabakada ilerledikçe akış ayrılmasını kontol altına aldığını göstermektedir.



Şekil 5.35 : Değişik kesitlerde serbest akım hızının hız profiline etkisi, S_a = 0.25.

Sonuçta U_∞ = 0.04 m/s'lik kanal hızı kullanılmasaydı, sınır tabakanın genelinde en yüksek serbest akım hızı akış ayrılmasını geciktirmede en etkin akış koşulu olarak karşımıza çıkacaktı. Ancak ***r*** oranının serbest akım hızının artmasıyla azalması, diğer çalışma koşullarının sabit tutulması halinde en etkin kontolün düşük ***r*** oranında gerçekleştiğini göstermektedir. Fakat unutulmamalıdır ki, serbest akım hızının sabit tutularak, frekansın arttırılmasının daha önce Şekil 5.31'de gösterildiği gibi neden olacağı yüksek ***r*** oranı daha verimli bir çalışma koşulu doğurmaktadır. Şekil 5.35'deki ilginç hız profillerinin elde edildiği zaman ortalamalı akış alanları EkA Şekil A10'da gösterilmiştir.

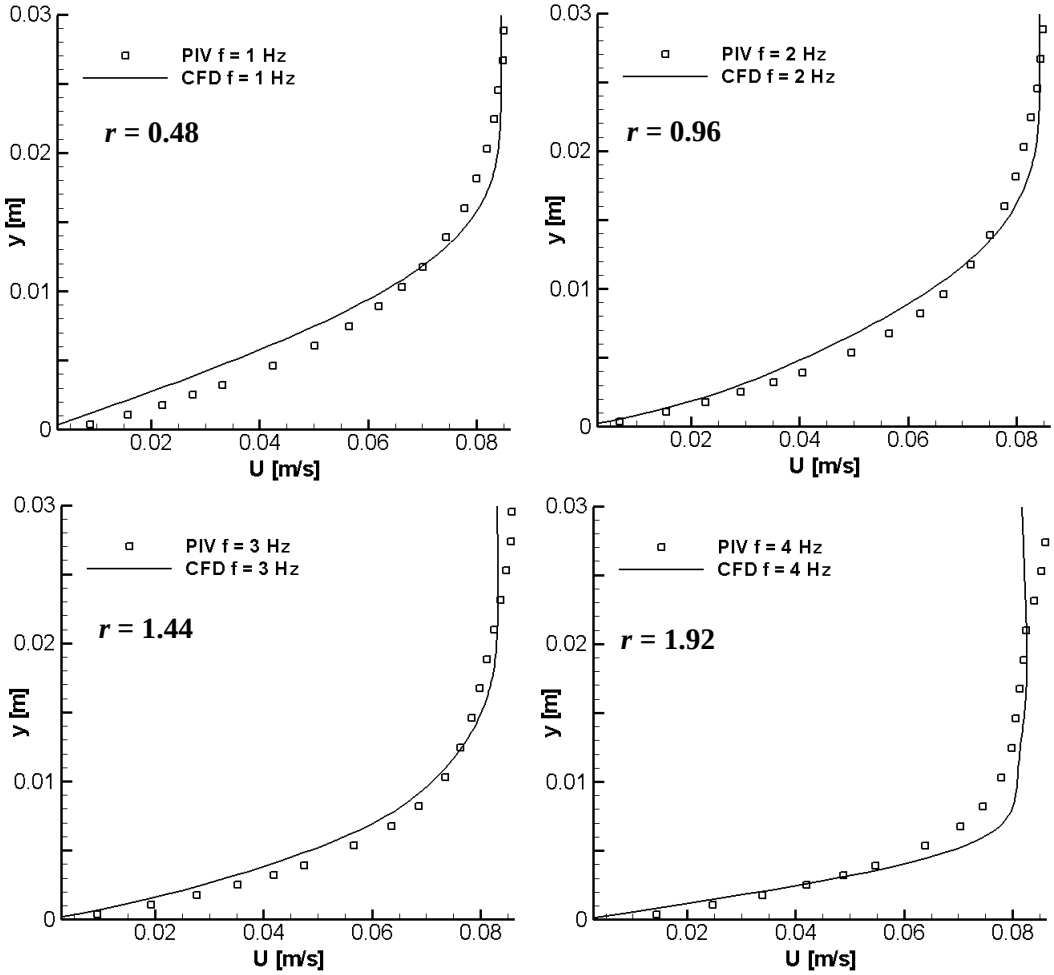
5.9 Sayısal Modelleme Sonuçlarının Deneysel Verilerle Karşılaştırılması

Sayısal modellemelerden elde edilen ortalama sınır tabaka hız profilleri PIV deneyleri ile JaVA'dan 300 mm öteden alınmış sınır tabaka hız profilleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma yapılırken geometrik parametrelerin, plaka konumunun, montaj tipinin ve serbest akım hızının aynı olmasına dikkat edilmiştir. Bunun yanında sayısal modelleme ile oluşturulan hız profili de çıkış kesidine karşılık gelen geniş aralıktan 0.3 m uzaklıktan çıkarılmıştır.

Bu bağlamda Şekil 5.36'da a = 1 mm, b = 25 mm alınan JaVA parametrelerinde ve (A) tipi montajda III plaka konumunda farklı çalışma frekanslarında aktif kontrol edilen sınır tabakaya ait geniş aralıktan 0.30 m uzaklıktaki sınır tabaka hız profilleri gösterilmiştir. Serbest akım hızı U_∞ = 0.0838 m/s'dir.

Şekil 5.36'dan anlaşılacağı üzere (A) tipi konfigürasyonda plakanın gövde içerisinde bulunması hem deneylerde hem de sayısal modellemelerde birbiriyle örtüşen sonuçlar alınmasını sağlamıştır. Plaka konumundan ötürü akışı rahatsız etmemektedir ve özellikle çalkantıların daha az olduğu düşük frekanslı akış rejimlerinde PIV ve CFD sonuçları uyuşmaktadır. Ancak f = 4 Hz'lik frekansta sayısal modelleme ile elde edilen ortalama hız profili deneysel veriye göre daha iyi bir grafik sunmaktadır.

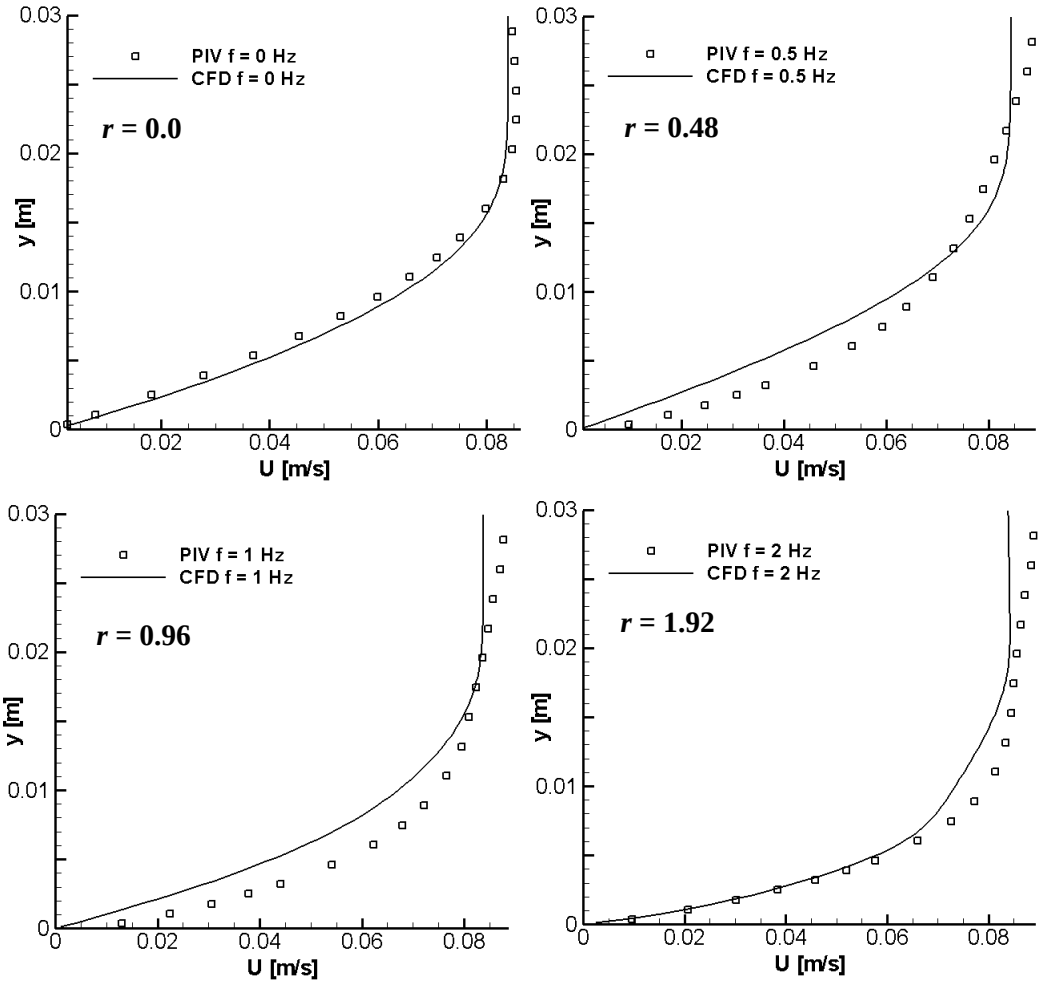
Şekil 5.37'de ise Şekil 5.36'da incelenen akış rejimlerinde genliğin a = 2 mm'ye çıkarılması ve buna bağlı olarak frekans değerlerinin düşürülmesi ile elde edilmiş ortalama hız profilleri gösterilmiştir. JaVA'nın çalıştırılmadığı zaman deneysel ve sayısal veriler arasında göze çarpan bir fark varken, aktif akış kontrolü sağlandığı zaman bu fark kapanmaktadır.



Şekil 5.36 : Ortalama PIV ve CFD sınır tabaka hız profilleri, S_a = 0.25.

Şekil 5.36 ve 5.37'de verilen örnekler montaj tipinin ve plaka bağıl konumunun akış rejimlerini belirleyen önemli parametreler olduğunu ispatlamaktadır, nitekim sayısal modelleme sonuçlarının PIV verileriyle validasyonu sadece JaVA parametrelerinin doğru seçilmesiyle değil aynı zamanda plaka bağıl konumunun da doğru ayarlanmasıyla mümkün olmuştur.

Blasius hız profili olarak alınan su kanalı giriş hız koşulu ile farklı çalışma frekanslarında yapılmış sayısal modellemeler deneysel olarak doğrulanmıştır. Bunun yanında yapılan pekçok sayısal modelleme sonucuna başvurularak, karşılaştırmalı olarak bazı çıkarımlar yapılmıştır. Burada JaVA yöneten boyutsuz parametrelerinin ve sınır tabaka ile ilgili sınır tabaka kalınlığı ve serbest akım hızının; akış ayrılmasını geciktirmedeki etkileri incelenmiştir.



Şekil 5.37 : Ortalama PIV ve CFD sınır tabaka hız profilleri, S_a = 0.50.

6. SONUÇLAR

Hava ve kara taşıtlarından binalara, ısı eşanjörlerinden reaksiyon kulelerine kadar birçok mühendislik uygulamalarında, cisimlerin bir akış ortamı içinde bulunması nedeniyle akış kaynaklı problemlerle sıkça karşılaşılmaktadır. Bu problemlerin olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılması veya azaltılması, çeşitli aktif ve pasif akış kontrol yöntemlerinin uygulanması ile mümkün olmaktadır. Pasif yöntemlerde ilave bir güç kullanılmaksızın sistemin geometrik modifikasyonu söz konusudur. Aktif yöntemlerde ise, harici olarak bir enerji girişi gerekli olup, akış içine yapılan üfleme ve emme, mikro-kabarcık ya da parçacık gönderme, akustik uyarma, dönen ya da salınım yapan cisim, hareketli duvar ve elektriksel kuvvetlerin oluşturulması örnek verilebilir.

Aktif akış kontrolleri arasında yer alan üfleme veya emme şeklindeki ikincil bir akışın ana akış ortamına gönderilmesine yönelik çalışmaların uzun yıllardan beri literatürde yeraldığı ve aerodinamik yapılı cisimler etrafındaki akış kontrolünde çeşitli uygulamaların pratikte karşılık bulduğu görülmektedir. Üfleme ve emme ile etkin akış kontrolünün sağlanmasına rağmen bu kontrol akışını oluşturmak için sistemde harici olarak sürekli bir kütle akışının sağlanması gerekmektedir. Sentetik jet olarak adlandırılan net sıfır kütle akılı jetlerde, sistemde periyodik olarak emme ve üfleme yapılmasına karşın sisteme ilave bir kütle girişi olmadan kontrol jeti veya vorteksi mevcut ortam akışından sağlanmaktadır. Bu sayede daha düşük enerji harcanmasına rağmen akış sistemine momentum transferi yapılabilmekte ve kontrol akışının darbeli olması nedeniyle daha etkili bir akış kontrolü sağlanmaktadır. Bu avantajından dolayı sentetik jet çalışmaları günümüzde pekçok araştırmacı tarafından incelenmekte ve geliştirilmektedir.

Sentetik jet ile aktif akış kontrolüne bir örnek olmak üzere cidar yakınındaki sınır tabaka içerisinde hava jeti veya vorteks oluşturarak akışa ilave enerji verilebilir, ve sınır tabakanın cidardan ayrılması geciktirilmiş olur. Böylece akışa karşı koyan direnç kuvvetleri azaltılır, gürültü kaynakları ve istenmeyen daimi olmayan çalkantılar en az düzeye indirgenebilir. Geleneksel pasif akış ayrılma kontrolü

metodlarının aksine, aktif metodun avantajı; ihtiyaç durumunda kullanılmaları ve böylelikle akış kontrolünün gerekli olmadığı çalışma koşullarında akışa zararlı etkilerin bertaraf edilmesidir.

Bu tez çalışmasında aktif akış kontrolü için geliştirilmiş olan jet ve vorteks aktüatörü veya JaVA deneysel ve sayısal olarak ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır. Deneysel çalışmalara başlamadan önce durgun su içinde çalışacak olan jet ve vorteks aktüatörünün tasarımı yapılmıştır. Bu modelle beraber incelenmek üzere seçilen parametreler, boyutlu parametreler (hız, genlik, frekans, plaka geometrisi) ve bu boyutlu parametrelerden elde edilecek boyutsuz parametrelerdir (Reynolds sayısı, boyutsuz ölçeklendirilmiş genlik, geometrik boyut oranları vb.). Boyutsuz parametrelerin akışa olan etkisi de akış tipini tanımlamada ve oluşacak akış rejiminin uygun frekans aralığında kalıp kalmadığını anlamada faydalı olmuştur. JaVA'nın daha önce ilgili literatürde tanımlanan prototipine benzeyen ancak çalışma ilkesi ve geometrik tasarımı açısından üstünlükleri olan modeli tamamlanıp, uygun boyutlarda üretildikten sonra, hareketsiz su ortamında akış görüntüleme deneyleri yapılmış ve ilgili boyutsuz parametrelerin akış rejimine olan etkileri gözlemlenmiştir. JaVA ile beraber farklı genişlikte aktüatör plakaları, farklı genlikte diskler de üretilmiştir.

Hareketsiz su ortamında elde edilen akış görüntüleme deneyleri JaVA gibi bir aktif akış kontol düzeneğinin çalışma koşullarına göre hangi tip akış rejimlerini yarattığı konusunda literatürdeki boşluğu dolduran niteliktedir. Zira bu tez çalışmasından önce Lachowicz ve diğ. tarafından araştırılmış JaVA kaynaklı akışlar durgun hava ortamında yapılmıştır. Su ortamının konumsal ve zamansal çözünürlük açısından ölçümlere ve akış görüntülemeye daha müsait olması ve akış görüntüleme deneylerinde boya çözeltisinin havadaki dumana göre daha rahat takip edilebilir olması mükemmel bir çözünürlükte zengin bir deneysel altyapı oluşturulmasına olanak vermiştir. Bu bağlamda JaVA'nın aktüasyon plakasının genişliğine, tahrik mekanizmasında kullanılan diskin genliğine, çalışma frekansına bağlı olarak farklı akış rejimleri gözlemlenmiştir. Daha önce literatürde belirtilmemiş diğer yöneten parametreler olarak plaka bağıl konumu ve plaka kalınlığı da akışı etkileyen faktörler arasındadır. Plaka bağıl konumu plakanın JaVA gövdesine göre harekete başlamadan önceki sıfır konumunu ifade etmektedir ve gövde içinde, gövde ile aynı hizada ve gövde dışında olmak üzere üç tandedir. Bu parametreler temel akış rejimlerini yönetirler ve bu durgun suda gözlemlenen temel akış rejimleri açılı jetler, cidar jeti,

vorteksler ve kaotik akış tipleridir. Özellikle plaka genişliğinin artması ile JaVA'nın tasarımı gereği jet akışının hızı artmakta ve akış rejimi vorteks veya daimi olmayan jet olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun yanında yüksek disk genliği ve frekans da aynı etkiyi yapmaktadır. Değişik yöneten parametreler kullanılarak hareketsiz su ortamında yapılan akış görüntüleme deneylerinden elde edilen görüntülerden optik akış hesabı adı verilen sayısal bir yaklaşımla hız vektörleri çıkarılmıştır. Temel akış tipleri içinde seçilen farklı noktaların zamana bağlı davranışları incelenmiş ve hız-zaman grafikleri ile frekans spektrumları çıkarılmıştır. Akış görüntüleme sonuçları kullanılarak x ve y doğrultusundaki hız alanları, ortalama hız büyüklükleri ve vortisite değerleri elde edilmiş ve bu sayısal akış alanları Kriging interpolasyonu ile uygun korelasyon fonksiyonlarını (Gauss veya üstel) ve düzgünleştirme faktörlerini kullanmak suretiyle düzgünleştirilmiştir. Düşük frekanslardaki düzgün jet akışları üzerinde seçilen noktaların hareketi periyodik yapıdadır ve çalışma frekansında belirgin bir pik genlik göze çarpmaktadır. Frekans arttığında oluşan jetlerde veya plaka genişliğinin arttırılması ile meydana gelen vorteks akışlarında seçilen noktalar kaotik yapıdadır ve bu hem hız-zaman grefiklerine hem de frekans spektrumlarına yansımaktadır.

Deneylerde tekrarlanabilirlik sağlandıktan sonra PIV ile bu akışların hız alanları deneysel olarak elde edilmiştir. PIV deneyleri ile JaVA kaynaklı akış rejimlerinin periyotları emme ve basma fazları olarak daha yakından incelenebilmiştir. Özellikle JaVA plakası ve geniş aralığı yakınında yapılmış PIV deneyleri jet akışlarının vorteks çiftleri halinde ilerleyişini ayrıntılı bir şekilde göstermiştir. PIV verileri kullanılarak faz ortalamaları alınmış akış alanlarının hacimsel debileri ve momentum akıları hesaplatılarak hangi parametre kombinasyonlarında JaVA'nın muhtemel sınır tabaka ayrılması kontrolünde etkin bir mekanizma olarak kullanılabileceği görülmüştür. Plaka konumuna bağlı olarak farklılık gösteren jetler içerisinde bir karşılaştırma yapıldığında düşey jetin en fazla momentum transferini sağladığı görülmüştür.

Kriging ve POD gibi yöntemler ile akış alanındaki boşluklar doldurulup, akış alanı iyileştirilebilir. Oluşan akış tiplerinin dinamiğini daha iyi anlamak için deneysel veritabanına POD analizi yapılmıştır. Akışa ait modlar oluşturulmuş ve herhangi bir anlık akış alanı POD mod katsayıları kullanılarak başarıyla tekrar oluşturulmuştur.

Durgun suda yapılan deneysel çalışmalardan elde edilmiş sonuçlar, JaVA modeli için yapılacak CFD simülasyonlarına zemin oluşturmaktadır. Uygun sınır koşullarının tanımlandığı ve yeterince hassas bir hareketli hesaplama ağı kullanılarak yapılan CFD analizi ile bazı akış tiplerinin daimi olmayan akış simülasyonları yapılmış ve elde edilen hız alanları deneysel verilerle örtüşmüştür.

Bu çalışmaları JaVA'nın su kanalında yapılan akış görüntüleme, PIV ve sayısal modelleme çalışmaları takip etmektedir. Stuttgart Üniversitesi Aerodinamik ve Gaz Dinamiği Enstitüsü'nde (IAG) bulunan kapalı-devre sebest yüzeye sahip bir su kanalından faydalanılarak daha önce durgun suda denenmiş ve karakteristikleri ortaya çıkarılmış jet ve vorteks aktüatörüyle düz levha üzerinde akış ayrılmasının aktif kontrolü incelenmiştir. Özellikle yüksek genlik ve frekanslarda veya bu parametrelerin uygun kombinasyonlarında; JaVA'nın sınır tabaka ayrılması kontrolünde etkin bir mekanizma olarak kullanılabileceği görülmüştür. Su kanalında 0.1 m/s serbest akım hızı mertebesinde yapılan deneylerde JaVA sınır tabakanın laminer bölgesinde kalacak şekilde düz levhanın ön kenarına yaklaşık 1.5 m mesafede konuşlandırılmış ve montajına göre iki referans konumu belirlenmiştir. Bu deneylerde ilave bir parametre olarak jet hızının serbest akım hızına oranı karşımıza çıkmaktadır. Plaka konumundan ve montaj tipinden farklı olarak sadece çalışma parametrelerine göre belirlenen bu oran JaVA'nın etkinliği ve verimi konusunda fikir vermektedir. Bu bağlamda bu oranın 1.0 civarında olması, bir başka deyişle jet akışı hızının serbest akım hızına yakın olması halinde, sınır tabakaya etkili bir momentum transferi olmaktadır ve sınır tabaka hız profilinin iyileşmesini sağlamaktadır.

Bu deneyleri takiben su kanalında JaVA yakınında yapılan PIV deneyleri emme ve basma fazlarını incelemek açısından önemlidir. Bir periyot içerisinde emme ve basma fazları kendi içerisinde gruplandırılarak faz ortalamaları alınmış ve yüksek frekans ve genlik değerlerindeki çalışma koşullarının etkili olduğu görülmüştür. Bu değerlendirmelerde aynı zamanda aynı jet Reynolds sayısını veren farklı genlik ve frekansların sağladığı momentum akısının da yaklaşık aynı olduğu sonucuna varılmıştır.

JaVA'dan 300 mm ötede yapılan PIV deneyleri ise o kesitteki sınır tabaka hız profillerinin ve diğer sınır tabaka karakteristiklerinin değişimini araştırmak açısından önem arzetmektedir. JaVA'nın sınır tabakayı enerjilendirmesi ile sınır tabaka hız profilleri iyileşmekte ve bu sınır tabaka özelliklerine yansımaktadır. Aktif kontrolün

artan etkinliği ile öteleme kalınlığı ve buna bağlı olarak biçim katsayısı azalmakta ve sürtünme katsayısı artmaktadır.

Su kanalında yapılan deneyler ışığında JaVA kaynaklı akış rejimlerinin sınır tabaka ile olan etkileşimi sayısal olarak modellenmiştir. Blasius hız profili olarak alınan su kanalı giriş hız koşulu ile farklı çalışma frekanslarında sayısal modelleme yapılmış ve daha önce deneysel olarak gözlemlenen aktüatörün sınır tabakadaki momentum transportununa katkısı, sayısal olarak da doğrulanmıştır. Aktüatör kaynaklı jet ve vortekslerin sınır tabaka ile etkileşimini daha sağlıklı bir biçimde yorumlayabilmek için, sayısal hesaplama ağı yeterince uzun tutulmuş ve ortalaması alınmış akış alanlarında istenen kesitlerde hız profilleri alınmıştır. Aktüatörün, sınır tabakaya kattığı momentum ve enerjiyi sayısal olarak ortaya koyabilmek için, farklı çalışma frekanslarında sınır tabaka karakteristikleri çıkarılmıştır.

Bunun yanında yapılan pekçok sayısal modelleme sonucuna başvurularak, karşılaştırmalı olarak bazı çıkarımlar yapılmıştır. Burada JaVA yöneten boyutsuz parametrelerinin ve sınır tabaka ile ilgili sınır tabaka kalınlığı ve serbest akım hızının; akış ayrılmasını geciktirmedeki etkileri incelenmiştir ve sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçların birbiri ile örtüştüğü görülmüştür. Özellikle artan frekans ile öteleme kalınlığı genel olarak azalmakta buna karşın momentum ve enerji kalınlığı gibi sınır tabaka karakteristikleri artmaktadır. Cidardan ayrılmayı engelleyici bir faktör olarak sürtünme katsayısı da JaVA performansıyla doğru orantılı değişmektedir. JaVA'nın levha ile iki farklı montajının etkisi de incelenmiş, özellikle aktüatör plakasının gövde içinde kalması veya gövde ile aynı hizada kalması durumunda (A) tipi konfigürasyonun yani jet akışının geniş aralıktan çıktıktan sonra aktüatör plakasının üzerinden geçerek serbest akım yönünde ilerlemesinin iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bunun yanında plaka ortalama konumunun gövde dışında olmasının (B) tipi konfigürasyonda yani jet akışının plaka ile herhangi bir etkileşime girmeden doğrudan serbest akıma katıldığı durumda iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Bütün bunlara ilaveten deneyleri yapılmamış olan ancak ilgi uyandıran rapma üzerindeki akışların sayısal modellemeleri ile daha çarpıcı sonuçlar ortaya konmuştur. Bu sayısal modellemelerde JaVA'nın çalıştırılmadığı durumlarda akış ayrılması açıkça görülmektedir. Akış ayrılması, aktif kontrol ile artan frekanslarda geciktirilmekte veya engellenmektedir.

Sonuç itibariyle özgün değeri olduğuna inanılan bu tez çalışması, aktif akış kontolü alandaki deneysel ve sayısal gelişmeleri biraraya getirerek, bunları yeni bir aktif akış kontrol aktüatörüne uygulamaktadır. Teknolojik avantajı, pasif akış ayrılma kontrolünün yerine kullanılabilecek yeni bir düzenek olmasıdır, temel amacı ise uçuş kontrol sistemlerine kolaylıkla entegre edilebilen ve daha büyük bir uçuş aralığı, manevra kabiliyeti, kararlılık ve gelişmiş performans sağlayan etkin, verimi yüksek aktüatör geliştirilmesidir. Böylelikle geniş bir genlik ve frekans aralığında çalışabilen ve farklı uçuş rejimlerinde kontrol sağlama imkanı olan JaVA'nın aktif akış ayrılması kontrolündeki önemi ve görevi deneysel ve sayısal çalışmalarla ortaya konmuştur ve konuyla ilgili literatürdeki boşluğu doldurmaktadır

KAYNAKLAR

Agashe, O.M., Shelpak, M., Arnold, D.P., and Cattafesta, L.N., 2006. MEMS-based actuators for flow-control applications. IUTAM Symposium on Flow Control and MEMS, Proceedings of the IUTAM Symposium hels at the Royal Geographic Society, (CD-ROM).

Aqeel, M.R., 2010. CFD simulations of jet and vorteks actuators (JaVA) with and without cross boundary layer, *Ph.D. Thesis,* Institut für Aerodynamik und Gasdynamik (IAG), Universität Stuttgart, Germany.

Arifoğlu, U., 2005. MATLAB: *Simulink ve Mühendislik Uygulamaları*, ALFA Yayınları, İstanbul.

Anderson, J. D., 2001. *Fundamentals of aerodynamics*, Mc-Graw Hill, Boston

Berkooz, G., Holmes, P., and Lumley, J.L., 1993. The Proper Orthogonal Decomposition in the Analysis of Turbulent Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics.* Vol. **25**, pp. 539-575.

Bonnet, J.P., 2009. Von Karman Institute (VKI)- Lecture Series, *Flow Control: fundamentals, advances and applications. (Introduction and fluid mechanic for flow control).* Brussels, Belgium.

Bons, J.P., Sondergaard, R., and Rivir, R.B., 2002. The Fluid Dynamics of LPT Blade Separation Control Using Pulsed Jets. *ASME Journal of Turbomachinery*. Vol. **124**, pp. 77-85.

Burkhardt, H. and Bredebusch, A., 1994. Application of digital image processing methods for the analysis of local structures in fluidized bed processes, *C8 Research Project* Report.

Cadirci, S., Gunes, H., and Rist, U., 2010. Numerical investigation of jet and vortex actuator (JaVA) for active flow control, *The 5th Flow Control Conference and Exhibit AIAA*,Chicago, Illinois, USA, June 28-July 01.

Carr, J.R., 1990. Rapid solution of kriging equations, using a banded Gauss elimination algorithm. *International Journal of Mining and Geological Engineering.* Vol. **8**, pp. 393-399.

Cattafesta, L.N., Song, Q., Williams, D.R., Rowley C.W., and Alvi, F.S., 2008. Active Control of Flow-Induced Cavity Oscillations. *Progress in Aerospace Sciences.* Vol. **44**, pp. 479-502.

Cattafesta, L.N., 2009. Von Karman Institute (VKI)- Lecture Series, *Flow Control: fundamentals, advances and applications*. Brussels, Belgium.

Cekli, H.E., 2007. Development of new flow diagnostic systems, *M.S. Thesis,* Institut of Science and Technology, Istanbul Technical University, Turkey.

Coe, D.J., Allen, M.G., Trautman, M.,A., and Glezer, A., 1994. Micromachined jets for manipulation of macro flows, *Solid State Sensor and Actuator Worshop*,Hilton Head, SC, USA, June.

Crittenden, T.M., Glezer, A., Funk, R., and Parekh, D., 2001. Combustion driven jet actuators for flow control, *AIAA Paper,* **AIAA-2001-2768.**

Crittenden, T.M., Shlyubsky, D., and Glezer, A., 2004. Combustion driven jet actuators in reversed flow configurations, *AIAA Paper,* **AIAA-2004-2689.**

Cutler, A., Beck, B., Wilkes, J., **Drummond, J., Alderfer, D., and Daheny, P.,** 2005. Development of a pulsed combustion actuator for high speed flow control, *AIAA Paper,* **AIAA-2005-1084.**

Davis, J.C., 2002. *Statistics and data analysis in Geology*, J. Wiley, New York.

Deutsch, C.V., and Journel, A.G., 1992. GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide, Oxford University Press, New York.

Eppler, R., 1963. Praktische Berechnung laminarer und turbulenter Absauge-Grenzschichten, *Ingenieur Archiv,* **Ingenieur Archiv-Heft 4.**

Everson, R., and Sirovich, L., 1995. The Karhunen-Loeve transform of incomplete data. *Journal of Optical Society of America*. Vol. **12**, (8).

Fluent Inc.: FLUENT 6.3 User's Guide. Documentation, 2008.

Gad-el-Hak, M., and Bushnell, D., 1991. Separation Control: Review. *Journal of Fluids Engineering.* **Vol.** 113, no. 1, pp. 5-30.

Gad-el-Hak, M., 2000. *Flow control : passive, active, and reactive flow management*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Greenblatt, D., and Wygnanski, I., 2000. The Control of Separation by Periodic Excitation. *Prog. Aerospace Science.* Vol. **36**, pp. 487-545.

Grossman, K., Cybyk, B., VanWie, D., and Rigling, M., 2004. Characterization of spark jet actuators for flow control. **AIAA Paper 2004-89**.

Gunes, H., Sirisup, S., and Karniadikis, G.E., 2006. Gappy data: To Krig or Not To Krig. *Journal of Computational Physics*. Vol. **212** , no. 1.

Gunes, H., and Rist, U., 2007. Spatial Resolution Enhancement/Smoothing of Stereo-Particle-Image-Velocimetry Data Using Proper-Orthogonal-Decomposition-Based and Kriging Interpolation methods. *Physics of Fluids*.Vol.**19,** no. 6.

Gunes, H., Cadirci, S., Baldani, F., Peters, B., and Rist U., 2008 (A).Temporal analysis of jet and vortex actuator (JaVA)-induced flows, *International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows*, Technical University of Berlin, Berlin, Germany, Sept.16-19.

Gunes, H., Cadirci, S., and Rist, U., 2008 (B). An experimental investigation of jet and vortex actuator for active flow control, *The 4th Flow Control Conference and Exhibit AIAA*, Seattle, Washington, USA, June 23-26.

Güneş, H., Çadırcı, S., ve Rist, U., 2008 (C). Aktif akış kontrolü için jet and vortex actuator (JaVA) modeli: deneysel verilerin işlenmesi, *II. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı*, İTÜ, İstanbul, Türkiye, 15-17 Ekim.

Gunes, H., Cadirci, S., Peters, B., and Rist, U., 2009. Experimental investigation of jet and vortex actuator using particle image velocimetry, *ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE2009),* Orlando, Florida, USA, Nov. 13-19.

Hisdal, H., and Tveito, O.E., 1992. Generation of Runoff Series at Ungauged Locations Using Empirical Orhogonal Functions in Combination with Kriging. *Stochastic Hydrology and Hydraulics.* Vol. **6**, pp. 255-269.

Holman, R., Utturkar, Y., Mittal, R., Smith, B., and Cattafesta, L., 2005. A Jet Formation Criterion for Synthetic Jets. *AIAA Journal.* Vol. **43**, no. 10, pp. 2110-2116.

Horn, B.K.P., and Schunck, B.G., 1981. Determining Optical Flow. *Artificial Intelligence*. Vol **17**, pp. 185-203.

Huang, D., Allen, T.T., Notz, W.I., and Zeng, N., 2006. Global Optimization of Stochastic Black-Box Systems via Sequential Kriging Meta-Models. *Journal of Global Optimization.* Vol. **34**, no. 3, pp. 411-466.

Ingard, U., and Labate, S., 1950. Acoustic Circulation Effects and the Nonlinear Impedance of Orifices. *Journal of Acoustic Society of America.* Vol. **22**, no. 2, pp. 211-218.

Isaaks, E.H., and Srivastava, R.M., 1989. *Introduction to Applied Geostatics*, Oxford University Press, New York..

Jabbal, R. J., and Zhong, S., 2008. The near wall effect of synthetic jets in a boundary layer. *Heat and Fluid Flow*. Vol. **29**, pp. 119-130.

Journel, A.G. and Huijbregts, C.H.J., 1981. *Mining Geostatistics,* Academic Press.

Kähler, C.J., 2003. Experimental investigation of flows at low Reynolds number using optical techniques, RTO/AVT 104 VKI Lecture Series.

Kanda, N., Kogoma, M., Jinno, H., Uchiyama, H., and Okazaki, S., 1991. Atmospheric Pressure Glows Plasma and Its Application to Surface Treatment and Film Deposition. *Proceeding 10th Symposium on Plasma Chemistry*. Vol.**3**, No: 3.2-20.

Karadogan, H., and Rockwell, D., 1983. Toward Attenuation of Self-Sustained Oscillations od a Turbulent Jet Through a Cavity. *Journal of Fluids Engineering*. Vol. **105** pp. 335-340.

Kegerise, M.A., Cattafesta, L.N., and Ha, C., 2002. Adaptive Identification and Control of Flow Induced Cavity Oscillations. AIAA 3158.

Krige, D.G., 1951. A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chem., Metal. and Mining Soc. of South Africa.* Vol.**52**, no. 6, pp. 119-139.

Kostas, J., and Foucant, J.M., 2007. The Flow Structure Produced by Pulsed-jet Vortex Generators in a Turbulent Boundary Layer in an Adverse Pressure Gtadient. *Flow Turbulence Combust.* Vol. **78**, pp. 331-363.

Kuo, C.H. and Huang, S.H., 2001. Influence of Flow Path Modification on Oscillation of Cavity Shear Layer. *Experiments in Fluids*.Vol. **31**, pp.162-178.

Lachowicz, J. T., Yao,C., and Wlezien, R.W., 1999. Flow Field Characterization of a Jet and Vortex Actuator. *Experiments in Fluids.*Vol. **27**, pp.12 – 20.

Lang, M., 2004. Experimentelle Untersuchungen zur Transition in einer laminaren Ablöseblase mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie und der Particle Image Velocimetry, *Ph.D. Thesis*, Institut für Aerodynamik und Gasdynamik der Universität Stuttgart, Germany.

Latip, L., and Tsudagawa, M., 2002. Image velocity measurement by using spatial filter method, *IEEE Instrumentation and Measuremet Technology Conference*, Anchorage, Alaska, USA, May 21-23.

Lee, C., Hong, G., Ha Q.P., and Mallinson, S.G., 2003. A Piezoelectrically Actuated Micro Synthetic Jet for Active Flow Control. *Sensors and Actuators.* Vol. **108**, pp. 168-174.

Liakopoulos, A., 1990. Lecture Notes.

Lucas, B., D., and Kanade, T., 1981. Optical Flow Method.

Lumley, J. L., 1967. The Sructure of Inhomogeneous Turbulence. *Atmospheric Turbulence and Wave Propagation*. pp. 166-178. Moscow.

Mc Manus, K., and Magill, J., 1971. Separation control in incompressible and compressible flows using pulsed jets. *AIAA Peper*, **AIAA-1971-97**. Washington D.C., USA.

Madou, M., 1997. *Fundamentals of Microfabrication*, CRC Press, New York..

McCormick, D.C., 2000. Boundary layer separation control with directed synthetic jets, *AIAA Paper*, **AIAA-2000-0519.**

Raffel, M., Willert, C., and Kompenhans, J., 1998. Particle Image Velocimerty –A Practicel Guide, Springer Verlag.

Raman, G., Mills, A., Othman, S., and Kibens, V., 2001. Development of Powered Resonance Tube Actuators for Active Flow Control. *ASME Paper FEDSM*-18273.

Reichert, R.S., Hatay, F.F., Biringen, S., and Huser, A., 1994. Proper Orthogonal Decomposition Applied to Turbulent Flow in a Square Duct. *Physics of Fluids.* Vol. **6,** no. 9.

Rempfer, D., and Fasel, F.H., 1993. Evaluation of Three-Dimensional Coherent Structures in a Flat-Plate Boundary Layer. *Journal of Fluid Mechanics.* Vol. **260**, pp.351-375.

Rijpkema, J.J.M., Etman, L.F.P., F.F., and Schoofs, A.J.G., 2001. Use of Design Sensitivity Information in Response Surface and Kriging Metamodels. *Optimization and Engineering.* Vol. **2,** pp. 469-484.

Sahan, R. A., Liakopoulos, A. and Gunes, H., 1997. Reduced Dynamical Models of Non Isothermal Grooved-Channel Flow. *Physics of Fluids*, Vol. **9**, no.3.

Sakata, S., Ashida, F., and Zako, M., 2007. On Applying Kriging-Based Approximate Optimization to Inaccurate Data. *Comp. Methods Appl. Mech. Engrg.* Vol. **196,** pp. 2055-2069.

Schaefer, J.T., and Doswell, C.A., 1979. On the Interpolation of a Vector Field. *Monthly Weather Review*. Vol. **107,** pp. 458-460.

Sirovich, L., 1987. Turbulence and the Dynamics of Coherent Structures. *Applied Mathematics.* Vol. **45,** pp. 561.

Skamnakis, D., and Papailiou, K., 2007. Using Stability Theory to Analyze Configurations of Pulsed Jets for Flow Control. *Flow Turbulence Combustion.* Vol.**78**, pp. 445-463.

Smith, B.L., and Glezer, A., 1998. The Formation and Evolution of Synthetic Jets. *Physics of Fluids.* Vol.**10**, no. 9, pp. 2281-2297.

Tang, H., Zhong, S., Jabbal, M., Garcillan, L., Guo, F., Wood, N., and Warsop, C., 2007. Towards the Design of Synthetic-Jet Actuators for Full-Scale Flight Conditions. *Flow Turbulence Combustion*. Vol.**78**, pp. 309-329.

Taylor, H.,D., 1948. Application of vortex generator mixing principles to diffusers, *Research Department Concluding Technical* Report, **No. R- 15064-5,** United Aircraft Corporation, Connecticut.

Thrane, N., 1990. The Discrete Fourier Transform and FFT Analysers- Lecture Notes.

Umetani, J., Yuzawa, C., and Okada, E., 1989. Microvascular Red Blood Cell Velocity Measurement Using the Image Gradient Method. *Image Processing*. Vol.**6.**

Url-1 <*http://web.mit.edu./*>, alındığı tarih 01.08.2009.

Venturi, D., and Karniadakis, G.E., 2004. Gappy Data and Reconstruction Procedures for Flow Past a Cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. **519**, pp. 315–336.

Warsop, C., and Hucker, M., 2006. Pulsed Air-jet for Flow Separation Control. *Flow Turbulence Combustion*. Vol. **78**, pp. 255-281.

White, F.M., 2004. *Akışkanlar Mekaniği*, Çeviri: Kadir Kırkköprü, Erkan Ayder. Literatür, İstanbul.

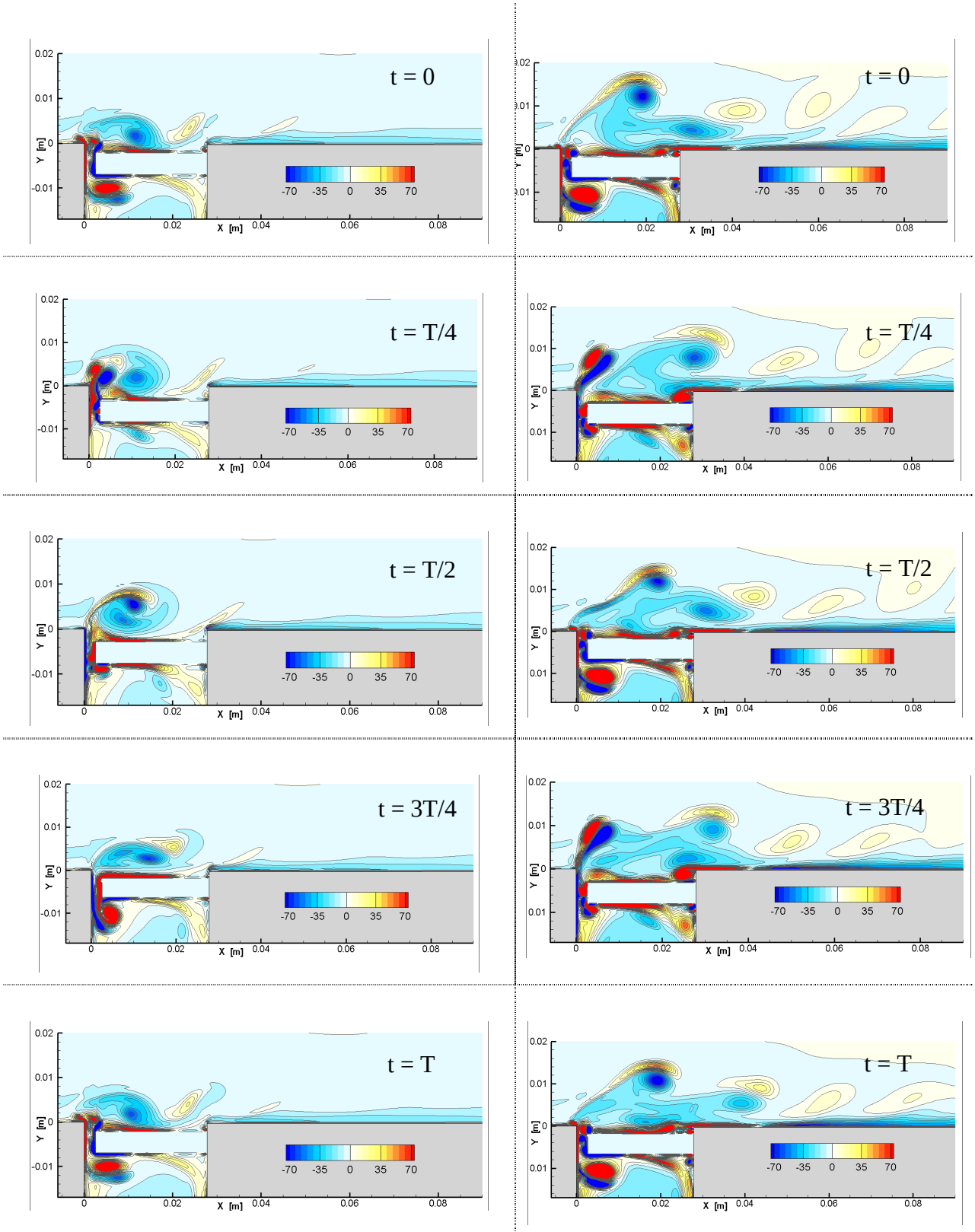
Zhong, S., and Jabbal, M., 2006. Towards the Design of Synthetic-jet Actuators for Full-scale Flight Conditions. *Flow Turbulence Combustion*. Vol. **78**, pp. 283-307.

.

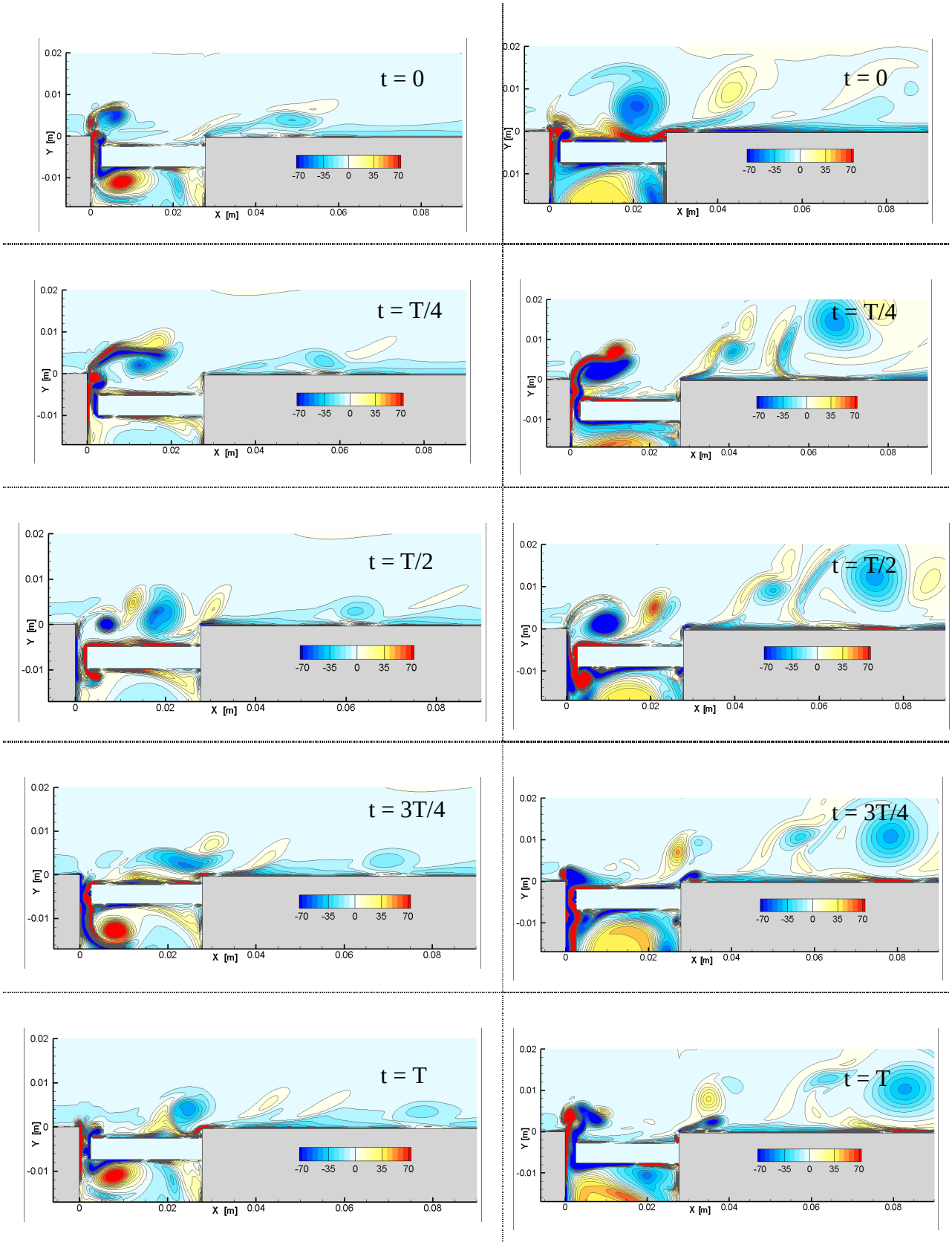
EKLER

EK A : (A) Tipi Konfigürasyonda CFD Anlık Akış Alanları
(B) Tipi Konfigürasyonda CFD Anlık Akış Alanları
Rampa ve Müteakip Düz Levhaya Ait CFD Anlık Akış Alanları

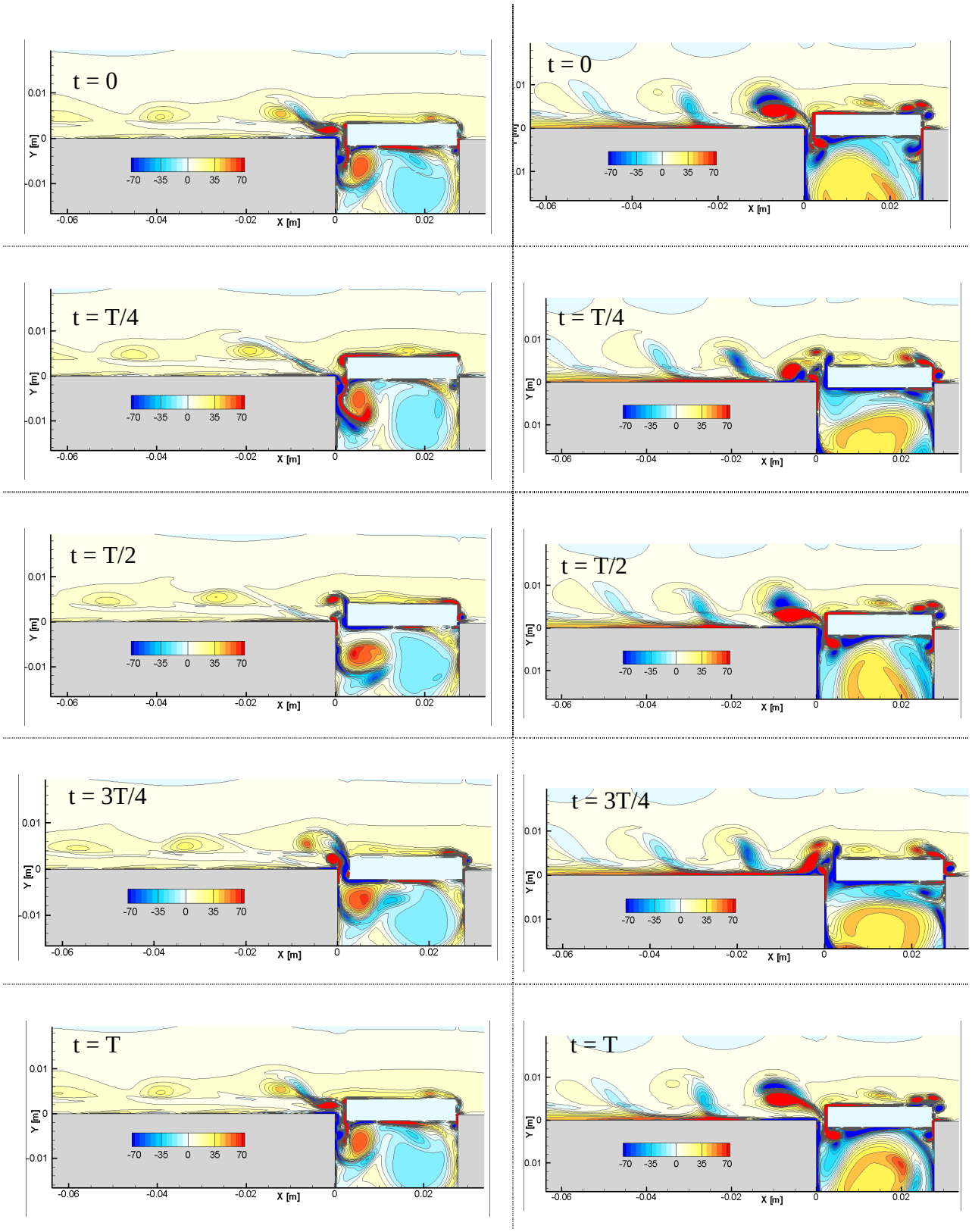
EK A



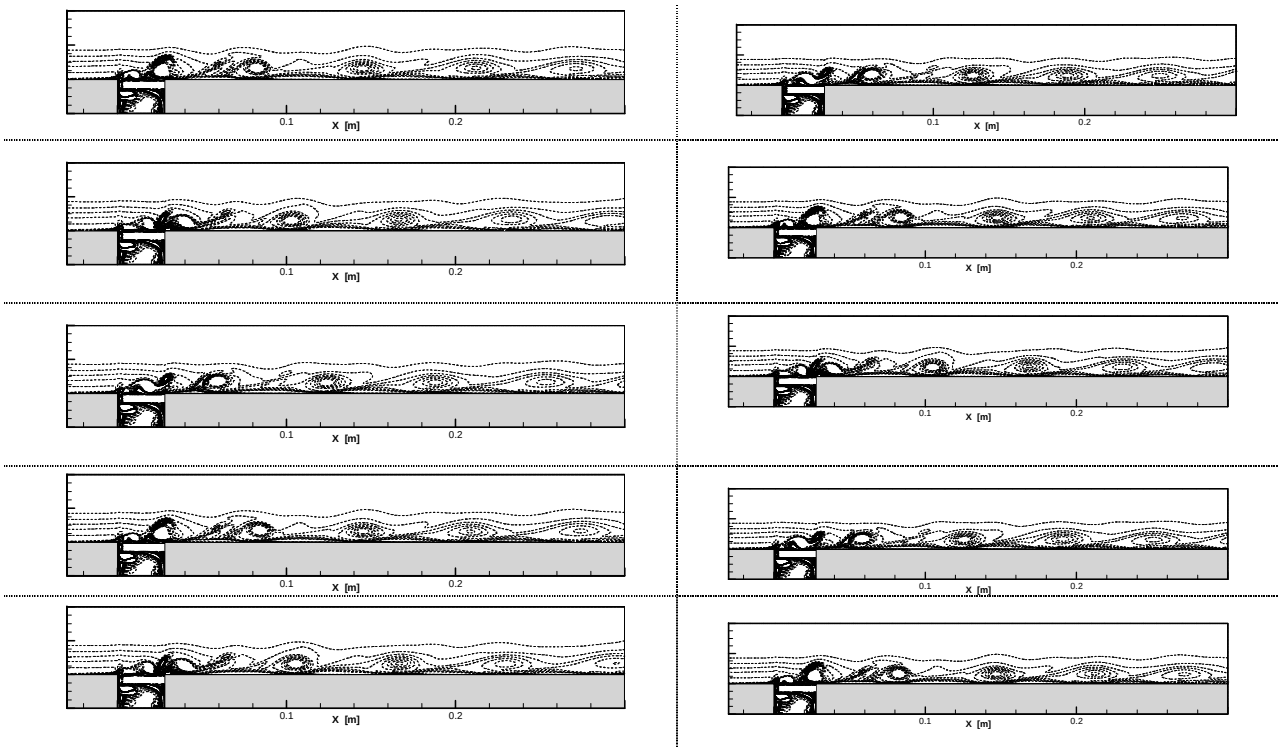
Şekil A.1 : Bir periyot içerisinde a = 1 mm , b = 25 mm (A) montajı Konum III için anlık vortisite alanları: sol sütun : f = 2 Hz, sağ sütun: f = 4 Hz.



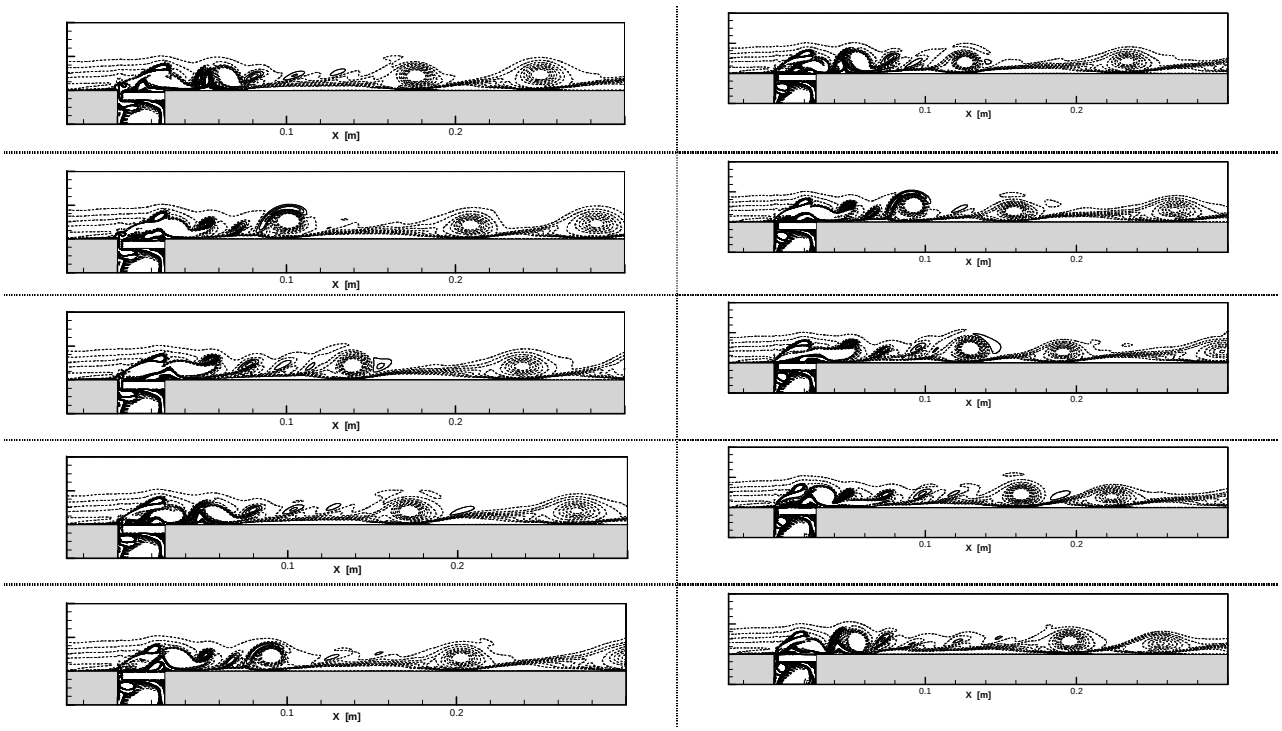
Şekil A.2 : Bir periyot içerisinde a = 2 mm , b = 25 mm (A) montajı Konum III için anlık vortisite alanları: sol sütun : f = 1 Hz, sağ sütun: f = 2 Hz.



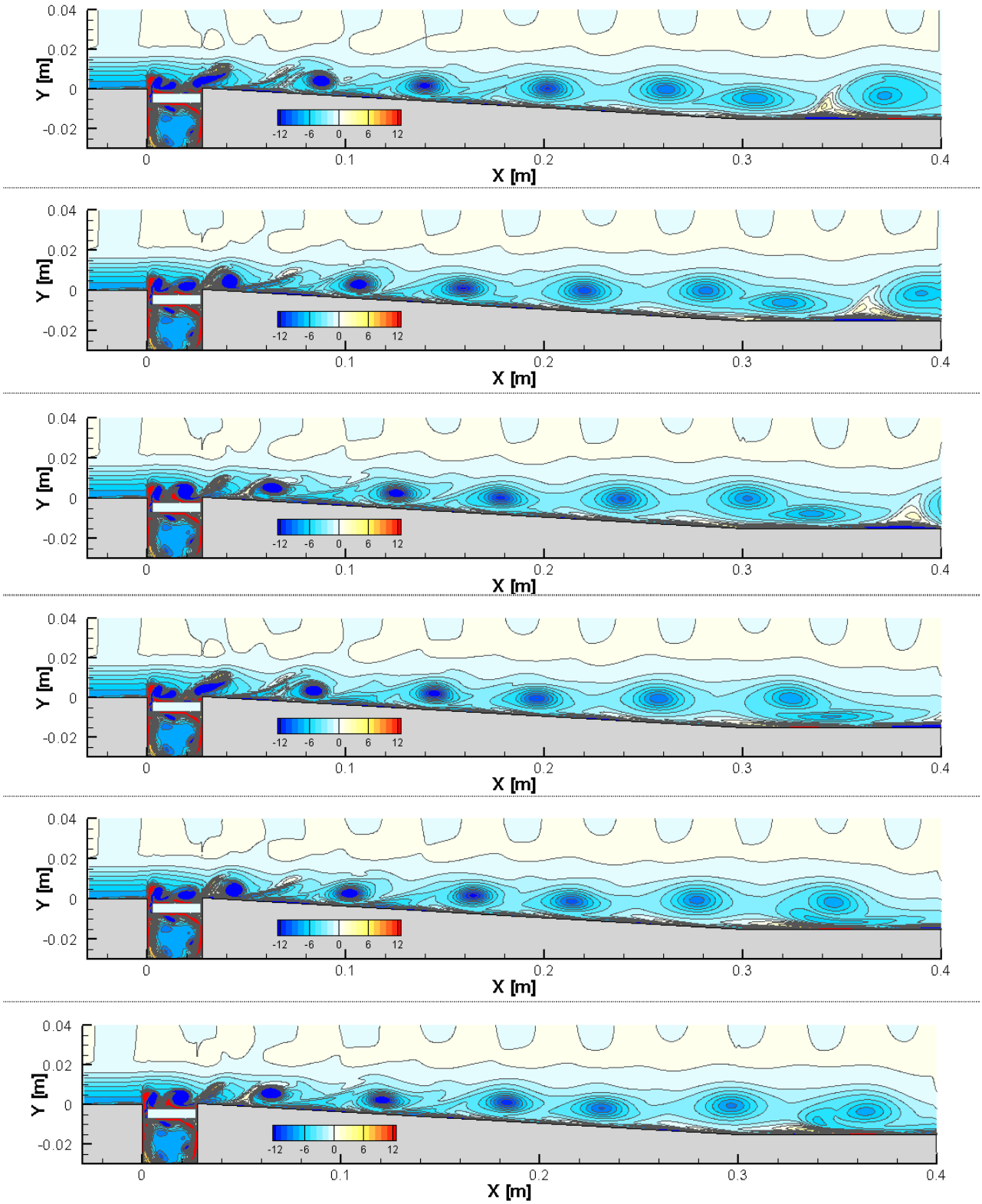
Şekil A.3 : Bir periyot içerisinde a = 1 mm , b = 25 mm (B) montajı Konum I için anlık vortisite alanları: sol sütun : f = 2 Hz, sağ sütun: f = 4 Hz.



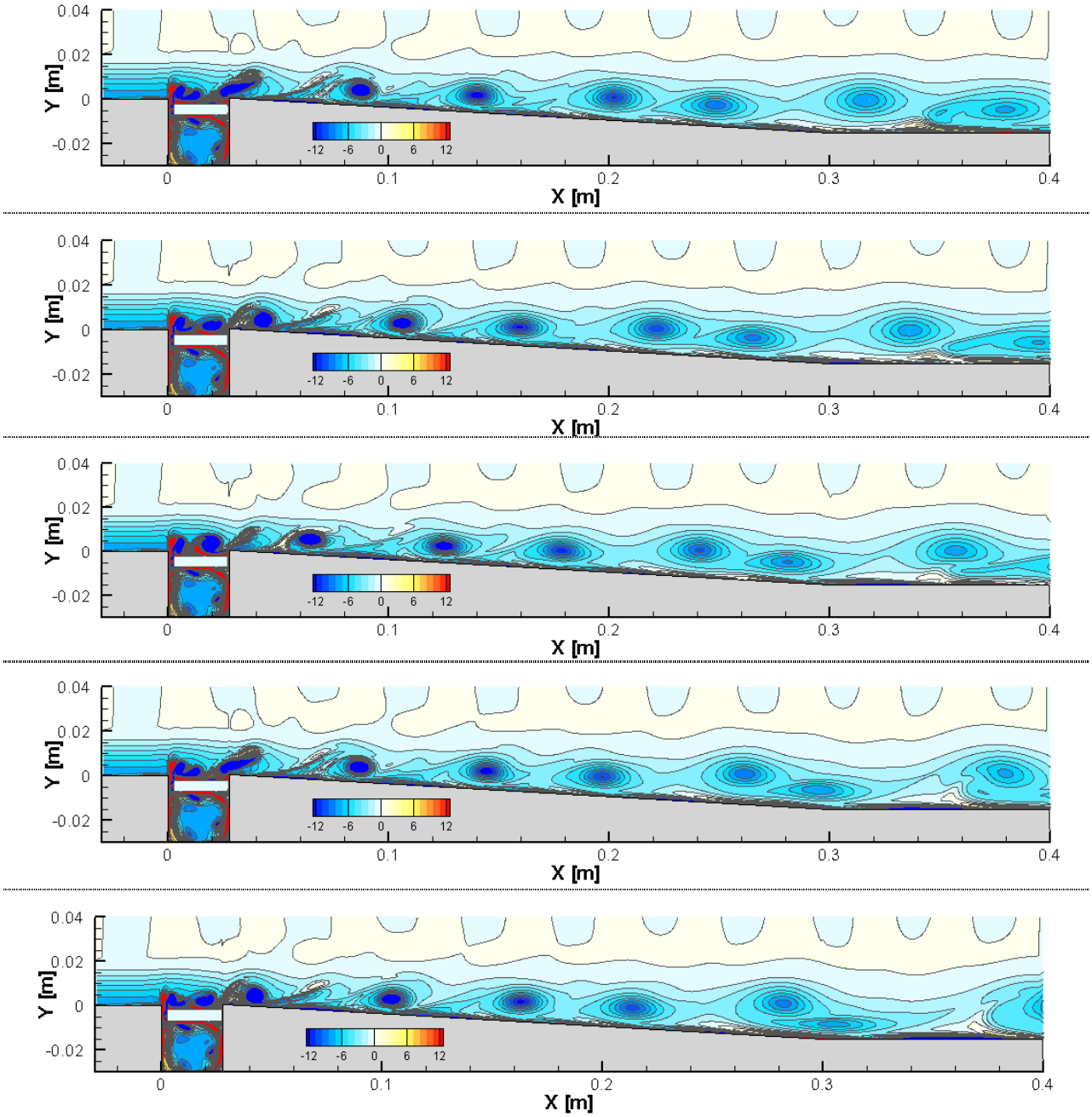
Şekil A.4 : Bir periyot içerisinde a = 1 mm , b = 25 mm, f = 2 Hz, (A) montajı Konum II için anlık vortisite alanları: sol sütun : 1., 21.,41.,61.,81. akış alanları, sağ sütun : 101., 121.,141.,161.,181. akış alanları.



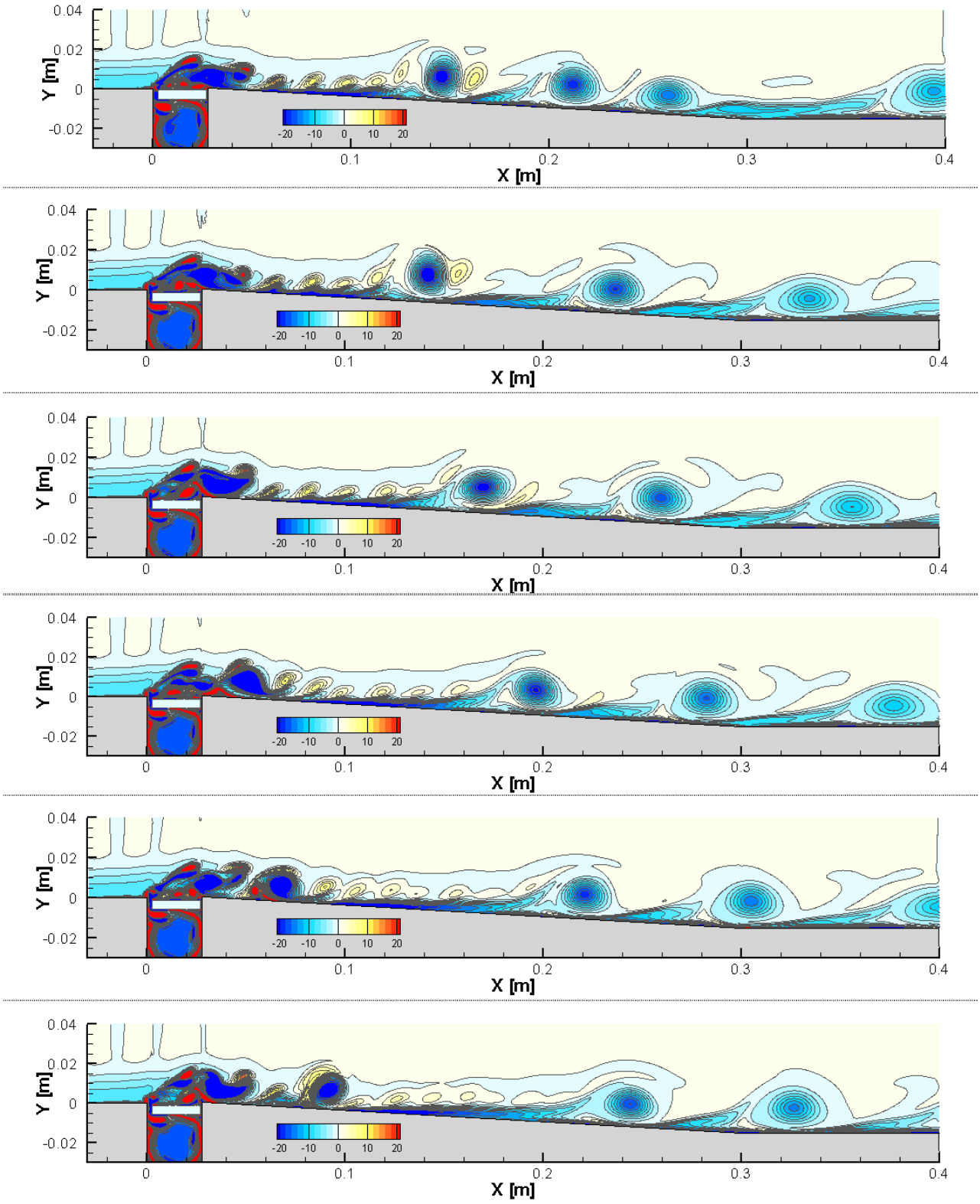
Şekil A.5 : Bir periyot içerisinde a = 1 mm , b = 25 mm, f = 3 Hz, (A) montajı Konum II için anlık vortisite alanları: sol sütun : 1., 22.,43.,64.,85. akış alanları, sağ sütun : 106., 127.,148.,169.,190. akış alanları.



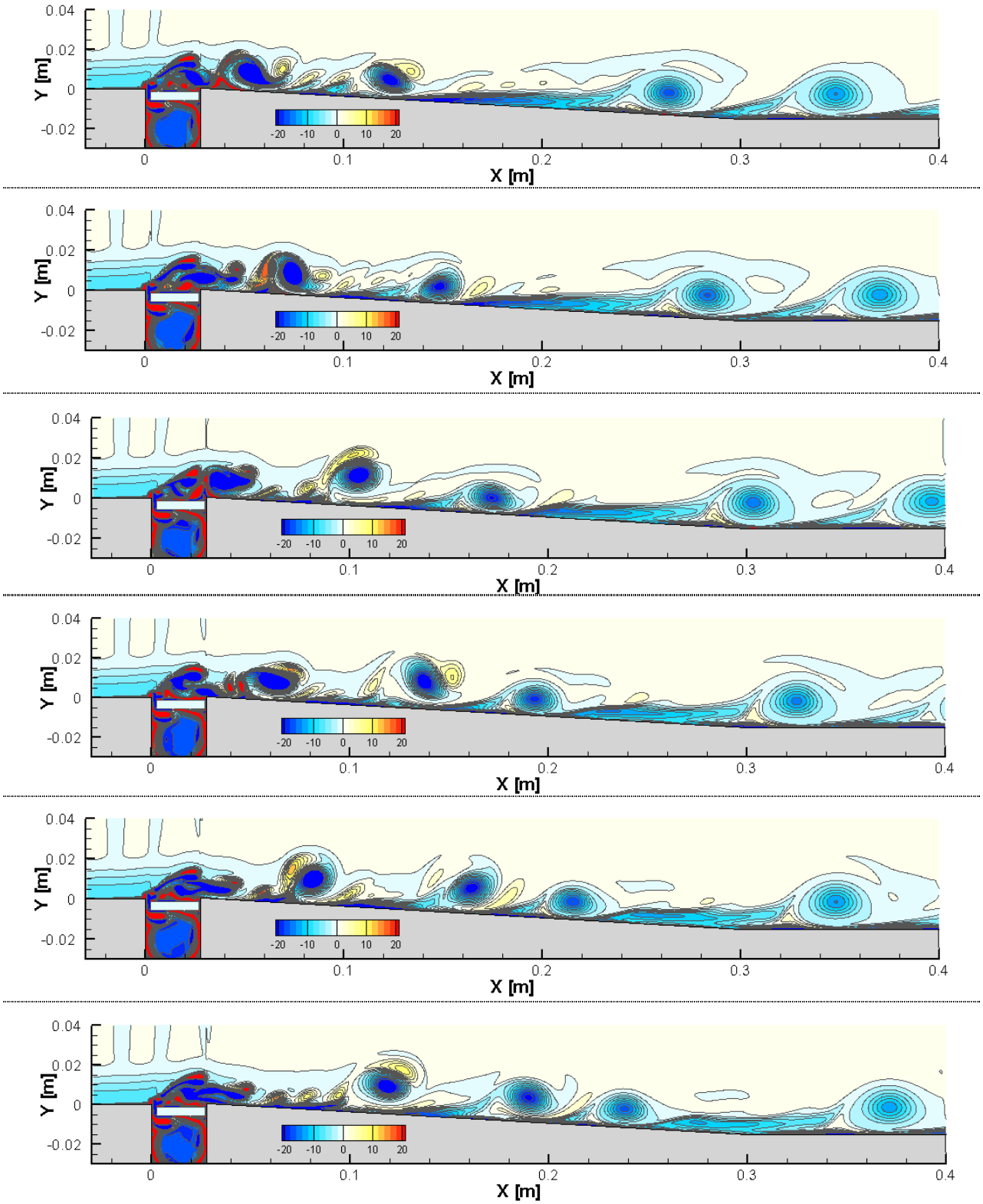
Şekil A.6 : Bir periyot içerisinde a = 1 mm , b = 25 mm, f = 2 Hz, (A) montajı Konum II için rampa ve müteakip düz levha üzerindeki 1.,21.,41.,61.,81. ve 101. anlık vortisite alanları.



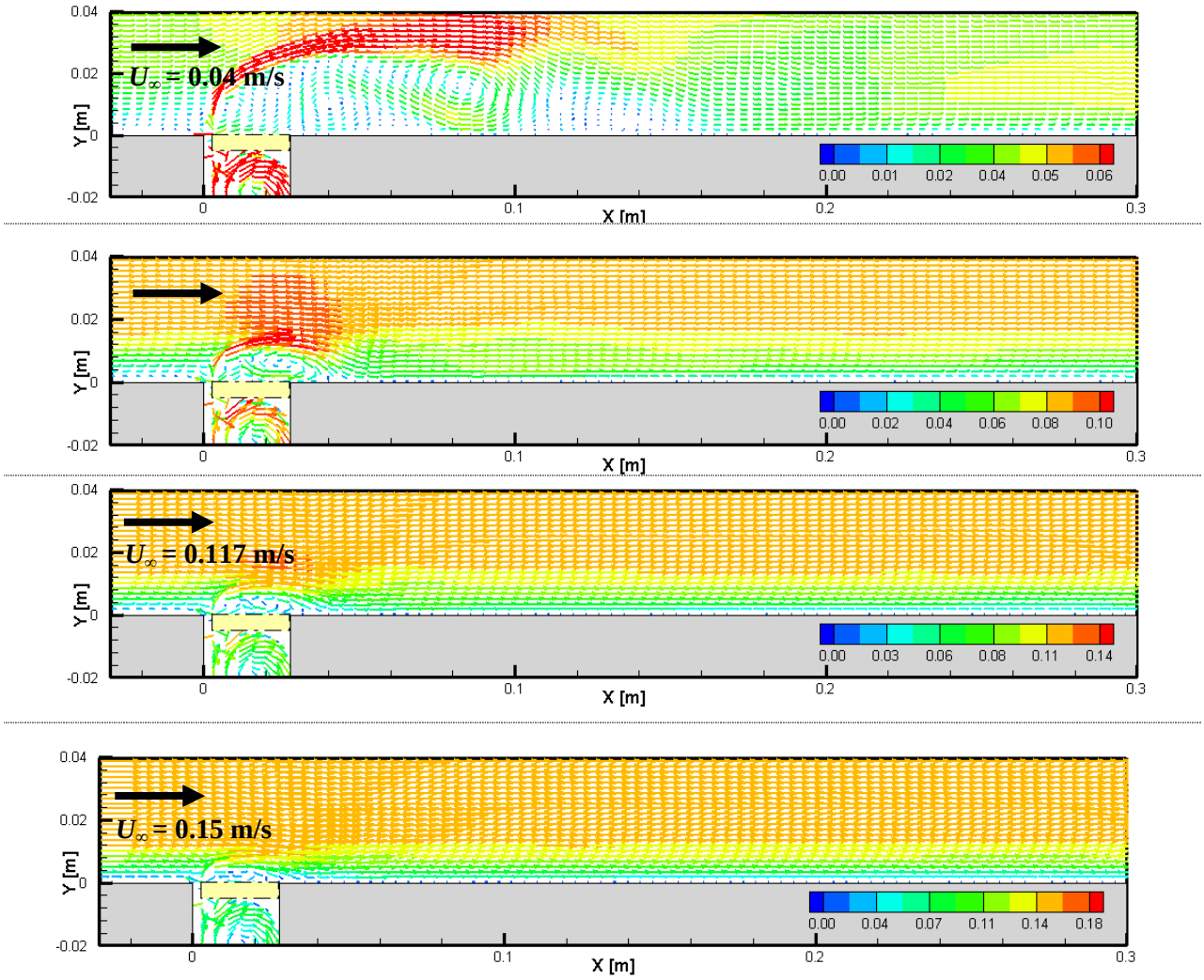
Şekil A.7 : Bir periyot içerisinde a = 1 mm , b = 25 mm, f = 2 Hz, (A) montajı Konum II için rampa ve müteakip düz levha üzerindeki 121.,141.,161.,181. ve 200. anlık vortisite alanları.



Şekil A.8 : Bir periyot içerisinde a = 1 mm , b = 25 mm, f = 4 Hz, (A) montajı Konum II için rampa ve müteakip düz levha üzerindeki 1.,21.,41.,61.,81 ve 101. anlık vortisite alanları.



Şekil A.9 : Bir periyot içerisinde a = 1 mm , b = 25 mm, f = 4 Hz, (A) montajı Konum II için rampa ve müteakip düz levha üzerindeki 121.,141.,161.,181., 201. ve 221. anlık vortisite alanları.



Şekil A.10 : Değişik serbest akım hızlarında a = 1 mm , b = 25 mm, f = 4 Hz, (A) montajı Konum II için düz levha üzerindeki ortalama akış alanları [m/s].

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: **Sertaç Çadırcı**

Doğum Yeri ve Tarihi: **İstanbul, 27.06.1978**

Adres: **İTÜ Makina Fakültesi 34437 İstanbul**

Lisans Üniversite: **YTÜ Makina Fakültesi- Makina Mihendisliği**

Yayın Listesi:

Cadirci S., Gunes H., Rist U., "Numerical Investigation of Jet and Vortex Actuator (JaVA) for Active Flow Control" AIAA- 5th Flow Control Conference, 28 Haziran-01 Temmuz 2010 Chicago,ABD.

Cadirci S., Gunes H., "On the Use of POD Models for Convective Flow in a Grooved Channel" ESDA2010-24892**,** Proceedings of the ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering System Design and Analysis ESDA2010, 12-14 Temmuz 2010, Istanbul, Turkey. (genişletilmiş özet kabul edildi).

Gunes H., **Cadirci S**., Gocmen K., "Numerical Simulation of Mixed Convection in a Rectangular Cavity with Multiple Heat Sources" IMECE2009-11472, ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 13-19 Kasım 2009, Orlando, ABD.

Gunes H., **Cadirci S**.,"Modeling and Inverse Design of Convective Heat Transfer in a Grooved Channel Using Proper Orthogonal Decomposition" IMECE2009-10780, ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 13-19 Kasım 2009, Orlando, ABD.

Gunes H., **Cadirci S**., Rist U., Peters B., "Experimental Investigation of Jet and Vortex Actuator Using Particle Image Velocimetry" IMECE2009-11451, ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 13-19 Kasım 2009, Orlando, ABD.

Rist, U., Gunes, H., **Cadirci, S**., "Qualitative and quantitative characterization of a Jet and Vortex Actuator" - 16-18 Ekim 2008 / FLUBIO Workshop, İtalya.

Hasan Güneş, **Sertaç Çadırcı**, Alpay Akgüç, "Taşınımla Isı Transferinin Kriging - Benzetilmiş Tavlama ile Modellenmesi ve Optimizasyonu" - Bilimde Modern Yöntemler Sempozyumu, 15-17 Ekim 2008, Osmangazi Üniversitesi- Eskişehir.

Güneş H., **Çadırcı S**., Rist U., "Akış Kontrolü İçin Jet ve Vorteks Aktüatör (JaVA) Akış Tiplerinin Deneysel İncelenmesi"- II. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, 15-17 Ekim 2008, İTÜ- İstanbul.

Güneş H., **Çadırcı S**., Baldani F., Peters B., Rist U., "Temporal Analysis of Jet and Vortex Actuator (JaVA)-induced Flows"- International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, 16-19 Eylül 2008, Technical University of Berlin, Berlin, Almanya.

Güneş H., **Çadırcı S**., Rist U., "An Experimental Investigation of Jet and Vortex Actuator for Active Flow Control"- 4th AIAA Flow Control Conference / Actuator Induced Flow Types 23-26 Haziran 2008, Seattle, ABD.

Hasan Güneş, **Sertaç Çadırcı**, Ulrich Rist (2007): Spatial resolution enhancement and smoothing of experimental data: DNS-based versus Kriging interpolation, IAG report IB 07-03 / 29 Aralık 2007, (Üniversite Bülteni)- Stuttgart, Almanya

Rist U., Güneş H., **Çadırcı S**., 13. STAB Workshop; 14-16 Kasım 2007/ DLG- Göttingen Almanya.