

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YALPA OMURGA GEOMETRİSİNİN SÖNÜM KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE
ETKİLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Hasan İslam ÇOPUROĞLU

NİSAN 2023
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YALPA OMURGA GEOMETRİSİNİN SÖNÜM KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE
ETKİLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Hasan İslam ÇOPUROĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 03 / 04 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 28 / 04 / 2023

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Emre PEŞMAN

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

Yalpa hareketinin deney teknikleri ile analizlerini gerçekleştirmek üzere kurgulanan bu tez çalışması benim için bir doktora çalışmasından öte, başından itibaren bir tutku projesi haline geldi. İşte bu tutku ile hazırlanan deneyler ve analizler bu tez çalışmasının ortaya çıkmasına neden oldu. Deneysel olarak çalışmayı gerçekleştirebilmek gerçekten çok zorlayıcı bir süreçti. Bu süreçte bana gerekli yardımı ve desteği veren herkese müteşekkirim.

Hazırlamış olduğum doktora tezinde tüm iyi niyetiyle yardımlarını esirgemeyen, çalışmalarında hep yol gösteren ve beni araştırma yapmak için Japonya'ya gitmeye teşvik eden danışman hocam Doç. Dr. Emre PEŞMAN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca desteklerinden ve yardımlarından dolayı KTÜ Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Ercan KÖSE'ye, KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Yücel ÖZMEN'e teşekkür ederim. Deneylerim esnasında bana yol gösteren ve deney imkânı sunan Osaka Metropolitan Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Dr. Toru KATAYAMA'ya, yapmış olduğum çalışmayı takip eden ve önerilerini esirgemeyen Prof. Dr. Yoshiho IKEDA'ya ayrıca deneylerim boyunca bana yardımcı olan Katayama Laboratuvarı öğrencilerine teşekkür ederim. 2022 Yılı BİDEB 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Bursu ile araştırmacı olarak Japonya, Osaka Metropolitan Üniversitesi'ne gitmeme ve tez çalışmamda kullandığım deneysel yöntemleri öğrenmeme vesile olan TÜBİTAK'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Benden desteklerini esirgemeyen, her zor anımda yanımda olan kardeşlerim, anne ve babama şükranlarımı sunarım. Bu süreçte fedakârlık gösteren biricik eşim Özlem ÇOPUROĞLU'na ve canım kızım Zeynep Ayla ÇOPUROĞLU'na sonsuz teşekkür ederim.

Hasan İslam ÇOPUROĞLU

Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Yalpa Omurga Geometrisinin Sönüm Karakteristikleri Üzerine Etkilerinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Emre PEŞMAN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri ve örnekleri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 28.04.2023

Hasan İslam ÇOPUROĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIX
SEMBOLLER DİZİNİ	XX
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Genel Bilgiler ve Tezin Amacı.....	1
1.2. Literatür Özeti	2
1.3. Kapsam	5
2. YALPA HAREKETİ VE YALPA SÖNÜMÜ	6
2.1. Yalpa Hareketi ve Yalpa Sönümünün Tanımlanması ve Analizi.....	6
2.2. Yalpa Sönümünü Hesaplama Yöntemleri	8
2.3. Deneysel Yalpa Sönümü Hesaplama Yöntemleri	9
2.3.1. Serbest Bırakma Deneyi ile Yalpa Sönümü Hesabının Yapılması	10
2.3.2. Zorlanmış Yalpa Deneyi ile Yalpa Sönümü Hesabı.....	13
2.4. Ikeda Metodu ile Yalpa Sönümü Hesabı.....	14
2.4.1. Sürtünme Bileşeni.....	15
2.4.2. Girdap Oluşturma Bileşeni	17
2.4.3. Kaldırma Kuvveti Bileşeni	19
2.4.4. Dalga Yapma Bileşeni	20
2.4.5. Yalpa Omurgası Bileşeni.....	21
3. YALPA SÖNÜMÜNÜN AKIŞ GÖRÜNTÜLEME İLE ANALİZİ.....	27
3.1. Akış Görüntüleme Teknikleri.....	27
3.2. Parçacıklı Akış Görüntüleme Hız Ölçümü Tekniği (PIV)	27
3.2.1. PIV Sistemi Donanımları ve Bileşenleri	28

3.2.2.	Görüntü Edinimi	29
3.2.2.	Aydınlatma	30
3.2.3.	Parçacık	31
3.2.4.	Görüntü Analiz Süreci	33
3.2.5.	Üç Boyutlu PIV Teknikleri	35
4.	YALPA SÖNÜMÜNÜN DENEYSEL ANALİZİNİN YAPILMASI	37
4.1.	Model ve Yalpa Omurgası Özellikleri.....	37
4.2.	Çekme Tankı Özellikleri	40
4.3.	Zorlayıcı Yalpa Mekanizması	41
4.4.	Serbest Bırakma Testi Mekanizması	43
4.5.	Deneylerde Kullanılan PIV Donanımı	44
4.6.	Veri Toplama.....	49
4.7.	Deney Koşulları.....	53
4.8.	Deney Sonuçlarının Elde Edilmesi.....	54
5.	YALPA SÖNÜMÜNÜN SAYISAL ANALİZİ.....	55
5.1.	Akışkan Hareketinin Temel Denklemleri.....	55
5.2.	Lattice-Boltzmann Yöntemi Denklemleri	58
5.3.	Duvar Adaptasyonlu Yerel Eddy Türbülans Modeli (WALE).....	60
5.4.	Sayısal Çözücü	62
5.5.	Yalpa Hareketinin Sayısal Olarak Modellenmesi	62
5.5.1.	Sınır Şartları.....	65
5.5.2.	Yalpa Hareketinin Modellenmesi.....	65
5.6.	Doğrulama ve Hassaslık Analizleri	67
6.	YALPA OMURGASI GÖVDE ŞEKLİNİN YALPA SÖNÜMÜNE ETKİSİ .	71
6.1.	Yalpa Omurgalarının Gövde Şekillerinin Karşılaştırılması	71
6.2.	Zorlanmış Yalpa Testi Sonuçları.....	72
6.2.1.	Yalpa Momenti Analizi Sonuçları.....	72
6.2.2.	Yalpa Sönümü Katsayısı Sonuçları	74
6.2.3.	PIV Analizi Sonuçları.....	76
6.3.	Serbest Bırakma Testi Sonuçları	81
6.3.1.	Serbest Bırakma Testi Deneyi Sonuçları.....	81
6.3.2.	Serbest Bırakma Testi Sayısal Analiz Sonuçları	83

6.4.	Yalpa Sönüm Katsayılarının Ikeda Tahmin Yöntemi ile Karşılaştırılması.....	85
6.4.1.	Ikeda Yöntemi'nde Yapılması Önerilen İyileştirme Analizi.....	89
7.	SONUÇLAR, TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	93
8.	KAYNAKLAR.....	96
9.	EKLER	102
ÖZGEÇMİŞ		



Doktora Tezi

ÖZET

YALPA OMURGA GEOMETRİSİNİN SÖNÜM KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE
ETKİLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Hasan İslam ÇOPUROĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Emre PEŞMAN
2023, 101 Sayfa, 55 Sayfa Ek

Yalpa hareketinden kaynaklanan büyük yalpa genlikleri istenmeyen durumlardan birisidir, bundan ötürü yalpa hareketinin ve bununla doğrudan bağlı olan yalpa sönümünün detaylıca analiz edilmesi önem arz etmiştir. Bu tez çalışmasında farklı tip geometrik şekillere sahip yalpa omurgalarının gemi modeli üzerindeki yalpa ve sönüm karakteristikleri farklı yalpa genlikleri altında deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneyler ve sayısal analizler sonucunda elde edilen boyutsuz yalpa sönüm katsayıları karşılaştırıldığında, alışlagelmiş olan levha omurga şeklinin dışındaki geometrik şekilli yalpa omurgalarının farklı yalpa sönüm katsayılarına sahip olduğu görülmüştür. Yalpa omurgalarının geometrik özelliklerinin etkili olduğu görülmüştür. Köşeli uç kısma sahip yalpa omurgalarının daha yüksek yalpa sönüm katsayılarına sahip olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlardan hareketle, yalpa omurgası uç girdap büyüklüğünü ve dolayısıyla da yalpa sönüm katsayısını artırabilmek için, yalpa omurgası tasarımlarında levha köşe ve uçlarının sivriltilmesi önerilmiştir. Ikeda yöntemi ile de karşılaştırmalar yapılmış olup, Ikeda yöntemini iyileştirmek için önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler :Yalpa sönümü, yalpa omurgası, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, deneysel akışkanlar dinamiği, PIV, Ikeda metodu

PhD. Thesis

SUMMARY

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF
BILGE KEEL GEOMETRY ON DAMPING CHARACTERISTICS

Hasan İslam ÇOPUROĞLU

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Naval Architecture and Marine Engineering
Supervisor: Associate Prof. Dr. Emre PEŞMAN
2023, 101 Pages, 55 Pages Appendix

Large roll amplitudes due to roll motion are undesirable. For this reason, it is important to analyze the roll motion and the roll damping directly related to it in detail. In this thesis, the roll and damping characteristics of bilge keels with different types of geometric shapes on the ship model are investigated experimentally and numerically under different roll amplitudes. From the comparison of the dimensionless roll damping coefficients obtained by experiments and numerical analyses, it is seen that geometrically shaped bilge keels other than the usual plate bilge keel shape have different roll damping coefficients. It has been observed that the shape features of the bilge keels are effective on roll damping. Roll keels with sharper tip ends are found to have higher roll damping coefficients. Based on these results, it has been suggested that the corners and tip ends of the plate should be sharpened in roll keel designs in order to increase the roll damping coefficient. Also, comparisons are made with the Ikeda method, and suggestions are made to improve it.

Key Words :Roll damping, roll spine, computational fluid dynamics, experimental fluid dynamics, PIV, Ikeda method

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Altı serbestlik dereceli gemi hareketleri.....	6
Şekil 2.2. Yalpa yapan bir geminin üzerine etki eden kuvvet ve moment ve kuvvetlerin gemi kesiti üzerinde gösterimi	7
Şekil 2.3. (a) Serbest bırakma deneyi mekanizması (b) Yalpa periyotlarının değişimi	11
Şekil 2.4. Serbest bırakma testi sonucunda elde edilen yalpa genliklerinin isimlendirilmesi	12
Şekil 2.5. (a) Zorlanmış yalpa deneyi mekanizması (b) Yalpa periyotlarının değişimi ...	14
Şekil 2.6. Profesör Ikeda'nın çalışmasında kullandığı silindirik model.....	15
Şekil 2.7. Gövdeden ayrılan girdapların gösterimi.....	18
Şekil 2.8. Gövde üzerindeki kabul edilen basınç dağılımı	19
Şekil 2.9. Gövdedeki kabul edilen basınç dağılımları	23
Şekil 3.1. PIV analiz süreçleri	28
Şekil 3.2. PIV'de kullanılan temel bileşenler.....	29
Şekil 3.3. Otokorelasyon haritası.....	34
Şekil 4.1. Model 35'e ait, (a) dijital katı model izometrik görünümü, (b) sintine dönümleri ve karina görünümü (c) modelin profilden görünümü	38
Şekil 4.2. Yalpa omurgalarının orta kesitlerinin temel ölçüleri	39
Şekil 4.3. (a) 3 boyutlu yazıcıda üretilen yalpa omurgası çiftleri (b) Yüzey işlemi gerçekleştirilmiş olan yalpa omurgası örneği (c) Yalpa omurgasının görünümü.....	40
Şekil 4.4. (a) Çekme tankının orijinal kılavuzundan alınan ölçüleri (b) Çekme tankının görünümü.....	41
Şekil 4.5. Zorlayıcı yalpa mekanizmasının (a) şematik gösterimi (b) fotoğrafı.....	42
Şekil 4.6. Model ve mekanizmanın bağlantı resimleri	43
Şekil 4.7. Serbest bırakma mekanizması	44
Şekil 4.8. PIV donanımının konumlandırıldığı cam pencere açıklığı	45

Şekil 4.9. Kamera, lazer, yansıtıcı ayna ve donanımların konumlarının görünümü	47
Şekil 4.10. PIV parçacığı	48
Şekil 4.11. PIV görüntü bağdaştırıcı	48
Şekil 4.12. Deneylerde kullanılan PIV donanımının şematik olarak görünümü	49
Şekil 4.13. Strengecin kalibre edilmesi işlemi	50
Şekil 4.14. Zorlayıcı yalpa testinde veri toplama işlemi şeması	50
Şekil 4.15. PIV veri toplama şeması.....	51
Şekil 4.16. (a) gemi modeli üzerindeki görüntü yakalama yansıtıcıları, (b) görüntü yakalayan kamera donanımı	52
Şekil 4.17. Görüntü işleme programının arayüzü ve veri çıktıları penceresi	52
Şekil 5.1. D2Q9 kare kafes modeli.....	60
Şekil 5.2. Çözüm hacminin gösterimi	63
Şekil 5.3. 3 boyutlu çözümlemelerde kullanılan parçacık yoğunluğu kafes yapıları	63
Şekil 5.4. Parçacık yoğunluğu görünimleri	64
Şekil 5.5. 20 derecelik yalpa genliği için elde edilen yalpa açısı zaman grafiği	66
Şekil 5.6. 20 derece ilk meyil açısı ile serbest bırakma testi simülasyonu için elde edilen yalpa açısı zaman grafiği	67
Şekil 5.7. Farklı parçacık yoğunlukları için yalpa sönüm katsayıları (3B)	68
Şekil 5.8. Farklı parçacık yoğunlukları için yalpa sönüm katsayıları (2B)	69
Şekil 5.9. Yalpa momenti zaman grafiği (3B).....	70
Şekil 5.10. Yalpa açısı zaman grafiği (2B).....	70
Şekil 6.1. Yalpa omurgası gövde şekli analizlerinde kullanılan yalpa omurgaların orta kesit görünimleri	71
Şekil 6.2. Deneylerden elde edilen (a) 5 derece yalpa genliği için (b) 10 derece yalpa genliği için (c) 15 derece yalpa genliği için (d) 15 derece yalpa genliği için yalpa açısı zaman grafiği	72
Şekil 6.3. Levha omurgalı konfigürasyon ve 20 derece yalpa genliği için Yalpa açısı ve yalpa momenti zaman değişimi	73

Şekil 6.4.	Faz farkının gösterimi	73
Şekil 6.5.	Farklı gövde şekillerine sahip yalpa omurgaları için boyutsuz yalpa sönüm katsayıları.....	75
Şekil 6.6.	Farklı gövde şekillerine sahip yalpa omurgaları için boyutsuz yalpa omurgası sönüm bileşeni katsayıları.....	76
Şekil 6.7.	Levha yalpa omurgalı konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu	77
Şekil 6.8.	Ölçüm alanından elde edilen hız vektörlerinin ortalaması	78
Şekil 6.9.	Levha yalpa omurga konfigürasyonu için girdap ve akış çizgisi dağılımları...	79
Şekil 6.10.	Kanat kesit yalpa omurga konfigürasyonu için girdap ve akış çizgisi dağılımları.....	79
Şekil 6.11.	Oval kesit yalpa omurga konfigürasyonu için girdap ve akış çizgisi dağılımları.....	79
Şekil 6.12.	Serbest bırakma deneyi testlerinden elde edilen yalpa açısı, zaman grafikleri (tam ölçek).....	82
Şekil 6.13.	Serbest bırakma deneyi testlerinden elde edilen yalpa açısı, zaman grafikleri (yakınlaştırılmış).....	82
Şekil 6.14.	Serbest bırakma deneyinden elde edilen yalpa sönüm katsayıları	83
Şekil 6.15.	Serbest bırakma testleri sayısal analizlerinden elde edilen yalpa açısı, zaman grafikleri (tam ölçek)	84
Şekil 6.16.	Serbest bırakma testleri sayısal analizlerinden elde edilen yalpa açısı, zaman grafikleri (yakınlaştırılmış).....	84
Şekil 6.17.	İki boyutlu serbest bırakma testi sayısal analizlerinden elde edilen boyutsuz yalpa sönüm katsayıları	85
Şekil 6.18.	Deneylerden elde edilen yalpa sönüm katsayılarının Ikeda yöntemi ile karşılaştırılması.....	86
Şekil 6.19.	Yalpa omurgası sönüm bileşenin Ikeda yöntemi ile karşılaştırılması.....	87
Şekil 6.20.	Deneyler esnasında serbest su yüzeyinin bozulması ve hava kabarcıklarının gösterimi	88
Şekil 6.21.	Yalpa omurgası sürüklenme katsayıları	90

Şekil 6.22. HAD analizleri sonucu elde edilmiş olan farklı şekle sahip yalpa omurgaları için KC- Cd grafiği	91
Şekil 6.23. Düzenlenmiş C_D değerleri için Ikeda metodundan elde edilen yalpa omurgası sönüm katsayıları	92
Ek Şekil 1. Yalpa omurgasız, 5 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği	102
Ek Şekil 2. Yalpa omurgasız, 10 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği	102
Ek Şekil 3. Yalpa omurgasız, 15 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği	103
Ek Şekil 4. Yalpa omurgasız, 20 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği	103
Ek Şekil 5. Levha omurgalı, 5 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği	103
Ek Şekil 6. Levha omurgalı, 10 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği	104
Ek Şekil 7. Levha omurgalı, 15 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği	104
Ek Şekil 8. Levha omurgalı, 20 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği	104
Ek Şekil 9. Kanat kesit yalpa omurgalı, 5 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği	105
Ek Şekil 10. Kanat kesit yalpa omurgalı, 10 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği	105
Ek Şekil 11. Kanat kesit yalpa omurgalı, 10 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği	105
Ek Şekil 12. Kanat kesit yalpa omurgalı, 20 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği	106
Ek Şekil 13. Oval kesit yalpa omurgalı, 5 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği	106
Ek Şekil 14. Oval kesit yalpa omurgalı, 10 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği	106

Ek Şekil 15. Oval kesit yalpa omurgalı, 15 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği	107
Ek Şekil 16. Oval kesit yalpa omurgalı, 20 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği	107
Ek Şekil 17. Üçgen kesit yalpa omurgalı, 5 derece yalpa genliği konfigürasyonu için HAD analizinden elde edilen yalpa momenti zaman grafiği	107
Ek Şekil 18. Üçgen kesit yalpa omurgalı, 10 derece yalpa genliği konfigürasyonu için HAD analizinden elde edilen yalpa momenti zaman grafiği	108
Ek Şekil 19. Üçgen kesit yalpa omurgalı, 15 derece yalpa genliği konfigürasyonu için HAD analizinden elde edilen yalpa momenti zaman grafiği	108
Ek Şekil 20. Üçgen kesit yalpa omurgalı, 20 derece yalpa genliği konfigürasyonu için HAD analizinden elde edilen yalpa momenti zaman grafiği	108
Ek Şekil 21. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, +5 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	109
Ek Şekil 22. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	110
Ek Şekil 23. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, -5 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	111
Ek Şekil 24. Levha yalpa omurgalı konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, +5 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	112
Ek Şekil 25. Levha yalpa omurgalı konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	113
Ek Şekil 26. Levha yalpa omurgalı konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, -5 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	114
Ek Şekil 27. Kanat kesit omurgalı konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, +5 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	115
Ek Şekil 28. Kanat kesit yalpa omurgalı konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	116

Ek Şekil 29. Kanat kesit omurgalı konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, -5 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	117
Ek Şekil 30. Oval kesit yalpa omurgalı konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, +5 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	118
Ek Şekil 31. Oval kesit yalpa omurgalı konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	119
Ek Şekil 32. Oval kesit yalpa omurgalı konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, -5 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	120
Ek Şekil 33. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, +10 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	121
Ek Şekil 34. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	122
Ek Şekil 35. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, -10 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	123
Ek Şekil 36. Levha yalpa omurgalı konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, +10 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	124
Ek Şekil 37. Levha yalpa omurgalı konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	125
Ek Şekil 38. Levha yalpa omurgalı konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, -10 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	126
Ek Şekil 39. Kanat kesit yalpa omurgalı konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, +10 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	127
Ek Şekil 40. Kanat kesit yalpa omurgalı konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	128

Ek Şekil 41. Kanat kesit yalpa omurgalı konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, -10 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	129
Ek Şekil 42. Oval kesit yalpa omurgalı konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, +10 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	130
Ek Şekil 43. Oval kesit yalpa omurgalı konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	131
Ek Şekil 44. Oval kesit yalpa omurgalı konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, -10 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	132
Ek Şekil 45. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 15 derece yalpa genliği, +15 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	133
Ek Şekil 46. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 15 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	134
Ek Şekil 47. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 15 derece yalpa genliği, -15 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	135
Ek Şekil 48. Levha yalpa omurga konfigürasyonun, 15 derece yalpa genliği, +15 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	136
Ek Şekil 49. Levha yalpa omurga konfigürasyonun, 15 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	137
Ek Şekil 50. Levha yalpa omurga konfigürasyonun, 15 derece yalpa genliği, -15 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	138
Ek Şekil 51. Kanat kesit yalpa omurga konfigürasyonun, 15 derece yalpa genliği, +15 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	139
Ek Şekil 52. Kanat kesit yalpa omurga konfigürasyonun, 15 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	140

Ek Şekil 53. Kanat kesit yalpa omurga konfigürasyonun, 15 derece yalpa genliği, -15 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	141
Ek Şekil 54. Oval kesit yalpa omurga konfigürasyonun, 15 derece yalpa genliği, +15 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	142
Ek Şekil 55. Oval kesit yalpa omurga konfigürasyonun, 15 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	143
Ek Şekil 56. Oval kesit yalpa omurga konfigürasyonun, 15 derece yalpa genliği, -15 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	144
Ek Şekil 57. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 20 derece yalpa genliği, +20 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	145
Ek Şekil 58. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 20 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	146
Ek Şekil 59. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 20 derece yalpa genliği, -20 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	147
Ek Şekil 60. Levha yalpa omurga konfigürasyonun, 20 derece yalpa genliği, +20 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	148
Ek Şekil 61. Levha yalpa omurga konfigürasyonun, 20 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	149
Ek Şekil 62. Levha yalpa omurga konfigürasyonun, 20 derece yalpa genliği, -20 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	150
Ek Şekil 63. Kanat kesit yalpa omurga konfigürasyonun, 20 derece yalpa genliği, +20 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	151
Ek Şekil 64. Kanat kesit yalpa omurga konfigürasyonun, 20 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu.....	152

- Ek Şekil 65. Kanat kesit yalpa omurga konfigürasyonun, 20 derece yalpa genliği, -20 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu..... 153
- Ek Şekil 66. Oval kesit yalpa omurga konfigürasyonun, 20 derece yalpa genliği, +20 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu..... 154
- Ek Şekil 67. Oval kesit yalpa omurga konfigürasyonun, 20 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu..... 155
- Ek Şekil 68. Oval kesit yalpa omurga konfigürasyonun, 20 derece yalpa genliği, -20 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu..... 156

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Deneysel yalpa sönümü hesaplama yöntemlerinin karşılaştırılması.....	10
Tablo 4.1. Model 35'in temel parametreleri.....	37
Tablo 4.2. Dizayn edilen yalpa omurgalarının görünüşleri	39
Tablo 4.3. Yüksek hızlı kameraya ait temel özellikler	45
Tablo 4.4. Yüksek hızlı kameraya ait çözünürlük- saniye başı kare oranları.....	46
Tablo 4.5. PIV lazerin genel özellikleri.....	46
Tablo 5.1. Simülasyonlarda kullanılan parametreler.....	65

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Alan
A_{44}	: Ek su kütlelerinin atalet momenti
b_{BK}	: Yalpa omurgası genişliği
B	: Genişlik
B_{44}	: Yalpa sönüm katsayısı
$B_{\phi,1}$	: Lineer yalpa sönüm bileşeni
$B_{\phi,2}$	: Kuadratik yalpa sönüm bileşeni
$B_{\phi,1}$	: Kübik yalpa sönüm bileşeni
B_F	: Yalpa sönümünün sürtünme bileşeni
B_E	: Yalpa sönümünün girdap oluşturma bileşeni
B_L	: Yalpa sönümünün kaldırma kuvveti bileşeni
B_W	: Yalpa sönümünün dalga bileşeni
B_{BKN}	: Yalpa sönümünün yalpa omurgası normal bileşeni
B_{BKH}	: Yalpa sönümünün yalpa omurgası tekne etkileşimi bileşeni
B_{BKW}	: Yalpa sönümünün yalpa omurgası dalga bileşeni
B_{BKL}	: Yalpa sönümünün yalpa omurgası kaldırma kuvveti bileşeni
C_{44}	: Yalpa doğrultma katsayısı
C_B	: Blok katsayısı
C_D	: Sürüklenme katsayısı
C_M	: Orta kesit katsayısı
C_P	: Basınç katsayısı
C_R	: Artık katsayısı
C_f	: Sürtünme katsayısı
d	: Su çekimi (draft)
D	: Derinlik
d_{BK}	: Serbest su yüzeyinden yalpa omurgasına olan mesafe
F_n	: Normal basınç kuvveti

F_f	: Sürtünme kuvveti
F_b	: Kaldırma kuvveti
F_g	: Ağırlık kuvveti
g	: Yer çekimi ivmesi
GM	: Metasantr yüksekliği
GZ	: Doğrultucu moment kolu
H_0	: Yarı genişliğin su çekimine oranı
I_{44}	: Gemi yalpa atalet momenti
k_N	: Kaldırma eğimi
KG	: Ağırlık merkezinin omurgaya olan dikey mesafesi
L	: Uzunluk
M_ϕ	: Toplam yalpa momenti
OG	: Serbest su yüzeyinden ağırlık merkezine olan mesafe
r_{BK}	: Yalpa ekseninden yalpa omurgasına olan mesafe
R	: Sintine dönümü yarıçapı
S_f	: Sürtünme yüzeyi
T	: Yalpa periyodu
V	: İleri hız
ε	: Faz farkı
ν	: Kinematik viskozite
ω	: Yalpa frekansı
ϕ	: Yalpa açısı
ρ	: Yoğunluk
Δ	: Deplasman tonajı
σ	: Kesit katsayısı

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler ve Tezin Amacı

Bir gemi oluşan hidrodinamik kuvvetlerin etkisi altında 6 serbestlik dereceli bir hareket yapar. Altı serbestlik dereceli gemi hareketi, yalpa, dalıp- çıkma, baş-kıç vurma, boyuna öteleme, yan öteleme ve savrulma hareketi şeklinde bileşenlere ayrılabilir. Gemilerde denizcilik analizleri ve gemi hareketlerinin tahlili oldukça önemlidir. Dalıp çıkma, baş kıç vurma ve yalpa hareketleri diğerklerine göre daha ciddi zararlı etkiler yaratabilmektedir (Taylan, 1990).

Yalpa hareketi geminin boyuna eksenini etrafında sancak ve iskele yönüne doğru harmonik olarak gerçekteşen açısal bir harekettir. Yalpa hareketinden kaynaklanan büyük yalpa genlikleri istenmeyen durumlardan birisidir. Hatta güvenli stabilite sahası olarak kabul edilen doğrultucu moment bölgesinin dışında kalan salınımlarda geminin alabora olma, batma tehlikesi mevcuttur. Yalpa hareketi yolcu ve iş güvenliğı nedeni ile de olumsuz sonuçlar doğurabilir. Yolcular ve personel konforunu oldukça düşüren durumlara neden olmakla beraber aşırı genlikli ya da yüksek frekanslı yalpa hareketleri gemi içerisindeki yolcu ve personelin düşmesine, yaralanmasına dahi neden olabilir.

Bunun gibi nedenlerden ötürü, yalpa hareketinin ve bununla doğrudan bağı olan yalpa sönümünün detaylıca analiz edilmesi önem arz etmiştir. Bu gerekliliğinin bir sonucu olarak ise, birçok araştırmacı çalışmalarını, günden güne oluşturulan ve geliştirilen yasa ve yönetmeliklerle sonuçlanan yalpa hareketinin üzerine yoğunlaştırmıştır. Gemi yalpa hareketi üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır.

Tekne formunun yalpa hareketi esnasında akışkan ile oluşturduğı dinamikleri incelemek, analiz etmek ve oluşan akış formlarını gözlemlemek, bu hareketin zararlı etkilerini en az düzeye indirmek için oldukça önemlidir. Ayrıca elde edilen sonuçlarla, mevcut gemi hareket denklemlerini daha da iyileştirmek mümkün olabilir.

Bu tez çalışmasında farklı tip yalpa omurgasına sahip bir gemi modelinin yalpa ve sönüm karakteristikleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Parçacıklı Akış Görüntüleme Hız Ölçümü Tekniğı (PIV) (Von Karman Institute, 2001) kullanılarak farklı bir yaklaşımla, oluşacak olan akış yapılarını görüntülenmiş ve elden edilen sonuçlar hesaplamalı akışkanlar dinamiğı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Deneyle model geminin farklı yalpa omurgaları ile çekme tankında PIV, gerinim ölçer ve görüntü işleme ile incelenmesinden oluşmuştur. Deneyle çekme tankında TÜBİTAK BİDEB 2214-A burs programı kapsamında, Katayama Laboratuvarı, Osaka Metropolitan Üniversitesi, Japonya'da gerçekleştirilmiştir.

Hazırlanmış bu tez çalışmasında deneysel akışkanlar dinamiği yöntemlerinden faydalanılmıştır. Deneysel çalışma ile beraber sayısal çalışma ile desteklenen problemin çözümünün daha tatmin edici olacağı ortadadır. Bundan dolayı, deneysel çalışma ile beraber ayrıca bir sayısal çalışma da yapılmıştır. Bu sayısal çalışma deney ortamında gerçekleştirilen problemin hesaplamalı akışkanlar dinamiği paket programı ile simülasyonlarının yapılması şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Bu tez sonucunda yalpa hareketinin olumsuz etkilerine karşı kullanılacak olan yalpa engelleyici omurga sistemlerinin optimizasyonu ile daha etkin yalpa omurgası prototipleri ortaya çıkacak olup, gemi inşaatı sanayisinde bu alandaki çeşitliliği artıracığı düşünülmektedir. Ayrıca literatürde az sayıda bulunan gemi mühendisliği alanındaki akış görüntüleme çalışmalarına bir yenisi olarak eklenecek olup, bu alandaki sonraki çalışmalara destek olması amaçlanmıştır.

1.2. Literatür Özeti

Literatürde farklı gemi modellerinin yalpa ve yalpa sönüm hareketlerine dair yapılmış çalışmaların birçoğu ampiriktir, bazı deneysel ve az sayıda sayısal çalışma mevcuttur. Ayrıca yalpa hareketini inceleyen akış görüntüleme teknikleri kullanılan çok az çalışma bulunmaktadır.

Yalpa hareketi üzerine yapılmış olan ilk çalışmaların birçoğu deneyseldir. Yalpa hareketi analizinin yapıldığı ilk çalışmalardan birisi olarak Froude (1872) gösterilebilir. Froude (1872), hıza bağlı olarak enerji kayıplarını lineer ve kuadratik olarak formüllemiştir. Yapmış olduğu çalışmalar sonucunda yalpa hareketinin sönümünü iyileştirmek üzere yalpa omurgası kullanılmasını önermiştir. Serat (1933), küçük bir silindirin modelin ağırlık merkezinin yerini değiştirerek yalpa sönüm etkisini araştırmak için bir takım deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Prensi olarak silindir kullanmasına rağmen, deneylerinde üç boyut etkisini yok edemediği için iki boyutu temsil edememiştir. Ancak Baumann (1937) daha büyük dairesel bir silindir için iki boyutlu bir yaklaşım gerçekleştirmeyi başarmıştır. 2 boyutlu bir silindir kesiti için ek kütle atalet momentinin ve

yalpa sönümünün sıfır olduğunu fark etmiş, bu da onun serbestçe yüzen modeli için ek kütle ve yalpa sönümünü belirlemesinin önünü açmıştır. Hareketin yalnızca bir frekansını araştırmış, ancak sonuçları dikkate değer ölçüde doğru bir sıralamaya sahiptir. Ursell (1949), potansiyel teori ile karşılaştırmalı olarak çok düşük frekanslarda dalga ile yalpaya zorlanma deneyleri gerçekleştirmiştir. Yuvarlatılmış hatlara sahip $B/T = 2,52$ olan bir dikdörtgen model için yalpa sönümlemesinin ortadan kalkacağını bulmuştur. Bu teorik sonuç, McLeod ve Hsieh (1963) tarafından da deneysel olarak doğrulanmıştır. Vugts (1968) silindirik bir model ile yalpa hareketine ait hidrodinamik katsayıları hesaplamaya yönelik çalışmalar yapmıştır.

Bu alanda en çok bilinen ve günümüzde de aktif olarak kullanılan çalışmaları ise Ikeda vd. (1977; 1978a; 1979b) yapmıştır. Ikeda'nın (1977; 1978a; 1979b) tahmin yaklaşımı viskoz etkileri tahmin yöntemlerinden biri olarak iyi bilinmektedir. Ikeda'nın (1977; 1978a; 1979b) ampirik yöntemine göre, sabit bir geminin yalpa sönümlemesi, dalga bileşeni, sürtünmesi bileşeni, girdap oluşturma bileşeni, kaldırma bileşeni ve yalpa omurgası bileşeni olmak üzere beş bileşene ayrılır. Her bir bileşen için yalpa genliğine, frekansa ve model seyir hızına bağlı olarak formüller çıkarılmıştır. Ancak bu yöntem, sınırlı koşullar altında (yalpa genliği, frekans, geleneksel formlar) deneylere dayalı olarak geliştirilmiştir. Ayrıca, yöntem serbest yüzey etkisini, farklı tekne geometrilerini ve yalpa omurga geometrik şekillerini dikkate almamaktadır. Bilhassa yalpa omurgası geometrik varyasyonlarının ve konfigürasyonlarının yalpa sönümleme için farklı sonuçlar vermesi beklenir. Himeno (1981) bu çalışmaları daha da detaylandırarak sunmuştur.

Kato (1965) yapmış olduğu çalışmada gemi gövdesinde yalpa omurgasının olmasının yalpa sönümüne olan etkisini incelemiştir. Ayrıca Blasius'un (Hager, 2003) laminar akışlar için plaka sürtünme teorisini, sabit sürtünmeli yalpa sönümlemesi için bir denklem türetmek üzere kullanmıştır. Bugün bu denklem Kato formülü olarak bilinmektedir. İlerleyen yıllarda yalpa hareketinin hem lineer hem de lineer olmayan formülasyonlarını içeren çalışmalar ortaya çıkmıştır (Blagoveshchensky, 1962; Bhattacharyya, 1978). Hareketin lineer olmaması sıklıkla sönümleme ve doğrultma terimleriyle ilişkilendirilir. Pek çok bilim insanı, doğrusal olmayan değişkenlerle çeşitli yalpa hareketi modellerini araştırmıştır (Denise, 1983; de Kat ve Paulling, 1989). Farklı sönüm terimleri ve doğrultma momenti gösterimi dereceleri bu modelleri birbirinden ayırır. Sönümün ve bileşenlerinin etkileri birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır (Ikeda vd., 1977; Ikeda vd., 1978; Schmitke, 1978; Himeno, 1981; Cumming vd., 1990; Haddara ve Zhang, 1994). Yalpa hareketinin lineer

olmama durumu literatürde çeşitli sönüm terim formları kullanılarak incelenmiştir (Wellicome, 1975; Wright ve Marshfield, 1979; Odabaşı ve Vince, 1982; Taylan, 1990; 1996; 2000)

Literatürde yalpa omurgasının yalpa sönümü üzerindeki etkisini araştıran çalışmalar mevcuttur. Sonlu bir analitik yöntem kullanarak, Korpus ve Falzarano (1997) yalpa omurgaları tarafından üretilen viskoz sönümlemeyi incelemişlerdir Bangun vd. (2010), yalpa omurgaları olan yüzen bir duba etrafındaki akışı simüle etmek için sayısal bir çalışma yapmışlardır. Piehl ve el Moctar (2014), yalpa omurgası etrafındaki akışı ve farklı türbülans modelleriyle ilgili kuvvetleri hesaplamak için HAD kullanmışlardır. Veer vd. (2015), yalpa omurgasının geometrik etkisini araştırmak için düz levha yalpa omurgasına uç ve orta plakalar ekleyerek yüzer dönen bir silindir gövdesi üzerinde çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yalpa omurgası üzerindeki hidrodinamik yükleri ve gövde üzerindeki basınç ölçümlerini göstermek için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Ommani vd. (2016), çeşitli su çekimi ve yalpa genliği koşulları altında yalpa omurgası yükünü ve gövde basıncı dağılımını araştırmak için bir yalpa omurgası ile donatılmış, harmonik olarak dönen dairesel bir silindiri simüle etmişlerdir. Irkal vd. (2016), farklı yalpa omurgası boyutunun ve konfigürasyonlarının yalpa sönümleme üzerindeki etkisini araştırmak için deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yıldız ve Katayama (2017), yalpa omurgasının serbest yüzey varlığındaki ve yalpa sönümü üzerindeki etkisini simüle etmek için deneysel ve sayısal bir çalışma yürütmüşlerdir. Katayama vd. (2019) su çekiminin yalpa omurgası bileşeni üzerindeki etkilerini deneysel ve sayısal olarak araştırmıştır. Zhang vd. (2020), yalpa omurgasının genliği ve salınım frekansının, yüksekliğinin ve kalınlığının etkisini göz önünde bulundurarak yalpa omurgası yükünü ve gövde basıncı dağılımını araştırmak için sayısal bir çalışma yapmışlardır.

Daha önceki çalışmalarda da görülebileceği gibi, bilgisayarların hızla gelişmesi ile hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin (CFD) gemi mühendisliği, okyanus mühendisliği ve deniz mühendisliği uygulamaları alanında kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır. Yalpa sönümlemesini hesaplamanın en doğru yolu model testleri yapmak olsa da (Yıldız ve Katayama, 2017) son zamanlarda CFD ile yürütülen popüler araştırma konularından biri de yalpa hareketi analizinin gemi güvenliği için kritik olması nedeniyle yalpa hareketi analizi çalışmalarıdır. Bununla birlikte, rezonans frekansına yakın yalpa hareketlerinde viskoz etkiler nedeniyle doğru yalpa sönümü tahmini daha zordur.

Literatürde yalpa hareketi analizi üzerine birçok iki boyutlu CFD çalışması bulunabilir (Yeung ve Anathakrishnan, 1992; Korpus ve Falzarano, 1997; Wanderley vd., 2007; Bangun vd., 2010; Irkal vd., 2016; Katayama vd., 2019; Song vd., 2019; Yıldız vd., 2019). Ayrıca, CFD ile yalpa hareketi analizi üzerine yapılmış birçok üç boyutlu çalışma da bulunmaktadır (Wilson vd., 2006; Belenky vd., 2010; Bo vd., 2012; Carrica vd., 2012; Zhou vd., 2015; Sadat-Hosseini vd., 2016; Kianejad vd., 2018; Gokce ve Kinaci, 2018; Hashimoto vd., 2019; Liu vd., 2021; Zhang vd., 2021; Ghamari vd., 2022).

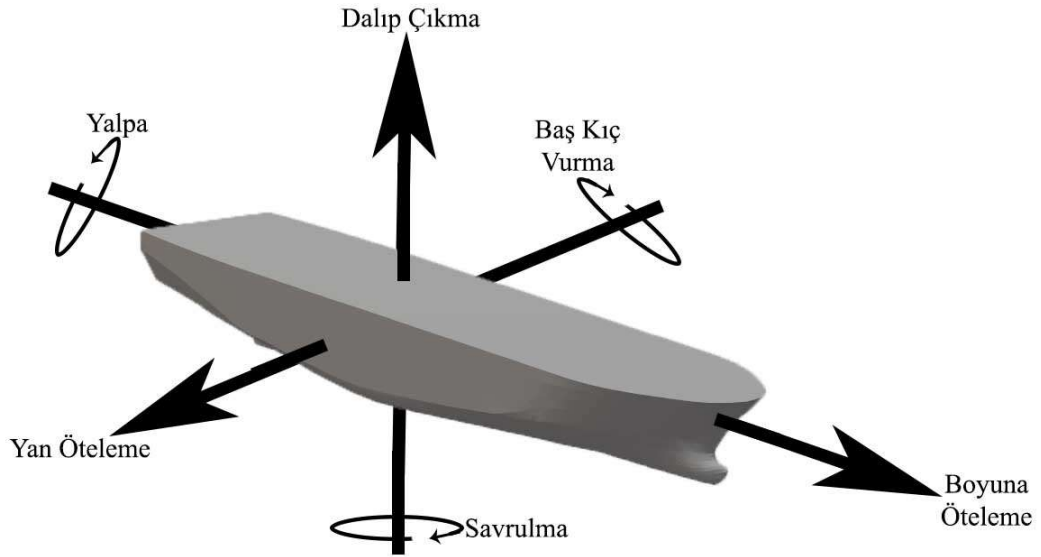
1.3. Kapsam

Birinci bölüm olan “Giriş” bölümünde tezin amacı ve genel literatür özeti kısımları verilmiştir. İkinci bölümde yalpa hareketinin tanımlanması, deneysel yalpa sönümü hesaplama metotları, Ikeda metodu ile yalpa sönümü hesabı ve yalpa sönüm hesabı teknikleri sunulmuştur. Bu bölümde yalpa hareketinin temelleri ve yalpa sönüm analizinin nasıl yapılacağı anlatılmıştır. Üçüncü bölümde akış görüntüleme sistemleri ve parçacıklı akış görüntüleme hız ölçüm tekniği açıklanarak, yalpa sönüm deneylerinde nasıl kullanılacağı anlatılmıştır. Dördüncü bölümde yalpa hareketinin ve yalpa sönümünün deneysel olarak analizinin hazırlanması süreçleri ve deney yönteminin detayları verilmiştir. Bu kısımda, kullanılan model ve yalpa omurgalarının özellikleri, deneyin gerçekleştirildiği çekme tankı, deney mekanizmaları, deney koşulları ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Beşinci bölümde yapılan tez çalışmasının diğer ayağı olan sayısal analiz kısmı detaylıca anlatılmıştır. Kullanılan sayısal çözücü, kullanılacak olan yaklaşımın temel denklemleri ile akışkanlar mekaniği temel denklemleri tanıtılmıştır. Ayrıca sayısal çözümün yol haritası ile, modellemelerin nasıl gerçekleştirildiği burada verilmiştir. Altıncı bölümde ise, yapılan çalışmalar sonucunda yalpa omurgası gövde şeklinin yalpa sönümüne etkisine dair elde edilen deney analiz sonuçları ve sayısal simülasyon çözümleri verilmiş olup, elde edilen verilerin değerlendirilmesi ve karşılaştırılması yapılmıştır. Sekizinci ve son bölümde ise genel olarak elde edilen sonuçlar incelenerek elde edilen veriler üzerinde çıkarımlar yapılmış, öneriler verilmiş ve gelecekte yapılacak potansiyel çalışmalara yer verilmiştir.

2. YALPA HAREKETİ VE YALPA SÖNÜMÜ

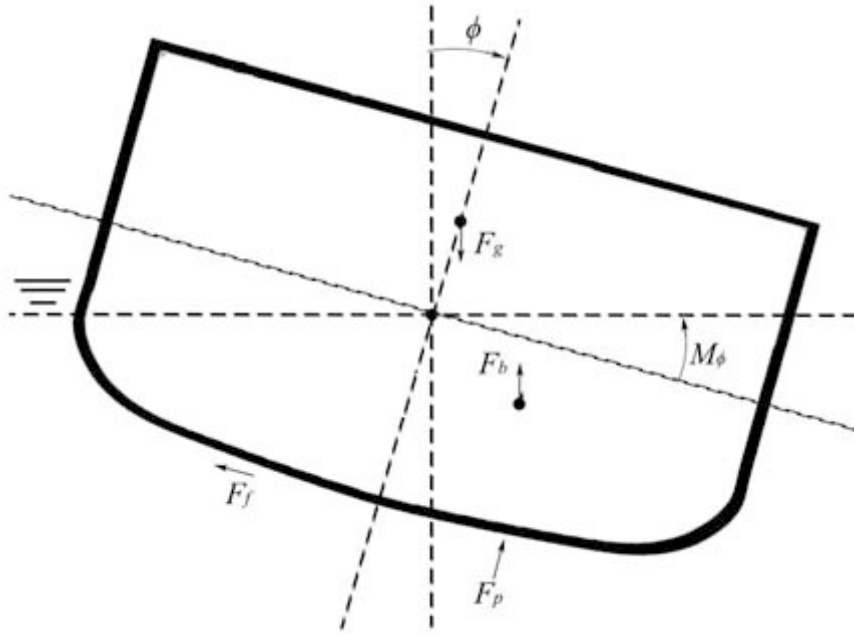
2.1. Yalpa Hareketi ve Yalpa Sönümünün Tanımlanması ve Analizi

Gemi mühendisliği terminolojisinde yalpa terimi, bir geminin boyuna eksenini etrafındaki açısal hareketini tanımlar. Şekil 2.1’de geminin hareketlerinin gemi üzerindeki şematik olarak gösterimi görülebilir.



Şekil 2.1. Altı serbestlik dereceli gemi hareketleri

Yalpa sönümü ise, genel olarak, yalpa hareketi yapan bir geminin, çeşitli yollarla (sürtünme, vb. gibi) kaybettiği enerjidir. Şekil 2.2 yalpa yapan bir teknenin üzerine etki eden kuvvet ve momentleri gemi kesiti üzerinde göstermektedir.



Şekil 2.2. Yalpa yapan bir geminin üzerine etki eden kuvvet ve moment ve kuvvetlerin gemi kesiti üzerinde gösterimi

Akışkan kuvvetlerinin iki bileşeni şekilde gösterilmiştir; bunlar gövde yüzeyine normal yöndeki basınç kuvveti F_p ve teğet yöndeki sürtünme kuvveti F_f 'dir. Akışkan kuvvetlerinin gövde yüzeyi üzerindeki integrasyonu, kaldırma kuvveti merkezinden geçen uzunlamasına bir eksen etrafında bir kaldırma kuvveti olan F_b ve bir geri yükleme momenti olan M_ϕ 'yi oluşturur. Gövde sıfır hareket hızı ile denge durumundaysa, viskoz kuvvet de sıfırdır ve basınç kuvveti yalnızca hidrostatik basınçtan oluşur. Bu durumda ağırlık kuvveti F_g ve kaldırma kuvveti F_b birbirine eşittir ve birbirlerini sıfırlar.

Bir serbestlik dereceli yalpa hareketi ikinci mertebeden adi diferansiyel bir denklem ile ifade edilebilir. İlgili denklem aşağıdan görülebilir.

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = f(t) \quad (2.1)$$

Bu denklemde, $a\ddot{\phi}$ atalet terimini, $b\dot{\phi}$ sönüm terimini, $c\phi$ doğrultma terimini, $f(t)$ ise, zorlayıcı fonksiyonu göstermektedir. Bu denklem üzerinden hareketle, bir geminin tek serbestlik dereceli, yalpa hareketi,

$$(I_{44} + A_{44})\ddot{\phi} + B_{44}(\dot{\phi}) + C_{44}(\phi) = f(t) \quad (2.2)$$

şeklinde gösterilebilmektedir (ITTC, 2021). Burada, ϕ yalpa açısını, $(I_{44} + A_{44})$ toplam yalpa atalet momentini ki A_{44} eklenmiş hidrodinamik atalet momenti ya da başka bir tabir ile, ek su kütlesi atalet momenti de bu değere dahildir. $B_{44}(\dot{\phi})$ sadece geminin açısal yalpa hızına bağlı olduğu kabul edilen sönüm momentidir. $C_{44}(\phi)$ doğrultma momentini gösterirken, $f(t)$ dalgalar ya da dış, harici kuvvetlere bağlı olarak ortaya çıkan zorlayıcı fonksiyonunu göstermektedir. Denklem 2.1'in her iki tarafını da toplam yalpa atalet momentine $(I_{44} + A_{44})$ bölersek, normalleştirilmiş yalpa denklemi ortaya çıkar (IMO, 2006).

$$\ddot{\phi} + \frac{B_{44}(\dot{\phi})}{I_{44} + A_{44}} + \frac{C_{44}(\phi)}{I_{44} + A_{44}} = \frac{f(t)}{I_{44} + A_{44}} \quad (2.3)$$

Doğrultma momenti C_{44} aşağıdaki gibi de ifade edilebilir.

$$C_{44} = \Delta GZ(\phi) \quad (2.4)$$

Burada Δ geminin deplasmanı ve GZ ise geminin ağırlık merkezine göre hidrostatik doğrultma kolu olarak verilmiştir. 2.4'teki denklem göz önüne alınarak,

$$C_{44} = w_x^2 \cdot \frac{GZ(\phi)}{GM} = w_x^2 \cdot r(\phi) \quad (2.5)$$

şeklinde gösterilebilir. Denklem 2.5'te w_x geminin sönümlenmemiş doğal yalpa frekansını temsil eder. GM ise, metasantr yüksekliğidir.

2.2. Yalpa Sönümünü Hesaplama Yöntemleri

Yalpa sönüm katsayıları birçok şekilde, örneğin doğrusal veya doğrusal olmayan formlarda ifade edilebilir. Sönüm moment terimi olan $B_{44}(\dot{\phi})$ aşağıda verilen lineer olmayan formda fonksiyonun seriye açılımı ile verilebilir (ITTC, 2021).

$$B_{44}(\dot{\phi}) = B_{\phi,1} \cdot \dot{\phi} + B_{\phi,2} \cdot \dot{\phi} \cdot |\dot{\phi}| + B_{\phi,3} \cdot \dot{\phi}^3 + \dots \quad (2.6)$$

Bu denklemde, $B_{\phi,1}$, $B_{\phi,2}$ ve $B_{\phi,3}$ doğrusal olmayan sönüm bileşenleridir ve sabit yalpa genliği ϕ , sabit periyodik salınım frekansı ω ile karakterize edilen periyodik salınım hareketi sırasında sabit kabul edilirler. Bu katsayıların farklı frekans ve genlikte periyodik salınım için aynı değerler olmayabileceğine dikkat edilmelidir. Doğrusal olmayan bu bileşenlerin hesaplanması ve analiz edilmesi oldukça zordur. Bu terimler ancak serbest bırakma ve zorlanmış yalpa deneyleri ile hesaplanabilmektedir. Literatürde yapılmış olan çalışmalarda lineer olmayan matematik modeller oluşturulmuş (Bulian, 2004) ya da mevcut lineer olmayan terime karşılık olarak lineer olan bir terim türetilmeye çalışılmıştır (Ikeda vd., 1977; 1978a; 1978b).

2.3. DeneySEL Yalpa Sönümü Hesaplama Yöntemleri

Bir geminin yalpa sönüm davranışını araştırmak için üç farklı deneysel test yöntemi kullanılabilir. Bu çalışmalar Piehl'in (2016) çalışmasında özetlenmiştir. Bu deney yöntemleri,

a. Serbest bırakma testi, serbest yüzen bir gemi (model veya tam ölçekli) belirli bir yalpa açısı ϕ_0 'a kadar eğilir ve ardından serbest bırakılır. Gemi, genliği azalan bir yalpa salınımı başlatır.

b. Serbest zorlanmış yalpa testi yöntemi, herhangi bir mekanik bağlantı olmadan, yani gemi tüm serbestlik derecelerinde hareket etmekte serbestken, bir dahili yalpa momenti örneğin düzenli su dalgaları uygulayarak geminin sürekli olarak yalpalaması için uyarılması ile gerçekleştirilir.

c. Zorlanmış yalpa testi ise, önceden belirlenmiş bir yalpa hareketiyle dönen bir dişliye sabitlenmiş bir model kullanır. Önceki iki yöntemin aksine bu test sırasında yalpa açısı yerine suyun reaksiyon momenti ölçülür.

Bu yöntemlerin çok yönlü karşılaştırılmaları Tablo 2.1'de verilmiştir. Yöntemlerin tamamı aşağıdaki başlıklarda detaylıca incelenmiştir. Bu çalışmada serbest bırakma testi yöntemi ile zorlanmış yalpa testi yöntemi uygulanmıştır.

Tablo 2.1.Deneysel yalpa sönümü hesaplama yöntemlerinin karşılaştırılması (ITTC, 2021)

Deney Yöntemi / Karşılaştırma maddesi	Serbest bırakma	Serbest zorlanmış yalpa testi	Zorlanmış yalpa testi
Sabit yalpa genliği	İmkânsız	Mümkün	Vardır
Büyük açılarda yalpa	Geçici olarak mümkündür	Deney koşullarına bağlıdır	Kolaylıkla elde edilebilir
Seyir hızı	Mümkün fakat zordur	Mümkün fakat zordur	Mümkün ve kolaydır
HAD analizi zorluk derecesi	Orta	Zor	Kolay
Yalpa eksenı	Gerçek / zamana bağlı	Gerçek / zamana bağlı	Belirlenmiş / sabit
Maliyet ve zaman durumu	Ucuz ve hızlı	Pahalı ve yavaş	Pahalı ve hızlı

Bu deney yöntemlerinden bu tez çalışmasında kullanılmış olan, serbest bırakma testi ile zorlanmış yalpa testi kısaca açıklanmıştır.

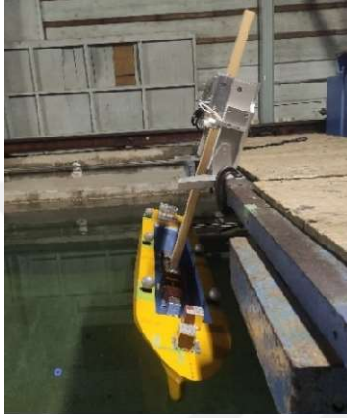
2.3.1. Serbest Bırakma Deneyi ile Yalpa Sönümü Hesabının Yapılması

Serbest bırakma testleri, gemi modeline bir ilk meyil verilip ardından gemiyi serbest bırakarak serbestçe hareket etmesine izin vermeye ve örneğin azalan yalpa açıları gibi parametreleri kaydetmeye ve analiz etmeye dayanır.

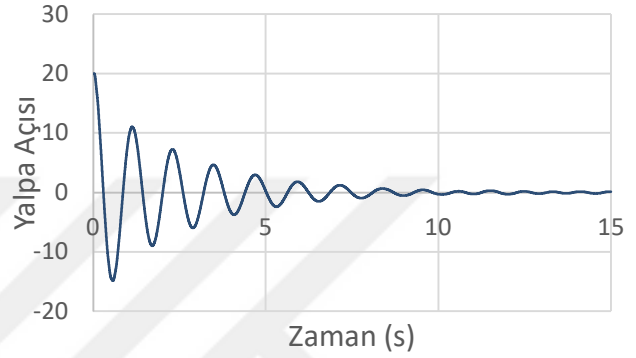
Serbest bırakma testleri, modelin ya da geminin ileri hıza sahip olması veya ileri hız olmadan gerçekleştirilebilir. Testler ileri hız ile gerçekleştirilirse, bunlardan elde edilen yalpa sönümlemesi, ileri hız olmadan elde edilen yalpa sönümlemesinden farklı ve genellikle daha büyük olmaktadır (ITTC, 2021).

Yukarıda verilmiş olan Tablo 2.1'den de görülebileceği üzere, serbest bırakma deneyi diğer yöntemlere nazaran, ucuz ve hızlı bir yöntemdir. Ancak bu deney esnasında ölçüm süresi diğer yöntemlere göre oldukça kısadır ve az sayıda ölçüm periyodu gözlemlenebilmektedir. Bu yöntem tatbik edilirken, ITTC (2017) tarafından hazırlanan rapora göre, alınan ölçümlerin doğruluğu için deney birkaç kez tekrarlanmalıdır. Bu test sırasında, modele ya da gemiye, havuzun boyuna doğrultusunda yayılan ve sonundan

yansıyan dalga dahil sonuçları etkileyecek hiçbir harici hareket verilmemelidir. Deneyler arasında farklılık oluşmasını engellemek ve tekrarlanabilirliğe izin vermek (belirsizlikleri azaltmak) için, ilk yalpa açısı mekanik cihazlar kullanılarak oluşturulmalı ve mümkün olduğunca insan müdahalesi azaltılmalıdır. Aşağıdaki şekilde örnek bir serbest bırakma mekanizması ve serbest bırakma testi sonucunda elde edilen yalpa periyodu değişimleri görülebilir.



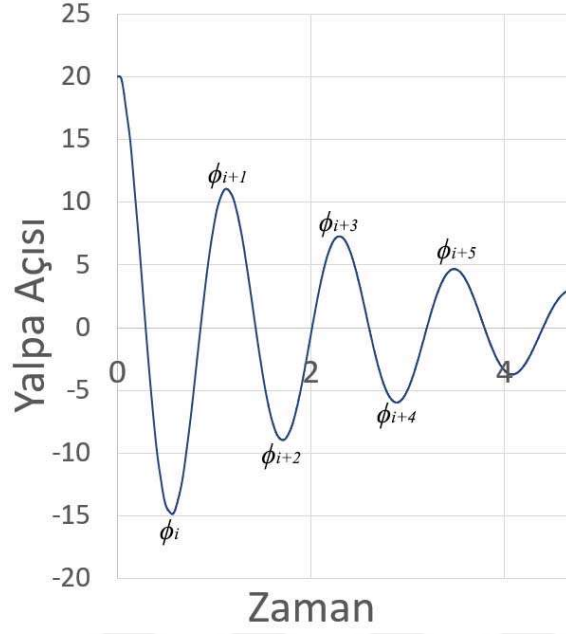
(a)



(b)

Şekil 2.3. (a) Serbest bırakma deneyi mekanizması (b) Yalpa periyotlarının değişimi

Serbest bırakma testi sonuçları ile yalpa sönümü hesabı gerçekleştirilebilir. Bu işlem aşağıdaki gibi yapılır. Öncelikle deney sonucunda elde edilen sönümlenen yalpa genliklerine sırası ile, ϕ_i , ϕ_{i+1} , ϕ_{i+2} , ... diyelim. Şekil 2.4'ten bu işlemin nasıl yapıldığı görülebilir.



Şekil 2.4. Serbest bırakma testi sonucunda elde edilen yalpa genliklerinin isimlendirilmesi

$$\phi_m = \frac{|\phi_i| + |\phi_{i+1}|}{2} \quad (2.7)$$

$$\Delta\phi = |\phi_i| - |\phi_{i+1}| \quad (2.8)$$

Burada, ϕ_m ortalama yalpa açısı ve $\Delta\phi$ yalpa genliği azalma miktarıdır. Daha sonra bu veriler kullanılarak, x ekseninde ϕ_m ve y ekseninde $\Delta\phi$, üçüncü dereceden bir polinom eğrisi uydurulur. Buradan Himeno (1981) tarafından önerilen yalpa genliği azalması ve ortalama yalpa açısı arasındaki bağıntıyı gösteren ifade kullanılarak,

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{2} 2\alpha\phi_m + \frac{4}{3}\beta\phi_m^2 + \frac{3\pi}{8}w_n\gamma\phi_m^3 \quad (2.9)$$

regresyon katsayıları olan α, β ve γ hesaplanır. Daha sonra uydurulan eğriden elde edilen regresyon katsayıları kullanılarak lineer, kuadratik ve kübik yalpa sönümü katsayıları hesaplanır ki bunlar;

$$B_{\phi,1} = 2\alpha(I_{44} + A_{44}) \quad (2.10)$$

$$B_{\phi,2} = \beta(I_{44} + A_{44}) \quad (2.11)$$

$$B_{\phi,3} = \gamma(I_{44} + A_{44}) \quad (2.12)$$

bulunan bu katsayılar ile birlikte, doğrusal olmayan sönüm terimi oluşturulur.

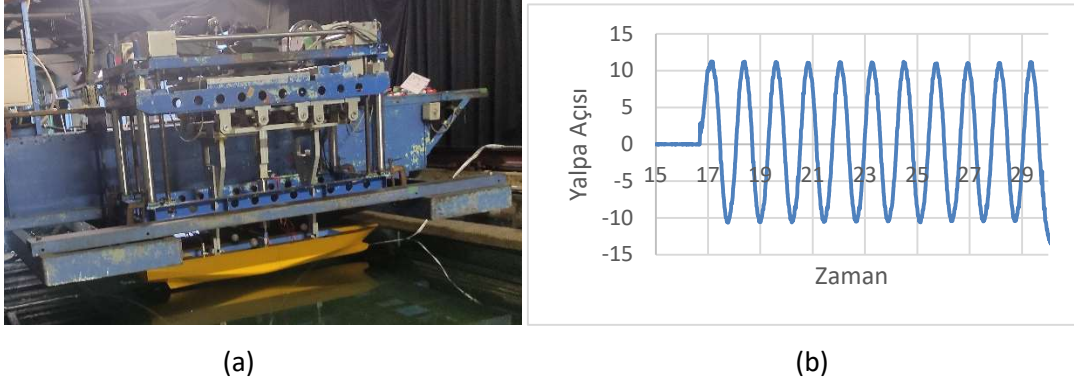
$$B_{44}(\dot{\phi}) = B_{\phi,1} \cdot \dot{\phi} + B_{\phi,2} \cdot \dot{\phi} \cdot |\dot{\phi}| + B_{\phi,3} \cdot \dot{\phi}^3 \quad (2.13)$$

2.3.2. Zorlanmış Yalpa Deneyi ile Yalpa Sönümü Hesabı

Zorlanmış yalpa deneyi testleri, gemi modelinin, çekme arabası ile model arasına harici bir mekanik osilatör koyarak bir yalpa momenti oluşturulması ve sürekli olarak yalpa yaptırılması ile gerçekleştirilir. Bu testte, tipik olarak, yalpaya harici ve sabit bir moment ile zorlanan model, önceden belirlenen stabil bir eksen etrafında yalpa hareketi yapar. Bu durum, sabit açılı bir yalpa hareketini garanti ettiği ve dolayısıyla analizi basitleştirdiği için sayısal simülasyonların karşılaştırılmasında uygulanabilirliği oldukça yüksektir.

Zorlanmış yalpa deneyleri ek olarak bir yalpa momentini tahrik edecek mekanik bir osilatöre ihtiyaç duyduğu için pahalıdır. Bu yöntemin diğer yöntemlere göre üstünlüğü, istenilen frekans, yalpa genliği vb. gibi parametrelerin istenildiği gibi kolayca belirlenerek modele tatbik edilebilmesidir.

Bununla birlikte, 6 serbestlik dereceli bir harekette sabit bir yalpa eksenine olmadığından, ki bu yöntem tek serbestlik derecesine sahiptir, önceden belirlenmiş dönme ekseninin seçilen yalpa sönüm katsayılarını etkileyeceği unutulmamalıdır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde (Ikeda vd., 1978; ITTC, 2017) gerçeğe yakın bir yalpa hareketi analizi yapmak için özellikle savrulma, baş kık vurma ve dalıp çıkma hareketleri deneyler sırasında kısıtlanmamalıdır. Bu durum, farklı serbestlik derecelerinin birleştirici etkileri nedeniyle daha karmaşık bir ölçüm/simülasyon ve analiz tekniğine yol açar. Sonuç olarak, 1 serbestlik dereceli testlerden elde edilen yalpa hareketi analizlerinin, 6 serbestlik dereceli yalpa hareketi analizlerinden farklı olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Aşağıdaki şekilde örnek bir zorlanmış yalpa mekanizması ve zorlanmış yalpa testi sonucunda elde edilen yalpa periyodu değişimleri görülebilir.



Şekil 2.5. (a) Zorlanmış yalpa deneyi mekanizması (b) Yalpa periyotlarının değişimi

1 serbestlik dereceli bir zorlanmış yalpa deneyinde, yalpa açısının değişimi aşağıdaki denklem ile gösterilebilir.

$$\phi(t) = \phi_{max} \sin(\omega t) \quad (2.14)$$

$$f(t) = M_0 \sin(\omega t + \varepsilon) \quad (2.15)$$

Bu denklemlerde, ϕ_{max} , belirlenmiş, modelin ulaşılmaması istenen yalpa genliği, M_0 , modelin istenilen yalpa genliğine ulaşması için gereken zorlayıcı yalpa yaptırma momenti, ε ise faz farkıdır. Yalpa sönüm katsayısı ise,

$$B_{44}(\dot{\phi}) = \frac{M_0 \cdot \sin(\varepsilon)}{\phi_{max} \cdot \omega} \quad (2.16)$$

olarak verilebilir.

2.4. Ikeda Metodu ile Yalpa Sönümü Hesabı

1977 ile 1981 yılları arasında Ikeda ve Himeno tarafından yayınlanan makaleler (Ikeda vd., 1977, 1978a, 1978b; Himeno, 1981), matematiksel yalpa sönümleme modelinin geliştirilmesine temel teşkil etmektedir. Gemilerin yalpa hareketini analiz etmek için teorik arka plan sağlarlar ve yalpa sönümlemesini modelleyen denklemler sunarlar. Yapılan çalışmalar silindirik bir modelin çekme tankında deneylerinin gerçekleştirilmesi ile

yürütülmüştür. İlgili silindirik model bugün hâlâ Osaka Metropolitan Üniversitesi, çekme tankı laboratuvarında bulunmaktadır. İlgili silindirik model aşağıdaki şekilden görülebilir.



Şekil 2.6. Profesör Ikeda'nın çalışmasında kullandığı silindirik model

Ikeda, yalpa sönümünün birkaç bağımsız etkiden oluştuğu varsayımı üzerinde çalışmıştır. Yöntemindeki sönüm bileşenlerinin her biri, belirli bir akış etkisine karşılık gelir. Toplam doğrusal yalpa sönüm katsayısı bu bileşenlerin toplamıdır. İlgili denklem aşağıdan görülebilir.

$$B = B_F + B_E + B_L + B_W + B_{BK} \quad (2.17)$$

Bu denklemde sönüm teriminin, B_F sürtünme bileşeni, B_E girdap oluşturma bileşeni, B_L kaldırma kuvveti bileşeni, B_W dalga bileşeni, B_{BK} yalpa omurgası bileşenidir. Bu bileşenler yalpa genliği, frekansı ve varsa ileri hıza bağlı olarak değişebilir. Aşağı bölümlerde Ikeda metoduna ait her bir sönüm terimi bileşeni detaylıca anlatılmıştır.

2.4.1. Sürtünme Bileşeni

Sürtünme bileşeni, 2 m uzunluğundaki bir model gemi için toplam yalpa sönümünün %8 ile %10'unu oluşturur (Ikeda vd., 1977, 1978). Ancak, bu bileşen Reynolds sayısından (ölçek etkisi) etkilenir ve bu nedenle bu oran, gemi boyutuyla orantılı olarak azalır ve tam ölçekli gemiler için yalnızca %1 ile %3 arasındadır (ITTC, 2021). Yalpa sönümünün diğer bileşenlerinin bu tür ölçek etkileri yoktur. Bu nedenle, bir geminin ölçeği değişse bile,

sürtünme bileşeni dışındaki diğer bileşenler için aynı boyutsuz sönümleme katsayısı kullanılabilir.

Kato, (1957) tamamen suya daldırılmış dairesel silindirler üzerindeki deneysel sonuçlardan yalpa sönümünün sürtünme bileşeni için yarı ampirik bir formül çıkardı. Reynolds sayısı aşağıdaki şekilde (2.18) tanımlandığında, yalpa yapan silindirler için sürtünme sönümünün laminar akış için verilenle (Hager, 2003) aynı biçimde ifade edilebileceğini bulundu:

$$Re = \frac{0,512r^2\phi_a^2\omega}{v} \quad (2.18)$$

Denklem 2.18'de ϕ_a yalpa genliği r silindir yarıçapı, v ise kinematik viskozite ve ω yalpa frekansıdır. Sürtünme katsayısı (C_f) aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$C_f = 1,328\left(\frac{3,22r^2\phi_a^2}{Tv}\right)^{-0,5} \quad (2.19)$$

Bu denklemde, T yalpa periyodudur.

Ikeda vd., (1977) gemide herhangi bir ileri hız yokken, yalpa sönümünün sürtünme bileşeni için aşağıdaki formülü geliştirmişlerdir.

$$B'_{F_0} = \frac{4}{3\pi}\rho S_f r_{BK}^3 \phi_a \omega C_f \quad (2.20)$$

Bu denklemde, ρ yoğunluk, S_f sürtünme yüzeyi ve r_{BK} dönme merkezinin gemi sintinesine olan mesafedir. 3 boyutlu bir gemi için S_f ve r_{BK} aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Kato, 1957).

$$S_f = L_{bp}(1,7d + C_B B) \quad (2.21)$$

$$r_{BK} = \frac{1}{\pi}[(0,887 + 0,145C_B)(1,7d + C_B B) - 2.OG] \quad (2.22)$$

Burada L_{bp} gemi boyu, C_B blok katsayısı, B gemi genişliği, d su çekimi, OG ise serbest su yüzeyinden ağırlık merkezine olan dikey mesafedir.

Sürtünme bileşeni, ileri hız ile hafifçe artar ve bu nedenle, ileri hızın sürtünme bileşeni üzerindeki etkisini hesaba katmak için katsayıyı değiştirmek için yarı teorik bir yöntem Tamiya ve Komura (1972) tarafından önerilmiştir. Ikeda, bu formüllerin kombinasyonunu pratik kullanım için doğru bulmuş ve şu şekilde ifade etmiştir:

$$B_F = B_{F_0} \left(1 + 4,1 \frac{V}{wL}\right) \quad (2.23)$$

Bu formülasyonda, V ileri gemi hızını temsil etmektedir. B_{F_0} Denklem 2.20'deki B'_{F_0} kesit sönüm katsayısının gemi boyuna göre integralinin alınması ile elde edilebilen 3 boyutlu sönüm katsayısıdır.

2.4.2. Girdap Oluşturma Bileşeni

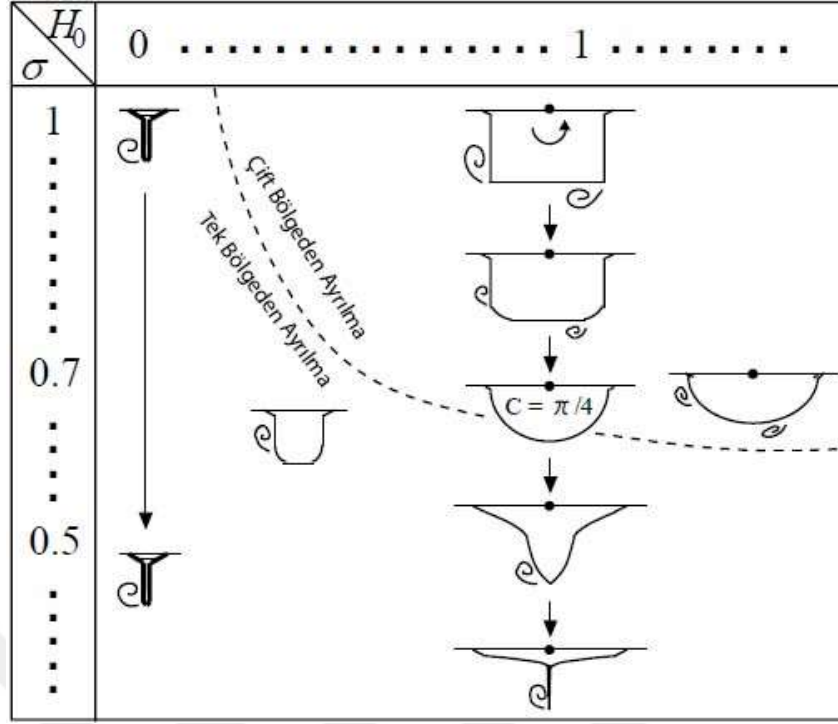
İleri hız mevcut değilken, çıplak gövde için yalpa sönümünün girdap oluşturma bileşeni temel olarak gemi gövdesinin dönüm kısımlarında oluşan girdaplar nedeni ile oluşmaktadır. Oluşturulan girdapların sayısı, gövde şekliyle ilgili iki parametreye bağlıdır; bunlar, yarı genişlik-su çekimi oranı (2.24);

$$H_0 = B/2d \quad (2.24)$$

ve kesit katsayısıdır (2.25).

$$\sigma = A_j/B.d \quad (2.25)$$

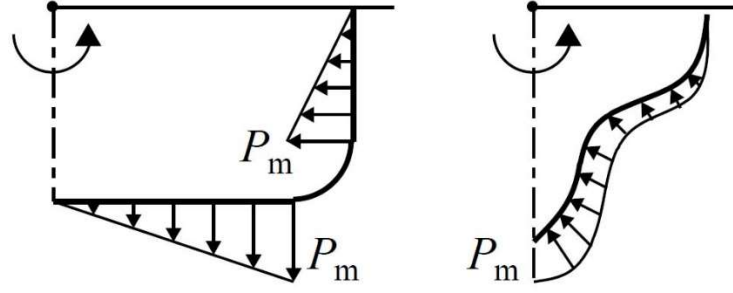
Denklem 2.25'te A_j hesaplama yapılacak olan kesit alanını gösterir. Şekil 2.7 Ikeda vd. (1977) tarafından hazırlanmış olup, yalpa hareketi sırasında gemi gövdesi çevresinde oluşan girdapların konumunu şematik olarak göstermektedir.



Şekil 2.7. Gövdeden ayrılan girdapların gösterimi (Ikeda vd., 1977).

Ikeda vd. (1978) çeşitli kesitlere sahip bir dizi iki boyutlu silindir üzerinde yapılan deneylerden, çıplak bir gövde için sürtünme bileşeninin hem yalpa frekansının hem de yalpa genliğinin karesiyle orantılı olduğunu bulmuşlardır.

Tekne üzerindeki basınç dağılımları için Şekil 2.8'deki varsayım yapıldığında basınç katsayısı C_p 'nin büyüklüğü, maksimum gövde yüzeyindeki bağıl hızın, ortalama hıza oranının bir fonksiyonu olarak alınabilir ($\gamma = V_{max}/V_{mean}$). Bu fonksiyon, sonsuz bir sıvı içinde dönen bir Lewis-biçimli silindir için potansiyel akış teorisi kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanabilir. Böylece C_p - γ eğrisi, 2 boyutlu modeller için yalpa sönümünün deneysel sonuçlarından elde edebilir. Sıfır ileri hızda girdap oluşturma bileşeni, basınç katsayısı C_p 'yi yaklaşık γ fonksiyonu ve aşağıdaki formülle uydurarak ifade edilebilir (Ikeda vd., 1977, 1978).



Şekil 2.8. Gövde üzerindeki kabul edilen basınç dağılımı (Ikeda vd., 1977).

$$B'_{E_0} = \frac{4\rho d^4 \omega \phi_a}{3\pi} C_R \quad (2.26)$$

$$C_R = \frac{M_\phi}{\frac{1}{2}\rho d^4 L \phi |\dot{\phi}|} \quad (2.27)$$

Burada C_R artık katsayı, M_ϕ ise yalpa momenti olup, üç boyutlu bir gemi gövdesi formu için, girdap oluşturma bileşeni, B'_{E_0} 'ın gemi boyuna göre integralinin alınması ile elde edilir.

Girdap oluşturma bileşeni, modelde ileri hız arttıkça azalır ve küçük bir hücum açısıyla bir gemi veya kanat üzerindeki (doğrusal) kaldırma kuvveti için doğrusal olmayan bir düzeltmeye indirgenir. Ikeda vd. (1978) ileri hız olması durumunda, deneysel çalışmalarından yola çıkarak aşağıdaki ampirik bağıntıyı bulmuşlardır.

$$B_E = B_{E_0} \frac{(0,04\omega L)^2}{V^2 + (0,04\omega L)^2} \quad (2.28)$$

2.4.3. Kaldırma Kuvveti Bileşeni

Gemi seyir halindeyken kaldırma kuvveti etkisinin gemide yan öteleme yaptırdığı görülebilmektedir. Yalpa hareketi esnasında da kaldırma kuvvetinin oluştuğu görülebilmektedir. Kaldırma kuvveti bileşeni doğrusal bir bileşen olup formülü aşağıdaki gibidir (Ikeda vd., 1978).

$$B_L = \frac{\rho}{2} V L d k_N l_0 l_R \left(1 - 1,4 \frac{OG}{l_R} + 0,7 \frac{OG^2}{l_0 l_R}\right) \quad (2.29)$$

Burada L gemi boyu, k_N kaldırma eğimi, l_0 ve l_R kaldırma kolu olup,

$$l_0 = 0,3d \quad (2.30)$$

$$l_R = 0,5d \quad (2.31)$$

$$k_N = 2\pi \frac{d}{L} + \kappa(4,1 \frac{B}{L} - 0,045) \quad (2.32)$$

şeklinde verilmiştir. Denklem 2.32'deki κ terimi orta kesit katsayısı ile ilgili olup,

$$\kappa = \begin{cases} 0 & C_M \leq 0,92 \\ 0,1 \text{ için} & 0,92 \leq C_M \leq 0,97 \\ 0,3 & 0,97 \leq C_M \end{cases} \quad (2.33)$$

olarak ifade edilmiştir (ITTC, 2021).

2.4.4. Dalga Yapma Bileşeni

Dalga oluşturma bileşeni, genel kargo tipi bir gemi için yalpa sönümünün %5 ila %30'unu oluşturmaktadır. Bununla birlikte, bileşenin sıg su çekimi ve geniş kesitli gemiler için daha büyük bir etkisi olabilir (Ikeda vd., 1978). Yalpa sönümünün lineer bir bileşenidir ve yalpa hareketinin yüzey dalgalarını oluşturmaktan ötürü meydana gelir. Sıfır Froude sayısı durumunda yani ileri hız yokken, dilim teorisi kullanılarak dalga yapma sönüm bileşeni kolayca elde edilebilir. Dilim teorisi kullanılarak (ITTC, 2021), geminin ya da modelin bir kesitine ait dalga yapma sönüm bileşeni aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$B_{W_0} = B_{22}(l_W - OG)^2 \quad (2.34)$$

bu denklemde, B_{22} ve l_W , model kesiti yan öteleme sönüm katsayısını ve yan öteleme sönüm kuvveti nedeniyle durgun su seviyesinde ölçülen moment kolunu temsil eder.

Sıfır olmayan ileri gemi hızında, dalga yapma sönüm bileşenini teorik olarak ele almak oldukça zordur. Ancak, ileri hızdaki dalga yapma sönüm bileşenini tahmin etmek için kullanılabilecek yöntemler vardır. Ikeda vd. (1978) yanal dalga enerji kaybını hesaplamış

ve sonuçlarını birleşik düz plaka modelleri için yapılan deneylerle karşılaştırmışlardır. Bu temel analizden, tipik gemi biçimlerinin dalga yapma yalpa sönüm bileşeni için ampirik bir formül önermişlerdir.

$$\frac{B_W}{B_{W_0}} = 0,5 [(A_2 + 1) + (A_2 - 1)\tanh(20\tau - 0,3) + (2A_1 - A_2 - 1)\exp(-150(\tau - 0,25)^2)] \quad (2.35)$$

Bu denklemde,

$$A_1 = 1 + \xi_d^{-1,2} e^{-2\xi d} \quad (2.36)$$

$$A_2 = 0,5 + \xi_d^{-1} e^{-2\xi d} \quad (2.37)$$

$$\xi_d = \frac{w_E^2 d}{g} \quad (2.38)$$

$$\tau = \frac{V_{WE}}{g} \quad (2.39)$$

şeklinde hesaplanır.

2.4.5. Yalpa Omurgası Bileşeni

Yalpa omurgası sönüm bileşeni tüm bileşenler arasındaki sönümün en yüksek ve en büyük bileşenidir. Küçük yalpa genliklerinde dahi sönümün 50%'sini bu bileşen oluşturmaktadır ve yalpa omurgası sönüm bileşeninin sönüme etki oranı yalpa genliği ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Ikeda vd. (1977, 1978) yapmış oldukları deneyler ile bu bileşenin hesaplanması için bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu yaklaşıma göre yalpa omurgası bileşeni, dört ayrı alt bileşene ayrılır. Bunlar, yalpa omurgası normal bileşeni (B_{BKN}), yalpa omurgası tekne etkileşimi bileşeni (B_{BKH}), yalpa omurgası dalga bileşeni (B_{BKW}) ve yalpa omurgası kaldırma kuvveti bileşenidir (B_{BKL}).

$$B_{BK} = B_{BKN} + B_{BKH} + B_{BKW} + B_{BKL} \quad (2.40)$$

Normal kuvvet bileşeni, yalpa yapan düz plakaların deneysel sonuçlarından çıkarılmıştır (Ikeda vd., 1978). Yalpa yapan düz plakaların sürüklenme katsayısı (C_D), Keulegan-Carpenter (KC) sayısına bağlıdır.

$$KC = \frac{VT}{D} \quad (2.41)$$

Bu denklemde D karakteristik uzunluktur. Yalpa omurgası olan ve olmayan bir silindirik modelin serbest yalpa testlerinden elde edilen verilerle CD için tahmin formülü $0,3 < KC < 20$ sayısı için aşağıdaki gibi ifade edilmiştir;

$$C_D = 22,5 \frac{b_{BK}}{\pi r_{BK} f \phi_a} + 2,4 \quad (2.42)$$

Ikeda vd. (1978) yapmış oldukları çalışmalar sonucunda, ileri hızın olmadığı durum için yalpa omurgası normal bileşenini aşağıdaki formülasyon ile temsil etmişlerdir.

$$B_{BKN_0} = \frac{8}{3\pi} \cdot \rho \cdot r_{BK}^3 \cdot w \cdot \phi_a \cdot b_{BK} \cdot f^2 \cdot C_D \quad (2.43)$$

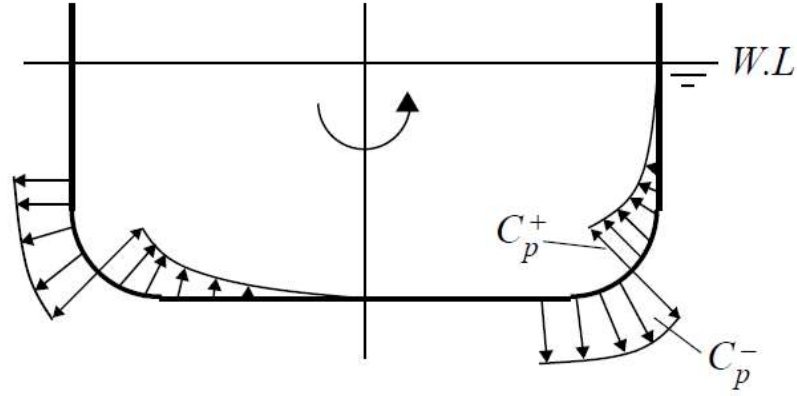
Bu denklemde f ampirik bir katsayı olup aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$f = 1 + 0,3e^{[-160(1-\sigma)]} \quad (2.44)$$

İleri hızın varlığı durumunda ise,

$$B_{BKN} = B_{BKN_0} + \frac{\pi}{2} \cdot \rho \cdot b_{BK}^2 \cdot r_{BK}^2 \cdot V \quad (2.45)$$

Yalpa omurgası sönüm bileşeninin bir diğer alt bileşeni ise, yalpa omurgası tekne etkileşimi bileşenidir. Bu bileşen yalpa omurgası olan bir teknenin gövde üzerindeki basınçları analiz edilerek hesaplanmaktadır. Ikeda vd. (1977, 1978a, 1978b) yapmış oldukları çalışmalarda gemi üzerindeki basınç dağılımını aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi kabul etmişlerdir.



Şekil 2.9. Gövdedeki kabul edilen basınç dağılımları (Ikeda vd., 1978)

İleri hıza sahip olmayan bir model ya da gemi için yalpa omurgası tekne etkileşimi bileşeni formülasyonu Ikeda vd. (1978) çalışmasında aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$B_{BK \ 0} = \frac{4}{3\pi} \cdot \rho \cdot r_{BK} \cdot d \cdot w \cdot \phi_a \cdot b_{BK} \cdot f^2 \int C_p \cdot l dG \quad (2.46)$$

Bu denklemde, C_p Şekil 2.9'dan da gösterildiği üzere basınç katsayısı, l ise moment koludur.

$$\int C_p \cdot l dG = (-A_3 C_p^- + B_3 C_p^+) \quad (2.47)$$

$$C_D = C_p^+ - C_p^- \quad (2.48)$$

C_p^+ ve C_p^- yalpa omurgasının etrafındaki basınç katsayıları olup, C_p^+ Ikeda vd. (1978) tarafından yapılmış olan deneylerin sonuçlarından çıkarılmıştır. $C_p^+ = 1,2$ olduğu bilindiğine göre, Denklem 2.42'den görülebilecek olan C_D formülünü kullanarak C_p^- hesaplanabilir.

$$C_p^- = 1,2 - C_D = -22,5 \frac{b_{BK}}{\pi r_{BK} f \phi_a} - 1,2 \quad (2.49)$$

Denklem 2.47'deki A_3 ve B_3 katsayıları ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$A_3 = (m_3 + m_4) \cdot m_8 - m_7^2 \quad (2.50)$$

$$B_3 = \frac{m_4^3}{3(H_0 - 0,215m_1)} + \frac{(1-m_1)^2 \cdot (2m_3 - m_2)}{6 \cdot (1 - 0,215m_1)} + m_1 \cdot (m_3 \cdot m_5 + m_4 \cdot m_6) \quad (2.51)$$

Burada görülen $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7, m_8$ katsayıları aşağıdaki formülasyonlarla bulunabilir.

$$m_1 = R/d \quad (2.52)$$

$$m_2 = \frac{OG}{d} \quad (2.53)$$

$$m_3 = 1 - m_1 - m_2 \quad (2.54)$$

$$m_4 = H_0 - m_1 \quad (2.55)$$

$$m_5 = \frac{0,414H_0 + 0,0651m_1^2 - (0,0382H_0 + 0,0106)m_1}{(H_0 - 0,215m_1)(1 - 0,215m_1)} \quad (2.56)$$

$$m_6 = \frac{0,414H_0 + 0,0651m_1^2 - (0,0382 + 0,0106H_0)m_1}{(H_0 - 0,215m_1)(1 - 0,215m_1)} \quad (2.57)$$

$$m_7 = \begin{cases} \frac{S_0}{d} - 0,25\pi m_1 & S_0 > 0,25\pi r \\ 0 & S_0 \leq 0,25\pi r \end{cases} \quad (2.58)$$

$$m_8 = \begin{cases} m_7 + 0,414m_1 & S_0 > 0,25\pi r \\ m_7 + \sqrt{2}(1 - \cos(\frac{S_0}{R}))m_1 & S_0 \leq 0,25\pi r \end{cases} \quad (2.59)$$

S_0 negatif basınç bölgesi uzunluğu olup,

$$S_0 = (0,3\pi f r_{BK} \phi_a) + 1,95b_{BK} \quad (2.60)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. r_{BK} , yalpa ekseninden yalpa omurgasının ucuna kadar olan mesafe ve R , sintine dönümünün yarıçapıdır. Bunlar aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$r_{BK} = d \sqrt{[H_0 - (1 - \frac{\sqrt{2}}{2}) \frac{R}{d}]^2 + [1 - \frac{OG}{d} - (1 - \frac{\sqrt{2}}{2}) \frac{R}{d}]^2} \quad (2.61)$$

$$R = \begin{cases} 2d \sqrt{\frac{H_0(\sigma-1)}{\pi-4}} & R < d, R < \frac{B}{2} \\ d & H_0 \geq 1, \frac{R}{d} > 1 \\ \frac{B}{2} & H_0 \leq 1, \frac{R}{d} > H_0 \end{cases} \quad (2.62)$$

Yalpa omurgası tekne etkileşimi bileşenini tahmin etmek için yapılan çalışmada (Ikeda vd., 1978), tahmin yöntemini basitleştirmek için kullanılan yaklaşımda modelin kesiti incelendiğinde, modelin dikey bir yan duvardan, yatay bir tabandan ve çeyrek dairenin sintine yarıçapından oluştuğunu varsayar. Sintine omurgasının konumu ve açısı, çeyrek daire yayının orta noktası ve gövde yüzeyine dik olarak alınır. Bundan dolayı bu şekilde kesite sahip olmayan tekneler için, bu bileşenin tahmini için formülasyonu tatmin edici bir şekilde uygulamak mümkün olmayabilir.

Yalpa omurgasının bir diğer alt sönüm bileşeni ise dalga yapma bileşenidir. Bu bileşen için Bassler ve Reed (2009) tarafından aşağıdaki gibi bir formül önerilmiştir.

$$\hat{B}_{BKW_0} \sim C_{BK}(b_{BK}) \exp\left[-\frac{\omega^2}{g} d_{BK}(\phi)\right] \quad (2.63)$$

Burada, C_{BK} , yalpa omurgası genişliği olan b_{BK} 'in bir fonksiyonudur. Denklemi basitleştirmek için C_{BK} 'in yalpa omurgası genişliğinin gemi genişliğine oranı olduğu varsayılmıştır. Sönümün sıfır yalpa genliği için sıfır olduğu varsayılır. Serbest yüzeyden yalpa omurgasına olan mesafe olan d_{BK} ise aşağıdaki formül ile verilmiştir.

$$d_{BK}(\phi) = \left\{ \left[\frac{\frac{2d}{B}}{\sqrt{1 + \left(\frac{2d}{B}\right)^2}} \right] \cos\phi - \left[\frac{2}{\sqrt{1 + \left(\frac{2d}{B}\right)^2}} \right] \sin\phi \right\} \quad (2.64)$$

İleri hız olması durumunda ise bu alt bileşen aşağıdaki gibi bulunur.

$$\frac{B_{BKW}}{\hat{B}_{BKW_0}} = 0,5 [(A_2 + 1) + (A_2 - 1)\tanh(20\tau - 0,3) + (2A_1 - A_2 - 1)\exp(-150(\tau - 0,25)^2)] \quad (2.65)$$

Bu denklemde,

$$A_1 = 1 + \xi_d^{-1,2} e^{-2\xi} \quad (2.66)$$

$$A_2 = 0,5 + \xi_d^{-1} e^{-2\xi d} \quad (2.67)$$

$$\xi_d = \frac{w_E^2 d}{g} \quad (2.68)$$

$$\tau = \frac{V w_E}{g} \quad (2.69)$$

şeklinde hesaplanır.

Ikeda'nın tahmin yönteminde, ileri hızın yalpa omurgası bileşeni üzerindeki etkisinin küçük olduğu ve göz ardı edilebileceği varsayılmıştır. Ancak, bir gemi yüksek ileri hıza sahipse, yalpa omurgasına etki eden kaldırma kuvvetini göz ardı etmek zordur. Yalpa omurgasına etki eden kaldırma kuvveti Ikeda ve Katayama (1994) tarafından aşağıdaki denklem ile gösterilmiştir.

$$L_{BK} = \frac{\pi \rho}{2} \frac{R^2 b_{BK}^2}{2} \quad (2.70)$$

Burada V_R yalpa hareketinden kaynaklı yalpa omurga üzerinde ölçülen toplam bileşke hızdır. Bu kuvvetten hareketle yalpa omurgası kaldırma kuvveti bileşeni aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$B_{BKL} = \frac{2L_{BK} r_{BK}}{\phi_a w} \quad (2.71)$$

3. YALPA SÖNÜMÜNÜN AKIŞ GÖRÜNTÜLEME İLE ANALİZİ

3.1. Akış Görüntüleme Teknikleri

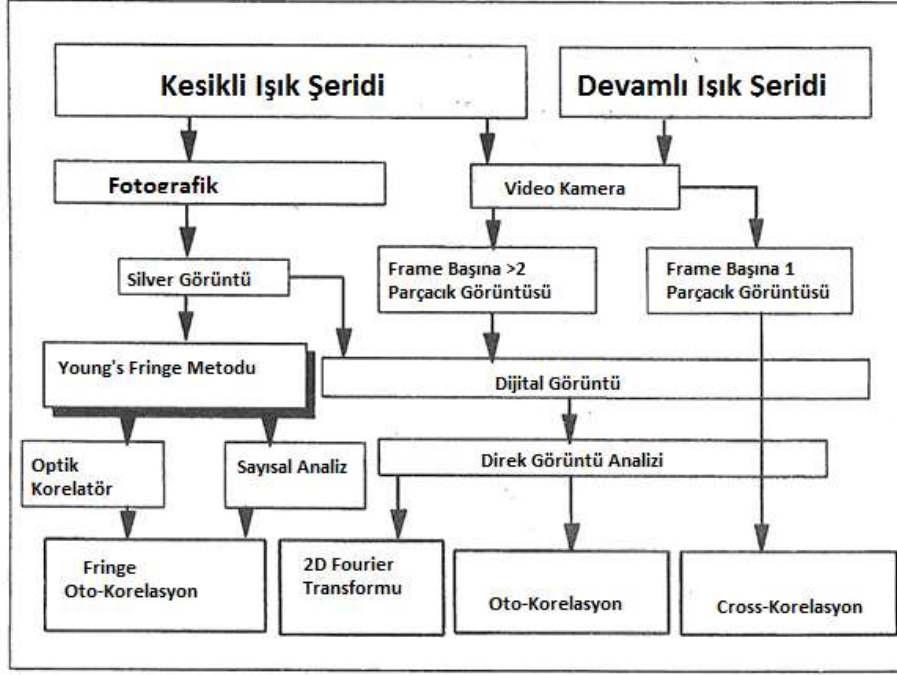
Akışkanlar mekaniği üzerine araştırma yapan bir araştırmacı için muhtemelen en önemli olan ölçüm akım hızı ölçümleridir. Bu amaçla önceleri basınç propları kullanılmıştır. Sıcak tel (Hotwire) tekniğinin kullanılması yüksek frekanslı akımları ölçme yetisi kazandırmıştır. Lazer-Doppler hız ölçüm tekniğinin (LDV) gelişmesi ile birlikte de kesintisiz akımların hız ölçümleri yapılabilmektedir. LDV düşük hızlı akımlardan süpersonik akımlara kadar birçok uygulamada kullanılabileceğini göstermiştir. Ancak türbülanslı ya da kararsız akışlarda tek noktada ölçüm yapabilen bir tekniktir (Von Karman Institute, 2001).

Birçok türbülans modeli, tek noktada zamana bağımlı bir hesaplama yapar. Yıllar boyunca tam bir alan içerisinde ölçüm yapma ihtiyacı doğmuştur ve bunun için sayısız teknik denemeleri yapılmıştır. Çok noktalı LDV ölçümü bu denemelerin sonuncusu olmuş ve karmaşık akışları yorumlamada bir adım öteye gidilmiştir. Parçacıklı akış görüntüleme hız ölçümü (PIV) tekniği LDV'nin gelişmesinin ardından, bir alanın tam ölçümünün yapılabilmesi için ortaya çıkmıştır. 70'li yılların sonunda ortaya çıkmış 80'lerde kısmi olarak çalışmalarda kullanılmaya başlanmış ve 80'lerin sonlarında yayılmaya başlamıştır. Şu anda birçok alanda uygulaması olan yüksek potansiyelli tam gelişmiş bir tekniktir. Bu tekniğin birçok avantajı bulunmaktadır. Bunlardan bazıları, akım hız alanlarının çok tekrar yapılmadan ölçülebilmesi, test süresinin ve hazırlık aşamasının daha az olması ve en önemlisi de diğer tekniklerin görüntülemesi imkânsız olan girdap alanlarını görüntüleyebilmesidir (Raffel vd., 2007).

3.2. Parçacıklı Akış Görüntüleme Hız Ölçümü Tekniği (PIV)

PIV metodu, LDV gibi, akım tarafından taşınan parçacıkların hızlarının ölçülmesi temeline dayanır. Fakat, LDV'nin aksine tam bir akış alanı, incelenmek için aydınlatılır. Bu işlem, dar bir ışık huzmesinin aydınlatılmak istenen bölgede oluşturulması ile gerçekleşir. Akımı takip eden parçacıklar bu yolla görünür hale gelip, görüntüleri kaydedilir. Bu kayıtlar ya zamanla tek parçacığın iz bırakan görüntülerini ya da tüm alanın anlık görüntülerini içerir. Parçacıkların konum değişimi bu kayıtların analizi ile açıklanır.

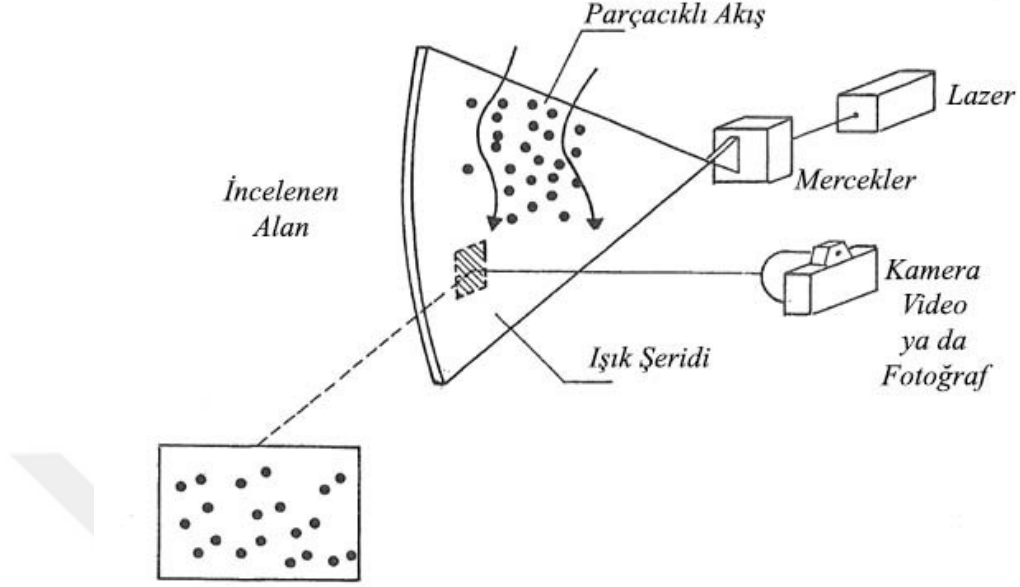
Yani PIV'nin temel prensibi gayet basittir. Aydınlatılan bölgedeki parçacıkların konum değişimi ile akımın anlık hızı ölçülür. Doğru ölçüm iki adımda gerçekleştirilir. İlk adım görüntülerin kaydedilmesi, ikinci adım ise kaydedilen görüntülerdeki parçacıkların konum değişim analizlerinin yapılmasıdır. PIV aşağıdaki şema üzerinden görülebileceği adımlarla analiz gerçekleştirir (Von Karman Institute, 2001).



Şekil 3.1. PIV analiz süreçleri (Von Karman Institute, 2001)

3.2.1. PIV Sistemi Donanımları ve Bileşenleri

PIV'de kullanılan temel sistem Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Işık şeridi atımlı bir lazer tarafından ve bir silindirik lensten geçerek oluşturulmaktadır. Bir fotoğrafik kamera ise, ışık şeridine odaklanarak, aydınlatılmış parçacıkların geçiş izlerini görüntülemek üzere konumlandırılmaktadır. Kamera objektifi, ardı ardına en az iki atımlı olacak şekilde yanıp sönen lazer ışığına göre açılır. Akış içerisindeki aydınlatılmış parçacıklardan böylelikle farklı iki zamandan fotoğraf alınmış olur. Işık yoğunluğunun yeterli olması ve lazerin iki atım süresinin odak bozulmasını önleyecek kadar kısa olması önemlidir.



Şekil 3.2. PIV'de kullanılan temel bileşenler (Von Karman Institute, 2001)

3.2.2. Görüntü Edinimi

Görüntü ediniminde iki farklı yöntemden bahsedilebilir. Bunlardan ilki fotografik teknik diğeri ise video tekniğidir. Bunlardan ilkinde fotoğraf çiftleri şeklinde görüntü elde edilirken ikincisinde video formatında bir görüntü elde edilir.

Fotografik teknikte pozlamalar arasındaki süreler, fotografik kayıt türünün seçimi, fotoğrafların işleme süreci, optik seçimi ve işlem sonrası süreç metodu kayıt parametrelerinden bazılarıdır.

Fotografik kayıt türü yüksek çözünürlük sağlayacak şekilde seçilmelidir. Ancak aynı zamanda iyi bir kontrast sağlayacak kadar da hassas olmalıdır. Birçok durumda, kaydın yüksek çözünürlüklü ve kontrastlı olması oluşacak olan gürültü sinyalini azaltır (Von Karman Institute, 2001).

Optik kullanımı da aynı zamanda hassas bir parametredir. Kontrastı yüksek tutabilmek amacıyla, parçacık görüntüsünü olabildiğince keskin yapmak temeldir. Makro lensler gibi ileri bir kamera lensi seçilmelidir. Kameranin kendisi de iyi bir kalitede olmalıdır. İki fotoğraf karesi arasındaki zaman süresinin çok kısa olması gerekmektedir. Kameranin odaklanması ve dikkatle ayarlanması gerekmektedir.

Fotografik teknik halen en yüksek çözünürlük sağlayan görüntü kayıt metodudur. Ancak, son yıllarda video kayıt tekniği dikkate değer ölçüde gelişmiştir. PIV’de de bu gelişen tekniklerin kullanılması gayet doğaldır. PIV kullanıldığından beri fotografik görüntüleme metodu yüksek çözünürlük vermesine rağmen, ayarlaması ve sonuç alması zor bir metottur. Bu yüzden zamanla video kayıt yönteminin, bu yöntemin yerini alması beklenmektedir.

Fotografik yöntem ile video kayıt yönteminin temel farkı, fotoğraf makinesi yerine video kayıt kamerasının değişimidir. Video kamera yöntemi de fotografik film yöntemi ile aynı şekilde kurulur. Genellikle bir bağdaştırıcı yardımı ile her iki yöntemdeki kayıt cihazları da bilgisayara bağlanır.

Video kayıt yönteminin en elverişli yanı, akım içerisindeki parçacıkların iz görüntülerinin bu teknikte anında görülebilmesidir. Bu durum araştırmacıya, parçacık yoğunluğuna anında müdahale etme ya da kamera odaklanmasını anında ayarlamasına izin verir. Bu fotografik yöntem ile çekimdeki usandırıcı ayarlama sürecini azaltan elverişli bir durumdur. Diğer bir avantaj ise, video kaydı direk bilgisayara yapıldığından, çalışma başlar başlamaz analizin de başlamasına imkân vermesidir.

Bunun gibi elverişli yanlarının olmasına rağmen elde edilen görüntünün çözünürlüğü aynı koşullardaki fotografik tekniğine göre düşüktür. Önceki bölümde verildiği üzere, optik sistem operasyonunun kırılma limitinden dolayı, kaydedilen görüntü boyutu, büyütülmüş parçacık izinden çok daha büyüktür. Yani büyütme oranı 1 iken, 2 mikrometre olan bir parçacık, görüntülendiğinde, 30 mikrometre olarak görülür. 1 mm başına 300 çizgi çifti çözünürlüklü, 35 mm'lik bir fotografik filmi, referans alırsak, yaklaşık 10000 obje görüntüleyebiliriz. 1024 piksellik bir video kamera da aşağı yukarı aynı sonucu vermektedir. Büyütme oranı ve piksel büyüklüğü incelenecek olan duruma göre seçilmelidir.

3.2.2. Aydınlatma

Aydınlatma PIV sisteminin en önemli kısımlarından birisidir. Aydınlatma kalitesi elde edilecek olan sonuçların kalitesini de doğrudan etkileyecektir (Von Karman Institute, 2001).

PIV sisteminde herhangi bir ışık kaynağının kullanılabilmesine rağmen dar ve güçlü bir ışık alanı oluşturabilmenin en uygun yolu genellikle bir lazerdir. Diğer ışık kaynakları ile de bazı deneyler yapılmıştır ancak, aralarında en çok kullanılan açık ara fark ile lazerdir. Lazer ışınları güçlüdür ve kolaylıkla mercek ve yansıtıcılarla yönlendirilebilen aydınlatma

kaynaklardır. Kullanım yerine göre devamlı veya atımlı olarak kullanılabilirler. Argon iyon lazerleri devamlı ışık için ve Ruby ya da Nd-Yag lazerleri ise atımlı ışık kaynağı için iyi seçimlerdir. Bunların arasından Ruby lazerleri kameranın odaklanması ve görüntülemesi açısından daha iyidir. Aydınlatma alanı küresel pozitif lensler kullanılıp lazerin optik sistemindeki ışınının ıraksaması düşürülerek şerit haline getirilmesi ile elde edilir.

Birçok durumda, atımlı lazer kullanılır fakat düşük hızlı akışlarda (2m/s' den daha düşük)(Von Karman Institute, 2001) mekanik veya opti elektrikli objektifle beraber argon gibi devamlı bir lazer kullanılabilir.

Lazer ışık şeridinin kalınlığı ise bir başka önemli parametredir. Akış hızı, akışın niteliği, odak mesafesi, ölçüm alanının büyüklüğü gibi parametreler, lazer şeridinin kalınlık seçimini etkilemektedir.

3.2.3. Parçacık

LDV'de olduğu gibi PIV de akışa eklenen parçacıkların hızını ölçen bir tekniktir. Bu yüzden bu parçacıkların akışı doğru bir biçimde izlemesi gerekir ki bu da parçacıkların çok küçük olması gerekliliğini doğurur. LDV'de bu parçacıkların seçimi güvenli olmaları için bu sınırlamalar altında yapılır. Birçok durum için akış içerisindeki parçacık, akışı takip edecek kadar küçük olmalıdır. Aksi takdirde çok az ışık yansıtacaklardır (aydınlanacaklardır). Ayrıca, bu yansıma aydınlatıcı ışığa 90 derece açı yapacak şekilde kaydedilecektir. Bunun bir sonucu olarak kamera, en çok ışık miktarını toplamak için olabildiğince büyük açıklıkta kullanılacaktır. Alanın derinliği çok küçük olacağından kamera odağı büyük bir dikkatle ayarlanmalıdır. Ancak kameranın algılayabileceği izler oluşturabilmek adına çok da küçük parçacıklar olmamalıdır. Pratikte 1 ile 100 mikrometre arasında değişen parçacık boyutları uygundur. Bu boyut aralığındaki parçacıklarda fotoğraf büyüklüğü lensin kırınım etkisine göre belirlenir. D_i parçacık izinin efektif ölçüsü ise,

$$D_i = \sqrt{(M^2 \cdot D_p + D_e)} \quad (3.1)$$

burada M büyütme oranı, D_p parçacık çapı ve D_e parçacığın kırılmış görüntüsünün çapı olup,

$$D_e = 2.44(1 + M).f\#. \lambda \quad (3.2)$$

$f\#$, kayıt optiklerinin f-sayısının karakteristik açıklığıdır (genel olarak 2.8 ile 11 arasındadır) ve λ kullanılan lazerin dalga boyudur. Not edilmelidir ki, bir çok durumda, küçük parçacık kullanılıp ve büyütme oranı 1 alınca, görüntülenen çap (D_e) yaklaşık olarak yukarıda verilen bağıntı ile bulunur.

Yüksek kaliteli bir ölçüm için parçacık konsantrasyonu da önemli bir parametredir. Yüksek iz konsantrasyonu hız ölçümünü engellemeyecektir ancak, gürültü sinyalini (signal to noise) göre epey yükseltecektir. Bu durum da analiz sırasında fotoğraf karelerinin gürültü filtreleme kısmında zaman kaybettirecektir. PIV'de parçacık konsantrasyonu parçacıkları birbirinden ayırt edebilecek düzeydedir. Parçacık konsantrasyonu az olursa görüntü alınının her yerinde hız ölçümü yapmak mümkün olmayacaktır. Bu yüzden göz önüne alınması gereken, parçacıkların ayırt edilebileceği düzeye kadar konsantrasyonun olabildiğince yüksek olmasıdır. Genel olarak metre küp başına 10^{10} ile 10^{11} arasında parçacık düşmesi uygun olacaktır. Ancak parçacık miktarı 10^{11} ve 10^{12} 'yi aştığında yüksek gürültü (karıncalanma) başlayacaktır. Pratik olarak, maksimum konsantrasyon C aşağıdaki bağıntıdaki gibi bulunmalıdır.

$$\sqrt{\left(\frac{1}{\Delta z}\right)} \gg \frac{D_i}{M} \quad (3.3)$$

Δz ışık şeridinin kalınlığıdır. Parçacık konsantrasyonunun alt limiti ise alınan resmin analizine bağlı olarak yapılır.

PIV'de genel olarak, parçacık konsantrasyonu mümkün olan en yüksek oranda yapılır. Ancak unutulmamalıdır ki, üst sınırdan da çok yüksek olan parçacık konsantrasyonu, akış karakteristiklerini bozabilir ya da aydınlatma kalitesini çok fazla düşürebilir.

PIV'de su içerisindeki uygulamaları için kullanılan parçacıklar günümüzde genellikle, yansıtıcı cam küreciklerden, gümüş kaplı cam küreciklerden, polimer tabanlı partiküllerden ya da suda çözünmeyen organik materyallerden üretilmektedir. Kullanılan parçacığın akışkan ile benzer yoğunlukta olması beklenir.

3.2.4. Görüntü Analiz Süreci

Görüntü analiz süreci dijital fotoğraf ve video kayıt teknolojisi gelişmeden önce, Young's Fringe tekniği denen Fringe şeritlerinin analizi ve hesaplanmasına dayanan bir optik süreç ile yapılmaktaydı. Zamanla gelişen bilgisayar ve dijital fotoğrafçılık görüntü analizinin bilgisayarlarda sayısal olarak ve daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesinin önünü açmıştır. Bu nedenle günümüzde optik süreç yerine tam dijital süreçle analizler gerçekleştirilmektedir (Von Karman Institute, 2001).

Dijital ya da "online" PIV tam dijital bir işlemdir. Işık şeridi görüntüsü bir Video CCD ya da CID kamera ile kaydedilir ve direkt olarak dijital forma aktarılır. Video kamera bir hareketli ya da sabit bir kamera olabilir. İlk durumda, görüntülerin zaman serileri işlenirken, çoklu parçacık görüntüleri kaydedilir. Bu dijital görüntüler, görüntü proses sistem bilgisayarı tarafından anında analiz edilebilir. Bu süreç, zaman kazandıran online analize izin verir. PIV ölçümleri deneme-yanılma tabanına bağlı hassas ayarlamalar gerektirdiğinden bu on-line metodu tüm ölçüm için zaman kazandırıcı bir tekniktir.

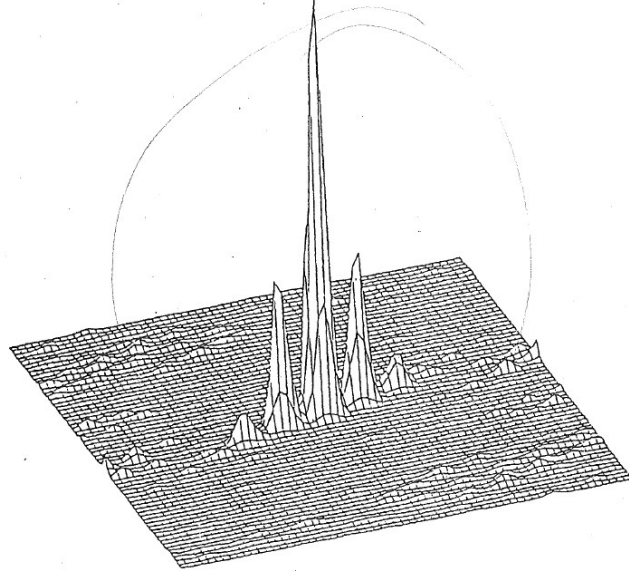
Bu tarz bir operasyonda video kamera durağan bir fotografik cihaz gibi kullanılır. Akış alanı genellikle lazer olan bir atımlı ışık şeridi ile aydınlatılır. Video kamera açıkken, birkaç ışık flaşı üretilir. Bunun bir sonucu olarak, aydınlatılan her parçacığın farklı bir karede görüntülediği birkaç görüntü ortaya çıkar. Sonra görüntü bilgisayara bağlı bir bağdaştırıcı sayesinde dijital ortama aktarılır. Bu görüntü direk olarak bir ekranı verilerek, deneyi gerçekleştiren operatörün sonuçların kalitesi ile ilgili anında yorum yapmasına olanak tanır ve gerekirse çeşitli parametrelerde anında oynama yapmasına imkân tanır. Görüntü bir kez kabul edilebilir olduğunda, bilgisayar sayısal çözümlemeyi gerçekleştirebilir. Donanım ve yazılım alanında bu doğrultuda her yıl yenilikler gerçekleşmektedir.

PIV, temel olarak parçacıkların fotoğraf tabanlı lazer aydınlatmaları veya dijital PIV'deki lazer atımları arasındaki zamanda hareket ettiği mesafeyi belirler. Bu mesafeyi belirlemenin en yaygın yöntemleri parçacık izleme veya korelasyondur. Kareler 16 piksel ya da 16'nın katları olan sorgulama hücrelerine bölünürler. Sorulama hücreleri kare ya da akışın tipine göre uzatılmış dikdörtgenler veya uygun şekillere sahip olabilirler. Parçacık görüntüsünün 2 boyutlu dijital oto korelasyonu bir FFT algoritması kullanılarak yapılır. Analiz paralel bağlı bir bilgisayar işlemcisi ya da bilgisayarın kendi işlemcisi tarafından yapılabilir. Günümüzde hızla gelişen bilgisayar teknolojisi sayesinde hızlı işlemciler, 1000 vektörlük bir kareyi birkaç saniyeden daha az sürede analiz edebilmektedir.

Bu kısımda otokorelasyon, çapraz korelasyon kısaca açıklanacaktır. Bu korelasyon tekniklerindeki farklılıklar, birinci ve ikinci görüntüler için görüntü pencere alanlarıdır. Otokorelasyonda hem birinci hem de ikinci görüntü penceresi için aynı görüntü penceresi kullanılır. Tek çerçeveli çapraz korelasyonda, ikinci görüntü penceresi, aynı penceredeki birinci görüntüden akış yönünde kaydırılır. Tek çerçeveli çapraz korelasyonun işlenmesi, birinci ve ikinci görüntü pencereleri arasındaki örtüşme miktarına bağlıdır.

İki çerçeveli çapraz korelasyonda birinci görüntü penceresi birinci karede, ikinci görüntü penceresi de ikinci karede yer alır. Zaman gecikmesindeki her iki sorgulama penceresi de aynı koordinata sahiptir. Korelasyon alanı, sorgulama noktası içindeki her bir parçacık ile diğer her parçacık arasındaki baskın mesafeyi gösterir. Her parçacık görüntüsünün kendisinin korelasyonunu temsil eden maksimum yoğunluk noktası merkezde bulunur. Bu baskın parçacık aralığına karşılık gelen pozitif yer değiştirme zirvesi adı verilen ikinci bir tepe noktasıdır.

Otokorelasyon fonksiyonu simetriktir, böylece her yer değiştirme tepe noktası zıt yönde eşit boyutta bir tepe noktasına sahip olur. Bir tepe noktası, birinci ve ikinci parçacık görüntüleri arasındaki mesafeyi ileri hızı, diğeri ise yedek hızdaki ikinci ve birinci parçacık görüntüleri arasındaki mesafeyi temsil eder. Şekil 3.3, PIV tekniklerinin oto korelasyon sürecinin korelasyon haritası göstermektedir.



Şekil 3.3. Otokorelasyon haritası (Von Karman Institute, 2001)

En yüksek ortadaki tepelik, sorgulama hücreesindeki parçacık yer değişimi ortalamasını verir. Piksel altı yoğunluğu interpolasyon algoritması ile yapılır. Tepelerin

yükseklikleri ölçümün iyi olduğuna bir kanıttır. Yalnızca verilen eşik değerinin üzerindeki tepecikler dikkate alınır.

Temel olarak, bir yüksek hızlı video kamera zaman serisi halinde saniyede çok yüksek kare çekebilme kapasitesine sahiptir. Bu özellik, kareleri tek bir parçacık izi ile analiz etmede kullanılabilir. Ardışık kareler, sonra eklenerek çoklu görüntü halinde analiz edilebilir. Daha iyi bir teknik ardışık sorgulama hücrelerinin çapraz korelasyonuna bağlıdır. Bu tekniğin avantajı otokorelasyondan farklı olarak, parçacık izinin yönünü düzeltmesidir. Çoklu görüntülerde bir parçacık izinin diğerlerinde birbirini takip etmesi gerekmekte ve yer değişiminin çakışma olmasını engelleyecek kadar büyük olması gerekir. Bunun anlamı verilen hız değeri bu resimden ölçülebilir.

Bu kareleri analiz etmek otokorelasyon tekniğine çok benzerdir. Farkı ise, çapraz korelasyon kararlıdır. Bir parçacık izinin yer değişiminin 0 olduğu bir tepe yoktur bu nedenle gürültü oranı genelde düşüktür.

3.2.5. Üç Boyutlu PIV Teknikleri

PIV iki boyut için yeterli akış çözümlemeleri vermeye başladıktan sonra, akışkan dinamiği ile uğraşan araştırmacılar, üçüncü boyutun uygulanabilirliğini tartışmaya başladılar. PIV tekniğini 3 boyutlu analizlerde kullanmak için üç yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan ilki holografi yöntemi, ikincisi ise günümüzde daha çok kullanılan stereoskopik yöntemi, diğer yöntem ise çok daha pahalı olan tomografik PIV'dir.

Holografi fotoğrafının 3 boyutlu eşi olarak düşünülebilir. Bu yüzden fotografiden holografie geçmek çok normal bir durum olmuştur. Temel prensiplere bakıldığında, holografi birçok avantaj sunmaktadır ancak uygulaması da bir o kadar zordur.

Üç boyutlu PIV analizi parçacık izlerinin görüntülerinin aydınlatılmış bir hacim içerisinde görüntülenmesini sağlar. Aynı zamanda bu durum odaklama problemini de basitleştirir çünkü hologram odaklama yapmaya ihtiyaç duymaz. Hologram kısmı bittikten sonra üç boyutlu akış alanı görüntüsü tekrar oluşturulur ve parçacık izi görüntüleri yukarıda anlatılan tekniklerden birisi ile analiz edilir.

Stereoskopik fotoğrafı neredeyse fotoğrafının kendisi kadar eskidir. PIV, fotoğrafı tekniklerinin avantajlarının kullanıldığı bir teknik olduğundan, stereoskopik alanda gerçekleştirilen gelişmelerden de faydalanır. Bu teknikte iki ya da üç sabit kamera, iki farklı açıdan, aynı parçacık görüntüleme alanından iki ayrı görüntü almak için kullanılır (2D-3C).

Her iki görüntü de işlenir ve analiz bilgileri yeniden işlenerek üçüncü bir bileşen ortaya çıkarılır. Işın şeridine göre enine olan harekete dair bir analiz gerçekleştirilir. Bu hareketin yer değişimi çok iyi bir hassaslıkta gerçekleştirilebilir. Bu tekniğin zorluğu ise, kameraların ışın şeridine göre 90 dereceden farklı bir açıyla yerleştirilmelerinin gerekliliğidir. Bundan dolayı odaklama bir sorun olarak karşımıza çıkar. Bu sorunun bir çözümü, iki kamerayı yan yana ışın şeridine dik olacak şekilde ayarlamaktır. Bu kameraların çok geniş bir görüş açısı olmalıdır. Bundan sonra problem küçük bir büyütme oranı olacaktır. Yine de bu tip sorunları olmasına rağmen, stereoskopik metot iyi bir 3 boyutlu ölçüm tekniğidir.

Tomografik PIV (Tomo-PIV) yöntemi, üç boyutlu hız vektörü alanlarını belirlemeye yönelik özel yeteneğe sahip PIV ölçüm tekniklerinin nispeten yeni bir örneğidir. Düzlemsel 2 boyutlu PIV tekniğine benzer şekilde, Tomo-PIV ilkesi, ilgili bölgenin yakalanan iki görüntüsü üzerinde görüntülenmiş izlenen parçacıkların yer değiştirmesinden bir akıştaki hız vektör alanının hesaplanmasına dayanır. Düzlemsel bir stereoskopik PIV kurulumuyla, iki boyutlu bir düzlemde (2D-3C) üç bileşenin tümü ile anlık hız vektör alanlarını belirlemek mümkündür. Ayrıca Tomo-PIV, anlık hız vektörü hacminin (3D-3C) belirlenmesini sağlar (Scarano, 2013).

Yöntem, bu dağılımın birkaç kamera üzerindeki izdüşümlerine dayanan anlık bir parçacık dağılımının tomografik yeniden yapılandırmasından yararlanır: parçacıklar, ilgili akışa eklenir ve dikdörtgen tabanlı bir hacimde kısa bir lazer ışığı atımıyla aydınlatılır. Parçacıklar tarafından saçılan ışık, Scheimpflug koşulunu uygulayan birkaç (yaklaşık 3 ila 6, tipik olarak 4) kamera tarafından yakalanır (Scarano, 2013). Bu şekilde, anlık parçacık dağılımının ağırlıklı izdüşümleri, kamera sensörleri tarafından farklı görüş yönlerinden kaydedilir. Araştırılan hacim boyunca her bir kamera pikselinin kaydı hakkındaki bilgiler, bir üç boyutlu kalibrasyon prosedüründen elde edilen bir polinom yaklaşımıyla tanımlanır.

Akış içindeki hacminin aydınlatılması ve görüntülenmesi birbirini takip eden iki zaman adımıyla gerçekleştirilir ve her iki zaman adımı için bir tomografik rekonstrüksiyon gerçekleştirilir. Elde edilen voksel uzaylarının üç boyutlu çapraz korelasyonunun düzenli bir ızgara üzerinde yerel olarak hesaplanmasıyla, iki boyutlu PIV değerlendirme sürecine benzer şekilde yeniden yapılandırılmış parçacık dağılımlarının yer değiştirme vektör alanı elde edilebilir.

4. YALPA SÖNÜMÜNÜN DENEYSEL ANALİZİNİN YAPILMASI

Bu kısımda yapılmış olan çalışmada kullanılmış olan materyal, yöntem, deney mekanizmaları ve deneye ait sınır koşulları anlatılacaktır. Deneyler Osaka Metropolitan Üniversitesi, Katayama Laboratuvarı'nda, üniversiteye ait olan çekme tankında gerçekleştirilmiştir. Katayama Laboratuvarında bulunan Model 35 isimli sökülüp takılabilir yalpa omurgalarına sahip olan model kullanılmış olup, yalpa sönümü testleri iki ayrı ölçüm yöntemi olan zorlanmış yalpa ve serbest bırakma yöntemleri ile yapılmıştır. Farklı şekillerdeki yalpa omurgaları kullanılarak farklı yalpa genliklerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerin tamamı modelde herhangi bir ileri hız olmaksızın yapılmıştır. Deneyler ITTC (2017) tarafından önerilmiş olan prosedürler takip edilerek yürütülmüştür.

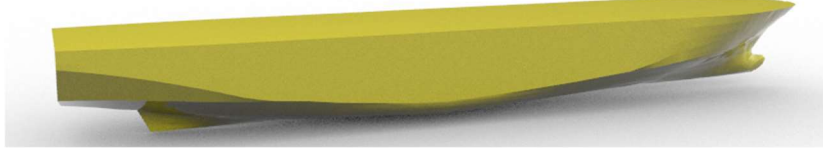
4.1. Model ve Yalpa Omurgası Özellikleri

Deneylerde Katayama Laboratuvarında bulunan Model 35 isimli, sökülüp takılabilir yalpa omurgalarına sahip olan model kullanılmıştır. İlgili model bir ro-ro feribot gemisinin modeli olup 1/50 ölçekte modellenmiştir. Model 35'in temel parametreleri aşağıdaki tablodan görülebilir.

Tablo 4.1. Model 35'in temel parametreleri

Parametre	Değer
Ölçek	1/50
L_{bp}	1,12 m
L_{oa}	1,36 m
B	0,246 m
D	0,1394 m
T	0,0596 m

Model 35'e ait izometrik ve gerçek görünüm Şekil 4.1'den görülebilir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.1. Model 35'e ait, (a) dijital katı model izometrik görünümü, (b) sintine dönümleri ve karina görünümü (c) modelin profilden görünümü

Gemi modeline takılarak deneylerde kullanılmak üzere 3 farklı yalpa omurgası belirlenmiştir. Bu omurgalar Osaka Metropolitan Üniversitesi, Talaşlı İmalat Laboratuvarı'nda, 3B yazıcıda üretilmiştir. Modellerin 16.05.2022 itibari ile OMU Talaşlı İmalat Laboratuvarı'nda üretilmiştir.

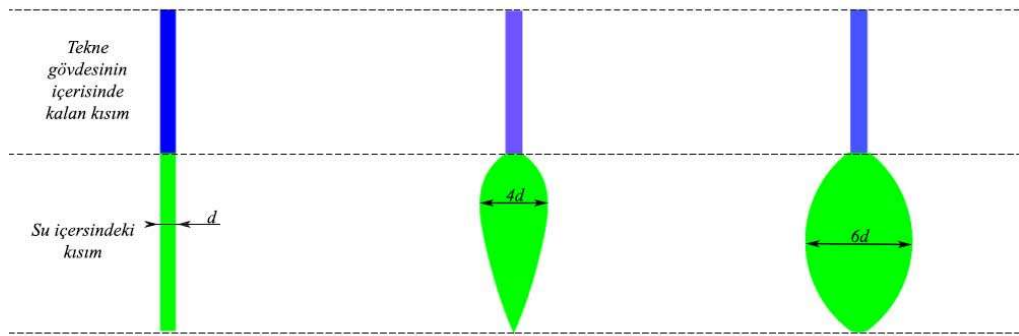
Aşağıdaki tabloda farklı yalpa omurgalarına ait geometriler yandan görünüş, önden görünüş ve orta kesit görünüşü olmak üzere verilmiştir. İlgili tasarımlar, Rhinoceros modelleme paket programı ile, ICEM CFD grid oluşturma programı üzerinde tasarlanmışlardır.

Ayrıca üçgen kesitli bir yalpa omurgası daha tasarlanıp üretilmiştir, ancak deneyler esnasında kırıldığı için burada yer verilmemiş, sayısal çalışmada değerlendirilmiştir.

Tablo 4.2. Dizayn edilen yalpa omurgalarının görünümleri

Yalpa Omurgası Adı	Yandan Görünüş	Önden Görünüş	Orta Kesit Görünüş
Levha Omurga			
Kanat kesit omurga			
Oval kesit omurga			

Aşağıdaki şekilde deneylerde kullanılmış olan yalpa omurgalarının orta kesitlerinin temel ölçüleri verilmiştir. Yukarıdaki tablodan da görülebileceği üzere, yalpa omurgalarının profil iz düşüm alanları birbirleri ile eşittir. Yalpa omurgaları tasarımları yapılırken, ek olarak ters üçgen biçimli bir tasarım daha yapılmış olup, üç boyutlu yazıcıdan çıktıktan sonra kırılması nedeni ile deneylerde kullanılması mümkün olmamıştır.



Şekil 4.2. Yalpa omurgalarının orta kesitlerinin temel ölçüleri

Tasarlanmış olan yalpa omurgaları, 3 boyutlu yazıcı kullanılarak basılmıştır. Ardından Model 35'in üzerinde orijinal olarak bulunan yalpa omurgasının yüzey kalitesine yaklaşabilmek için, zımparalama, astar boya ve yüzey kat boyası uygulanmıştır.



(a)



(b)

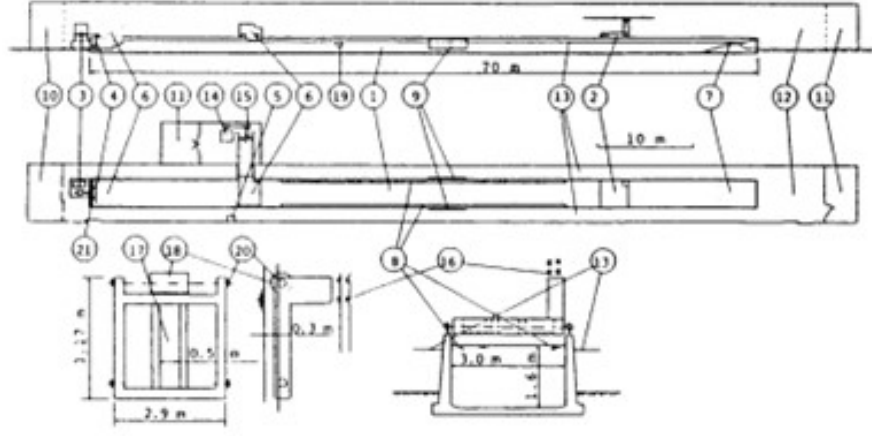


(c)

Şekil 4.3. (a) 3 boyutlu yazıcıda üretilen yalpa omurgası çiftleri (b) Yüzey işlemi gerçekleştirilmiş olan yalpa omurgası örneği (c) Yalpa omurgasının görünümü

4.2. Çekme Tankı Özellikleri

Osaka Metropolitan Üniversitesi Nakamozu Kampüsü, Deniz Sistemleri Mühendisliği altında bulunan çekme tankı laboratuvarı 1949 yılında inşa edilmiştir. Çekme tankı üzerinde arabalı vinç, düzenli ve düzensiz dalgalar üretebilen dalga üretici, yalpaya zorlama mekanizması, serbest bırakma kolu ve mekanizması, görüntü yakalama ve işleme donanımı, PIV donanımı, rüzgar üretici gibi donanımlar mevcuttur. Şekil 4.4'te çekme tankının orijinal kılavuzu, ölçüleri ve görünümü verilmiştir. Çekme tankı 70 m uzunluğa, 3 m genişliğe ve 1,6 m derinliğe sahiptir.



(a)

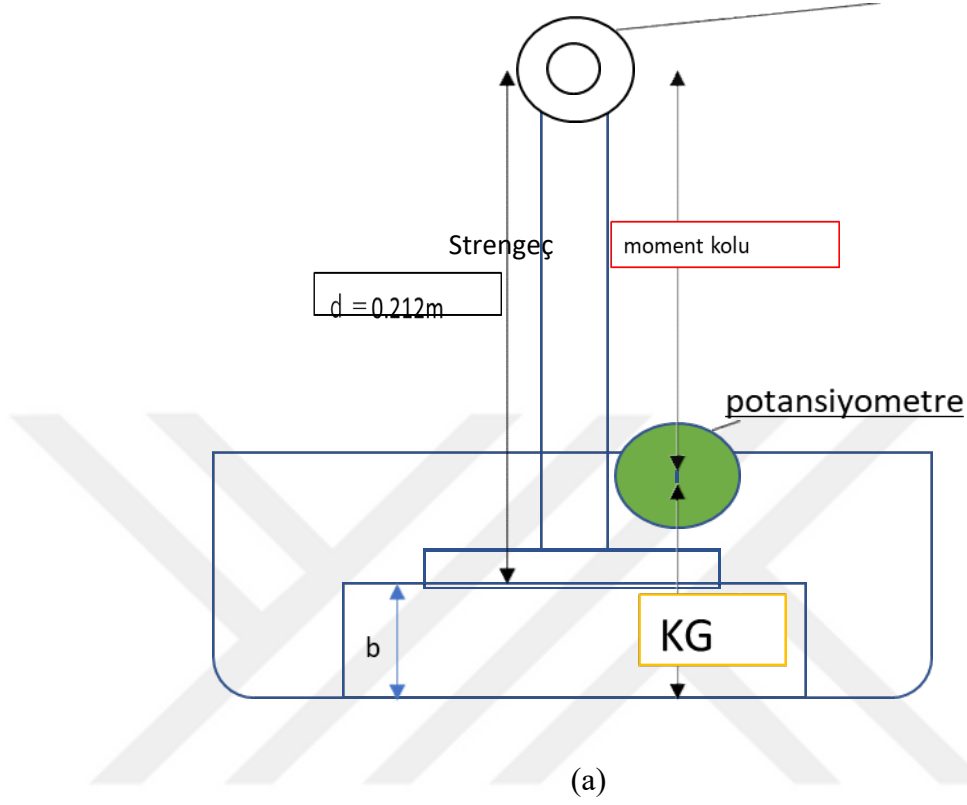


(b)

Şekil 4.4. (a) Çekme tankının orijinal kılavuzundan alınan ölçüleri (URL1, 2023) (b) Çekme tankının görünümü

4.3. Zorlayıcı Yalpa Mekanizması

Zorlanmış yalpa deneylerinde model zorlayıcı yalpa mekanizması kullanılmıştır. Bu donanım Profesör Yoshiho Ikeda tarafından tasarlanmış ve ürettirilmiştir. Donanımın şematik gösterimi ve fotoğrafı aşağıdaki şekilden görülebilir.



Şekil 4.5. Zorlayıcı yalpa mekanizmasının (a) şematik gösterimi (b) fotoğrafı

Model tekne belirlenen KG noktasından ve su çekimine sahip olacak şekilde mekanizmaya iki noktadan bağlanır. Bu noktalardan birinde potansiyometre bağlantısı

vardır. Bu potansiyometre model teknenin yaptığı yalpa açısını verilendirir. Ortada ise bu iki bağlantı noktasına ek olarak strengecin bulunduğu bir mesnetli kol mevcuttur. Şekil 4.6’da model tekne bağlantısı resimleri ve mekanizmanın tekne bağlandıktan sonraki görünümü verilmiştir.



Şekil 4.6. Model ve mekanizmanın bağlantı resimleri

Bu deney mekanizması yalpa hareketi haricinde diğer beş serbestlik derecesini kısıtlamaktadır. Kısacası bir serbestlik dereceli bir çalışma gerçekleştirilmektedir. Deneylerde model tekneye belirlenen yalpa frekansı ve açılarında düzenli yalpa hareketi verilmiştir. Deneyler model tekne sakin suda ve trimsiz şekilde gerçekleştirilmiştir.

4.4. Serbest Bırakma Testi Mekanizması

Serbest bırakma mekanizması Profesör Hirotada Hashimoto tarafından tasarlanarak ürettirilmiştir. İlgili mekanizma çift mesnetli alüminyum iki profil arasındaki rulmanlı

mekanizmanın arasına sıkıştırılan modele bağlı bir ahşap profilin, bir pim yardımı ile serbest bırakılarak altı serbestlik dereceli hareket etmesi prensibi ile çalışmaktadır. Bu hareketin nitelikleri görüntü işleme (opti-track) yardımı ile verilendirilmektedir. Şekil 4.7’de serbest bırakma mekanizması görülebilir.



Şekil 4.7. Serbest bırakma mekanizması

4.5. Deneylerde Kullanılan PIV Donanımı

Zorlanmış yalpa deneylerinde yalpa hareketinin akışkan ile etkileşimi sonucu oluşan akış yapılarını incelemek ve akışın hızını ölçebilmek amacı ile, Katayama Laboratuvarı’na ait PIV donanım seti kullanılmıştır. Laboratuvarda bulunan çekme tankı yan duvarlarının orta kısmında, zorlanmış yalpa deneyinin gerçekleştirildiği konumda 2 metre genişlik ve 1,5 metre yüksekliğinde cam bir pencere bulunmakta olup, PIV donanımının lazer ve kamerası bu kısma yerleştirilmiştir. Şekil 4.8’de bu cam pencere açıklığı görülebilir.



Şekil 4.8. PIV donanımının konumlandırıldığı cam pencere açıklığı

Kullanılan PIV konfigürasyonu, Kato Koken firmasına ait, 2D-PIV konfigürasyonudur. Bu donanım setinin içerisinde, bir adet Kato Koken PIV G2000 lazer, bir adet Phantom k4 yüksek hızlı kamera, bir adet bağdaştırıcı, bir adet yansıtıcı, mercek setleri ve tutucu tripodlar bulunmaktadır. Aşağıdaki tablolarda kamera ve lazerin özellikleri görülebilir.

Tablo 4.3. Yüksek hızlı kameraya ait temel özellikler

Görüntüleme Cihazı	1 inç CMOS sensör
Ton	Tek renkli 10 bit/renkli AD dönüştürme 10 bit
Etkin Pikseller	2592 x 2048 (5,3 milyon piksel)
Lens Yuvası	C mount/F mount lens (adaptör kullanılarak)
Arayüz	USB3.0 (Mikro-B)
Deklanşör Hızı	Minimum 52 µs (rms değeri)
Kayıt Yöntemi	2 GB dahili kamera belleği / DMA aktarımıyla PC belleği (yüksek kapasiteli kayıt için)
Dış Ölçüsü	44 mm x 44 mm x 81,5 mm (terminaller hariç)
Görüntü Çıkış Formatı	AVI,WMV,BMP/JPEG,RAW
Güç Kaynağı Yöntemi	USB veri yolu gücü / 12 pimli güç konektörü
Tetikleyici	Başlat/Bitiş/Değişken (3,3V TTL veya kontak)
	Hareket tetikleyici
Yardımcı Fonksiyon	Histogram gösterimi, yardımcı hat gösterimi, odak zirvesi, canlı görüntü döndürme, kare zamanı yazma, kırpma, bilgi metni çıkışı
Uyumlu İşletim Sistemi	Windows 10 / 8.1 (64/32BitOS *64Bit önerilir) Japonca sürüm/İngilizce sürüm

Tablo 4.4. Yüksek hızlı kameraya ait çözünürlük- saniye başı kare oranları

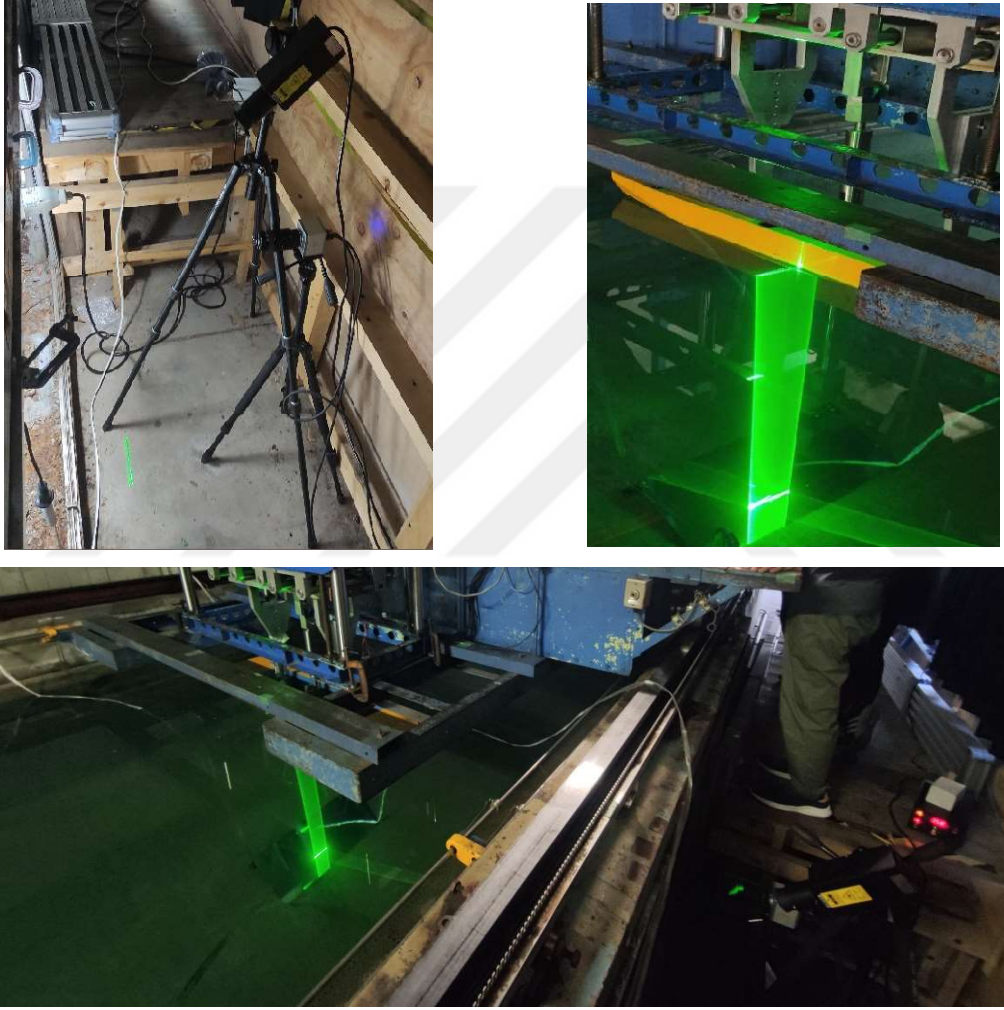
Çözünürlük	Ayarlanabilen kare sayısı (fps)
2592×2048	100,6
1920×1080	250,200,150,100,60
1600×1200	250,200,150,100,60
1280×1024	300,250,200,150,100
1024×1024	400,300,250,200,150
1280×768	500,400,300,250,200,150
1024×768	500,400,300,250,200
800×600	800,500,400,300,250,200
640×480	1000,800,500,400,300,250,200
512×480	1500,1000,800,500
576×256	2000,1500,1000
320×320	2000,1500,1000
320×240	2500,2000,1500
240×180	3000,2500,2000
320×120	4000,3
320×20	7500,5

Tablo 4.5. PIV lazerin genel özellikleri

Modeli	PIV lazer G2000
Lazer Gücü	2W
Lazer Osilatörü	LD pompalı YV04 lazer
Salınım Dalga Boyu	532nm (yeşil)
Salınım Formu	Devam eden dalga
Uzamsal Mod	TEM00 yakınında
Koltuk Açısı	Min38°~Maks63°
Eylem Sıcaklık Nem	15°C~35°C
Güvenlik Cihazları	Acil durdurma anahtarı
Giriş Gücü	AC100V~240V

PIV verileri kamera 1980x1080 piksellik çözünürlük ve 100 fps kare yakalama hızı ile elde edilmiştir. Görüntü alınacak alandan şablon ile beraber FlowExpert paket yazılımı ile kalibrasyon gerçekleştirilip, kayıtlar avi formatında alınmıştır. Veri işlemler Matlab üzerinden açık kaynak kodlu olarak kullanılan PIVlab (Thielicke ve Sonntag, 2021; Thielicke ve Stamhuis, 2014) paket programı ile gerçekleştirilmiştir.

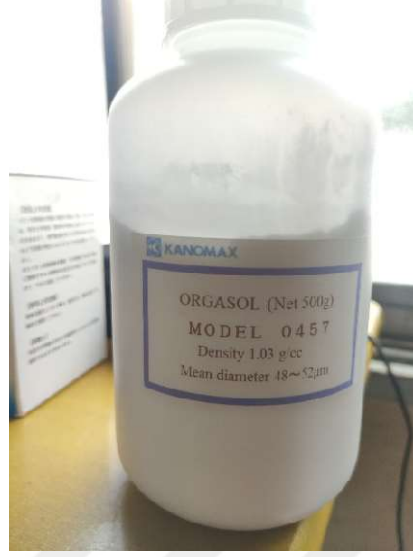
Aşağıdaki resimde PIV donanımının kurulmuş hali görülebilir.



Şekil 4.9. Kamera, lazer, yansıtıcı ayna ve donanımların konumlarının görünümü

PIV kalibrasyonu yapılırken, tank büyüklüğü nedeni ile parçacık konsantrasyonu sabit tutulamayacağından, görüntü alınacak alana parçacık solüsyonu besleme sistemi eklenmiştir. Kullanılan parçacık, Kanomax marka, 0457 model, 1,03 gr/cc yoğunluğa sahip, ortalama parçacık büyüklüğü 48-52 mikrometre, organik poliamid temellidir. Deney

kalibrasyonu yapılırken, farklı tip parçacıklar denenmiş ve en iyi sonuç bu özelliklere sahip parçacık ile alınmıştır. İlgili parçacığa ait fotoğraf aşağıda görülebilir.



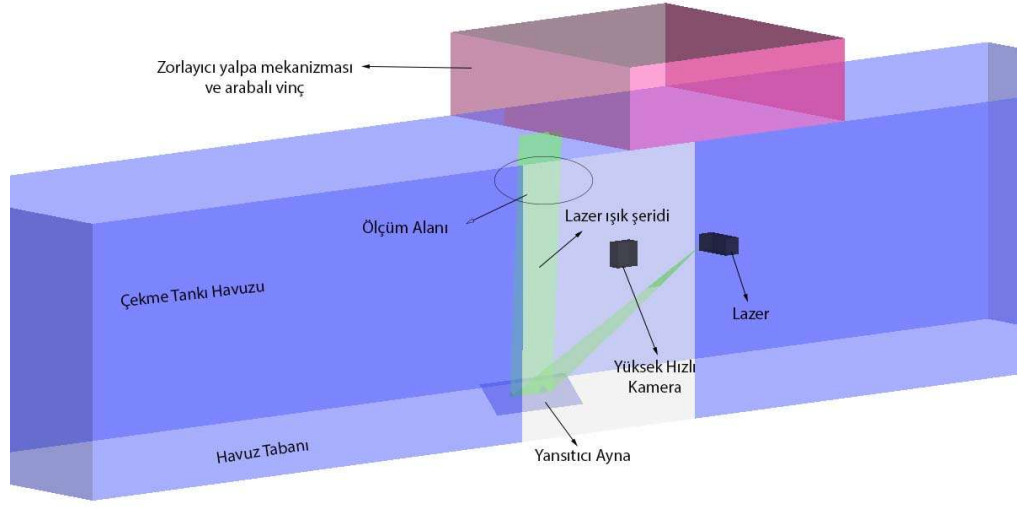
Şekil 4.10. PIV parçacığı

Kato koken marka görüntü bağdaştırıcı kullanılmıştır. İlgili ürün aşağıdaki fotoğrafta görülebilir.



Şekil 4.11. PIV görüntü bağdaştırıcı

Genel olarak deneylerde kullanılmış olan PIV donanımının kurulumu aşağıdaki Şekil 4.12’de şematik olarak gösterilmiştir. PIV donanımın kurulumu, parçacık seçimi, odak uzaklığı, saniye başına kare kayıt seçimi gibi parametreler ITTC (2014) tarafından hazırlanmış olan tavsiye prosedürlerine göre seçilmiştir.

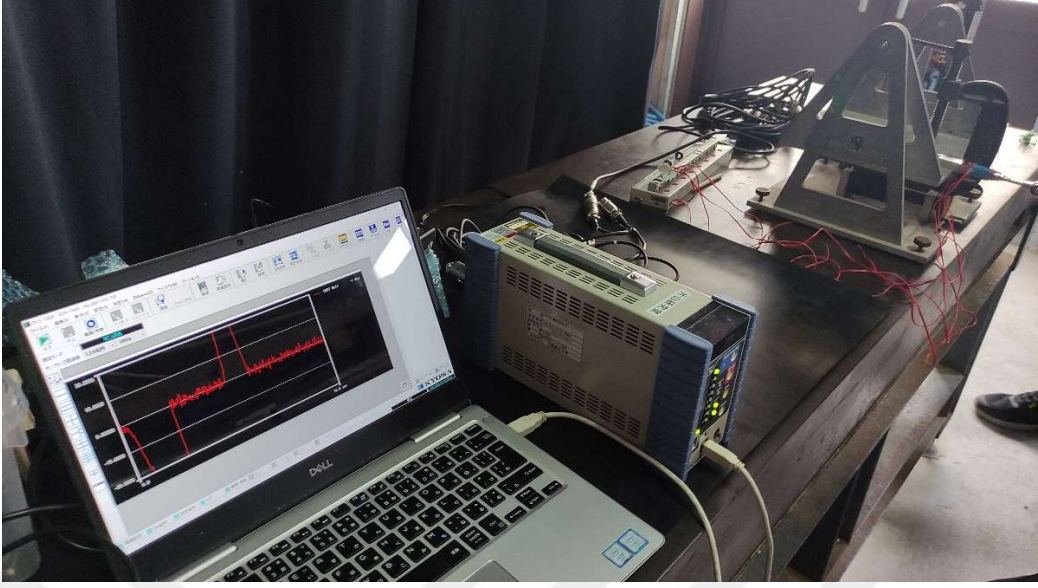


Şekil 4.12. Deneylerde kullanılan PIV donanımının şematik olarak görünümü

4.6. Veri Toplama

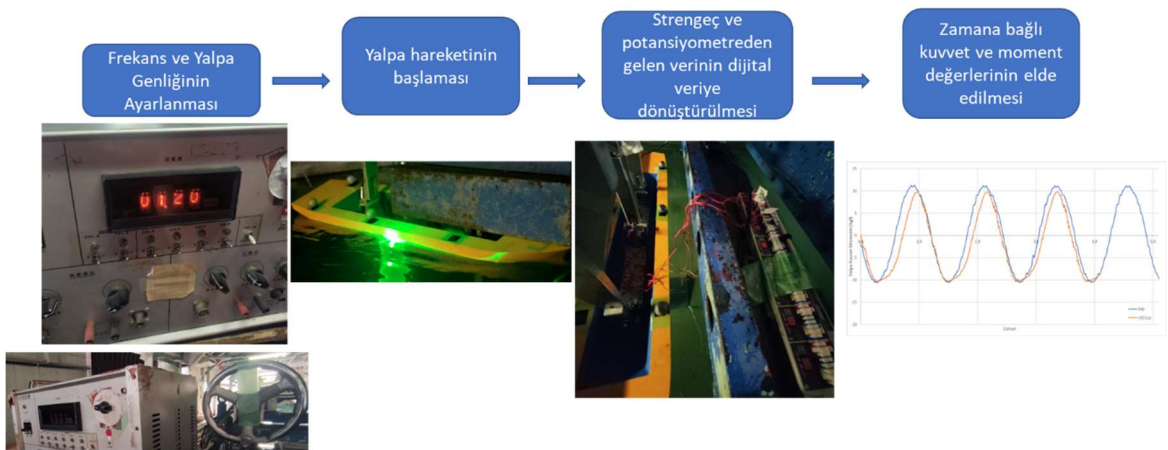
Bu çalışmada gerçekleştirilen deneylerde üç temel veri toplama sistemi kullanılmıştır. Bunlardan ilki, zorlanmış yalpa testlerinde yalpa hareketi sırasında tekneye etki eden kuvvetin elde edilmesi için zorlayıcı yalpa mekanizmasına ait veri toplama sistemidir. İkinci veri toplama sistemi, zorlanmış yalpa testlerinde yalpa hareketi esnasında model tekne ile akışkan arasındaki akış formlarının ve hızının tespit edilebilmesi için kullanılan PIV donanımına ait veri toplama sistemidir. Son veri toplama sistemi ise serbest bırakma mekanizmasındaki model teknenin zamana bağlı yalpa hareketi açılarının elde edilmesi için kullanılan veri toplama mekanizmasıdır.

Zorlayıcı yalpa deneyi testlerinde model teknenin yalpa hareketi esnasında su ile etkileşimi sonucu etki eden kuvvetler, model teknenin ortasına mesnetli bir kol üzerine yerleştirilen strengçe ve bağdaştırıcı yardımı ile elde edilmiştir. Teknenin zamana bağlı yalpa genlikleri ise tekne üzerindeki bir potansiyometreden elde edilmiştir. Deneylerden önce tüm veri toplama donanımı kalibre edilmiştir. Şekil 4.13'te kalibrasyon işlemine ve veri toplama donanımına ait fotoğraf görülebilir.



Şekil 4.13. Strengecin kalibre edilmesi işlemi

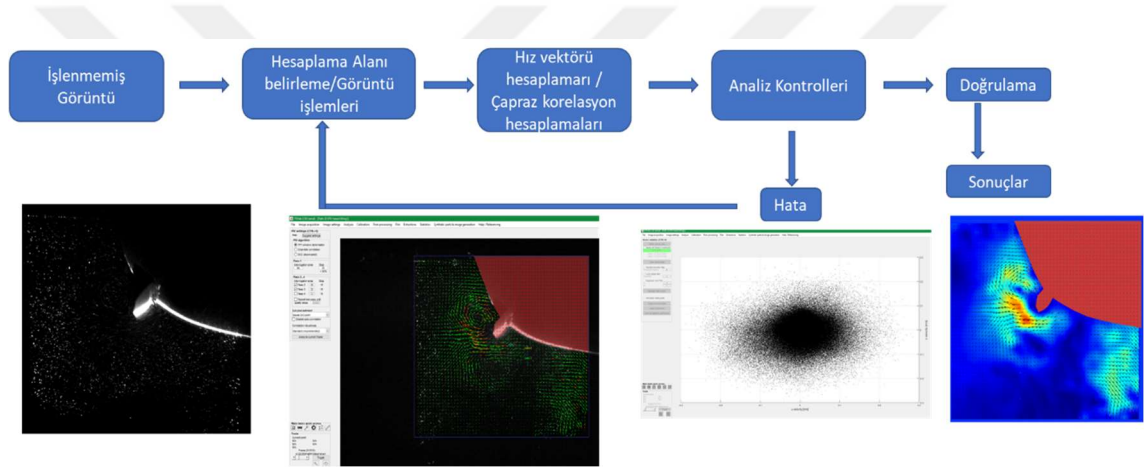
Zorlayıcı yalpa testinde veri toplama işlemi şu sıra ile gerçekleşir. Öncelikle zorlayıcı yalpa mekanizmasında istenilen yalpa frekansı ve yalpa genliği verisi girilir. Ardından model tekne üzerindeki mesnetli kolların hareketi ile yalpa hareketini gerçekleştirir. Model tekne üzerinde bulunan potansiyometre yalpa açısı zaman verisini veri toplama portuna iletir, buradan bağdaştırıcı üzerinden USB kablo aracılığı ile veriler bilgisayara aktarılır. Aynı şekilde strengecten alınan veri de veri toplama portu üzerinden bağdaştırıcıya ardından da bilgisayara iletilir. Aşağıdaki şekilde bu işlem şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Zorlayıcı yalpa testinde veri toplama işlemi şeması

Zorlayıcı yalpa deneyi testlerinde model teknenin yalpa hareketi esnasında su ile etkileşimi sonucu oluşan akış yapılarının incelenmesi amacıyla PIV sistemi kullanılmış olup

veri toplama işlemi, yalpa hareketi esnasında sürekli lazer şeridinin aydınlattığı alan üzerinde parlayan parçacıkların görüntüleri video formatında yüksek hızlı kamera tarafından yakalanır. Bu görüntü bağdaştırıcıya iletilir, bağdaştırıcıdan USB kablosu ile bilgisayara iletilir. Bilgisayara iletilen video verisi PIVLab paket programı ile görüntü çiftlerine ayrılır. Görüntü çiftlerine ayrılan her kare görüntü iyileştirme işlemine tabi tutulur. Gemi modeli gövdesi maskelenir, hız vektörlerinin hesaplanacağı işlem alanı belirlenir, çapraz korelasyon hesaplamaları ve görüntü işleme koşturmaları gerçekleştirilir. Elde edilen veri vektör büyüklük skalası üzerinden incelenerek, hatalı vektörler elemine edilir. Sonuç olarak hız büyüklük verileri ve hız profilleri çıkartılabilir. PIV veri toplama işleme aşağıdaki şemadan görülebilir.



Şekil 4.15. PIV veri toplama şeması

Serbest bırakma deneylerinde veri toplama işlemi görüntü işleme mekanizması ile gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde altı kamera gemi modelinin serbest bırakıldığı uzay çevresine yerleştirilir. Model üzerinde bulunan görüntü yakalama yansıtıcıları (image capturing reflectors) uzaydaki hareketi görüntü işleme paket programı ile (SkyCom) işlenerek uzaydaki 6 serbestlik dereceli hareketinin verisi (açı, mesafe vb. gibi) zamana bağlı olarak oluşturulur. Aşağıdaki şekilde görüntü yakalama yansıtıcıları ile kullanılan kamera donanımından 2 tanesi görülebilir.



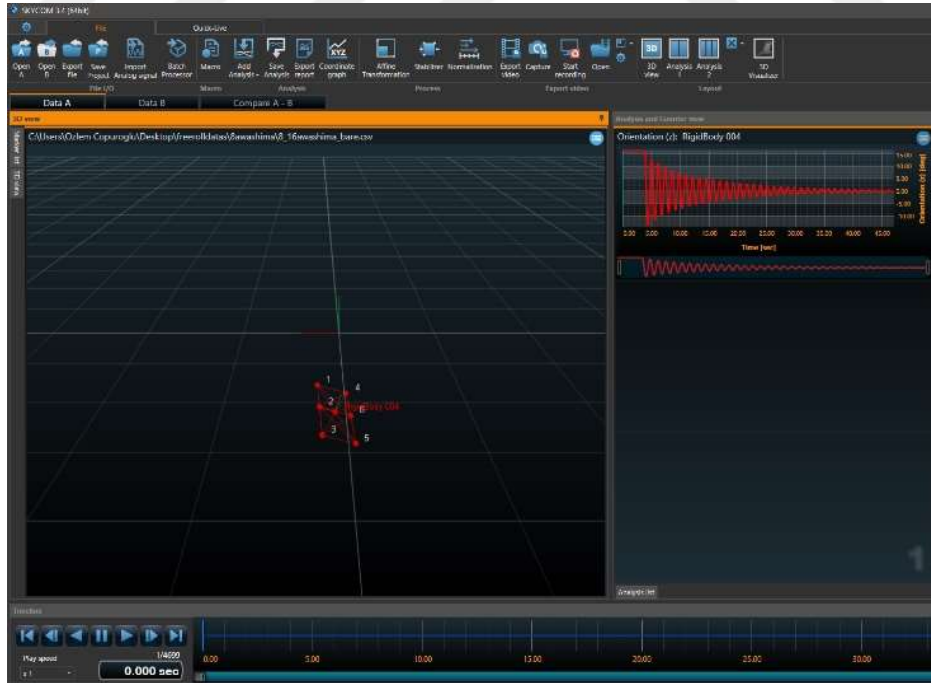
(a)



(b)

Şekil 4.16. (a) gemi modeli üzerindeki görüntü yakalama yansıtıcıları, (b) görüntü yakalayan kamera donanımı

Ayrıca aşağıdaki resimde görüntü işleme programının arayüzü ve sonuçların alındığı yan pencere görülebilir.



Şekil 4.17. Görüntü işleme programının arayüzü ve veri çıktıları penceresi

4.7. Deney Koşulları

Yapılan deneylerde deney koşullarının ölçümler üzerinde büyük bir etkisi vardır. Doğru ölçümleri elde edebilmek ve hata yüzdesini azaltabilmek için deney koşulları ITTC (2021) tarafından düzenlenen ve tavsiye edilen prosedürlere göre hazırlanmıştır. Deneylerden önce Katayama Laboratuvarı tarafından hazırlanmış olan kontrol listesi üzerinden doğrulama yapılmıştır.

Zorlanmış yalpa hareketi deneyleri için aşağıdaki deney koşullarında testler gerçekleştirilmiştir;

- a) Model hızı sıfırdır.
- b) Deneylerin gerçekleştirildiği su sıcaklığı 25 santigrat derecedir.
- c) Deneylerin gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı 34-42 santigrat derecedir.
- d) Deneyler tek serbestlik derecesinde (sadece geminin boyuna eksenindeki açısıl hareketi olan yalpa hareketine izin verilmiştir.)
- e) Model gemiye verilen yalpa hareketi frekansı 1,2 s ve yalpa açıları 5, 10, 15 ve 20 derecedir. Deneylerden önce model tekne suya batırılmadan havada yalpa hareketi verilerek strengecten elde edilen moment değerleri her bir yalpa açısı için elde edilmiş böylelikle mekanizmanın oluşturduğu sürtünme kaynaklı tepki kuvveti ihmal edilmiştir.
- f) Model geminin üzerine yerleştirilen yalpa hareketinin verildiği kolların mesnet pimleri tam KG noktası üzerinde konumlandırılmıştır. Geminin KG uzunluğu 0,107 m'dir.
- g) Kullanılmış olan strenguç 0,212 m uzunluğunda bir moment koluna sahip olup, 500 gramlık bir ağırlık ile öncesinden kalibre edilmiştir.
- h) Kullanılmış olan potansiyometre, harici bir dijital açı ölçer ve ilaveten hassas su terazisi ile kontrol edilmiş ve kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir.
- i) PIV lazeri 1500 w ve PIV hızlı kamerası 100 fps ile deneylerde kullanılmış olup, lazer şeridi kalınlığı 10-20 piksel kalınlığında olacak şekilde ayarlanmıştır. Ham görüntü verisi avi video uzantısı şeklinde kaydedilmiştir.
- j) Her test aşamasından sonra, çekme tankında oluşan dalgaların sönümlenmesi için dalga sönümleyici sistemler kullanılmış olup, bu işlem yaklaşık 15 dk almaktadır.

Serbest bırakma deneyleri için yukarıdaki maddelerden hariç olarak aşağıdaki deney koşullarında testler gerçekleştirilmiştir;

- a) Model 0,0596 m su çekiminde meyilsiz ve trimsiz yüzecek şekilde konfigüre edilmiştir.
- b) Model ağırlığı 10,137 gramdır.
- c) Model üzerinde ağırlık kaydırılarak meyil testi gerçekleştirilmiş olup, GM ve KG değeri istenilen değerde (0,107 m) oluncaya kadar model üzerindeki ağırlıkların düşey ekseninde lokasyonlarının değişimi denenmiştir.
- d) Deneylerden önce görüntü yakalama sistemi kendi mekanizması ile kalibre edilmiştir.
- e) Model teknenin bırakıldığı yalpa genliği 16 derecedir. Bu açı değeri, serbest bırakma mekanizmasının bu tip model deneyleri için daha önceki deneylerden tecrübe edilmiş önerilen açı derecesidir.

4.8. Deney Sonuçlarının Elde Edilmesi

Deneylerde, kullanılan prosedürler aracılığı ile gerekli veriler elde edilmiştir. Bu verilerin bir bölümü işlenmemiş ham veri olup, daha sonrasında paket programlar ile nitelikli veri haline getirilmiştir. Kimi veri ise nitelikli veri olarak deney mekanizmalarından işlenmiş şekilde elde edilmiştir.

Zorlanmış yalpa testi deneylerinden, belirlenmiş her bir yalpa açısı için, belirlenmiş her yalpa omurgası ile ve yalpa omurgasız durum için; potansiyometreden elde edilmiş yalpa açısının zamana göre değişimleri, strengçten alınmış yalpa tepki momentlerinin zamana göre değişimi, PIV ile elde edilmiş, minimum 2000 kareden oluşan yüksek hızlı kamera çıktıları elde edilmiştir.

Serbest bırakma testi deneylerinden, belirlenmiş yalpa açısı için (15,5 derece), belirlenmiş her yalpa omurgası ile ve yalpa omurgasız durum için; görüntü yakalama mekanizması ile, zamana bağlı yalpa açısı değerleri elde edilmiştir.

5. YALPA SÖNÜMÜNÜN SAYISAL ANALİZİ

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) akışkan problemlerinin analizi ve çözülmesi için sayısal yöntem ve algoritmaların kullanıldığı bir akışkanlar mekaniği bilim dalıdır. Akışkanların birbirleri ve katı yüzeyler ile etkileşimleri bilgisayar yardımı ile çözülmeye çalışılır. HAD analizlerinin tarihsel gelişmelerine dair, 1920'li yıllarda sayısal analizlere ilk adımlar atılmış olup, 1960'lı yıllarda birçok HAD algoritmaları geliştirilmiştir. 1980'li yıllarda ilk hava dinamiği çözümlerinin gerçek uygulamalar için denenmiştir ve 1990'lı yıllarda bilgisayarların gelişimine bağlı olarak birçok ticari yazılımın ortaya çıkmıştır. 2000'lerde ise kullanması kolay mevcut bilgisayar sistemlerine gömülü ticari yazılımların piyasaya sürüldüğü görülmektedir.

HAD analizlerinde farklı tipte problemler farklı ayırıştırma teknikleri kullanılarak çözülmektedir. Yapısal analizler Sonlu Farklar Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile akış analizlerinde ise, Sınır Elemanları Yöntemi ve Sonlu Hacimler Yöntemi teknikleri kullanılmaktadır. Ayrıca ağsız yöntemler de kullanılmaktadır.

Sınır Elemanları Yöntemi, akışlar için kullanılan ve integral denklemlerle formüle edilmiş akış alanının tamamını, sınır elemanları üzerinde lineer kısmi diferansiyel denklemlere dönüştürerek çözen bir yöntemdir. Karmaşık geometrilerde ve yapısal olmayan ağlarda iyi çözümler vermesi bu yöntemin tercih sebeplerinden bazılarıdır.

Bilgisayar yazılımlarının gelişmesi ile günümüzde birçok HAD yazılımı ve paket programları mevcuttur. Bunlardan bazıları, Ansys Fluent, Ansys CFX, XFlow, Star CCM+, FlowMaster, OpenFOAM, Flow3D, vb. gibi sıralanabilmektedir.

Bu tezde yapılan yalpa sönümünün belirlenmesi çalışmalarında iki ve üç boyutlu simülasyonlar XFlow paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

5.1. Akışkan Hareketinin Temel Denklemleri

Reynolds transport teoremi bir sistemdeki bir akışkan özelliğinin zamana göre değişim hızı ile bir kontrol hacmindeki bir akışkan özelliğinin zamana göre değişim hızı arasındaki matematiksel bağıntıdır. Bu teoreme göre sabit bir kontrol hacmi için Reynolds Transport Teoremi,

$$\frac{d\Phi_{sis}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_V \rho \beta dV + \int_A \rho \beta \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (5.1)$$

şeklindedir. Burada Φ kütle, enerji, momentum gibi herhangi bir yaygın özelliği gösterirken, $\beta = \Phi / m$ ise buna karşılık gelen yoğun özelliği göstermektedir. Ayrıca sabit bir kontrol hacmi için Reynolds transport teoreminin alternatif formu aşağıdaki gibidir:

$$\frac{d\Phi_{sis}}{dt} = \int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho \beta) dV + \int_A \rho \beta \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (5.2)$$

Reynolds transport teoreminin uygulanmasıyla ($\Phi = m$ için) kontrol hacmi için kütle korunumu denklemi,

$$0 = \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_A \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (5.3)$$

şeklinde yazılabilir. Diverjans teoreminin uygulanmasıyla denklem (1.20),

$$\int_V \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) \right] dV = 0 \quad (5.4)$$

şekline dönüşür. Bu denklem yalnızca köşeli parantezin sıfır olmasıyla sağlanır. Böylece kütle korunumu denklemi (süreklilik denklemi),

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (5.5)$$

elde edilmiş olur. Bu denklemin Kartezyen koordinatlarda açık şekli aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) = 0 \quad (5.6)$$

Reynolds transport teoreminin uygulanmasıyla ($\Phi = m\vec{V}$ için) kontrol hacmi için kütlelenin korunumu denklemi,

$$\sum \vec{F} = \int_V \rho \vec{g} dV + \int_A \sigma_{ij} \vec{n} dA = \int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) dV + \int_A (\rho \vec{V}) \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (5.7)$$

yazılabilir. Diverjans teoreminin uygulanmasıyla denklem (5.7),

$$\int_V \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) - \rho \vec{g} - \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} \right] dV = 0 \quad (5.8)$$

şekline dönüşür. Bu denklem yalnızca köşeli parantezin sıfır olmasıyla sağlanır. Böylece doğrusal momentumun korunumu denklemi,

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) - \rho \vec{g} - \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} = 0 \quad (5.9)$$

elde edilmiş olur. Denklem (5.9)' un alternatif formu ise

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} \quad (5.10)$$

şeklindedir. Bu denklemin Kartezyen koordinatlarda açık şekli aşağıdaki gibidir:

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = \rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \quad (5.11)$$

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] = \rho g_y + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} \quad (5.12)$$

$$\rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = \rho g_z + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (5.13)$$

5.2. Lattice-Boltzmann Yöntemi Denklemleri

Bu tez çalışmasında, Lattice-Boltzmann Metodu tabanlı XFlow paket programı kullanılmıştır. Lattice-Boltzmann Yöntemi (LBM), araştırmacıların son zamanlarda üzerinde çalıştıkları ağsız (mesh-free) sayısal yaklaşımlardan biridir. Ağsız sayısal yaklaşımların temel avantajları, özellikle hareketli nesneleri modellerken, analiz öncesi hazırlık süresinin önemli ölçüde kısaltılması ve basitleştirilmesidir. Boltzmann Denklemlerine dayalı Lattice-Boltzmann Yöntemi, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) problemleri için Navier-Stokes tabanlı yöntemlere bir alternatiftir. LBM, akışkanın hareketini küçük hücrelerin (veya kafeslerin) bir ağında taklit eden bir tekniktir. LBM, moleküler dinamiklerin bazı özelliklerini benzer şekilde kullanır, ancak daha hızlı ve daha az bellek tüketir. LBM'nin avantajı, düşük Reynolds sayılı akışlar (düşük hız, yüksek viskozite) için etkili olması ve çok sayıda küçük ölçekli hareketlerin oluşmasına izin vermesidir.

Boltzmann süreklilik denklemi, Denklem 5.14'te verildiği gibi tek parçacık dağılım fonksiyonu $f(x,c,t)$ için bir integre-diferansiyel denklemdir.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + c \cdot \frac{\partial f}{\partial x} + F \cdot \frac{\partial f}{\partial c} = Q(f) \quad (5.14)$$

Burada c parçacık hızı, F tepki kuvveti ve $Q(f)$ çarpışma integralidir ve genellikle Denklem 5.15'te verilen Bhatnagar-Gross-Krook (BGK) yaklaşımı ile daha basit bir ifade ile değiştirilir. Boltzmann Denklemlerinin sayısal ve analitik çözümlerinin basitleştirilmesi He ve Luo (1997) tarafından önerilmiştir.

$$Q_{BGK}(f) = -\frac{f-f^{eq}}{\tau} \quad (5.15)$$

Yukarıdaki denklemde τ , yerel dengeyle ilgili tipik tek gevşeme süresidir. Boltzmann denklemlerinin çözücüsü, bir kafes üzerinde hareket eden ve çarpışan parçacıkların tek bir dağıtım işlevine sahiptir. Denklemin çözümü iki ana adım içerir. Bunlar, akış adımı ve çarpışma adımıdır ve sırasıyla Denklem 5.16 ve 5.17'de gösterilmişlerdir.

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) = \tilde{f}_i(x, t + \Delta t) \quad (5.16)$$

$$\tilde{f}_i(x, t + \Delta t) = f_i(x, t) - \frac{1}{\tau} \left(f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t) \right) \quad (5.17)$$

Verilen denklemlerde τ , Denklem 5.18'de gösterildiği gibi makroskobik viskozite ile ilgili gevşeme karakteristik süresidir. c_s ses hızıdır, Δt zaman adımıdır, $c_i = \Delta x / \Delta t$ i yönündeki parçacık hızıdır ve f_i^{eq} denge dağılım fonksiyonudur. Denklem 5.17'de çarpışma operatörü $\frac{1}{\tau} \left(f_i^{eq}(x, t) - f_i(x, t) \right)$ BGK yaklaşımının bir sonucudur (Denklem 5.19). Denklem 5.18'de gösterildiği gibi pozitif bir viskozite için gevşeme süresi 0,5'ten büyük olmalıdır.

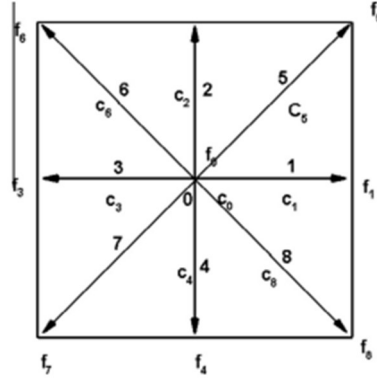
$$\nu = c_s^2 \left(\tau - \frac{1}{2} \right) \quad (5.18)$$

$$\Omega_i^{BGK} = -\frac{1}{\tau} \left(f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t) \right) \quad (5.19)$$

Denge dağılım fonksiyonu genellikle aşağıdaki denklemde olduğu gibi gösterilir (Denklem 5.20).

$$f_i^{eq}(x, t) = t_i \rho \left(1 + \frac{c_{i\alpha} v_\alpha}{c_s^2} + \frac{v_\alpha v_\beta}{2c_s^2} \left(\frac{c_{i\alpha} c_{i\beta}}{c_s^2} - \delta_{\alpha\beta} \right) \right) \quad (5.20)$$

Burada δ Kronecker delta t_i kafes sıvı yoğunluğundaki ağırlıklandırma faktörü, c_i ($c_{i\alpha}$, $c_{i\beta}$) partikül hızları, v (v_α , v_β) makroskobik hızlardır. İki boyutlu akışları simüle etmek için yaygın olarak Şekil 1'de gösterilen D2Q9 modeli kullanılır. Bir D2Q9 kare kafesinde, Şekil 5.1'de gösterildiği gibi sekiz bağlantıyla birbirine bağlanan dokuz ayrı hız c_i ($i=0,1,\dots,8$) ve dokuz düğüm f_i ($i=0,1,\dots,8$) vardır.



Şekil 5.1. D2Q9 kare kafes modeli (XFlow 16, 2015)

5.3. Duvar Adaptasyonlu Yerel Eddy Türbülans Modeli (WALE)

XFlow kodunun varsayılan türbülans modeli, Duvar Adaptasyonlu Yerel Eddy Türbülans (Wall Adapting Local Eddy-WALE) modelidir. WALE türbülans modeli, gerinim oranını ve girdap yoğunluğunu dikkate alır. Cebirsel karakteri, modeli hızlı ve verimli kılar (XFlow 16, 2015).

WALE modeli, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans ölçeği boyutuna dayalı bir dinamik yapılandırma kullanır. WALE modeli ayrıca, yüksek Reynolds sayılı akışların türbülans özelliklerini daha iyi bir şekilde yakalamak için ve türbülans hareketlerinin çözünürlüğünü arttırmak için bir çözünürlük skalası kullanır. Bu skalada, yakın duvar bölgesindeki türbülans hareketleri için daha küçük bir ölçek kullanılırken, serbest akış bölgesindeki hareketler için daha büyük bir ölçek kullanılır (Weickert vd., 2010).

Lattice Boltzmann yöntemi ile türbülansın simülasyonu için kullanılan türbülans modelleri, RANS tabanlı yöntemlere kıyasla daha farklıdır. Lattice Boltzmann yöntemi, akışın mezoskopik davranışını tanımlarken, RANS yöntemleri makroskobik seviyede hareketi tanımlar. Bundan dolayı WALE türbülans modeli, Lattice Boltzmann yönteminin özelliklerini dikkate alarak modifiye edilmiştir.

Large Eddy simülasyonlarında (LES), türbülansı modellemek için türbülanslı girdap viskozitesi adı verilen ν_t ek bir viskozite eklenir. Bu girdap viskozitesi şu şekilde verilir:

$$\nu_t = C_X^2 \Delta_x^2 \overline{\omega} \quad (5.21)$$

burada C_X , LES modeline bağımlı sabitini, Δx , kafes aralığını ve $\bar{\omega}$, LES model operatörünü gösterir. Lattice Boltzmann modelinde, viskozite gevşeme süresi (τ) ile şu şekilde ilişkilidir:

$$v_{toplamlam} = v_0 + v_t = \frac{2\tau_0 - 1}{6} + \frac{\tau_t}{3} \quad (5.22)$$

burada v_0 , moleküler viskozitedir. Viskozite terimini ayırmaya benzer şekilde, gevşeme süresi τ moleküler ve türbülanslı kısımlara bölünür. Toplam gevşeme süresi şu şekilde tanımlanır:

$$\tau_{toplamlam} = 3v_{toplamlam} + \frac{1}{2} \quad (5.23)$$

Toplam gevşeme parametresi $\tau_{toplamlam}$, LES modeline bağlı olan ve kayma gerilimi tensörünün (S) ve dönme tensörünün (Ω) bir fonksiyonu olan $\bar{\omega}$ operatöründen türetilir.

Newton akışkanları için kesme gerilimi tensörü S şu şekilde tanımlanır;

$$S_{i,j} = v_0 \rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.24)$$

ve Newton sıvıları için dönme tensörü (Ω) şu şekilde verilir:

$$\Omega_{i,j} = v_0 \rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.25)$$

Kayma gerilmesi tensörünü (S) ve dönme tensörünü (Ω) hesaplamak için bir merkezi fark şeması uygulanır. $\bar{\omega}$ operatörü ve $\Delta x = \Delta t = 1$ ölçeklendirmesi için Lattice Boltzmann birimlerini kullanarak, türbülanslı gevşeme parametresi (τ_t) elde edilir:

$$\tau_t = \frac{\sqrt{\tau_0^2 + \frac{18C_X^2 \bar{\omega}^2}{\rho}} - \tau_0}{2} \quad (5.26)$$

WALE modeli, kayma gerilmesi tensörünün yanı sıra dönme tensörünü de hesaba katan hız gradyan tensörünün karesine dayanmaktadır (Weickert ve diğerleri, 2010). Operatör $\bar{\omega}$ aşağıdaki formüllerle tanımlanır:

$$\bar{\omega} = \frac{(g_{i,j}^d g_{i,j}^d)^{\frac{3}{2}}}{(S_{i,j} S_{i,j})^{\frac{5}{2}} + (g_{i,j}^d g_{i,j}^d)^{\frac{5}{4}}} \quad (5.27)$$

$$g_{i,j}^d = S_{i,k} S_{k,j} + \Omega_{i,k} S_{k,j} - \frac{1}{3} \delta_{i,j} (S^2 - \Omega^2) \quad (5.28)$$

burada Denklem 5.21'deki LES model sabiti C_X , $C_X=C_W=0,5$ olarak alınır (Weickert ve diğerleri, 2010) .

5.4. Sayısal Çözücü

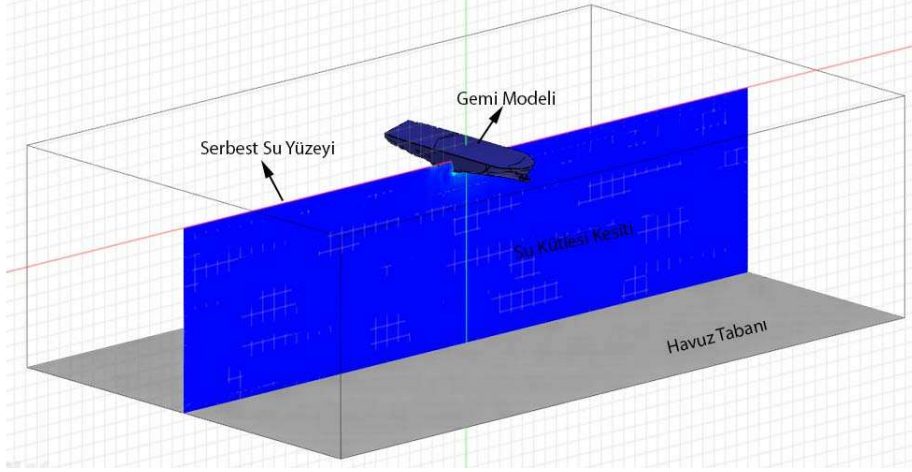
XFlow, havacılık, otomotiv, denizcilik, enerji, inşaat ve diğer endüstriyel sektörlerde kullanılan bir HAD yazılımıdır. XFlow, kararlılık, doğruluk ve doğrusallıktan uzaklaşma sorunlarına karşı hassaslığı, yüksek paralelleştirme özellikleri, kapsamlı simülasyon ve veri analizi araçlarını birleştirerek tatmin edici çözümler sunmaktadır (XFlow 16, 2015).

XFlow'un özelliklerinden biri, geleneksel CFD yazılımlarında sıkça kullanılan sonlu hacim metodu yerine, Lattice Boltzmann yöntemini kullanmasıdır. Bu yöntem, hareketli nesnelerin akışkan ile etkileşiminin daha doğru bir şekilde takip edilmesine, türbülansın küçük ölçeklerde daha iyi bir şekilde modellenmesine olanak sağlar.

XFlow'un diğer önemli özellikleri arasında, çoklu fiziğin desteklenmesi, otomatik parçacık adaptasyonu, adaptif zaman adımı uyumu bulunmaktadır. Bu özellikler, büyük ve karmaşık simülasyonların hızlı ve verimli bir şekilde yapılabilmesini sağlar.

5.5. Yalpa Hareketinin Sayısal Olarak Modellenmesi

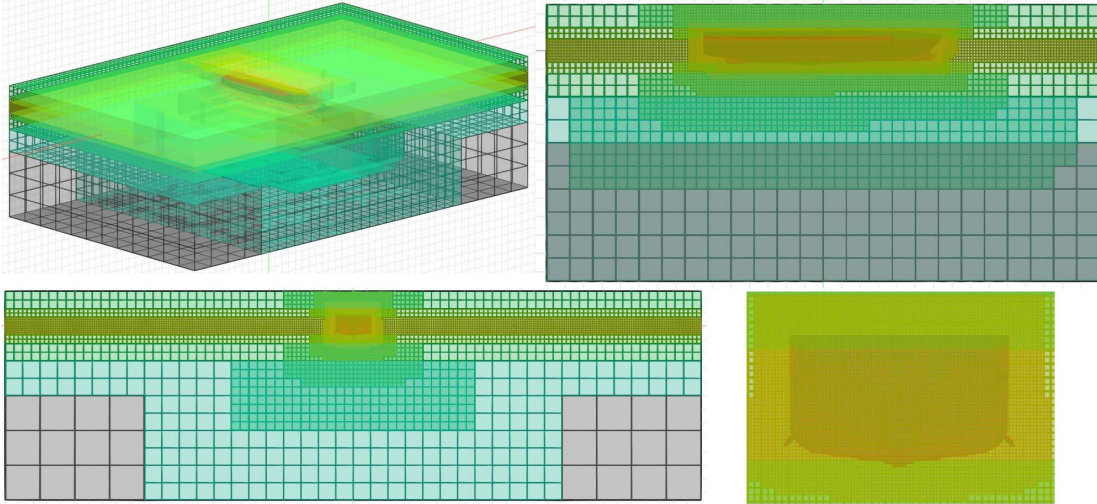
Bu tez çalışmasında sayısal çözücü üzerinde zorlanmış yalpa hareketi ile serbest bırakma testleri simüle edilmiştir. Zorlanmış yalpa hareketi için 5,10,15 ve 20 dereceli yalpa genliklerinde, serbest bırakma çözümlemeleri için ise 20 derecelik meyil açısı ile bırakılarak yapılmıştır. Bu çözümlemeler 2 boyutlu ve 3 boyutlu olmak üzere iki farklı yaklaşımla gerçekleştirilmiştir. 3 boyutlu çözümlemelere ait çözüm hacminin gösterimi aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.2. Çözüm hacminin gösterimi

Sayısal çözümlemelerde model ile aynı ölçek (1/50) kullanılmıştır. Çözüm hacminin ölçüleri deneylerin gerçekleştirildiği çekme havuzu ölçüleri ile aynı alınmıştır. Dalga yansımalarını önlemek amacı ile modelin enine duvarları simetri olarak alınmıştır. Model ile duvar arasındaki uzaklıklar akışı bozmayacak büyüklükte ITTC (2014b) tarafından önerilen orana göre seçilmiştir.

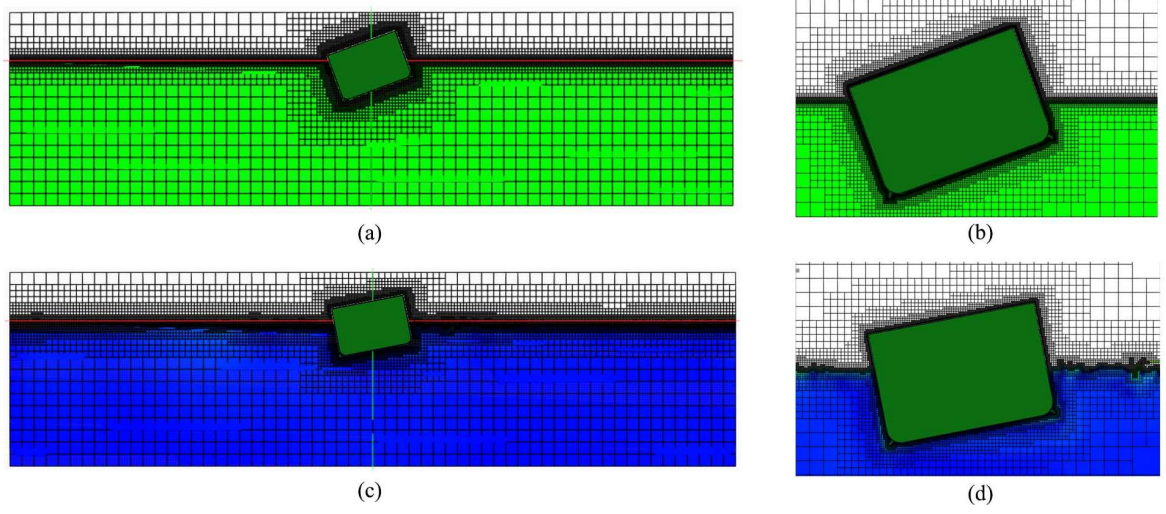
Parçacık yoğunluk yapısı adaptif olarak temsil edilmiş olup, aşağıdaki şekilde farklı görünüşlerden parçacık yoğunlukları görülebilir.



Şekil 5.3. 3 boyutlu çözümlemelerde kullanılan parçacık yoğunluğu kafes yapıları

Görülebileceği üzere, tekne modeline yaklaştıkça parçacık yoğunluğu artmaktadır. İlgili simülasyon modelinde minimum parçacık yoğunluğu (parçacıklar arası mesafe) 0,003 m ve maksimum parçacık yoğunluğu ise, 0,3 m'dir.

İki boyutlu sayısal çözümlemelerde ise, minimum parçacık yoğunluğu (parçacıklar arası mesafe) 0,0001 m ve maksimum parçacık yoğunluğu ise, 0,01 m'dir. Aşağıdaki şekilde iki boyutlu sayısal çözümlemelerde kullanılan parçacık yoğunluğu kafes yapıları görülebilir. Ayrıca simülasyon içerisindeki parçacık yoğunluğunun adaptif olarak nasıl değiştiği de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.4. (a) 0. zaman adımı için parçacık yoğunluğunun görünümü (b) 0. zaman adımı için parçacık yoğunluğunun model yakınında görünümü (c) 56. zaman adımı için parçacık yoğunluğunun görünümü (d) 56. zaman adımı için parçacık yoğunluğunun model yakınında görünümü

Şekil 5.4.'te 0. zaman adımında 20 derecelik ilk meyil ile serbest bırakma testinin görünümünün ardından, 56. zaman adımında serbest bırakma testinin 2.tepe noktasından alınmış görüntü verilmiştir. Ayrıca görülebileceği üzere, akışkan ve nesnenin hareket dinamiğine göre bazı zonlarda parçacık yoğunluğu otomatik olarak artırılmakta ve azaltılmaktadır.

5.5.1. Sınır Şartları

Çözümün doğru bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için ele alınması gereken başlangıç parametreleri bulunmaktadır. Bu parametreler aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

Tablo 5.1. Simülasyonlarda kullanılan parametreler

Parametre	Değer
Akış hacmi	2 boyutlu ve 3 boyutlu
Türbülans modeli	WALE
WALE sabiti Cx, Cw	0,5
Yerçekimi ivmesi	$9,81 \text{ m/s}^2$
Su yüksekliği (Tabandan)	1,8 m
Su sıcaklığı	288,15 K
Su yoğunluğu	$998,3 \text{ kg/m}^3$
Duvar modeli	Enhanced Wall-Function
Duvar pürüzlülüğü	0 m
Zaman adımı	Sabit- Otomatik
Courant sayısı	1

Simülasyonlarda sakin su yüzeyi mevcut olup, zorlanmış yalpa testlerinde bir dereceli serbestlik durumu mevcutken, serbest bırakma testinde, üç boyutlu çözümlerde altı serbestlik derecesi, iki boyutlu çözümlerde ise bir serbestlik derecesi mevcuttur. Referans basınç değeri atmosfer basıncına eşit seçilmiştir. Program serbest su yüzeyi akışları için kanal çözücüsü ile sınır koşullarını otomatik olarak ayarlamaktadır. Sınır koşulları inlet, taban ve duvar şartları, outlet ve serbest su yüzeyinden oluşmaktadır. Kanal çözücüsü serbest su yüzeyi üstündeki hava akışkanı için çözüm yapmadığı için zamandan büyük ölçüde tasarruf edilmiş olur.

5.5.2. Yalpa Hareketinin Modellenmesi

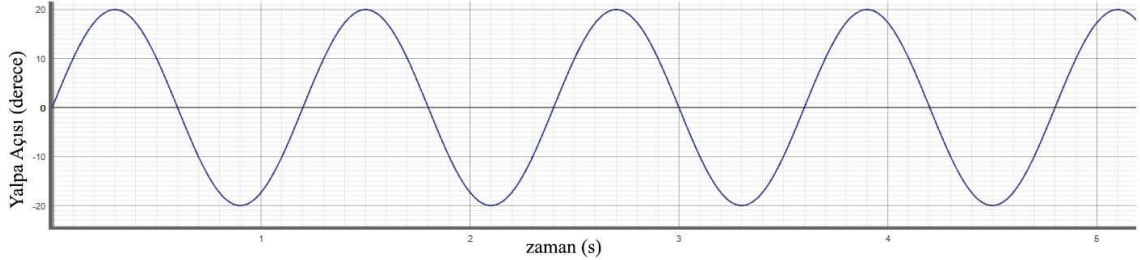
Zorlanmış yalpa testleri için sayısal simülasyonları gerçekleştirilirken kullanılan sayısal çözücüye yalpa hareketinin ve serbestlik derecelerinin tanımlanması gerekmektedir.

Standart ağ inşası ile simüle edilen HAD programlarında nesneye hareket vermek ve serbestlik derecelerini tanımlayabilmek için bazı fonksiyonların harici dosyalar ve kurulumlarla eklenmesi gerekebilmektedir. Ancak Lattice Boltzmann tabanlı sayısal çözücülerde ağ yapısı mevcut olmadığı için, nesneye hareket vermek için paket programın fizik fonksiyonu giriş arayüzünden hareketin zamana bağlı fonksiyonunu yazılarak istenilen dinamik hareket elde edilmiş olur.

Zorlanmış yalpa testleri için yalpa hareketi, aşağıdaki zamana bağlı yalpa açısal hızı fonksiyonu ile HAD programına tanımlanır.

$$\dot{\phi}(t) = w\phi_a \sin(wt) \quad (5.29)$$

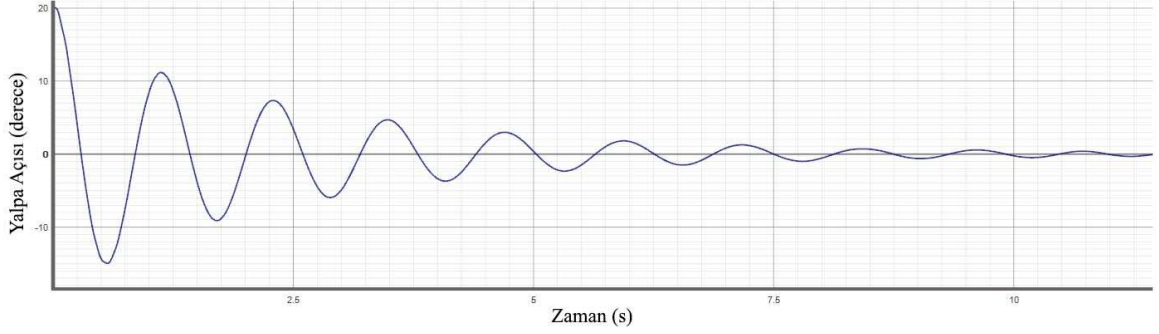
Yukarıda verilen fonksiyonda istenilen değerler arayüzde, teknenin boyuna eksenini açısal hız fonksiyonu kısmına tanımlandığında istenilen yalpa hareketi elde edilmiş olur. 20 derecelik bir yalpa genliğine ve 1,2 saniyelik periyoda ait yalpa hareketi için aşağıdaki şekilde görülebilecek program arayüzünden alınan yalpa açısı zaman grafiği elde edilir.



Şekil 5.5. 20 derecelik yalpa genliği için elde edilen yalpa açısı zaman grafiği

Serbest bırakma testi için ise teknenin ağırlık, yalpa jirasyon noktası ve ağırlığı bilinmelidir. Ayrıca tekneye ait atalet momentleri de tanımlanmalıdır. Sayısal çözücünün fizik motoru nesnenin su içerisindeki istenilen su çekiminde yüzmesi ve ağırlığının tanımlanması durumunda atalet momentlerini hesaplamaktadır.

Bu işlemin ardından modelin serbestlik dereceleri ve serbest bırakma açısı belirlenerek ki üç boyutlu simülasyonlar için altı serbestlik derecesi, iki boyutlu simülasyonlar içinse, bir serbestlik derecesi kullanılmıştır, sayısal çözücüye yalpa hareketinin tanımlanması gerçekleştirilmiş olur. İlgili işlemler gerçekleştirip yalpa hareketi karakteristikleri tanımlandığında, aşağıdaki gibi program arayüzünden alınan bir yalpa açısı zaman grafiği elde edilir.



Şekil 5.6. 20 derece ilk meyil açısı ile serbest bırakma testi simülasyonu için elde edilen yalpa açısı zaman grafiği

5.6. Doğrulama ve Hassaslık Analizleri

HAD yönteminin kullanıldığı çalışmalarda, sonuçların güvenilirliğini artırmak için doğrulama çalışması yapılması gerekli görülmektedir. Doğrulama çalışması genellikle literatürdeki fiziksel deneylerden elde edilen sonuçların HAD simülasyonlarında elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmasıyla yapılır. Ayrıca sonuçların güvenilirliğini arttırmak için Lattice-Boltzmann tabanlı yaklaşımlarda parçacık yoğunluğu bağımsızlığı gibi HAD çalışmalarının çözüm kabiliyetini doğrudan etkileyebilecek parametrelerin incelenmesi uygun görülmüştür.

Simülasyon sonuçlarının güvenilirliğini artırmak için bu çalışmada üç farklı doğrulama çalışması yapılmıştır. Bunlardan ilki, XFlow kullanıcı kılavuzu tarafından önerilen çözüm kararlılık parametresi hesaplamasıdır (XFlow 16, 2015). XFlow kodunun kararlılık parametresi aşağıdaki denklemde verildiği gibi tanımlanır.

$$Stb = \frac{\max(Stb_v, Stb_v, Stb_p)}{0.7} \quad (5.30)$$

$$Stb_v = \frac{v}{C_s dx} \quad (5.31)$$

$$C_s = \frac{dx}{\sqrt{3} dt} \quad (5.32)$$

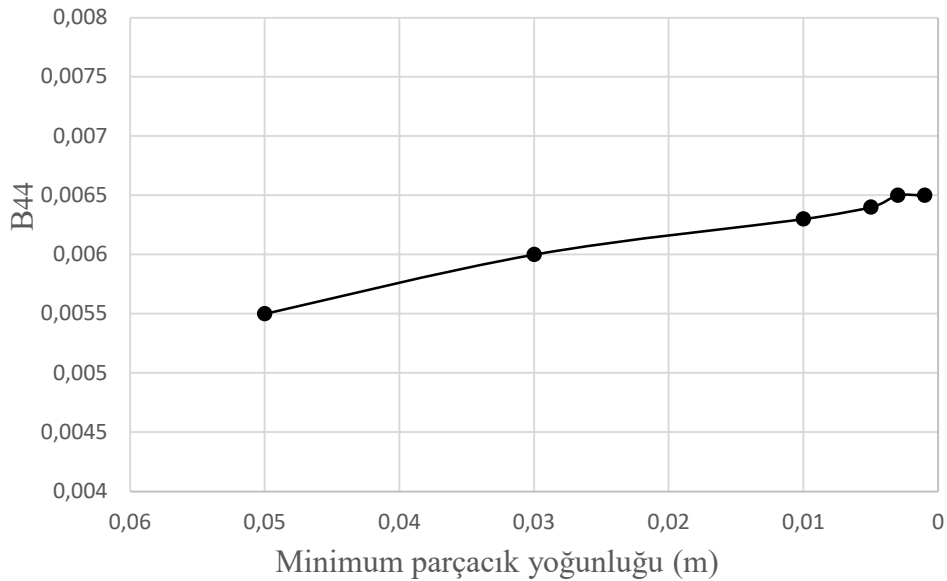
$$Stb_v = \frac{v_{max} dt}{dx} \quad (5.33)$$

$$Stb_{\rho} = \frac{2(\rho_{max}-\rho_{min})}{(\rho_{max}+\rho_{min})} \quad (5.34)$$

Bu denklemlerde Stb stabilite parametresi, ν kinematik viskozitedir. Stabilite parametresi, Courant-Friedrichs-Lewy koşulunu (XFlow 16, 2015) sağlamalıdır. Bu, stabilite parametresinin değerinin 1'den küçük olması gerektiği anlamına gelir. XFlow kullanıcı rehberi stabilite parametresinin 0,01-0,3 civarında tutulmasını önermektedir (XFlow 16, 2015).

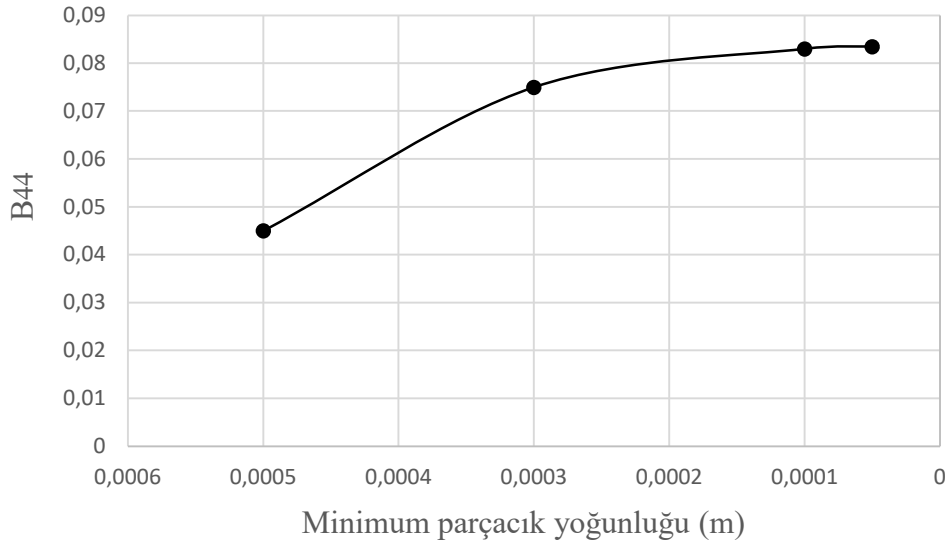
Bu tez kapsamında yapılmış olan HAD çalışmalarında, stabilite parametresinin ortalama olarak 0,02 ile 0,2 arasında olduğu görülmüştür.

Yapılmış olan diğer doğrulama çalışması ise parçacık yoğunluğundan bağımsızlık çalışmasıdır. Özellikle nesne duvarı yakınındaki parçacık yoğunluğu akış sonuçlarına etki edebilmektedir. Parçacık yoğunluğundan bağımsızlık çalışması üç boyutlu ve iki boyutlu sayısal analizler için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu testler için optimum parçacık yoğunluğunu bulmak amacıyla bir test durumu için (20 derece yalpa genliği ile levha omurga konfigürasyonu) farklı parçacık yoğunlukları kullanılarak, yalpa sönüm katsayıları hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Parçacık yoğunluğunu değiştirmek için minimum parçacık yoğunluğu yani nesne duvarı yakınındaki parçacık yoğunluğu (parçacıklar arası mesafe) 0,003 m ile 0,05 arasında değişecek şekilde testler hazırlanmış ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki şekilden sonuçlar görülebilir.



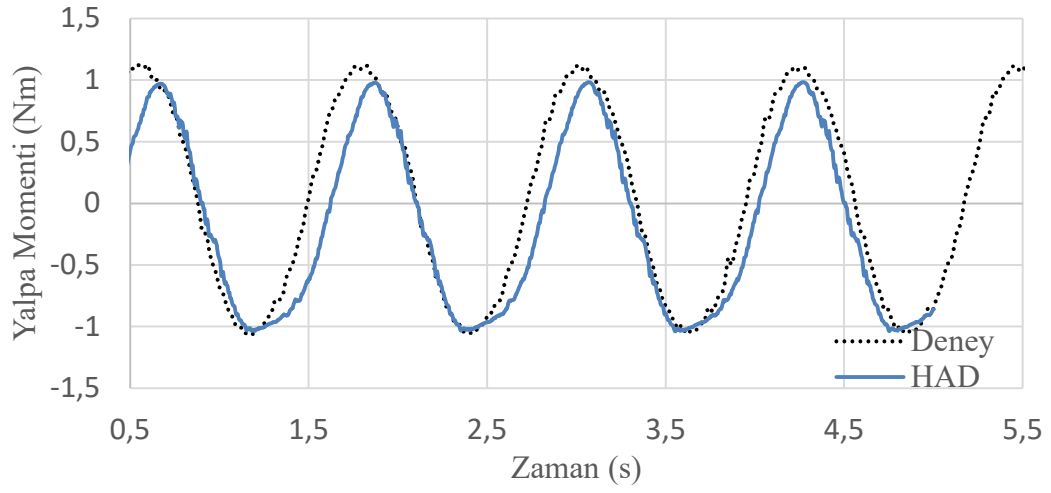
Şekil 5.7. Farklı parçacık yoğunlukları için yalpa sönüm katsayıları (3B)

İki boyutlu testler için optimum parçacık yoğunluğunu bulmak amacıyla bir test durumu için (20 derece ilk meyil açılı serbest bırakma ile levha omurga konfigürasyonu) farklı parçacık yoğunlukları kullanılarak, yalpa sönüm katsayıları hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Parçacık yoğunluğunu değiştirmek için minimum parçacık yoğunluğu yani nesne duvarı yakınındaki parçacık yoğunluğu (parçacıklar arası mesafe) 0,00005 m ile 0,001m arasında değişecek şekilde testler hazırlanmış ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki şekilden sonuçlar görülebilir.

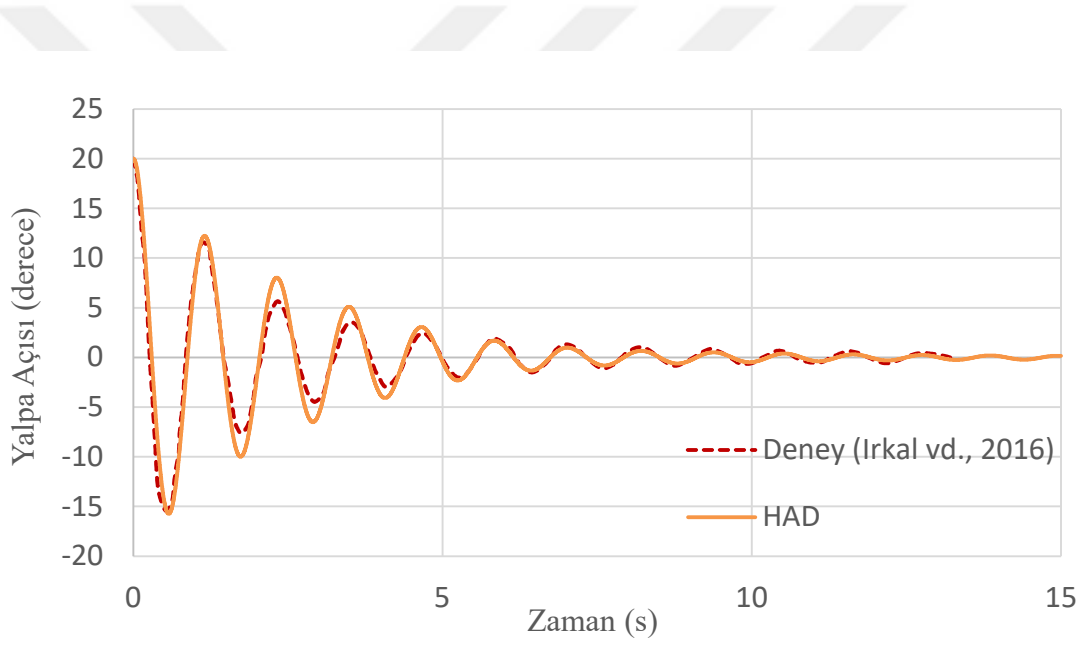


Şekil 5.8. Farklı parçacık yoğunlukları için yalpa sönüm katsayıları (2B)

Yapılmış olan bir diğer doğrulama çalışması ise aynı parametreler ile gerçekleştirilmiş olan deney sonuçları ile sayısal çözümlerden elde edilmiş verilerin karşılaştırılmasıdır. Üç boyutlu sayısal analiz sonuçları bu tez kapsamında yapılmış olan üç boyutlu zorlanmış yalpa hareketi deney sonuçlarından bir test ile (20 derece yalpa genliği ile levha omurga konfigürasyonu) karşılaştırılmış, iki boyutlu sayısal analiz sonuçları ise Irkal vd. (2016) tarafından yapılmış olan iki boyutlu deneylerinden bir test ile (20 derece ilk meyil açılı serbest bırakma ile levha omurga konfigürasyonu) karşılaştırılmıştır. Aşağıdaki şekillerde deneysel çalışmalar ile yapılmış olan karşılaştırmalar verilmiştir.



Şekil 5.9. Yalpa momenti zaman grafiği (3B)



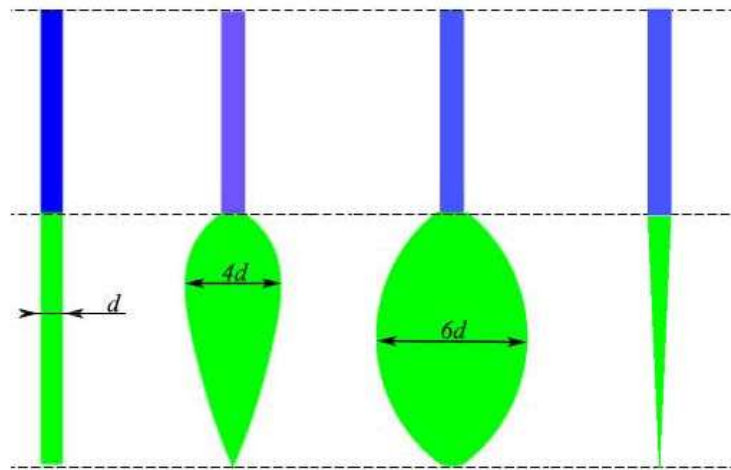
Şekil 5.10. Yalpa açısı zaman grafiği (2B)

6. YALPA OMURGASI GÖVDE ŞEKLİNİN YALPA SÖNÜMÜNE ETKİSİ

Gövde şeklinin yalpa sönümü üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla dört farklı tipte geometrinin kullanılması hedeflenmiş fakat bunlardan orta kesiti üçgen şeklinde olanın deneyler sırasında kırılması nedeniyle üç adet geometrinin deneyleri yapılmıştır. Gövde şeklinin yalpa sönümüne etkisinin analizi için deneylerde, orta kesiti dikdörtgen (levha omurga), simetrik kanat şeklinde olan (kanat kesit omurga) ve elipsoit şeklinde olan, (oval kesit omurga) geometriler kullanılmıştır. Üçgen orta kesite sahip, üçgen omurganın yalpa sönümüne olan etkisi ise yalnız HAD analizleri yardımıyla incelenmiştir.

6.1. Yalpa Omurgalarının Gövde Şekillerinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada profil alanları aynı olan (yükseklik ve uzunlukları aynı) ancak kalınlıkları ve orta kesit alanları birbirinden farklı olan yalpa omurgaları tasarlanmıştır. Şekil 6.1 incelendiğinde tasarlanmış olan yalpa omurgaları arasında en narın uç yapısına sahip olanın üçgen kesitli yalpa omurgası olduğu görülebilir. Kanat kesit omurga ile üçgen kesit omurganın uç kalınlıkları 0'a yakınsamaktadır. Ancak, oval kesit ve levha omurganın uç kalınlıkları d kalınlığındadır. Bu tasarımlar ile yalpa omurgalarının uç etkisi incelenebilecektir.



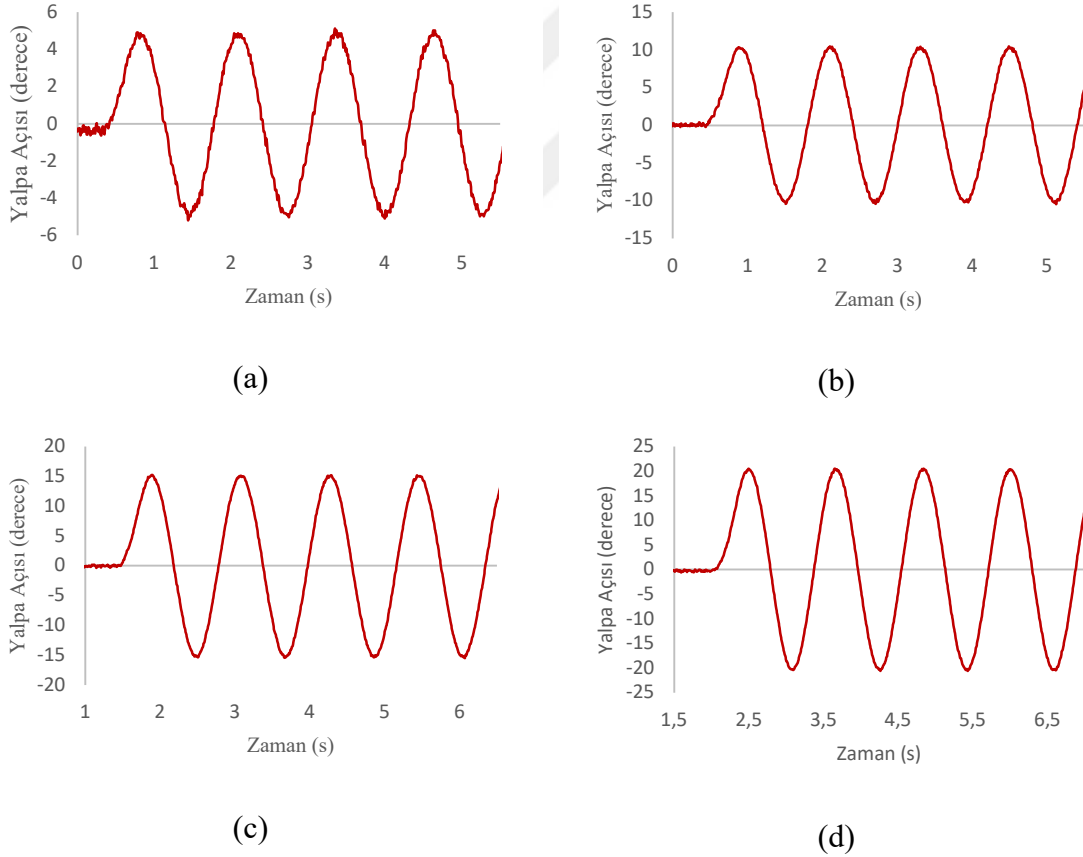
Şekil 6.1. Yalpa omurgası gövde şekli analizlerinde kullanılan yalpa omurgaların orta kesit görünüşleri

6.2. Zorlanmış Yalpa Testi Sonuçları

Zorlanmış yalpa testinde tekneye, farklı yalpa omurgaları monte edilerek, model gemi 5, 10, 15 ve 20 derecelik genliklerde, 1,2 saniyelik periyot ile yalpa hareketi yapmaya zorlanmıştır. Teknenin su ile etkileşiminden dolayı oluşan yalpa tepki momentleri tekne üzerine bağlı olan strengaç aracılığı ile ölçülmüştür. Ayrıca, model ile akışkan etkileşimi sonucu oluşan akış PIV tekniği kullanılarak görüntülenmiş ve analiz edilmiştir.

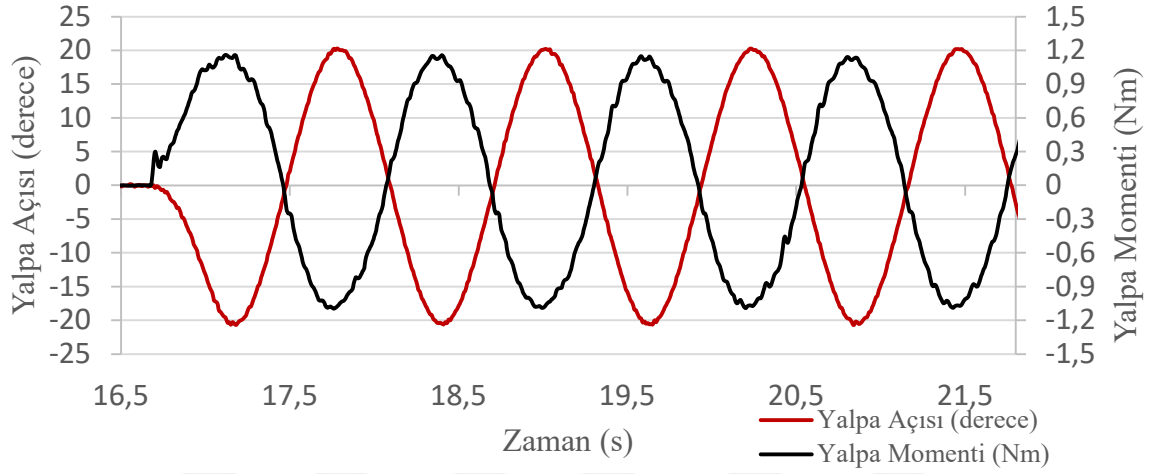
6.2.1. Yalpa Momenti Analizi Sonuçları

Deneylerde istenilen yalpa genliği ve yalpa periyodunun doğruluğu ölçülmüş ve aşağıda Şekil 6.2’de verilen sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar deney mekanizmasının istenilen genlik ve periyotta hareket üretebildiğini göstermektedir.



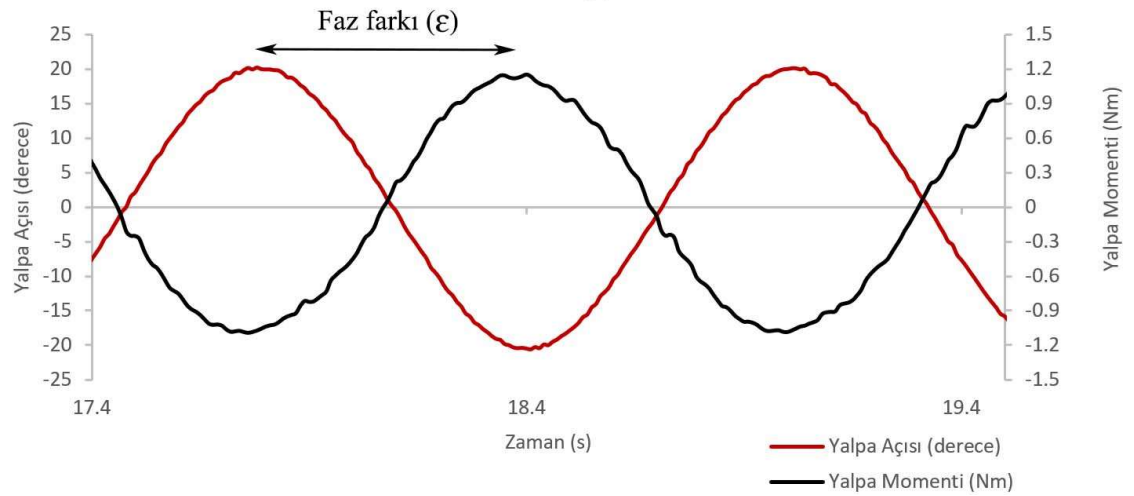
Şekil 6.2. Deneylerden elde edilen (a) 5 derece yalpa genliği için (b) 10 derece yalpa genliği için (c) 15 derece yalpa genliği için (d) 20 derece yalpa genliği için yalpa açısı zaman grafiği

Model geminin yalpa omurgasız, levha omurgalı, kanat kesit omurgalı, oval kesit omurgalı konfigürasyonları 5,10,15 ve 20 derecelik yalpa genlikleri ile zorlanmış yalpa testine tabi tutulmuş ve strengecten elde edilen verilerle yalpa momenti zaman grafikleri çıkarılmıştır. Şekil 6.3'te levha omurga konfigürasyonu için 20 derece yalpa genliğinde, yalpa açısı ve yalpa momenti zaman değişimi grafikleri verilmiştir. Tüm deney konfigürasyonları için elde edilen grafikler Ek 1'de verilmiştir.



Şekil 6.3. Levha omurgalı konfigürasyon ve 20 derece yalpa genliği için Yalpa açısı ve yalpa momenti zaman değişimi

Elde edilen yalpa açısı ve yalpa momenti değişim grafiklerinden yalpa sönümü için gerekli parametrelerden birisi olan faz farkı bulunabilir. Faz farkı aşağıda gösterildiği şekilde elde edilir.



Şekil 6.4. Faz farkının gösterimi

6.2.2. Yalpa Sönümü Katsayısı Sonuçları

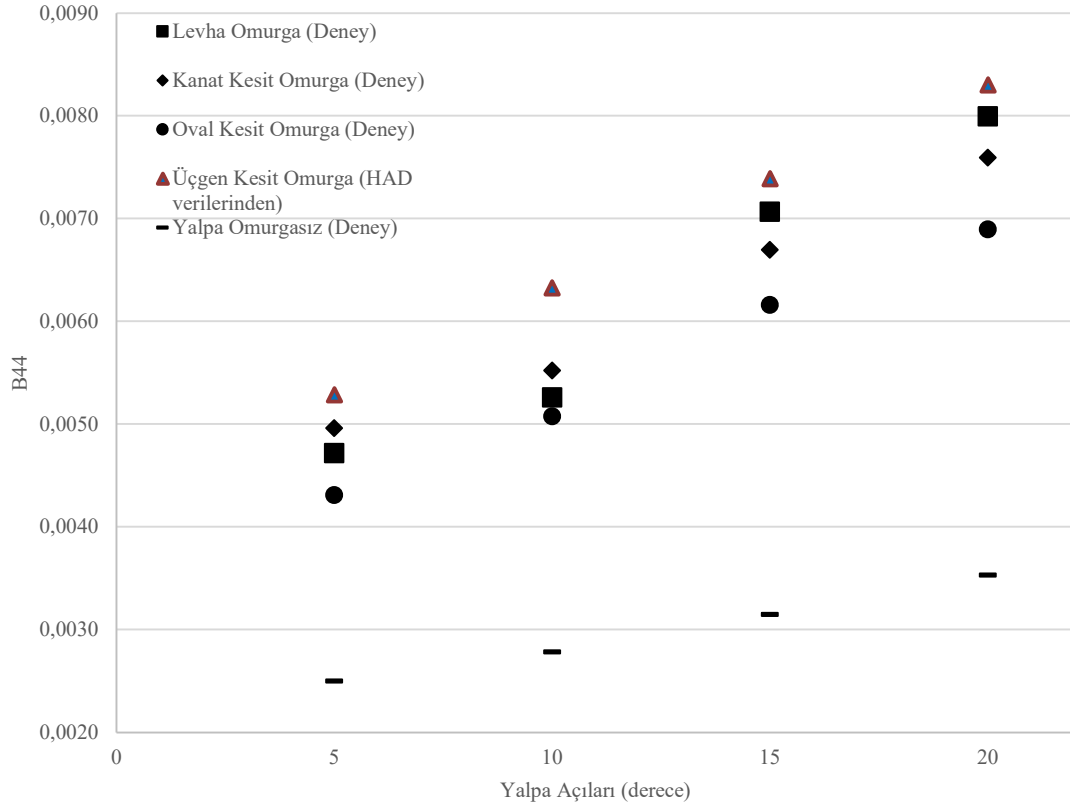
Strengçeç ve potansiyometre ölçümlerinden elde edilmiş olan verilerden yararlanarak, ITTC, (2021) tarafından önerilen ve Bölüm 2.3.2’de anlatılan yöntem kullanılarak yalpa sönüm katsayıları elde edilebilir. Yalpa sönüm değerini elde edebilmek için hesaplanan moment değerlerine Fourier Analizi (FA) uygulanmıştır. Böylelikle kaydedilen moment değerleri belli bir frekans (ω), zaman (t) ve faz farkına (ϵ) bağlı olarak sinüs veya kosinüs fonksiyonu olarak yazılmıştır.

Denklem 2.16’daki bağıntı kullanılarak elde edilen yalpa sönüm katsayıları her bir test durumu için hesaplanmıştır. Ancak bu bağıntı ile elde edilen sönüm katsayısının boyutu kgm^2/s ile ifade edilmektedir. Yalpa sönüm katsayısını boyutsuzlaştırmak için aşağıdaki bağıntılardan yararlanılmıştır (ITTC, 2021).

$$\hat{w} = w \sqrt{\frac{B}{2g}} \quad (6.1)$$

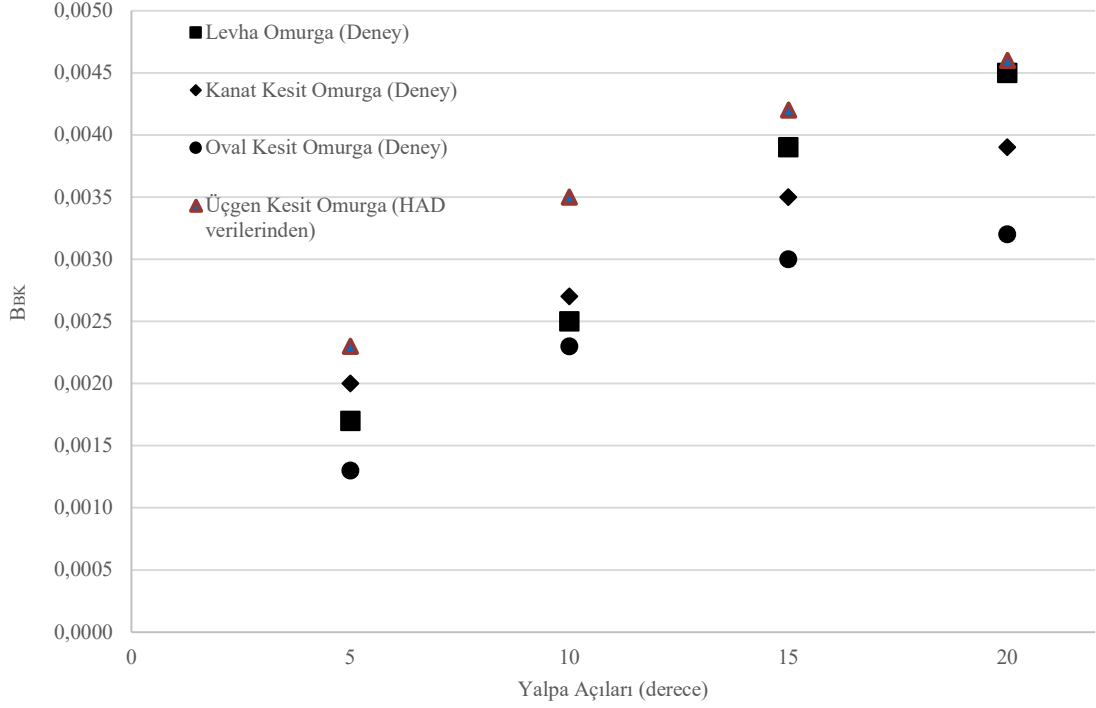
$$\hat{B}_{44} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\overline{GM}\phi_a}{B\hat{w}} \cdot N_{(\phi_a)} \quad (6.2)$$

Burada $\hat{w}$ boyutsuz açısal frekans, $\hat{B}_{44}$ boyutsuz yalpa katsayısı ve $N_{(\phi_a)}$ doğal frekanstır. Denklem 6.2’den boyutsuz yalpa katsayıları elde edilmiştir. Aşağıdaki grafikte karşılaştırmalı olarak boyutsuz yalpa sönüm katsayıları görülebilir. Üçgen kesit yalpa omurgasının bulunduğu konfigürasyonlar HAD analizleri ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.5. Farklı gövde şekillerine sahip yalpa omurgaları için boyutsuz yalpa sönüm katsayıları

Şekil 6.5'te verilen yalpa sönüm katsayılarından hareketle, yalpa omurgasız yalpa sönüm katsayısını da bildiğimiz için, yalpa sönümünün yalpa omurgası sönüm bileşenine ait katsayıları çıkartılabilir. Aşağıdaki grafikte her bir konfigürasyon için yalpa omurgası sönüm bileşeni katsayıları görülebilir.



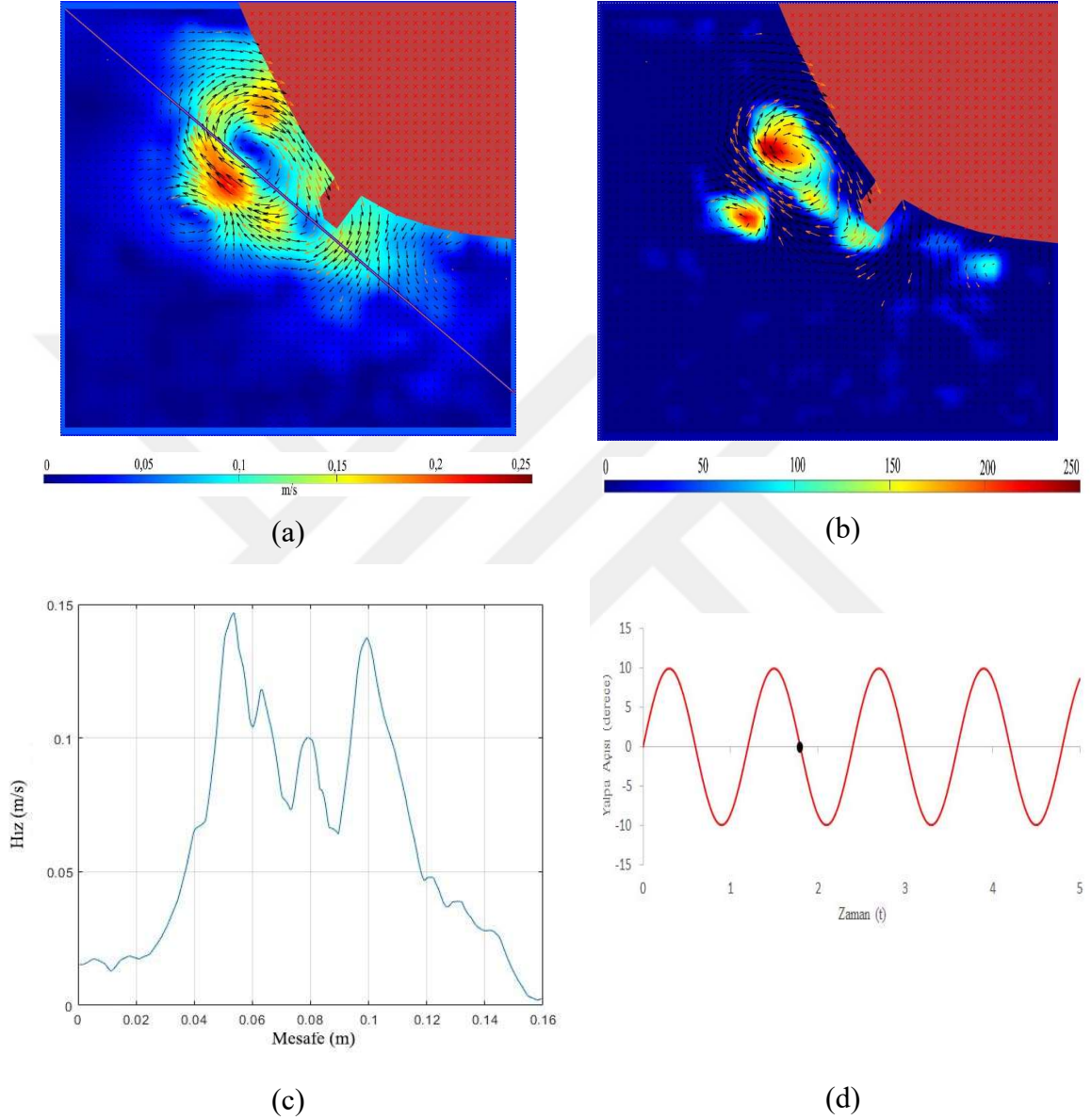
Şekil 6.6. Farklı gövde şekillerine sahip yalpa omurgaları için boyutsuz yalpa omurgası sönüm bileşeni katsayıları

Şekil 6.5’te verilen boyutsuz yalpa sönüm katsayıları karşılaştırıldığında, alışlagelmiş olan levha omurga şeklinin dışındaki geometrik şekilli yalpa omurgaların sonuçlarının farklı olduğu görülebilmektedir. Üçgen kesit yalpa omurgası her bir yalpa açısı için en yüksek yalpa sönüm katsayısına sahiptir. Düşük yalpa açılarında (5 ve 10 derece) kanat kesit yalpa omurgası levha omurgaya göre daha yüksek yalpa sönüm katsayısı sağlarken yüksek yalpa açılarında (15 ve 20 derece) levha omurga daha yüksek yalpa sönüm katsayısına sahiptir. Oval kesit yalpa omurgası ise, tüm yalpa omurgaları arasında her yalpa açısı için en düşük yalpa sönüm katsayısına sahiptir. Akış içerisindeki cisimlerin köşe yapıları sivrileştikçe, akışa karşı olan direnç kuvvetlerinin de arttığı sonucuna varılmıştır.

6.2.3. PIV Analizi Sonuçları

Model geminin yalpa omurgasız, levha omurgalı, kanat kesit omurgalı, oval kesit omurgalı konfigürasyonları 5,10,15 ve 20 derecelik yalpa genlikleri ile zorlanmış yalpa testine tabi tutulurken bölüm 4.5’te verilen PIV kurulumu verilen PIV tekniği ile yalpa omurgası etrafındaki akış yapıları analiz edilmiştir. Elde edilen PIV görüntüleri, model teknenin sancak tarafındaki yalpa omurgasından alınmıştır. Akışın hız büyüklüğü dağılımı,

girdap dağılımı ve hız profili grafiklerini ihtiva eden levha omurga, 10 derecelik yalpa genliğinin 0 dereceli konumu için PIV çıktısı Şekil 6.7’de verilmiş olup diğer konfigürasyonlardan elde edilen çıktılar Ek 2 kısmında verilmiştir.



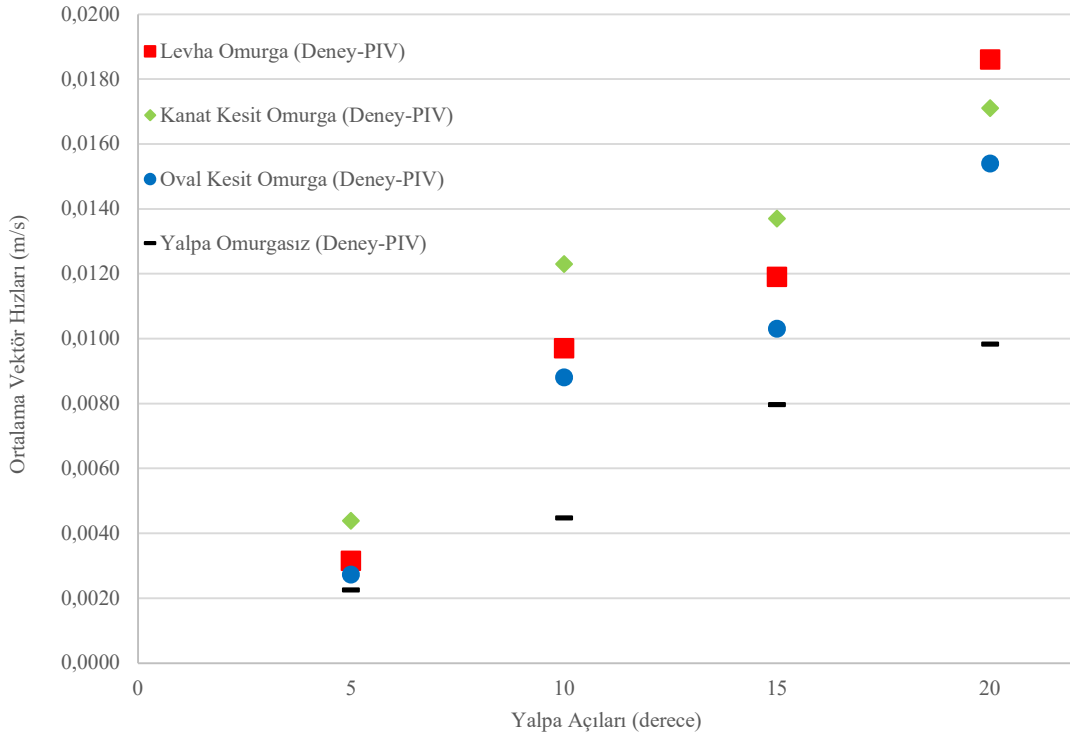
Şekil 6.7. Levha yalpa omurgalı konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu

Şekil 6.7’de verilen hız büyüklüğü alanı m/s boyutunda, girdap yoğunluğu ise boyutsuz olarak (dimensionless vortex contour) verilmiştir. Hız profili ise, yalpa omurgasının girdap alanı üzerinde seçilmiş olup, mesafe ölçümü serbest su yüzeyinden tekne

omurgasına olacak şekilde alınmıştır. Ayrıca görüntünün ve ölçümün alındığı andaki yalpa açısı pozisyonu da şekilde verilmiştir.

PIV tekniği ile incelenen test durumlarının her birisi için verilen hız profilleri incelendiğinde, yalpa genliğinin artması ile beklendiği üzere hız büyüklüklerinin de arttığı görülebilir. Ayrıca, levha yalpa omurgası ile kanat kesit yalpa omurgasının, yalpa omurgasız ve oval kesit yalpa omurgasının bulunduğu konfigürasyonlara göre daha yüksek hız profillerine sahip olduğu görülebilir.

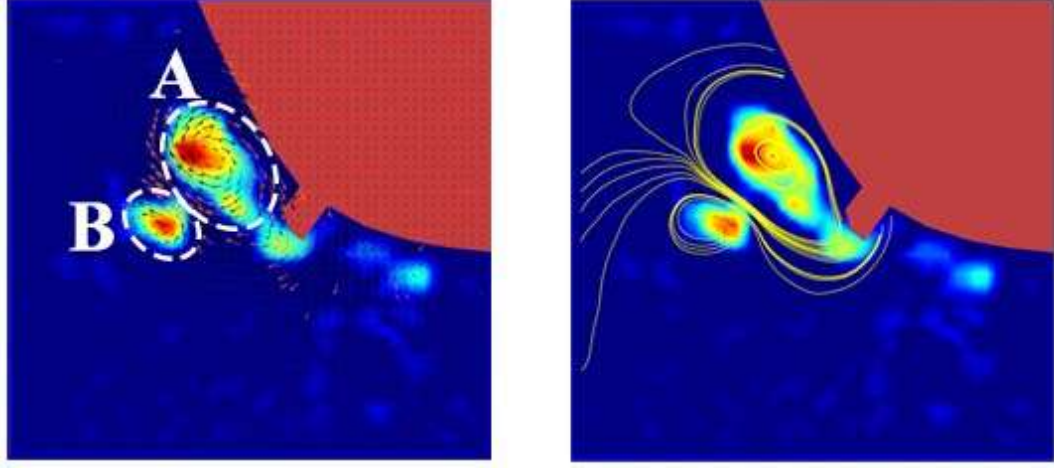
PIV tekniği korelasyon sürecinde, ölçüm alanında bulunan her parçacık için hız vektörleri oluşturmaktadır. Elde edilen bu hız vektörlerinin ortalamaları alınarak aşağıda bulunan yalpa omurga çeşitlerinin oluşturduğu konfigürasyonlarla hazırlanan ortalama hız, yalpa açısı grafiği elde edilmiştir (Şekil 6.8).



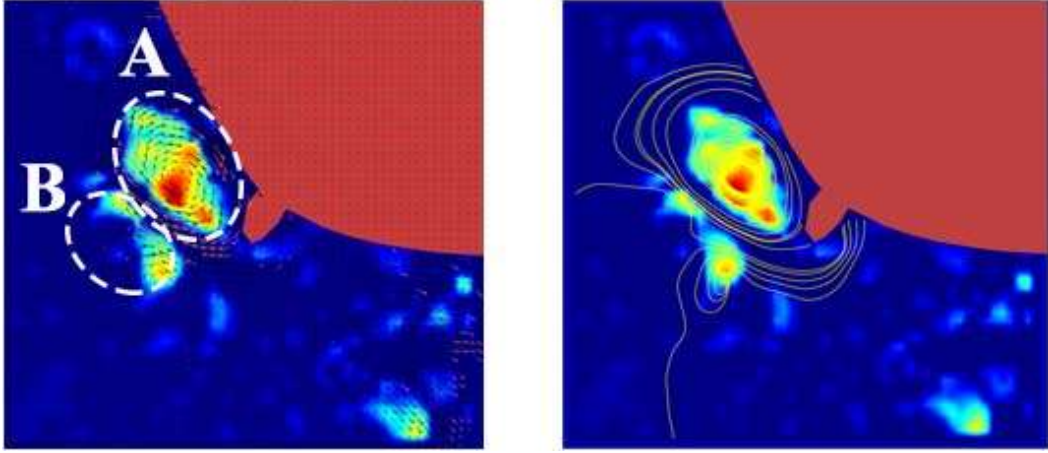
Şekil 6.8. Ölçüm alanından elde edilen hız vektörlerinin ortalaması

Şekil 6.8’de verilen grafik incelendiğinde, strengecten elde edilen verilerle hazırlanan, boyutsuz yalpa sönüm katsayıları ile benzer eğilimde bir grafik dağılımının olduğu gözlenebilir. Ancak elde edilen PIV verileri iki boyutlu bir kesitin analizi olduğu için, üç boyut etkisi nedeni ile mevcut veriler kullanılarak yalpa sönüm katsayısına (B44) ulaşılamaz.

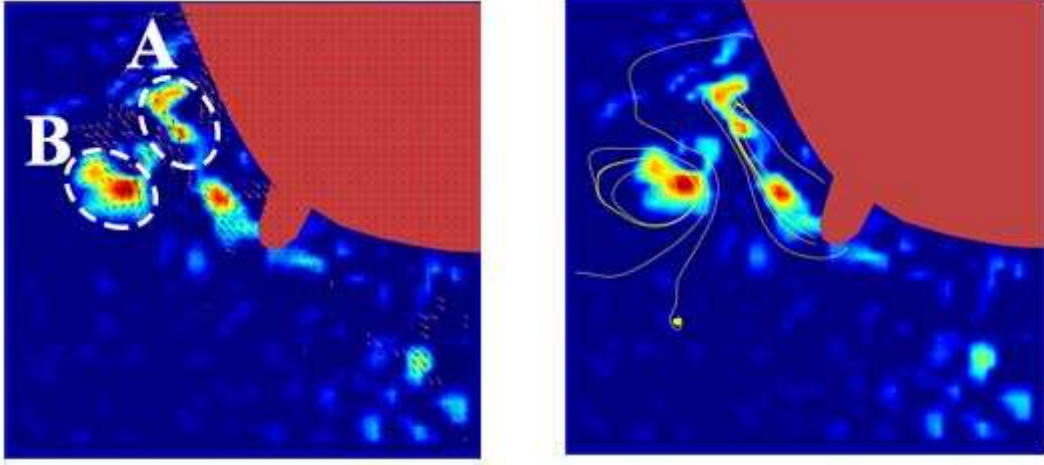
Sadece PIV görünüm kesitlerinde görülebilen, girdap büyüklüğü, konumları, şiddetleri gibi parametreler incelenerek, farklı yalpa omurgası şekillerinin oluşturduğu akış yapılarına harcanan enerji hakkında yorum yapılabilir. Bu amaç doğrultusunda aşağıda, 10 derecelik yalpa genliğinde, 0 derece yalpa açısı konumunda, farklı yalpa omurga konfigürasyonları ile alınmış PIV girdap görüntüleri birbirleri ile karşılaştırılmışlardır.



Şekil 6.9. Levha yalpa omurga konfigürasyonu için girdap ve akış çizgisi dağılımları



Şekil 6.10. Kanat kesit yalpa omurga konfigürasyonu için girdap ve akış çizgisi dağılımları



Şekil 6.11. Oval kesit yalpa omurga konfigürasyonu için girdap ve akış çizgisi dağılımları

Şekil 6.9, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11 incelendiğinde oluşan girdapların temel yapıları ve akış çizgilerinin takibi ile bu girdap yapılarının konumu görülebilir. Yalpa omurgaları etrafında oluşan akış ayrılmaları, Karman girdap caddesi ile benzerlik göstermektedir. A ve B olarak isimlendirilen girdaplar uç girdap yapılarına (tip vortex structure) örnek gösterilebilirler. Burada bilinmesi gereken ise, A girdap yapısının iz bölgesinde devamlılığı olduğu (wake shed vortex), B girdap yapısının ise uç kısımdan belli bir zaman içerisinde serbest kayma yüzeyi nedeni ile koparak akıştan ayrılacak olan girdap yapısı (leading edge vortex) olduğudur.

Bu girdap yapılarının oluşma ve akıştan ayrılma süreleri, yalpa omurgası üzerinde oluşan kuvvetlerle yakından ilgilidir. Büyük girdaplar, yalpa omurgasında daha büyük sürüklenme kuvvetleri oluştuğunun ve dolayısıyla daha büyük bir akış direncinin oluştuğunun göstergesidir. Burada levha yalpa omurgası ile kanat kesit yalpa omurgası ucunda oluşan girdapların oval kesit yalpa omurgası ucunda oluşan girdaplara göre çok daha büyük olduğu görülebilir. Bu durum da levha ve kanat kesit yalpa omurgalarının oval kesit yalpa omurgasına göre daha yüksek yalpa sönüm katsayılarına sahip olduğunu göstermektedir. Nitekim Şekil 6.6'da verilen grafik incelendiğinde, strengecten alınan verilerin de bu durumu doğruladığı görülebilmektedir.

Ayrıca, Şekil 6.9 ve 6.10'da B girdabının akış çizgileri kontrol edildiğinde, henüz girdabın yalpa omurgasından ayrılmadığı ancak, Şekil 6.11'de bulunan B girdabının ayrılarak yalpa omurgasından kopmuş olduğu görülebilir. Hatta Şekil 6.11'de B girdabının ardılının da yalpa omurgası ucunda belirgin olduğu görülmektedir. Şekil 6.9, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11, 10 derecelik yalpa genliği altında zorlanmış yalpa hareketi yapan bir modele ait

0 derecelik konumdan alınmış girdap görüntüleri olduğundan, örnekler arasında girdap oluşma ve kopma periyotlarının yani, girdap saçılım frekanslarının farklı olduğu yorumu yapılabilir.

Bu durum da Strouhal sayılarının farklı olması anlamına gelmektedir. Strouhal sayısı,

$$St = \frac{f_V L_c}{U} \quad (6.3)$$

şeklinde gösterilmektedir. Burada L_c karakteristik uzunluk, f_V girdap saçılım frekansı ve U akış hızıdır. PIV verileri incelendiğinde (Ek 2) karakteristik uzunluk ve akış hızının aynı olduğu ancak, girdap saçılım frekansının farklı olduğu tespit edilebilmektedir.

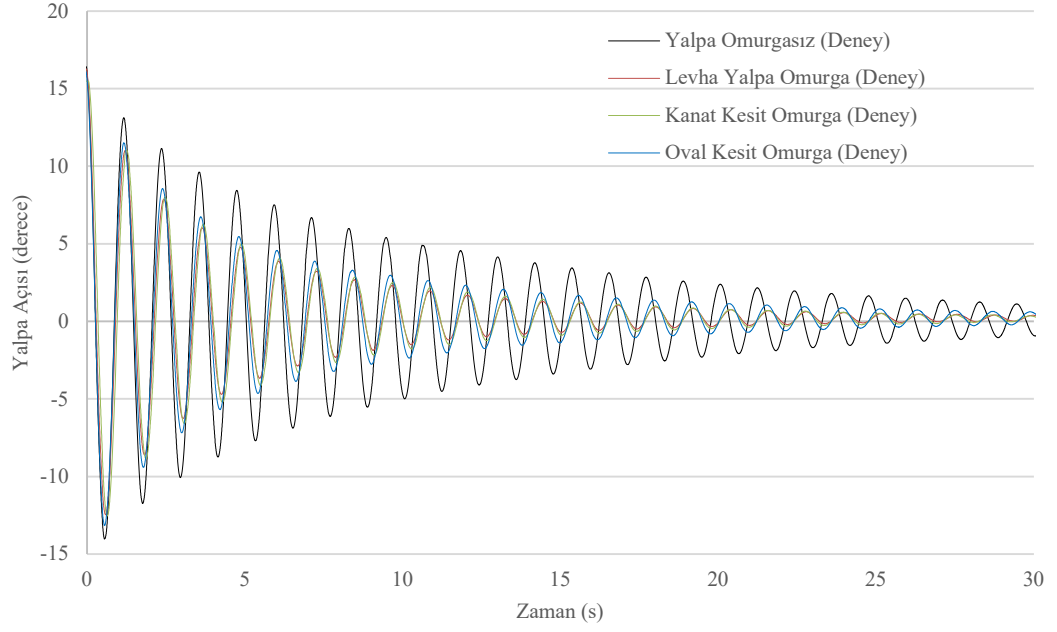
6.3. Serbest Bırakma Testi Sonuçları

Serbest bırakma testinde iki farklı yaklaşım ile sonuçlar elde edilmiştir. Bunlar deneysel ve sayısal analiz yaklaşımlarıdır. Deneylerde, model tekneye, farklı yalpa omurgaları monte edilerek, 16 derecelik başlangıç meyili ile testler gerçekleştirilmiştir. Teknenin su ile etkileşiminden dolayı oluşan yalpa açıları görüntü yakalama sistemi aracılığı ile elde edilmiştir.

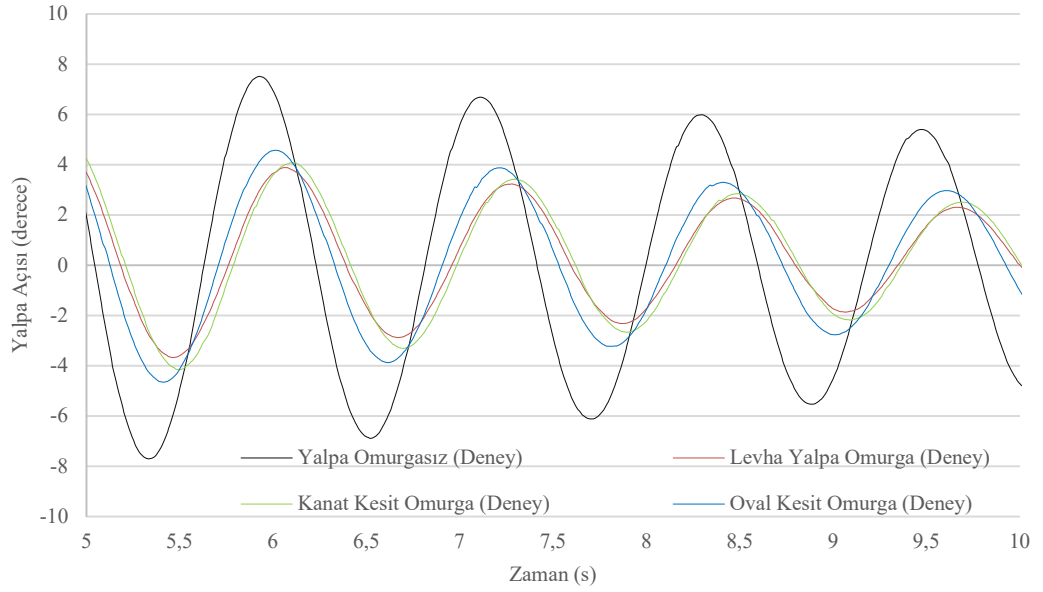
Sayısal analizlerde ise, 2 boyutlu simülasyonlar gerçekleştirilmiş olup, kullanılan model tekne İrkal vd., (2016)'nin 2 boyutlu serbest bırakma deneylerinde kullanılan model teknenin ölçülerindedir. Bu model tekne basit bir dikdörtgenler prizması olup, sintonie dönümleri yuvarlatılmıştır.

6.3.1. Serbest Bırakma Testi Deneyi Sonuçları

Aşağıda tam (Şekil 6.12) ve yakınlaştırılmış (Şekil 6.13) olmak üzere serbest bırakma deneylerinden elde edilen yalpa açısının zamanla değişimi grafikleri verilmiştir.

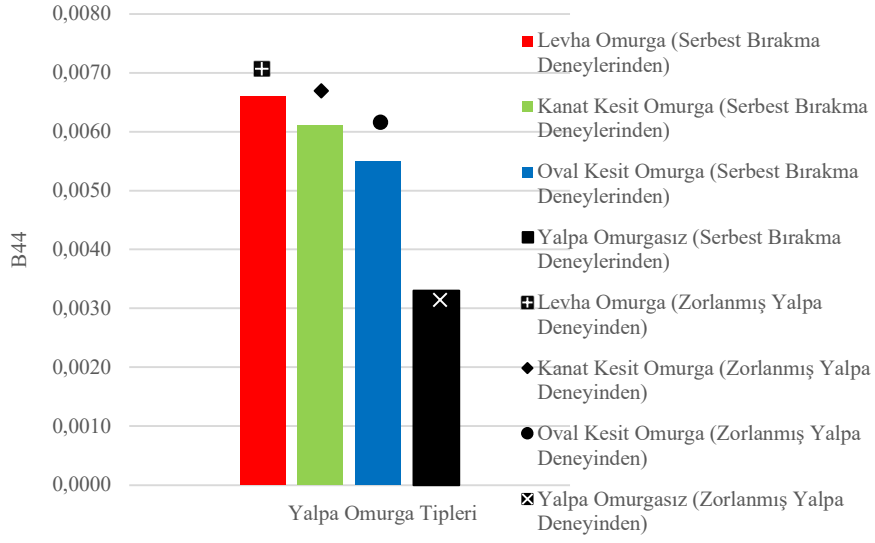


Şekil 6.12. Serbest bırakma deneyi testlerinden elde edilen yalpa açısı, zaman grafikleri (tam ölçek)



Şekil 6.13. Serbest bırakma deneyi testlerinden elde edilen yalpa açısı, zaman grafikleri (yakınlaştırılmış)

Elde edilen veriler Bölüm 2.3.1'deki yöntemle değerlendirildiğinde (tepe noktalarındaki yalpa açısı değerleri alınarak zarf eğrilerinin oluşturulması ile), yalpa sönüm katsayıları elde edilmiştir. Yalpa sönüm katsayıları aşağıda Şekil 6.14'te verilmiştir.

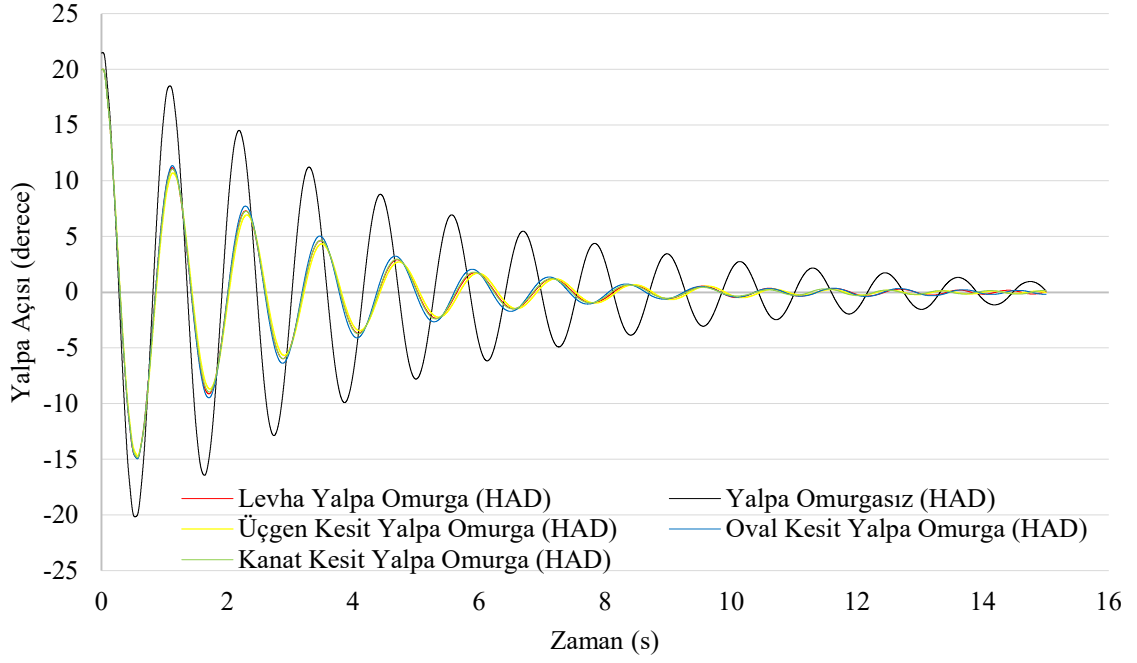


Şekil 6.14. Serbest bırakma deneyinden elde edilen yalpa sönüm katsayıları

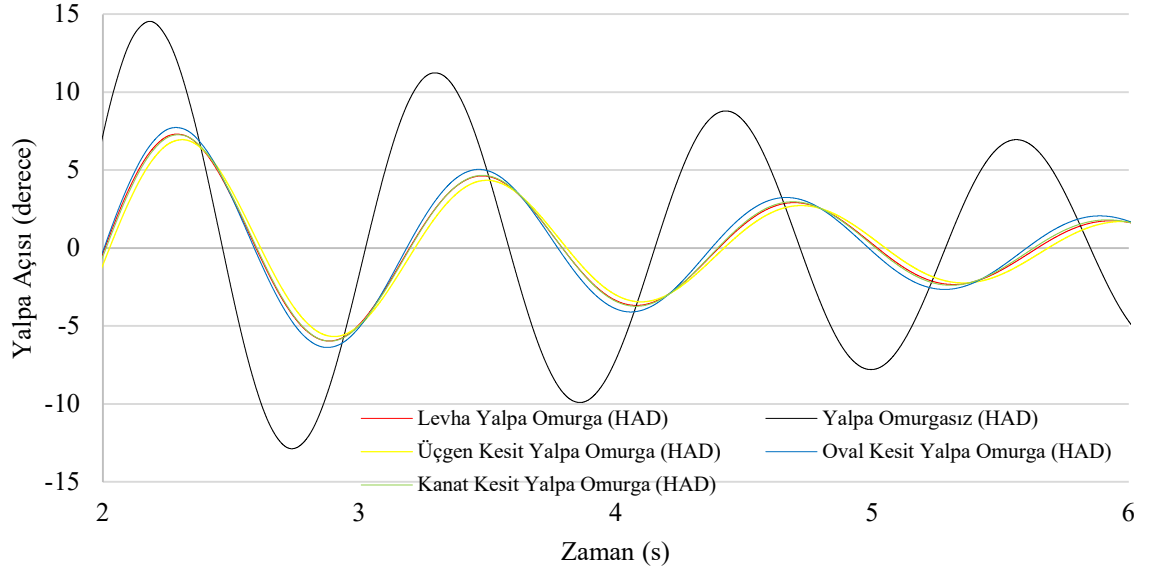
Serbest bırakma deneylerinden elde edilen veriler ile zorlanmış yalpa deneylerinden elde edilen veriler incelendiğinde, yalpa sönüm katsayılarının birbirlerine oldukça yakın olduğu görülebilir. Bu test sonucunda da, levha yalpa omurganın en yüksek yalpa sönüm katsayısına sahip olduğu, oval kesit yalpa omurganın ise en küçük yalpa sönüm katsayısına sahip olduğu görülebilir.

6.3.2. Serbest Bırakma Testi Sayısal Analiz Sonuçları

Aşağıdaki grafikte, serbest bırakma testinin yalpa omurgasız, levha yalpa omurga, kanat kesit yalpa omurga, oval kesit yalpa omurga ve üçgen kesit yalpa omurga konfigürasyonlarının sayısal iki boyutlu analiz sonuçları verilmiştir.

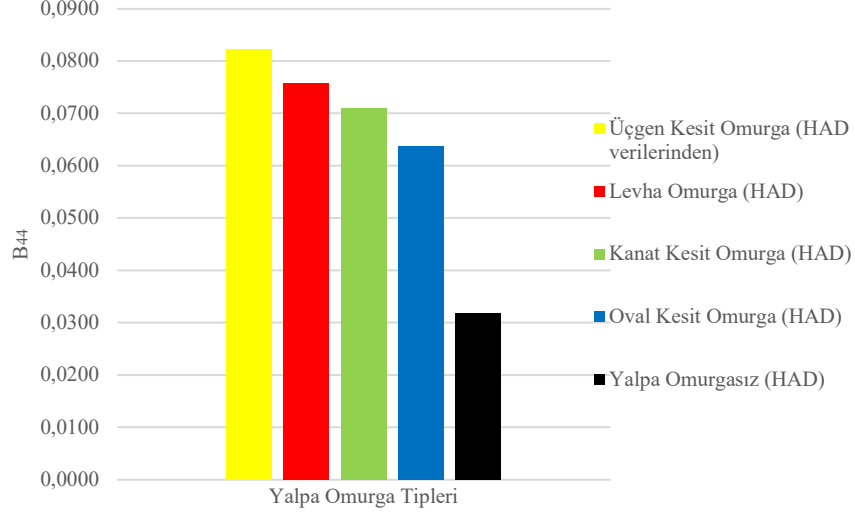


Şekil 6.15. Serbest bırakma testleri sayısal analizlerinden elde edilen yalpa açısı, zaman grafikleri (tam ölçek)



Şekil 6.16. Serbest bırakma testleri sayısal analizlerinden elde edilen yalpa açısı, zaman grafikleri (yakınlaştırılmış)

Elde edilen veriler Bölüm 2.3.1’deki yöntemle değerlendirildiğinde, yalpa sönüm katsayıları elde edilir. Aşağıdaki grafikte elde edilen yalpa sönüm katsayıları görülebilir.

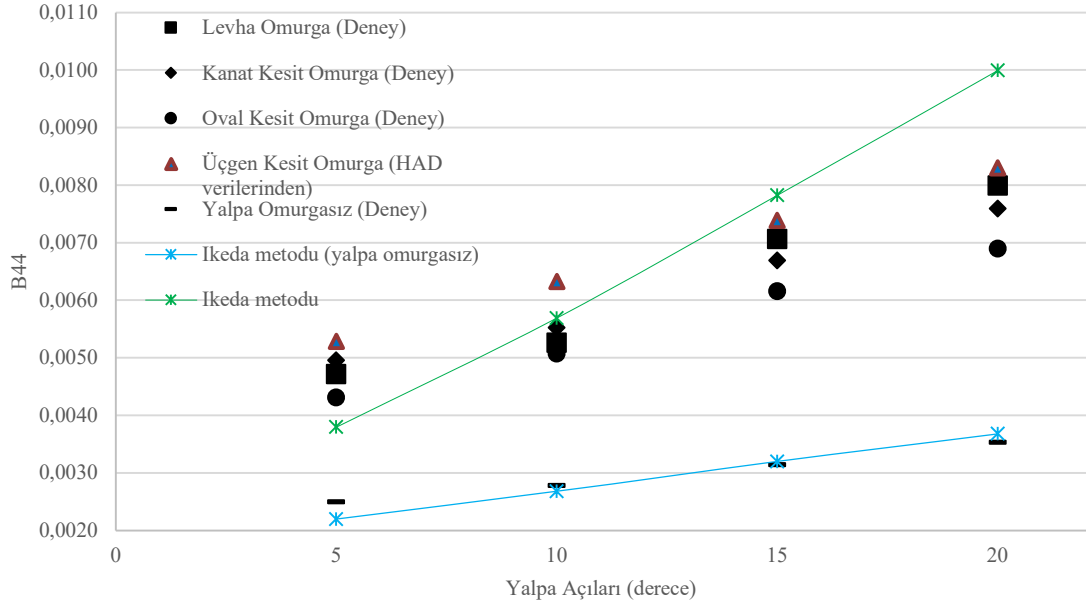


Şekil 6.17. İki boyutlu serbest bırakma testi sayısal analizlerinden elde edilen boyutsuz yalpa sönüm katsayıları

Şekil 6.14’te verilen deneysel verilerle elde edilen yalpa sönüm katsayıları Şekil 6.17 verilen iki boyutlu sayısal analiz verilerinden elde edilen sönüm katsayıları ile eğilim olarak uyumlu iken, değerler olarak oldukça farklıdır. Bu durum kullanılan gemi modelinin farklı olması ve üç boyut etkisi ile açıklanabilir.

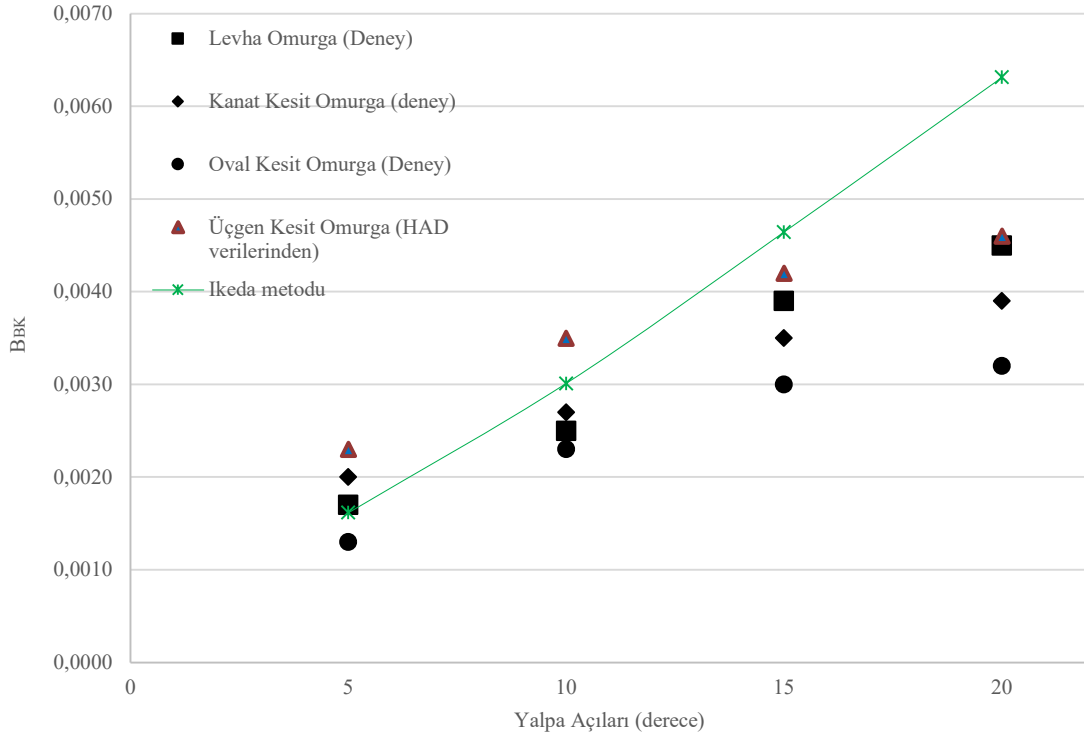
6.4. Yalpa Sönüm Katsayılarının Ikeda Tahmin Yöntemi ile Karşılaştırılması

Bu bölümde deneysel olarak hesaplanan boyutsuz toplam yalpa sönüm katsayıları Ikeda metodundan elde edilen yalpa sönüm katsayıları ile karşılaştırılmıştır. Ikeda metodu ile sönüm tahmini, Osaka Metropolitan web sayfasından alınan Fortran kodu ile gerçekleştirilmiştir (URL 2, 2022). Deneylerden ve sayısal analizden elde edilen yalpa sönüm katsayıları ile, Ikeda metodu ile elde edilen yalpa sönüm katsayıları karşılaştırılması aşağıda Şekil 6.18’deki grafikte karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.18. Deneylerden elde edilen yalpa sönüm katsayılarının Ikeda yöntemi ile karşılaştırılması

Ikeda yöntemi ile elde edilen yalpa sönüm katsayıları yalpa omurgalı durum ve yalpa omurgasız durum olmak üzere ikiye ayrılarak verilmiştir. Ikeda yönteminden yalpa sönümünün yalpa omurgasız bileşeni de elde edilip, deneylerden alınmış olan verilerle oluşturulan bulgularla karşılaştırılabilir. Aşağıda verilen Şekil 19'daki grafikte bu karşılaştırma verilmiştir.

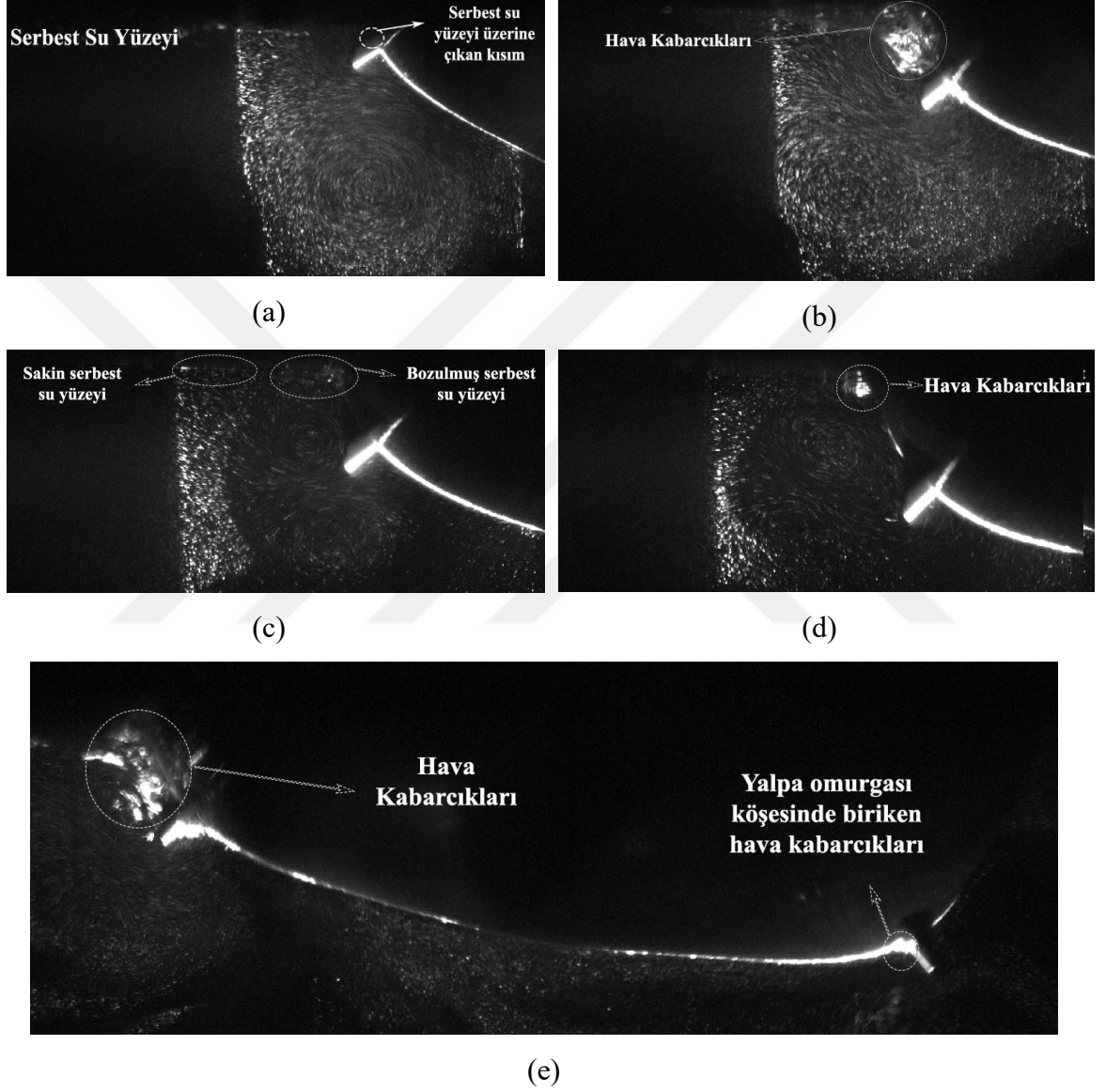


Şekil 6.19. Yalpa omurgası sönüm bileşenin Ikeda yöntemi ile karşılaştırılması

Şekil 6.18 ve Şekil 6.19 incelendiğinde Ikeda yönteminin yalpa sönüm katsayısı tahmininin yalpa omurgasız durum için oldukça tutarlı olduğu görülebilmektedir. Ancak görülebileceği üzere yalpa genliğinin artması ile beraber Ikeda yönteminin deneyler ile uyumu azalmaktadır. Ikeda yönteminde yalpa omurgasının sadece uzunluk ve genişliği göz önüne alınmaktadır. Ancak elde edilen deneysel sonuçlar ile Ikeda yöntemi arasında levha omurga tipinde dahi farklılıklar vardır.

15 ve 20 derecelik yalpa genliklerinde serbest su yüzeyine yaklaşan yalpa omurgalarında serbest su yüzeyi etkisi görülmektedir. Özellikle, 20 derecelik yalpa genliğinde deneylerden elde edilen yalpa sönüm katsayısı sonuçlarında bu çok daha barizdir ve 5,10 ve 15 derecede elde edilen sonuçlar gibi lineer bir artışla artmamış olduğu görülür. Bunun sebebi serbest su yüzeyinin etkisi olup, deneyler esnasında 15 derecelik yalpa genliğinde serbest su yüzeyini bozması, 20 derecelik yalpa genliğinde ise yalpa omurgasının kısmen su yüzeyinin üzerine çıkması ve akış yapılarının içerisine su baloncuklarının karışarak akış yapılarını bozmasıdır. Ayrıca kanat kesit omurga levha omurgaya göre 5 ve 10 derecede daha yüksek bir sönüm katsayısı oluşturabilirken, 15 ve 20 derecede levha omurganın daha yüksek bir yalpa sönümü üretebildiği görülmektedir. Bu durum kanat kesit

omurganın serbest su yüzeyinden daha çok etkilendiği yorumunu yaptırabilir ancak emin olmak için daha çok deney yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Aşağıda verilen Şekil 6.20’de ham PIV görüntülerinden yalpa omurgasının serbest su yüzeyine olan etkisi gözlemlenebilir.



Şekil 6.20. Levha yalpa omurgası için (a)20 derece yalpa genliğinde serbest su yüzeyi, (b) 20 derece yalpa genliğinde akışa dahil olan hava kabarcıkları, (c) 15 derece yalpa genliğinde serbest su yüzeyi, (d) 15 derece yalpa genliğinde akışa dahil olan hava kabarcıkları (e) 20 derece yalpa genliğinde akışa dahil olan ve yalpa omurgası ve model gövdesinde biriken hava kabarcıkları

Ikeda yönteminde serbest su yüzeyi etkisinin bulunmaması, Ikeda yönteminden elde edilen verilerin 15 ve 20 derecelik yalpa genliği için gerçek sonuçlardan uzaklaşması ile neticelenmiştir.

6.4.1. Ikeda Yöntemi'nde Yapılması Önerilen İyileştirme Analizi

Ikeda yalpa sönüm katsayısı tahmin yöntemi ile elde edilen yalpa sönüm katsayıları incelendiğinde, yalpa omurgasız durum için yalpa sönüm katsayılarının deneylere oldukça yaklaştığı görülebilir (Şekil6.18). Deney sonuçları ile uyumsuz olan kısmın yalpa omurgası sönüm bileşeni olduğu görülmektedir ve bu kısımda yalpa omurgası sönüm bileşeni üzerine odaklanılmıştır.

Bölüm 2.4.5'te verildiği üzere, yalpa omurgası sönüm bileşeni aşağıda verildiği şekilde komponentlere ayrılabilir.

$$B_{BK} = B_{BKN} + B_{BKH} + B_{BKW} + B_{BKL} \quad (6.4)$$

Deneylerde ileri hız durumu mevcut olmadığı için kaldırma kuvveti bileşeni ihmal edilebilir. Normal kuvvet bileşeni aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

$$B_{BKN_0} = \frac{8}{3\pi} \cdot \rho \cdot r_{BK}^3 \cdot w \cdot \phi_a \cdot b_{BK} \cdot f^2 \cdot C_D \quad (6.5)$$

Yalpa omurgası ve tekne etkileşimi bileşeni ise aşağıdaki gibi verilebilir.

$$B_{BKH_0} = \frac{4}{3\pi} \cdot \rho \cdot r_{BK} \cdot d \cdot w \cdot \phi_a \cdot b_{BK} \cdot f^2 \int C_p \cdot ldG \quad (6.6)$$

$$\int C_p \cdot ldG = (-A_3 C_p^- + B_3 C_p^+) \quad (6.7)$$

$$C_D = C_p^+ - C_p^- \quad (6.8)$$

C_p^+ ve C_p^- yalpa omurgasının etrafındaki basınç katsayıları olup, C_p^+ Ikeda vd. (1978) tarafından yapılmış olan deneylerin sonuçlarından çıkarılmıştır. $C_p^+ = 1,2$ olduğu

bilindiğine göre, Denklem 2.42'den görülebilecek olan C_D formülünü kullanarak C_p^- hesaplanabilir.

$$C_p^- = 1,2 - C_D = -22,5 \frac{b_{BK}}{\pi r_{BK} f \phi_a} - 1,2 \quad (6.9)$$

Yalpa omurgasının bir diğer alt sönüm bileşeni ise dalga yapma bileşenidir. Aşağıdaki formülle gösterilir.

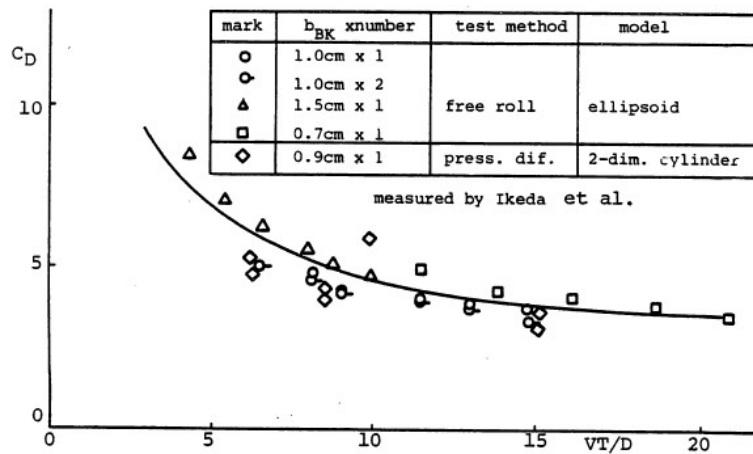
$$\hat{B}_{BK} \sim C_{BK}(b_{BK}) \exp\left[-\frac{\omega^2}{g} d_{BK}(\phi)\right] \quad (6.10)$$

Ikeda yönteminde kullanılan yalpa omurgası bileşenleri incelendiğinde yalpa omurgalarının baş kış kısmındaki uç noktalarının gemi ile birleştiği yerlerin şekilleri ve özellikle 15 ve 20 derecelik yalpa genliklerinde serbest su yüzeyi etkisi de farklılık oluşturan etmenler olarak görülmesine rağmen yalpa omurgası şeklinin Ikeda yöntemi sonuçlarında değişikliğe neden olabilecek parametrelerden birisinin yalpa genliğinden bağımsız olarak C_D olduğu görülebilmektedir.

Ikeda yönteminde kullanılan C_D formülü aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$C_D = 22,5 \frac{b_{BK}}{\pi r_{BK} f \phi_a} + 2,4 \quad (6.11)$$

Bu formülasyon su altına batırılmış levhaların harmonik salınım hareketleri esnasında üzerine etki eden direnç kuvvetlerinin deneysel olarak ölçülmesi ile elde edilmiş olup, Ikeda vd. (1978) tarafından aşağıda verilen grafik ile çıkarılmıştır.

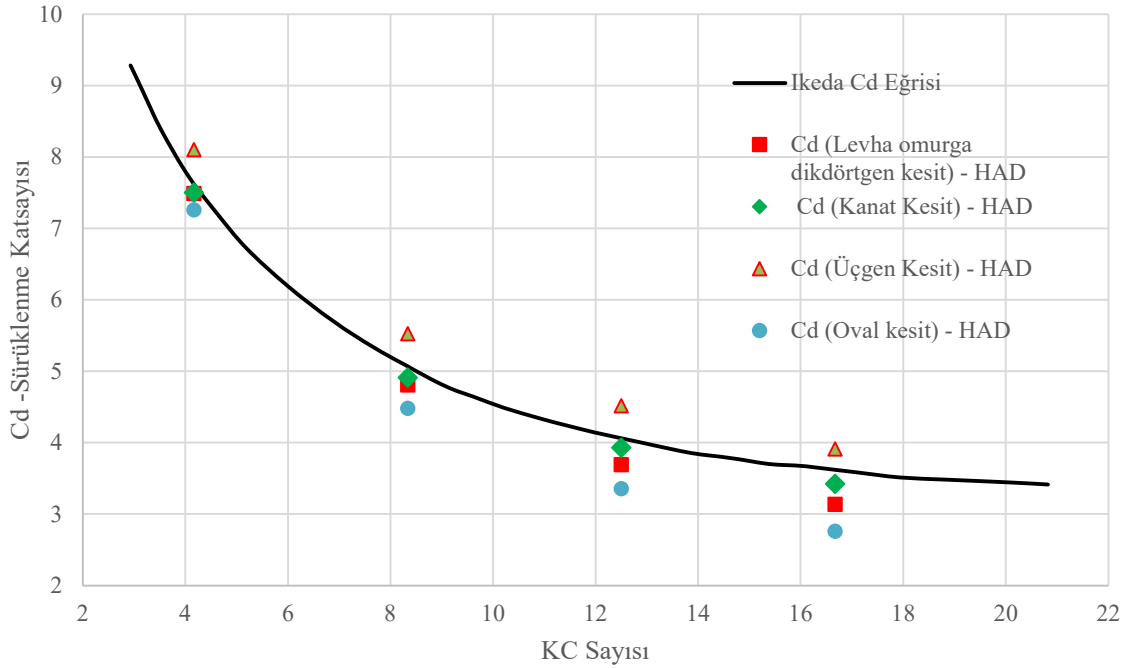


Şekil 6. 21. Yalpa omurgası sürüklenme katsayıları (Ikeda vd., 1978)

Şekil 6.21'den de görülebileceği üzere, verilen sürüklenme katsayısı (C_D), Keulegan-Carpenter (KC) sayısına bağlıdır. Ölçümlerin yapıldığı plakalar dikdörtgen orta kesite sahip olan farklı genişliklerdeki levhalardır. Görülebileceği üzere yalpa omurgası gövde şekli ile alakalı bir parametre bulunmayıp, yalpa omurgası kalınlığı ise etkisinin çok az olması nedeni ile ihmal edilmiştir (Ikeda vd., 1978).

Formülasyonun bu kısmında bir iyileştirme gerçekleştirebilmek adına, farklı şekillere sahip yalpa omurgaları için HAD analizleri ile C_D hesaplamalarının yapılması ve bulunan C_D değerlerinin Ikeda yönteminde yerine yazılması önerisi verilmektedir.

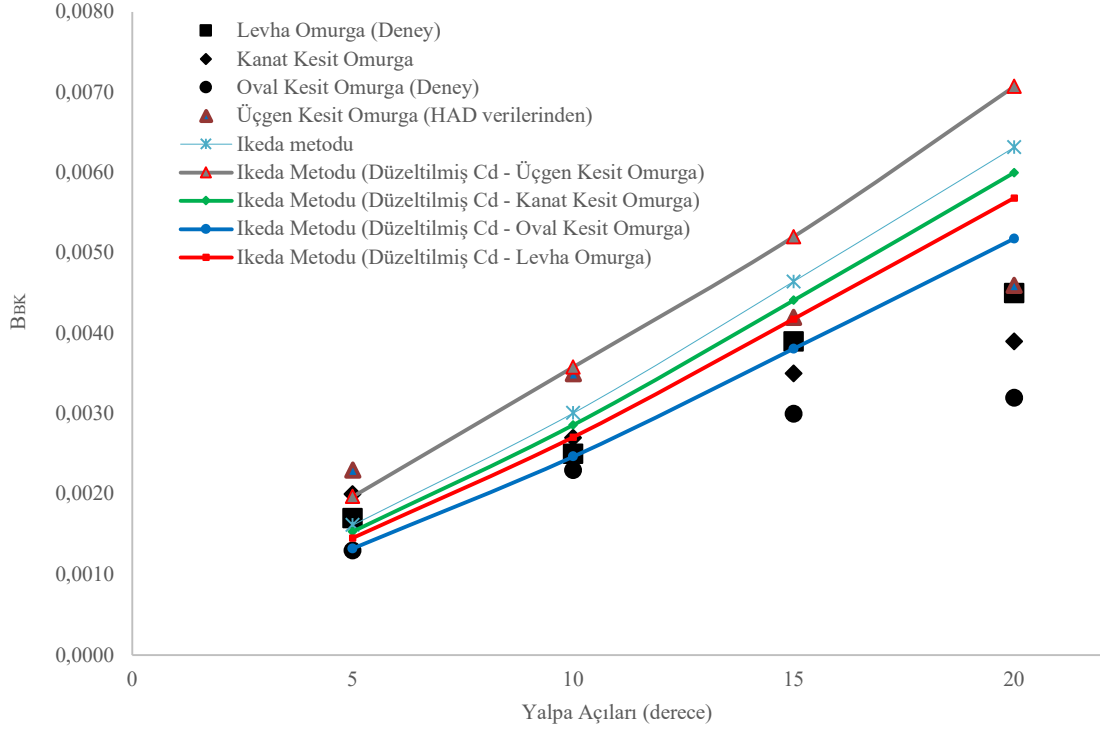
Bu amaç doğrultusunda bu çalışmada kullanılan yalpa omurgası şekilleri Ikeda vd. (1978) yapmış oldukları gibi bir silindire takılarak HAD analizleri ile yalpa hareketine maruz bırakılmış ve basınç farkı ölçümü yapılarak C_D değerleri elde edilmiştir. Elde edilen C_D değerlerinin KC sayısı ile değişimini gösteren grafik Şekil 6.22'de verilmiştir.



Şekil 6.22. HAD analizleri sonucu elde edilmiş olan farklı şekle sahip yalpa omurgaları için KC- Cd grafiği

Şekil 6.22 incelendiğinde deneysel verilerden de tahmin edilebileceği üzere en yüksek C_D katsayısına üçgen kesit omurga sahiptir. Elde edilen Ikeda C_D eğrisinin üzerinde bir yayılım göstermektedir. Kanat kesit omurga ve levha omurganın birbirlerine yakın C_D değerleri ürettiği ve oval kesit omurganın ise en küçük C_D değerlerine sahip olduğu görülebilir.

HAD analizlerinden elde edilen bu C_D değerleri denklem 6.11 yerine direkt olarak sayısal veri olarak konulup, Ikeda yalpa omurgası sönüm bileşeni analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu durumda düzenlenmiş C_D değerleri için Ikeda metodundan elde edilen yalpa omurgası sönüm katsayıları Şekil 6.23'te verilen grafikten görülebilir.



Şekil 6.23. Düzenlenmiş C_D değerleri için Ikeda metodundan elde edilen yalpa omurgası sönüm katsayıları

Şekil 6.23 incelendiğinde, elde edilen yalpa omurgası sönüm katsayılarının deneylerden elde edilenlere daha çok yaklaştığı görülebilmektedir. Özellikle 5 ve 10 derece yani serbest su yüzeyi etkisinin bulunmadığı kısımda bu yakınsama çok daha belirgin olmaktadır.

7. SONUÇLAR, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Yalpa hareketi geminin boyuna eksenine etrafında sancak ve iskele yönüne doğru harmonik olarak gerçekleşen açısal bir harekettir. Yalpa hareketinden kaynaklanan büyük yalpa genlikleri istenmeyen durumlardan birisidir. Yolcular ve personel konforunu ve yük güvenliğini oldukça düşüren durumlara neden olmakla beraber aşırı genlikli ya da yüksek frekanslı yalpa hareketleri gemi içerisindeki yolcu ve personelin düşmesine, yaralanmasına dahi neden olabilir. Hatta güvenli stabilite sahası olarak kabul edilen doğrultucu moment bölgesinin dışında kalan salınımlarda geminin alabora olma, batma tehlikesi mevcuttur. Bunun gibi nedenlerden ötürü, yalpa hareketinin ve bununla doğrudan bağlı olan yalpa sönümünün detaylıca analiz edilmesi önem arz etmiştir. Tekne formunun yalpa hareketi esnasında akışkan ile oluşturduğu dinamikleri incelemek, analiz etmek ve oluşan akış formlarını gözlemlemek, bu hareketin zararlı etkilerini en az düzeye indirmek için alınacak tedbirlerin ortaya çıkarılmasında oldukça önemlidir.

Bu tez çalışmasında farklı tip gövde şekline ve yalpa omurgasına sahip gemi modellerinin yalpa ve sönüm karakteristikleri farklı yalpa genlikleri altında deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneylerde zorlanmış yalpa hareketi testleri ile serbest bırakma testleri kullanılmıştır. Deneylerde ayrıca Parçacıklı Akış Görüntüleme Hız Ölçümü Tekniği (PIV) kullanılarak farklı bir yaklaşımla, akış yapıları görüntülenmiştir. Deneyler model geminin farklı yalpa omurgaları ile çekme tankında PIV, gerinim ölçer ve görüntü işleme ile incelenmesinden oluşmuştur.

Hazırlanmış bu tez çalışmasında deneysel akışkanlar dinamiği yöntemlerinin yansırı ayrıca bir sayısal çalışma da yapılmıştır. Bu sayısal çalışma deney ortamında gerçekleştirilen problemin hesaplamalı akışkanlar dinamiği paket programı ile simülasyonlarının yapılması şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Deneyler ve sayısal analizler sonucunda elde edilen boyutsuz yalpa sönüm katsayıları karşılaştırıldığında, alışlagelmiş olan levha omurga şeklinin dışındaki geometrik şekilli yalpa omurgalarının farklı yalpa sönüm katsayılarına sahip olduğu görülmüştür. Üçgen kesit yalpa omurgası her bir yalpa açısı için en yüksek yalpa sönüm katsayısına sahiptir. Düşük yalpa açılarında (5 ve 10 derece) kanat kesit yalpa omurgası levha omurgaya göre daha yüksek yalpa sönüm katsayısı sağlarken yüksek yalpa açılarında

(15 ve 20 derece) levha omurga daha yüksek yalpa sönüm katsayısına sahiptir. Bunun nedeninin kanat kesit yalpa omurgasının levha omurgaya göre serbest su yüzeyinden daha çok etkilenmesi olduğu düşünülmektedir. Ancak kesin bir yargıya varabilmek için daha çok deney gerçekleştirilmelidir. Oval kesit yalpa omurgası ise, tüm yalpa omurgaları arasında her yalpa açısı için en düşük yalpa sönüm katsayısına sahiptir. Bu kısımda yalpa omurgalarının uç şekil özelliklerinin (köşeli ya da yuvarlatılmış olması) etkili olduğu görülmüştür.

PIV tekniği ile incelenen test durumlarının her birisi için verilen hız profillerinin yalpa genliğinin artması ile hız büyüklüklerinin de arttığı görülebilir. Ortalama hız artışının boyutsuz yalpa sönüm katsayıları ile benzer trendde bir grafik dağılımının olduğu gözlenmiştir. Akış yapıları incelendiğinde, yalpa omurgalarında enerjinin uç girdap yapıları ile harcandığı, girdap saçılım frekanslarının yalpa omurgası şekli ile bağlantılı olduğu görülmüş ve dolayısıyla farklı şekle sahip yalpa omurgalarının farklı Strouhal sayılarına sahip olduğu bulunmuştur.

Sayısal çalışmalarda deneylerde kullanılmış olan model geminin haricinde, 2 boyutlu analizlere müsait olan bir model kullanılmış ve elde edilen yalpa sönüm katsayısı dağılımlarının benzer olduğu görülmüştür.

Bu sonuçlardan hareketle, yalpa omurgası uç girdap büyüklüğünü ve dolayısıyla da yalpa sönüm katsayısını artırabilmek için, yalpa omurgası tasarımlarında levha köşe ve uçlarının sivriltilmesi önerilmiştir.

Ikeda yöntemi ile elde edilen yalpa sönüm katsayıları yalpa omurgalı durum ve yalpa omurgasız durum olmak üzere ikiye ayrılarak verilmiştir. Ikeda yönteminin yalpa sönüm katsayısı tahmininin yalpa omurgasız durum için oldukça tutarlı olduğu görülmüştür. Ancak yalpa genliğinin artması ile Ikeda yönteminin deneyler ile uyumu azalmaktadır. Ikeda yönteminde yalpa omurgasının sadece uzunluk ve genişliği göz önüne alınmaktadır. Ancak elde edilen verilerden de görülebileceği gibi bu durum yalpa sönüm tahminini gerçeklikten uzaklaştırmaktadır. 15 ve 20 derecelik yalpa genliklerinde serbest su yüzeyine yaklaşan yalpa omurgalarında serbest su yüzeyi etkisi görülmektedir. Özellikle, 20 derecelik yalpa genliğinde deneylerden elde edilen yalpa sönüm katsayısı sonuçlarında bu çok daha barizdir ve 5,10 ve 15 derecede elde edilen sonuçların aksine lineer bir artışa sahip olmadığı görülmüştür. Bunun sebebi serbest su yüzeyinin etkisi olup, deneyler esnasında 15 derecelik yalpa genliğinde serbest su yüzeyini bozması, 20 derecelik yalpa genliğinde ise yalpa omurgasının kısmen su yüzeyinin üzerine çıkması ve akış yapılarının içerisine su

baloncuklarının karışarak akış yapılarını bozmasıdır. Ikeda yönteminde kullanılan yalpa omurgası bileşenleri incelendiğinde yalpa omurgalarının baş kık kısmındaki uç noktalarının gemi ile birleştiği yerlerin şekilleri ve özellikle 15 ve 20 derecelik yalpa genliklerinde serbest su yüzeyi etkisi de farklılık oluşturan etmenler olarak görülmesine rağmen yalpa omurgası şeklinin Ikeda yöntemi sonuçlarında değişikliğe neden olabilecek parametrelerden birisinin yalpa genliğinden bağımsız olarak C_D olduğu görülmüştür. Formülasyonun bu kısmında bir iyileştirme gerçekleştirebilmek adına, farklı şekillere sahip yalpa omurgaları için sayısal analizlerle C_D hesaplamalarının yapılması ve bulunan C_D değerlerinin Ikeda yöntemine dahil edilmesi önerisi verilmiştir.

İleride yapılacak çalışmalara örnek olarak, serbest su yüzeyi etkisinin incelenmesi, akış yapıları içerisine karışan ve yalpa omurgası ile gemi gövdesine tutunan hava kabarcıklarının yalpa sönümüne olan etkisi, yalpa omurgasına eklenmiş uç levhasının yalpa sönümüne olan etkisi, yalpa omurgası uçlarındaki sivriltilme açılarının yalpa sönümüne olan etkisi, üç boyutlu analizlerde yalpa omurgası ile gemi gövdesi birleşim noktalarının şekillerinin yalpa sönümüne etkisi verilebilir.

8. KAYNAKLAR

- Bangun, E.P., Wang, C.M. ve Utsunomiya, T., Hydrodynamic forces on a rolling barge with bilge keels, Applied Ocean Research, 32 ,2 (2010) 219-232. doi:10.1016/j.apor.2009.10.008
- Bassler, C.C. ve Reed, A.M., An analysis of the bilge keel roll damping component model, Proc. 10th Intl. Conf. Stability of Ships and Ocean Vehicles, 2009, USA.
- Baumann, H., Schlingerversuch mit einem Kreiszylinder, Schiffbau, Schiffahrt und Hafenbau, 38 (1937) 371-376.
- Belenky, V., Weems, K., Lin, W. ve Spyrou, K., Numerical evaluation of capsizing probability in quartering seas with split time method, In: Proc. 28th Symposium on Naval Hydrodynamics, 2010, Pasadena, California.
- Bhattacharyya, R., Dynamics of Marine Vehicles (1st Edition.), Wiley, New York, 1978.
- Bo, Y., Zuo-chao, W. ve Ming, W., Numerical Simulation of Naval Ship's Roll Damping Based on CFD, Procedia Engineering, 37 (2012) 14-18. doi:10.1016/j.proeng.2012.04.194
- Bulian, G., Estimation of nonlinear roll decay parameters using an analytical approximate solution of the decay time history, International shipbuilding progress, 51 ,1 (2004) 5-32.
- Carrica, P.M., Sadat-Hosseini, H. ve Stern, F., CFD analysis of broaching for a model surface combatant with explicit simulation of moving rudders and rotating propellers, Computers & Fluids, 53 (2012) 117-132. doi:10.1016/j.compfluid.2011.10.002
- Cumming, D., Haddara, M.R. ve Graham, R., Experimental Investigation of Roll Damping Characteristics of Destroyer Model, STAB'90, (ss. 166-169).
- de Kat, J.O. ve Paulling, J.R., The simulation of ship motions and capsizing in severe seas, Transactions SNAME, 117 (1989) 127-135.
- Denise, J.P.F., On the roll motion of barges, Transactions RINA, 125 (1983) 255-268.
- Froude, W., On the Influence of Resistance Upon the Rolling of Ships, Naval Science, 1 (1872) 411-429.
- Ghamari, I., Mahmoudi, H.R., Hajivand, A. ve Seif, M.S., Ship Roll Analysis Using CFD-Derived Roll Damping: Numerical and Experimental Study, Journal of Marine Science and Application, 21 ,1 (2022) 67-79. doi:10.1007/s11804-022-00254-1

- Gokce, M.K. ve Kinaci, O.K., Numerical simulations of free roll decay of DTMB 5415, Ocean Engineering, 159 (2018) 539-551. doi:10.1016/j.oceaneng.2017.12.067
- Haddara, M.R. ve Zhang, S., Effect of Forward Speed on the Roll Damping of Three Small Fishing Vessels, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 116 ,2 (1994) 102-108. doi:10.1115/1.2920129
- Hager, W.H., Blasius: A life in research and education, Experiments in Fluids, 34 ,5 (2003) 566-571. doi:10.1007/s00348-002-0582-9
- Hashimoto, H., Omura, T., Matsuda, A., Yoneda, S., Stern, F. ve Tahara, Y., Several remarks on EFD and CFD for ship roll decay, Ocean Engineering, 186 (2019) 106082. doi:10.1016/j.oceaneng.2019.05.064
- He, X. ve Luo, L.-S., Theory of the lattice Boltzmann method: From the Boltzmann equation to the lattice Boltzmann equation, Physical Review E, 56 ,6 (1997) 6811-6817. doi:10.1103/PhysRevE.56.6811
- Henry Peter Piehl, Ship Roll Damping Analysis, Doktora Tezi, Universität Duisburg-Essen, Hamburg, 2016.
- Himeno, Y., Prediction of Ship Roll Damping, University of Michigan, Michigan, 1981.
- Ikeda, Y., Himeno, Y. ve Tanaka, N., A Prediction Method for Ship Roll Damping, Department of Naval Architecture University of Osaka Prefecture, Osaka, 1978.
- Ikeda, Y ve Katayama, T., Roll damping of high speed slender vessels, J Kansai Soc Naval Arch, 222 ,n (1994) 73-82.
- Ikeda, Yoshiho, Himeno, Y. ve Tanaka, N., On Eddy Making Component of Roll Damping Force on Naked Hull, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1977 ,142 (1977) 54-64. doi:10.2534/jjasnaoe1968.1977.142_54
- Ikeda, Yoshiho, Himeno, Y. ve Tanaka, N., Components of Roll Damping of Ship at Forward Speed, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1978 ,143 (1978) 113-125. doi:10.2534/jjasnaoe1968.1978.113
- IMO, Interim Guidelines for Alternative Assessment of the Weather Criterion, London,UK, 2006.
- Irkal, M.A.R., Nallayarasu, S. ve Bhattacharyya, S.K., CFD approach to roll damping of ship with bilge keel with experimental validation, Applied Ocean Research, 55 (2016) 1-17. doi:10.1016/j.apor.2015.11.008
- ITTC, Recommended Procedures and Guidelines, Guideline on Best Practices for the Applications of PIV/SPIV in Towing Tanks and Cavitation Tunnels, International Towing Tank Conference, Berlin, 2014.

- ITTC, Recommended Procedures and Guidelines, Practical Guidelines for Ship CFD Applications, International Towing Tank Conference, Berlin, 2014.
- ITTC, Recommended Procedures and Guidelines, Estimation of Roll Damping, International Towing Tank Conference, Berlin, 2021.
- Katayama, T., Matsuoka, M., Adachi, T. ve Ikushima, K., Effects of half breadth to draught ratio of hull under water surface on bilge-keel roll damping component, Ocean Engineering, 188 (2019) 106283. doi:10.1016/j.oceaneng.2019.106283
- Kato, H., On the Frictional Resistance to the Rolling of Ships, Journal of Zosen Kiokai, 1957, 102 (1957) 115-122. doi:10.2534/jjasnaoe1952.1957.102115
- Kato, H., Effects of Bilge Keels on the Rolling of Ships, Journal of Zosen Kiokai, 1965, 117 (1965) 93-101. doi:10.2534/jjasnaoe1952.1965.93
- Kianejad, S.S., Lee, J., Liu, Y. ve Enshaei, H., Numerical Assessment of Roll Motion Characteristics and Damping Coefficient of a Ship, Journal of Marine Science and Engineering, 6, 3 (2018) 101. doi:10.3390/jmse6030101
- Korpus, R.A. ve Falzarano, J.M., Prediction of Viscous Ship Roll Damping by Unsteady Navier-Stokes Techniques, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 119, 2 (1997) 108-113. doi:10.1115/1.2829050
- Liu, L., Chen, M., Wang, X., Zhang, Z., Yu, J. ve Feng, D., CFD prediction of full-scale ship parametric roll in head wave, Ocean Engineering, 233 (2021) 109180. doi:10.1016/j.oceaneng.2021.109180
- McLeod, W.C. ve Hsieh, T., Experimental investigation of Ursell 's theory on wavemaking by a rolling cylinder, Schiffstechnik, 10, 50 (1963) 7-22.
- Odabaşı, A.Y. ve Vince, J., Roll response of a ship under the action of a sudden excitation, International Shipbuilding Progress, 29, 340 (1982) 327-333. doi:10.3233/ISP-1982-2934002
- Ommani, B., Kristiansen, T. ve Faltinsen, O.M., Simplified CFD modeling for bilge keel force and hull pressure distribution on a rotating cylinder, Applied Ocean Research, 58 (2016) 253-265. doi:10.1016/j.apor.2016.04.010
- Piehl, H. ve el Moctar, O., Bilge Keel Forces and Vortex Shedding: A Numerical Analysis With OpenFOAM, American Society of Mechanical Engineers, 2 (2014). doi:10.1115/OMAE2014-24079
- Raffel, M., Willert, C.E., Wereley, S.T. ve Kompenhans, J., Particle Image Velocimetry, Springer, Berlin, 2007. doi:10.1007/978-3-540-72308-0
- Sadat-Hosseini, H., Kim, D.-H., Carrica, P.M., Rhee, S.H. ve Stern, F., URANS simulations for a flooded ship in calm water and regular beam waves, Ocean Engineering, 120 (2016) 318-330. doi:10.1016/j.oceaneng.2016.02.019

- Scarano, F., Tomographic PIV: principles and practice, Measurement Science and Technology, 24 ,1 (2013) 012001. doi:10.1088/0957-0233/24/1/012001
- Schmitke, R.T., Ship sway, roll and yaw motions in Oblique seas, Transactions SNAME, 86 (1978) 26-46.
- Serat, M.E., Effect of Form on Roll, Trans. SNAME, 41 (1933).
- Song, S.-S., Kim, S.-H. ve Paik, K.-J., Determination of Linear and Nonlinear Roll Damping Coefficients of a Ship Section Using CFD, Brodogradnja, 70 ,4 (2019) 17-33. doi:10.21278/brod70402
- Tamiya, S. ve Komura, T., Topics on Ship Rolling Characteristics with Advance Speed, J. Society of Naval Architects of Japan, 132 (1972) 159-168.
- Taylan, M., Application of Nonlinear Roll Motion Model for Assesment of Ship Stability in Waves, Doktora Tezi, Florida Instute of Technology, Florida, 1990.
- Taylan, M., Nonlinear roll motion of ships in beam waves, Bulletin of Technical University Istanbul, 49 (1996) 459-479.
- Taylan, M., The effect of nonlinear damping and restoring in ship rolling, Ocean Engineering, 27 ,9 (2000) 921-932. doi:10.1016/S0029-8018(99)00026-8
- Thielicke, W. ve Sonntag, R., Particle Image Velocimetry for MATLAB: Accuracy and enhanced algorithms in PIVlab, Journal of Open Research Software, 9 ,1 (2021) 12. doi:10.5334/jors.334
- Thielicke, W. ve Stamhuis, E.J., PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB, Journal of Open Research Software, 2 (2014). doi:10.5334/jors.bl
- URL-2, http://www.marine.osakafu-u.ac.jp/~lab07/kata-laboHP/New_program_of_roll_damping/Roll%20Damping%20Program.html , Ikeda's roll damping estimation fortran codes. 10 Ocak 2023.
- URL-1, <https://ittc.info/members/member-organisations/osaka-metropolitan-university/> , Osaka Metropolitan University Towing Tank. 9 Şubat 2023.
- Ursell, F., On The Rolling Motion Of Cylinders In The Surface Of A Fluid, The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 2 ,3 (1949) 335-353. doi:10.1093/qjmam/2.3.335
- Veer, R. van't, Schut, X.B. ve Huijsmans, R.H.M., Bilge keel loads and hull pressures created by bilge keels fitted to a rotating cylinder, Applied Ocean Research, 53 (2015) 1-14. doi:10.1016/j.apor.2015.07.001
- Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Measurement Techniques in Fluid Dynamics : an Introduction, Von Karman Institute for Fluid Dynamics Pub, Brussels, 2001.

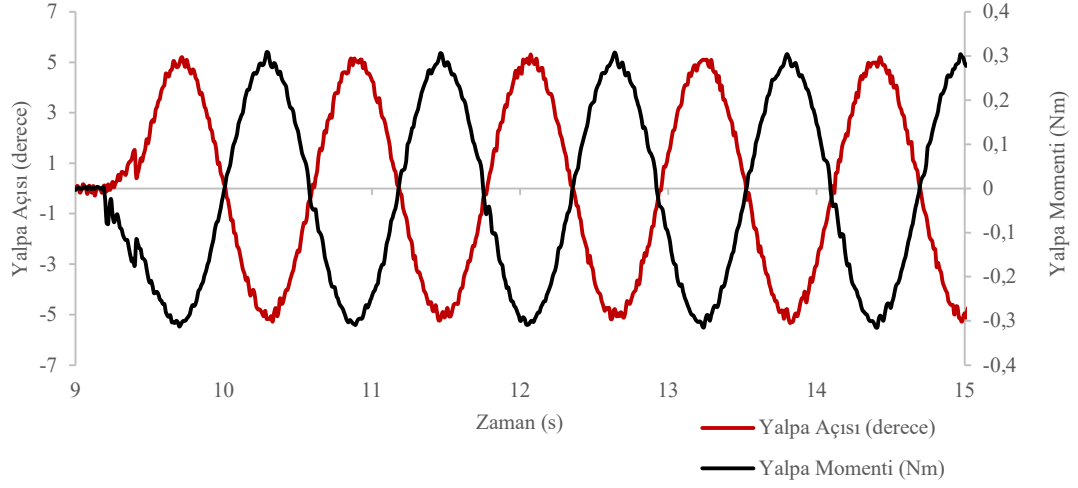
- Vugts, J.H., The hydrodynamic coefficients for swaying, heaving and rolling cylinders in a free surface, International Shipbuilding Progress, 15 ,167 (1968) 251-276. doi:10.3233/ISP-1968-1516702
- Wanderley, J.B. v., Ramiro, A., Reis, T., Fernandes, A.C. ve Levi, C., Numerical Simulation of Roll Damping of a FPSO, Volume 3: Pipeline and Riser Technology; CFD and VIV içinde (ss. 613-622). ASMEDC. doi:10.1115/OMAE2007-29017
- Weickert, M., Teike, G., Schmidt, O. ve Sommerfeld, M., Investigation of the LES WALE turbulence model within the lattice Boltzmann framework, Computers & Mathematics with Applications, 59 ,7 (2010) 2200-2214. doi:10.1016/j.camwa.2009.08.060
- Wellicome, J.F., An Analytical Study of the Mechanism of Capsizing, International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles içinde . Glasgow.
- Wilson, R. v., Carrica, P.M. ve Stern, F., Unsteady RANS method for ship motions with application to roll for a surface combatant, Computers & Fluids, 35 ,5 (2006) 501-524. doi:10.1016/j.compfluid.2004.12.005
- Wright, J.H.G. ve Marshfield, W.B., Ship roll response and capsize behavior in beam seas, Transactions RINA, 122 (1979) 129-148.
- XFlow 16, XFlow User Guide 16, Madrid, Spain: Next Limit, 2015.
- Yeung, R.W. ve Anathakrishnan, P., Oscillation of a floating body in a viscous fluid, Journal of Engineering Mathematics, 26 ,1 (1992) 211-230. doi:10.1007/BF00043236
- Yıldız, B. ve Katayama, T., Bilge keel–free surface interaction and vortex shedding effect on roll damping, Journal of Marine Science and Technology, 22 ,3 (2017) 432-446. doi:10.1007/s00773-016-0423-9
- Yıldız, B., Şener, B., Yurtseven, A. ve Katayama, T., Numerical And Experimental Calculation Of Roll Amplitude Effect On Roll Damping, Brodogradnja, 70 ,2 (2019) 1-15. doi:10.21278/brod70201
- Zhang, X., Gu, X. ve Ma, N., Bilge keel load and hull pressure distribution on a rolling ship section with a high-order fractional step finite volume solver, Ocean Engineering, 199 (2020) 107014. doi:10.1016/j.oceaneng.2020.107014
- Zhang, X., Gu, X. ve Ma, N., Roll characteristics contributed by a bilge keel using a high-order fractional step finite volume solver, Ocean Engineering, 240 (2021) 109935. doi:10.1016/J.OCEANENG.2021.109935

Zhou, Y., Ma, N., Shi, X. ve Zhang, C., Direct calculation method of roll damping based on three-dimensional CFD approach, Journal of Hydrodynamics, 27 ,2 (2015) 176-186. doi:10.1016/S1001-6058(15)60470-X

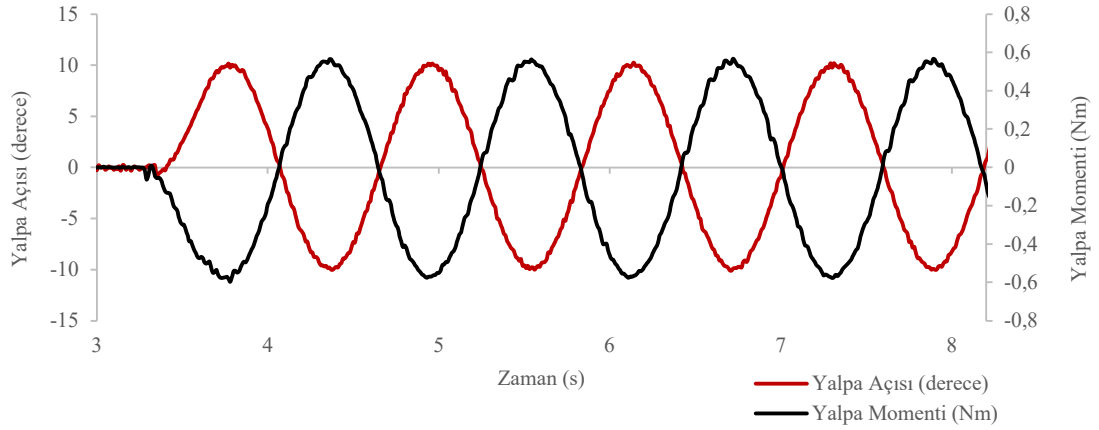


EKLER

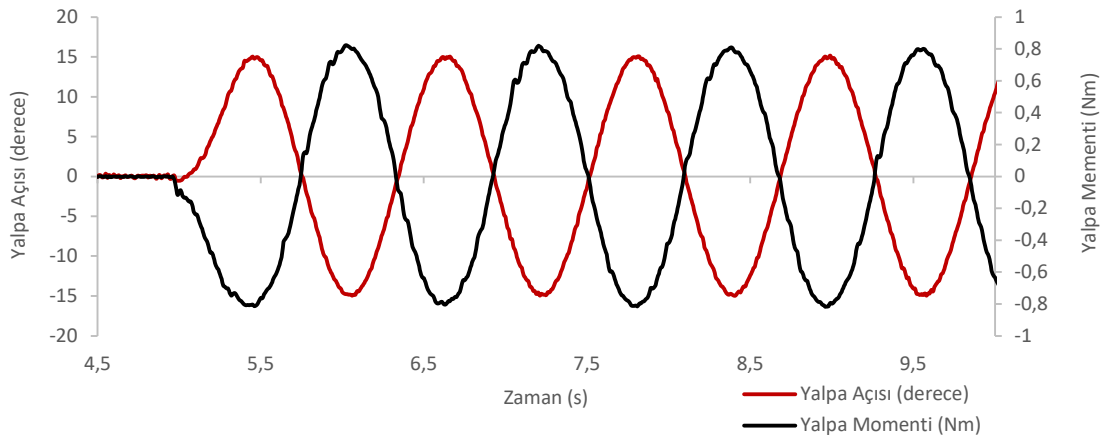
Ek 1. Strengeden ve Potansiyometreden Elde Edilen Yalpa Momenti Zaman Grafikleri



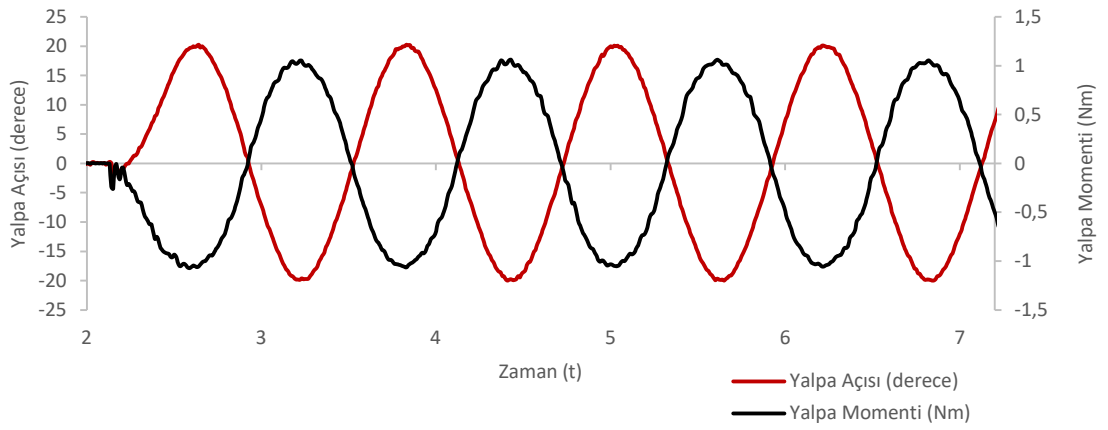
Ek Şekil 1. Yalpa omurgasız, 5 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği



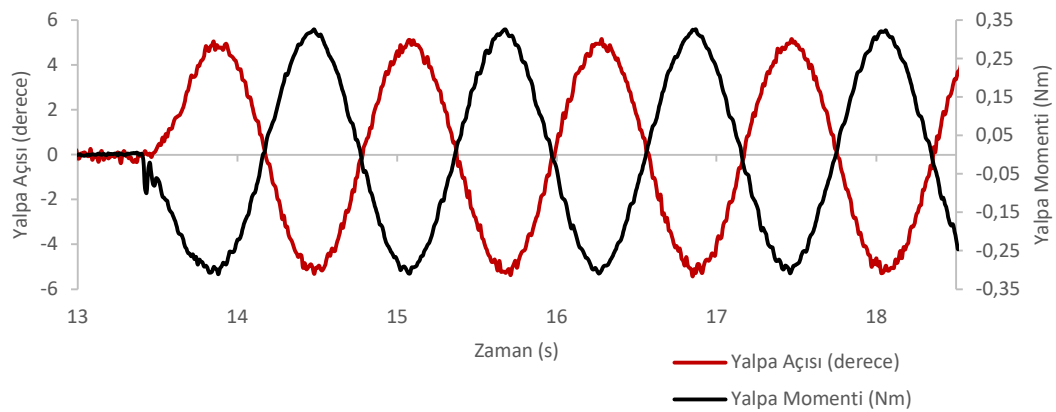
Ek Şekil 2. Yalpa omurgasız, 10 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği



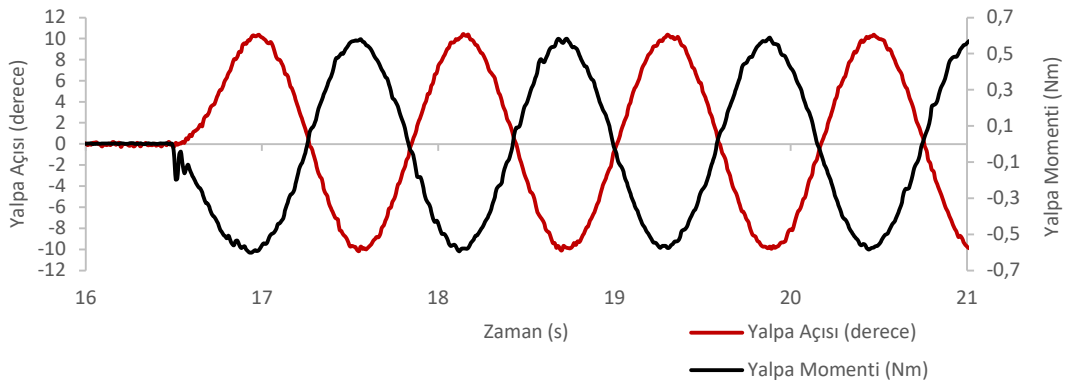
Ek Şekil 3. Yalpa omurgasız, 15 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği



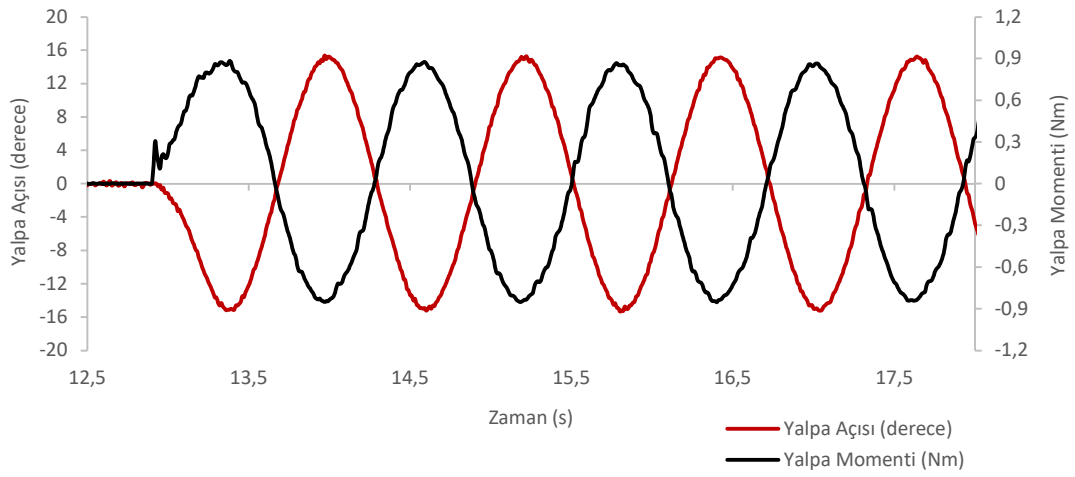
Ek Şekil 4. Yalpa omurgasız, 20 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği



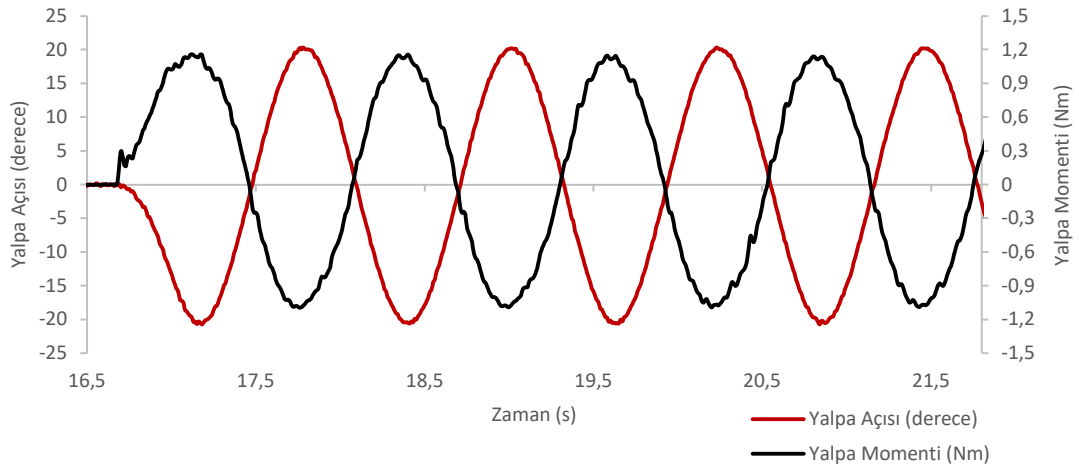
Ek Şekil 5. Levha omurgalı, 5 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği



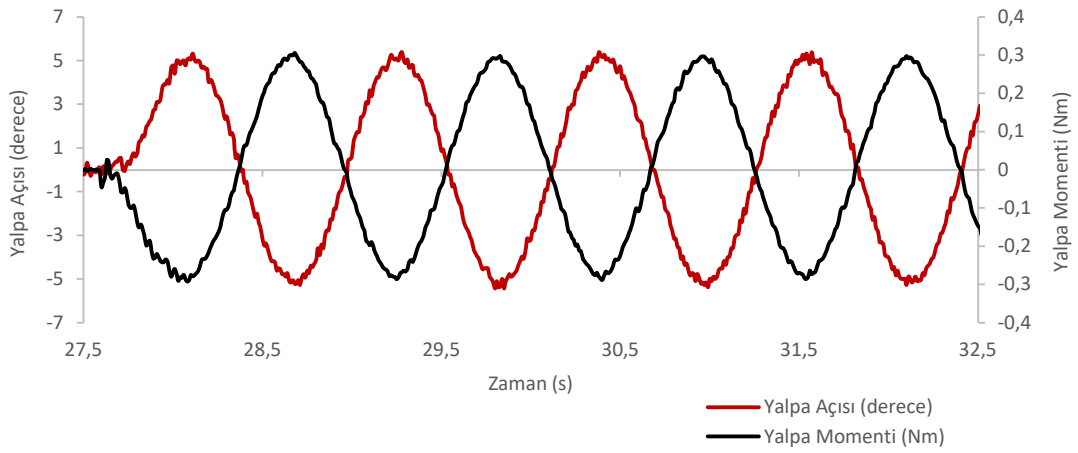
Ek Şekil 6. Levha omurgalı, 10 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği



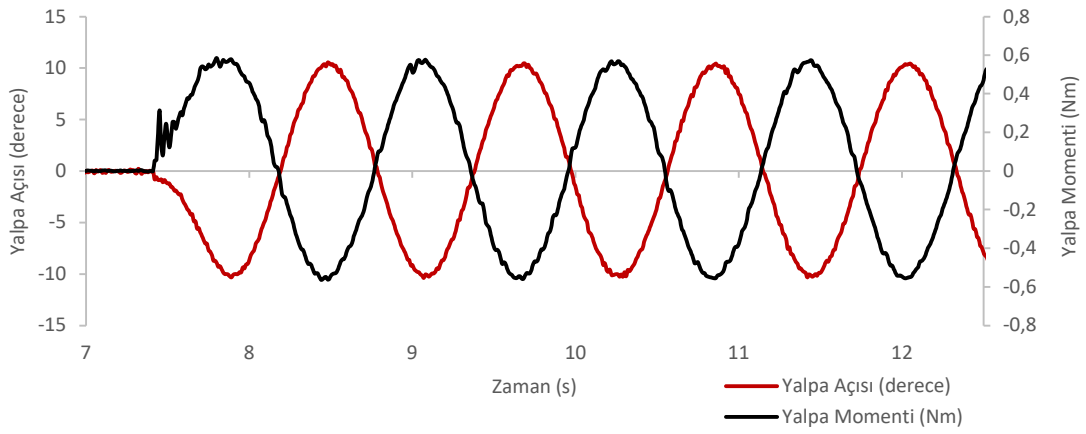
Ek Şekil 7. Levha omurgalı, 15 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği



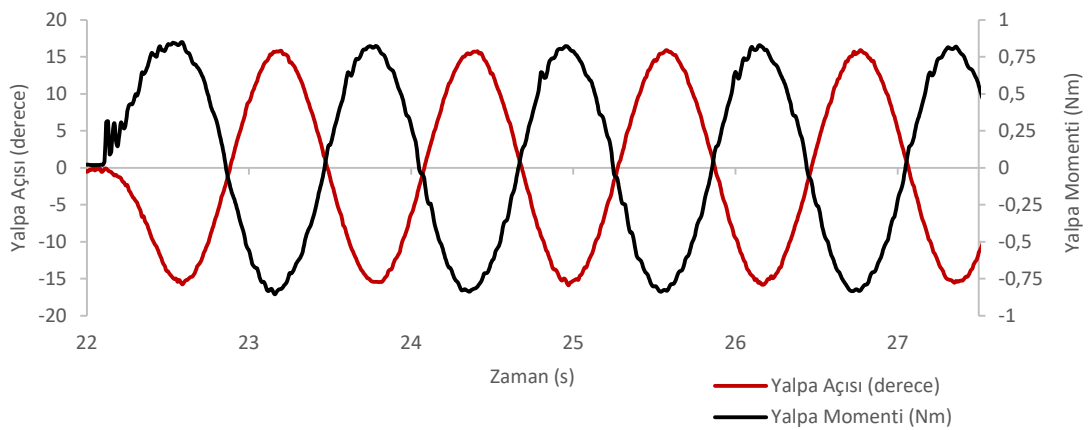
Ek Şekil 8. Levha omurgalı, 20 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği



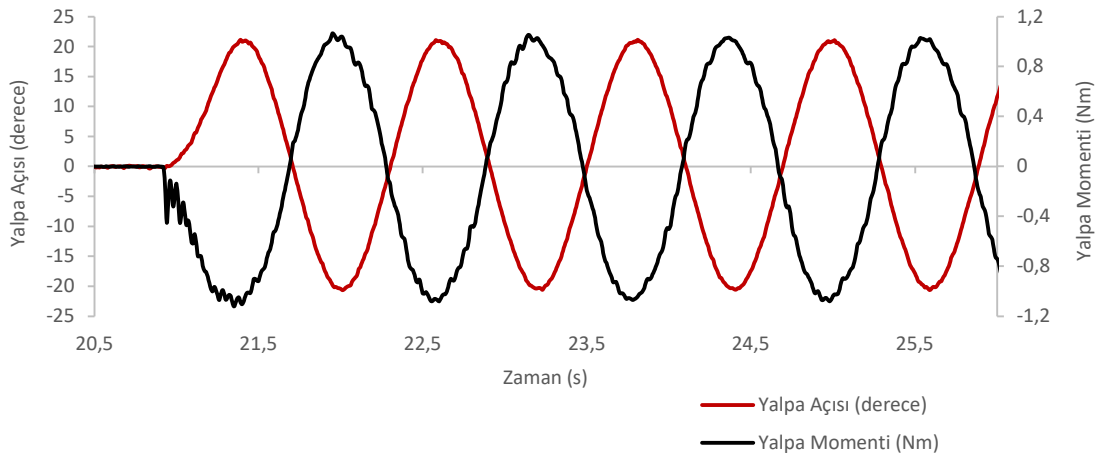
Ek Şekil 9. Kanat kesit yalpa omurgalı, 5 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği



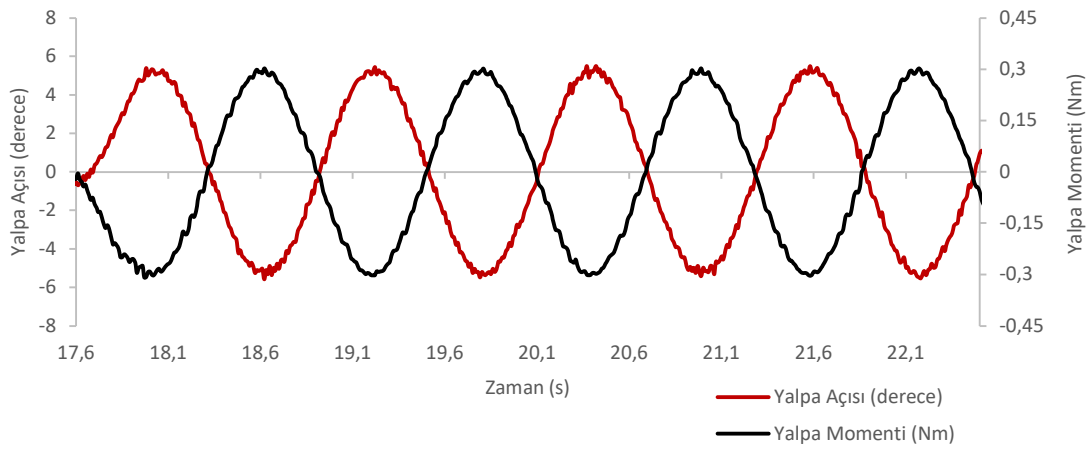
Ek Şekil 10. Kanat kesit yalpa omurgalı, 10 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği



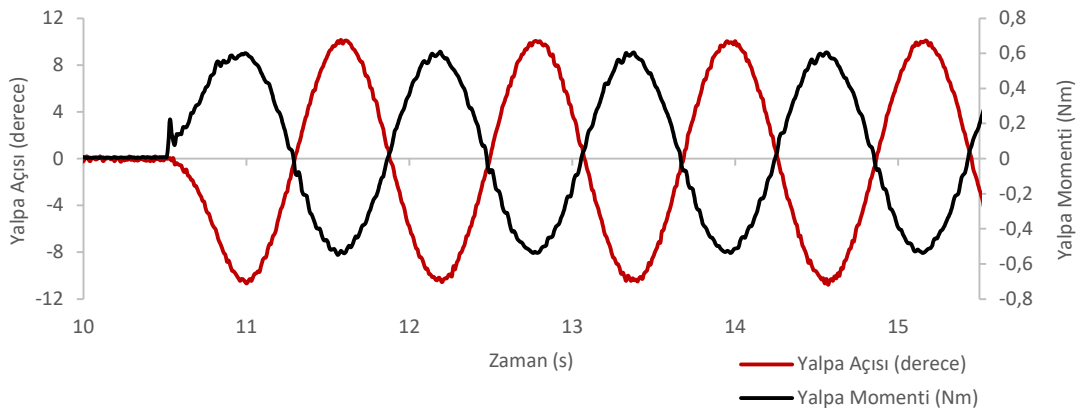
Ek Şekil 11. Kanat kesit yalpa omurgalı, 10 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği



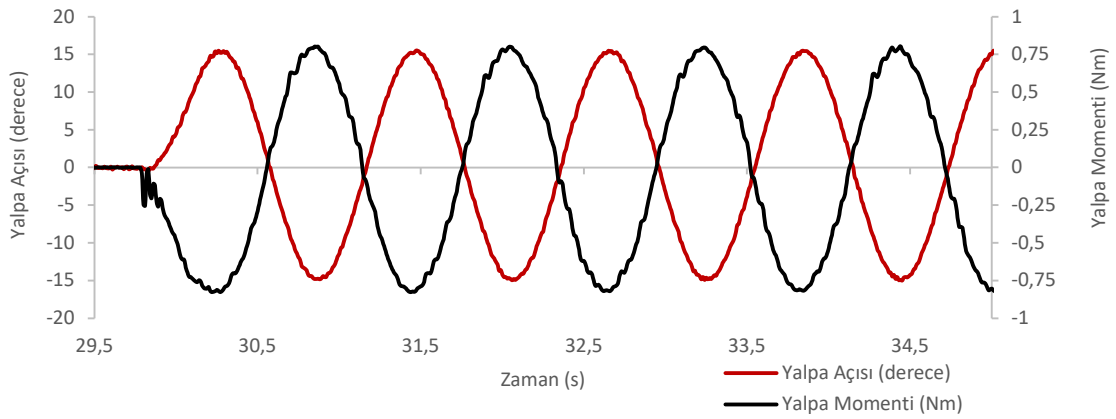
Ek Şekil 12. Kanat kesit yalpa omurgalı, 20 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği



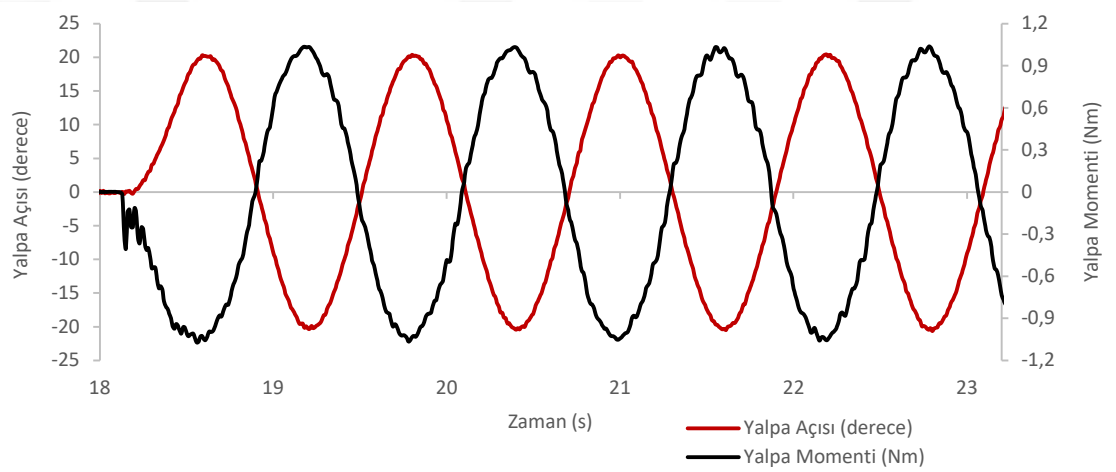
Ek Şekil 13. Oval kesit yalpa omurgalı, 5 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği



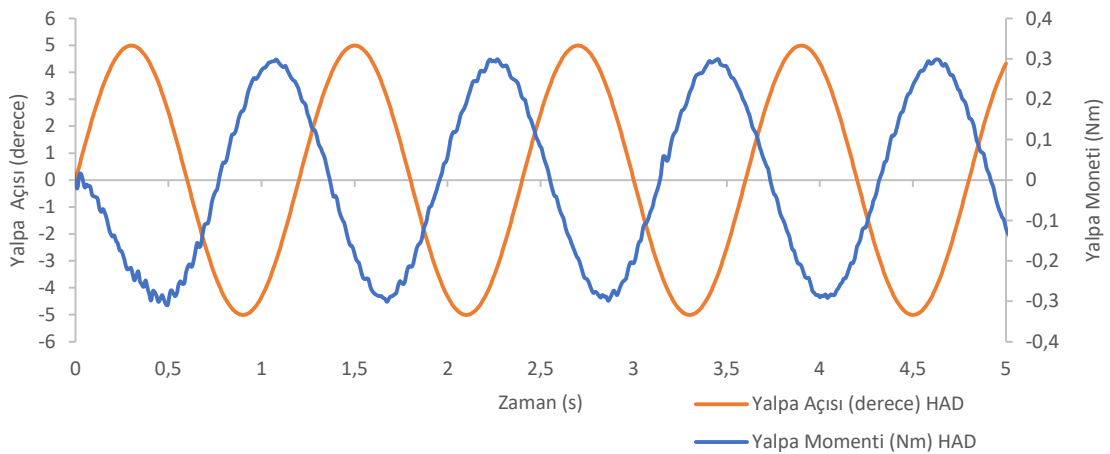
Ek Şekil 14. Oval kesit yalpa omurgalı, 10 derece yalpa genliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği



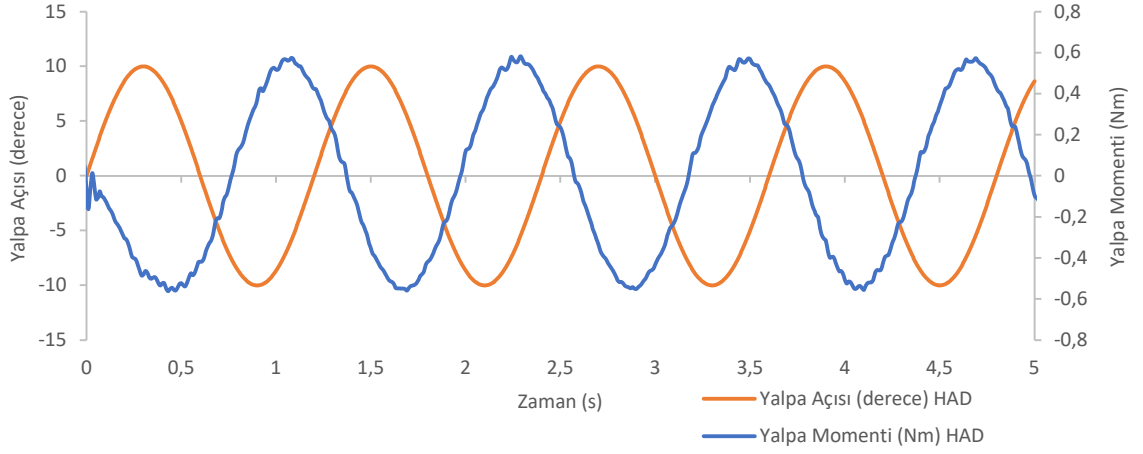
Ek Şekil 15. Oval kesit yalpa omurgalı, 15 derece yalpa genişliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği



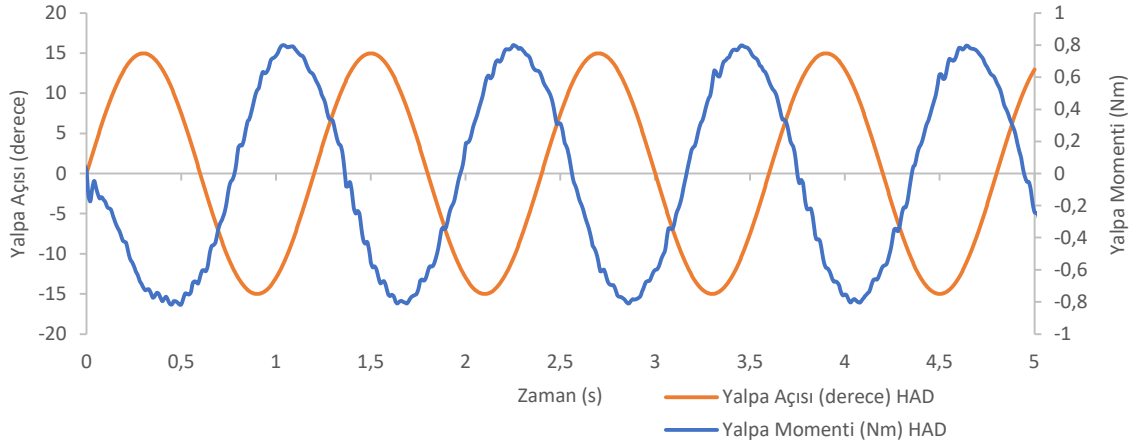
Ek Şekil 16. Oval kesit yalpa omurgalı, 20 derece yalpa genişliği konfigürasyonu için elde edilen yalpa momenti zaman grafiği



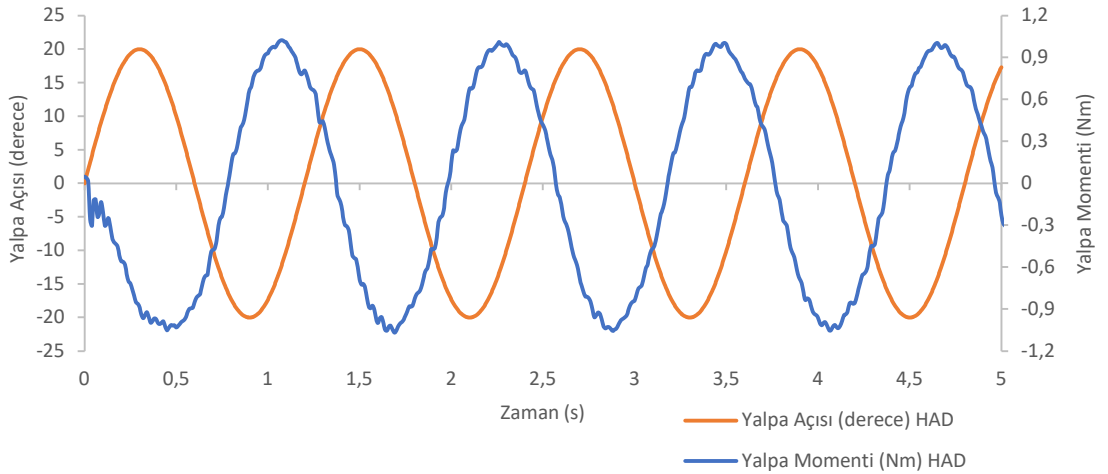
Ek Şekil 17. Üçgen kesit yalpa omurgalı, 5 derece yalpa genişliği konfigürasyonu için HAD analizinden elde edilen yalpa momenti zaman grafiği



Ek Şekil 18. Üçgen kesit yalpa omurgalı, 10 derece yalpa genliği konfigürasyonu için HAD analizinden elde edilen yalpa momenti zaman grafiği

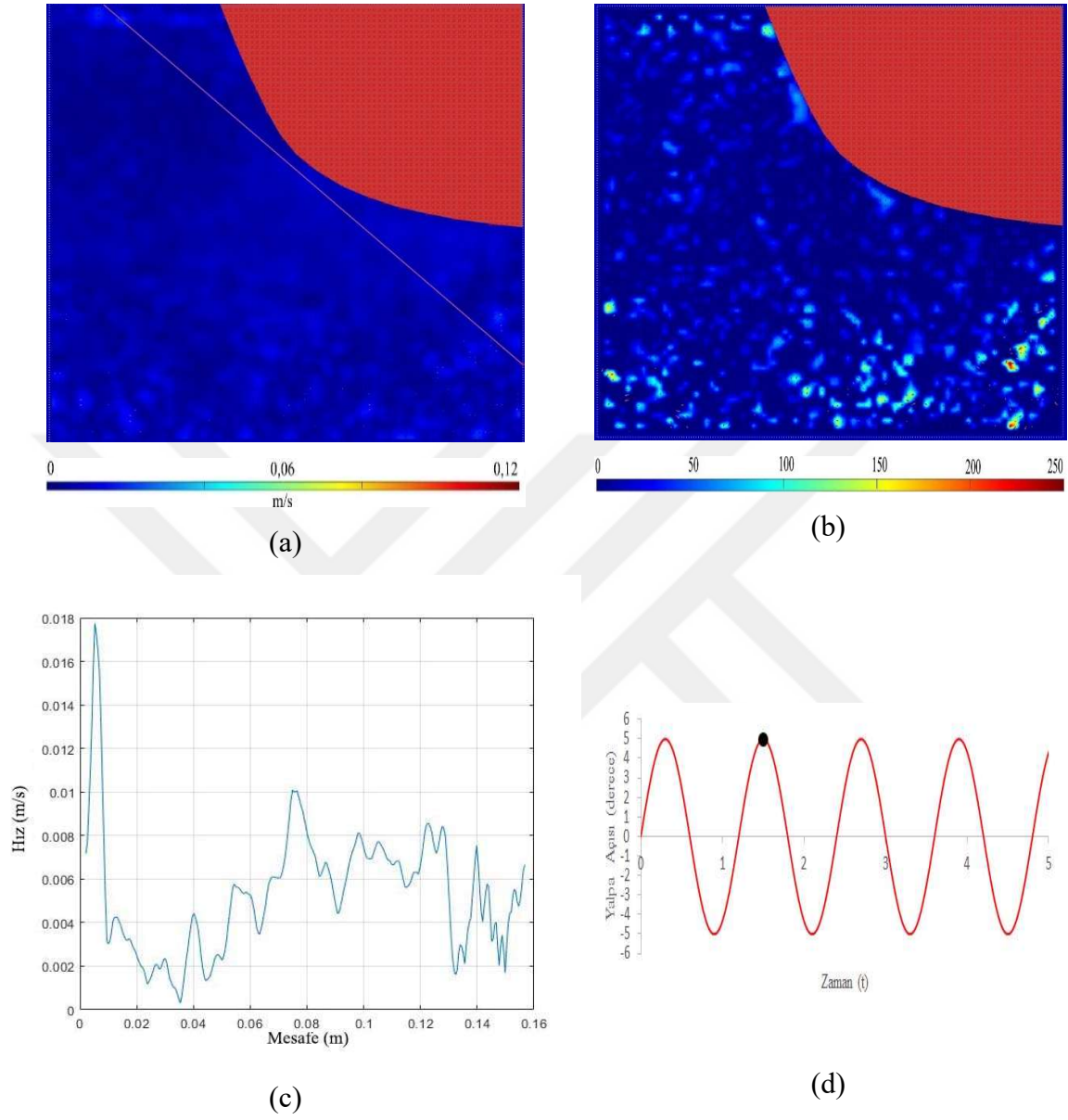


Ek Şekil 19. Üçgen kesit yalpa omurgalı, 15 derece yalpa genliği konfigürasyonu için HAD analizinden elde edilen yalpa momenti zaman grafiği

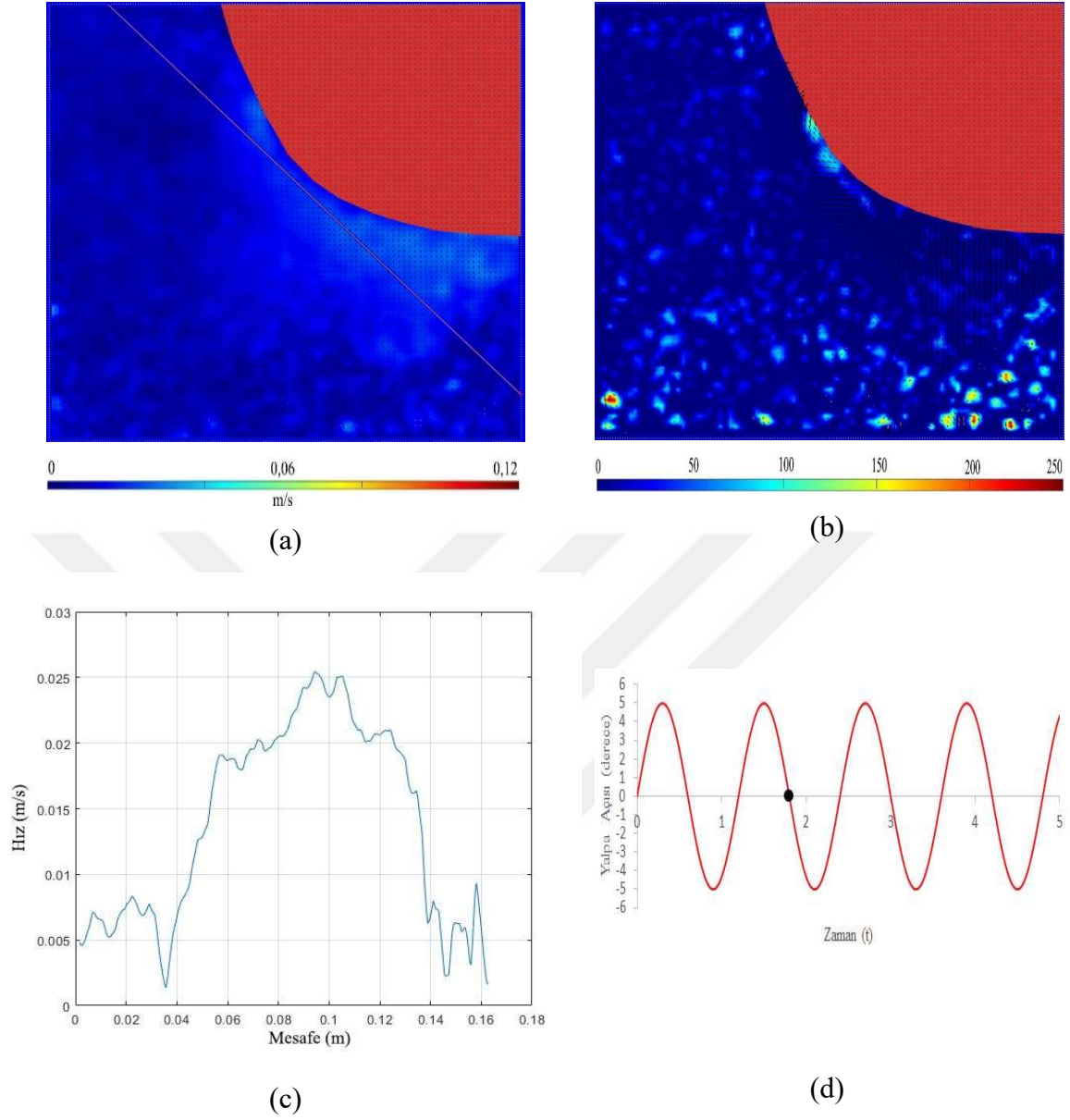


Ek Şekil 20. Üçgen kesit yalpa omurgalı, 20 derece yalpa genliği konfigürasyonu için HAD analizinden elde edilen yalpa momenti zaman grafiği

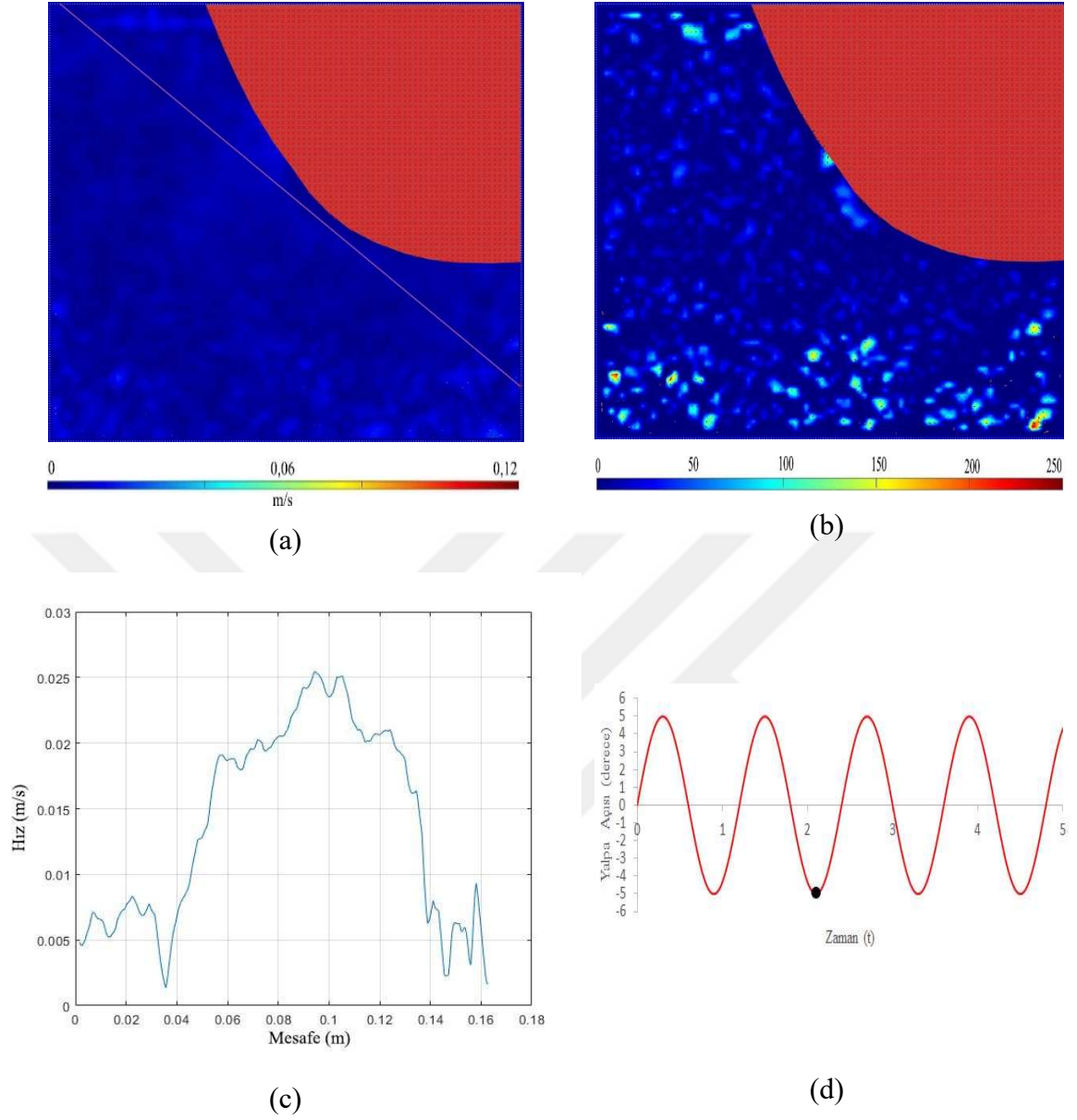
Ek 2. PIV Analiz Verileri



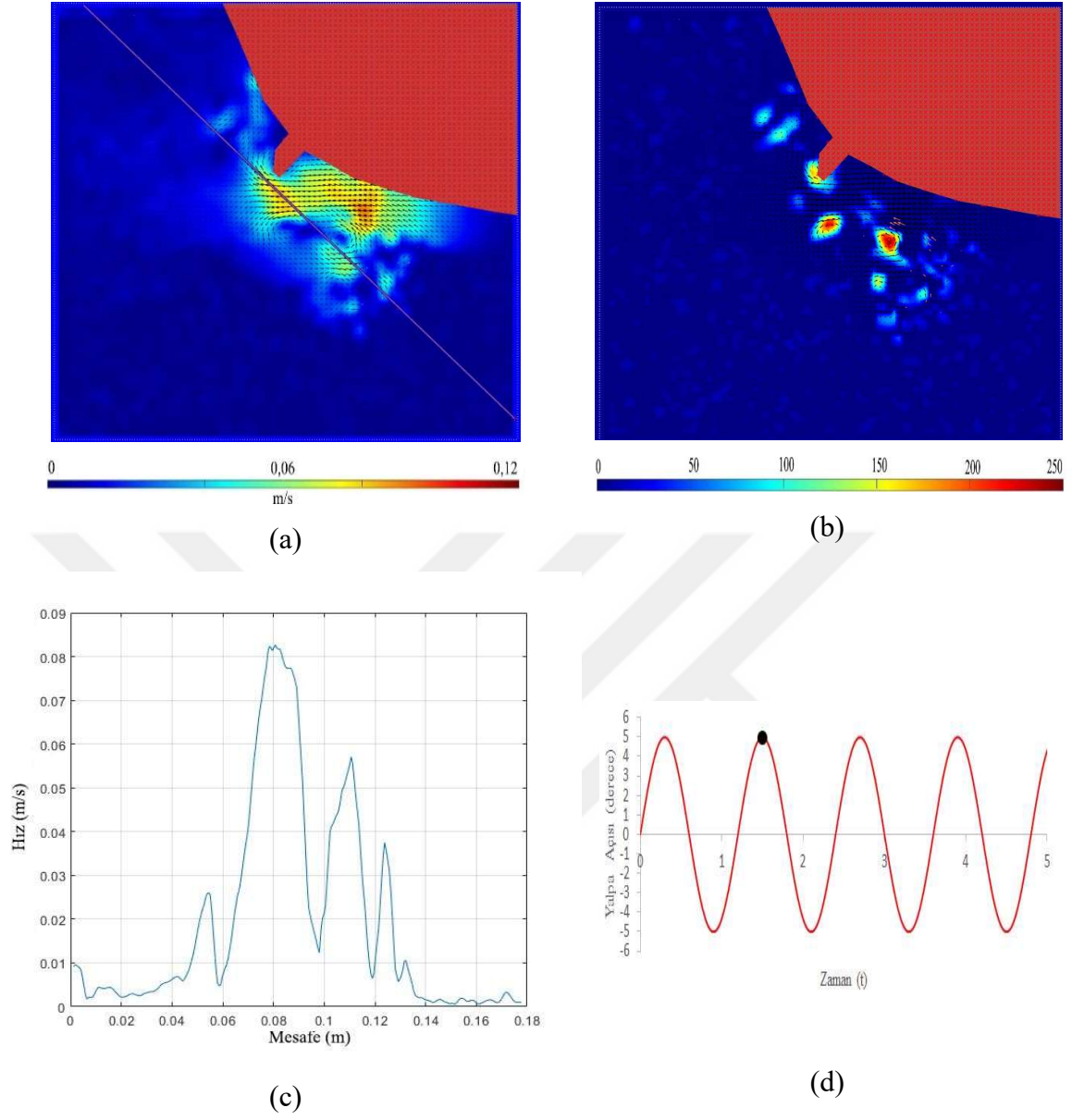
Ek Şekil 21. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, +5 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



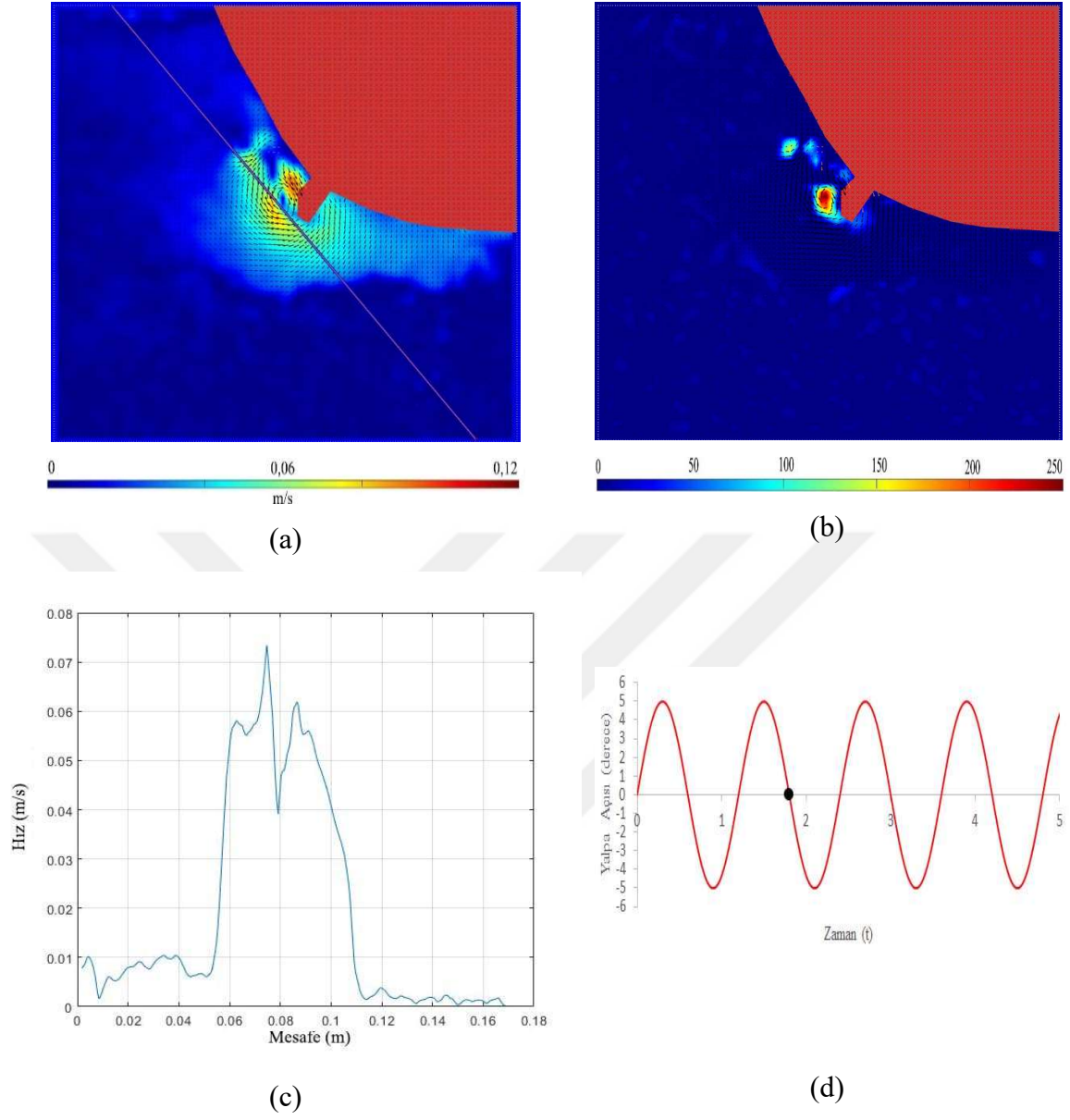
Ek Şekil 22. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



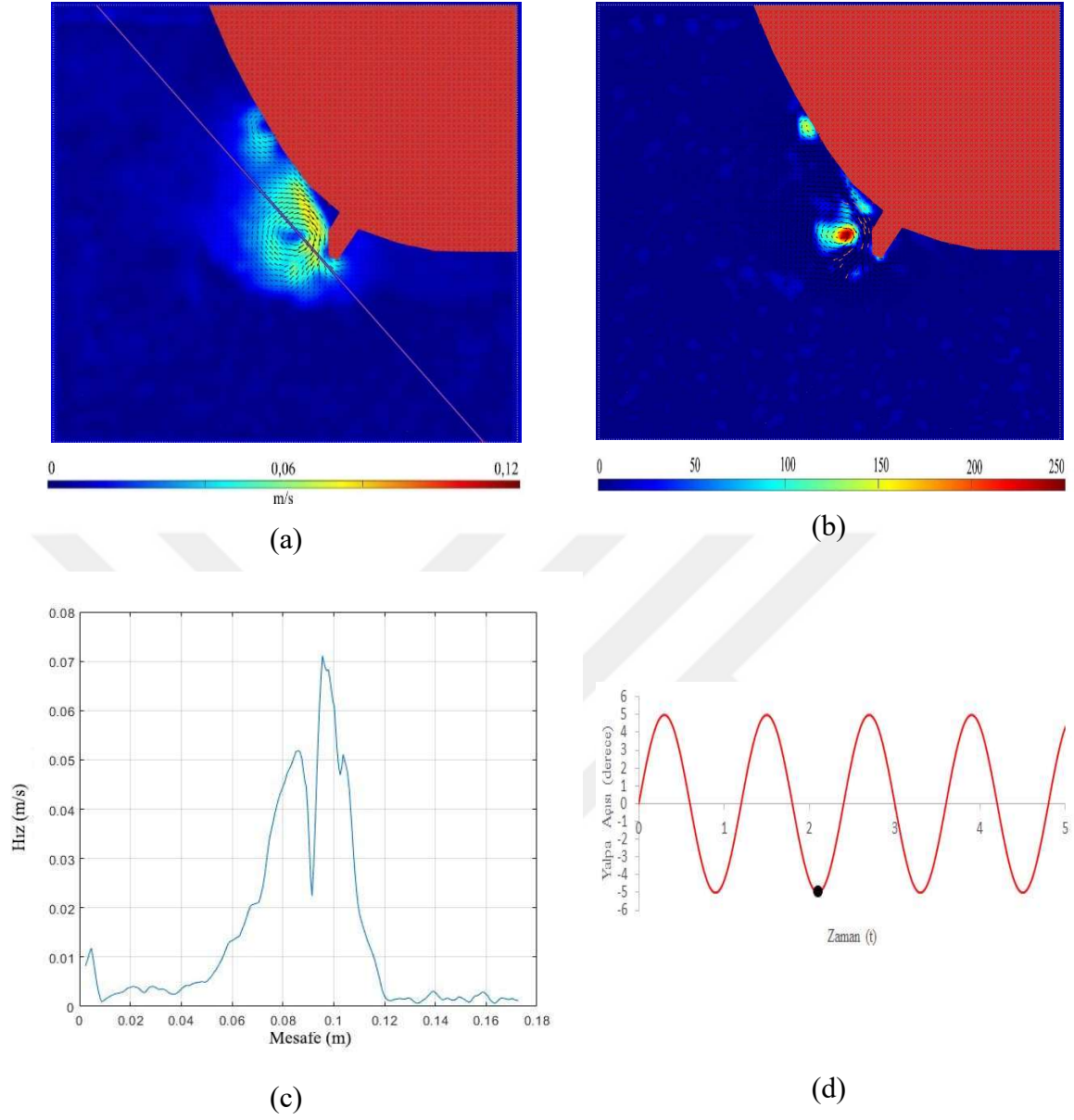
Ek Şekil 23. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, -5 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



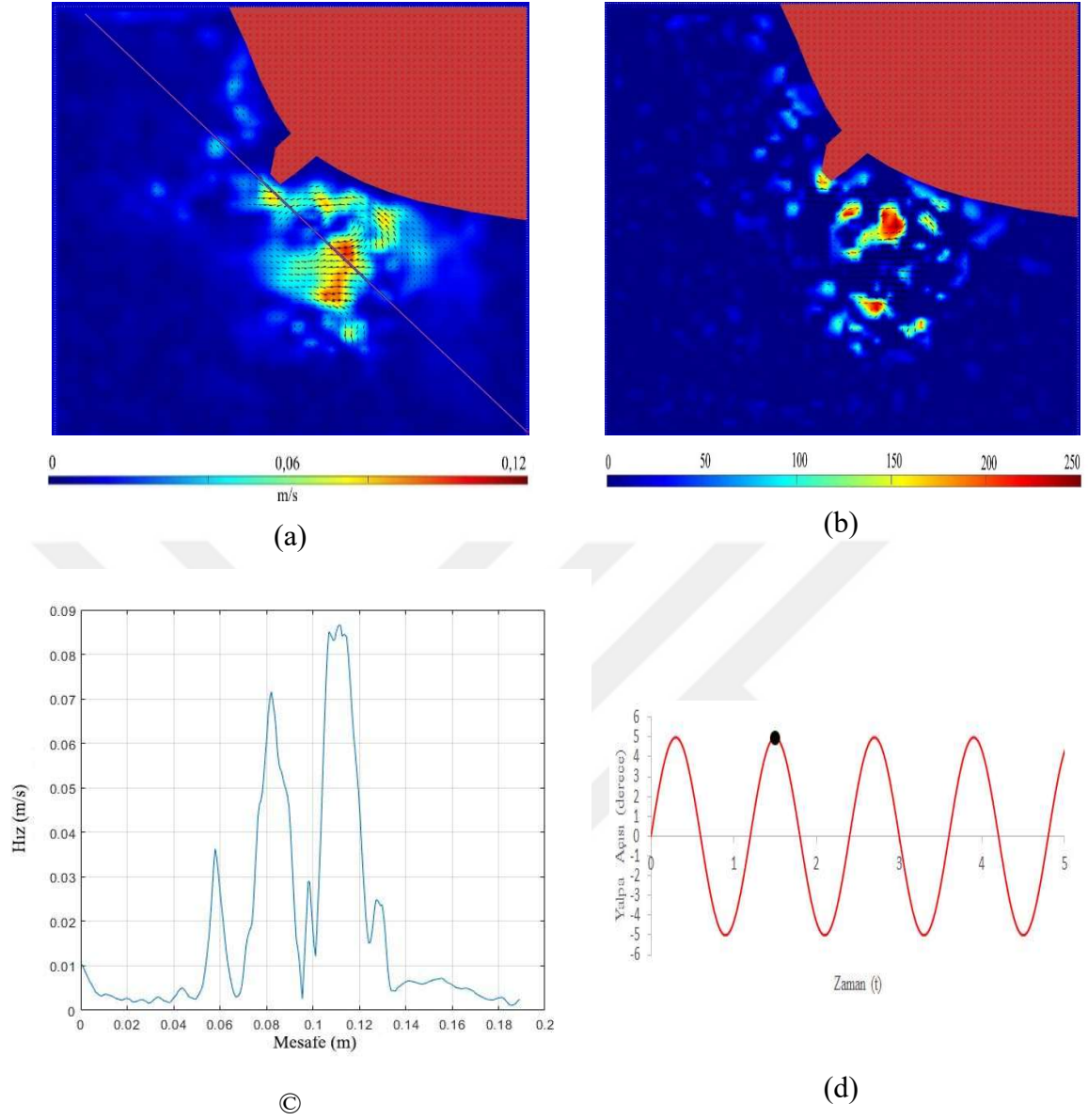
Ek Şekil 24. Levha yalpa omurgalı konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, +5 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



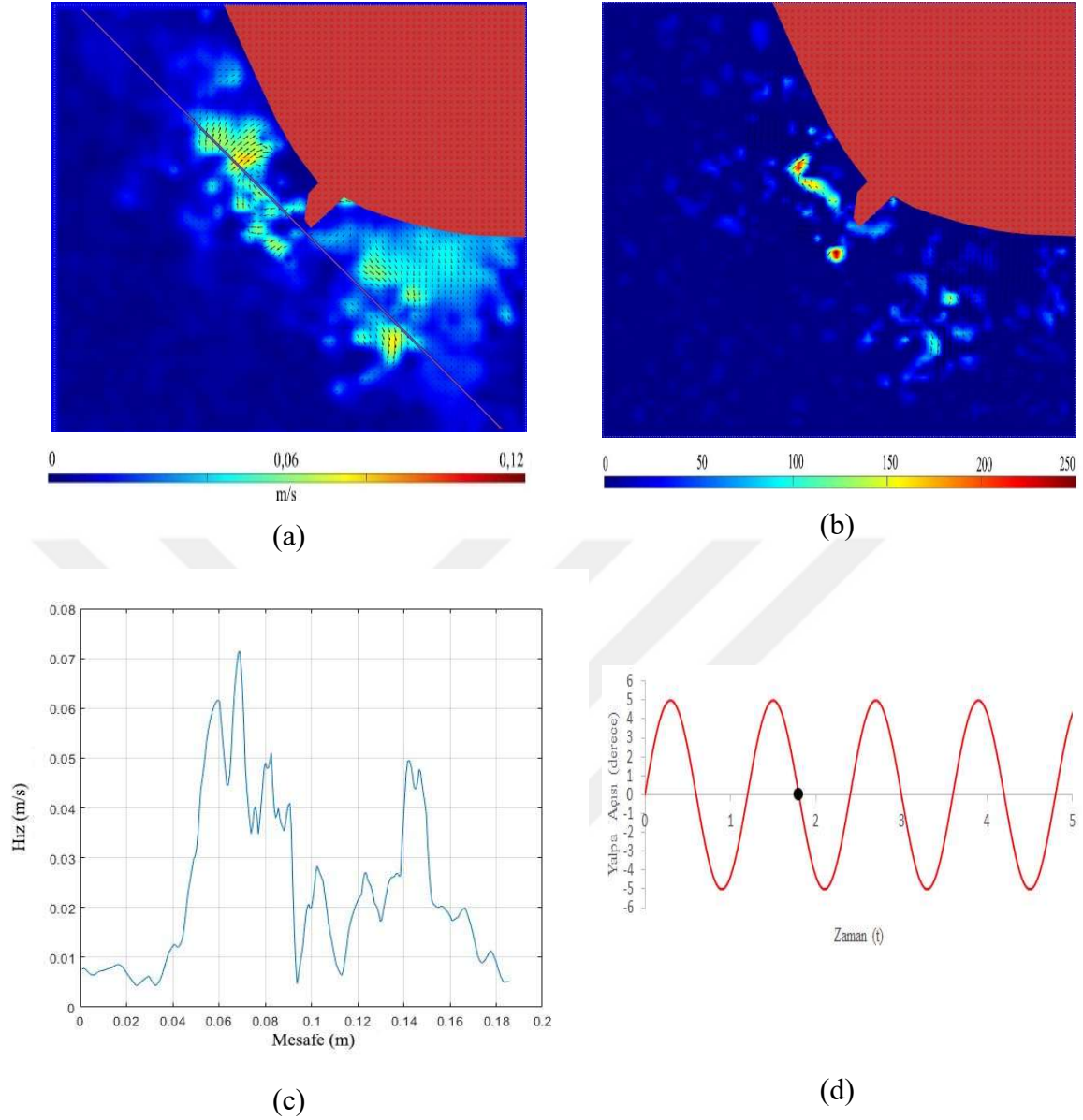
Ek Şekil 25. Levha yalpa omurgalı konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



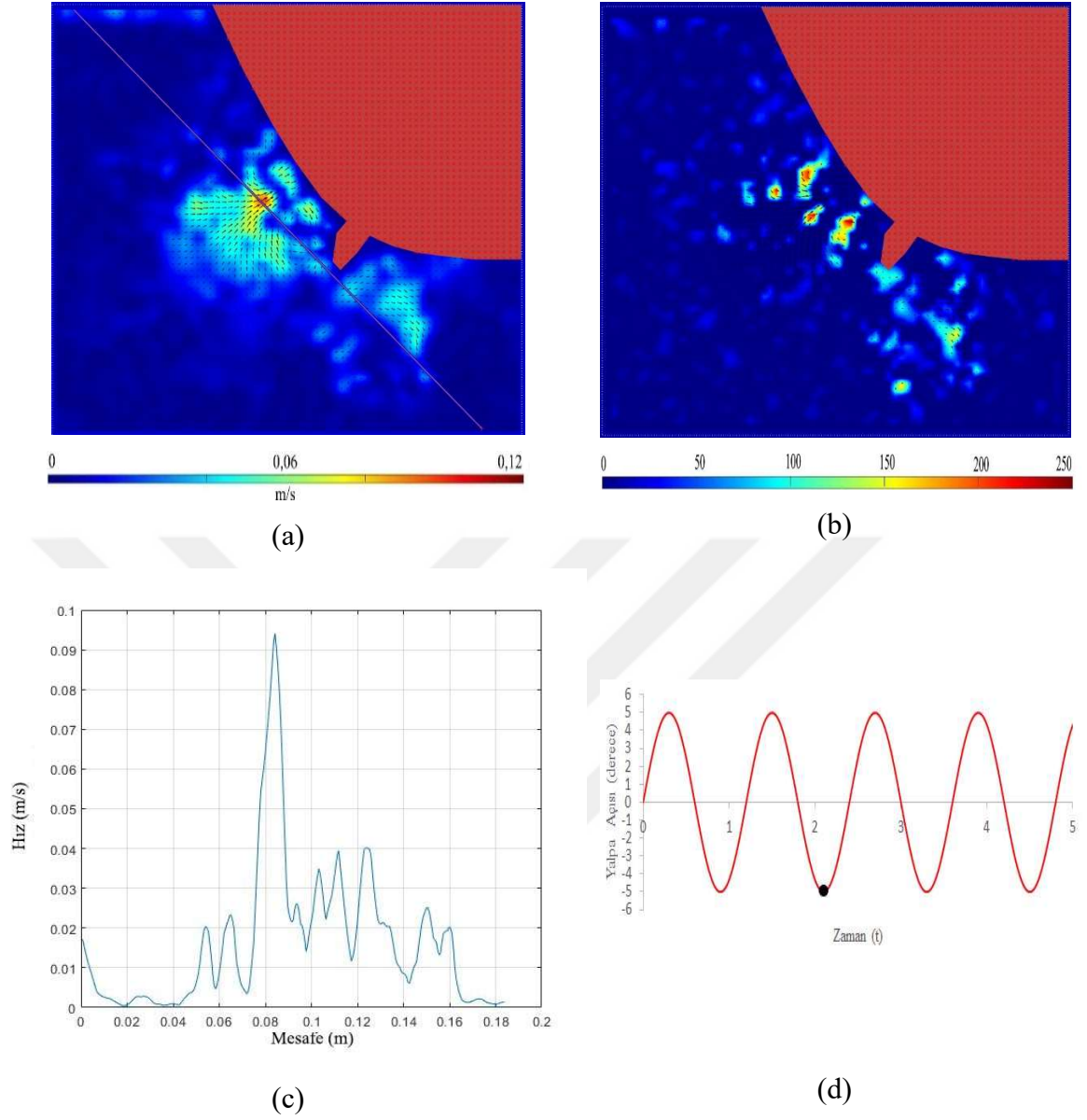
Ek Şekil 26. Levha yalpa omurgalı konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, -5 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



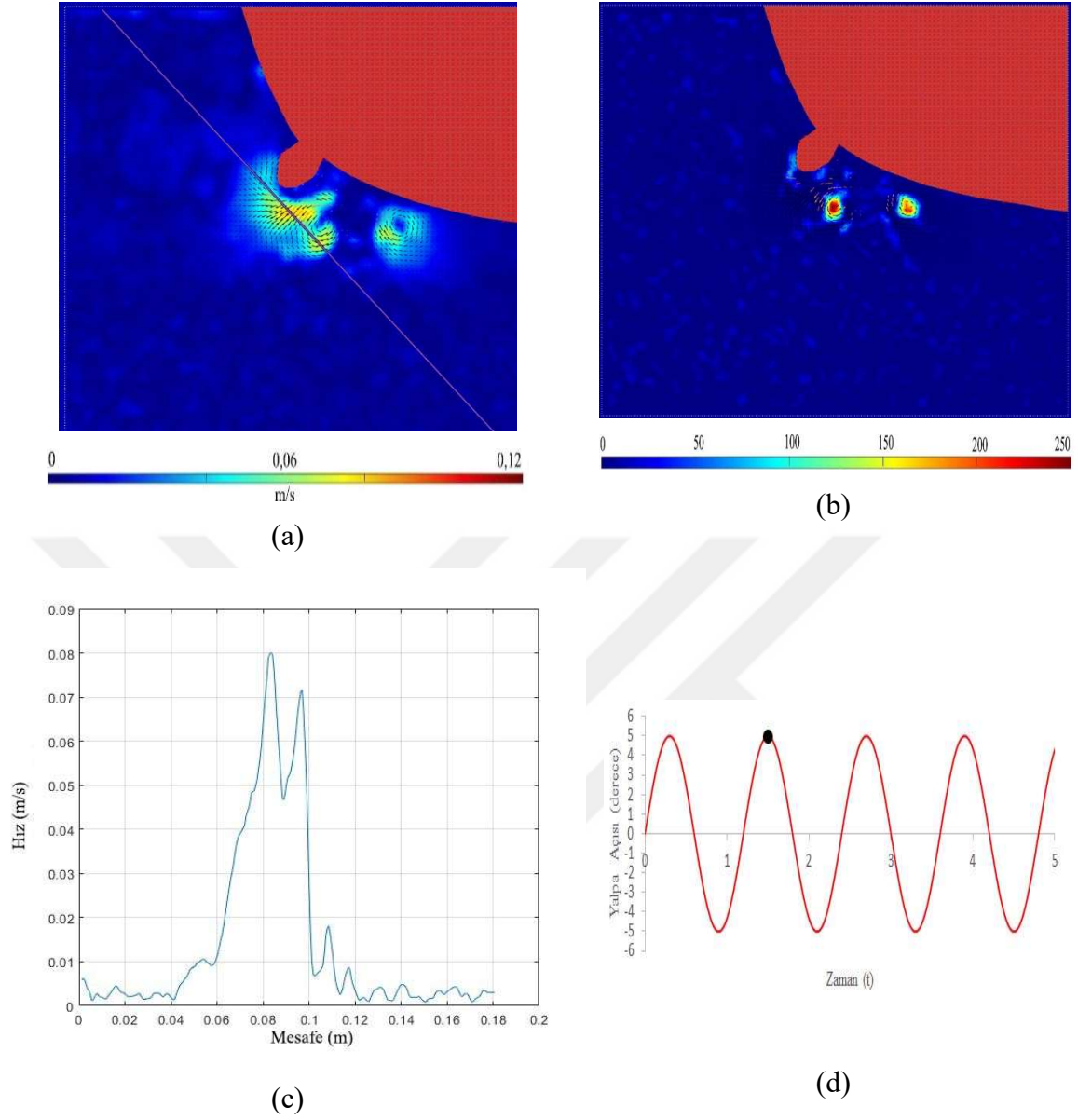
Ek Şekil 27. Kanat kesit omurgalı konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, +5 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



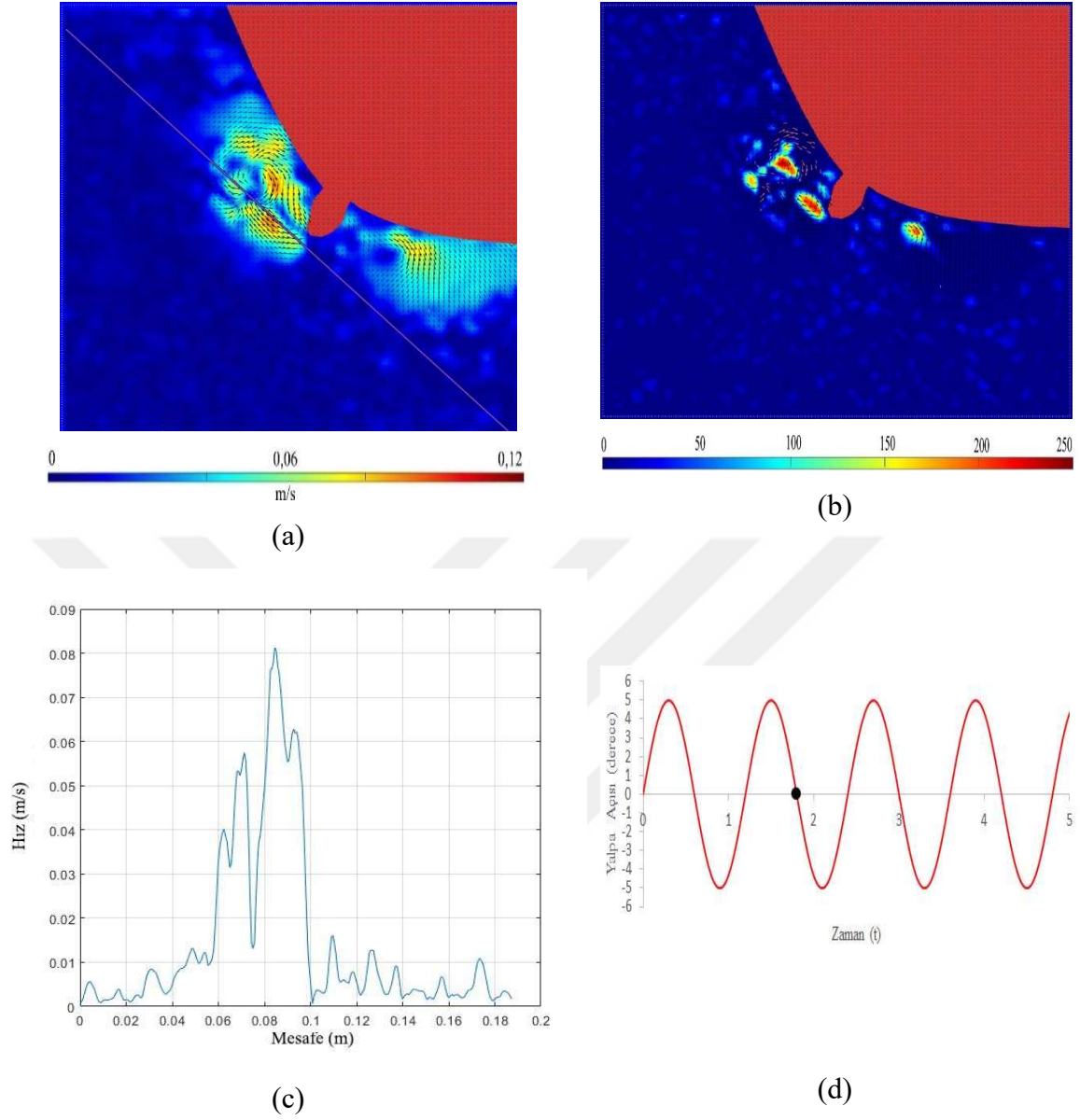
Ek Şekil 28. Kanat kesit yalpa omurgalı konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



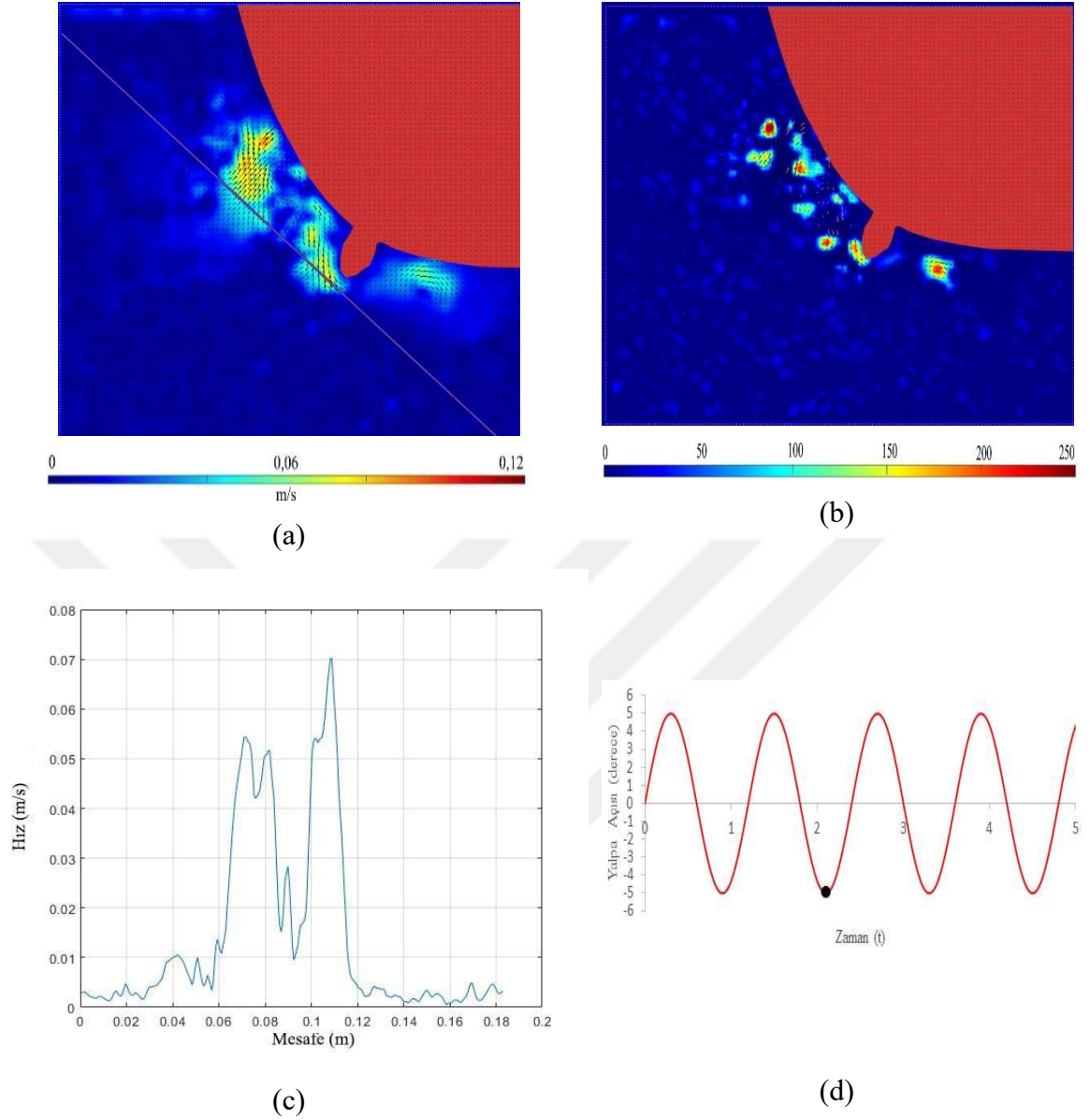
Ek Şekil 29. Kanat kesit omurgalı konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, -5 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



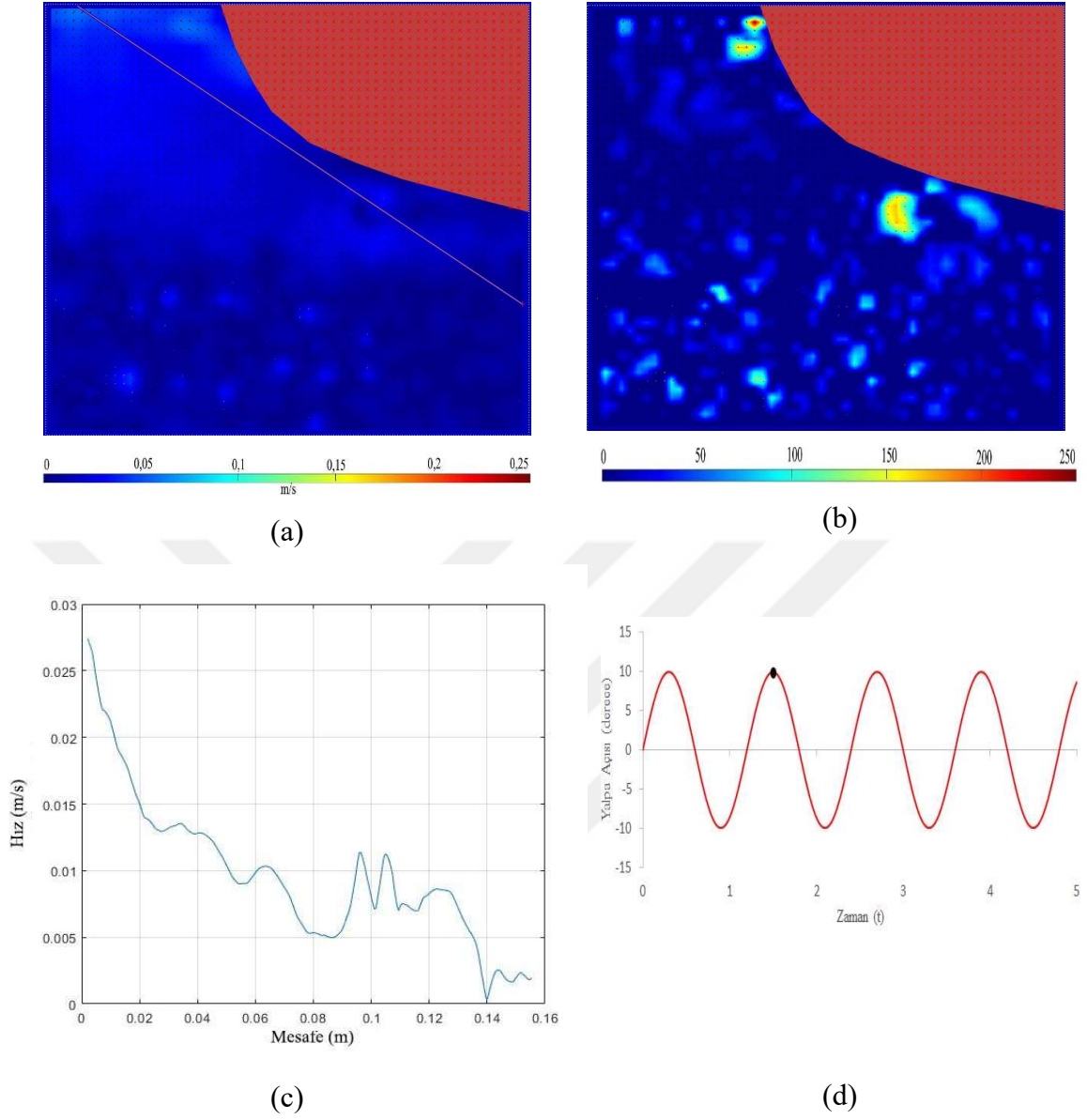
Ek Şekil 30. Oval kesit yalpa omurgalı konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, +5 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



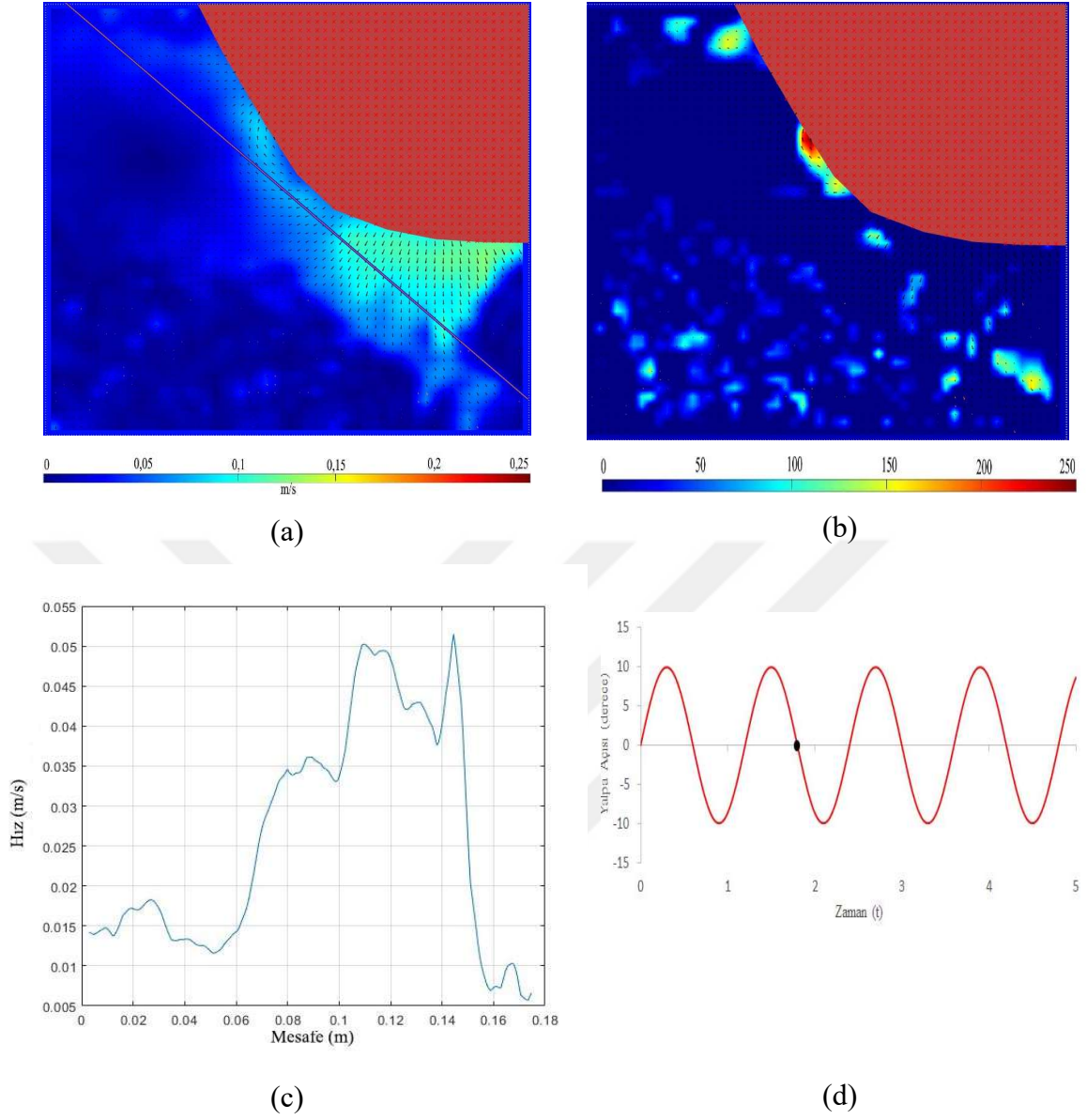
Ek Şekil 31. Oval kesit yalpa omurgalı konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



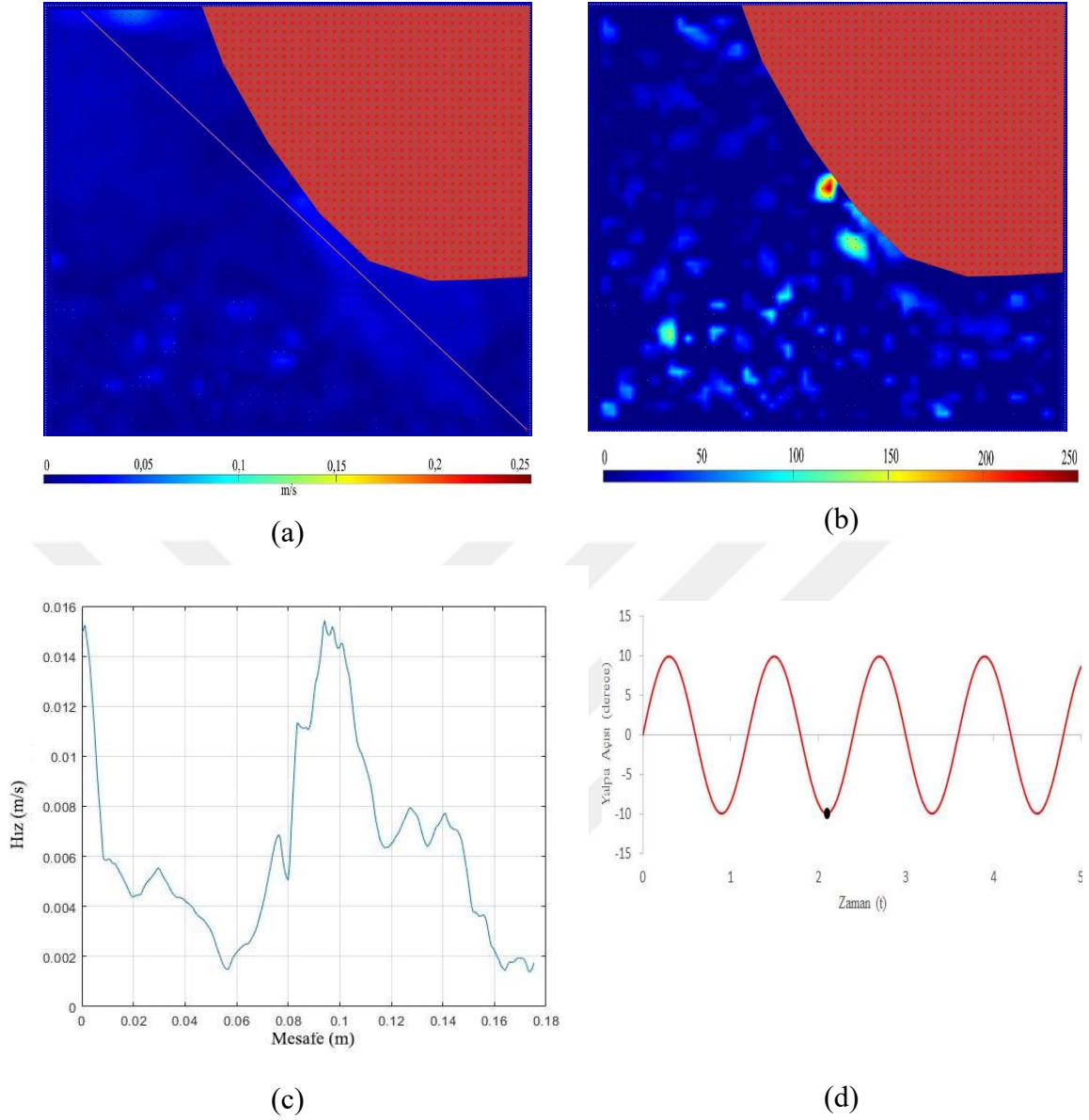
Ek Şekil 32. Oval kesit yalpa omurgalı konfigürasyonun, 5 derece yalpa genliği, -5 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



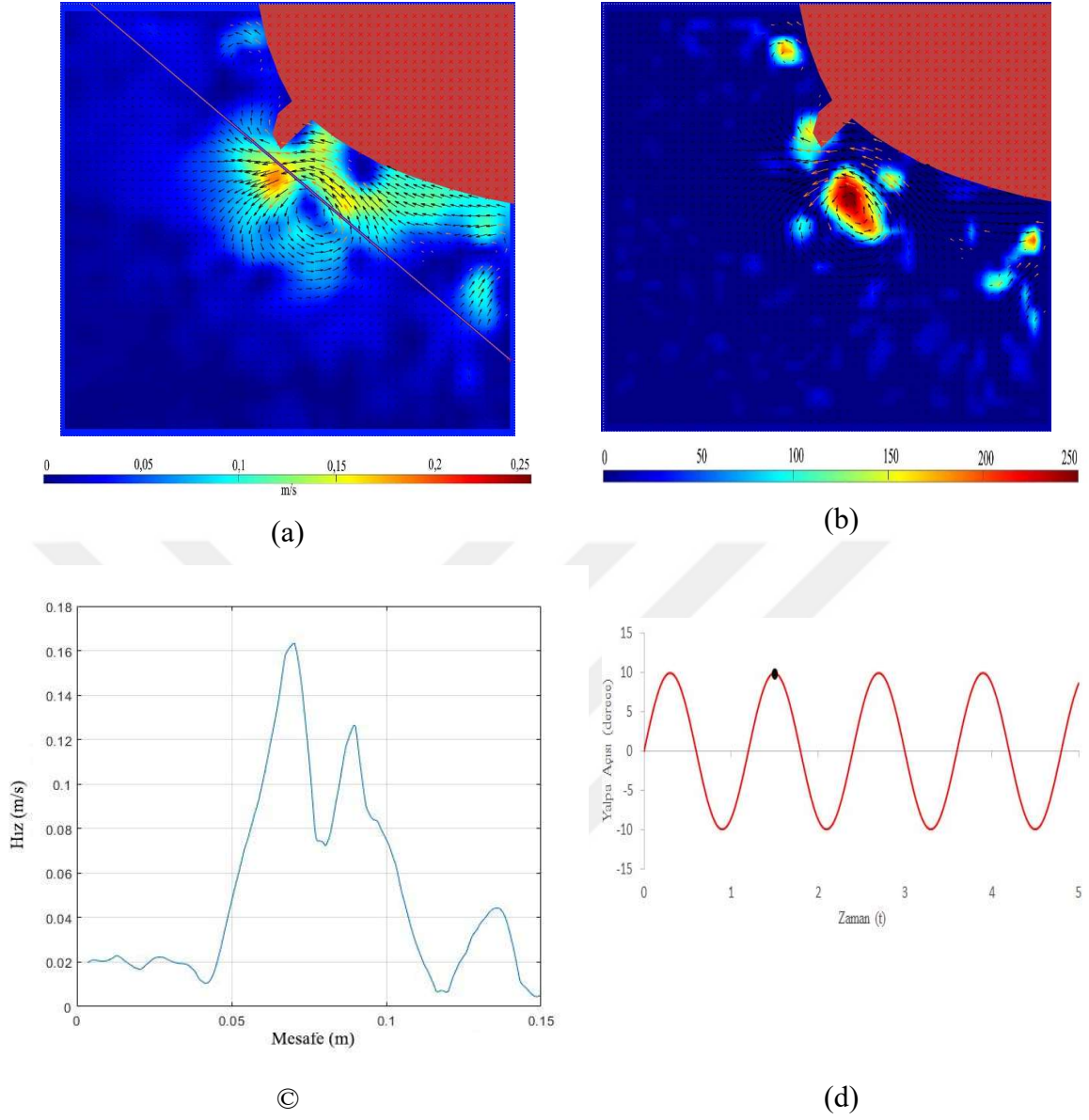
Ek Şekil 33. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, +10 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



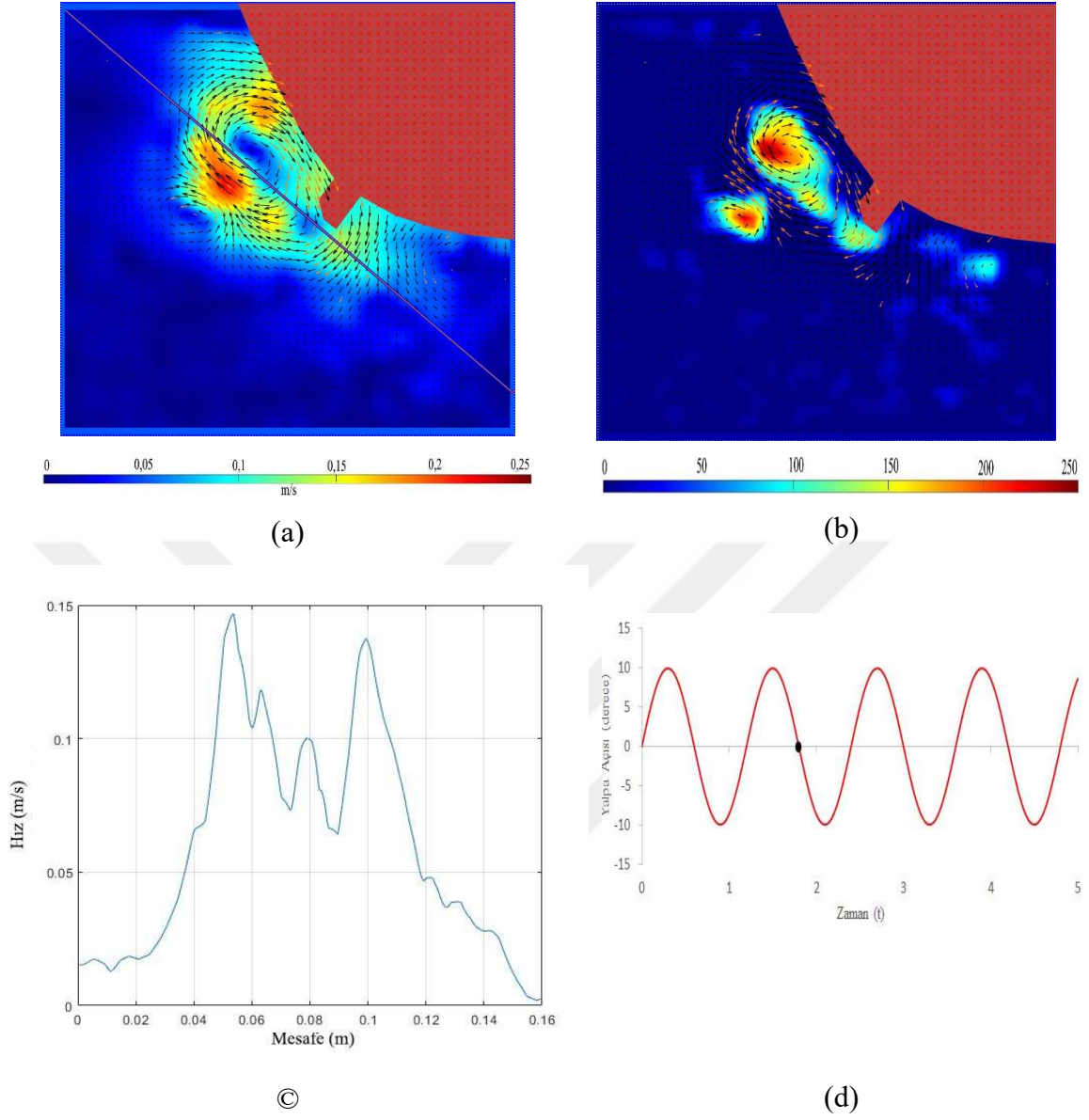
Ek Şekil 34. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



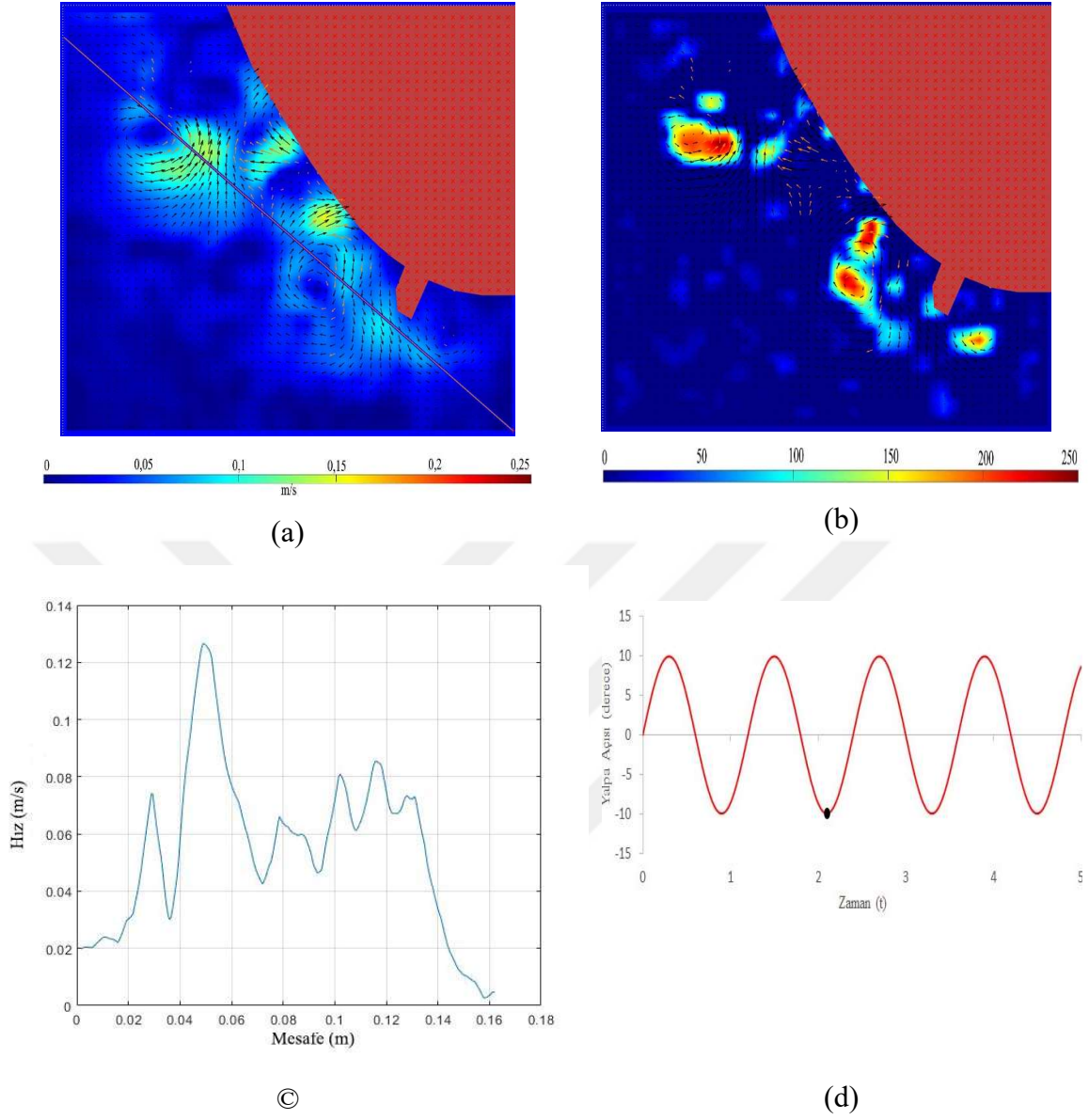
Ek Şekil 35. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, -10 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



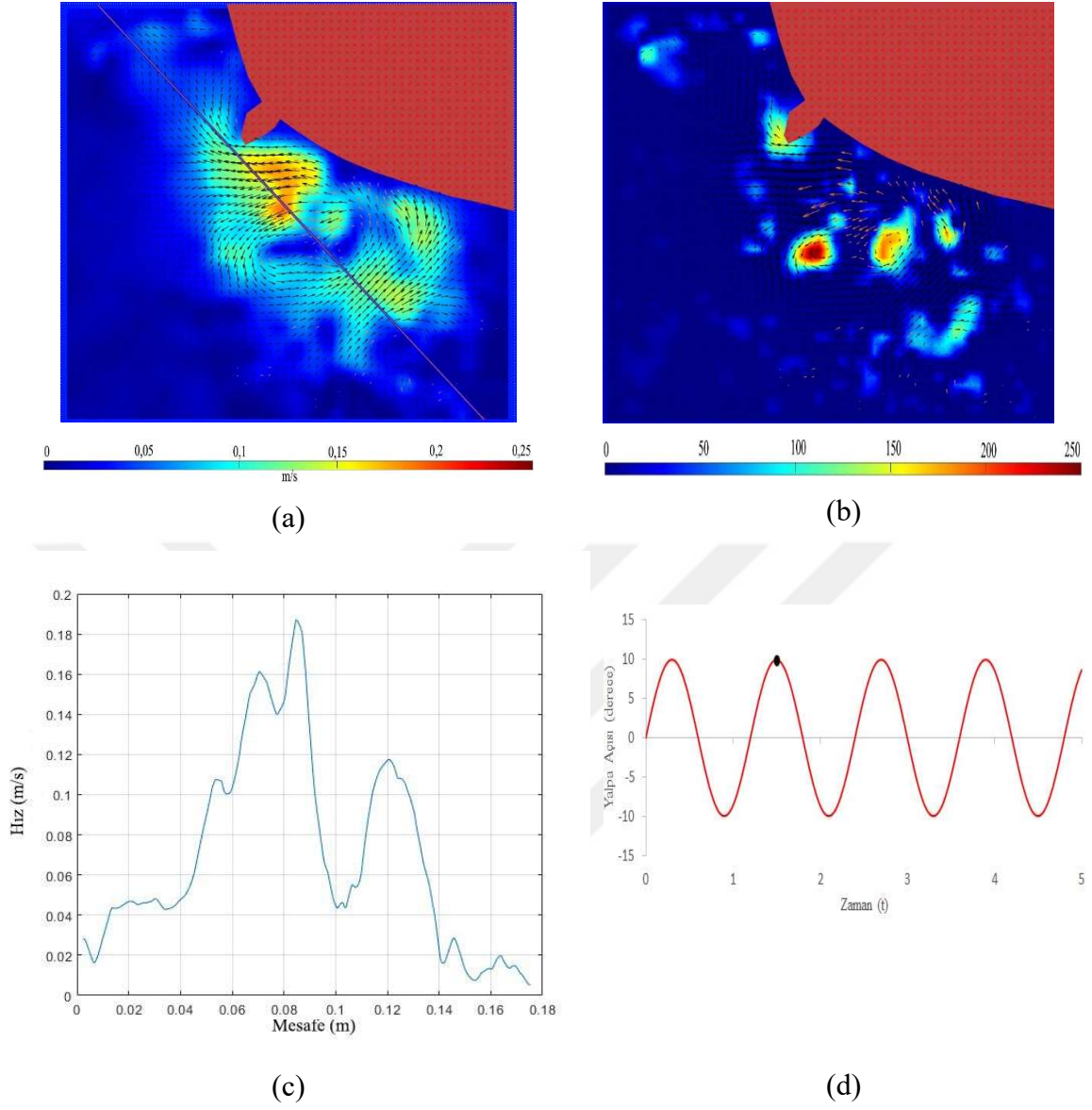
Ek Şekil36. Levha yalpa omurgalı konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, +10 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



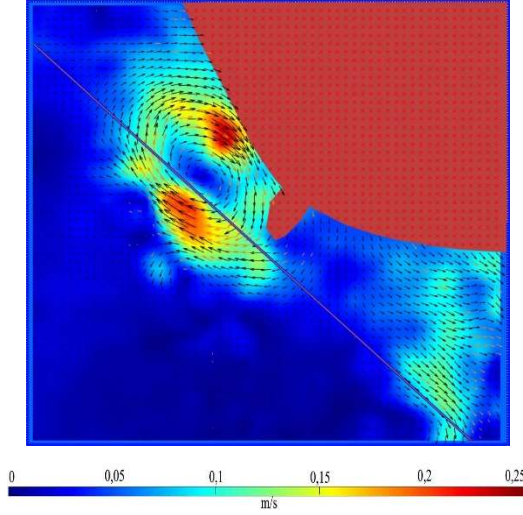
Ek Şekil 37. Levha yalpa omurgalı konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



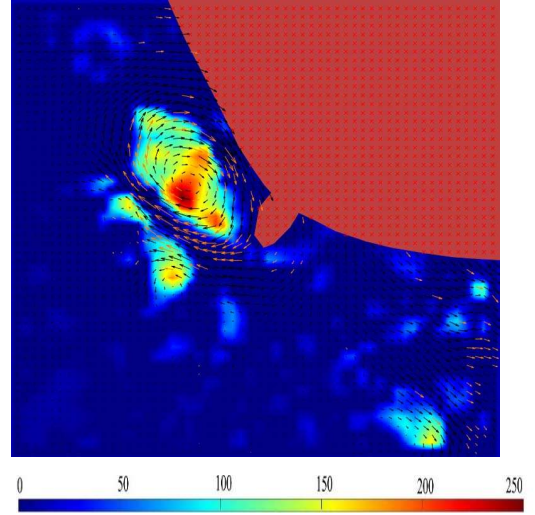
Ek Şekil 38. Levha yalpa omurgalı konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, -10 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



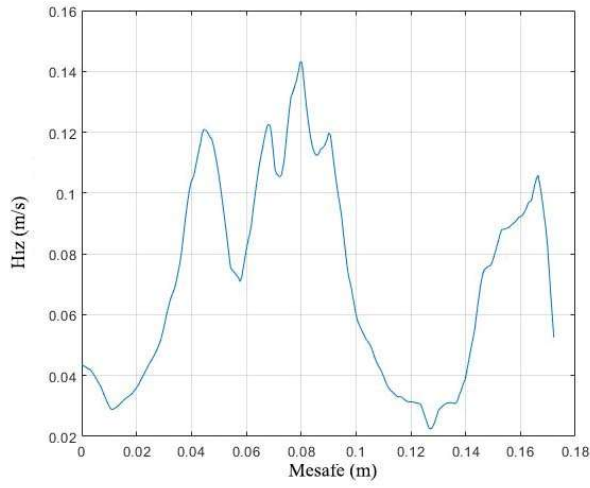
Ek Şekil 39. Kanat kesit yalpa omurgalı konfigürasyonunun, 10 derece yalpa genliği, +10 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



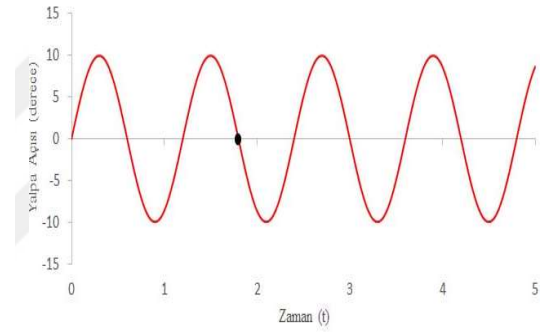
(a)



(b)

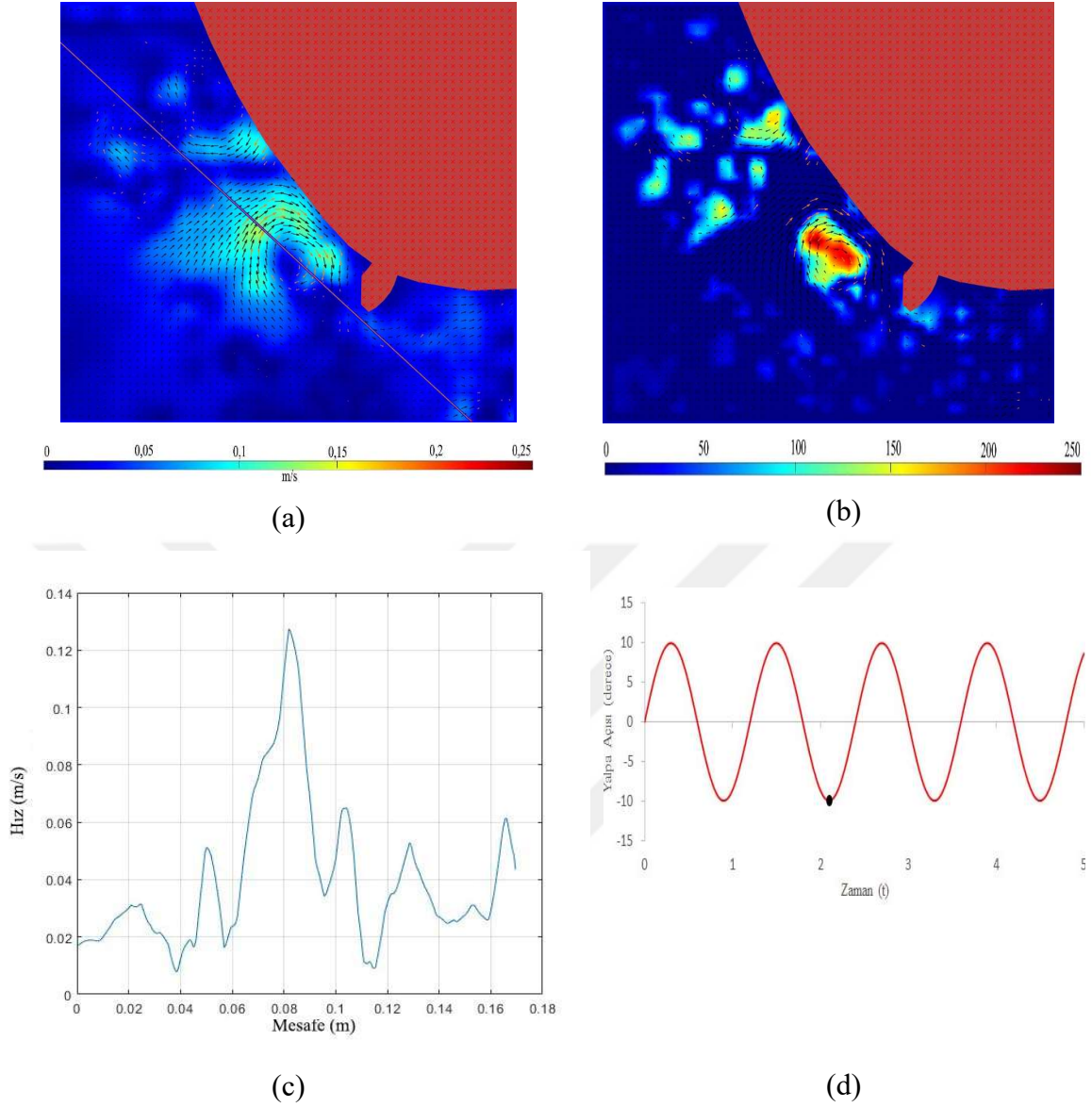


(c)

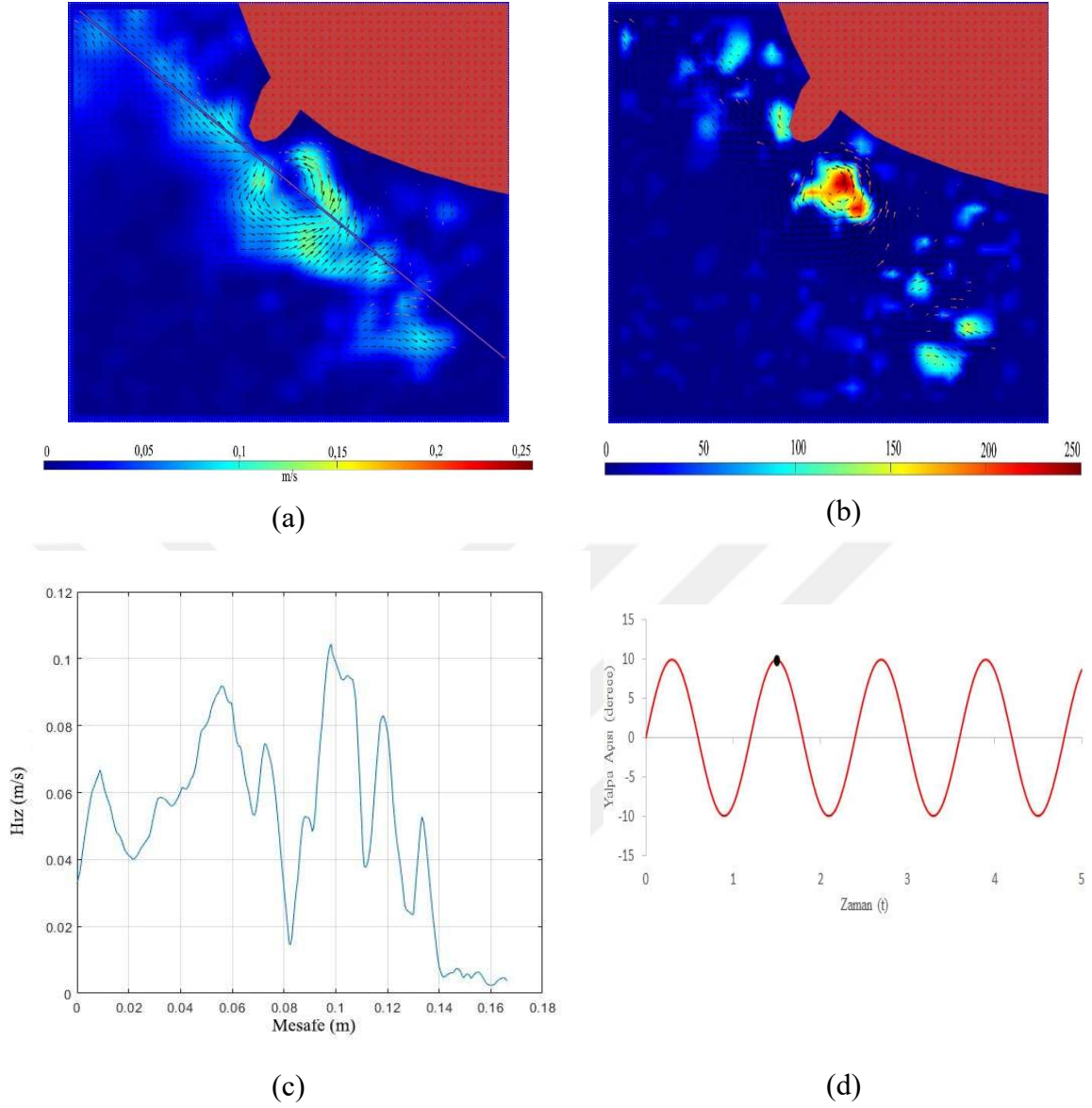


(d)

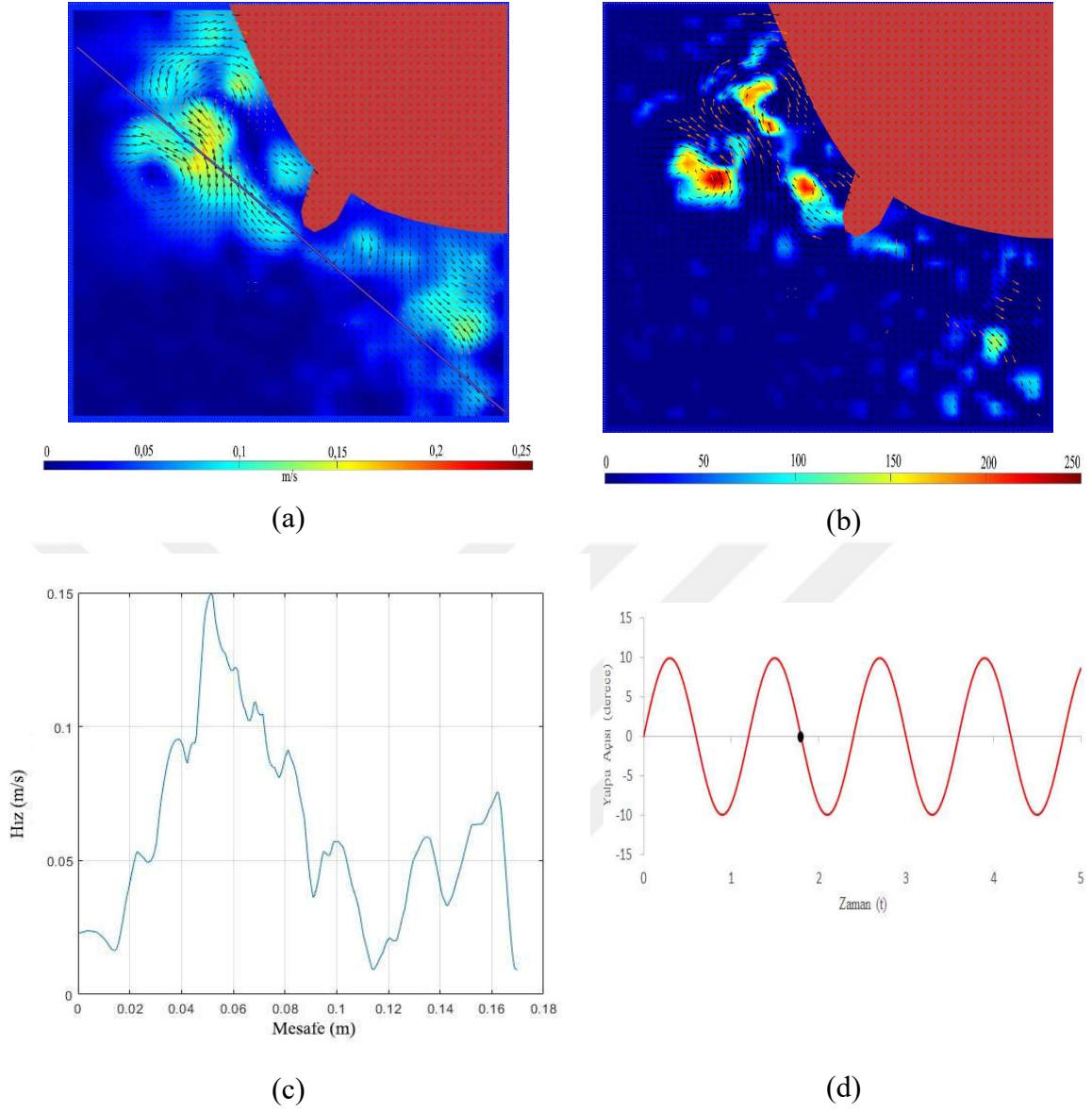
Ek Şekil 40. Kanat kesit yalpa omurgalı konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



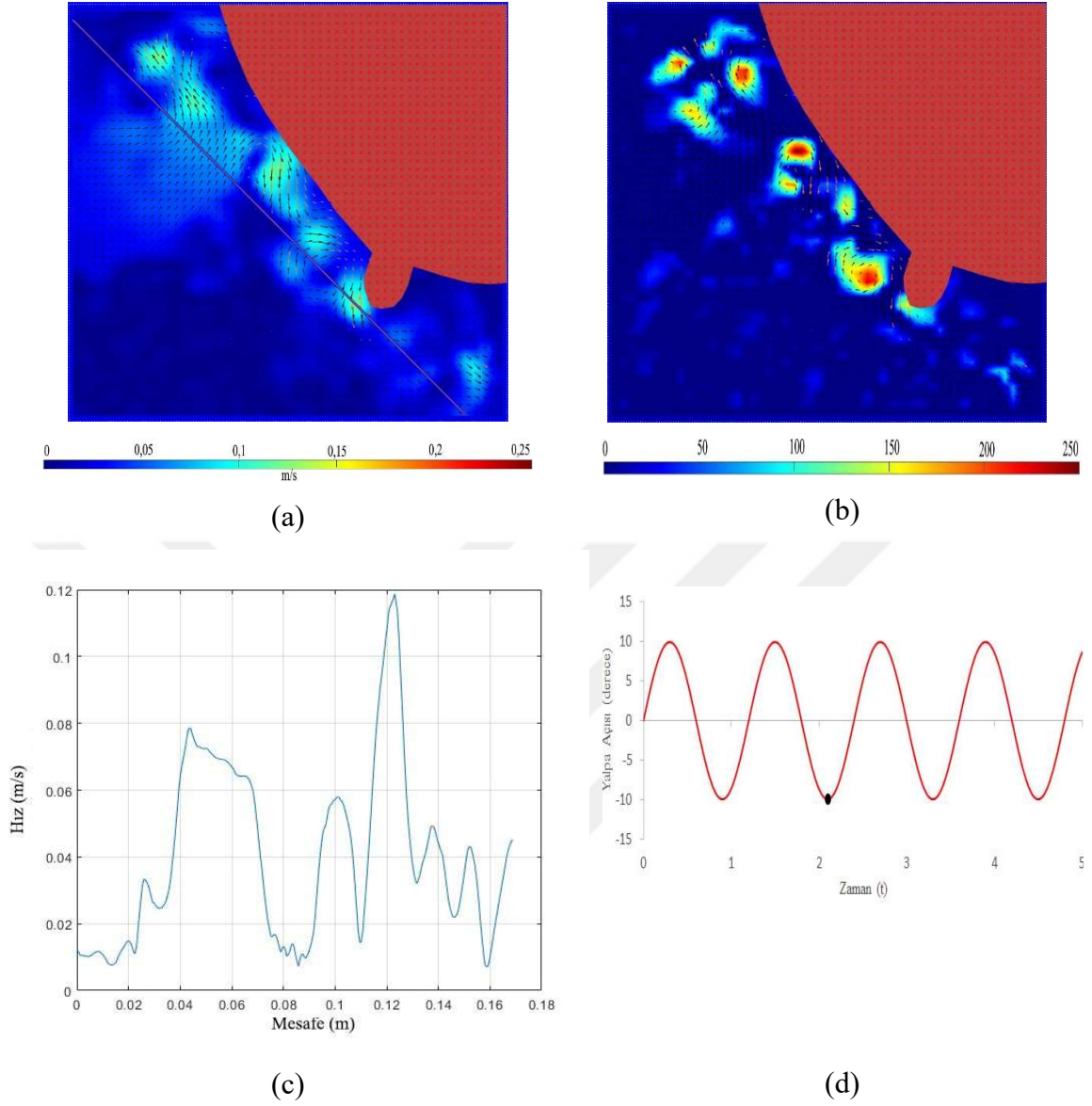
Ek Şekil 41. Kanat kesit yalpa omurgalı konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, -10 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



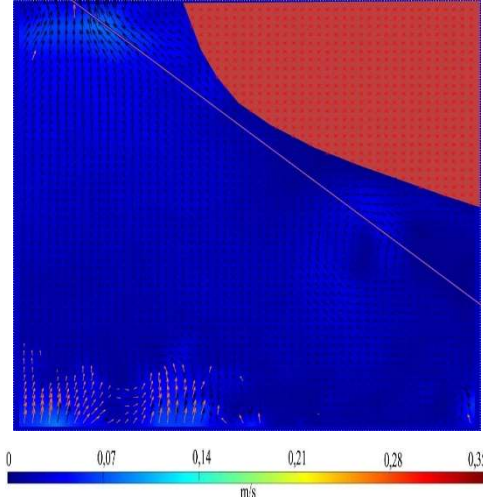
Ek Şekil 42. Oval kesit yalpa omurgalı konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, +10 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



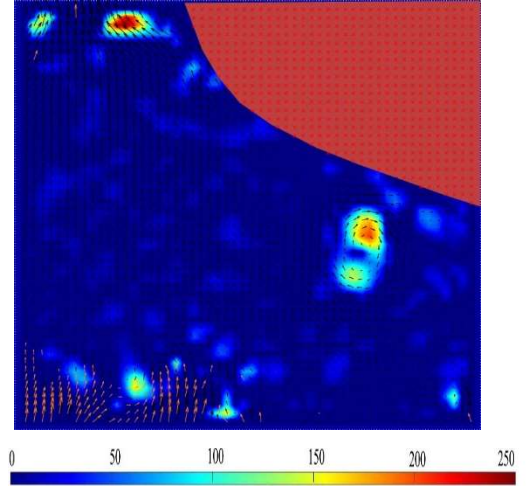
Ek Şekil 43. Oval kesit yalpa omurgalı konfigürasyonun, 10 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



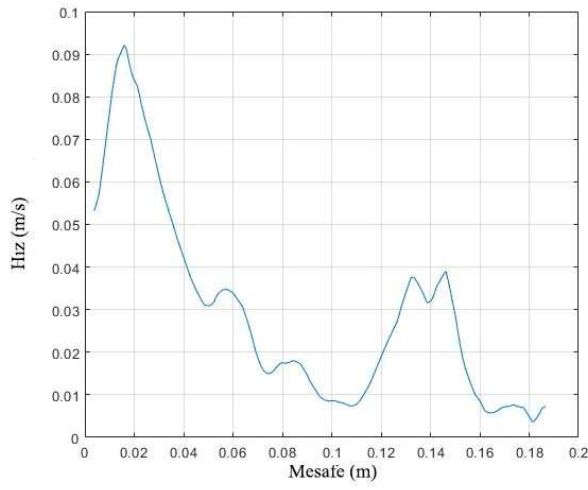
Ek Şekil 44. Oval kesit yalpa omurgalı konfigürasyonunun, 10 derece yalpa genliği, -10 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



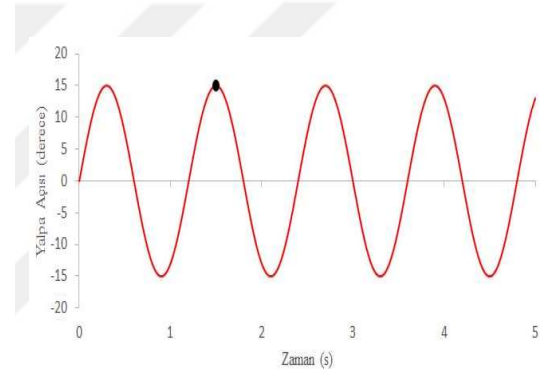
(a)



(b)

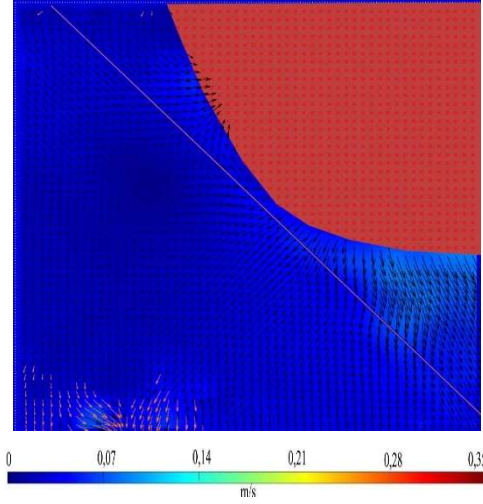


(c)

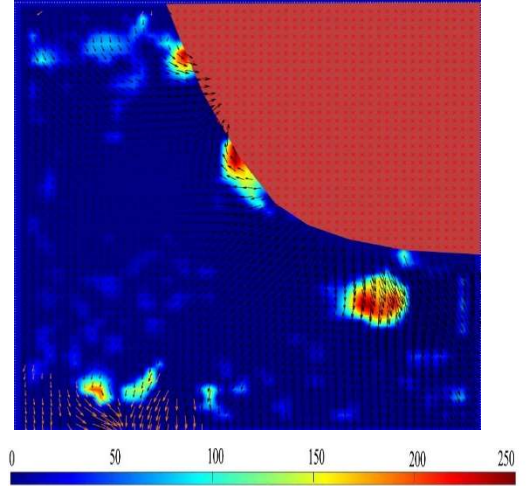


(d)

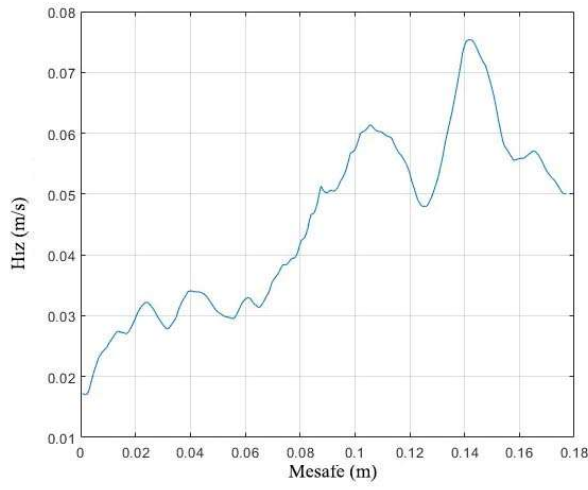
Ek Şekil 45. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 15 derece yalpa genliği, +15 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



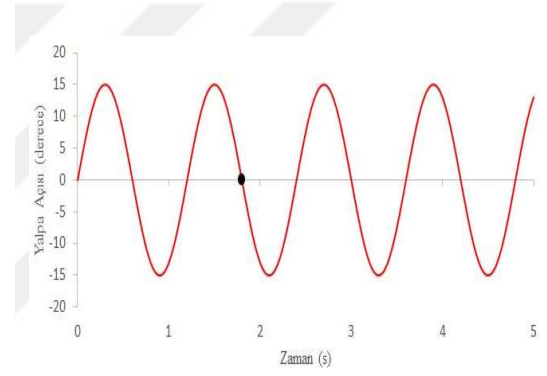
(a)



(b)

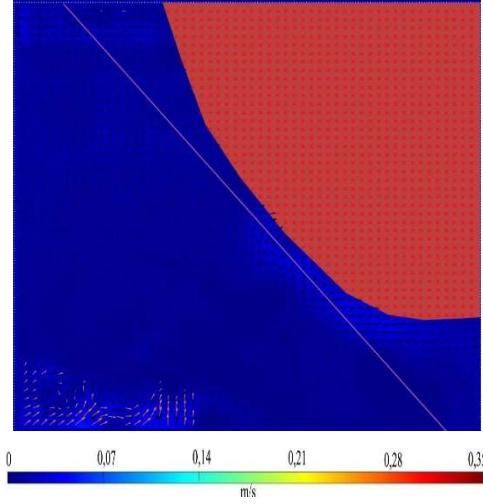


(c)

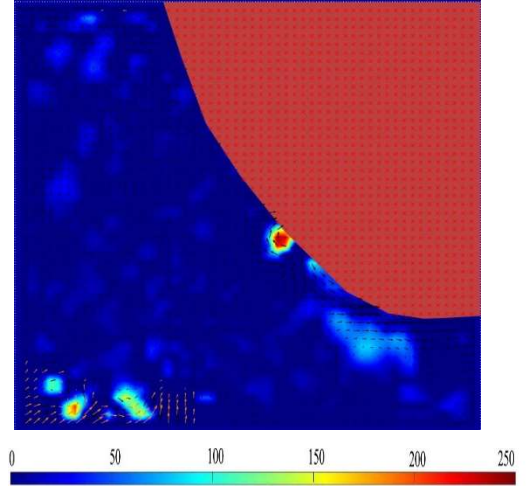


(d)

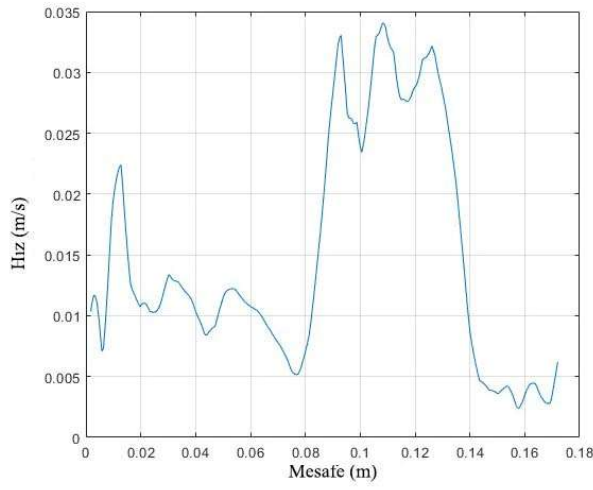
Ek Şekil 46. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 15 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



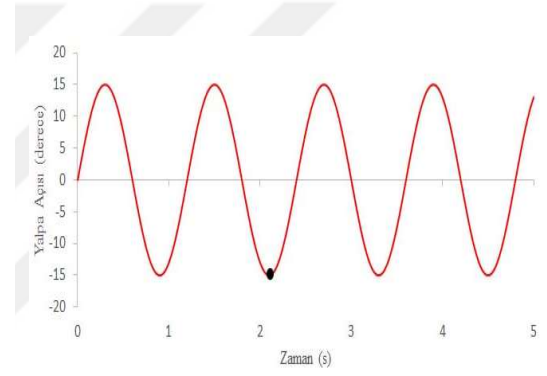
(a)



(b)

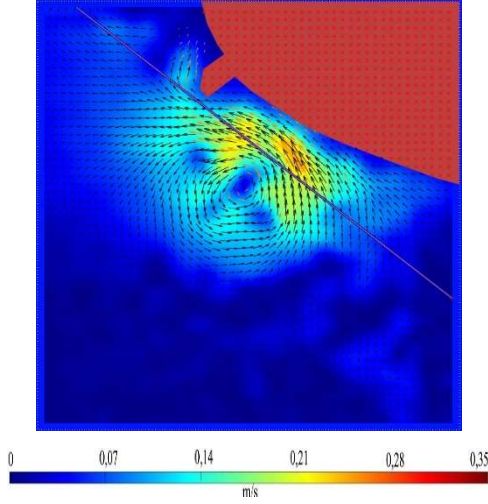


(c)

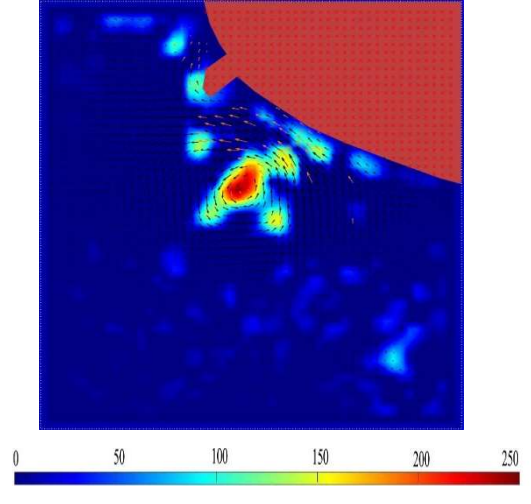


(d)

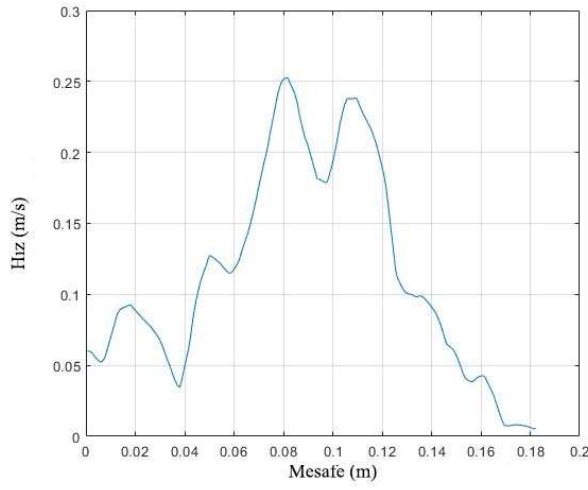
Ek Şekil 47. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 15 derece yalpa genliği, -15 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



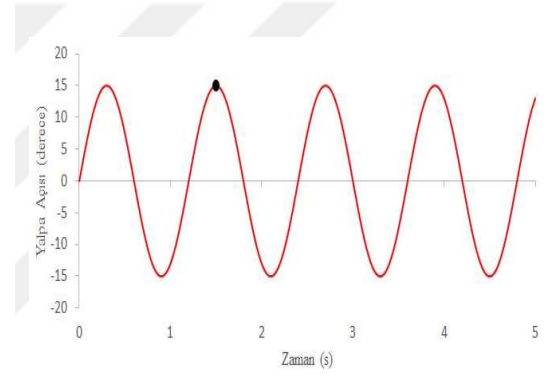
(a)



(b)

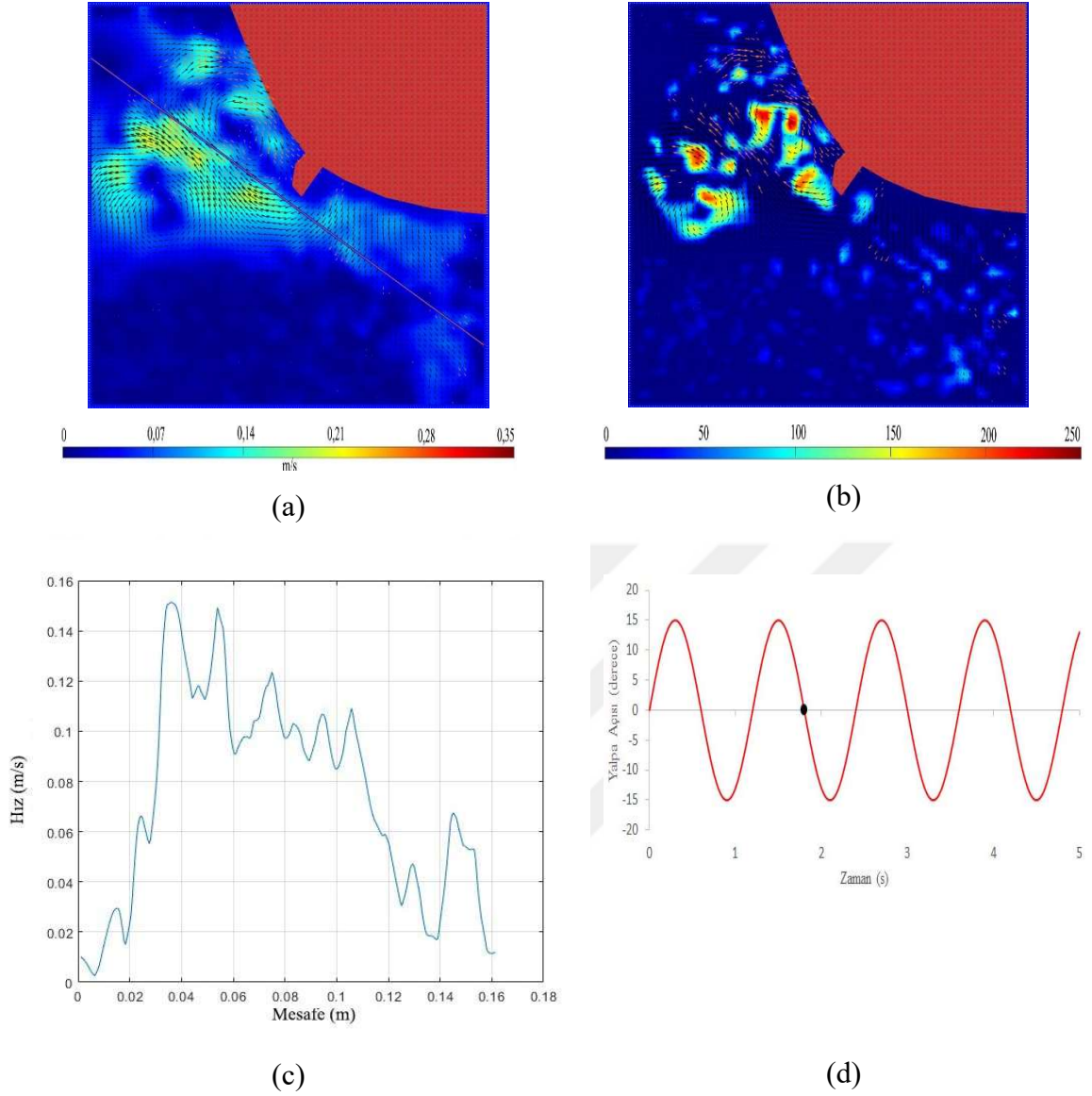


(c)

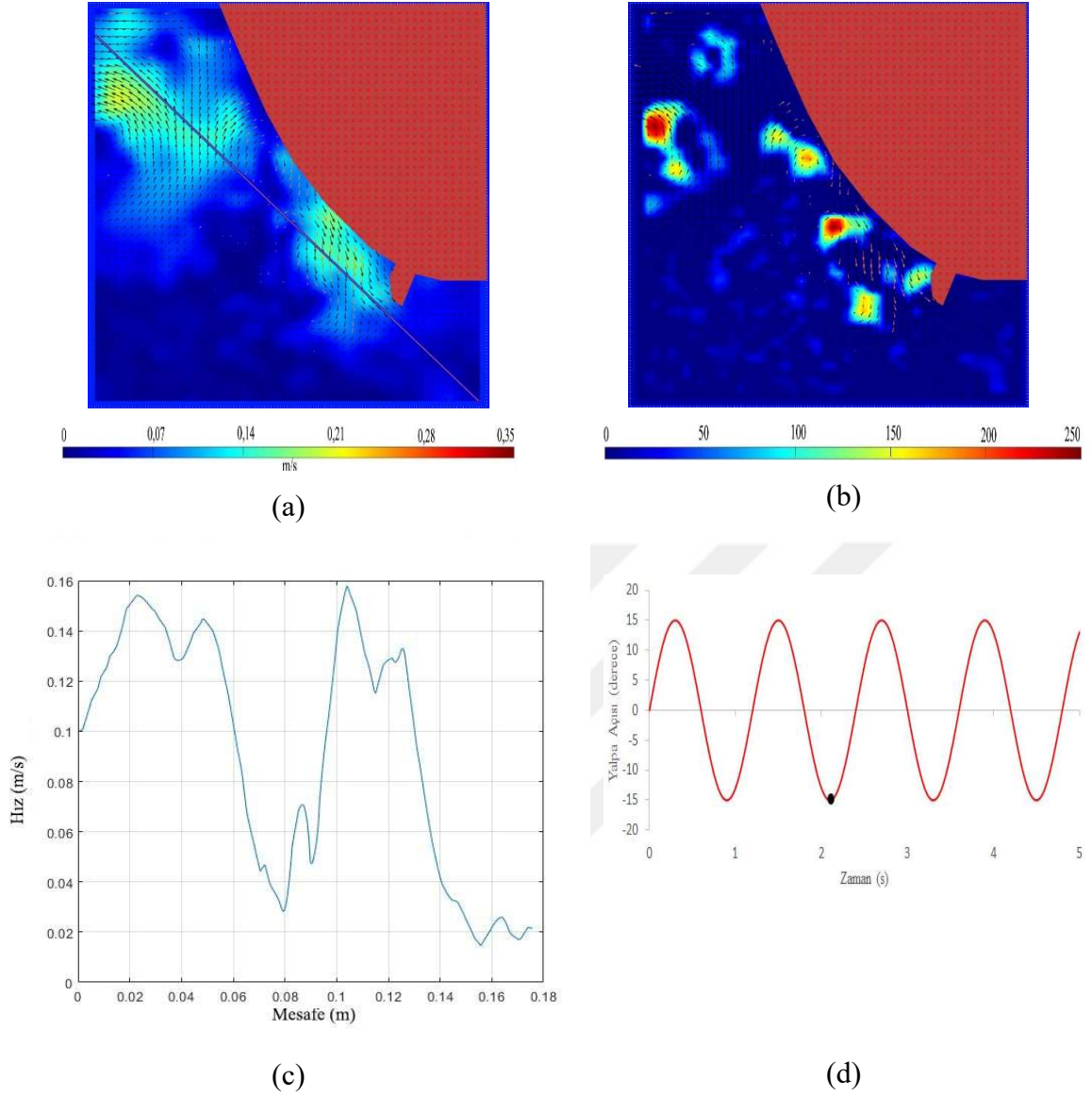


(d)

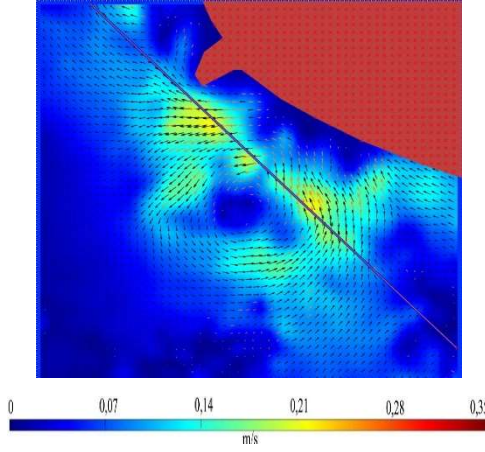
Ek Şekil 48. Levha yalpa omurga konfigürasyonunun, 15 derece yalpa genliği, +15 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



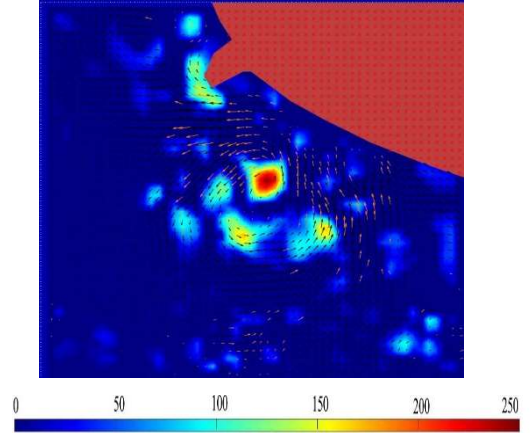
Ek Şekil 49. Levha yalpa omurga konfigürasyonun, 15 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



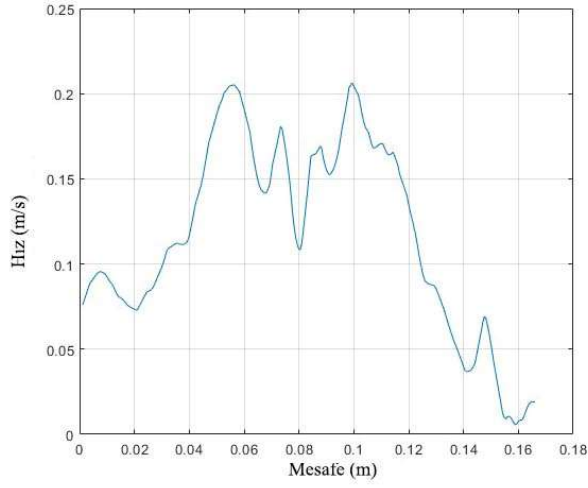
Ek Şekil 50. Levha yalpa omurga konfigürasyonun, 15 derece yalpa genliği, -15 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



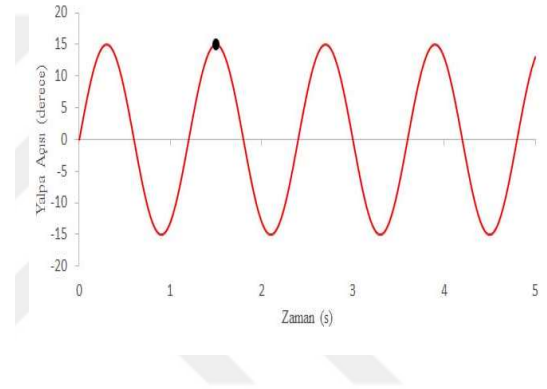
(a)



(b)

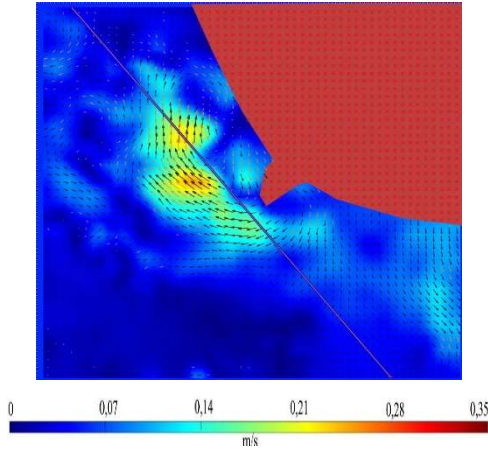


(c)

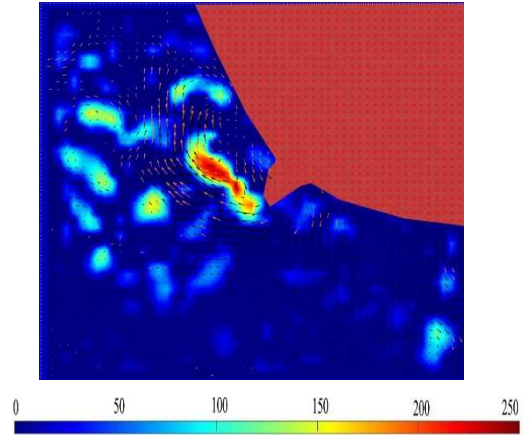


(d)

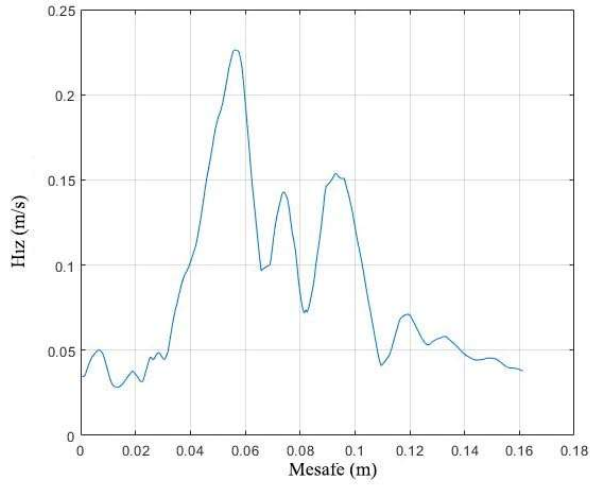
Ek Şekil 51. Kanat kesit yalpa omurga konfigürasyonunun, 15 derece yalpa genliği, +15 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



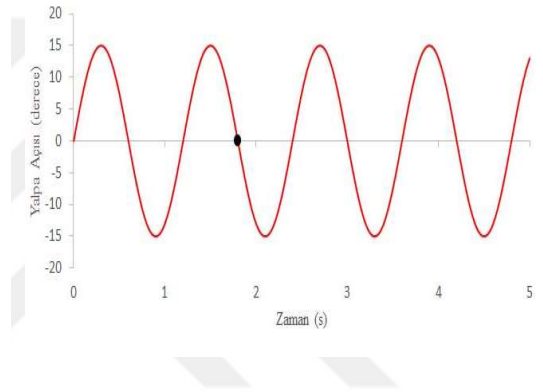
(a)



(b)

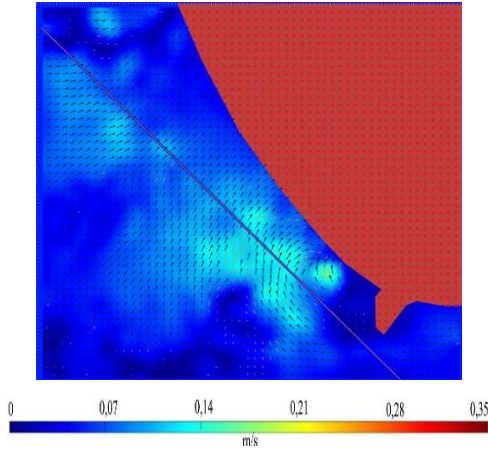


(c)

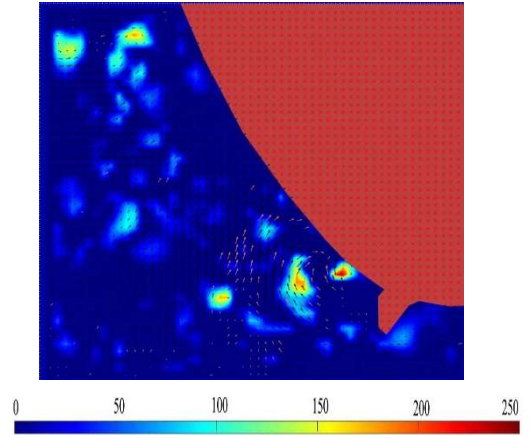


(d)

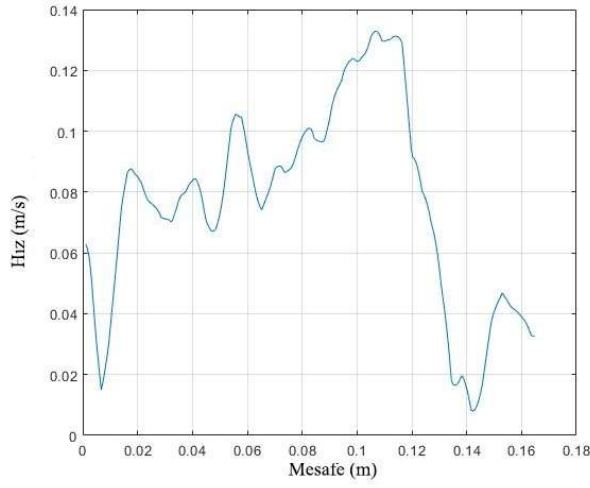
Ek Şekil 52. Kanat kesit yalpa omurga konfigürasyonunun, 15 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



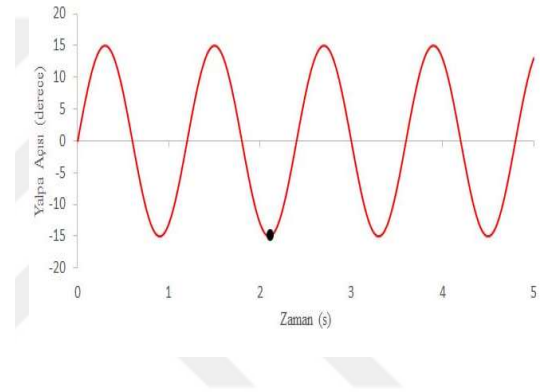
(a)



(b)

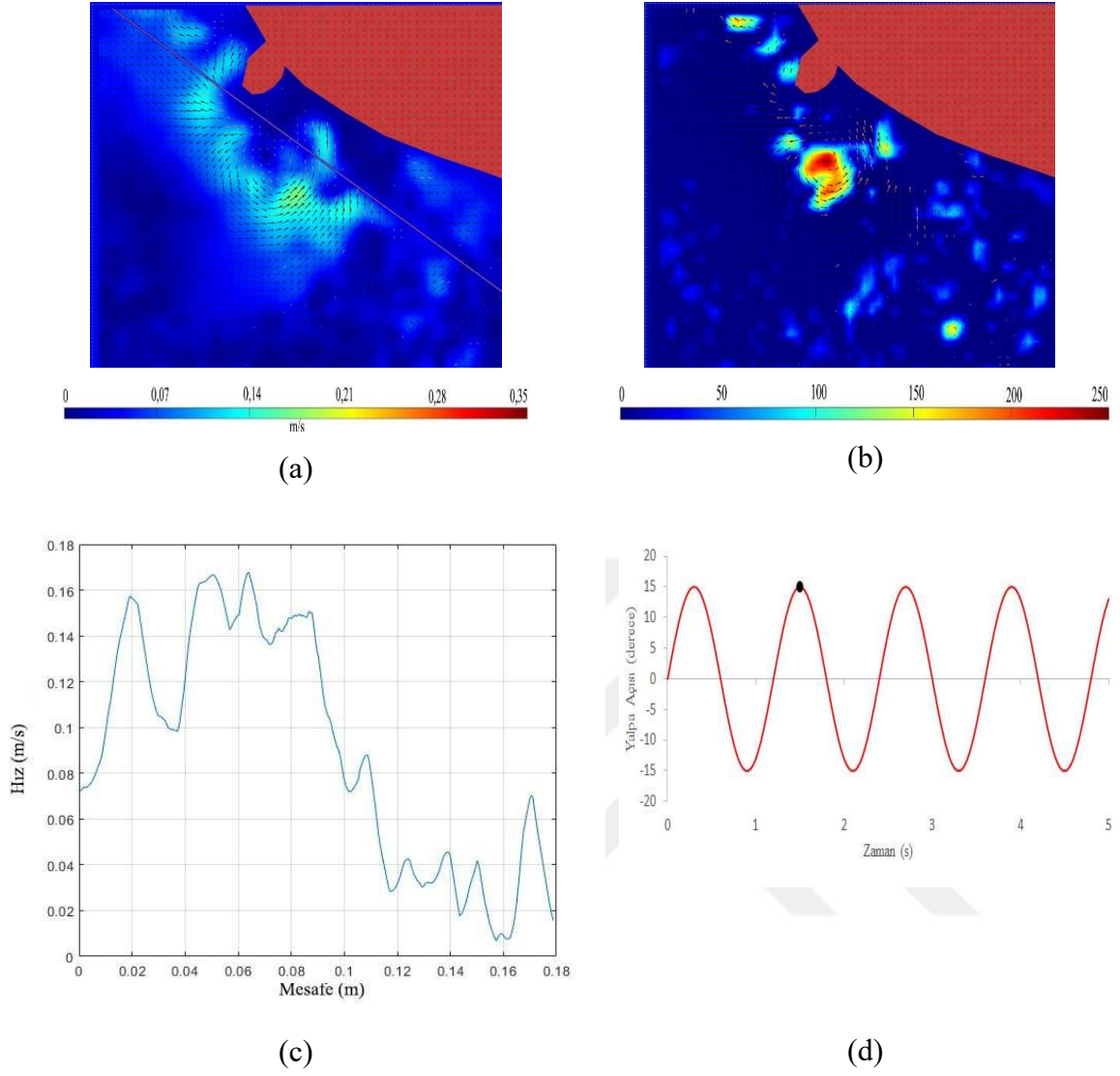


(c)

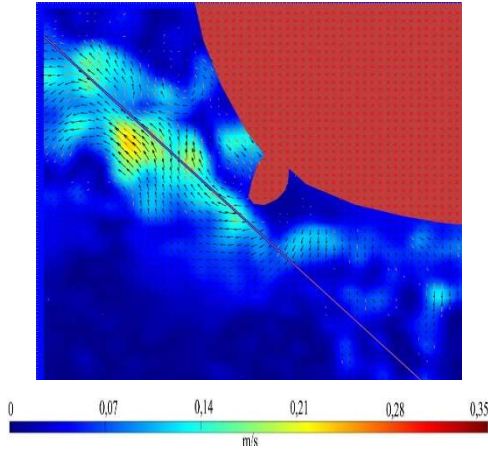


(d)

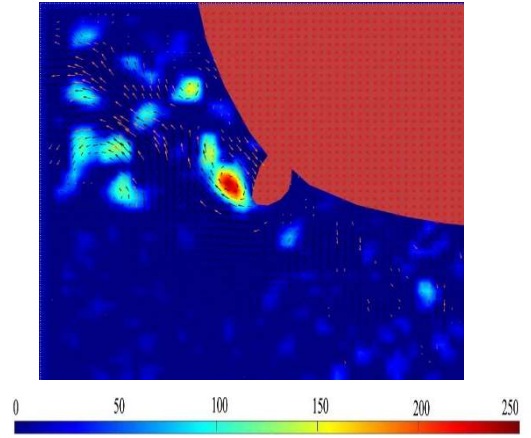
Ek Şekil 53. Kanat kesit yalpa omurga konfigürasyonunun, 15 derece yalpa genliği, -15 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



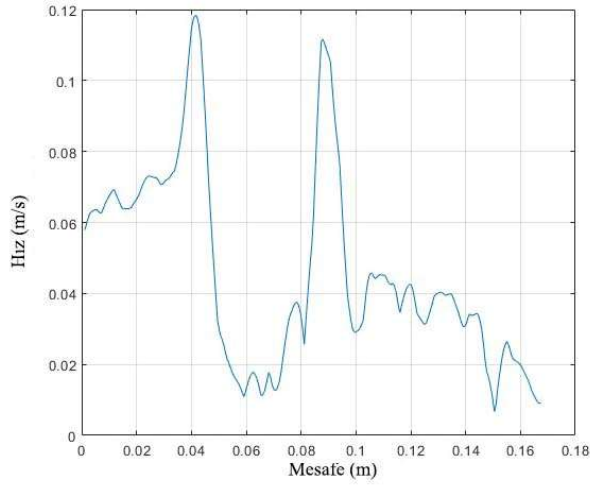
Ek Şekil 54. Oval kesit yalpa omurga konfigürasyonunun, 15 derece yalpa genliği, +15 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



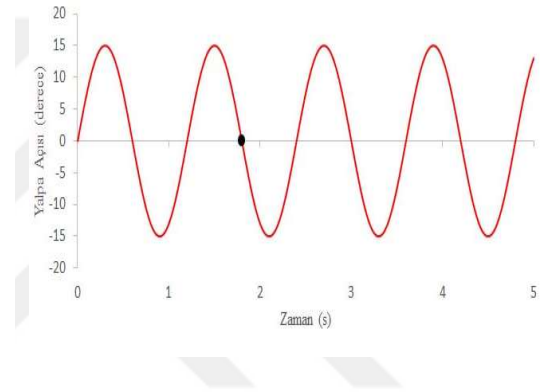
(a)



(b)

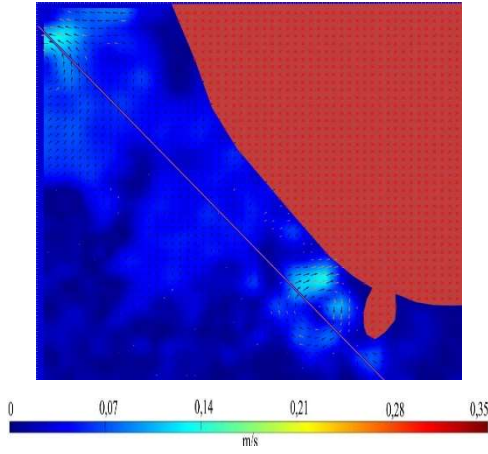


(c)

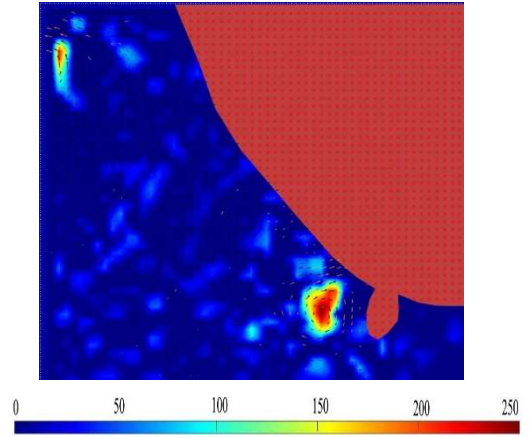


(d)

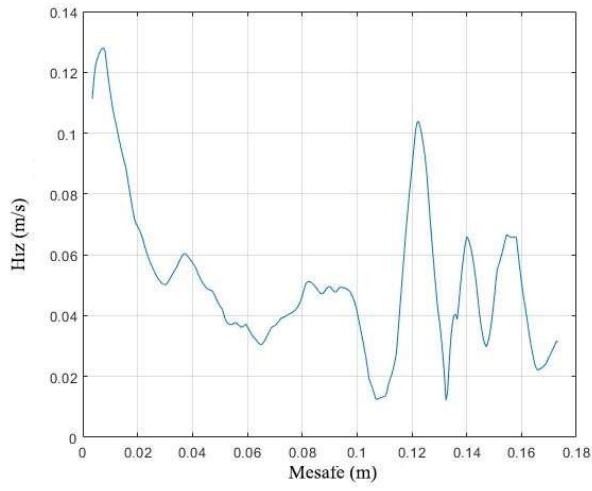
Ek Şekil 55. Oval kesit yalpa omurga konfigürasyonunun, 15 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



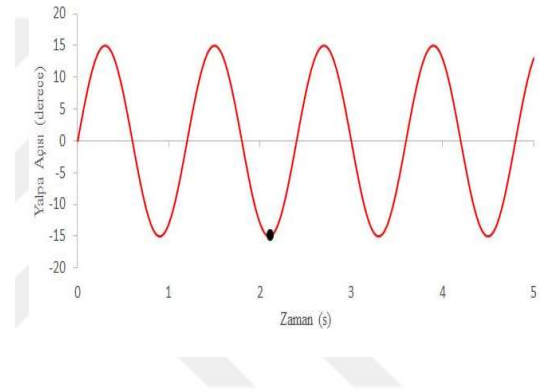
(a)



(b)

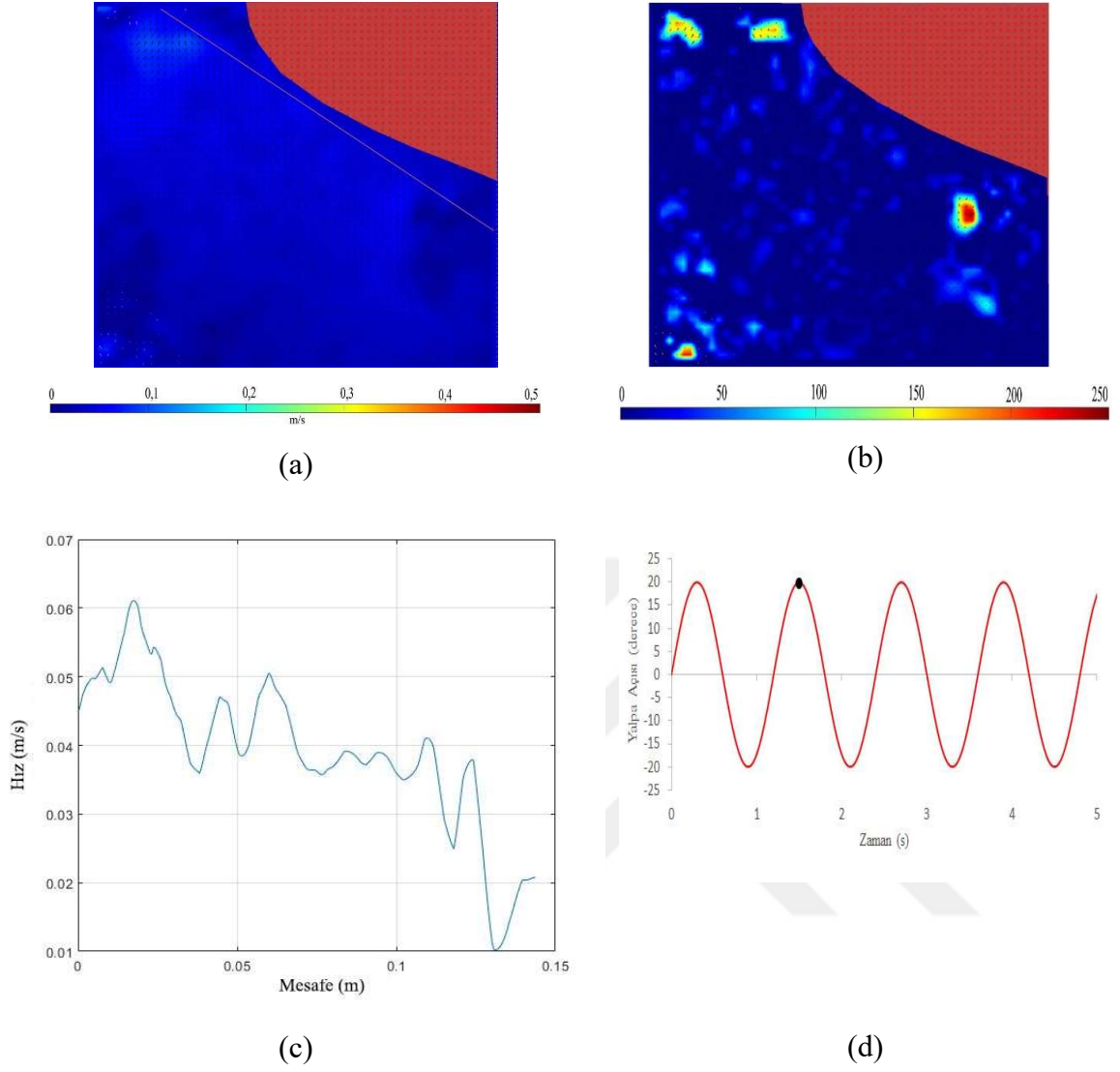


(c)

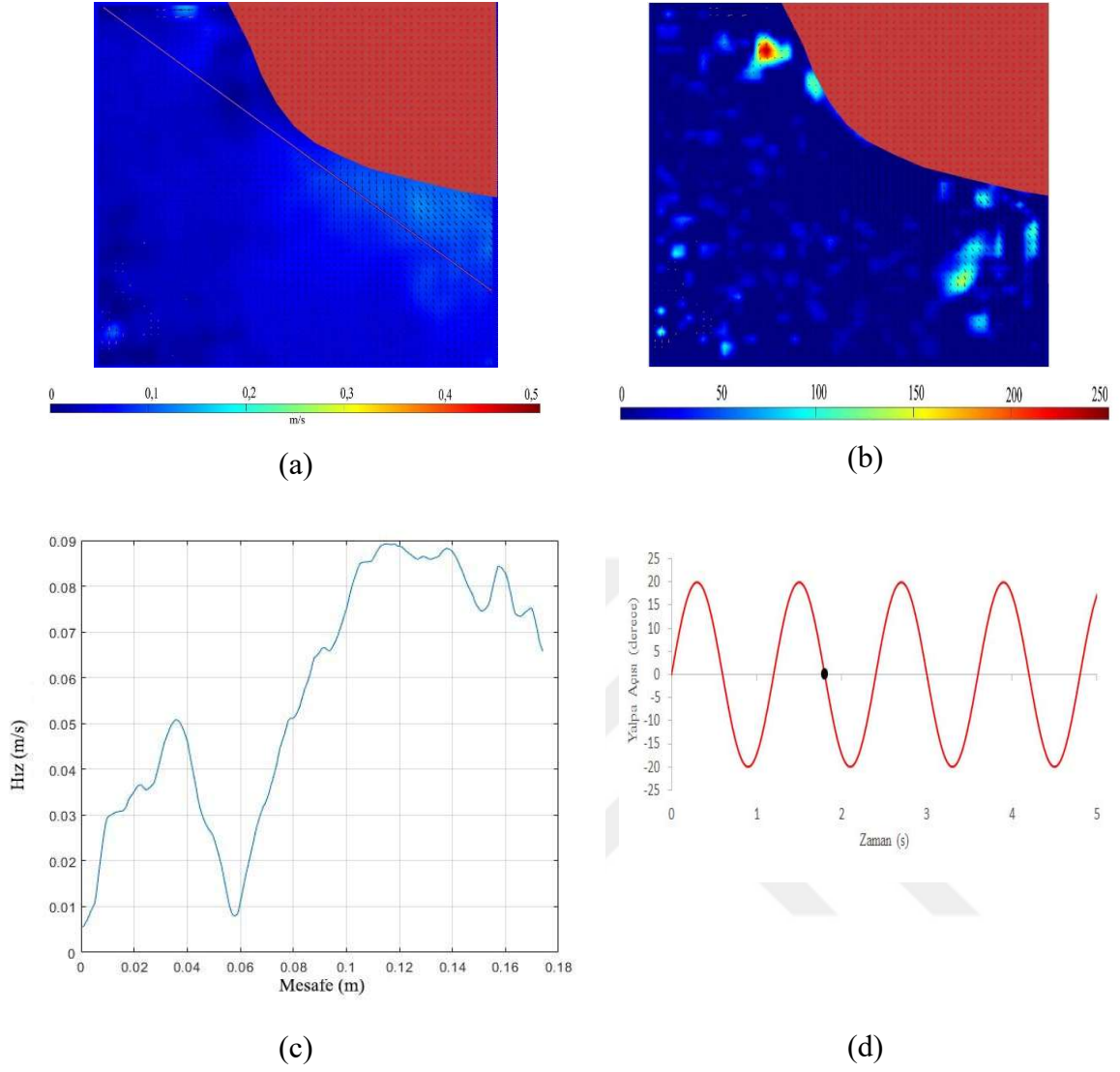


(d)

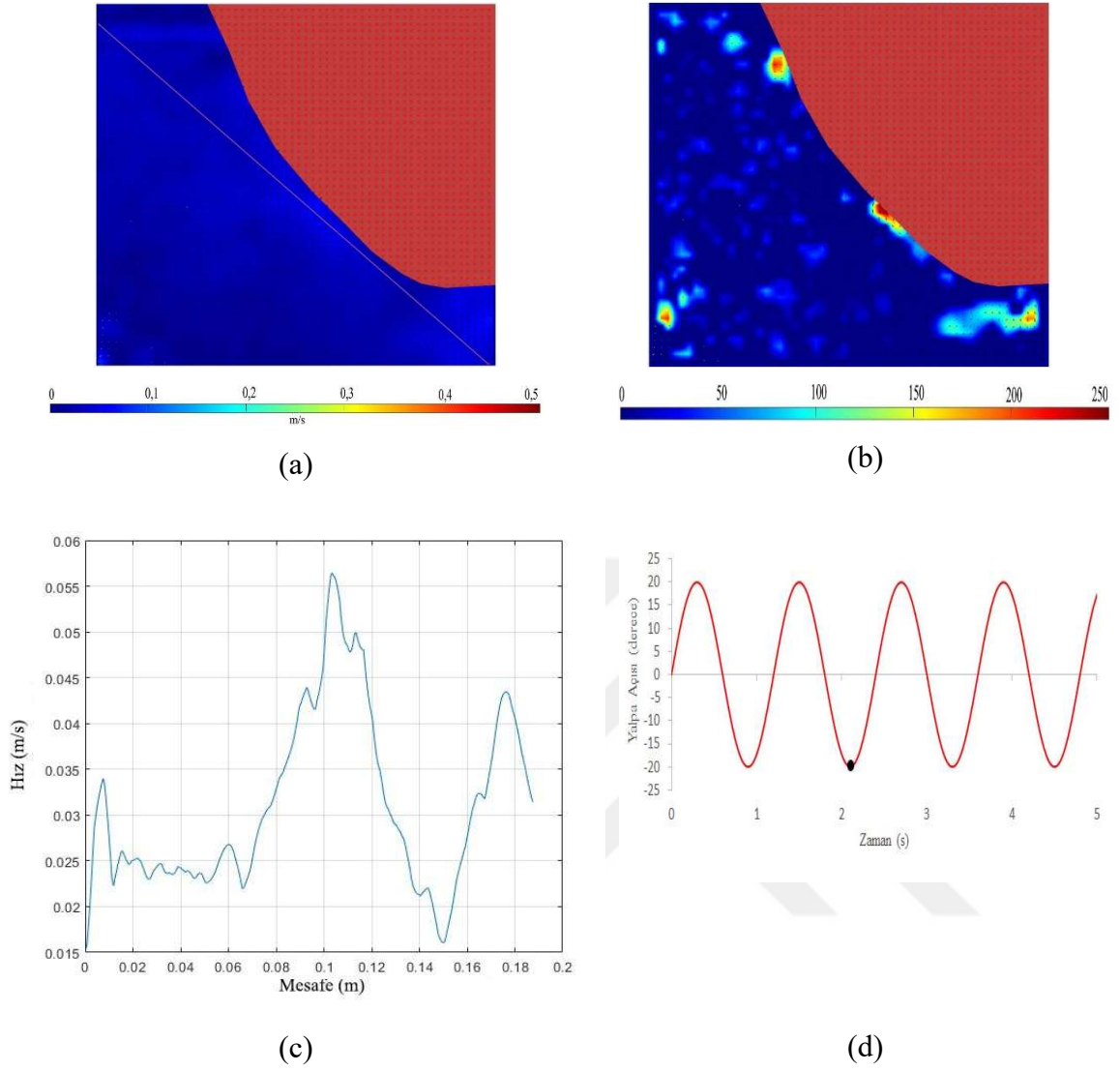
Ek Şekil 56. Oval kesit yalpa omurga konfigürasyonunun, 15 derece yalpa genliği, -15 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



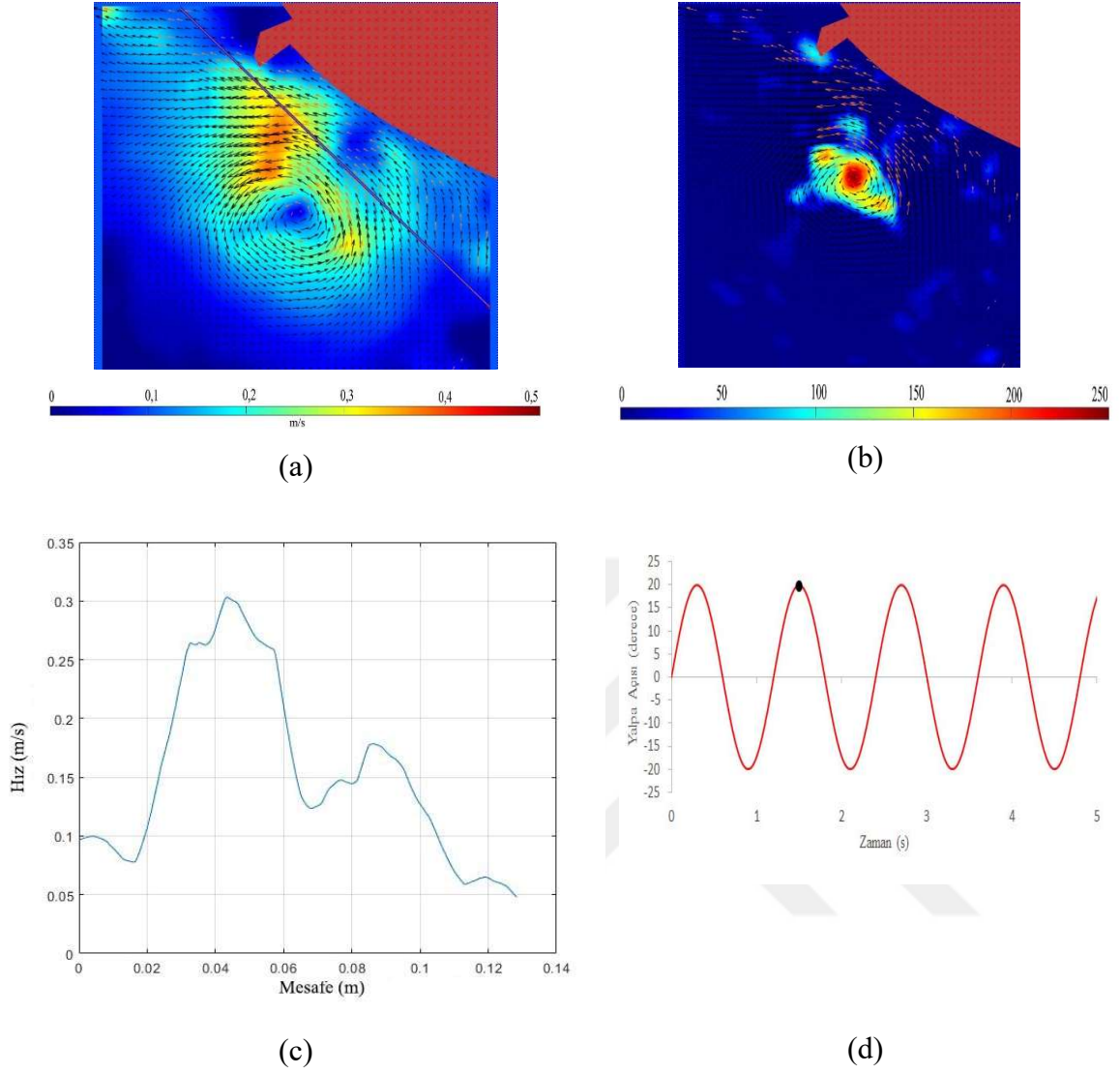
Ek Şekil 57. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 20 derece yalpa genliği, +20 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



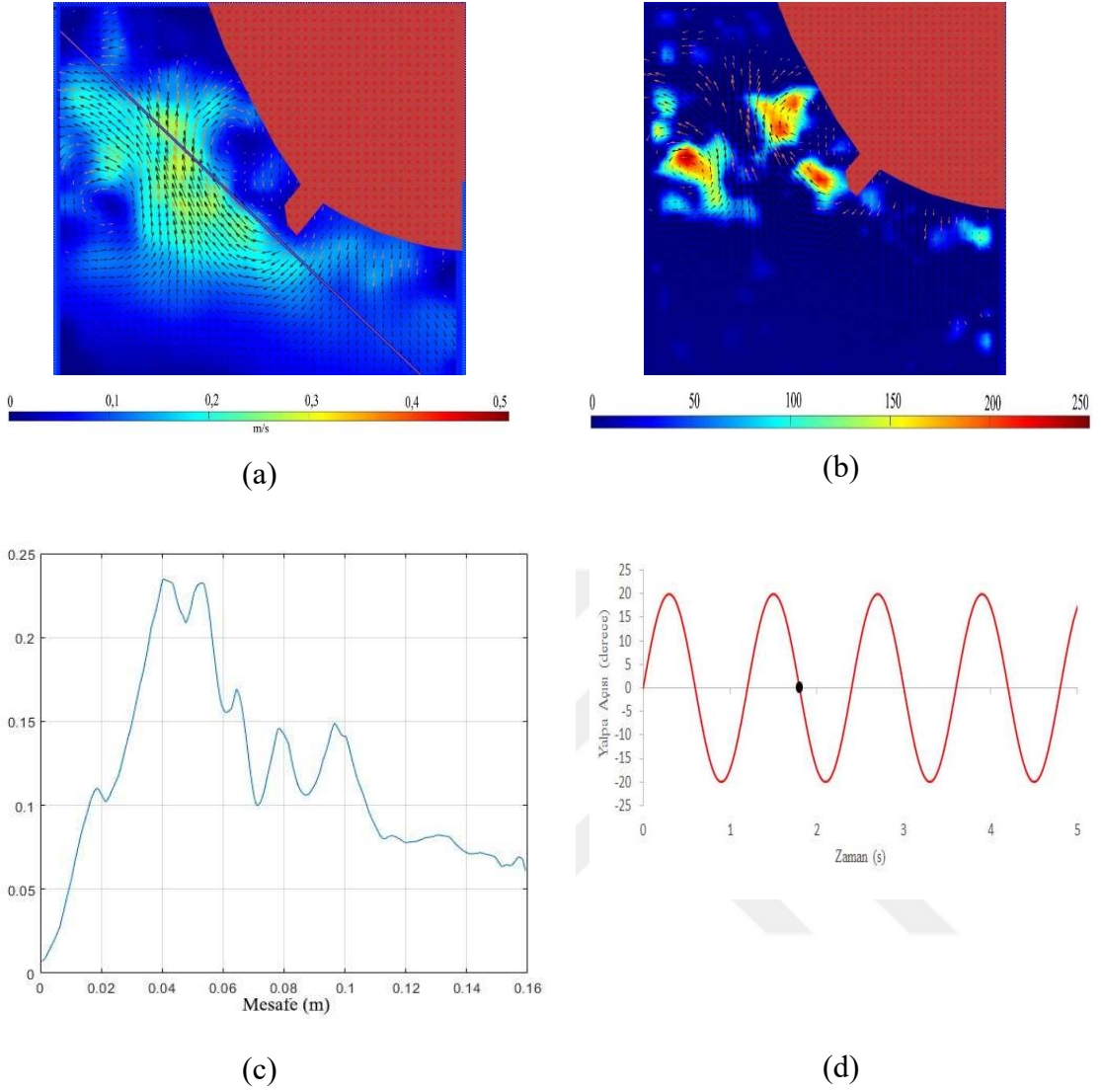
Ek Şekil 58. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 20 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



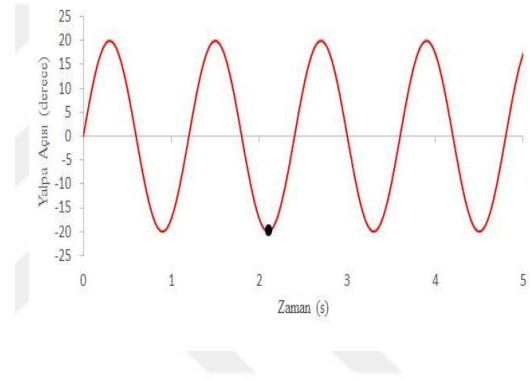
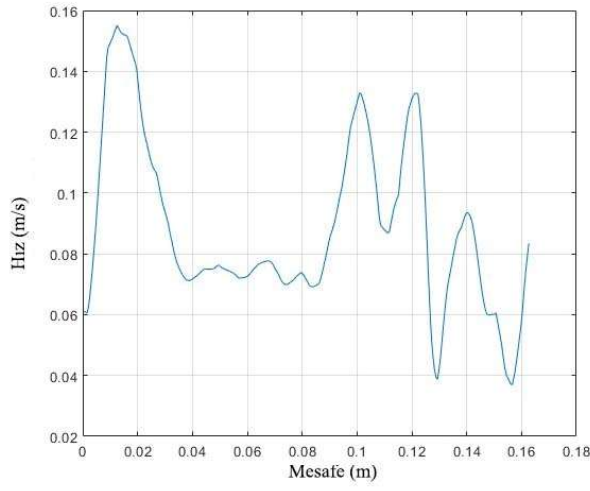
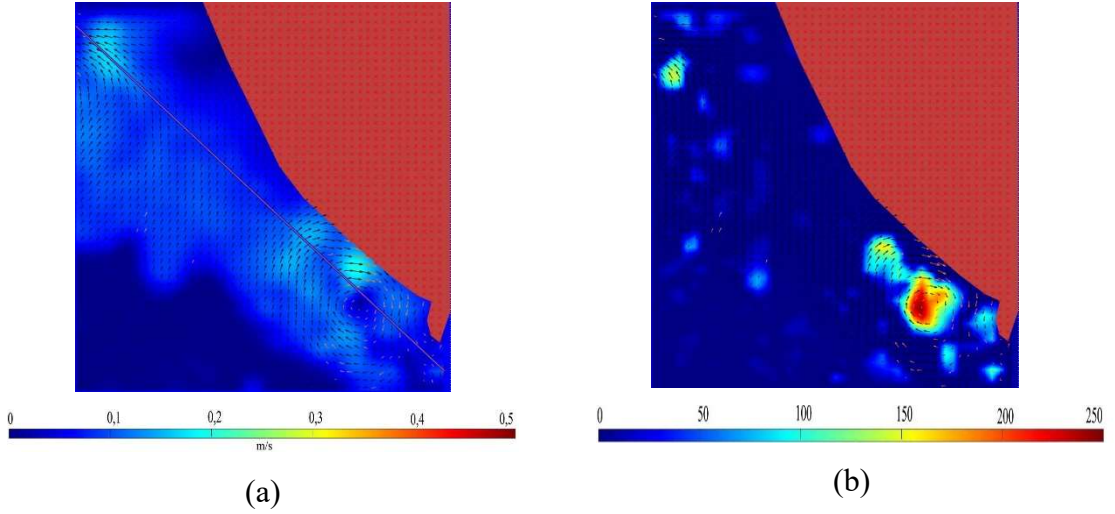
Ek Şekil 59. Yalpa omurgasız konfigürasyonun, 20 derece yalpa genliği, -20 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



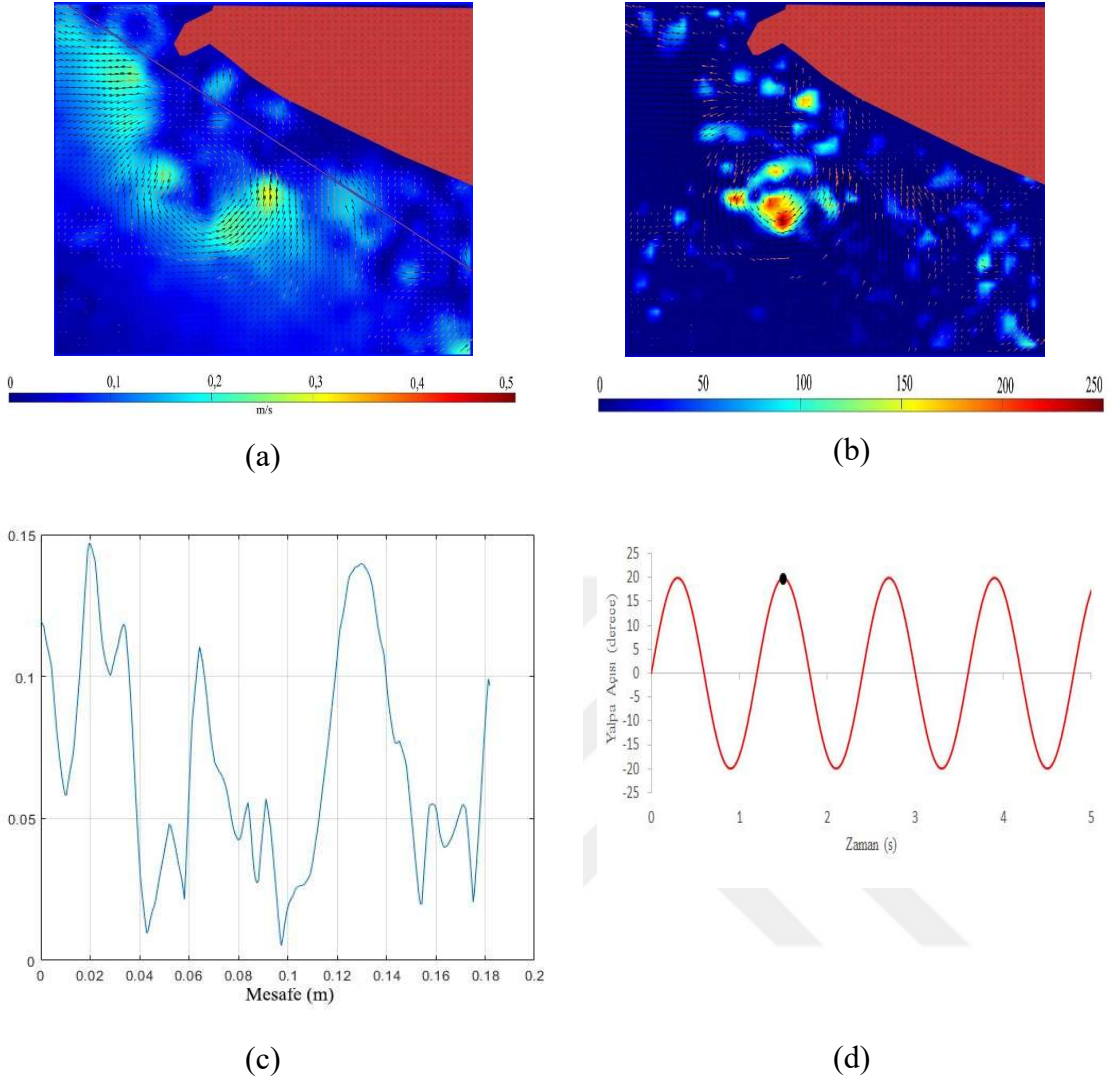
Ek Şekil 60. Levha yalpa omurga konfigürasyonunun, 20 derece yalpa genliği, +20 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



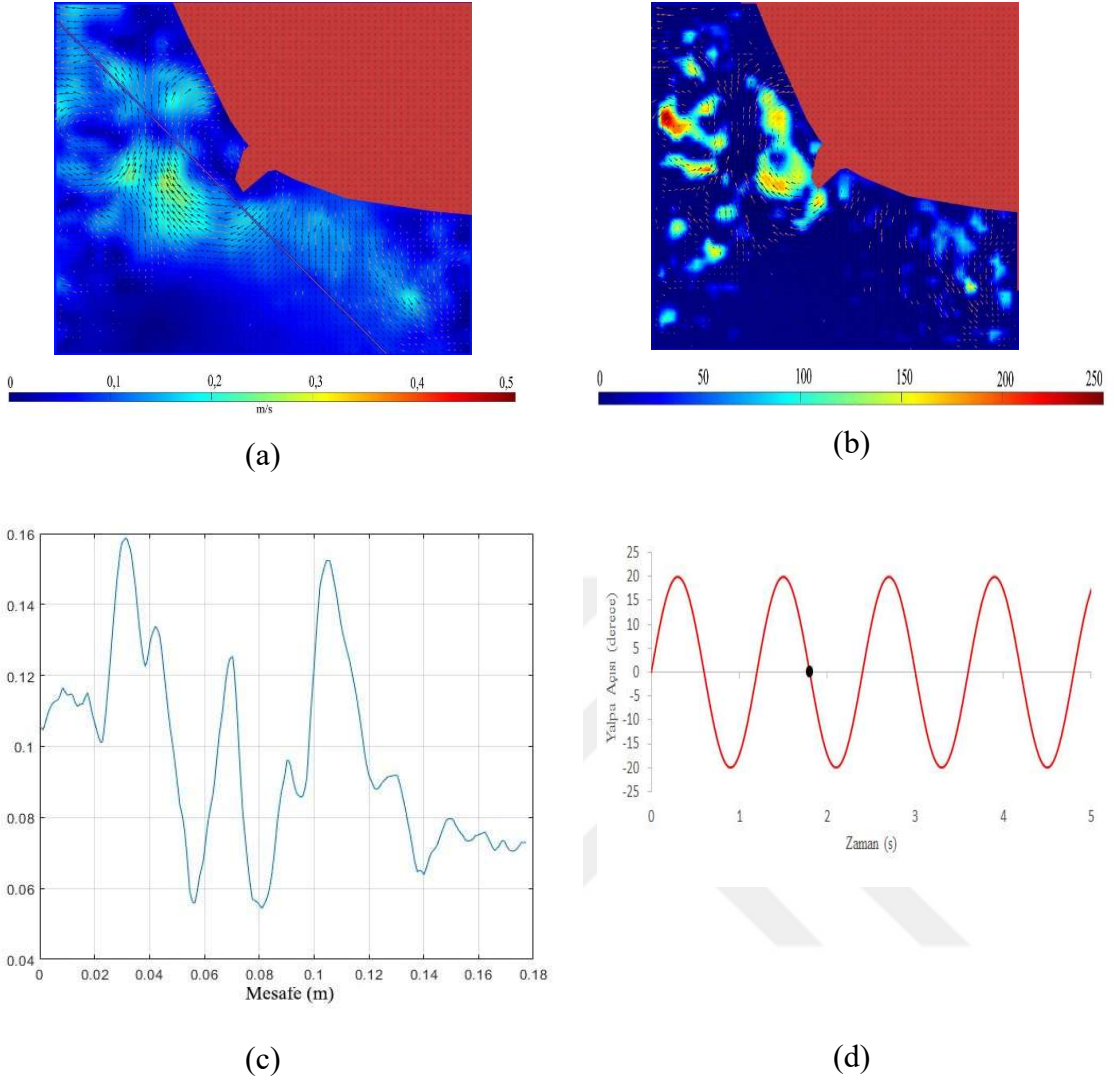
Ek Şekil 61. Levha yalpa omurga konfigürasyonun, 20 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



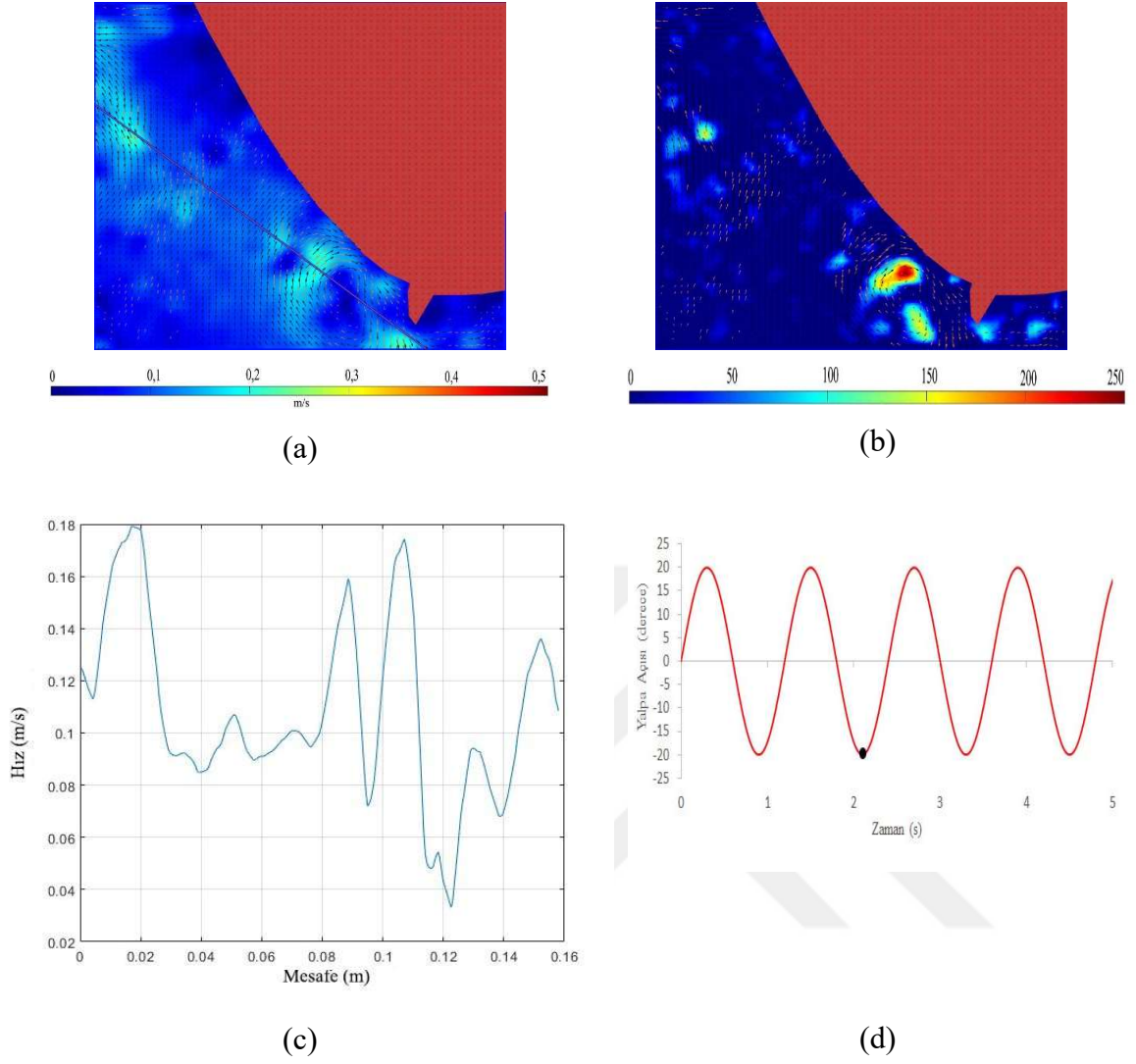
Ek Şekil 62. Levha yalpa omurga konfigürasyonun, 20 derece yalpa genliği, -20 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



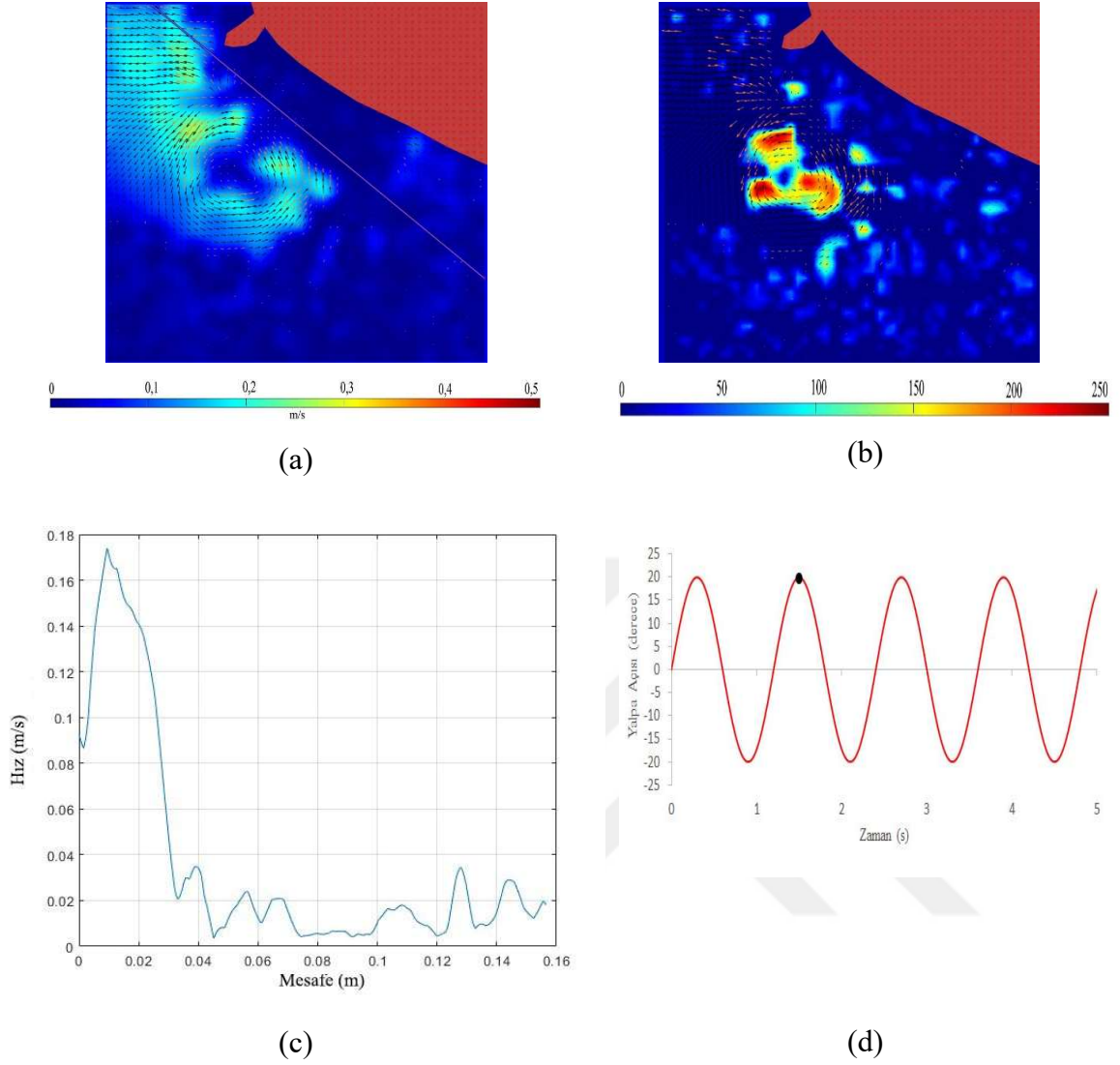
Ek Şekil 63. Kanat kesit yalpa omurga konfigürasyonunun, 20 derece yalpa genliği, +20 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



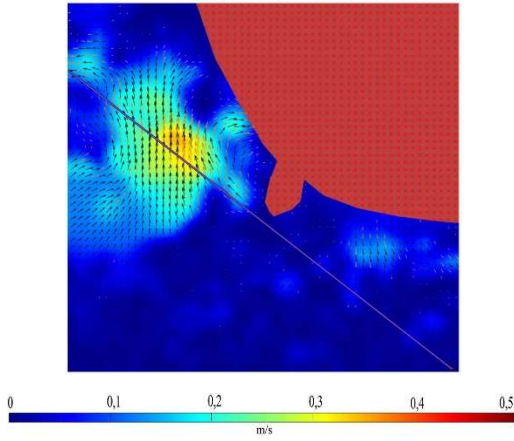
Ek Şekil 64. Kanat kesit yalpa omurga konfigürasyonunun, 20 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



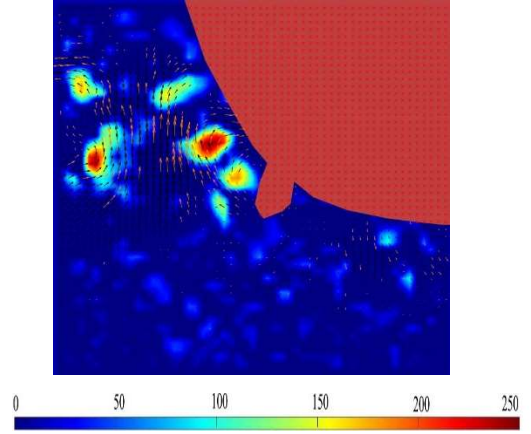
Ek Şekil 65. Kanat kesit yalpa omurga konfigürasyonunun, 20 derece yalpa genliği, -20 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



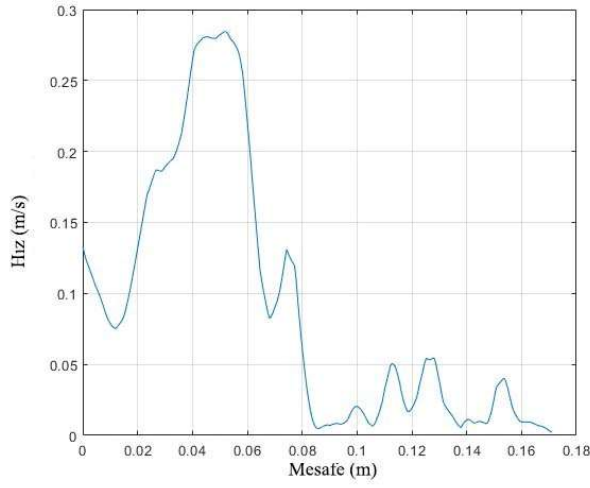
Ek Şekil 66. Oval kesit yalpa omurga konfigürasyonunun, 20 derece yalpa genliği, +20 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



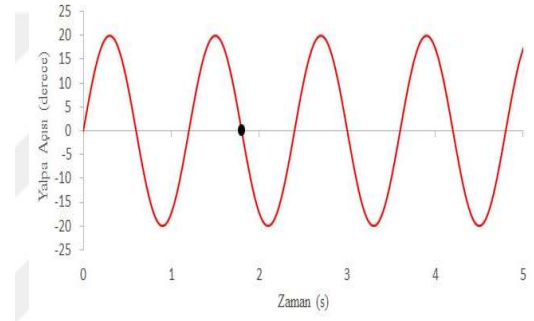
(a)



(b)

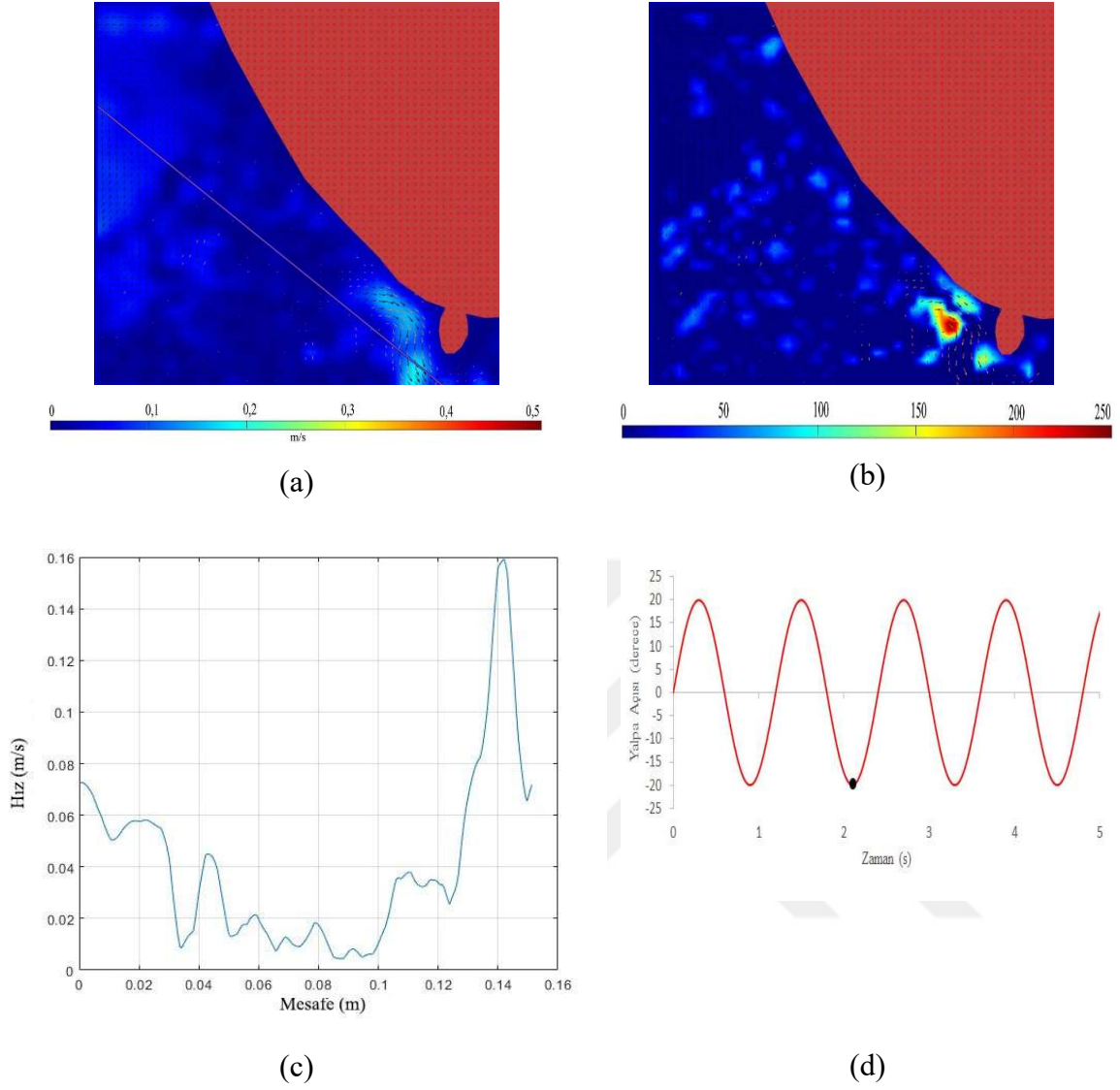


(c)



(d)

Ek Şekil 67. Oval kesit yalpa omurga konfigürasyonun, 20 derece yalpa genliği, 0 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu



Ek Şekil 68. Oval kesit yalpa omurga konfigürasyonunun, 20 derece yalpa genliği, -20 derece konumu için (a) Hız büyüklüğü alanı, (b) Girdap yoğunluğu alanı, (c) Hız profili, (d) Yalpa hareketindeki konumu

ÖZGEÇMİŞ

Lise öğrenimine Isparta Mürşide Ermumcu Anadolu Öğretmen Lisesi'nde başladı, Elâzığ Ahmet Kabaklı Anadolu Öğretmen Lisesi'nde tamamladı. 2009 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi Gemi İnşaatı Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2014 Haziran ayında Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisi olarak mezun oldu. 2014–2015 Eğitim ve Öğretim Güz Yarıyılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2017 yılında yüksek lisansını tamamlayıp aynı anabilim dalında doktora eğitimine başladı. 2015 Şubat ayından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. İyi seviyede İngilizce bilmektedir. Evli ve bir kız çocuk babasıdır.