T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YALPA SÖNÜMÜNÜN GEMİ KESİTİ İÇİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

BURAK YILDIZ

DOKTORA TEZİ
GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. HÜSEYİN YILMAZ

İSTANBUL, 2016

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YALPA SÖNÜMÜNÜN GEMİ KESİTİ İÇİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Burak YILDIZ tarafından hazırlanan tez çalışması 12.07.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Fahri ÇELİK

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Fuat ALARÇİN

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Erdem ÜÇER

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Şebnem HELVACIOĞLU

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Bu çalışma, YÖK Yurtdışı Doktora Araştırma Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Doktora serüvenim akademisyenliğe başladığım 2010 Şubat ayına kadar uzanmaktadır. Akademisyenlik ve özellikle akademisyen olarak doktora yapmak gerçekten çok sancılı bir süreçtir ve bu süreçte çok fazla desteğe ihtiyaç duyulur. İşte bu desteği ben bu süreçte fazlasıyla gördüğüm için çok şanslıyım.

Doktora süresince sevgili annem ve babam, çok değerli abim ve ailesi her zaman yanımda oldular ve hiçbir zaman desteklerini benden esirgemediler. Ailem dışında bana en büyük desteği veren ve artık ailemden biri saydığım mesai arkadaşlarım Tarık KOÇAL ve Kaan ÜNLÜGENÇOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasında bana danışmanlık yapan ve beni araştırma yapmak için Japonya'ya gitmeye teşvik eden değerli hocam Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ'a saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım. Doktora tezime büyük katkıları olan ve bu tez konusunu bana öneren, Japonya Osaka Prefecture Üniversitesi'nde bana çalışma ve deney imkânı hazırlayan Prof. Dr. Toru Katayama ve Prof. Dr. Yoshiho Ikeda'ya, ayrıca yürütülen deneylerde bana yardımcı olan Katayama-Lab öğrencilerine teşekkürlerimi sunarım. Japonya'da geçirdiğim süre boyunca ve sonrasında da tez yazarken beni her zaman destekleyen sevgili arkadaşım Lucile TESTA'ya da sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz, 2016

Burak YILDIZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ x

ŞEKİL LİSTESİ xi

ÇİZELGE LİSTESİ xiv

ÖZET xv

ABSTRACT xvii

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 6
1.3 Hipotez 7

BÖLÜM 2

YALPA SÖNÜMÜ 8

2.1 Yalpa Hareketi Denklemi ve Yalpa Sönüm Katsayısı 8
2.2 Deneysel Yalpa Sönümü Hesaplama Metotları 10
2.2.1 Serbest Bırakma Testi ile Yalpa Sönümü Hesabı 11
2.2.2 Zorlanmış Yalpa Testi ile Yalpa Sönümü Hesabı 13
2.3 Ikeda Metodu ile Yalpa Sönümü Hesabı 14
2.4 Yalpa Sönümünün Bileşenleri 18
2.4.1 Dalga Bileşeni 18
2.4.2 Kaldırma Bileşeni 19
2.4.3 Sürtünme Bileşeni 19
2.4.4 Girdap Bileşeni 21
2.4.5 Yalpa Omurgası Bileşeni 23
2.4.5.1 Yalpa Omurgası Normal Kuvvet Bileşeni 23
2.4.5.2 Yalpa Omurgası Tekne Etkileşimi Bileşeni 24

2.4.5.3 Yalpa Omurgası Dalga Bileşeni 26

BÖLÜM 3

YALPA SÖNÜM KATSAYISININ DENEYSEL OLARAK HESAPLANMASI 28

3.1 Çekme Tankı Özellikleri 28
3.2 Model Özellikleri 29
3.3 Zorlayıcı Yalpa Mekanizması 31
3.4 Veri Toplama 33
3.4.1 Deney Koşulları 34
3.5 Deney Sonuçları 35

BÖLÜM 4

YALPA SÖNÜMÜNÜN SAYISAL OLARAK MODELLENMESİ VE ANALİZİ 38

4.1 Akışkanlar Mekaniği Temel Denklemleri 38
4.1.1 Kütlenin Korunumu 39
4.1.2 Momentumun Korunumu 39
4.2 Sonlu Hacimler Yöntemi 40
4.2.1 RANS Denklemleri 40
4.2.2 Reynolds-Gerilme Denklemi 41
4.2.3 Standart k-ε Türbülans Modeli 42
4.3 Sayısal Çözücü 43
4.4 Yalpa Hareketinin Sayısal Modellenmesi 44
4.4.1 Hesaplama Modeli ve Ağ Yapısı 44
4.4.2 Sınır Şartları 46
4.4.3 Başlangıç Koşulları 47
4.4.4 Yalpa Hareketi 48
4.4.5 Hassaslık Analizleri 50

BÖLÜM 5

GEMİ SU ÇEKİMİNİN YALPA SÖNÜMÜNE ETKİSİ 53

5.1 Giriş 53
5.2 Zamana Bağlı Yalpa Hareketi ve Yalpa Momenti 54
5.3 Yalpa Sönüm Katsayısı Sonuçları 57
5.4 Boyutsuz Yalpa Sönüm Katsayısı 60
5.4.1 Boyutsuz Yalpa Sönüm Katsayılarının Karşılaştırılması 61
5.5 Yalpa Omurgası Normal Kuvveti Hesabı 62
5.5.1 Yalpa Omurgası Kuvvet Modeli 65
5.6 Tekne Üzerindeki Basınç Dağılımının Sayısal Olarak Hesaplanması 67
5.7 Tekne Etrafında Girdap Oluşumu ve Girdap Saçılışı 70
5.8 Yalpa Sönüm Katsayısının Yalpa Frekansı ve Açısına Göre Değişimi 75

BÖLÜM 6

GENİŞ YALPA AÇISININ YALPA SÖNÜMÜNE ETKİSİ 78

6.1 Giriş 78
6.2 Yalpa Momentlerinin Sayısal Olarak Hesaplanması 79
6.3 Yalpa Sönüm Katsayıları 84
6.3.1 Sayısal Sonuçların Ikeda Metodu ile Karşılaştırılması 86
6.4 Tekne Etrafında Girdap Oluşumu ve Girdap Saçılışı 87

BÖLÜM 7

YALPA OMURGASI GENİŞLİĞİNİN YALPA SÖNÜMÜNE ETKİSİ 93

7.1 Giriş 93
7.2 Yalpa Momentlerinin Sayısal Olarak Hesaplanması 94
7.3 Yalpa Sönüm Katsayıları 96
7.4 Tekne Etrafında Oluşan Hız Vektörleri ve Girdaplar 97

BÖLÜM 8

SONUÇ VE ÖNERİLER 99

KAYNAKLAR 103

ÖZGEÇMİŞ 107

SİMGE LİSTESİ

A_{44}	Ek su kütlesi atalet momenti
b_{BK}	Yalpa omurgası genişliği
B	Genişlik
B_{44}	Yalpa sönüm katsayısı
B_e	Eşdeğer lineer yalpa sönüm katsayısı
B_1	Lineer yalpa sönüm bileşeni
B_2	Kuadratik yalpa sönüm bileşeni
B_3	Kübik yalpa sönüm bileşeni
B_F	Sürtünme kaynaklı yalpa sönüm bileşeni
B_E	Girdap kaynaklı yalpa sönüm bileşeni
B_L	Kaldırma kuvvetinden kaynaklanan yalpa sönüm bileşeni
B_W	Dalga kaynaklı yalpa sönüm bileşeni
B_{BK}	Yalpa omurgası kaynaklı yalpa sönüm bileşeni
B_{BKN}	Yalpa omurgası normal kuvveti kaynaklı yalpa sönüm bileşeni
B_{BKH}	Yalpa omurgası tekne etkileşimi kaynaklı yalpa sönüm bileşeni
B_{BKW}	Yalpa omurgasının oluşturduğu dalga kaynaklı yalpa sönüm bileşeni
C_{44}	Yalpa doğrultma katsayısı
C_B	Blok katsayısı
C_D	Direnç katsayısı
C_M	Orta kesit katsayısı
C_P	Basınç katsayısı
d	Su çekimi
D	Derinlik
d_{BK}	Serbest yüzeyden yalpa omurgasına olan mesafe
F_{BK}	Yalpa omurgasına etki eden normal kuvvet
Fn	Froude sayısı
g	Yerçekimi ivmesi
GM	Metasantr yüksekliği
GZ	Doğrultucu moment kolu
I_{44}	Gemi yalpa atalet momenti
KG	Ağırlık merkezinin dikey mesafesi
L	Uzunluk
M_{44}	Toplam yalpa momenti
OG	Serbest su yüzeyinden ağırlık merkezine olan mesafe
r_{BK}	Yalpa ekseninden yalpa omurgasına olan mesafe

R	Sintine dönümü yarıçapı
t	Zaman
T	Yalpa periyodu
U	İleri hız
∇	Deplasman hacmi
ε	Faz farkı
ω	Yalpa frekansı
ϕ	Yalpa açısı
ϕ_a	Yalpa genliği
ϕ_m	Ortalama yalpa açısı
ρ	Yoğunluk

KISALTMA LİSTESİ

CFD	Computational Fluid Dynamics
DTMB	David Taylor Model Basin
FA	Fourier Analizi
FPSO	Floating Production Storage and Offloading
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
ITTC	International Towing Tank Conference
ONR	Office of Naval Research
PIV	Particle Image Velocimetry
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
SSFSRVM	Slender-Ship Free-Surface Random Vortex Method
VOF	Volume of Fluid

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Serbest bırakma testi 10
Şekil 2. 2 Farklı ileri hızlarda serbest bırakma testi [49] 11
Şekil 2. 3 Zorlanmış yalpa testi 11
Şekil 2. 4 Serbest bırakma testi eğrisi örneği 12
Şekil 2. 5 Örnek yalpa sönüm eğrisi ve denklemi 13
Şekil 2. 6 Yalpa sönümü bileşenlerinin yalpa açısına göre değişimi [16] 16
Şekil 2. 7 Yalpa sönümü bileşenlerinin yalpa frekansına göre değişimi [16] 17
Şekil 2. 8 Yalpa sönümü bileşenlerinin ileri hıza göre değişimi [16] 17
Şekil 2. 9 Yalpa sönümünün dalga bileşeni 18
Şekil 2. 10 Yalpa sönümünün sürtünme bileşeni 20
Şekil 2. 11 Kesit etrafında girdap oluşumu [13] 21
Şekil 2. 12 Yalpa omurgası direnç katsayısı [11] 24
Şekil 2. 13 Yalpa omurgasının tekne yüzeyinde oluşturduğu basınç dağılımı [15] 25
Şekil 2. 14 Duvar bordalı gemi için r_{BK} ve R gösterimi 26
Şekil 3. 1 Çekme tankının üstten ve profil görünüşleri 29
Şekil 3. 2 İki boyutlu Seri 60 orta kesit modeli 30
Şekil 3. 3 Yalpa omurgalı Seri 60 orta kesit resmi 30
Şekil 3. 4 Zorlayıcı yalpa mekanizması gösterimi 31
Şekil 3. 5 Çekme tankı ve zorlayıcı yalpa mekanizması 32
Şekil 3. 6 Zorlayıcı yalpa mekanizması detaylı görüntüsü 32
Şekil 3. 7 Deneye hazır tekne modelinin görüntüsü 32
Şekil 3. 8 Zorlayıcı yalpa mekanizması frekans ayarlama cihazı 33
Şekil 3. 9 Tekne üzerindeki strengeç 33
Şekil 3. 10 Ölçülen kuvvet ve yalpa açısı değerleri 34
Şekil 3. 11 Deney sırasında maksimum yalpa genliği durumu 35
Şekil 3. 12 Deney sırasında serbest yüzeye yaklaşma durumu 35
Şekil 3. 13 8.59^o yalpa genliği için yalpa momentleri deney sonuçları 36
Şekil 3. 14 11.38^o yalpa genliği için yalpa momentleri deney sonuçları 36
Şekil 3. 15 14.38^o yalpa genliği için yalpa momentleri deney sonuçları 37
Şekil 3. 16 27.27^o yalpa genliği için yalpa momentleri deney sonuçları 37
Şekil 4. 1 Sayısal çözücü akış diyagramı 43
Şekil 4. 2 Kullanılan hesaplama modeline uygulanan ağ yapısı 45
Şekil 4. 3 Hareketli iç bölge ağ yapısı 45
Şekil 4. 4 Yalpa omurgası etrafındaki ağ yapısı 46

Şekil 4. 5 Sınır şartlarının hesaplama modeli üzerinde gösterilmesi 47
Şekil 4. 6 Başlangıç fonksiyonu grafiği 49
Şekil 4. 7 Yalpa hareketi 49
Şekil 4. 8 Farklı zaman aralıkları için moment eğrileri 51
Şekil 4. 9 Farklı zaman aralıklarında toplam yalpa sönüm katsayıları 51
Şekil 4. 10 Farklı ağ yapıları için eleman yükseklikleri (δ = 0.005m ve δ = 0.001m) 52
Şekil 4. 11 Farklı ağ yapısı boyutları için toplam yalpa sönüm katsayıları 52
Şekil 5. 1 Su çekimi değişimi aralığının tekne orta kesitinde gösterimi 54
Şekil 5. 2 Min. yalpa açısında yalpa omurgasının serbest yüzeyden uzaklığı 55
Şekil 5. 3 Maks. yalpa açısında yalpa omurgasının serbest yüzeyden uzaklığı 55
Şekil 5. 4 Tekne yalpa hareketi 56
Şekil 5. 5 Farklı su çekimleri için gemiye etki eden yalpa momenti 56
Şekil 5. 6 Faz farkı gösterimi 57
Şekil 5. 7 Farklı su çekimleri için toplam yalpa sönüm katsayıları 59
Şekil 5. 8 Farklı su çekimleri için yalpa omurgası sönüm katsayıları 60
Şekil 5. 9 Farklı su çekimleri için boyutsuz yalpa sönüm katsayıları 62
Şekil 5. 10 Farklı su çekimleri için yalpa omurgası normal kuvvetleri 63
Şekil 5. 11 Farklı su çekimleri için direnç katsayıları 64
Şekil 5. 12 Yalpa omurgasına etkiyen kuvvet (Sayısal Yöntem ve Morison Denklemi) 67
Şekil 5. 13 Ikeda düzeneğinin gösterimi [15] 67
Şekil 5. 14 Tekne etrafındaki basınç dağılımı (Ikeda Metodu)[15] 68
Şekil 5. 15 Farklı su çekimlerinde tekne etrafındaki basınç dağılımı (Sayısal Yöntem) 70
Şekil 5. 16 Normal su çekimi (d=72mm) durumunda girdap oluşumu 72
Şekil 5. 17 Düşük su çekimi (d=30mm) durumunda girdap oluşumu 74
Şekil 5. 18 Farklı su çekimleri için girdap oluşumlarının basınç dağılımına etkisi 75
Şekil 5. 19 8.59^{o} için boyutsuz yalpa sönüm katsayılarının frekansla değişimi 76
Şekil 5. 20 11.38^{o} için boyutsuz yalpa sönüm katsayılarının frekansla değişimi 76
Şekil 5. 21 14.38^{o} için boyutsuz yalpa sönüm katsayılarının frekansla değişimi 76
Şekil 5. 22 T=0.8 sn için yalpa sönüm katsayılarının yalpa açısına göre değişimi 77
Şekil 5. 23 T=1.0 sn için yalpa sönüm katsayılarının yalpa açısına göre değişimi 77
Şekil 5. 24 T=1.2 sn için yalpa sönüm katsayılarının yalpa açısına göre değişimi 77
Şekil 6. 1 47° yalpa açısına maruz kalmış USS Cowpens 79
Şekil 6. 2 Farklı yalpa açılarında yalpa omurgasının serbest yüzeyden uzaklığı 80
Şekil 6. 3 Farklı yalpa genlikleri için toplam yalpa momenti eğrileri 81
Şekil 6. 4 Toplam ve yalpa omurgası yalpa momenti 82
Şekil 6. 5 Farklı yalpa açıları için yalpa omurgası momenti eğrileri 82
Şekil 6. 6 Yalpa omurgası momenti eğrilerinin detaylı gösterimi 83
Şekil 6. 7 Geniş yalpa açısında serbest yüzeyin yalpa omurgası momentine etkisi ... 84
Şekil 6. 8 Farklı yalpa açılarında boyutsuz yalpa sönüm katsayıları 84
Şekil 6. 9 Boyutsuz yalpa sönüm katsayıları (sayısal ve deney) 85
Şekil 6. 10 Boyutsuz toplam yalpa ve yalpa omurgası sönüm katsayıları 86
Şekil 6. 11 Farklı açılarda yalpa omurgası sönümü oranı 86
Şekil 6. 12 Farklı yalpa açılarında boyutsuz yalpa sönüm katsayıları 87
Şekil 6. 13 Farklı yalpa açılarında tekne etrafında oluşan girdaplar 88
Şekil 6. 14 20.0^{o} yalpa açısında tekne etrafında oluşan girdaplar 90
Şekil 6. 15 27.27^{o} yalpa açısında tekne etrafında oluşan girdaplar 92

Şekil 7. 1 Farklı yalpa omurgası genişliklerinin gösterimi 93
Şekil 7. 2 Farklı yalpa omurgası genişlikleri için toplam yalpa momenti eğrileri 94
Şekil 7. 3 Farklı yalpa omurgası genişlikleri için yalpa omurgası momenti eğrileri 95
Şekil 7. 4 Farklı yalpa omurgası genişlikleri için boyutsuz yalpa sönüm katsayıları ... 96
Şekil 7. 5 Farklı yalpa omurgası genişlikleri için hız vektörleri 97
Şekil 7. 6 Farklı yalpa omurgası genişlikleri için girdap büyüklükleri 98

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3. 1 Model ana boyutları 30
Çizelge 3. 2 Deney koşulları 34
Çizelge 4. 1 Başlangıç koşulları 47

ÖZET

YALPA SÖNÜMÜNÜN GEMİ KESİTİ İÇİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Burak YILDIZ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ

Yalpa hareketinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi operasyon ve güvenlik sebeplerinden dolayı büyük önem taşımaktadır. Rezonans bölgesinde gemi yüksek genlikli yalpa hareketine maruz kalabilir ve bu da geminin devrilmesine, yükün kaymasına, güverte yüklerinin hasara uğramasına ve istenmeyen diğer sonuçlara neden olabilir. Yalpa hareketi haricindeki diğer gemi hareketleri potansiyel teori yardımıyla doğru bir şekilde tahmin edilebilir. Bunun sebebi, diğer gemi hareketlerinden farklı olarak, viskoz sönümün özellikle rezonans bölgesinde yalpa hareketinde önemli bir etkiye sahip olmasıdır.

Viskoz yalpa sönümünü hesaplamak için deney sonuçları kullanılarak ampirik veya yarı ampirik formüller geliştirilmiştir. Bu formüllerden en doğru sonuç vereni ve yaygın olarak kullanılanı, Ikeda metodu olarak bilinen ve yalpa sönümünü beş ayrı bileşene ayırarak hesaplayan yöntemdir. Bu yöntem belli tipte bir gemi kullanılarak geliştirilmiştir ve her bir parametre için belli aralıklar belirlenmiştir. Bu sebepten dolayı yeni tipte bir gemi kullanıldığında ve verilen aralığın dışında bir parametre belirlendiğinde yöntem gerçeğinden farklı değerler vermektedir. Yalpa sönümünü en doğru şekilde hesaplamanın yolu model deneylerdir. Ancak pahalı ve zaman aldığından dolayı farklı tip gemi veya yalpa omurgası için araştırma yapmayı zorlaştırmaktadır.

Gelişen teknolojiyle beraber bilgisayar hesaplama hızındaki artış, yalpa sönümü hesabında Reynold averaged Navier-Stokes (RANS) denklemlerini sayısal olarak çözen Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programlarının kullanılmasını yaygın hale

getirmiştir. RANS çözücüler sınır tabakalardaki girdap oluşumları, girdap saçılışları ve türbülans etkileri gibi viskoz sönümün ana fiziksel unsurlarını içerir ve doğru sonuçlar almamızı sağlar. Bunlara ek olarak deneylere kıyasla daha ekonomiktir ve daha kısa sürede analiz yapılmasını sağlar.

Bu çalışmada serbest yüzey etkisi altında zorlanmış yalpa hareketi yapan yalpa omurgasına sahip iki boyutlu gemi kesiti etrafındaki akış RANS çözücü kullanılarak incelenmiştir. Yalpa sönüm katsayıları sayısal olarak hesaplanmış ve yapılan deneylerle de karşılaştırılarak yalpa sönüm katsayısının sayısal olarak doğru bir şekilde hesaplanabildiği gösterilmiştir. Çeşitli parametreler (yalpa frekansı, yalpa açısı, gemi su çekimi ve yalpa omurgası genişliği) için deneysel ve sayısal analizler yapılarak bu parametrelerin yalpa sönümüne etkisi gösterilmiştir. Ayrıca sığ su çekimi ve geniş yalpa genlikleri gibi Ikeda metodunun yetersiz kaldığı koşullar için hesaplamalar yapılmış ve metodun bu koşullarda neden farklı sonuçlar verdiği incelenmiştir. Viskoz sönüme neden olan tekne ve yalpa omurgası etrafındaki girdap oluşumları ve girdap saçılışları RANS çözücü yardımıyla gösterilmiş ve yalpa sönümüne etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yalpa sönümü, HAD, RANS, Ikeda metodu, yalpa omurgası, geniş yalpa açısı, sığ su çekimi

ABSTRACT

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF ROLL DAMPING FOR A SHIP HULL SECTION

Burak YILDIZ

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

PhD. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ

Accurate predictions of roll motion for operational and safety considerations are paramount. Large amplitude roll motions may lead to capsize, cargo shift, loss of deck cargo and other undesirable consequences. However, the accuracy of the calculated results for roll motion lag behind the other degrees of freedom. This is because, unlike other degrees of freedom, viscous damping plays an important role in roll, especially near resonance.

In the potential flow programs, viscous roll damping effects are accounted by using empirical or semi empirical methods. The most accurate and commonly used method has been established by Ikeda where roll damping is divided into five components; friction, wave, eddy, naked hull lift and bilge keel damping. However, the method calculates roll damping for conventional hull forms and the data for each component are limited to a range of parameters. Therefore, the method should be carefully investigated when new and modern designs are involved. The most accurate way to calculate roll damping is model tests. However, model testing is expensive and time consuming to carry out experiments so that it is difficult to investigate the influence of different hull and bilge keel geometries.

With the development of technology and fast computers Computational Fluid Dynamics (CFD) based on Reynold averaged Navier-Stokes (RANS) solvers have recently become a powerful tool for the assessment of the roll damping coefficient. RANS solvers naturally incorporate the effect of viscosity, effective creation of vortices

in the boundary layer, vortex shedding and turbulence and hence are likely to produce better results. Also, they may offer a cost-effective and fast method complementary to model tests to obtain viscous roll damping coefficients.

In this study, the flow around a forced rolling two dimensional hull section with bilge keel at free surface is simulated by using RANS solver. Roll damping coefficients are calculated numerically and validated with experiments to show if RANS code can correctly predict the damping coefficients. A series of model experiments and numerical studies are carried out for different parameters (roll frequency, roll amplitude, ship draft and bilge keel width) to show the effects of parameters on roll damping. Moreover, the conditions, such as shallow draft and large roll amplitude where Ikeda's estimation method is no longer sufficient, are investigated to show why this method is insufficient for accurate and physical correct prediction. The generated vortices and vortex shedding around the hull and bilge keel are observed by using RANS solver to show the effect on roll damping.

Keywords: Roll damping, CFD, RANS, Ikeda's method, bilge keel, large roll amplitude, shallow draft

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Yalpa sönümünün hesaplanması uzun zamandır gemi tasarımcıları için zor bir görev olmuştur. Yalpa hareketinin tasarım aşamasında doğru bir şekilde analiz edilmesi, ilerde geminin karşılaşabileceği olası devrilme olaylarının önlenmesi açısından katkı sağlar. Bu da araştırmacıları bu konuda çalışmaya yöneltmiştir.

Yalpa hareketinin azalmasına yönelik ilk uygulamalar, binlerce yıl öncesine Yunanlar tarafından gemilerde yalpayı azaltmak için düz levha omurgalar kullanmalarıyla başlamıştır. Bu en eski ve en basit yalpa sönümleme aracı olarak bilinir. Son zamanlarda gemilerde uygulanan diğer yalpa sönümleme sistemleri; fin stabilizerler, dümenler, jiroskopik stabilizeler ve U-tanklardır. Bu sönüm sistemleri kullanılarak gemilerin aşırı genlikli yalpalardan uzak durması sağlanır ve gemi ve mürettebat için daha emniyetli bir seyir sağlanır. Ancak önemli nokta gemilerin yalpa hareketinin önceden doğru bir şekilde tahmin edilmesi, buna göre bu sistemlerin gemiye uygulanması ve bu sistemlerle beraber geminin yalpa hareketinde meydana gelen değişimin hesaplanmasıdır. Çünkü bu sönüm sistemleri, yalpa omurgası hariç, karmaşık ve pahalı sistemlerdir. Bu nedenle hesapların doğru bir şekilde yapılarak gemiye avantaj sağlayacak en uygun yalpa sönüm sisteminin uygulanması gerekmektedir.

Yalpa sönümü deneysel olarak ve sayısal olarak hesaplanabilir. Deneysel olarak yapılan hesaplamalar sonucu ampirik formüller geliştirilmiş ve literatürde yayınlanmıştır. Bu tez kapsamında literatürde yalpa sönümü üzerine yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar incelenmiştir.

Yalpa hareketi ve yalpa sönümü üzerine yapılan ilk çalışmalardan birisi Froude [1] tarafından 1861 yılında gerçekleştirilmiştir. Froude çalışmasında, yalpa hareketi esnasındaki enerji kaybını hıza bağlı lineer ve kuadratik bir formda veren bir formül geliştirmiştir. Dalga yüksekliği ve dalga dikliğinin yalpa hareketi üzerine olan etkisini ve yalpa hareketinin gemi tekne formu tasarımına etkisini incelemiştir. Froude, çalışma sonucunda yalpa hareketini azaltmak için yalpa omurgası kullanılması gerektiğini önermiştir. Ayrıca pasif U-tankların kullanılmasıyla ilgili ilk çalışma da Froude tarafından gerçekleştirilmiştir. Vugts [2] yalpa yapan bir silindir kullanarak gerçekleştirdiği deneyler sonucunda yan öteleme, dalıp çıkma ve yalpa hareketlerine ait hidrodinamik katsayıları hesaplamıştır. Bu deneysel çalışma, yapılmakta olan birçok sayısal çalışma için doğrulama kaynağı olmaktadır. Sasajima [3], Tanaka [4]-[7], Martin [8], Kato [9]-[10] 1954-1965 yıllarında yaptığı çalışmalarda yalpa sönümünü fiziksel yönden incelemişlerdir. 1970 yılından sonra yalpa sönümü konusunda daha detaylı ve daha doğru sonuçlar veren çalışmalar yürütülmüştür. Ikeda, vd. [11]-[15] yaptığı çalışmalarda yalpa sönümünü etkileyen parametreleri detaylı bir şekilde deneysel olarak incelemiş ve yalpa sönümü hesabı için yarı ampirik bir formül önermiştir. Günümüzde de en çok bilinen ve kullanılan bu yöntem yalpa sönümü konusunda yapılan çalışmaların temeli olarak bilinir. Yapılan bu çalışmada, doğrusal olmayan yalpa sönümüne eşdeğer olan lineer bir yalpa sönüm katsayısı tanımlanmış ve yalpa sönümü bileşenlerine ayrılmıştır. Her bir bileşen için yalpa genliğine, frekansa ve ileri hıza bağlı olarak formüller önerilmiştir. 1981 yılında ise yapılan bu çalışmalar Himeno [16] tarafından daha ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Faltinsen [17] yaptığı serbest bırakma deneyleri sonucu lineer olmayan yalpa sönüm katsayılarını hesaplayan bir yöntem geliştirmiştir. Oliveira [18] çeşitli model testler yapmıştır ve Fernandes, vd. [19] tarafından önerilen lineer olmayan yaklaşımı kullanmış ve çalışmasında geniş ve küçük yalpa açıları için Keulegan-Carpenter etkisinin farklı olduğunu göstermiştir. Ayrıca geniş açılarda oluşan girdapların tekne altına doğru ilerlediğini ve bunun sönümü arttırdığını fakat küçük açılarda oluşan girdapların saçıldığını göstermiştir. Yapılan bir diğer çalışmada yüksek hızlı tekneler için yalpa sönümü hesaplama metodu Ikeda ve Katayama [20] tarafından önerilmiştir, aynı yazarlar daha sonraki çalışmalarında katamaran ve trimaranlar için yalpa sönümü hesabını geliştirmişlerdir. Ikeda [21] 2004

yılında yaptığı bir diğer çalışmasında yalpa omurgasının optimum yerini hesaplamak için önceden önerdiği metodu detaylandırarak geliştirmiştir. Ikeda bir diğer çalışmasında önerdiği metodu geliştirerek daha farklı tipteki gemilere de uygulanmasını sağlamıştır. Yapılan bazı çalışmalarda Ikeda tarafından geliştirilen metodun kısıtlamalar getirdiği noktalara değinilmiştir. Tanaka, vd. [22] yalpa omurgasına sahip gemilerde sığ su çekiminin yalpa sönüm katsayısına olan etkisini deneysel olarak incelemiş ve sonuçların Ikeda yöntemiyle olan farkını göstermiştir. Kawahara, vd. [23] 2009 yılında yaptığı çalışmada farklı tipteki gemi geometrisi için Ikeda yöntemiyle yalpa sönümünü hesaplamış ve bu yöntemin farklı tipteki gemiler için revize edilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Deneysel yöntemler kullanarak gemi hareketlerinin hesaplanması hem zaman aldığından hem de pahalı olduğundan, gemi hareketlerini hesaplamak için kullanılan lineer potansiyel teori deneysel yöntemlerin getirdiği zorlukları ortadan kalmıştır. Ancak bu yöntem yalpa hareketini hesaplamada yeterli olmamaktadır, çünkü yalpa yalpa sönümü viskoziteye bağlı ve doğrusal olmayan bir terimdir. Bu sebepten dolayı araştırmacılar yalpa sönümünü hesaplamak için deneysel verileri kullanarak doğrusal olmayan yalpa sönüm modelleri geliştirmişlerdir.

Kerwin [24], Haddara [25], Dalzell [26], Haddara [27] ve Nayfeh, vd. [28] yalpa sönümünü hesaplamak üzerine araştırmalar yapmışlardır. Araştırmalarında doğrusal artı kuadratik doğrusal olmayan model kullanmışlardır, Haddara [25] lineer artı kübik hıza bağlı bir model önermiştir. Dalzell [26] kuadratik ve kübik yalpa modellerini en küçük kareler tekniği kullanarak incelemiştir. Chakrabarti [29] muhtemel yalpa sönüm bileşenlerini ve bunların ampirik katkılarını incelemiştir. Yandan gelen dalgalarda yalpa hareketi yapan bir geminin hareketini incelemek için Taylan [30] doğrusal olmayan bir denklem önermiştir ve genelleştirilmiş Duffing metodunu kullanarak bu denklemi çözmüştür. Literatürdeki yalpa sönüm modellerini kullanarak kendi geliştirdiği denklemde uygulamıştır. Rezonans durumunda dört farklı gemi için yaptığı hesaplar sonucunda doğrusal olmayan yalpa modelinde sönüm teriminin ne kadar önemli olduğunu vurgulamıştır. Yalpa sönümünün hatalı seçiminin, özellikle yalpa genliğinin tepe yaptığı noktalarda hatalı sonuçlar almamıza sebep olabileceğini göstermiştir.

Gelişen teknolojiyle beraber bilgisayar hesaplama gücündeki artış ve hesaplama zamanının azalmasıyla Hesaplamal Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemleri yalpa sönümü hesaplarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. HAD alanında yaşanan bu gelişmeler araştırmacıları gemi yalpa sönüm katsayısının sayısal olarak hesaplanması konusunda çalışmaya yöneltmiştir.

Yeung & Ananthakrishnan [31], viskoz bir akışkanda salınım hareketi yapan yüzen bir cisim için RANS tekniklerini kullanarak analizler yapmış ve bu alandaki öncü çalışmalardan birine imza atmıştır. Korpus ve Falzarano [32], Yeung, vd. [33], Sarkar ve Vassalos [34] tarafından yapılan çalışmalarda salınım yapan iki boyutlu gövdeler etrafındaki akış RANS metodu kullanılarak analiz edilmiş ve yalpa sönüm katsayıları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Korpus ve Falzorano hız, girdap ve basınç paremetrelerinin etkilerini detaylı olarak incelemişlerdir. Sarkar ve Vassalos ise COMET isimli RANS çözücü kullanarak kare ve yuvarlak sintine dönümüne sahip tekneler için farklı yalpa genliklerinde yalpa sönümünü incelemişlerdir. Yalpa sönümünün tekne geometrisine bağlı olduğu kadar sintine yarıçapına da bağlı olduğunu göstermişlerdir. Miller, vd. [35] tarafından yürütülen çalışmada, yalpa omurgasına sahip batmış üç boyutlu bir silindir için zorlanmış yalpa durumunda etki eden kuvvetler ve momentler sayısal olarak hesaplanmış ve deneylerle karşılaştırılarak sonuçlar gösterilmiştir. Paap [36] yaptığı çalışmada, silindirik bir kesit için farklı geometrilerde yalpa omurgası kullanarak, yalpa omurgası geometrisinin yalpa sönümüne olan etkisini hem sayısal hem de deneysel olarak incelemiştir. Wilson [37] URANS metodunu kullanarak (CFDSHIP-IOWA) DTMB 5512 için gemi hareketlerini hesaplamış ve gemi etrafında oluşan akış ve dalga formlarını Irvine'in [38] deneysel çalışmalarıyla karşılaştırmıştır. Jaouen, vd. [39] 2011 yılında yaptığı çalışmada, iki boyutlu gemi kesitleri için serbest yüzey etkisi olmadan yalpa sönüm katsayısını ReFRESCO adındaki URANS yazılımıyla hesaplamıştır ve sonuçları Ikeda, vd. [11] ile karşılaştırarak doğrulamıştır. Oliveira ve Fernandes [40] yalpa sönüm katsayısının yalpa genliğiyle arttığını ve bir noktadan sonra bu artışın durduğunu yapmış olduğu sayısal çalışmalar sonucu gözlemlemiştir ve bu sonuçlara dayanarak doğrusal olmayan bir yöntem önermişlerdir. Aynı yazarlar [41] tarafından 2014 yılında yapılan diğer bir çalışmada da önceki çalışma geliştirilmiş ve artan yalpa genliğiyle yalpa sönümünün belli bir genlik değerinden sonra azalmaya

geçtiği görülmüştür. Wanderley, vd. [42] çalışmasında RANS kodu kullanarak yalpa esnasında tekneden saçılan girdapların yalpa sönümüne etkisini ve tekne üzerinde oluşan basınç dağılımını incelemiştir. Sadat Hosseini [43] ONR Tumblehome gemisinin belli hızlardaki yalpa hareket analizlerini CFDSHIP-IOWA koduyla hesaplamış Irvine'in [38] deneysel verileri ile karşılaştırmıştır.

Bangun, vd. [44] iki boyutlu dikdörtgen kesitli bir duba için hidrodinamik katsayıları hesaplamış ve Yago, vd. [45] tarafından yapılan deney sonuçları ile karşılaştırmıştır. Bonfiglio, vd. [46] ve Henning [47] ise yaptığı çalışmalarda iki boyutlu gemi kesiti için zorlanmış yalpa durumundaki hidrodinamik sönüm ve ek kütle katsayılarını sayısal olarak hesaplamışlardır, sonuçlar Vugts [2] tarafından yürütülen deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yang, vd. [48] DTMB 5512 modeli için farklı yalpa genliklerinde serbest bırakma simülasyonları yaparak yalpa sönüm katsayılarını hesaplamış ve sonuçları Irvine [38] tarafından yapılan deneylerle karşılaştırmıştır. Handschel, vd. [49] yalpa sönüm katsayısı hesabında serbest bırakma analizi ve zorlanmış yalpa analizlerinin farklı sonuçlar verdiğini sayısal olarak ve deneysel olarak göstermiştir. Bassler [50] yaptığı çalışmada geniş yalpa açılarındaki zorlamalı yalpa analizlerini bir URANS çözücü kullanarak yapmış ve hidrodinamik sönüm ve ek kütle katsayılarını hesaplamıştır. Yaptığı çeşitli analizlerde tekne formunun, yalpa omurga formunun, güverte formunun ve serbest yüzeyin geniş açılardaki yalpa sönüm katsayısını ve ek kütle katsayısını etkilediğini göstermiştir ve sonuçlarını deneysel çalışmalarıyla desteklemiştir. Gao [51] RANS metoduna dayalı HAD çözücü ile DTMB 5415 modelinin serbest bırakma simülasyonları üzerine bir çalışma yürütmüştür ve sonuçları Irvine'in [38] deneysel çalışmalarıyla karşılaştırmıştır. Avalos, vd. [52] FPSO tipi bir teknenin iki boyutlu kesiti için iki boyuttaki Navier-Stokes denklemlerini sonlu hacimler metodu kullanarak çözmüştür. Sintine yarıçapının yalpa sönümüne olan etkisini ve yalpa omurgası etrafında oluşan girdapların etkisini deneylerle doğrulayarak göstermiştir. Jiang [53] SSFSRVM (Slender-Ship Free-Surface Random Vortex Method) adındaki yüksek bilgisayar hesaplama gücü gerektirmeyen viskoz akış çözücü kullanarak askeri bir gemi için serbest bırakma simülasyonları uygulamış ve farklı zamanlarda yalpa omurgası etrafında oluşan girdapları görüntüleyerek PIV deney sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Çalışmanın sonucunda farklı genişlikteki yalpa omurgası için ve farklı

hızlarda kullandığı viskoz akış çözücünün yalpa hareketini doğru bir şekilde hesapladığını ve akıştaki girdap oluşmalarını doğru bir şekilde gösterdiğini ortaya koymuştur. Kampen [54] ise yaptığı çalışmada iki boyutlu FPSO kesiti için zorlanmış yalpa hareketi uygulayarak, yalpa sönüm katsayılarını sayısal olarak ve Ikeda metodunu kullanarak hesaplamış ve ayrıca deneylerle doğrulamıştır. Ikeda metoduyla olan farklılıkları göstererek, farklılıkların neden kaynaklandığını detaylı bir şekilde göstermiş ve Ikeda tarafından önerilen yöntemi revize etmiştir. Yıldız, vd. [55] tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada ise iki boyutlu model kullanılarak sığ su çekiminin yalpa sönüm katsayısına olan etkileri hem sayısal hem de deneysel olarak hesaplanmıştır. Ayrıca sonuçlar Ikeda metodu ile kıyaslanarak Ikeda metodu ile olan farklılıkların arkasındaki nedenler araştırılmıştır.

Literatürdeki örneklerinde de görüldüğü üzere yalpa sönüm hesabının sayısal olarak hesaplanması üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda göze çarpan en önemli nokta, sayısal analizlerin deney sonuçları ile doğrulanmasıdır. HAD kullanılarak yapılan analizler deneysel olarak desteklenmediği sürece geçerliliği yoktur, yapılan analizlerde belli bir tecrübe ve birikime sahip olunduktan sonra deneye ihtiyaç olmadan, sadece HAD analizleri sonuçlarına bakarak bir sonuca varabiliriz. Bunun için öncelikle deneysel çalışmaların yapılması ve daha sonra simülasyonların yapılarak deneysel verilerle karşılaştırılması gerekmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Tez çalışması kapsamında, serbest yüzey etkisi altında zorlanmış yalpa hareketi yapan yalpa omurgasına sahip iki boyutlu gemi kesiti etrafındaki akış, HAD analizleri kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Bu analizler sayesinde yalpa sönüm katsayısının sayısal olarak doğru bir şekilde hesaplanması amaçlanmıştır.

Zorlanmış yalpaya maruz bırakılan tekne ve yalpa omurgasına etkiyen momentler belirlenen koşullar için sayısal olarak hesaplanarak, bu koşulların yalpa sönümüne etkisinin sayısal olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Tekne ve yalpa omurgasına etkiyen momentler ayrı ayrı hesaplanarak parametrelerin yalpa sönümüne etkileri detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Ayrıca tekne etrafındaki akış RANS çözücü ile gösterilmiş ve tekne ve yalpa omurgası etrafında oluşan girdaplar belirli zaman aralıklarında incelenmiştir.

Bu şekilde viskoz sönümün ana kaynağı olan girdapların incelenen koşullar için nasıl farklılık gösterdiğinin ve yalpa sönümünü nasıl etkilediğinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Model deneyler yardımıyla sayısal hesapların doğruluğunun ispat edilmesi amaçlanmıştır. Deneyler Japonya'da Osaka Prefecture Üniversitesi Gemi Model Deney Tankı'nda sayısal hesaplarda kullanılan iki boyutlu Seri 60 gemisine ait orta kesit modeli kullanılarak yürütülmüştür. Sığ su çekimi ve geniş yalpa açı durumları için deneyler yapılarak sayısal hesaplar doğrulanmıştır.

Literatürdeki çalışmalarda viskoz yalpa sönümünü hesaplamak için, deney sonuçları kullanılarak ampirik veya yarı ampirik formüller geliştirilmiştir. Bu formüllerden daha doğru sonuç vereni ve yaygın olarak kullanılanı Ikeda metodudur. Ancak bu metot bazı durumlarda gerçeğinden farklı sonuçlar vermektedir. Sayısal hesaplamalar için bu durumlar ele alınarak Ikeda metodunun kapsamadığı durumlar incelenmiş ve bu şekilde Ikeda metodunun neden yetersiz kaldığının gösterilmesi amaçlanmıştır. Sığ su çekimi ve geniş yalpa açısı durumları ele alınarak Ikeda metodu ile farklılıkların sayısal olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca yalpa omurgası genişliğinin yalpa sönümüne etkisi sayısal olarak incelenmiştir.

1.3 Hipotez

Zorlanmış yalpaya maruz bırakılan bir tekneye ait yalpa sönüm katsayısının, tekne etrafındaki akışın RANS çözücü kullanarak incelenmesiyle, doğru bir şekilde hesaplanacağı ve sayısal hesapların yürütülen model deneyleri ile uyum içinde olması öngörülmektedir.

Sığ su çekimi ve geniş yalpa açısı durumları gibi Ikeda metodunun kapsamadığı ve farklı sonuçlar verdiği durumlarda sayısal analizlerin daha doğru sonuç vermesi beklenmektedir. Tekne etrafındaki akışın incelenerek viskoz sönüme neden olan girdapların belirlenen durumlar için farklılıklar göstereceği ve bu farklılıkların yalpa sönüm katsayısını etkileyeceği beklenmektedir.

BÖLÜM 2

YALPA SÖNÜMÜ

Gemi yalpa hareketinin doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi için yalpa sönümünün doğru bir şekilde hesaplanması gerekmektedir. Bu bölümde yalpa hareket denklemi, yalpa sönümünün deneysel olarak ve Ikeda metodu kullanılarak hesaplanması konusunda detaylı bilgiler verilmiştir.

2.1 Yalpa Hareketi Denklemi ve Yalpa Sönüm Katsayısı

Tek serbestlik dereceli gemi yalpa hareketi kütle yay sönüm sisteminde olduğu gibi ikinci mertebeden bir adi diferansiyel denklem ile tanımlanır.

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

Burada a ataleti, b sönümü, c rijitliği gösterirken; $\phi, \dot{\phi}, \ddot{\phi}$ ise sırasıyla yalpa açısını, yalpa hızını ve yalpa ivmesini gösterir. $f(t)$ ise zorlayıcı fonksiyon olarak tanımlanır. Bu denklem tek serbest dereceli gemi yalpa hareketi için;

$$(I_{44} + a_{44})\ddot{\phi} + b_{44}\dot{\phi} + \rho g \nabla . GZ(\phi) = f(t) \tag{2.2}$$

formunda yazılır. Burada I_{44} gemi yalpa atalet momentini, a_{44} ek su kütlesi atalet momentini, b_{44} yalpa sönümünü, $\rho g \nabla$ gemi deplasmanını (ρ yoğunluk, g yerçekimi ivmesi, ∇ batan hacim) ve $GZ(\phi)$ ise doğrultucu moment kolunu gösterir.

Bu formülü daha da basitleştirirsek;

$$\ddot{\phi} + 2\delta\dot{\phi} + c(\phi) = F(t) \tag{2.3}$$

formunda yani salınım yapan bir kütle yay sistemi denklemi şekline dönüştürebiliriz. Burada 2δ sönümü, $c(\phi)$ rijitliği ve $F(t)$ zorlayıcı fonkiyonu gösterir ve

$$2\delta = \frac{b_{44}}{(I_{44}+a_{44})} \tag{2.4a}$$

$$c(\phi) = \frac{\rho g \nabla . GZ(\phi)}{(I_{44}+a_{44})} \tag{2.4b}$$

$$F(t) = A_W \sin(\omega t) \tag{2.4c}$$

şeklinde hesaplanır. Burada A_W dalga genliğini gösterirken, ω ise dalga frekansını gösterir. Rijitlik, $c(\phi)$, ise şu şekilde de ifade edilebilir.

$$c(\phi) = \omega_n^2 \frac{GZ(\phi)}{GM} \tag{2.5a}$$

Burada ω_n doğal yalpa frekansını verir ve

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\rho g \nabla . GM}{(I_{44}+a_{44})}} \tag{2.5b}$$

şeklinde hesaplanır. Burada GM metasantr yüksekliğini verir.

Gemi yalpa hareketinde sönüm kısmındaki lineer olmayan kısımları da eklersek denklem;

$$\left(I_{44} + A_{44}(\omega)\right)\ddot{\phi} + B_{44}\left(\dot{\phi}\right) + C_{44}(\phi) = M_{44}(t) \tag{2.6a}$$

$$B_{44}\left(\dot{\phi}\right) = B_1\dot{\phi} + B_2\dot{\phi}\left|\dot{\phi}\right| + B_3\dot{\phi}^3 \tag{2.6b}$$

şeklini alır. Burada lineer kısım viskoz etkileri, kuadratik kısım girdaptan kaynaklanan etkileri ve kübik terim de düzeltme faktörü olarak açıklanır. $M_{44}(t)$ ise yalpa momenti olarak ifade edilir. B_1, B_2 ve B_3 ise lineer ve lineer olmayan yalpa sönüm katsayıları olup serbest bırakma testi ile hesaplanabilir. Bu test ile ilgili detay ve hesabın nasıl yapıldığı bir sonraki bölümde detaylı olarak verilmiştir.

Bu lineer olmayan terimlerin doğru bir şekilde elde edilmesi ve analiz edilmesi zor olduğundan, bu terime karşılık gelen eşdeğer bir lineer yalpa sönüm katsayısı önerilmiştir, B_e (Ikeda, vd. [11]-[15]; Himeno, [16]).

$$B_{44}\left(\dot{\phi}\right) = B_e\dot{\phi} \tag{2.7}$$

Bu eşdeğer lineer katsayı lineer olmayan tüm fiziksel etkileri içerir ve tek bir katsayı şeklinde bize verir. Eşdeğer lineer yalpa sönüm katsayısı, B_e, zorlanmış yalpa testi veya Ikeda metodu ile hesaplanabilir. Bu iki yöntem de detaylı bir şekilde bir sonraki bölümde anlatılmıştır.

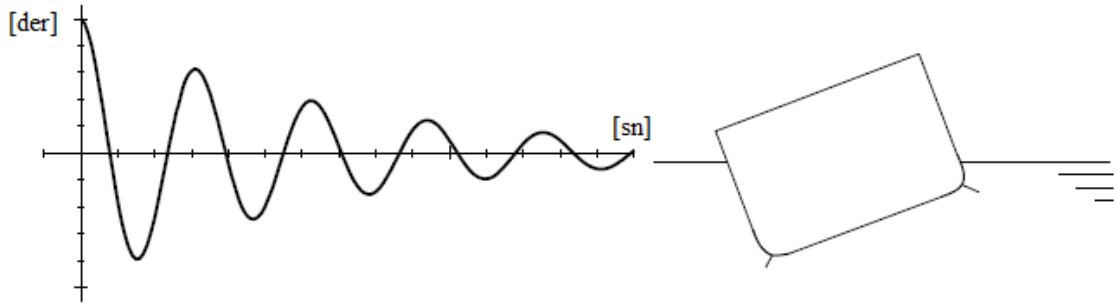
2.2 Deneysel Yalpa Sönümü Hesaplama Metotları

Deneysel olarak yalpa sönümünün hesaplanmasında iki farklı test vardır. Bunlar;

1. Serbest bırakma testi
2. Zorlanmış yalpa testi

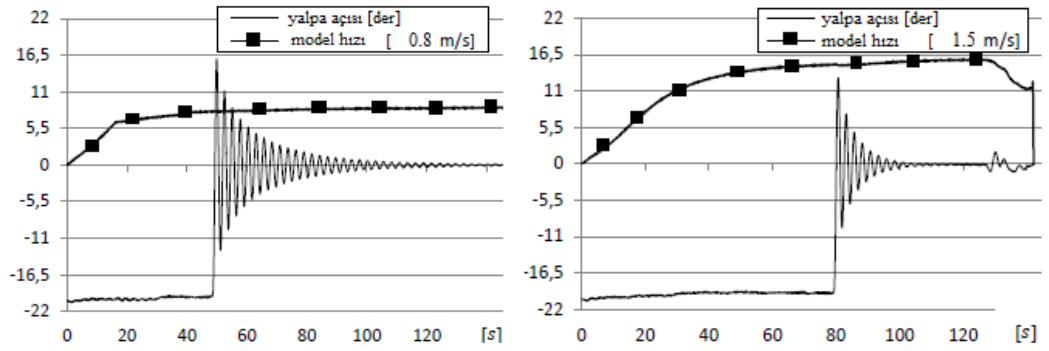
olarak adlandırılır.

Serbest bırakma testi diğer teste göre uygulaması daha basit ve daha ucuz bir yöntemdir. Serbest bırakma testinde model sakin suda belli bir ileri hızda ilerlerken, belli bir açıya kadar getirilip serbest bırakılır, model doğal frekansında salınım yapar ve yalpa genliği azalarak hareket eder (Şekil 2.1). Yalpa genliklerindeki azalma miktarlarından yalpa sönümü hesaplanır. Bu hareketi yaparken yan öteleme ve savrulma gibi yatay hareketler kısıtlanır, ileri hızda batma miktarı ve trim etkisi hesabı için dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri serbest bırakılır.



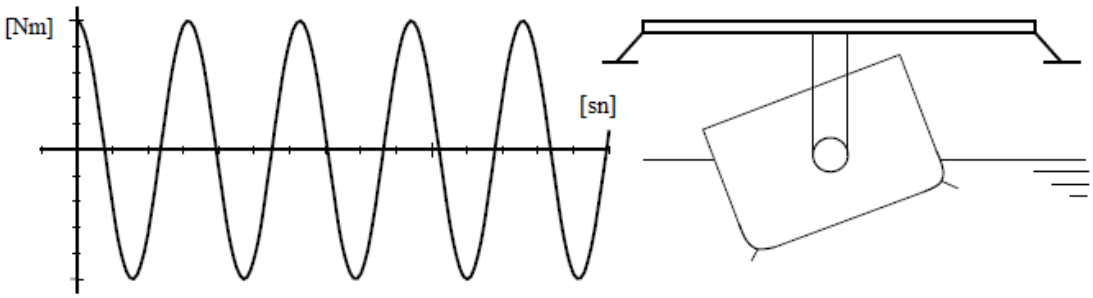
Şekil 2. 1 Serbest bırakma testi

Model belli bir açıya getirilip serbest bırakılırken uygulanan ek bir ivme yanlış hesaplamalara neden olabilir. Bu metodun en büyük dezavantajı herhangi bir zorlama kuvveti olmadığından dolayı ölçüm süresinin çok kısa olmasıdır ve bu da az sayıda yalpa periyodu ölçümü demektir. Hız arttıkça bu etkinin önemi daha da anlaşılmaktadır (Şekil 2.2). Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken önemli nokta, bu yöntemin frekansa bağlı olmamasıdır. Tekne sadece doğal frekansında hareket eder ve bu sebepten dolayı daha doğru sonuçlar elde etmek için deneyin birkaç farklı hızda yapılması gerekmektedir.



Şekil 2. 2 Farklı ileri hızlarda serbest bırakma testi [49]

Zorlanmış yalpa testi diğer yönteme göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir ve pahalı bir metottur. Model sabit bir eksende yalpa hareketine maruz bırakılır. Bu yöntemde yalpa hareketi haricindeki diğer hareketler kısıtlanır, dolayısıyla tek serbestlik dereceli bir hareket uygulanır (Şekil 2.3). Modele sıfır hızda veya ileri bir hızda istenilen açı ve istenilen frekansta hareket edecek şekilde moment uygulanır. Hareket stabil konuma gelene kadar modele zorlanmış moment uygulanmaya devam edilir.



Şekil 2. 3 Zorlanmış yalpa testi

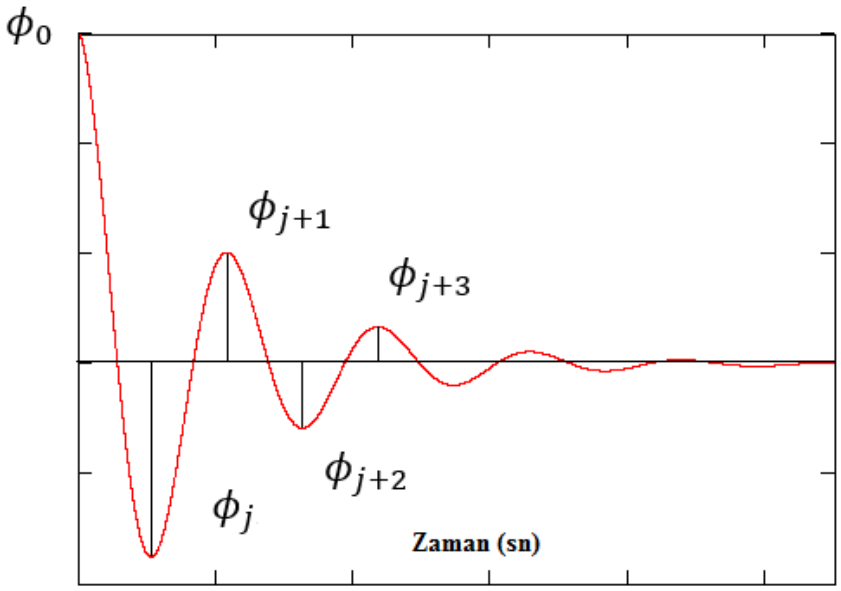
Geniş yalpa genliklerinde ve yüksek frekanslarda bu yöntem serbest bırakma testine göre daha uygundur. Bu yöntem kullanılarak çeşitli frekans, yalpa genliği ve ileri hızda yalpa sönüm katsayıları hesaplanabilir.

2.2.1 Serbest Bırakma Testi ile Yalpa Sönümü Hesabı

Serbest bırakma için tek serbestlik dereceli yalpa denklemi şu şekilde ifade edilir.

$$\left(I_{44} + A_{44}(\omega)\right)\ddot{\phi} + B_{44}\left(\dot{\phi}\right) + C_{44}(\phi) = 0 \tag{2.8}$$

Şekil 2.4'te gösterildiği gibi başlangıç yalpa açısı, ϕ_0, sonrasında oluşan yalpa genlikleri ϕ_j, ϕ_{j+1} vs. olarak ifade edilir.



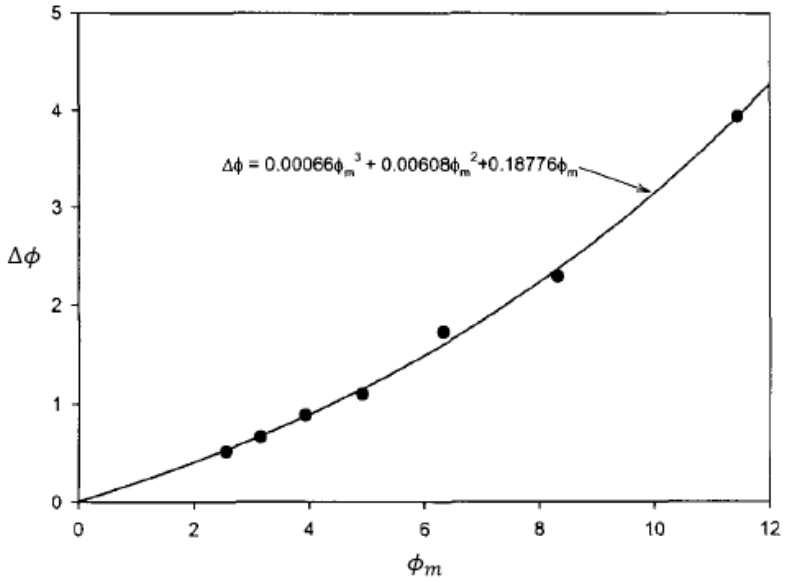
Şekil 2. 4 Serbest bırakma testi eğrisi örneği

Serbest bırakma deneyinden veya simulasyonlarından elde edilen yalpa genlikleri kullanılarak ortalama yalpa açısı ϕ_m, ve yalpa azalma miktarı, $\Delta\phi$, şu şekilde hesaplanır;

$$\phi_m = \frac{|\phi_j|+|\phi_{j+1}|}{2} \tag{2.9a}$$

$$\Delta\phi = |\phi_j| - |\phi_{j+1}| \tag{2.9b}$$

Daha sonra bu veriler kullanılarak, x ekseninde ϕ_m ve y ekseninde $\Delta\phi$, üçüncü dereceden bir polinom eğrisi uydurulur (Şekil 2.5).



Şekil 2. 5 Örnek yalpa sönüm eğrisi ve denklemi

Himeno [16] tarafından önerilen yalpa azalması ve ortalama yalpa açısı arasındaki bağıntıyı gösteren ifade kullanılarak;

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{2} 2\alpha\phi_m + \frac{4}{3}\beta{\phi_m}^2 + \frac{3\pi}{8}\omega_n\gamma{\phi_m}^3 \tag{2.10}$$

regresyon katsayıları α, β ve γ hesaplanır. Daha sonra uyduralan eğriden elde edilen regresyon katsayıları kullanılarak lineer, kuadratik ve kübik yalpa sönümü katsayıları hesaplanır.

$$B_1 = 2\alpha(I_{44} + A_{44}) \tag{2.11a}$$

$$B_2 = \beta(I_{44} + A_{44}) \tag{2.11b}$$

$$B_3 = \gamma(I_{44} + A_{44}) \tag{2.11c}$$

Bu katsayılar doğrusal olmayan yalpa denklemini modellemede kullanılır.

$$B_{44}(\dot{\phi}) = B_1\dot{\phi} + B_2\dot{\phi}|\dot{\phi}| + B_3\dot{\phi}^3 \tag{2.12}$$

2.2.2 Zorlanmış Yalpa Testi ile Yalpa Sönümü Hesabı

Zorlanmış yalpa testinde model diğer gemi hareketlerinden sınırlandırılarak sadece yalpa hareketine maruz bırakılır. Modele sıfır hızda belli bir frekansta ve belli bir yalpa genliğinde moment uygulanır.

$$\big(I_{44} + A_{44}(\omega)\big)\ddot{\phi} + B_{44}(\dot{\phi}) + C_{44}(\phi) = M_{44}(t) \tag{2.13}$$

Uygulanan moment gemiye düzenli bir şekilde sinüs fonksiyonu formunda yalpa hareketi yaptırır.

$$\phi(t) = \phi_a \sin(\omega t) \tag{2.14a}$$

$$M_{44}(t) = M_0 \sin(\omega t + \varepsilon) \tag{2.14b}$$

Burada ϕ_a yalpa hareketinin genliği, M_0 uygulanan zorlayıcı yalpa momentini genliği, ε ise faz farkıdır. Buradan verilenlerin yerine konmasıyla yalpa sönüm katsayısı;

$$B_{44}(\dot{\phi}) = B_e\dot{\phi} = \frac{M_0.\sin\varepsilon}{\phi_a.\omega} \tag{2.15}$$

şeklinde hesaplanır.

Hesaplanan eşdeğer lineer sönüm katsayısını lineer olmayan terimlerine (B_1, B_2 ve B_3) ayırmak istiyorsak yalpa hareketinin bir periyotta yaptığı salınımdaki enerji kaybını veren formülden yararlanabiliriz.

$$B_{44}(\dot{\phi}) = B_1\dot{\phi} + B_2\dot{\phi}|\dot{\phi}| + B_3\dot{\phi}^3 \tag{2.16a}$$

$$B_{44}(\dot{\phi}) = B_e\dot{\phi} \tag{2.16b}$$

$$E = 4\int_0^{\frac{\pi}{2\omega}} B_{44}(\dot{\phi})d\phi =$$

$$4\int_0^{\frac{\pi}{2\omega}} \left[\begin{matrix} B_1\omega\phi_a\cos(\omega t) + B_2\omega\phi_a\cos(\omega t)|\omega\phi_a\cos(\omega t)| + \\ B_3(\omega\phi_a\cos(\omega t))^3 + \cdots \ldots \end{matrix}\right] \omega\phi_a\cos(\omega t) =$$

$$\pi\omega{\phi_a}^2 B_1 + \frac{8}{3\pi}\omega^2{\phi_a}^3 B_2 + \frac{3}{4}\omega^3{\phi_a}^4 B_3 + \ \ldots \tag{2.16c}$$

Buradan;

$$B_e(U, \omega, \phi_a) \ = \ B_1 + \frac{8}{3\pi}\omega\phi_a B_2 + \frac{3}{4}\omega^2{\phi_a}^2 B_3 \tag{2.17}$$

elde edilir. Verilen bir frekans için çeşitli yalpa genliklerinde eşdeğer lineer yalpa sönüm katsayısı zorlanmış yalpa testi veya Ikeda metodu ile hesaplanarak yapılan regresyonlar sonucunda yalpa sönüm katsayısının lineer ve lineer olmayan katsayıları hesaplanabilir.

2.3 Ikeda Metodu ile Yalpa Sönümü Hesabı

Günümüzde viskoz sönüm konusunda yapılan çalışmalar büyük ölçüde deneysel olup yarı ampirik formüllerle hesaplanmaktadır. Bu çalışmalardan en yaygın olarak

kullanılanı ve en başarılı sonuçlar vereni Ikeda ve Himeno tarafından geliştirilmiş olanıdır. Geliştirilen bu yöntemde lineer olmayan yalpa sönüm katsayına eşdeğer bir lineer sönüm katsayısı tanımlanmıştır ve bu eşdeğer sönüm katsayısı bileşenlere ayrılmıştır. Bu sebepten dolayı literatürde bu metot Ikeda'nın Bileşen Metodu olarak geçmektedir.

Lineer olmayan sönüm;

$$B_{44}(\dot{\phi}) = B_1\dot{\phi} + B_2\dot{\phi}|\dot{\phi}| + B_3\dot{\phi}^3 \tag{2.18}$$

şeklinde ifade edilir ve bu lineer olmayan terimleri belirtmek ve hesaplamak zor olduğundan bu terimlere karşılık gelen eşdeğer lineer sönüm katsayısı tanımlanır.

$$B_{44}(\dot{\phi}) = B_e\dot{\phi} \tag{2.19}$$

Tanımlanan bu eşdeğer lineer sönüm katsayısı gemi yalpa hareketi sırasında sönümü oluşturan tüm fiziksel etkileri içerir. Bu etkiler Ikeda tarafından detaylı bir şekilde araştırılmış ve eşdeğer lineer sönüm katsayısı yedi ayrı bileşene ayrılmıştır. Bu bileşenler dalga, kaldırma, sürtünme, girdap ve yalpa omurgası bileşenleridir. Yalpa omurgasından kaynaklanan sönümde kendi içinde 3 ayrı bileşene ayrılmıştır. Bunlar yalpa omurgasının normal kuvvetinden, tekne üzerinde oluşturduğu basınçtan ve oluşturduğu dalgadan kaynaklanan sönüm bileşenleridir. Yapılan bu yaklaşımla eşdeğer lineer sönüm katsayısı;

$$B_e = B_W + B_L + B_F + B_E + B_{BKN} + B_{BKH} + B_{BKW} \tag{2.20}$$

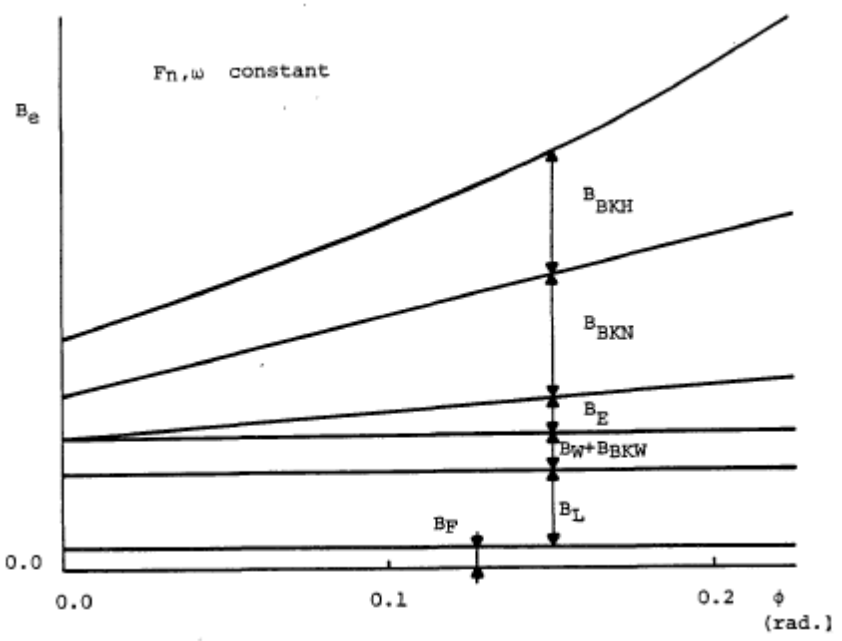
şeklinde ifade edilir.

Yalpa sönümü bileşenlerini toplarsak;

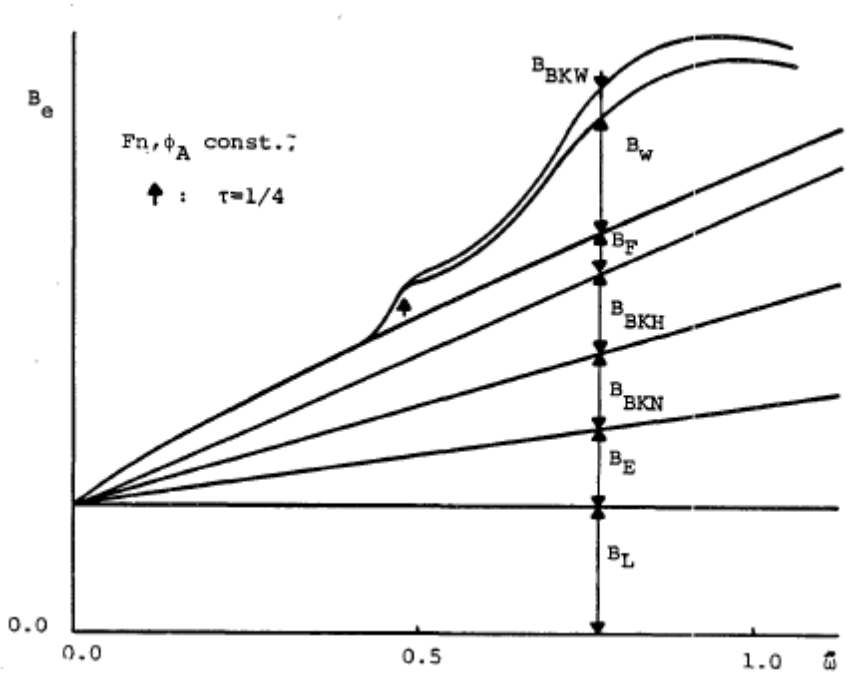
$$B_e = B_W + B_L + B_F + B_E + B_{BK} \tag{2.21}$$

şekline dönüşür. Bu bileşenlerden sürtünme kaynaklı sönüm, B_F, girdap kaynaklı sönüm, B_E, ve dalgadan oluşan sönüm, B_W, ampirik, kaldırma kuvvetinden kaynaklanan sönüm, B_L, yalpa omurgasının normal kuvvetinden oluşan sönüm, B_{BKN}, ve yalpa omurgası tekne etkileşiminden oluşan sönüm, B_{BKH}, yarı ampiriktir. Yalpa omurgasının oluşturduğu dalgadan kaynaklanan sönüm, B_{BKW}, ise genellikle ihmal edilir.

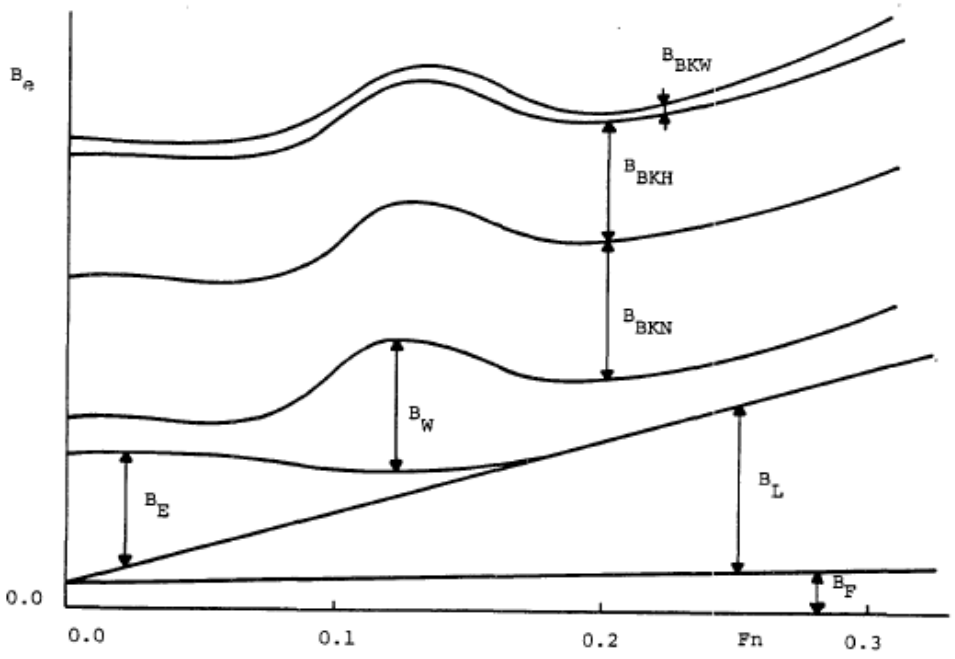
Bu bileşenler yalpa genliği, yalpa frekansına ve ileri hıza bağlı olarak değişebilirler ve bazıları lineer yalpa sönümüne, bazıları da lineer olmayan yalpa sönümüne karşı gelmektedir. Kaldırma ve dalga kaynaklı bileşenler, B_L, B_W, B_{BKW}, viskoz olmayan bileşenler olarak diğer bileşenler de viskoz ya da lineer olmayan bileşenler olarak ifade edilir. Ikeda yalpa sönüm bileşenlerinin yalpa açısına, yalpa frekansına ve ileri hıza göre değişimlerini detaylı bir şekilde incelemiştir ve bu değişimleri Şekil 2.6-2.8'de olduğu gibi göstermiştir.



Şekil 2. 6 Yalpa sönümü bileşenlerinin yalpa açısına göre değişimi [16]



Şekil 2. 7 Yalpa sönümü bileşenlerinin yalpa frekansına göre değişimi [16]



Şekil 2. 8 Yalpa sönümü bileşenlerinin ileri hıza göre değişimi [16]

2.4 Yalpa Sönümünün Bileşenleri

Bu bölümde yalpa sönümünün her fiziksel bileşeni detaylı bir şekilde verilmiş ve nasıl hesaplandıkları bağıntılarla gösterilmiştir.

2.4.1 Dalga Bileşeni

Yalpa sönümünün dalga bileşeni, B_W, gemi yalpa hareketi esnasında serbest su yüzeyinde dalga yayılmasından kaynaklanır (Şekil 2.9) ve viskoziteden kaynaklanmayan yalpa sönümü bileşenidir. Yalpa sönümünün lineer bileşeni olup sıfır hız için potansiyel teori kullanılarak hesaplanabilir. Genel kargo tipi bir gemi için toplam sönümün 5% ve 30%'unu oluşturur. Sığ su çekiminde ve geniş kesitlere sahip olan gemilerde bu oran daha yukarılara çıkabilir.



Şekil 2. 9 Yalpa sönümünün dalga bileşeni

Sıfır hızda dilim teorisi yardımıyla dalga bileşeni;

$$B_{W0} = B_{22}(l_w - OG)^2 \tag{2.22}$$

ifadesi ile hesaplanır. Burada B_{22} kesite ait olan yan öteleme sönüm katsayısı ve l_w ise sakin suda yan ötelemeden dolayı olan sönüm kuvvetine olan mesafeyi gösterir. OG ise sakin su seviyesinden ağırlık merkezine olan dikey mesafeyi gösterir ve aşağı yön pozitif olarak gösterilir.

İleri hızda dalga bileşeninin hesabı için Ikeda, vd. [11] yaptığı deneylerde uzak alandaki dalga enerji kaybını hesaplayarak bir ampirik formül önermiştir.

$$\frac{B_W}{B_{W0}} = 0.5\big((A_2+1) + (A_2-1)\,tanh(20\tau - 0.3) + (2A_1 - A_2 - 1)exp(-150(\tau - 0.25)^2\big) \tag{2.23}$$

Burada;

$$A_1 = 1 + \xi_d^{-1.2} e^{-2\xi_d}\,, A_2 = 0.5 + \xi_d^{-1} e^{-2\xi_d} \tag{2.24a}$$

$$\xi_d = \frac{\omega_E^2 d}{g}\,, \tau = \frac{U\omega_E}{g} \tag{2.24b}$$

olarak hesaplanır.

2.4.2 Kaldırma Bileşeni

Yalpa sönümünün kaldırma bileşeni, B_L, geminin ileri hareketinde yalpa yapması sonucu oluşan hidrodinamik kaldırma kuvvetinden kaynaklanır ve yalpa sönümünün diğer lineer bileşenidir. Hız sıfır olduğu zaman sıfıra gider. Ikeda, vd. [15] tarafından önerilen formülde kaldırma bileşeni;

$$B_L = \frac{\rho}{2} U.L.d.k_N.l_0.l_R.\left(1 - 1.4\frac{OG}{l_R} + 0.7\frac{OG^2}{l_0.l_R}\right) \tag{2.25}$$

Burada ρ, U, L ve d sırasıyla yoğunluğu, ileri gemi hızını, gemi boyunu ve su çekimini ifade eder. OG ise dalga bileşeninde de ifade edildiği gibi serbest su yüzeyinden ağırlık merkezine olan dikey mesafeyi gösterir. Ayrıca l_0, l_R ve k_N aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$l_0 = 0.3d \quad , \quad l_R = 0.5d \tag{2.26a}$$

$$k_N = 2\pi\frac{d}{L} + \kappa(4.1\frac{B}{L} - 0.045) \tag{2.26b}$$

κ ise orta kesit katsayısı, C_M, cinsinden ifade edilir.

$$\kappa = \begin{pmatrix} 0 & C_M \le 0.92 \\ 0.1 \quad \text{for} & 0.92 \le C_M \le 0.97 \\ 0.3 & 0.97 \le C_M \le 0.99 \end{pmatrix} \tag{2.26c}$$

2.4.3 Sürtünme Bileşeni

Yalpa sönümünün sürtünme bileşeni, B_F, tekne yüzeyinde oluşan sürtünme kuvvetlerinden kaynaklanan enerji kaybından meydana gelir (Şekil 2.10). Toplam yalpa sönümünün 8% ve 10% arasında bir kısmını oluşturur. Bu oran Ikeda'nın 2m boyundaki modeli kullanarak ortaya çıkardığı orandır. Bu yalpa sönüm bileşeni Reynold sayısından etkilenen tek bileşendir yani ölçek etkisi önemlidir. Bu sebeple model için olan bu oran gemi boyu arttıkça azalır, gerçek gemi boyu için 1% ve 3% arasındadır. Diğer yalpa

sönüm bileşenlerinde ölçek etkisi yoktur, bu sebeple hesaplanan boyutsuz yalpa sönüm bileşenleri, sürtünme bileşeni hariç, her ölçek için kullanılabilir.



Şekil 2. 10 Yalpa sönümünün sürtünme bileşeni

Ikeda, vd. [11] sıfır hızda sürtünme bileşeni hesabı için bir formül geliştirmiştir. Sıfır hızdaki sürtünme bileşeni katsayısı;

$$B_{F0} = \frac{4}{3\pi}\rho . S_f . r_f^3 . \phi_a . \omega . C_f \tag{2.27}$$

ile ifade edilmiştir. Burada ρ, ϕ_a, ω sırasıyla yoğunluğu, yalpa genliğini ve yalpa frekansını gösterir. Burada r_f sintine mesafesi, S_f ise sürtünme yüzeyi olup, şu şekilde hesaplanır.

$$r_f = \frac{1}{\pi}\left((0.887 + 0.145 . C_B)(1.7d + C_B . B) - 2OG\right) \tag{2.28a}$$

$$S_f = L(1.7d + C_B . B) \tag{2.28b}$$

Burada C_B blok katsayısını, B gemi genişliğini, L gemi boyunu, d su çekimini, OG ise serbest su yüzeyinden ağırlık merkezine olan dikey mesafeyi gösterir ve aşağı yön pozitif olarak alınır. Sürtünme katsayısı, C_f, ise Kato [10] tarafından önerilen formül ile hesaplanır. Buna göre sürtünme katsayısı;

$$C_f = 1.328\left(\frac{3.22 . r_{mid}^2 . {\phi_a}^2}{T . \upsilon}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.29}$$

ile ifade edilir. Burada r_{mid} gemi ortasında yalpa ekseninden gemi yüzeyine veya yalpa omurgasına olan uzaklık olarak ifade edilir. T yalpa periyodu, υ ise kinematik viskoziteyi gösterir.

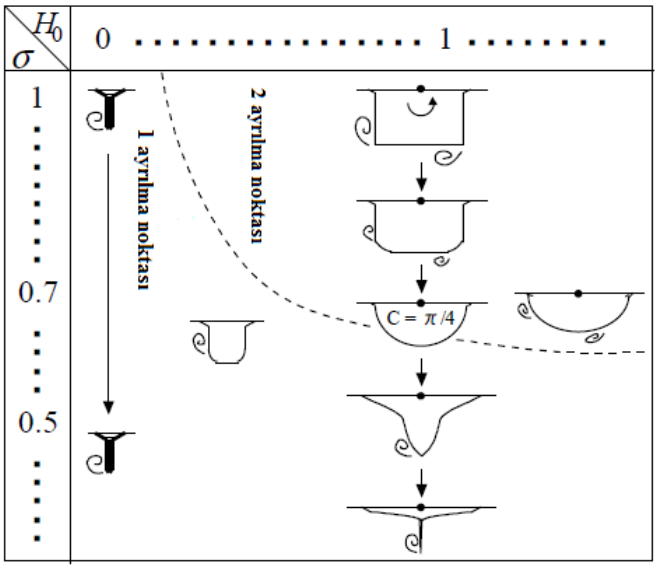
İleri hızda ise toplam sürtünme bileşeni;

$$B_F = B_{F0}\left(1 + 4.1\frac{U}{\omega.L}\right) \tag{2.30}$$

formülüyle hesaplanır. Burada U ileri gemi hızını ifade eder.

2.4.4 Girdap Bileşeni

Yalpa sönümünün girdap bileşeni, B_E, gemi yalpa hareketi esnasında sintine dönümünden saçılan girdapların gemi üzerinde oluşturdukları kuvvetten kaynaklanmaktadır. Sıfır hızda girdapların oluşturduğu sönüm esas olarak kesitlerdeki girdaplardan dolayıdır. Şekil 2.11' de yalpa hareketi sırasında farklı kesitler etrafında oluşan girdaplar gösterilmektedir. Oluşan girdapların sayısı iki parametreye bağlıdır; yarı genişlik/su çekimi oranı $H_0 = (\frac{B}{2d})$ ve kesit alanı katsayısı σ = $(\frac{A_j}{Bd})$.



Şekil 2. 11 Kesit etrafında girdap oluşumu [13]

Ikeda, vd. [13] farklı iki boyutlu kesitlerle yaptığı deneyler sonucunda sıfır hızda girdap bileşeni için bir formül geliştirmiştir. Bu hesapta tekne üzerindeki basınç dağılımı için bir varsayım yapılmıştır (Şekil 2.13). Basınç katsayısı, C_P, tekne üzerindeki maksimum hızın ortalama hıza oranının, $\gamma = U_{max}/U_{mean}$, fonksiyonu olarak verilmiştir.

$$B_{E0} = \frac{4}{3\pi}\rho.d^4.\omega.\phi_a.C_R \tag{2.31a}$$

$$C_R = \left\{\left(1 - f_1\frac{R}{d}\right)\left(1 - \frac{OG}{d}\right) + f_2\left(H_0 - f_1\frac{R}{d}\right)^2\right\} C_P\left(\frac{r_{max}}{d}\right)^2 \tag{2.31b}$$

$$C_P = 0.5(0.87e^{-\gamma} - 4e^{-0.187\gamma} + 3) \tag{2.31c}$$

Burada;

$$f_1 = 0.5[1 + \tanh\{20(\sigma - 0.7)\}] \quad (2.32a)$$

$$f_2 = 0.5(1 - cos\pi\sigma) - 1.5(1 - e^{-5(1-\sigma)})sin^2\pi\sigma \quad (2.32b)$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{\pi} f_3 (r_{max} + \frac{2M}{H})\sqrt{A^2 + B^2}}{2d(1 - \frac{OG}{d})\sqrt{H_0' \sigma'}} \quad (2.32c)$$

$$M = \frac{B}{2(1 + a_1 + a_3)} \quad (2.32d)$$

$$H_0' = \frac{H_0}{1 - \frac{OG}{d}}\ ,\ \sigma' = \frac{\sigma - \frac{OG}{d}}{1 - \frac{OG}{d}} \quad (2.32e)$$

$$H = 1 + a_1^2 + 9a_3^2 + 2a_1(1 - 3a_3)cos2\psi - 6a_3 cos4\psi \quad (2.32f)$$

$$A = -2a_3 cos5\psi + a_1(1 - a_3)cos3\psi + \{(6 - 3a_1)a_3^2 + (a_1^2 - 3a_1)a_3 + a_1^2\}cos\psi \quad (2.32g)$$

$$B = -2a_3 sin5\psi + a_1(1 - a_3)sin3\psi + \{(6 + 3a_1)a_3^2 + (3a_1 + a_1^2)a_3 + a_1^2\}sin\psi \quad (2.32h)$$

$$r_{max} = M\sqrt{\{(1 + a_1)sin\psi - a_3 sin3\psi\}^2 + \{(1 - a_1)cos\psi - a_3 cos3\psi\}^2} \quad (2.32i)$$

$$a_1 = b\left(\frac{1 - \frac{1}{H_0}}{2}\right)\ ,\ a_3 = b\left(\frac{1 + \frac{1}{H_0}}{2}\right) \quad (2.32j)$$

$$\psi = \begin{cases} 0 = \psi_1 \quad when\ r_{max}(\psi_1) \geq r_{max}(\psi_2) \\ 0.5cos^{-1}\left(\frac{a_1(1 + a_3)}{4a_3}\right) = \psi_2 \quad when\ r_{max}(\psi_1) < r_{max}(\psi_2) \end{cases} \quad (2.32k)$$

$$f_3 = 1 + 4exp\{-1.65x10^5(1 - \sigma)^2\} \quad (2.32l)$$

şeklinde hesaplanır.

Daha basit bir ifadeyle sıfır hızdaki yalpa sönümünün girdap bileşeni hesabı için düz bir levha kullanılarak geliştirilen uç etkilerin ihmal edildiği formül de kullanılabilir. Bu formüldeki C_R katsayısı gemi baş ve kıç noktalarının hesabı için kullanılır.

$$C_R = 1.5\left(1 - \frac{OG}{d}\right) \quad (2.33)$$

Ayrıca ileri hızda girdap bileşeni hesabı;

$$B_E = B_{E0}\frac{(0.04.\omega.L)^2}{U^2 + (0.04.\omega.L)^2} \quad (2.34)$$

formülü ile hesaplanır. Formülden de anlaşıldığı üzere hız arttıkça girdap sönümü bileşeni azalacaktır. Himeno [16] Fn>0.2 için bu değerin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğunu belirtmiştir.

2.4.5 Yalpa Omurgası Bileşeni

Yalpa omurgasından kaynaklanan sönüm toplam sönümün en önemli ve en büyük yüzdesini oluşturan bileşendir. Bu sebepten dolayı toplam sönüm katsayısının doğru hesaplanması için bu bileşenin çok iyi bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Küçük yalpa genliklerinde dahi bu bileşenin toplam sönüme olan katkısı 50% seviyesindedir ve yalpa genliği arttıkça bu oran da artmaktadır. Ikeda, vd. [11]-[15] yaptığı deneyler sonucunda bu bileşenin hesabı için bir formül geliştirmiştir. Yalpa omurgası bileşeni üçe ayrılır; yalpa omurgası normal bileşeni, B_{BKN}, yalpa omurgası tekne etkileşimi bileşeni, B_{BKH} ve yalpa omurgası dalga bileşeni, B_{BKW}.

$$B_{BK} = B_{BKN} + B_{BKH} + B_{BKW} \tag{2.35}$$

2.4.5.1 Yalpa Omurgası Normal Kuvvet Bileşeni

Yalpa omurgası normal kuvvet bileşeni akışkan içinde salınım yapan yalpa omurgasına etkiyen dirençten kaynaklanır ve Keulegan-Carpenter sayısına, KC, bağlıdır.

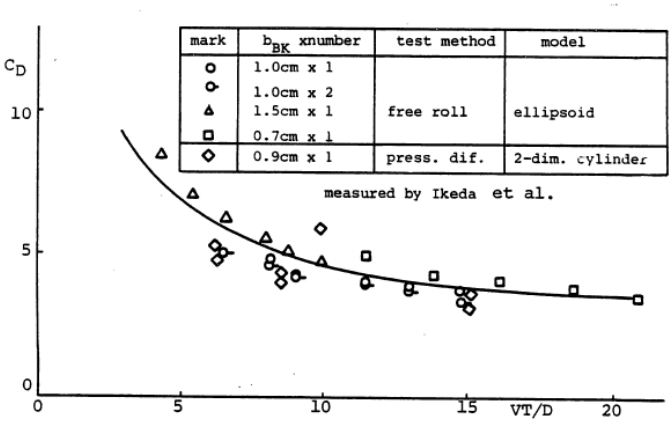
$$KC = \frac{UT}{D} \tag{2.36}$$

Ikeda, vd. [11] yapmış olduğu çalışmalar sonucunda sıfır hız durumunda yalpa omurgası normal kuvvetinden kaynaklanan sönüm hesabı için bir formül önermiştir.

$$B_{BKN0} = \frac{8}{3\pi}\rho . {r_{BK}}^3 . \omega . \phi_a . b_{BK} . f^2 . C_D \tag{2.37}$$

Burada C_D yalpa omurgası direnç katsayısıdır ve yapılan deneyler sonucunda KC sayısına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiş (Şekil 2.12) ve buna bağlı olarak aşağıdaki bağıntı Ikeda, vd. [11] tarafından geliştirilmiştir.

$$C_D = 22.5\frac{b_{BK}}{\pi r_{BK} f \phi_a} + 2.4 \tag{2.38}$$



Şekil 2. 12 Yalpa omurgası direnç katsayısı [11]

Burada f sintine dönümündeki hız artışını belirten ampirik bir katsayı olup aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$f = 1 + 0.3e^{\{-160(1-\sigma)\}} \tag{2.39}$$

İleri hız durumunda ise toplam yalpa omurgası normal kuvvet bileşeni;

$$B_{BKN} = B_{BKN0} + \frac{\pi}{2}\rho . {b_{BK}}^2 . {r_{BK}}^2 . U \tag{2.40}$$

şeklinde ifade edilir.

2.4.5.2 Yalpa Omurgası Tekne Etkileşimi Bileşeni

Bu bileşen yalpa omurgasının varlığında tekne üzerinde oluşan basınç değişimine bağlıdır.

$$B_{BKH0} = \frac{4}{3\pi}\rho . r_{BK} . d . \omega . \phi_a . b_{BK} . f^2 . \int C_P . ldS \tag{2.41}$$

Burada d su çekimini, C_P kesit etrafında yalpa omurgasından kaynaklanan basınç katsayısını, l ise moment koludur.

$$\int C_P . ldG = (-A_3 C_P^- + B_3 C_P^+) \tag{2.42a}$$

$$C_D = C_P^+ - C_P^- \tag{2.42b}$$

Burada C_P^+ ve C_P^- yalpa omurgasının ön yüzündeki pozitif basınç katsayısı ve arka yüzündeki negatif basınç katsayısıdır. C_P^+ Ikeda vd. [12] tarafından yapılan model testleri sonucunda deneysel olarak ifade edilmiştir.

$$C_P^+ = 1.2 \tag{2.42c}$$

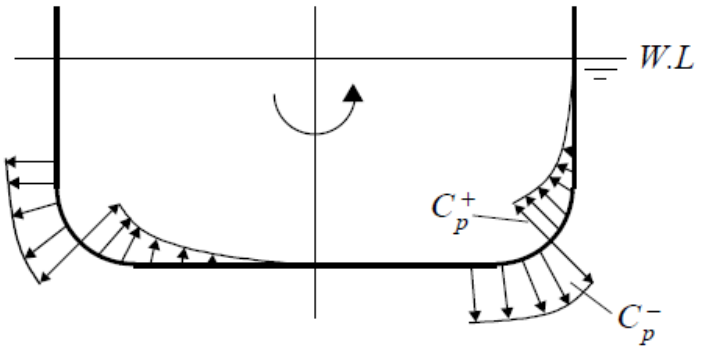
Direnç katsayısı da daha önce de tanımlandığı gibi;

$$C_D = 22.5\frac{b_{BK}}{\pi r_{BK} f \phi_a} + 2.4 \qquad (2.42d)$$

formülü ile hesaplanır. Buna göre;

$$C_P^- = -22.5\frac{b_{BK}}{\pi r_{BK} f \phi_a} - 1.2 \qquad (2.42e)$$

sonucuna ulaşılır. Ikeda vd. [15] yapmış olduğu deneyler sonucunda yalpa omurgasının tekne üzerinde oluşturduğu pozitif ve negatif basınç dağılımlarını hesaplamış ve Şekil 2.13'te gösterildiği gibi bir basınç dağılımı varsayımı yapmıştır.



Şekil 2. 13 Yalpa omurgasının tekne yüzeyinde oluşturduğu basınç dağılımı [15]

Basınç katsayısı hesabı için gerekli olan diğer katsayılarda aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$A_3 = (m_3 + m_4).m_8 - m_7^2 \qquad (2.43a)$$

$$B_3 = \frac{m_4^3}{3.(H_0 - 0.215.m_1)} + \frac{(1-m_1)^2.(2m_3 - m_2)}{6.(1-0.215m_1)} + m_1.(m_3.m_5 + m_4.m_6) \qquad (2.43b)$$

şeklinde hesaplanır. $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7$ ve m_8 katsayıları ise;

$$m_1 = \frac{R}{d}, \quad m_2 = \frac{OG}{d}, \quad m_3 = 1 - m_1 - m_2, \quad m_4 = H_0 - m_1 \qquad (2.44a)$$

$$m_5 = \frac{0.414H_0 + 0.0651m_1^2 - (0.0382H_0 + 0.0106).m_1}{(H_0 - 0.215.m_1)(1-0.215m_1)} \qquad (2.44b)$$

$$m_6 = \frac{0.414H_0 + 0.0651m_1^2 - (0.0382 + 0.0106H_0).m_1}{(H_0 - 0.215.m_1)(1-0.215m_1)} \qquad (2.44c)$$

$$m_7 = \begin{cases} \frac{S_0}{d} - 0.25\pi.m_1 & S_0 > 0.25\pi.R \\ 0 & S_0 \le 0.25\pi.R \end{cases} \qquad (2.44d)$$

$$m_8 = \begin{cases} m_7 + 0.414.m_1 & S_0 > 0.25\pi.R \\ m_7 + \sqrt{2}\left(1 - \cos(\frac{S_0}{R})\right).m_1 & S_0 \le 0.25\pi.R \end{cases} \qquad (2.44e)$$

Burada S_0 yalpa omurgası negatif basınç alanının uzunluğudur ve

$$S_0 = (0.3\pi . f . r_{BK} . \phi_a) + 1.95 . b_{BK} \tag{2.45}$$

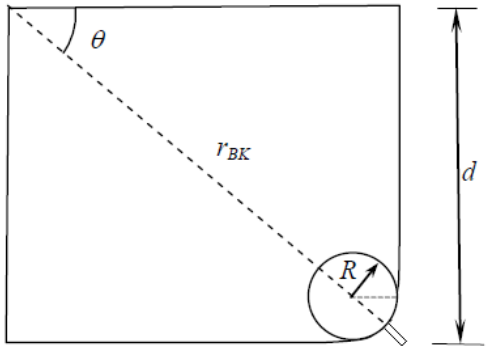
ile hesaplanır.

R sintine dönümü yarıçapını ve r_{BK} ise yalpa ekseninden yalpa omurgasına olan mesafeyi verir. Ikeda vd. [15] yaptığı deneyler sonucunda bu iki parametrenin hesabı için bir formül geliştirmiştir.

$$r_{BK} = d\sqrt{\left\{H_0 - (1 - \frac{\sqrt{2}}{2})\frac{R}{d}\right\}^2 + \left\{1 - \frac{OG}{d} - (1 - \frac{\sqrt{2}}{2})\frac{R}{d}\right\}^2} \tag{2.46a}$$

$$m_7 = \begin{cases} 2d\sqrt{\frac{H_0(\sigma-1)}{\pi-4}} & R < d, R < \frac{B}{2} \\ d & H_0 \geq 1, \frac{R}{d} > 1 \\ \frac{B}{2} & H_0 \leq 1, \frac{R}{d} > H_0 \end{cases} \tag{2.46b}$$

Burada dikkat edilmesi gereken bu formüllerin duvar bordalı ve yuvarlak sintine dönümlü gemilere ait olmasıdır (Şekil 2.14). Bu sebepten dolayı farklı tip gemiler için bu formül geçerli olmayabilir ve daha doğru sonuç için ayrı olarak hesaplanmalıdır.



Şekil 2. 14 Duvar bordalı gemi için r_{BK} ve R gösterimi

Bu bileşenin ileri hız durumundaki bileşeni için herhangi bir çalışma yürütülmemiştir.

2.4.5.3 Yalpa Omurgası Dalga Bileşeni

Yalpa omurgası dalga bileşeni, B_{BKW}, yalpa omurgasından kaynaklanan dalgaların oluşturduğu sönümdür ve genellikle ihmal edilir. Yalpa omurgasının serbest yüzeye yaklaştığı durumlarda etkisi arttığından hesaplanması gerekir. Yalpa omurgası genişliği değerinin $B/60$ ile $B/80$ arasındaki değerlerinde küçük yalpa genliklerinde serbest

yüzey etkileşimi küçük olduğundan dolayı bu değer ihmal edilebilir. Himeno [16] geniş yalpa omurgasına sahip gemilerde, savaş gemileri gibi, yalpa omurgası dalga bileşeninin önemli olduğuna dikkat çekmiştir. Ayrıca geniş yalpa açıları ve sığ su çekimi gibi yalpa omurgası serbest yüzey etkileşiminin arttığı durumlarda da bu değerin artacağı gözlemlenebilir.

Bu değerin hesaplanması için Bassler vd. [50] bir formül önermiştir.

$$\hat{B}_{BKW} \sim C_{BK}(b_{BK}) \exp\left(-\frac{\omega^2}{g} d_{BK}(\phi)\right) \tag{2.47}$$

Burada C_{BK} yalpa omurgası genişliğine bağlı bir fonksiyondur ve basitleştirilmiş bir ifadeyle yalpa omurgası genişliğinin gemi genişliğine oranı olarak hesaplanabilir. d_{BK} ise yalpa omurgasından su çekimine olan mesafedir ve yalpa açısının fonksiyonu olarak tanımlanmıştır.

$$d_{BK}(\phi) = r_{BK}\left[\left(\frac{\left(\frac{2d}{B}\right)}{\sqrt{1+\left(\frac{2d}{B}\right)^2}}\right) cos\phi - sin\phi\left(\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{2d}{B}\right)^2}}\right)\right] \tag{2.48}$$

İleri hızdaki değeri ise tekneye ait dalga bileşeninin ileri hız durumundaki hesabı ile aynıdır.

BÖLÜM 3

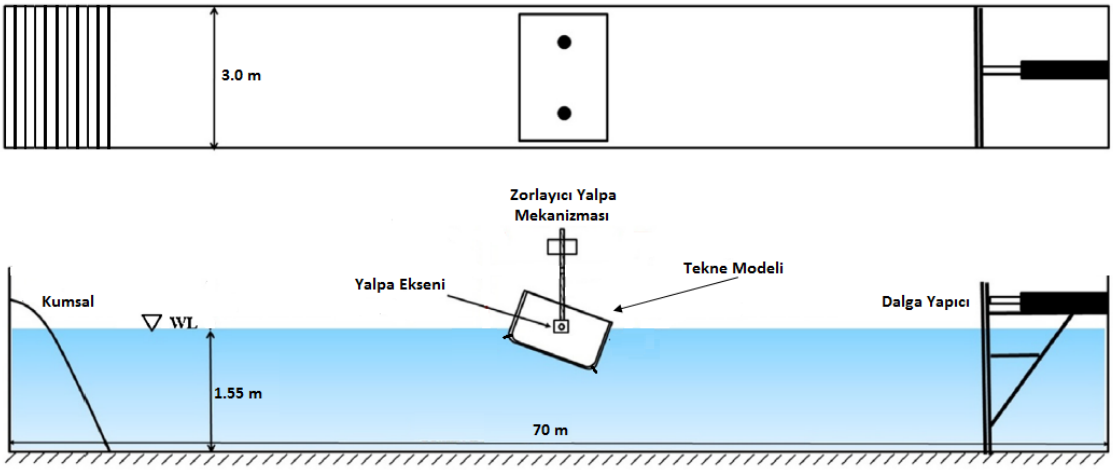
YALPA SÖNÜM KATSAYISININ DENEYSEL OLARAK HESAPLANMASI

Bu bölümde yalpa sönüm katsayısının deneysel olarak hesaplanması ile ilgili bilgiler verilmiştir. Sayısal olarak hesaplanan sonuçların doğrulanması için deney sonuçlarına ihtiyaç vardır ve bu yüzden tez kapsamında sayısal hesaplamaların doğrulanması için deneyler yapılmıştır. Deneyler Osaka Prefecture Üniversitesi model deney tankında yürütülmüştür. Belirlenen durumlar için S60 gemisinin iki boyutlu orta kesit modeli kullanılarak zorlamalı yalpa testleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları analiz edilerek belirlenen durumlar için yalpa sönüm katsayıları hesaplanmıştır. Sığ su çekimi ve geniş yalpa açısının yalpa sönüm katsayısına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Sığ su çekimi durumunda analizler çeşitli yalpa frekansları ve yalpa açılarında gerçekleştirilmiştir. Geniş yalpa açısında ise yalpa omurgasının serbest yüzeye en çok yaklaştığı durum için deneyler yürütülmüştür. Bu koşullarda tekneye etki eden yalpa momentleri hesaplanarak yalpa sönüm katsayıları hesaplanmıştır. Deneyler sıfır hız durumu için gerçekleştirilmiştir.

3.1 Çekme Tankı Özellikleri

Bu bölümde deneylerin gerçekleştirildiği Osaka Prefecture Üniversitesi çekme tankı hakkında bilgiler verilmiştir. Şekil 3.1 çekme tankına ait üst ve profil görünüşlerini, ayrıca çekme tankı boyutlarını göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi çekme tankında zorlayıcı yalpa mekanizması ve dalga yapıcı bulunmaktadır. Bu dalga yapıcı düzenli ve düzensiz dalgalar üretebilmektedir. Ancak bu tez kapsamında yürütülen deneyler sakin su durumu için yürütülmüştür. Şekilde görülen zorlayıcı yalpa mekanizması kullanılarak tekne modeli belirlenen yalpa frekansı ve açısında yalpa

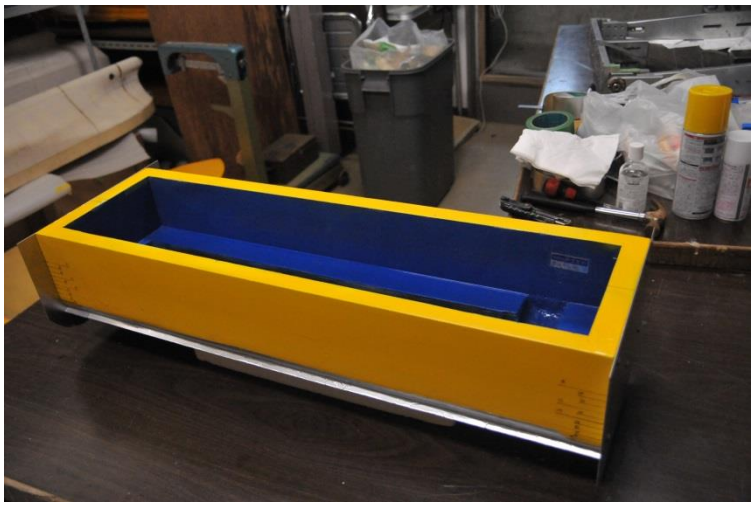
hareketine maruz bırakılmıştır ve belirlenen durumlar için yalpa sönüm katsayıları hesaplanmıştır.



Şekil 3. 1 Çekme tankının üstten ve profil görünüşleri

3.2 Model Özellikleri

Bu bölümde deneylerde kullanılan modelle ilgili bilgiler verilmiştir. Deneylerde Seri 60 tipi tekne formunun orta kesiti iki boyutlu olacak şekilde üretilmiştir. Deneylerde iki boyutlu model kullanılmasının sebebi, Ikeda metodunun da hesap yaparken iki boyutlu gemi kesitlerini kullanmasıdır. Deneylerde iki boyutlu orta kesit modeli kullanılarak üç boyuttan gelen olası etkiler ihmal edilmiş ve iki yöntemin birbiri ile karşılaştırması daha gerçekçi olmuştur. Şekil 3.2'de deneylerde kullanılan teknenin iki boyutlu modeli gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere model üzerinde yalpa omurgası bulunmaktadır ve modelin başı ve sonu uç etkileri önlemek için bir plaka ile kapatılmıştır. Bu şekilde uçlarda oluşacak girdap etkilerinin önüne geçilmiştir ve iki boyutun doğasına uygun bir model oluşturulmuştur. Şekil 3.3 modele ait yalpa omurgalı orta kesit görüntüsünü göstermektedir. Modele ait özellikler ise Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 2 İki boyutlu Seri 60 orta kesit modeli



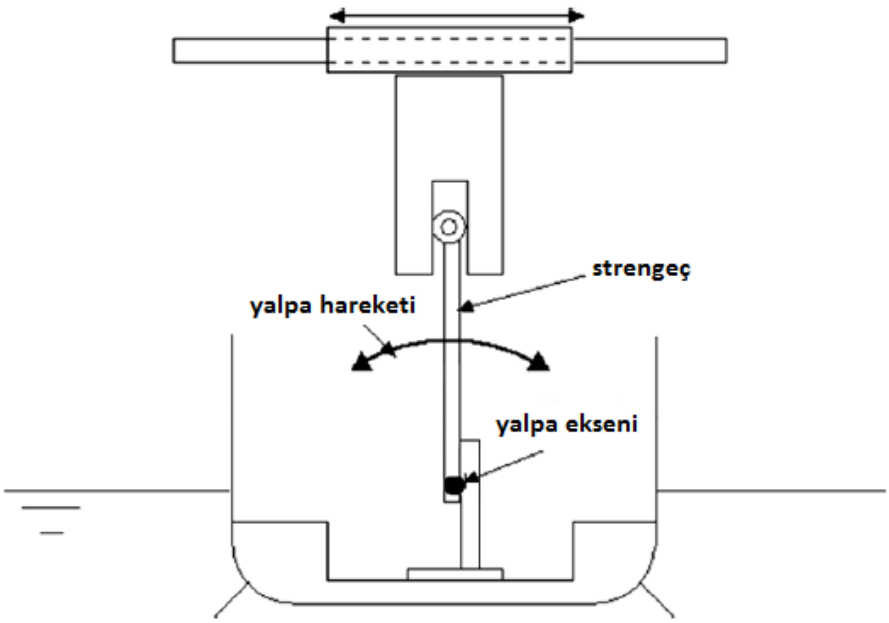
Şekil 3. 3 Yalpa omurgalı Seri 60 orta kesit resmi

Çizelge 3. 1 Model ana boyutları

Uzunluk: L	0.80m
Genişlik: B	0.237m
Derinlik: D	0.145m
Ağırlık merkezi: KG	0.072m
Blok katsayısı: C_B	0. 80
Sintine dönümü	0.035m
Uzunluk X Genişlik (yalpa omurgası)	0.80m x 0.01m

3.3 Zorlayıcı Yalpa Mekanizması

Yürütülen deneylerde kullanılan iki boyutlu model zorlayıcı yalpa mekanizmasına bağlanarak yalpa hareketine maruz bırakılmıştır. Zorlayıcı yalpa mekanizmasında tekne sadece yalpa hareketi yapmaktadır ve diğer beş serbestlik dereceli hareketler kısıtlanmıştır.

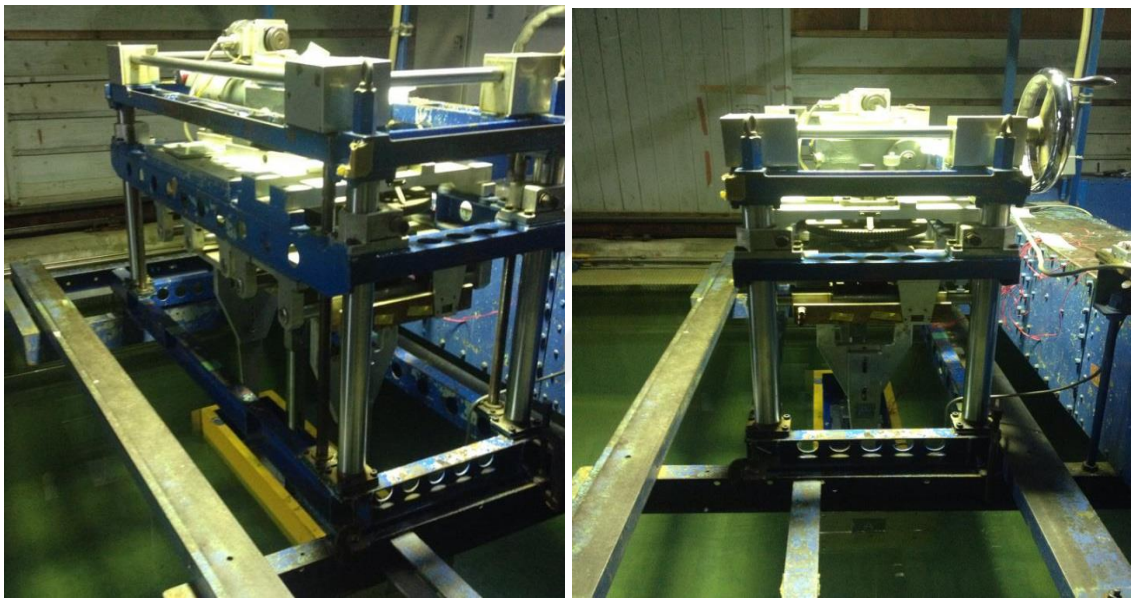


Şekil 3. 4 Zorlayıcı yalpa mekanizması gösterimi

Yalpa omurgalı tekne modeli ek ağırlıklar yardımıyla meyilsiz ve trimsiz olacak şekilde ayarlanmıştır. Tekne belirlenen yalpa ekseninde ve su çekiminde olacak şekilde zorlayıcı yalpa mekanizmasına baştan ve kıçtan olmak üzere iki noktadan bağlanmıştır. Tekneye belirlenen yalpa frekansı ve yalpa açılarında zorlayıcı yalpa mekanizması kullanılarak düzenli yalpa hareketi uygulanmıştır. Daha önce de söylendiği gibi deneyler sakin su ve sıfır hız durumlarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.5 çekme tankı üzerindeki zorlayıcı yalpa mekanizmasını ve mekanizmaya bağlı olan iki boyutlu tekne genel görüntüsünü göstermektedir. Şekil 3.6 ise zorlayıcı yalpa mekanizmasının yakından çekilmiş bir görüntüsünü göstermektedir. Şekil 3.7 de deneye hazır duruma getirilmiş tekne modelinin sakin su üzerindeki görüntüsünü göstermektedir.



Şekil 3. 5 Çekme tankı ve zorlayıcı yalpa mekanizması



Şekil 3. 6 Zorlayıcı yalpa mekanizması detaylı görüntüsü



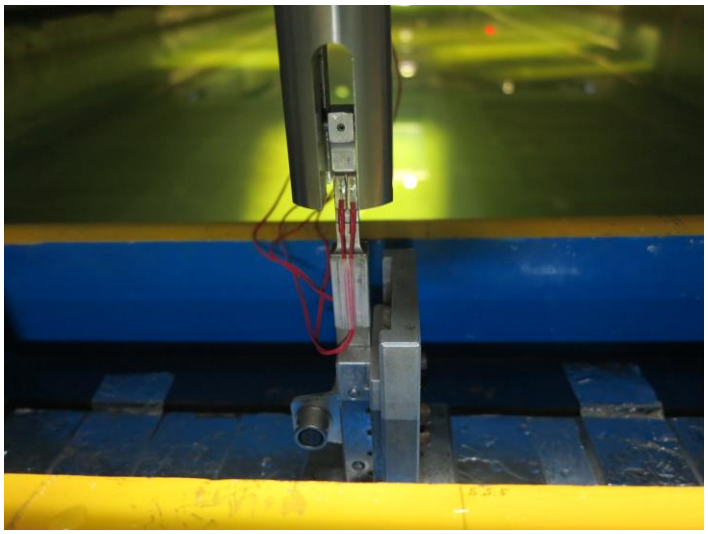
Şekil 3. 7 Deneye hazır tekne modelinin görüntüsü

3.4 Veri Toplama

Yalpa sönüm katsayısın hesaplanması için tekneye yalpa hareketi sırasında etki eden kuvvetlerin hesaplanması gerekmektedir. Bunun için öncelikle zorlayıcı yalpa mekanizmasına bağlı cihazlar kullanılarak teknenin hangi frekansta ve hangi açıda yalpa hareketi yapacağı ayarlanmıştır. Şekil 3.8 zorlayıcı yalpa mekanizmasının frekansını ayarlayan cihazı göstermektedir. Zorlayıcı yalpa mekanizmasına bağlı olan teknenin orta kısmına yerleştirilen strengeçler yardımıyla belli açı ve frekansta yalpa hareketine maruz bırakılan tekneye etki eden kuvvet değerleri zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Şekil 3.9 tekneye yalpa hareketi sırasında etki eden kuvveti ölçmek için kullanılan strengeçleri göstermektedir.

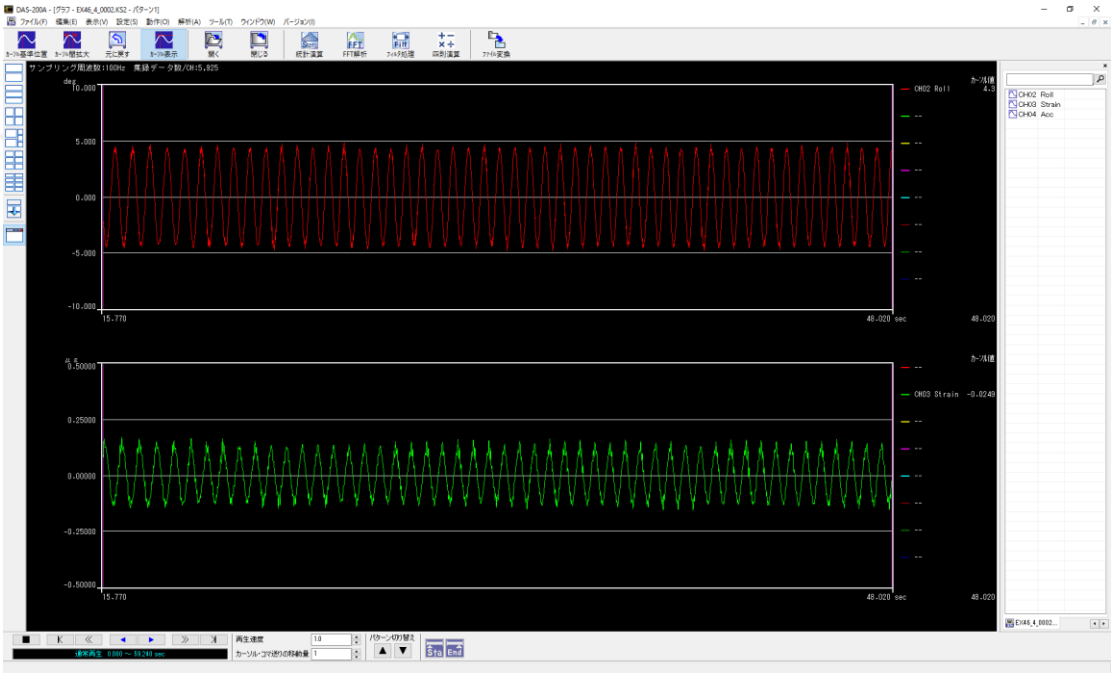


Şekil 3. 8 Zorlayıcı yalpa mekanizması frekans ayarlama cihazı



Şekil 3. 9 Tekne üzerindeki strengeç

Tekneye etki eden kuvvet değerleri zamana bağlı olarak bilgisayar programı yardımıyla kaydedilmektedir. Kaydedilen kuvvet değerleri ve yalpa açısına ait bilgisayar ekranının görüntüsü Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Kırmızı ile gösterilen eğri yalpa açısını, yeşil eğri ise kuvvet değerlerini göstermektedir. Sonuçlar 15 ile 45 sn aralıklarında kaydedilen değerleri göstermektedir. Analizlerde ilk 10-15 sn'ye ait değerler analiz oturmadığı için kullanılmamıştır. Bu yüzden analizler genelde 40-50 sn süresince analiz oturana kadar sürdürülmüştür.



Şekil 3. 10 Ölçülen kuvvet ve yalpa açısı değerleri

3.4.1 Deney Koşulları

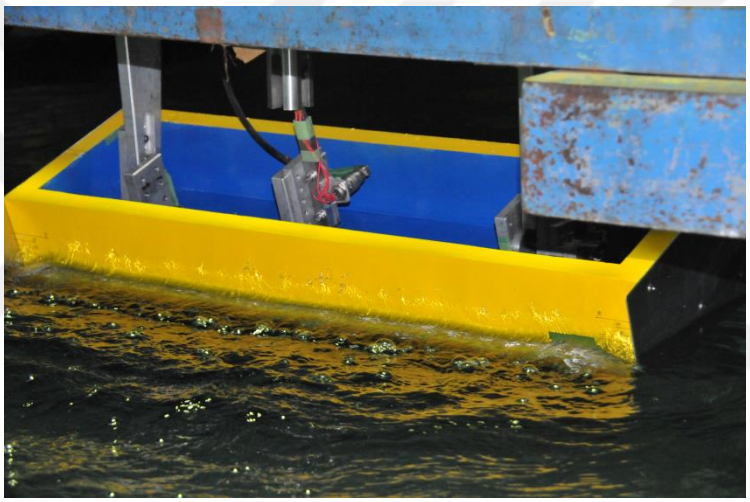
Tez kapsamında yürütülen deney koşulları Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3. 2 Deney koşulları

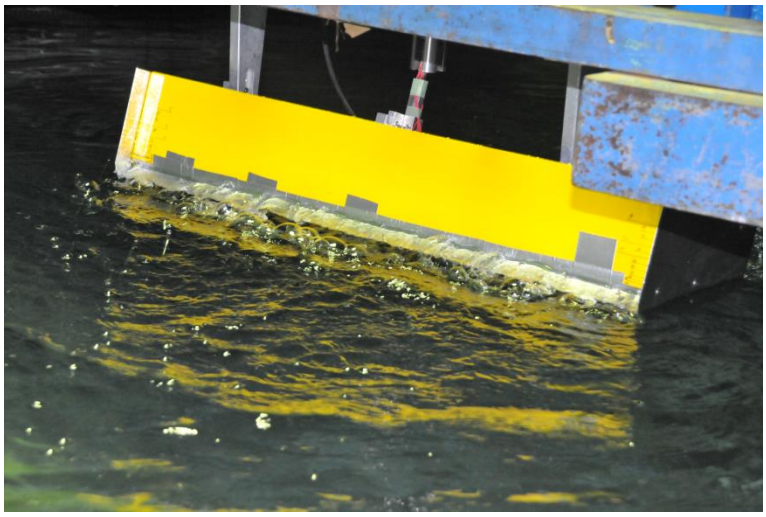
Fn	0.0
Yalpa açısı, ϕ (der)	8.59, 11.38, 14.38, 27.27
Yalpa frekansı, ω (rad/sn)	5.26, 6.28, 7.85
Su çekimi, d (mm)	23.0, 57.0, 72.0, 95.0

3.5 Deney Sonuçları

Bir önceki bölümde belirtilen deney koşulları için yürütülen zorlanmış yalpa testleri ile tekne üzerine etkiyen kuvvetler hesaplanmıştır ve bu veriler kullanılarak yalpa sönüm katsayıları hesaplanmıştır. Yalpa sönüm katsayılarının deneysel sonuçları sonraki bölümlerde sayısal sonuçlar ile karşılaştırılarak verilmiştir. Tekneye etki eden zorlayıcı moment değerleri kullanılarak yalpa sönüm katsayısının nasıl elde edildiği önceki bölümlerde gösterilmiştir. Bu bölümde sadece birkaç durum için tekne üzerine etkiyen zorlayıcı moment değerleri gösterilmiştir. Şekil 3.11 ve 3.12 deney esnasında iskele yalpa omurgasının tam batmış ve serbest su yüzeyine yaklaşmış konumlarındaki görüntülerini göstermektedir.



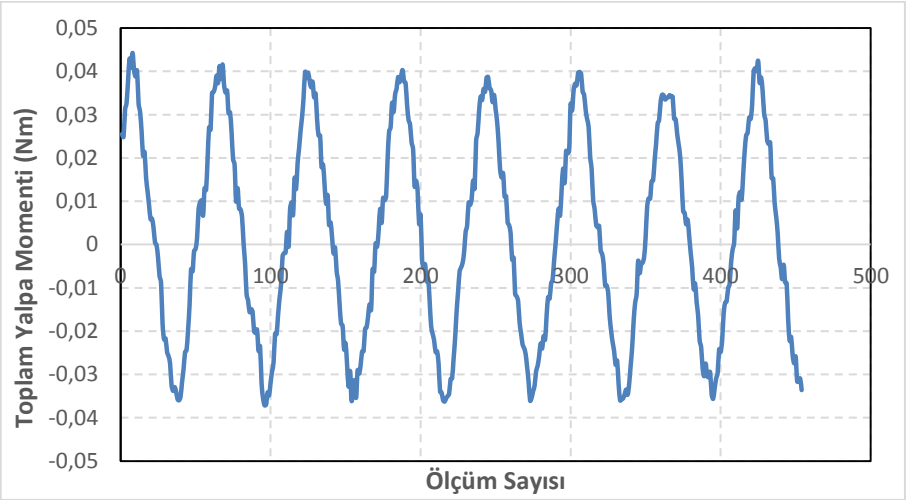
Şekil 3. 11 Deney sırasında maksimum yalpa genliği durumu



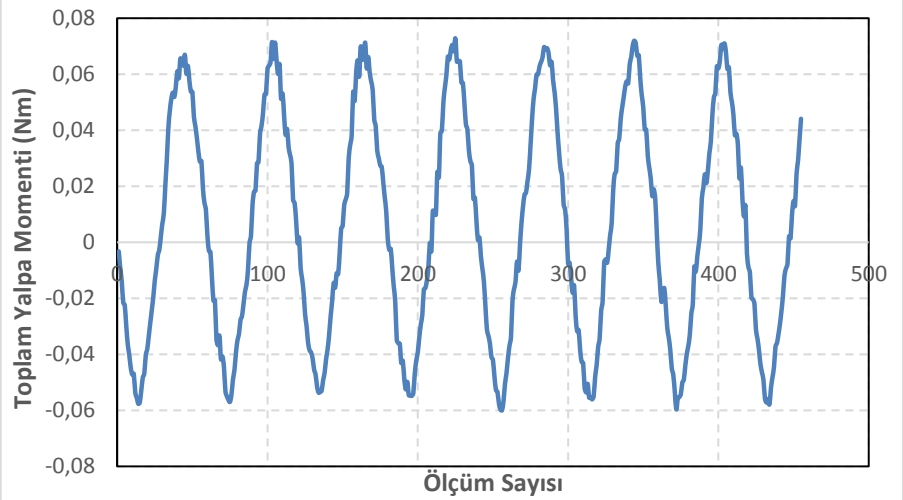
Şekil 3. 12 Deney sırasında serbest yüzeye yaklaşma durumu

Şekil 3.13-3.16 farklı yalpa genliklerinde yürütülen deneylerde tekneye etki eden yalpa momentlerini göstermektedir. Her bir analizde alınan saniye aralıkları aynı olmadığından eğriler farklı yerlerde maksimum değer göstermektedir. Şekillerden de anlaşıldığı üzere yalpa açısı arttıkça tekneye etki eden yalpa momentleri de artmıştır. Aynı durum yalpa sönüm katsayıları için söylenemez bunun için yalpa sönüm katsayılarının incelenmesi gerekir. Deneysel yalpa sönüm katsayıları ileriki bölümlerde gösterilmiştir.

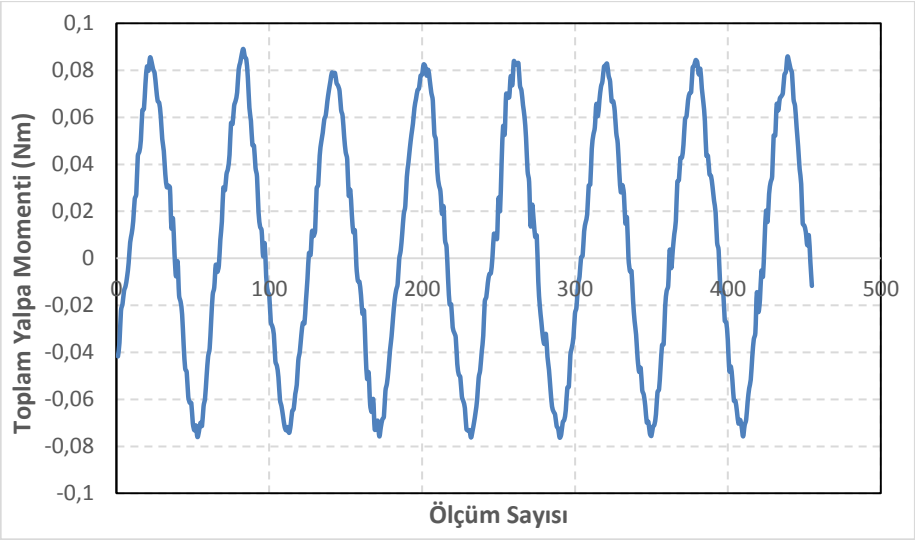
Deneyler sayısal sonuçların doğrulanması için büyük önem taşımaktadır. Sayısal sonuçların güvenilirliği için öncelikle deneylerle desteklenmesi gereklidir.



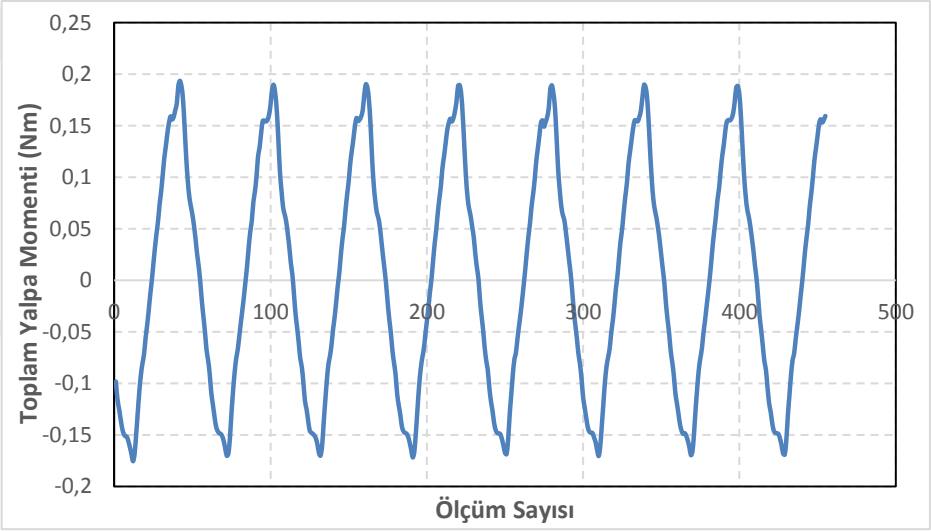
Şekil 3. 13 8.59^{o} yalpa genliği için yalpa momentleri deney sonuçları



Şekil 3. 14 11.38^{o} yalpa genliği için yalpa momentleri deney sonuçları



Şekil 3. 15 14.38^{o} yalpa genliği için yalpa momentleri deney sonuçları



Şekil 3. 16 27.27^{o} yalpa genliği için yalpa momentleri deney sonuçları

BÖLÜM 4

YALPA SÖNÜMÜNÜN SAYISAL OLARAK MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Gemi yalpa sönümünün sayısal olarak incelenmesi için yalpa hareketi esnasında gemi etrafındaki akışın çözülmesi gereklidir. Bu problemi tarif eden yönetici denklemler vardır. Bu yönetici denklemler bütün akışkan problemlerine temel teşkil etmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan HAD yöntemi de bu denklemleri temel alarak çözüm yapmaktadır. Bu bölümde bu temel denklemler ile gemi yalpa hareketinin sayısal çözücü kullanılarak nasıl modellendiği hakkında bilgi verilmiştir.

4.1 Akışkanlar Mekaniği Temel Denklemleri

Akışkanlar mekaniği problemlerinde temel denklemler diferansiyel formda ifade edilebilir ve bu denklemleri analitik olarak çözmek oldukça zordur. Kullanılan teori ve yönteme göre bazı basitleştirmeler yapılarak bu denklemler çözülebilir. Bu bölümde temel denklemler açıklanmıştır.

Bu tez çalışmasında incelenen akış problemi gereği akış sıkıştırılamaz kabul edilmiştir. Transport denklemleri kütlenin korunumu, momentumun korunumu ve enerjinin korunumu olmak üzere üç denklem takımını ifade etmektedir. Transport denklemlerinin en genel ifadesi:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}+\nabla.\left(\rho\phi\vec{V}\right)=\nabla.\left(\Gamma\nabla\phi\right)+S_{\phi} \tag{4.1}$$

şeklinde ifade edilir. Burada ϕ, akışkanın bir özelliğini temsil etmektedir. S_{ϕ} ise kaynak terimidir.

4.1.1 Kütlenin Korunumu

Denklem 4.1 de ϕ yerine 1 yazılırsa kütlenin korunumu denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla . \left(\rho \vec{V} \right) = 0 \tag{4.2}$$

Burada akışın sıkıştırılamaz olması durumunda denklem şu hali alır.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla . \vec{V} = 0 \tag{4.3}$$

Akışın daimi olduğu yani zamana bağlı olmadığı durumda ise denklem,

$$\nabla . \left(\rho \vec{V} \right) = 0 \tag{4.4}$$

halini alır. Akış hem sıkıştırılamaz hem de daimi ise,

$$\nabla . \vec{V} = 0 \tag{4.5}$$

denklemi elde edilir.

4.1.2 Momentumun Korunumu

Momentumun korunumu denklemleri, yukarıda bahsedilen transport denkleminde ϕ yerine hız terimi yazıldığı takdirde elde edilir ve üç ayrı hız bileşeni için türetilir.

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla . \left(\rho u \vec{V} \right) = \nabla . (\mu \nabla u) - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x \tag{4.6a}$$

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \nabla . \left(\rho v \vec{V} \right) = \nabla . (\mu \nabla v) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y \tag{4.6b}$$

$$\frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + \nabla . \left(\rho w \vec{V} \right) = \nabla . (\mu \nabla w) - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z \tag{4.6c}$$

Denklem 4.6 da verilen x, y ve z yönündeki hareket denklemleri özel olarak Navier-Stokes denklemleri adını almaktadır.

4.2 Sonlu Hacimler Yöntemi

Bu doktora çalışmasında kullanılan ticari sayısal çözücü sonlu hacim yöntemini kullanmaktadır. Sonlu hacimler yöntemi kullanılarak yukarıda bahsedilen transport denklemleri çözülebilmektedir. Ancak bu çözüm çerçevesinde söz konusu denklemler özel bir denkleme dönüşmektedir ve artık RANS denklemleri olarak anılmaktadır. Sonlu hacimler yöntemi analitik çözümü bulunmayan akış denklemlerini küçük hacimler üzerinde çözmektedir.

4.2.1 RANS Denklemleri

Yukarıda ifade edilen momentum denklemi tansörel notasyon kullanılarak viskoz gerilmeler de gösterilecek şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir [56]:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial t_{ji}}{\partial x_j} \tag{4.9}$$

Burada ∂t_{ji} , viskoz gerilme tansörü olup denklemi aşağıdaki gibidir:

$$t_{ji} = 2\mu s_{ij} \tag{4.10}$$

μ moleküler viskozite, s_{ij} ise gerilme oranı tansörüdür [56].

$$s_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{4.11}$$

Denklem 4.9 da verilen ifade içerisindeki hız terimi türbülanslı akımı temsil etmektedir. Bu durumda hız terimi içine zamana göre ortalama hız bileşeni ve çalkantı bileşeni dâhil olmaktadır [56].

$$u_i(x,t) = U_i + u_i'(x,t) \tag{4.12}$$

$$U_i(x,t) = \frac{1}{T}\int_t^T u_i(x,t)\,dt \tag{4.13}$$

Zamana göre ortalama hız bileşeni ve çalkantı hız bileşeni yukarıda açıklanmıştır. Momentum denklemindeki hız terimi bu iki bileşeni de kapsayacak şekilde değiştirildiğinde elde edilen denklem Navier-Stokes denkleminin özel bir hali olan

zaman ortalamalı Navier-Stokes denklemi adını alır. Söz konusu yeni denklemin kapalı formu aşağıdaki gibidir:

$$\rho\frac{\partial U_i}{\partial t}+\rho U_j\frac{\partial U_i}{\partial x_j}=-\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(2\mu S_{ji}-\overline{\rho u_j' u_i'}\right) \tag{4.14}$$

Burada $\overline{u_i' u_j'}$ terimi zaman içindeki ortalama değerdir. $-\overline{\rho u_j' u_i'}$ terimi Reynolds-gerilme tansörüdür.

$$\tau_{ij}=-\overline{\rho u_j' u_i'} \tag{4.15}$$

4.2.2 Reynolds-Gerilme Denklemi

RANS denklemindeki son terim Reynolds gerilmeleridir ve yöntem gereği meydana gelen zamana bağlı salınımları temsil etmektedir [57]. Yukarıda belirtilen çalkantı bileşenlerinin ortalaması alınıp gerekli düzenlemeler yapıldığı takdirde Reynolds-Gerilme denklemi elde edilmiş olur [56].

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t}+U_k\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k}=-\tau_{ik}\frac{\partial U_j}{\partial x_k}-\tau_{jk}\frac{\partial U_i}{\partial x_k}+\in_{ij}-\Pi_{ij}+\frac{\partial}{\partial x_k}\left[\upsilon\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k}+C_{ijk}\right] \tag{4.16}$$

Burada;

$$\Pi_{ij}=\overline{\frac{p'}{\rho}\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j'}{\partial x_i}\right)} \tag{4.17}$$

$$\in_{ij}=2\upsilon\overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_k}\frac{\partial u_j'}{\partial x_k}} \tag{4.18}$$

$$C_{ijk}=\rho\overline{u_i' u_j' u_k'}+\overline{p' u_i'}\delta_{jk}+\overline{p' u_j'}\delta_{ik} \tag{4.19}$$

olup denklem 4.16 türbülans kapama denklemlerine temel teşkil etmektedir. Π_{ij} terimi basınç-gerinimi korelasyon tensörü, $\in_{ij}$ yayılma tensörü, C_{ijk} türbülans taşınım tensörüdür.

4.2.3 Standart k-ε Türbülans Modeli

Ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımlarında kullanılan iki denklemli türbülans modelleri arasında en yaygın kullanılanı olan standart k-ε türbülans modelidir. Launder ve Spalding [58] tarafından önerilen bu model iki adet taşınım denkleminden oluşmaktadır. Modelin isminden de anlaşılacağı üzere bu iki denklem türbülans kinetik enerjisi k ve viskoz kayıp terimi ε içindir. Bu iki denklemi türetmek için Navier-Stokes operatörü kullanılmalıdır.

$$\mathrm{N}\left(u_i\right)=\rho\frac{\partial u_i}{\partial t}+\rho u_k\frac{\partial u_i}{\partial x_k}+\frac{\partial p}{\partial x_i}-\mu\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k\partial x_k} \tag{4.20}$$

Yukarıda verilen Navier-Stokes operatörünün momenti alınarak ε denklemi elde edilebilir [56].

$$\overline{2\upsilon\frac{\partial u_i'}{\partial x_j}\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mathrm{N}\left(u_i\right)\right]}=0 \tag{4.21}$$

Cebirsel bazı işlemlerden sonra viskoz kayıp terimi ε için transport denklemi şu hali alır:

$$\begin{aligned}&\rho\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}+\rho U_j\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}=-2\mu\left[\overline{u_{i,k}'u_{j,k}'}+\overline{u_{k,i}'u_{k,j}'}\right]\frac{\partial U_i}{\partial x_j}-2\mu\overline{u_k'u_{i,j}'}\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_k\partial x_j}\\&-2\mu\overline{u_{i,k}'u_{i,m}'u_{k,m}'}-2\mu\overline{u_{i,km}'u_{i,km}'}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}-\mu\overline{u_j'u_{i,m}'u_{i,m}'}-2\upsilon\overline{p_{,m}'u_{j,m}'}\right]\end{aligned} \tag{4.22}$$

Denklem 4.24 te görüldüğü gibi eşitlik içerisinde iki ve üç katlı çok sayıda bilinmeyen olduğundan bu tip denklemlerin çözümü için istatistiksel yöntemler geliştirilmiştir. Standart k-ε türbülans modeli için çeşitli bağıntılar aşağıda verilmiştir [56].

Kinematik eddy viskozitesi:

$$\mu_T=\rho C_\mu k^2/\varepsilon \tag{4.23}$$

Türbülans kinetik enerjisi:

$$\rho\frac{\partial k}{\partial t}+\rho U_j\frac{\partial k}{\partial x_j}=\tau_{ij}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}-\rho\varepsilon+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\mu_T/\sigma_k\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{4.24}$$

Türbülans yayılım oranı:

$$\rho\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}+\rho U_j\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}=C_{\varepsilon1}\frac{\varepsilon}{k}\tau_{ij}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}-C_{\varepsilon2}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\mu_T/\sigma_\varepsilon\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right] \tag{4.25}$$

Kapanma katsayıları:

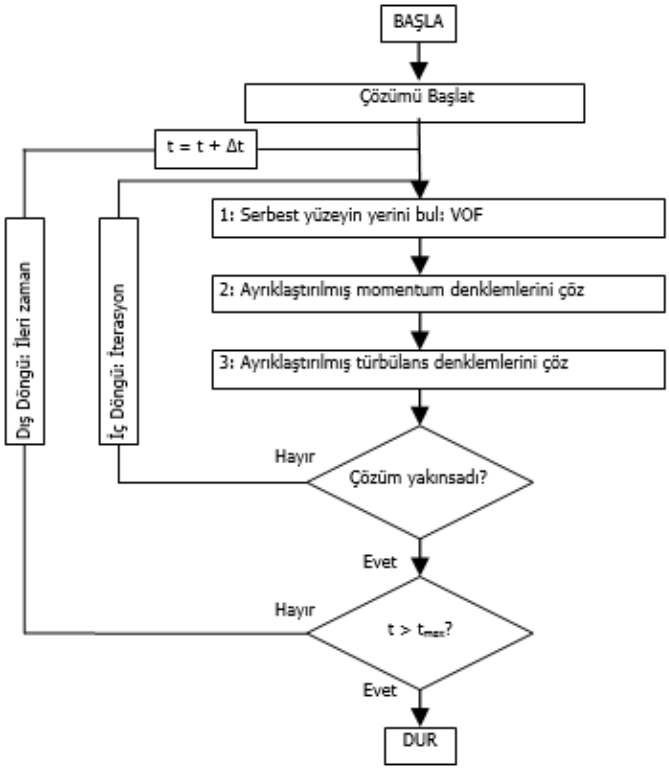
$$C_{\varepsilon 1}=1.44,\ C_{\varepsilon 2}=1.92,\ C_{\mu}=0.09,\ \sigma_k=1.0,\ \sigma_{\varepsilon}=1.3 \tag{4.26}$$

Diğer bağıntılar:

$$\omega=\varepsilon/\left(C_{\mu}k\right),\ l=C_{\mu}k^{3/2}/\varepsilon \tag{4.27}$$

4.3 Sayısal Çözücü

Bu bölümde yalpa yapan tekne etrafındaki akışı çözmek için kullanılan sayısal çözücü hakkında bilgi verilmiştir. Sayısal çözücüye ait akış diyagramı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 1 Sayısal çözücü akış diyagramı

Zamana bağımlı sayısal problemlerde üç ayrı döngü vardır. Dış döngü zamanla ilgilidir. İç döngü ise hız, basınç ve türbülans gibi değişkenleri hesaplamak için yapılan iterasyondur. Son döngü ise akış diyagramında 2. ve 3. adım olarak gösterilen ve lineer denklemlerin çözülmesini sağlayan döngüdür.

Analizin başlayabilmesi için hesaplama hacminin tanımlanması, momentum ve türbülans denklemlerinin ayrıklaştırılması ve başlangıç değerlerinin tanımlanmış olması

gerekir. Bu hazırlıklar yapıldıktan sonra çözüme başlanabilir. İlk adım VOF metodu kullanılarak serbest yüzeyin yerinin tespit edilmesidir. İkinci adımda ayrıklaştırılmış momentum denklemleri çözülür ve hız, basınç değişkenleri hesaplanır. Hız ve basınç değerlerinin hesaplanmasıyla birlikte üçüncü adımda ayrıklaştırılmış türbülans denklemleri çözülerek κ ve ε değerleri hesaplanır.

Bu üç adımdan sonra elde edilen değerler başlangıç değerleri ile kıyaslanır ve bir sonraki iterasyona ihtiyaç olup olmadığı belirlenir. Her iterasyon sonunda bulunan değer bir sonraki iterasyonda başlangıç değeri olarak kullanılır. Bu iterasyon çözüm yakınsayana kadar devam eder. Çözüm yakınsadıysa bir sonraki zaman adımına geçilir ve bu işlem belirlenen maksimum akış zamanına kadar devam eder.

4.4 Yalpa Hareketinin Sayısal Modellenmesi

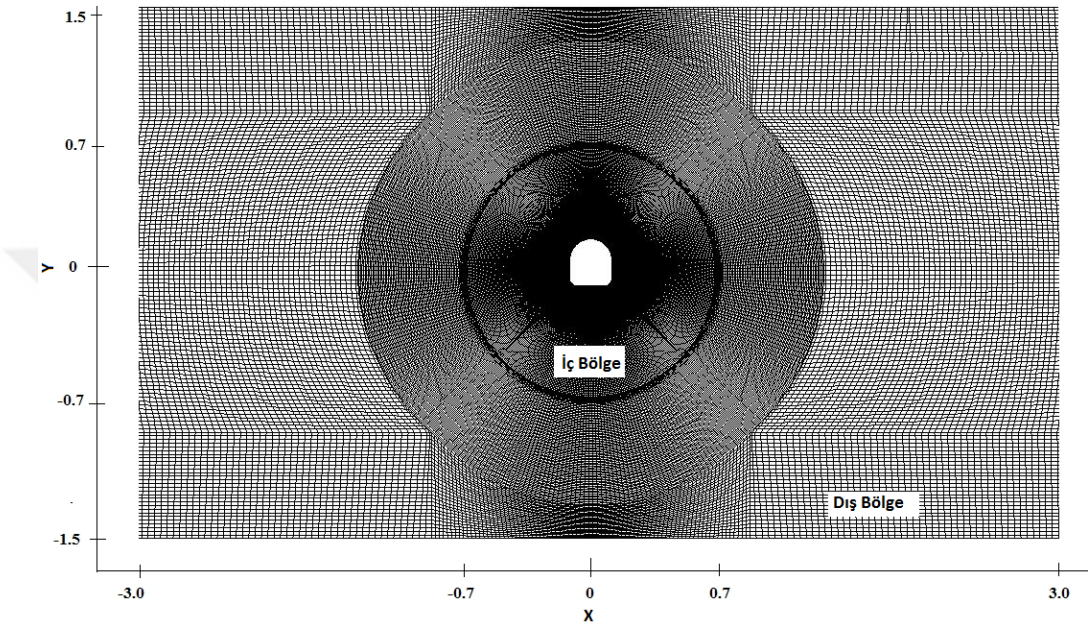
Bu bölümde sayısal çözücü kullanılarak yalpa hareketinin nasıl modellendiği hakkında bilgi verilmiştir. Serbest yüzey etkisi altında iki boyutlu olarak modellenen yalpa omurgalı tekne için oluşturulan ağ yapısı, sınır koşulları, başlangıç şartları ve kullanılan sayısal çözücüde tercih edilen hesaplama ayarları hakkında bilgi verilmiştir.

4.4.1 Hesaplama Modeli ve Ağ Yapısı

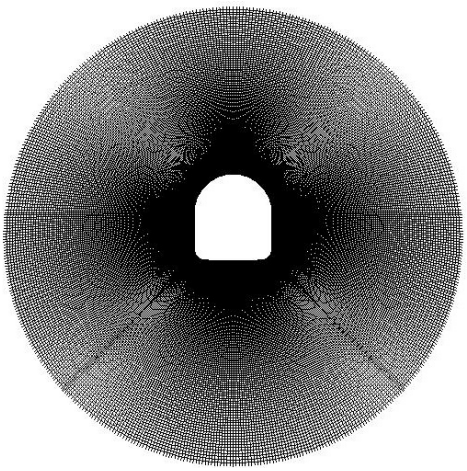
Sayısal analizler için oluşturulan model küçük kontrol hacimlerine ayrılarak bu hacimlerde ki her bir eleman için ayrıklaştırılmış transport denklemleri çözülür. Kontrol hacmini oluşturan elemanların büyüklüğü analiz süresini ve analizin doğruluğunu etkiler.

Bu tez kapsamında kullanılan model için oluşturulan ağ yapısı Şekil 4.2 ‘de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere oluşturulan modelde iki farklı bölge vardır. Birinci bölge dönme hareketinin verildiği iç bölge ve ikinci bölge ise sabit kalan dış bölgedir. İç bölge tekne ile birlikte hareket ettirilerek oradaki ağ yapısının bozulmaması sağlanmıştır. Dış bölge ise akış hareketlerini ve yayılan dalgaların sönümlenmesini sağlamaktadır. Ağ yapısını oluştururken “yapılandırılmış” (structured) adı verilen dört kenarlı elemanlar tercih edilmiştir. Literatürde bu tarz ağ yapısının hesaplamalarda avantajlar sağladığı belirtilmiştir [36]. Şekil 4.3’de tekne ile birlikte hareket eden iç bölgede tekne orta kesiti etrafındaki ağ yapısı gösterilmiştir. Buradaki eleman sayısı dış bölgeye oranla

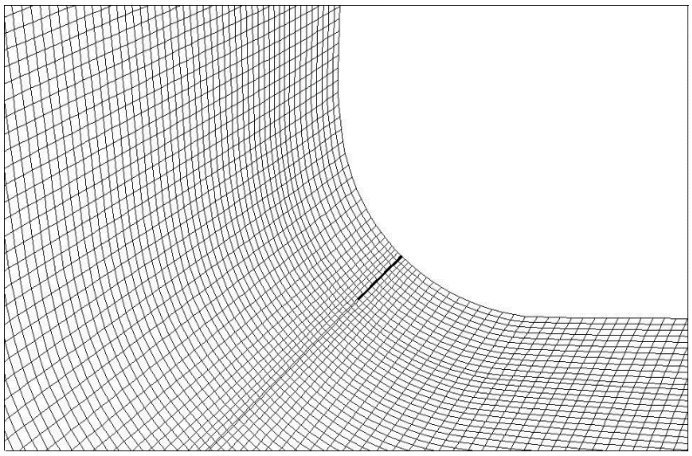
daha sıktır çünkü tekne etrafında oluşan akım ayrılmalarının ve girdapların doğru bir şekilde gözlemlenebilmesi için buradaki eleman sayısı artırılmıştır. Şekilden de görüldüğü üzere tekneye yaklaştıkça eleman sıklığı artmıştır. Şekil 4.4 ise tekne yalpa omurgası etrafındaki ağ yapısını göstermektedir. Literatür araştırmalarından varılan sonuca göre yalpa omurgası etrafındaki ağ yapısı $y^+ < 5$ olacak şekilde ayarlanmıştır ve eleman yükseklikleri 0.001m olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. 2 Kullanılan hesaplama modeline uygulanan ağ yapısı



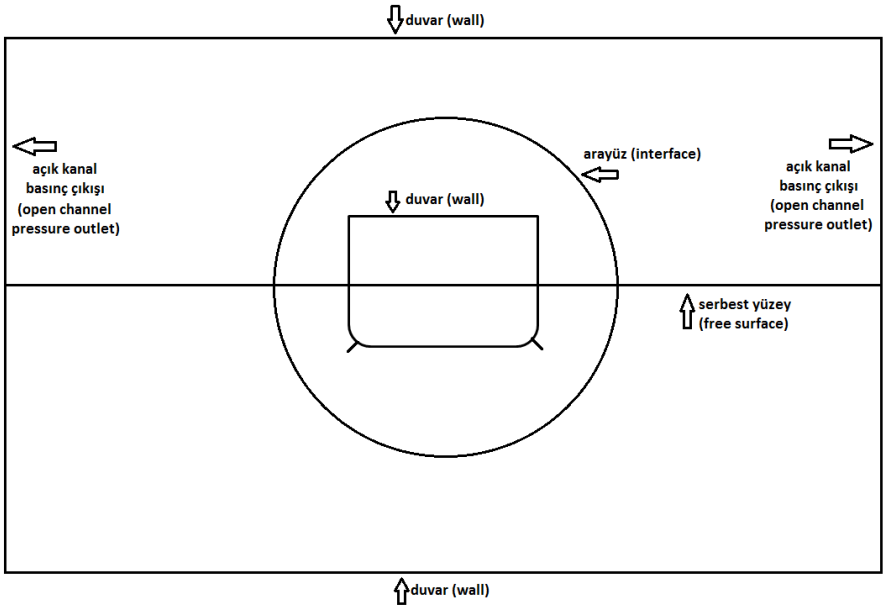
Şekil 4. 3 Hareketli iç bölge ağ yapısı



Şekil 4. 4 Yalpa omurgası etrafındaki ağ yapısı

4.4.2 Sınır Şartları

Analizlerde kullanılan hesaplama modeline ait sınır şartları Şeki 4.5'te gösterilmiştir. Görüldüğü üzere tekne ve yalpa omurga duvar olarak seçilmiştir yani bu noktalar üzerindeki normal ve teğetsel hızlar sıfırdır. Aynı şekilde dış bölgeye ait üst ve alt kısımlarda duvar olarak seçilmiştir. Dış bölgeye ait sağ ve sol kısımlar ise açık kanal basınç çıkışı olarak belirlenmiştir ve bu şekilde tekne serbest yüzeyi istenilen konuma ayarlanmıştır. Tekne hareketli bölge ve sabit bölgesini ayıran silindir ise arayüz olarak belirlenmiştir. Hareketli bölge kısmı için sayısal çözücüdeki "dynamic mesh" sekmesi aktif konuma getirilmiştir ve bu bölge içinde yer alan tekne, yalpa omurgası ve ağ yapısı seçilerek bu bölgeye hareket verilmiştir. Verilen hareketin ifadesi ve sayısal çözücüye nasıl tanımlandığı ilerleyen bölümlerde detaylı bir şekilde anlatılmıştır.



Şekil 4. 5 Sınır şartlarının hesaplama modeli üzerinde gösterilmesi

4.4.3 Başlangıç Koşulları

Çözüm algoritmasının doğru bir şekilde başlaması ve yürümesi için ele alınan problemdeki değişkenlerin başlangıç şartlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu değerler mümkün olduğunca doğru belirlenirse çözüm daha hızlı bir şekilde yakınsayacaktır. Analizlerde kullanılan başlangıç şartları Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 1 Başlangıç koşulları

	Su	I	Hava	Birim
x hız bileşeni		0		m/sn
y hız bileşeni		0		m/sn
Basınç		101325		Pa
Yoğunluk	998.2	I	1.225	kg/m^3
Türbülans kinetik enerji		1.0E-06		m^2/s
Türbülans dağılma oranı		1.0E-04		m^2/s^2

Her iki faz (su ve hava) başlangıçta sakin durumdadır ve bu yüzden x,y hız bileşenleri değerleri sıfırdır. Yoğunluk değerleri sayısal çözücünün içinde tanımlanmıştır ve akışkan tipi seçildiğinde otomatik olarak belirlenmektedir. Referans basınç değeri ortalama atmosfer basınç değerine ayarlanmıştır ve referans noktası basınç değişimlerinin mümkün olduğunca düşük olduğu bir nokta olarak belirlenmiştir. Bu durumda yapılan

analizlerde referans basınç noktası hava fazında dönen bölgeden yeterince uzak bir nokta olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin belirlenmesinde en karmaşık olan ve analiz sonuçlarını etkileyen türbülans parametreleridir. Bu değerlerin belirlenmesi için çeşitli kurallar vardır ancak hareketli akış için bunlar geçerli değildir. Bu değerlerin belirlenmesi için literatürde kullanılan modeller incelenmiştir ve en doğru sonuca ulaşana kadar yapılan hesaplamalar sonucu çizelgede gösterilen değerler alınmıştır.

4.4.4 Yalpa Hareketi

Kullanılan sayısal çözücüde tekneye hareket verme işlemi tekneyi çevreleyen ağ yapısına hız verilerek yapılır. Buradaki ağ yapısına bağlı olan duvarlarda aynı hıza sahip olurlar, yani iç hesaplama hacmine verilen hız beraberinde çıplak tekne ve yalpa omurgalarına da otomatik olarak yansır ve beraber hareket etmelerini sağlar. İstenilen hareket sayısal çözücüye tanımlanır ve tekne bu hareketi yaparken çıplak tekne ve yalpa omurgalarına etki eden kuvvet ve momentler ayrı olarak kayıt edilir. Bu tez kapsamında tekne sadece yalpa hareketine maruz bırakılmıştır, diğer hareketler kısıtlanmıştır.

Tekneye istenilen hareketi vermek için gerekli olan fonksiyon C^{++} programlama diliyle yazılarak sayısal çözücüye okutulmuştur. Sayısal çözücü bu fonksiyonu "user-defined-function" olarak çağırır. Bu fonksiyon zamana bağlı olarak dönme hızı olarak tanımlanmıştır. Herhangi bir zaman aralığında, sayısal çözücü bu fonksiyonu okuyarak tekneye gerekli olan hareketi sağlar.

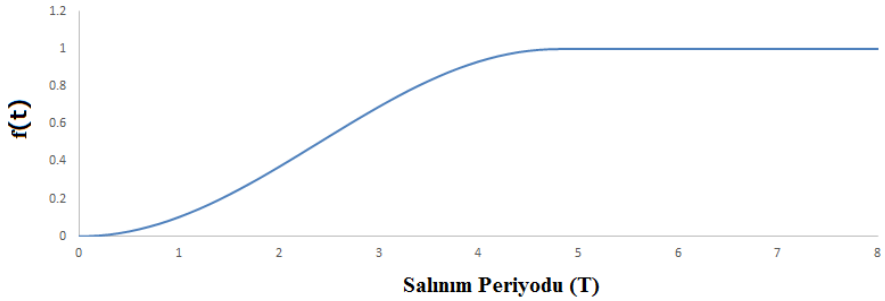
Tekne hareketi esnasında başlangıçta meydana gelen geniş tepe değerlerinden sakınmak için tekne kademeli bir şekilde hareket ettirilmelidir yani tekne maksimum açıya bir anda değil yavaş yavaş büyüyerek gelmelidir. Tekneye uygulanan harmonik hareket kosinüs fonksiyonudur.

$$\phi(t) = -\phi_a \cos(\omega t) \tag{4.1}$$

Tekneyi ilk dört salınımda sıfır yalpa genliğinden son değerine yavaşça kademeli şekilde getirecek bir başlangıç fonksiyonu tanımlanmıştır. Bu fonksiyonun değeri t=0 iken sıfır olmalıdır ve dört salınımdan sonra bire eşit olmalıdır. Başlangıç fonksiyonu;

$$f(t) = \frac{1}{2} sin\left(\frac{1}{4}\frac{\pi}{T}t - \frac{1}{2}\pi\right) + \frac{1}{2} \tag{4.2}$$

olarak tanımlanmıştır ve grafiği Şekil 4.6’ da gösterilmiştir.



Şekil 4. 6 Başlangıç fonksiyonu grafiği

Yani bu durumda yalpa hareketinin fonksiyonu;

$$\phi(t) = -f(t)\phi_a \cos(\omega t) \tag{4.3}$$

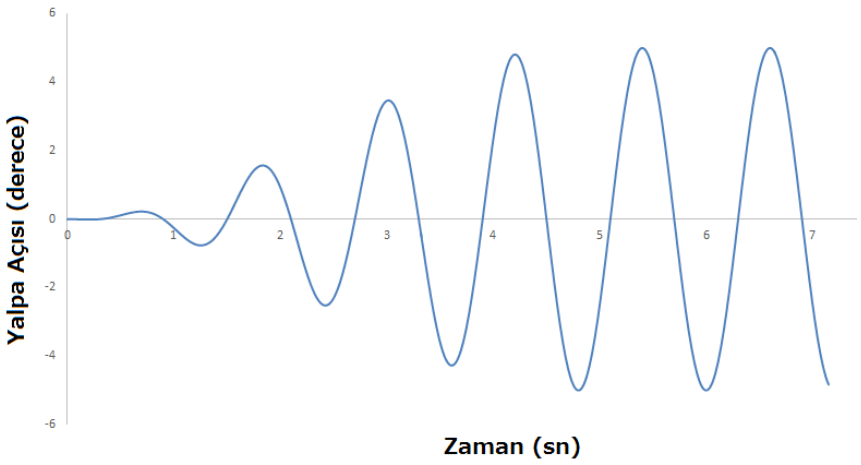
olarak belirlenmiştir. Kullanılan sayısal çözücü tekneye hareketi verirken hareket denklemini değil hız denklemini kullanır. Buna göre hız fonksiyonu;

$$\dot{\phi}(t) = f(t)\omega\phi_a \sin(\omega t) - f'(t)\phi_a \cos(\omega t) \tag{4.4}$$

olarak belirlenir. Burada $f'(t)$ başlangıç fonksiyonunun, $f(t)$, türevidir. ω ve ϕ_a ise sırasıyla yalpa frekansını ve yalpa genliğini vermektedir. Dört salınımdan sonra $f(t)$ fonksiyonunun değeri bire eşit olacaktır ve bu durumda son hız denklemi;

$$\dot{\phi}(t) = \omega\phi_a \sin(\omega t) \tag{4.5}$$

olacaktır. Tanımlanan bu hız denklemi ile tekne Şekil 4.7’deki gibi bir harmonik salınım yapacaktır.

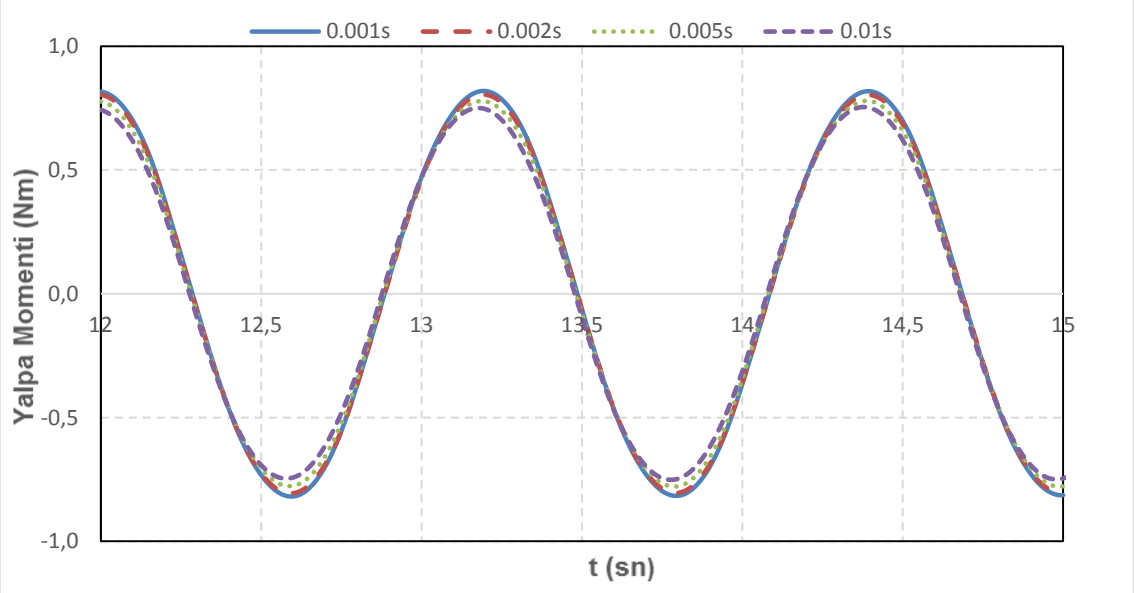


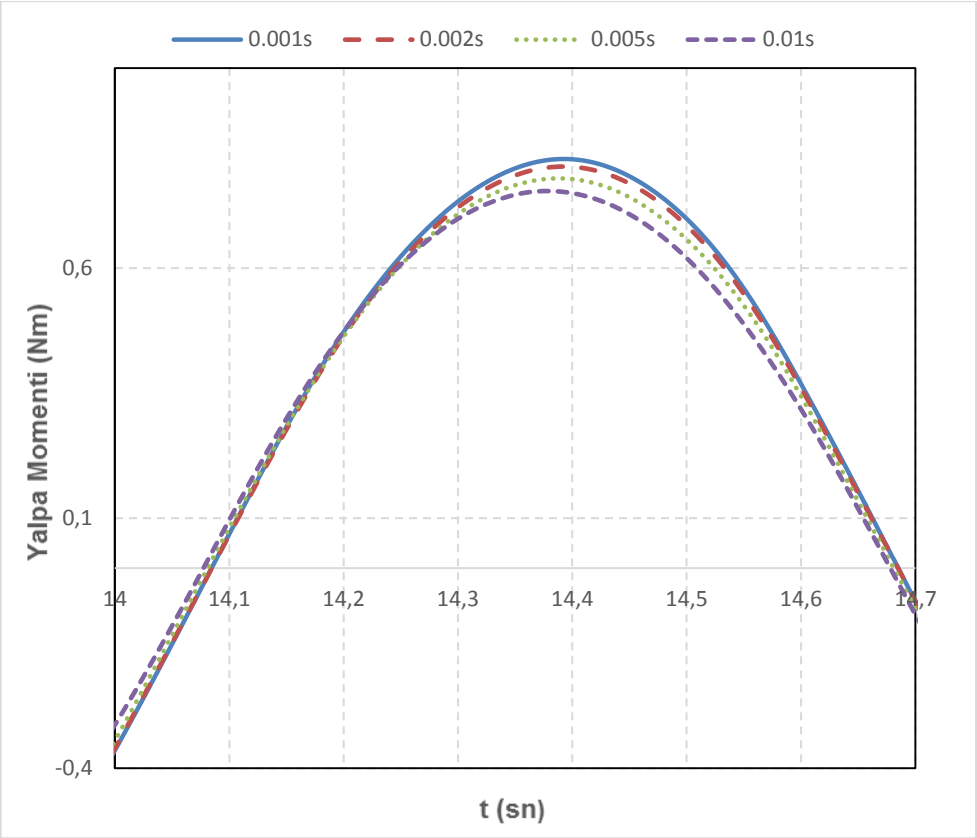
Şekil 4. 7 Yalpa hareketi

4.4.5 Hassaslık Analizleri

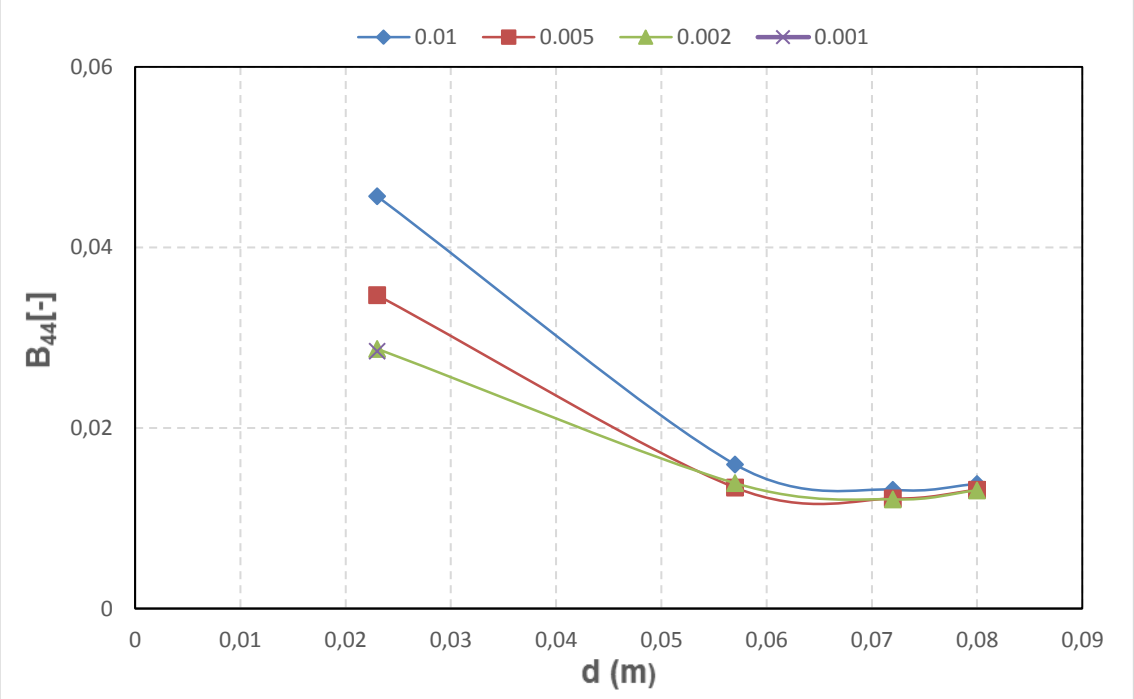
Zorlamalı yalpaya maruz bırakılmış tekneye ait sayısal sonuçları doğrulamak için ağ yapısı eleman sayısı ve zaman aralığı hassasiyeti analizleri yapılmıştır. Analizler sadece tek bir açı ve periyot için yapılmıştır. ϕ= 8.59^o ve T=1.2 sn olarak belirlenmiştir.

Zaman aralıkları analizleri Δt = 0.01, 0.005, 0.002, 0.001 sn için yapılmıştır. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi zaman aralığı küçüldükçe tekneye uygulanan toplam moment artmıştır ve son iki zaman aralığı için sonuçlar birbirine çok yakındır. Sonuçların yalpa sönümüne olan etkisi de ayrıca gösterilmiştir. Şekil 4.9 farklı su çekimlerinde farklı zaman aralıkları için yapılan yalpa sönüm analizlerini göstermektedir. Şekilden de anlaşıldığı üzere yalpa omurgasının serbest yüzeyle etkileşime girmediği su çekimi değerlerinde tüm zaman aralıkları için değerler aynıdır. Ancak yalpa omurgasının serbest yüzeyle etkileşime girdiği düşük su çekimi değerlerinde zaman aralığı küçüldükçe sonuçlar birbiriyle benzerlik göstermiştir. Bunun sebebi yalpa omurgasının serbest yüzeyle etkileşime girdiği durumlarda lineerlik derecesinin azalmasıdır. Aynı durum geniş yalpa açılarında da söz konusudur.



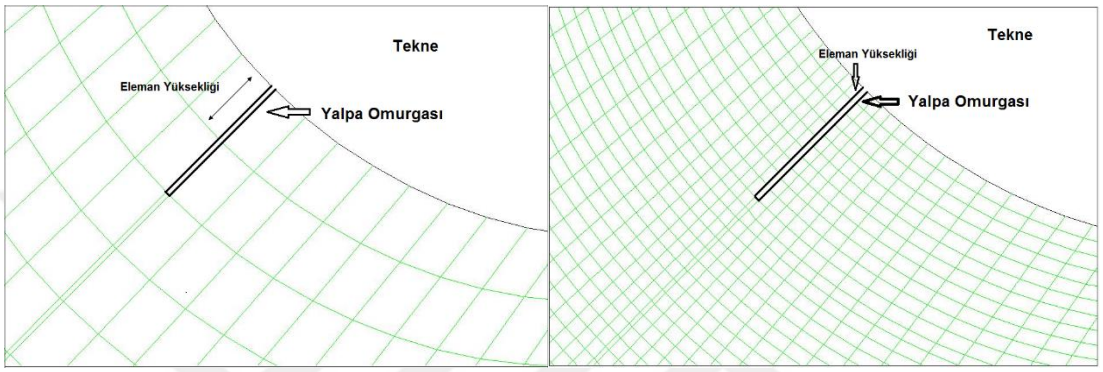


Şekil 4. 8 Farklı zaman aralıkları için moment eğrileri

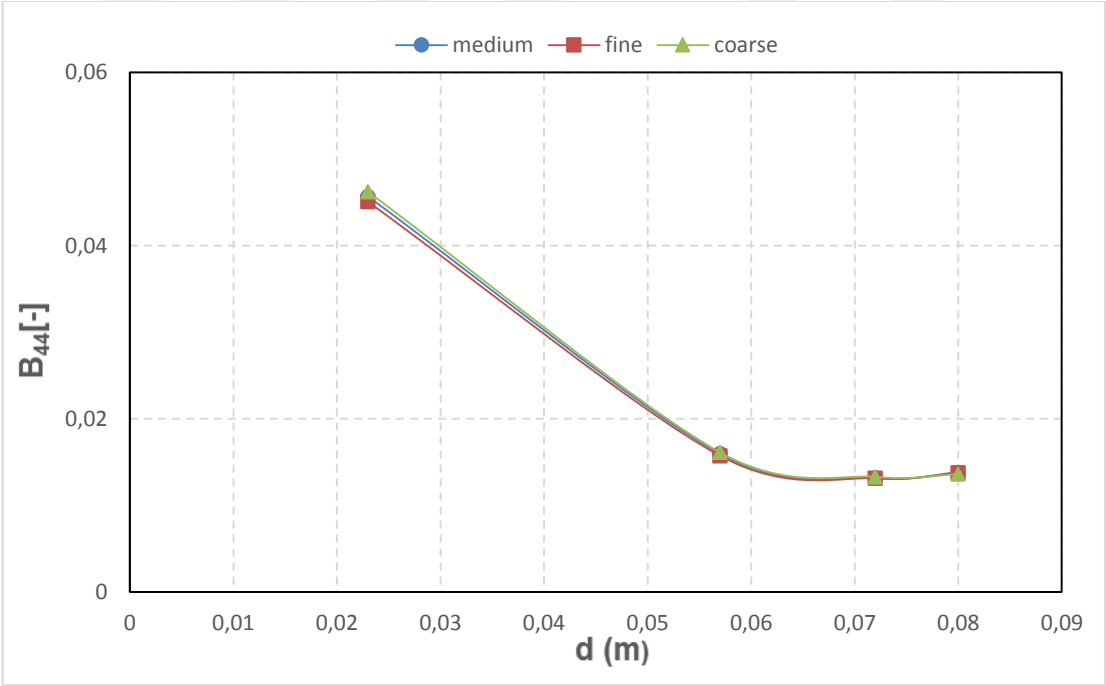


Şekil 4. 9 Farklı zaman aralıklarında toplam yalpa sönüm katsayıları

Ağ yapısı hassasiyeti için ise üç farklı eleman boyutu kullanılmıştır. Şekil 4.10'da gösterildiği gibi eleman yükseklikleri değiştirilerek üç farklı ağ yapısı çalışması yapılmıştır. Eleman yükseklikleri δ olarak tanımlanmıştır ve δ = 0.005, 0.001 ve 0.0007 olarak alınmıştır. Farklı eleman boyutları sonuçları zaman aralıklarındaki kadar etkilememiştir, üç farklı ağ yapısını oluşturan eleman boyutu için de yalpa sönüm katsayıları büyük oranda benzerlik göstermişlerdir. Şekil 4.11 farklı eleman boyutları için farklı su çekimlerinde hesaplanan yalpa sönüm katsayılarını göstermektedir.



Şekil 4. 10 Farklı ağ yapıları için eleman yükseklikleri (δ = 0.005m ve δ = 0.001m)



Şekil 4. 11 Farklı ağ yapısı boyutları için toplam yalpa sönüm katsayıları

BÖLÜM 5

GEMİ SU ÇEKİMİNİN YALPA SÖNÜMÜNE ETKİSİ

5.1 Giriş

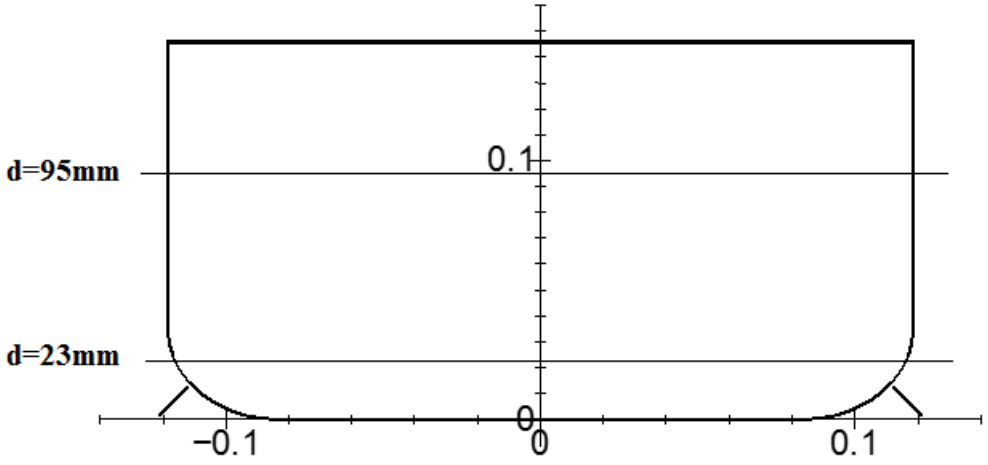
Daha öncede vurgulandığı gibi, gemilerde yalpa hareketi esnasında yalpa sönümüne neden olan çeşitli faktörler vardır; serbest yüzey dalgaları, tekne yüzey sürtünmesi, tekneden saçılan girdaplar vb. gibi. Yalpa omurgasının varlığı yalpa sönümünü büyük derecede etkiler. Ikeda tarafından önerilen yalpa sönümünün beş ayrı bileşene; dalga, kaldırma, sürtünme, girdap ve yalpa omurgası bileşeni, ayrıldığı metotta yalpa omurgası sönümü yalpa omurgası varlığında tekne omurgası üzerinde meydana gelen basınç dağılımına ve yalpa omurgası normal kuvvetine bağlı olarak tanımlanmıştır. Ikeda tarafından yapılan deneyler sonucunda bazı varsayımlar yapılmış ve bağıntılar geliştirilmiştir. Deneyler yalpa omurgasının en etkin olduğu yani tam olarak batmış durumda iken gerçekleştirilmiştir. Bu yüzden sonuçlarda serbest yüzey etkisi hesaba katılmamıştır. Bu etki yalpa omurgasının serbest yüzeye yaklaştığı durumlarda daha etkili olabilir ve yalpa sönümünü etkileyebilir bu yüzden bu koşullarda yalpa sönümü serbest yüzey etkisi hesaba katılarak detaylı olarak incelenmelidir.

Bu bölümde, yalpa sönümü iki boyutlu bir gemi kesiti için farklı gemi su çekimleri için hesaplanmıştır. Su çekimi değişimi, yalpa omurgasının serbest yüzeyle etkileşimde olmadığı derin su çekimi durumu ve serbest yüzeye yeterince yaklaştığı sığ su çekimi durumu olarak belirlenmiştir. Farklı su çekimi durumları için yalpa sönümü deneysel olarak, Ikeda metodu kullanılarak ve sayısal olarak hesaplanmıştır. Yalpa omurgasının serbest yüzeyle etkileşime girdiği sığ su çekimi durumunda Ikeda metodunun beklendiği gibi değerleri gerçek değerinden fazla hesapladığı gözlemlenmiştir. Sayısal sonuçlar deney sonuçlarıyla doğrulanmış ve Ikeda metodunun neden farklı sonuçlar

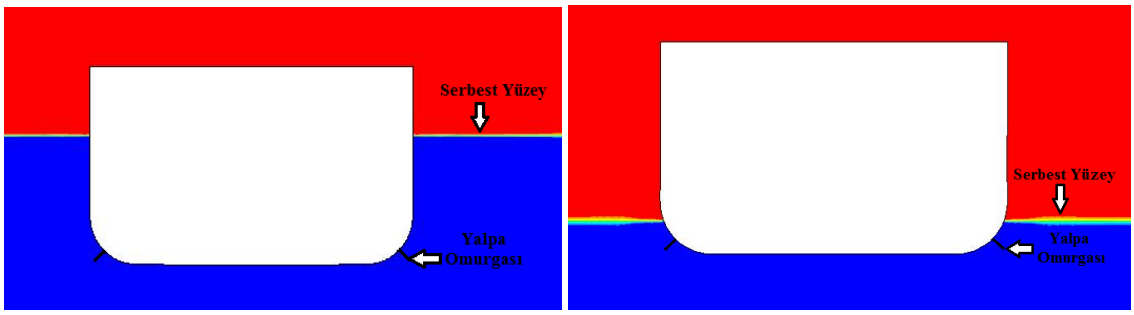
verdiği sayısal metot kullanılarak detaylı olarak gösterilmiştir. Farklı su çekimi durumlarında tekne üzerinde oluşan hidrodinamik moment değerleri, basınç değişimleri analiz edilmiştir.

5.2 Zamana Bağlı Yalpa Hareketi ve Yalpa Momenti

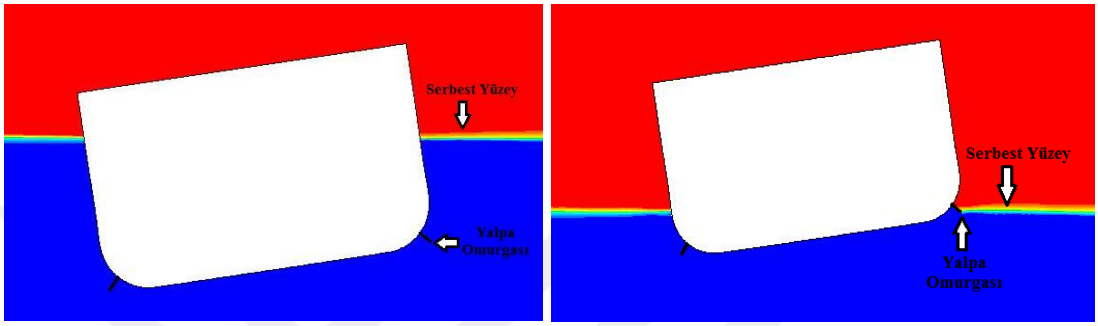
Gemi su çekimi değişiminin yalpa sönümü üzerindeki etkisini incelemek için farklı su çekimi değerlerinde tekneye etki eden hidrodinamik yalpa momentleri sayısal olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.1 hesaplarda kullanılan iki boyutlu tekne orta kesitini ve su çekiminin hangi aralıklarda değiştiğini göstermektedir. Analizler sıfır hız durumunda yedi farklı su çekiminde tek bir yalpa açısı ve yalpa frekansı için yapılmıştır. Su çekimi aralığı 96mm-23mm olarak belirlenmiştir. Su çekimi azaldıkça yalpa omurgası serbest yüzeye yaklaşmaktadır ve hatta en düşük su çekimi değerinde yalpa omurgası sudan dışarı çıkmaktadır. Şekil 5.2 en yüksek ve en düşük su çekimi durumlarında (d=96mm ve d=23mm) yalpa açısı minimum iken yalpa omurgasının konumunu göstermektedir. Şekil 5.3 ise maksimum yalpa açısında yalpa omurgasının konumunu göstermektedir.



Şekil 5. 1 Su çekimi değişimi aralığının tekne orta kesitinde gösterimi

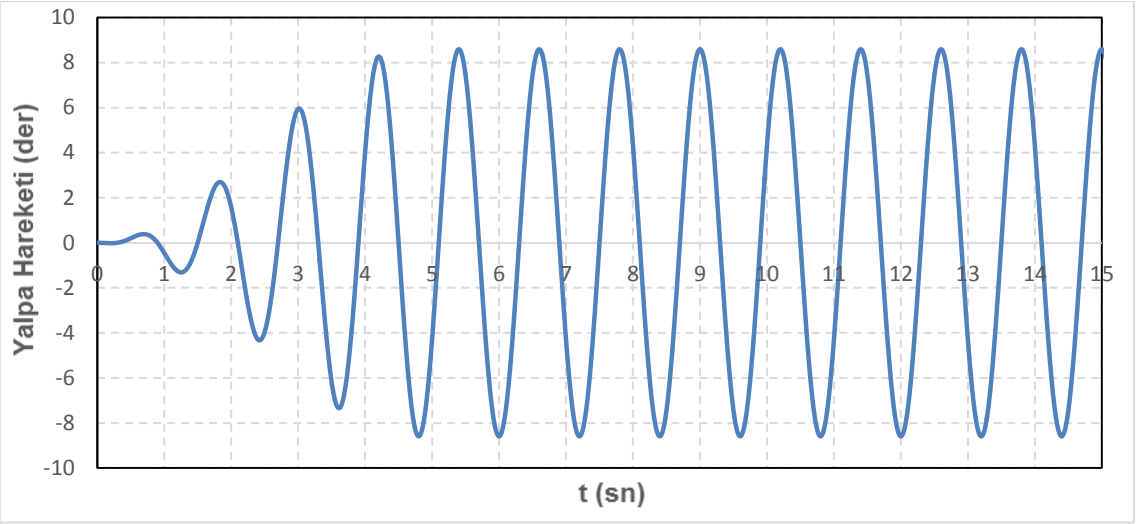


Şekil 5. 2 Min. yalpa açısında yalpa omurgasının serbest yüzeyden uzaklığı



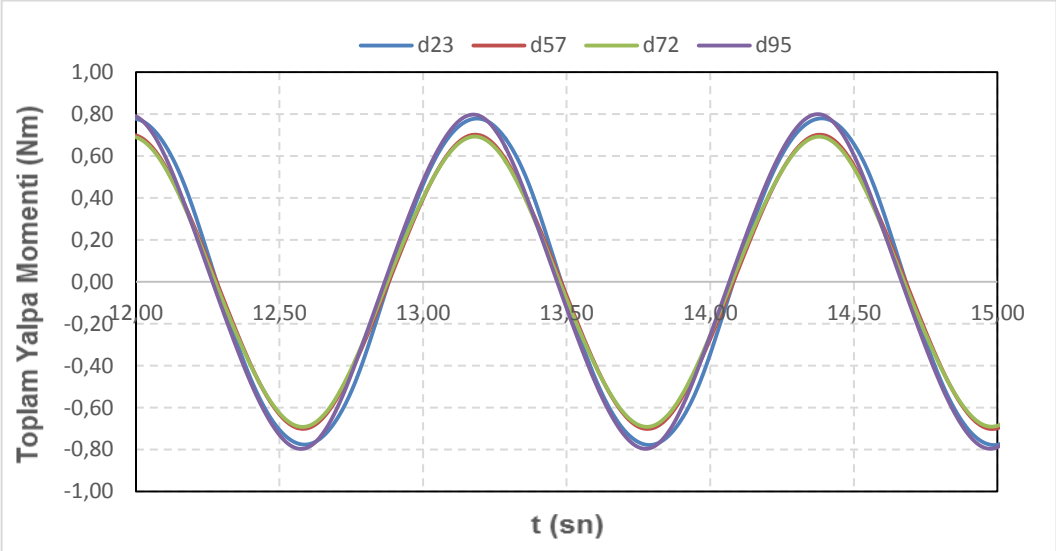
Şekil 5. 3 Maks. yalpa açısında yalpa omurgasının serbest yüzeyden uzaklığı

Şekil 5.3'te görüldüğü üzere yalpa omurgası sığ su çekimi konumunda serbest su yüzeyi ile etkileşimdedir ve bu etkileşim yalpa sönümünü etkilemektedir. Yalpa sönümü hesabı için iki boyutlu gemi kesiti belli bir açıda ve belli bir frekansta zorlanmış yalpaya maruz bırakılmıştır. Yalpa açısı, ϕ, 8.59^{o} ve yalpa periyodu, T, 1.2 sn olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında zorlanmış yalpaya maruz bırakılan gemi kesitinin yalpa hareketi Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Daha öncede vurgulandığı gibi salınımın ilk saniyelerinde oluşan güçlü akış etkilerinden sakınmak için harekete bir başlangıç fonksiyonu tanımlanmıştır.



Şekil 5. 4 Tekne yalpa hareketi

Tekne bu hareketi yaptığı esnada tekne ve yalpa omurgasına etkiyen toplam moment sayısal olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.5 farklı su çekimleri için tekne üzerine etki eden toplam momenti (çıplak tekne+yalpa omurgası) göstermektedir. Su çekimi arttıkça tekneye etki eden toplam momentin azaldığı görülmektedir ancak en yüksek su çekimi durumunda (d=95mm) bu durum değişmiş ve toplam moment artmıştır. Bu yüzden toplam moment grafiklerine bakılarak yalpa sönümü hakkında artıyor veya azalıyor diye kesin bir sonuca varılamaz. Çünkü yalpa sönümü aynı zamanda yalpa momenti ve yalpa açısı arasındaki faz farkına da bağlıdır. Bunun için yalpa sönüm değerlerinin hesaplanması gereklidir.



Şekil 5. 5 Farklı su çekimleri için gemiye etki eden yalpa momenti

5.3 Yalpa Sönüm Katsayısı Sonuçları

Hesaplanan yalpa momentleri kullanılarak yalpa sönüm değerleri elde edilmiştir. 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.

Gemi yalpa hareket denkleminde bilinen tüm terimleri eşitliğin sağ tarafına ve bilinmeyen hidrodinamik terimleri denklemin sol tarafında bırakırsak;

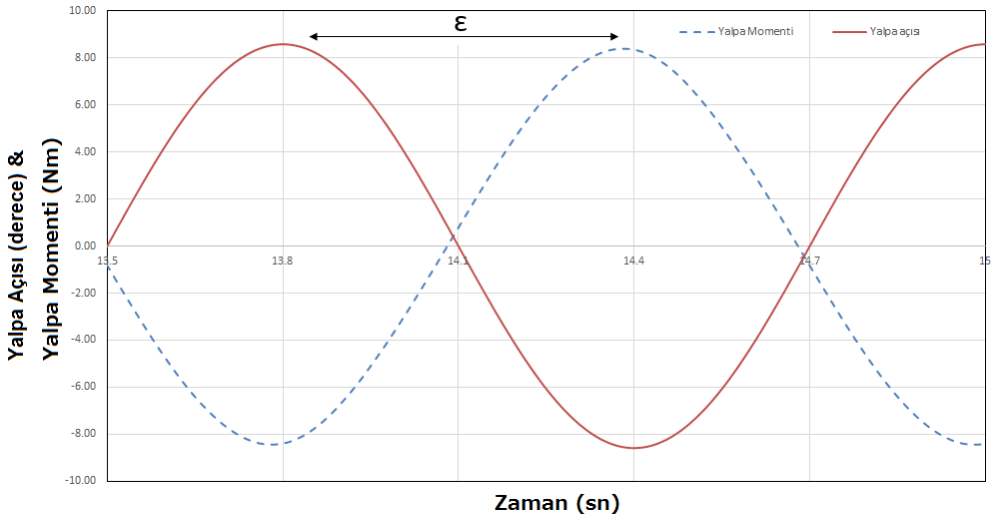
$$(I_{44} + A_{44})\ddot{\phi} + B_{44}(\dot{\phi}) + C_{44}(\phi) = M_{44}(t) \quad (5.1)$$

$$A_{44}\ddot{\phi} + B_{44}\dot{\phi} = M'_{44}(t) \quad (5.2)$$

eşitlik bu hale gelir. Burada $M'_{44}(t)$ kütle dağılımı etkisi olmadan ölçülen yalpa momenti değerleridir. Kullanılan sayısal çözücüde kütle hesaba katılmamıştır, bundan dolayı ölçülen moment otomatik olarak $M'_{44}(t)$ değerine eşittir. Hesaplanan bu moment değerlerine FA uygulandıktan sonra moment fonksiyonu;

$$M'_{44}(t) = M_0 \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (5.3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada M_0 moment genliğini ve ε ise yalpa momenti ve yalpa açısı arasındaki faz farkını göstermektedir (Şekil 5.6).



Şekil 5. 6 Faz farkı gösterimi

Bu eşitliği 5.2 denkleminde yerine yazarsak;

$$A_{44}\ddot{\phi} + B_{44}\dot{\phi} = M_0\cos(\omega t + \varepsilon) \quad (5.4)$$

eşitliğini elde ederiz. Hız ve ivme denklemlerini bu eşitlikte yerine koyarsak;

$$\phi(t) = -\phi_a\cos(\omega t) \quad (5.5a)$$

$$\dot{\phi}(t) = \omega\phi_a\sin(\omega t) \quad (5.5b)$$

$$\ddot{\phi}(t) = \omega^2\phi_a\cos(\omega t) \quad (5.5c)$$

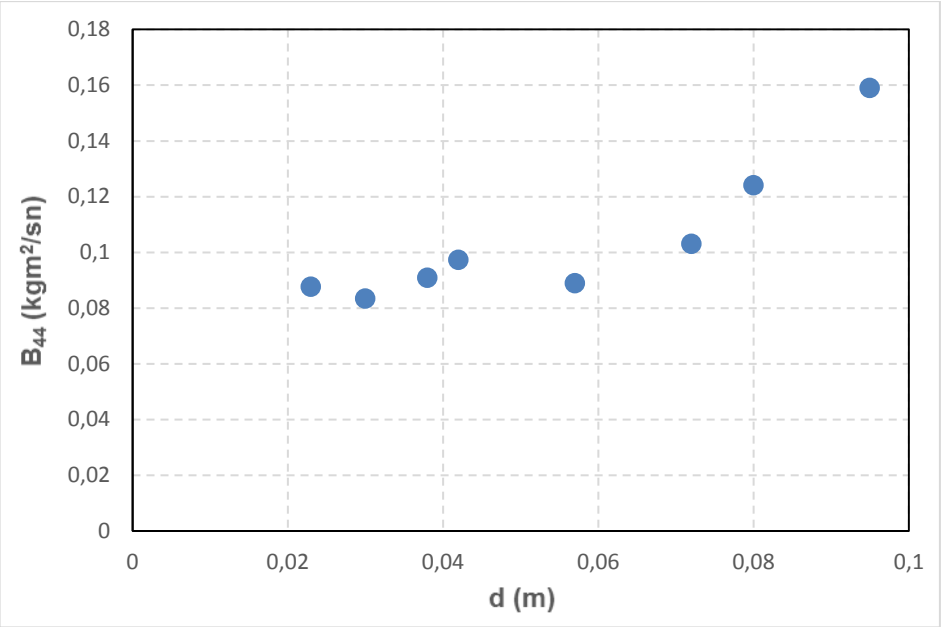
eşitlik

$$A_{44}\omega^2\phi_a\cos(\omega t) + B_{44}\omega\phi_a\sin(\omega t) = -M_0\cos(\varepsilon)\cos(\omega t) + M_0\sin(\varepsilon)\sin(\omega t) \quad (5.6)$$

halini alır. Bu eşitlik kullanılarak istenilen yalpa sönümü değeri hesaplanabilir. $\omega t = \frac{\pi}{2}$ değeri eşitlikte yerine koyulursa, yalpa sönümünü hesaplamak için gerekli olan ifade elde edilir.

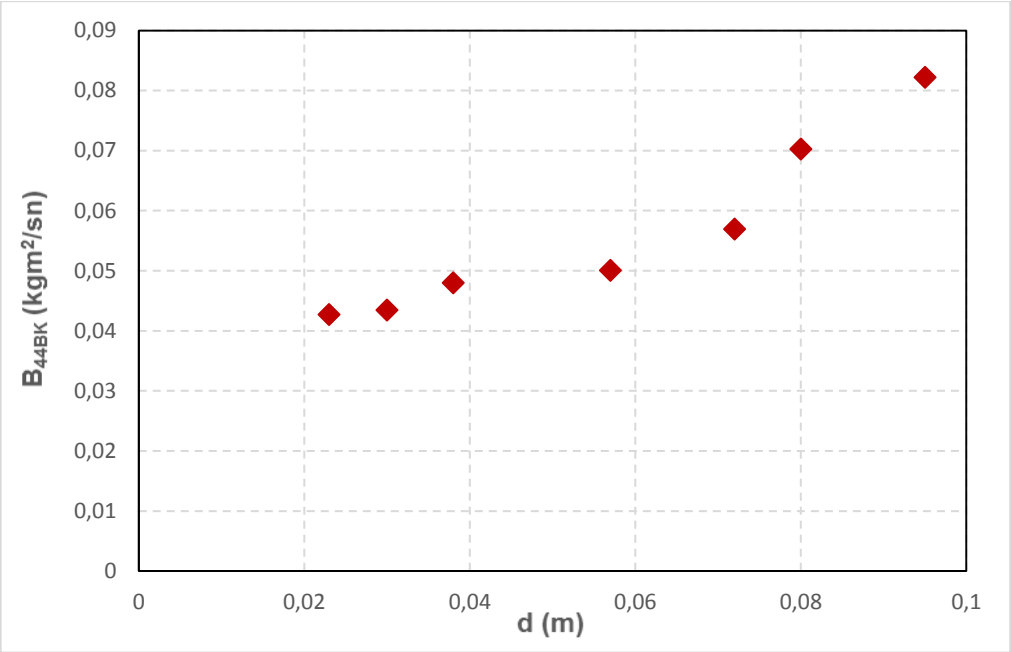
$$B_{44} = \frac{M_0.\sin\varepsilon}{\phi_a.\omega} \quad (5.7)$$

Bu eşitlik kullanılarak farklı su çekimleri için yalpa sönüm katsayısı, B_{44}, sayısal olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.7 farklı su çekimleri için hesaplanan yalpa sönüm katsayılarını göstermektedir.



Şekil 5. 7 Farklı su çekimleri için toplam yalpa sönüm katsayıları

Sonuçlara bakıldığında yalpa sönümünün doğrusal olmayan karakteri görülmektedir. Su çekimi azaldıkça toplam yalpa sönümü genel olarak azalmaktadır ve en düşük su çekiminde bir yükselme görülmektedir. Bu artış muhtemelen yalpa omurgasının sudan çıkmasıyla oluşan yalpa omurgası dalga bileşeninin artışından kaynaklanmaktadır. Yalpa omurgasının serbest yüzeye yaklaştıkça toplam sönüme olan katkısının azaldığını göstermek için yalpa omurgası sönüm katsayıları ayrı olarak hesaplanmıştır. Kullanılan sayısal çözücü yalpa omurgası ve çıplak tekneye etki eden momentlerin ayrı ayrı kaydedilmesini sağlamaktadır. Yalpa omurgasına etki eden momentler farklı su çekimleri için hesaplanmış ve yalpa omurgası sönüm katsayıları elde edilmiştir. Şekil 5.8 farklı su çekimlerinde hesaplanan yalpa omurgası sönüm katsayılarını göstermektedir.



Şekil 5. 8 Farklı su çekimleri için yalpa omurgası sönüm katsayıları

Şekil 5.8'de görüldüğü üzere yalpa omurgasının toplam sönüme olan katkısı yalpa omurgası serbest su yüzeyine yaklaştıkça azalmıştır. Ikeda metodunun hesaba katmadığı bu etki görüldüğü gibi değerleri önemli ölçüde etkilemektedir. İki yöntem arasındaki farklılıkları göstermek için bir sonraki bölümde sayısal olarak hesaplanan yalpa sönüm katsayıları Ikeda metodu ile karşılaştırılmıştır ve ayrıca deney sonuçları da gösterilerek sayısal sonuçlar doğrulanmıştır.

5.4 Boyutsuz Yalpa Sönüm Katsayısı

Sayısal olarak elde edilen yalpa sönüm katsayılarının Ikeda metodu ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması için yalpa sönüm katsayıları boyutsuzlaştırılmıştır. Boyutsuz yalpa sönüm katsayısı;

$$\hat{B}_{44} = \frac{B_{44}}{\rho A B^2}\sqrt{\frac{B}{2g}} \tag{5.8}$$

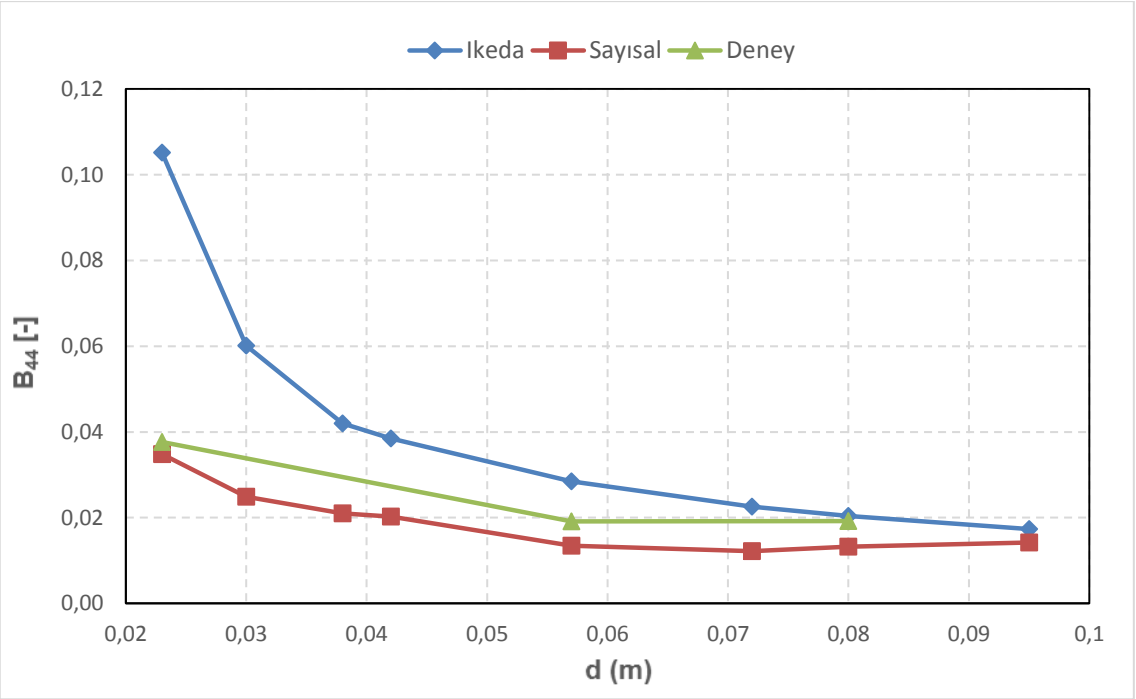
şeklinde ifade edilir. Burada B model genişliğini, A orta kesit alanını, ρ yoğunluğu ve g ise yerçekimi ivmesini vermektedir.

5.4.1 Boyutsuz Yalpa Sönüm Katsayılarının Karşılaştırılması

Bu bölümde sayısal olarak hesaplanan boyutsuz toplam yalpa sönüm katsayıları Ikeda metodu ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 5.9 üç farklı hesaplama metodunun sonuçlarını göstermektedir. Şekilde kırmızı çizgi sayısal sonuçları, yeşil çizgi deneysel sonuçları ve mavi çizgi ise Ikeda metodunu göstermektedir. Analizlerde sadece su çekimleri değiştirilmiş ve diğer parametreler sabit tutulmuştur. Yalpa açısı, ϕ, 8.59^{o}, yalpa periyodu, T, 1.2 sn olarak belirlenmiştir. Ağırlık merkezi, KG, 72 mm olarak alınmış ve yalpa ekseni de bu nokta alınarak hesaplar yapılmıştır.

Şekilden de anlaşılacağı üzere sayısal sonuçlar deneysel verilerle Ikeda metoduna göre daha uyumludur ve aynı eğilimi göstermiştir. Özellikle düşük su çekimlerinde Ikeda metodunun değerleri fazla hesapladığı görülmektedir. Çünkü önceden de vurgulandığı üzere su çekimi azaldıkça serbest yüzey etkileşimi artmaktadır ve Ikeda metodu bu etkiyi hesaba katmamaktadır, bu da sonuçların olması gerekenden fazla hesaplanmasına neden olmuştur.

Burada dikkat edilmesi gereken bir husus boyutlu yalpa sönüm katsayıları su çekimi azaldıkça azalmakta iken boyutsuz yalpa sönüm katsayısı artmaktadır. Bunun sebebi boyutsuzlaştırma analizinde orta kesit katsayısı kullanılmaktadır ve su çekimi düştükçe bu değer azaldığından boyutsuz yalpa sönüm katsayısında bir artış gözlenmiştir. Boyutsuzlaştırma analizi sadece farklı metotları karşılaştırmak için kullanılmıştır.



Şekil 5. 9 Farklı su çekimleri için boyutsuz yalpa sönüm katsayıları

Sayısal çözücü deneysel verilerle doğrulandıktan sonra Ikeda metodunun düşük su çekimlerinde neden farklı sonuçlar verdiği araştırılmıştır. Yalpa sönüm katsayısına en büyük katkı yalpa omurgası bileşeni tarafından sağlandığından yalpa omurgası sönüm bileşeni üzerine odaklanılmıştır.

Yalpa omurgası sönümünü oluşturan bileşenleri etkileyen yalpa omurgasına etkiyen normal kuvvet ve yalpa omurgasının tekne üzerinde oluşturduğu basınç dağılımı sayısal olarak detaylı bir şekilde araştırılmıştır ve Ikeda metoduyla farklılıkları gösterilmiştir.

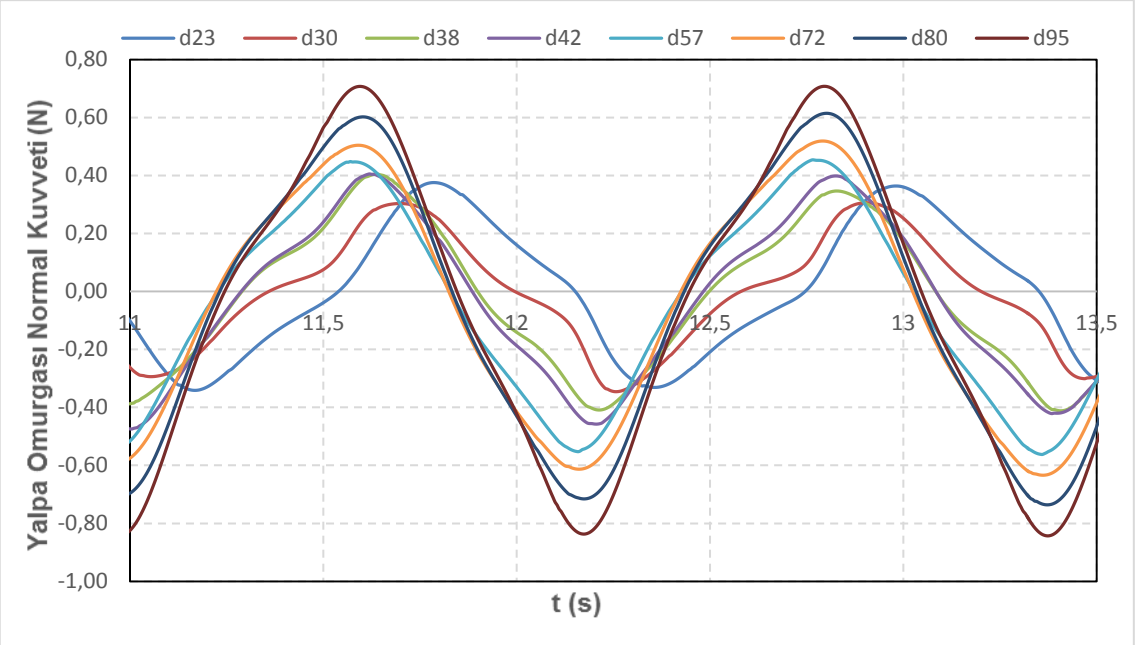
5.5 Yalpa Omurgası Normal Kuvveti Hesabı

Bu bölümde su çekimi azaldıkça ya da serbest yüzey etkisi arttıkça yalpa omurgasının etkisinin azaldığı sayısal olarak gösterilmiştir. Bunun için zorlanmış yalpa esnasında yalpa omurgasına etkiyen normal kuvvet bileşeni ve moment hesaplanmıştır.

Şekil 5.10 farklı su çekimlerinde yalpa omurgasına etkiyen normal kuvvetleri göstermektedir. Açıkça görülmektedir ki su çekimi azaldıkça ya da yalpa omurgası serbest su yüzeyine yaklaştıkça etkisini kaybetmektedir ve yalpa omurgasına etkiyen kuvvet azalmaktadır. Ayrıca faz farkının da büyük ölçüde değiştiği gözlemlenmiştir.

Kuvvet ve faz farkındaki bu değişim yalpa omurgasından kaynaklanan sönümü etkilemektedir.

Burada dikkat edilmesi gereken diğer bir ayrıntı en düşük su çekimi durumunda kuvvet değerinde bir artış gözlemlenmesidir. Yalpa sönümü katsayıları sonucunda da vurgulandığı üzere bu artış yalpa omurgasının bu su çekimi durumunda su yüzeyinden dışarı çıkmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü dışarı çıkan yalpa omurgası dalga oluşturmaktadır ve oluşan bu dalga yalpa omurgası dalga bileşeninde artışa neden olmaktadır. Bu bileşen Ikeda metodunda ihmal edilmiştir çünkü hesaplaması zor bir bileşendir. Bunun nedeni tekne dalgası ve yalpa omurgası dalgası arasındaki faz farkıdır ve pozitif ya da negatif katkı sağlayabilir [14]. Himeno [16] geniş boyuttaki yalpa omurgalarına sahip savaş gemilerinde ve yalpa omurgasının serbest su yüzeyi ile etkileşimde olduğu geniş yalpa açıları, sığ su çekimi gibi durumlarda bu değerin hesaplanması gerektiğini vurgulamıştır.



Şekil 5. 10 Farklı su çekimleri için yalpa omurgası normal kuvvetleri

Ikeda metodunda yalpa omurgası normal kuvvet bileşeni;

$$B_{BKN0} = \frac{8}{3\pi}\rho . {r_{BK}}^3 . \omega . \phi_a . b_{BK} . f^2 . C_D \tag{5.9}$$

ile hesaplanmaktadır. Burada yalpa omurgası direnç katsayısı, C_D, düz bir levha kullanılarak yapılan deneyler sonucu geliştirilen bağıntı ile hesaplanmaktadır.

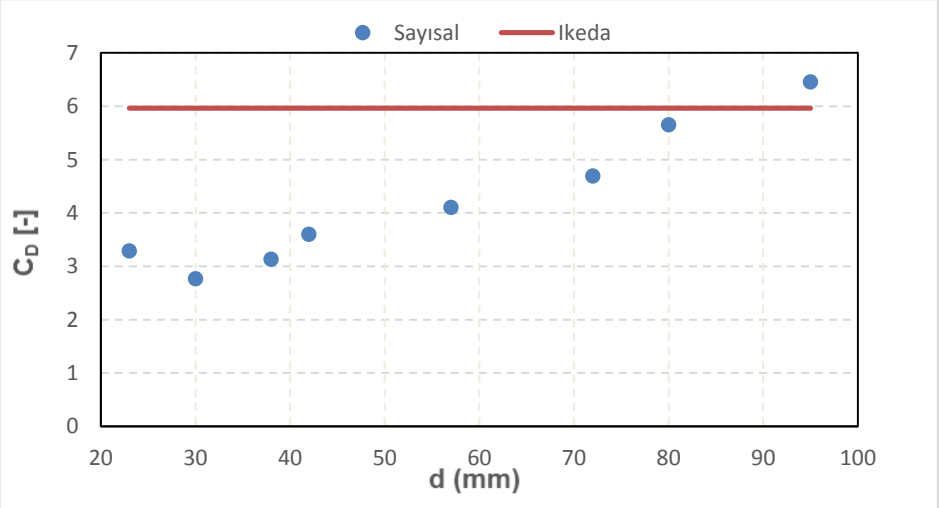
$$C_D = 22.5\frac{b_{BK}}{\pi r_{BK} f \phi_a} + 2.4 \quad (5.10)$$

Deneyler tamamen batmış bir levha kullanılarak gerçekleştirilmiştir ve görüldüğü üzere bağıntıda su çekimi bileşeni yoktur ve bu yüzden her su çekimi değeri için aynı sonucu verecektir.

Farklı su çekimleri için yalpa omurgası direnç katsayıları sayısal sonuçlar kullanılarak aşağıdaki direnç katsayısı bağıntısı ile hesaplanmıştır.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho S U_{BK}|U_{BK}|} \quad (5.11)$$

Burada F_D yalpa omurgasına etkiyen direnç kuvveti, S yalpa omurgasının projeksiyon alanı, U_{BK} ise yalpa omurgasının merkezindeki hızdır. Şekil 5.11 farklı su çekimleri için hesaplanan yalpa omurgası direnç katsayılarını göstermektedir. Dolu noktalar sayısal analizlerle elde edilen sonuçları gösterirken, çizgi ise Ikeda metodu ile hesaplanan direnç katsayılarını göstermektedir. Görüldüğü üzere Ikeda metodu serbest yüzey etkisini hesaba katmadığından farklı su çekimleri için aynı sonucu vermektedir, sayısal çözüm de serbest yüzey etkisi hesaba katıldığından dolayı yalpa omurgası serbest yüzey etkileşimi yalpa omurgasına etkiyen direnç katsayını azaltmıştır. Yüksek su çekimi değerlerinde sayısal veriler ve Ikeda metodu sonuçları birbirine yaklaşmaktadır. Bu da kullanılan sayısal yöntemin doğru sonuç verdiğini göstermektedir. Bir sonraki bölümde de sayısal yöntemin doğruluğu başka bir yöntem kullanılarak gösterilmiştir.



Şekil 5. 11 Farklı su çekimleri için direnç katsayıları

5.5.1 Yalpa Omurgası Kuvvet Modeli

Kullanılan sayısal yöntemin doğruluğunu ispatlamanın diğer bir yolu da yalpa omurgasına etkiyen normal kuvvetin Morison denklemi kullanılarak geliştirilen yalpa omurgası kuvvet modeli kullanılarak hesaplanmasıdır. Bu bölümde sıfır hızda yalpa omurgasına etkiyen kuvveti hesaplamak için geliştirilen model anlatılmış ve sonuçları sayısal verilerle karşılaştırılmıştır.

Keulegan&Carpenter (1958) salınım yapan akım içinde sabit duran iki boyutlu bir levhaya etkiyen kuvveti üç bileşene ayırmışlardır;

$$F = \rho A_0 \frac{dkU}{dt} + \oint p_x dS + \frac{1}{2}\rho C_D D U|U| \tag{5.12}$$

burada F akış yönünde (x) levha birim boyuna etkiyen kuvvet, U akışın hızı, p_x basıncın x yönündeki bileşeni, C_D levha direnç katsayısı, k virtual kütle katsayısı, D levhanın akış yönü normalindeki uzunluğu ve A_0 ise ek kütleye bağlı akış alanıdır ($A_0 = \pi D^2/4$), ve burada;

$$\oint p_x dS = \rho A_0 r \frac{dU}{dt} \tag{5.13}$$

olarak ifade edilir, dolayısıyla;

$$F = \rho A_0 \left[\frac{d(kU)}{dt} + r\frac{dU}{dt}\right] + \frac{1}{2}\rho C_D D U|U| \tag{5.14}$$

şeklini alır. Burada r levhanın kesit alanının ek kütleye bağlı alana oranı olarak verilmiştir.

$$r = \frac{A}{A_0} \tag{5.15}$$

Kütle katsayısının değişimini hesaplamak için yeni bir katsayı, k', tanımlanmıştır;

$$k'\frac{dU}{dt} = \frac{d(kU)}{dt} \tag{5.16}$$

ve ek kütle veya atalet katsayısı;

$$C_M = (k' + r) \tag{5.17}$$

olarak ifade edilmiştir. Bu ifadeyle beraber denklem;

$$F = \rho A_0 C_M \frac{dU}{dt} + \frac{1}{2}\rho C_D D U|U| \tag{5.18}$$

haline dönüşür ve A_0 ifadesinin yerine konulmasıyla son halini alır. Bu ifade birim levha uzunluğuna akış yönünde etki eden kuvveti ifade eder ve Morison denklemi olarak adlandırılır.

$$F = \rho \frac{\pi}{4} D^2 C_M \frac{dU}{dt} + \frac{1}{2} \rho C_D D U|U| \tag{5.19}$$

Bu eşitlik kullanılarak yalpa hareketi sırasında yalpa omurgasına etkiyen normal kuvvet hesaplanabilir. Bunun için yalpa omurgası merkezindeki hız tekne yalpa hızına bağlı olarak hesaplanmıştır. Yalpa omurgasından yalpa eksenine olan uzaklık r_{BK} , tekne yalpa hızı $\dot{\phi}(t)$ olarak ifade edilmiştir. Buna göre yalpa omurgası merkezindeki hız;

$$U_{BK}(t) = r_{BK} \dot{\phi}(t) \tag{5.20}$$

olarak hesaplanır. Yalpa hız denklemi;

$$\dot{\phi}(t) = \omega \phi_a \sin(\omega t) \tag{5.21}$$

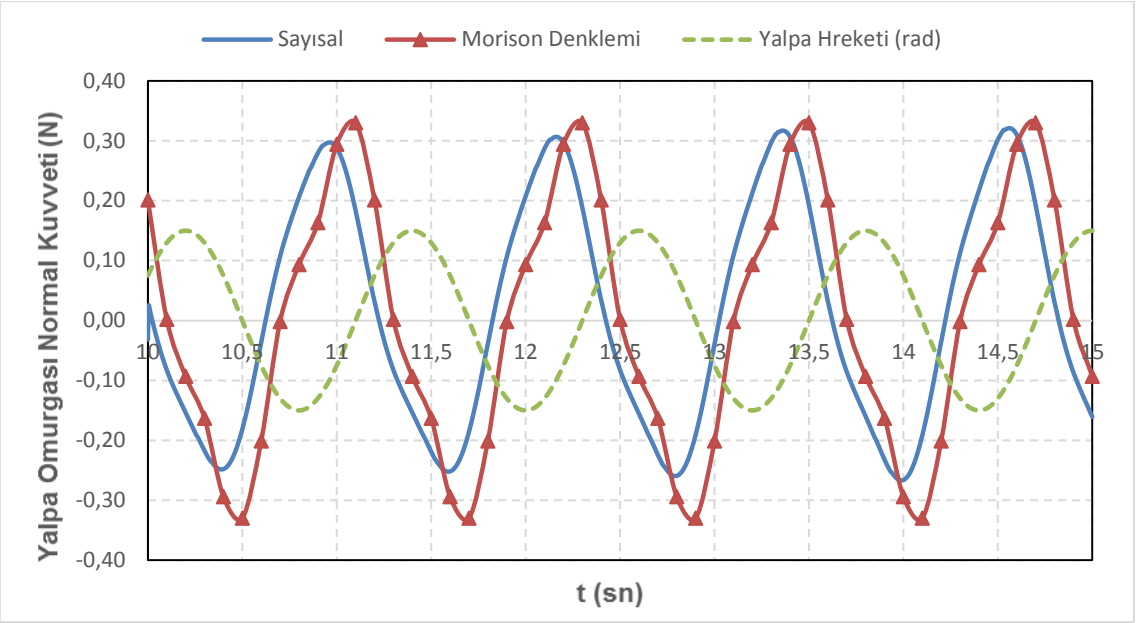
olarak verilmiştir. Buna göre yalpa omurgası merkezindeki hız ifadesi;

$$U_{BK}(t) = r_{BK} \dot{\phi}(t) = r_{BK} \omega \phi_a \sin(\omega t) \tag{5.22}$$

olur ve bu ifade Morison denkleminde yerine konulursa, yalpa omurgasına etkiyen normal kuvvet ifadesi;

$$F_{BK}(\mathrm{t}) = \frac{\pi}{4} \rho {D_{BK}}^2 C_M r_{BK} \omega^2 \phi_a \cos(\omega t) + \frac{1}{2} \rho C_D D_{BK} \omega^2 {\phi_a}^2 \sin(\omega t)|\sin(\omega t)| \tag{5.23}$$

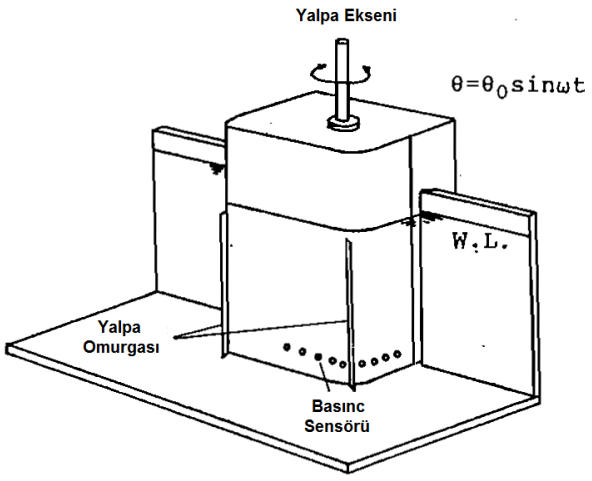
ile hesaplanır. Bu ifade kullanılarak yalpa esnasında yalpa omurgasına etkiyen normal kuvvet bileşeni hesaplanmıştır. İfadeden de anlaşılacağı gibi bu ifade serbest yüzey etkisini hesaba katmamaktadır. Bundan dolayı bu ifadeden elde edilen sonuç yüksek su çekimindeki sayısal analiz sonucu ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.12 iki farklı yöntem kullanılarak hesaplanan yalpa omurgası normal kuvvet sonuçlarını göstermektedir ve şekilden de anlaşıldığı üzere sayısal yöntemle hesaplanan sonuç Morison denklemi ile elde edilen sonuçla benzerlik göstermektedir. Bu karşılaştırma ile kullanılan sayısal yöntem farklı bir metot kullanılarak doğrulanmıştır.



Şekil 5. 12 Yalpa omurgasına etkiyen kuvvet (Sayısal Yöntem ve Morison Denklemi)

5.6 Tekne Üzerindeki Basınç Dağılımının Sayısal Olarak Hesaplanması

Yalpa omurgası tekne üzerindeki basınç dağılımını önemli derecede etkiler. Ikeda metodu bu etkiyi yalpa omurgası tekne etkileşimi sönümü olarak adlandırmıştır. Bu bileşenle ilgili detaylı bilgi Ikeda metodunun anlatıldığı bölümde verilmiştir. Bu bölümde tekne üzerindeki basınç dağılımı farklı su çekimleri için sayısal yöntem kullanılarak hesaplanmış ve Ikeda metodunda yapılan basınç dağılımı varsayımı ile karşılaştırılmıştır. Ikeda [15] Şekil 5.13'de gösterilen deney düzeneğini kullanarak iki boyutlu tekne modeli üzerindeki basınç dağılımlarını hesaplamıştır.

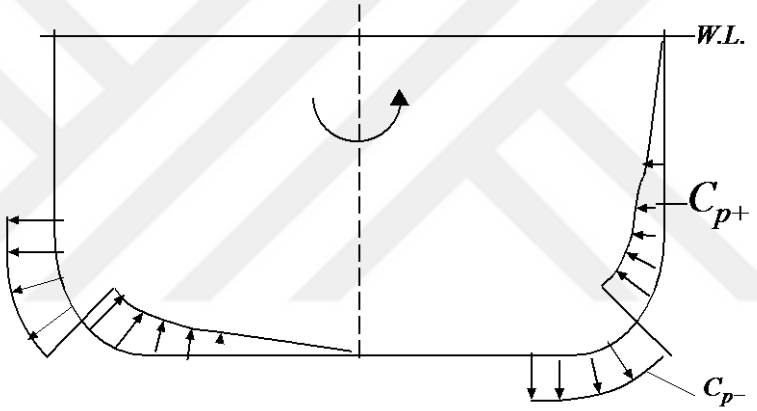


Şekil 5. 13 Ikeda düzeneğinin gösterimi [15]

Şekildeki düzenekte görüldüğü gibi yalpa omurgası etrafına yerleştirilen basınç sensörleri sayesinde yalpa hareketi esnasında yalpa açısı sıfır olduğu durumda ya da açısal yalpa hızının maksimum olduğu durumdaki basınç değerleri ölçülmüştür. Bu değerler kullanılarak boyutsuz basınç katsayısı, C_P, değerleri hesaplanmıştır.

$$C_P = \frac{P^*}{\frac{1}{2}\rho(r_{BK}\omega\phi_a)^2} \tag{5.24}$$

Burada P^* basınç sensörlerinden okunan basınç değeri, r_{BK} yalpa omurgasından yalpa eksenine olan mesafe, ω yalpa frekansı ve ϕ_a yalpa genliği olarak verilmiştir. Bu işlemler sonucunda tekne etrafındaki basınç dağılımı hesaplanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda Ikeda tekne etrafındaki basınç dağılımı için Şekil 5.14'deki varsayımı yapmıştır.



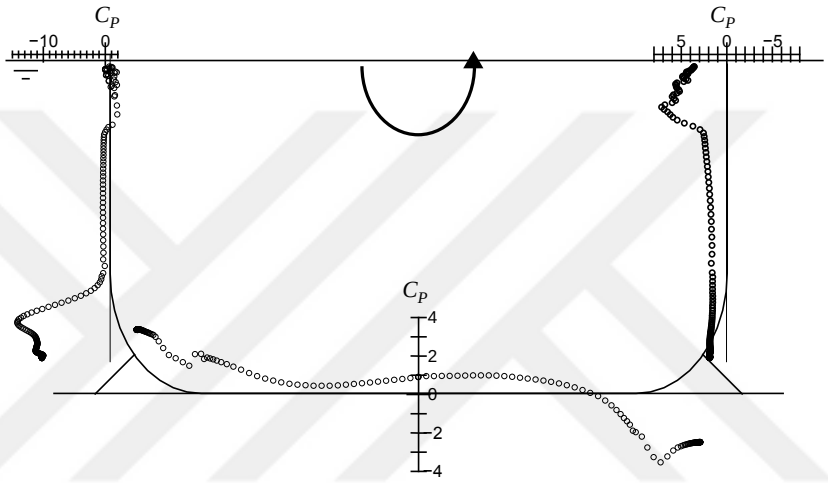
Şekil 5. 14 Tekne etrafındaki basınç dağılımı (Ikeda Metodu)[15]

Sayısal yöntem kullanılarak farklı su çekimlerinde tekne etrafındaki basınç dağılımı hesaplanmış ve su çekimi azaldıkça basınç dağılımının nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Analizler sonucunda serbest yüzey etkisinin basınç dağılımı üzerindeki etkisinin ihmal edilemeyeceği görülmüştür. Şekil 5.15 farklı su çekimlerinde sayısal olarak hesaplanan tekne üzerinde oluşan basınç dağılımlarını göstermektedir. Şekil 5.15a ve 15b yüksek su çekimindeki durumu göstermektedir. Bu durumlarda yapılan hesaplar Ikeda tarafından yapılan varsayımla benzerlik göstermiştir. Yalpa hareketi esnasında yalpa omurgasının ön yüzünde pozitif basınç bölgesi oluşurken, yalpa omurgasının arka yüzeyinde negatif basınç bölgesi oluşmaktadır.

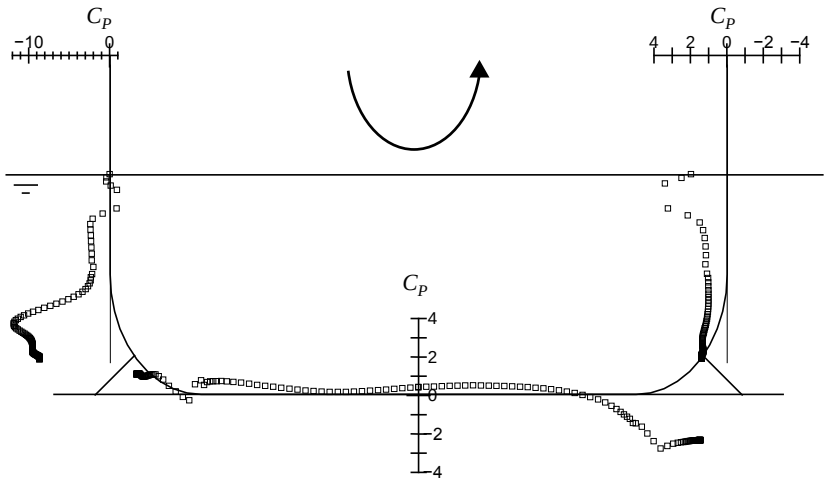
Su çekiminin azalmasıyla beraber serbest yüzeyle etkileşime giren yalpa omurgası bu basınç dağılımını değiştirmiştir. Şekil 5.15c ve 15d düşük su çekimi durumlarındaki

basınç dağılımını göstermektedir. Görüldüğü gibi serbest yüzey etkisi arttığında Ikeda tarafından yapılan varsayım geçerliliğini yitirmiştir. Yalpa omurgasının her iki yüzünde de negatif basınç bölgesi oluşmuştur. Bu durum yalpa omurgasına etkiyen momenti ve dolayısıyla yalpa omurgası sönümünü etkilemiştir. Ikeda metodunun düşük su çekiminde neden farklı sonuç verdiği ve yalpa omurgası serbest yüzey etkileşiminin yalpa sönümünün nasıl etkilediği tekne etrafındaki basınç dağılımı sayısal olarak hesaplanarak gösterilmiştir.

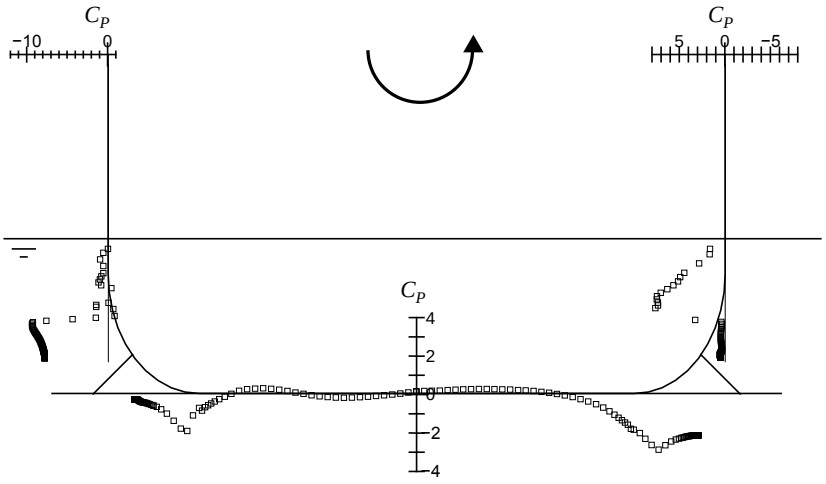
(a) d=95mm



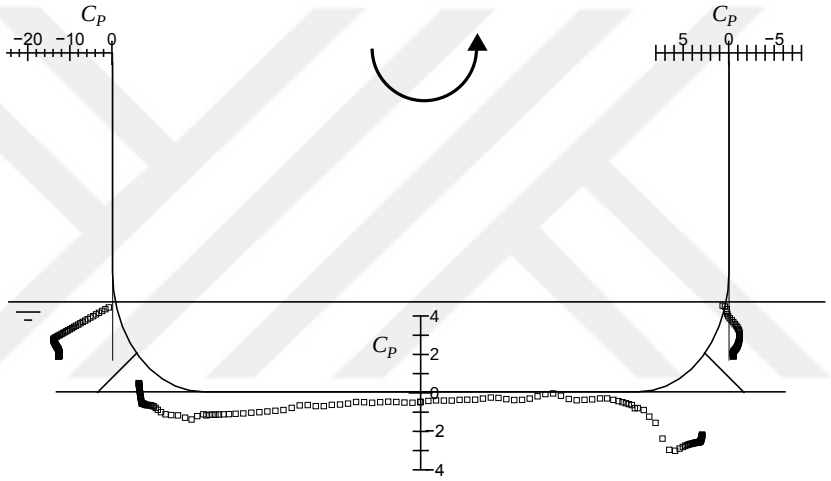
(b) d=72mm



(c) d=42mm



(d) d=23mm



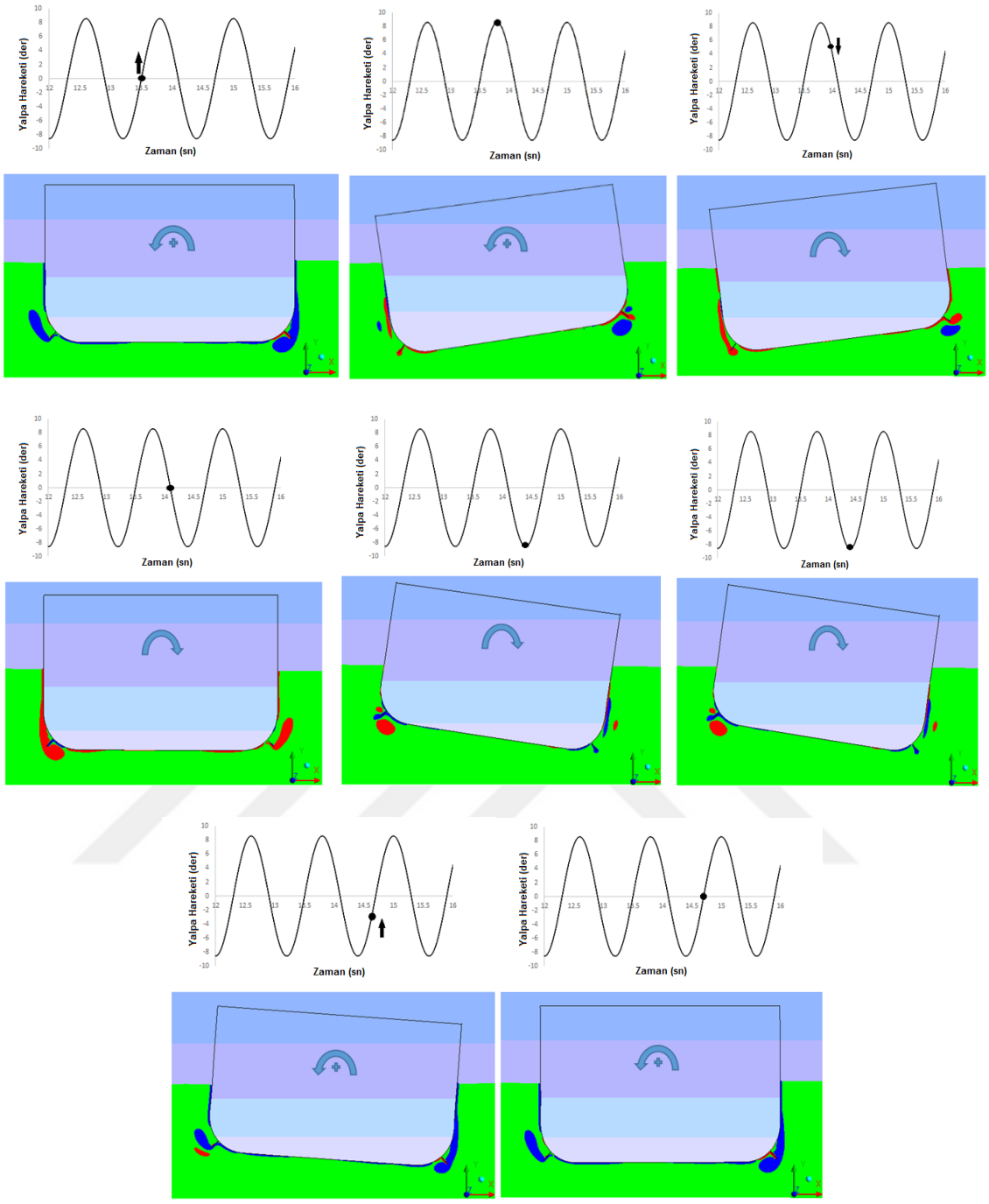
Şekil 5. 15 Farklı su çekimlerinde tekne etrafındaki basınç dağılımı (Sayısal Yöntem)

5.7 Tekne Etrafında Girdap Oluşumu ve Girdap Saçılışı

Potansiyel teorinin yalpa hareketini doğru bir şekilde hesaplayamamasının nedeninin viskozite olduğu belirtilmiştir. Viskoz bir akışta kaymama koşulunun uygulandığı bölgelerde viskoz gerilmeler meydana gelir ve bunlarda girdapların oluşmasına sebep olur. Bu oluşan girdaplar yalpa hareketinde ihmal edilemeyecek kadar önemlidir ve yalpa sönümüne büyük oranda katkı sağlamaktadırlar. İlk olarak girdaplar tekne etrafında hız ve basınç değişimlerine neden olurlar ve bu değişim yalpa sönümünü etkiler. İkinci olarak saçılan girdaplar bir kuvvet oluştururlar bu kuvvet yalpa sönümünü etkiler. Son olarak bir önceki salınımda oluşan girdap bir sonraki salınımda etkili olabilir ve bu da yalpa sönümünü etkiler.

Bir önceki bölümde tekne etrafındaki basınç dağılımının farklı su çekimlerinde değişim gösterdiği ve bu değişimin yalpa sönüm katsayısını nasıl etkilediği gösterilmiştir. Tekne etrafında basınç farklılıklarına sebep olan etken, oluşan girdaplar ve girdap saçılışıdır. Bu bölümde normal su çekimi ve düşük su çekimi durumları için yalpa hareketi esnasında oluşan girdaplar ve girdap saçılışları sayısal çözücü yardımıyla gözlemlenmiştir ve yalpa sönümüne olan etkisi gösterilmiştir.

Şekil 5.16 normal su çekimi (d=72mm) durumunda teknenin bir tam salınım yaptığı esnadaki yalpa omurgaları etrafında oluşan girdap oluşumlarını göstermektedir. Mavi renk saat yönünde olup negatif girdapları göstermektedir, kırmızı renk ise saat yönünde olup pozitif girdapları göstermektedir. Şekilden de görüldüğü üzere yalpa açısı sıfır olduğu durumda girdaplar en etkin durumdadırlar, tekne saat yönünde yalpa hareketine devam ederken her iki yalpa omurgasının arka yüzünde negatif girdaplar gözlemlenmiştir. Tekne en büyük yalpa açısına ulaştığında iskele tarafında bulunan yalpa omurgası etrafındaki negatif girdap yalpa omurgasından saçılmıştır ve tekneden uzaklaşmaktadır. Sancak tarafındaki negatif girdabın ise tekne saat yönünde dönmeye devam ederken hala etkin olduğu gözlemlenmiştir. Teknenin tekrar sıfır açıya ya da maksimum hıza geldiği noktada yalpa omurgalarının arkalarında pozitif girdaplar gözlemlenmiştir. Teknenin açısı negatif yönde arttıkça bu pozitif girdaplar tekneden saçılmaya başlamışlardır ve tekne tekrar saat yönünün tersinde dönmeye başladığında negatif girdaplar yalpa omurgalarının uç kısımlarından oluşmaya başlamıştır. Tekne tam bir salınımını tamamladığında tekrar ilk konumundaki gibi aynı girdap oluşumları gözlemlenmiştir ve tekne yalpa hareketine devam ettikçe bu girdap oluşumu döngüsü şekilde gösterildiği gibi devam etmiştir.

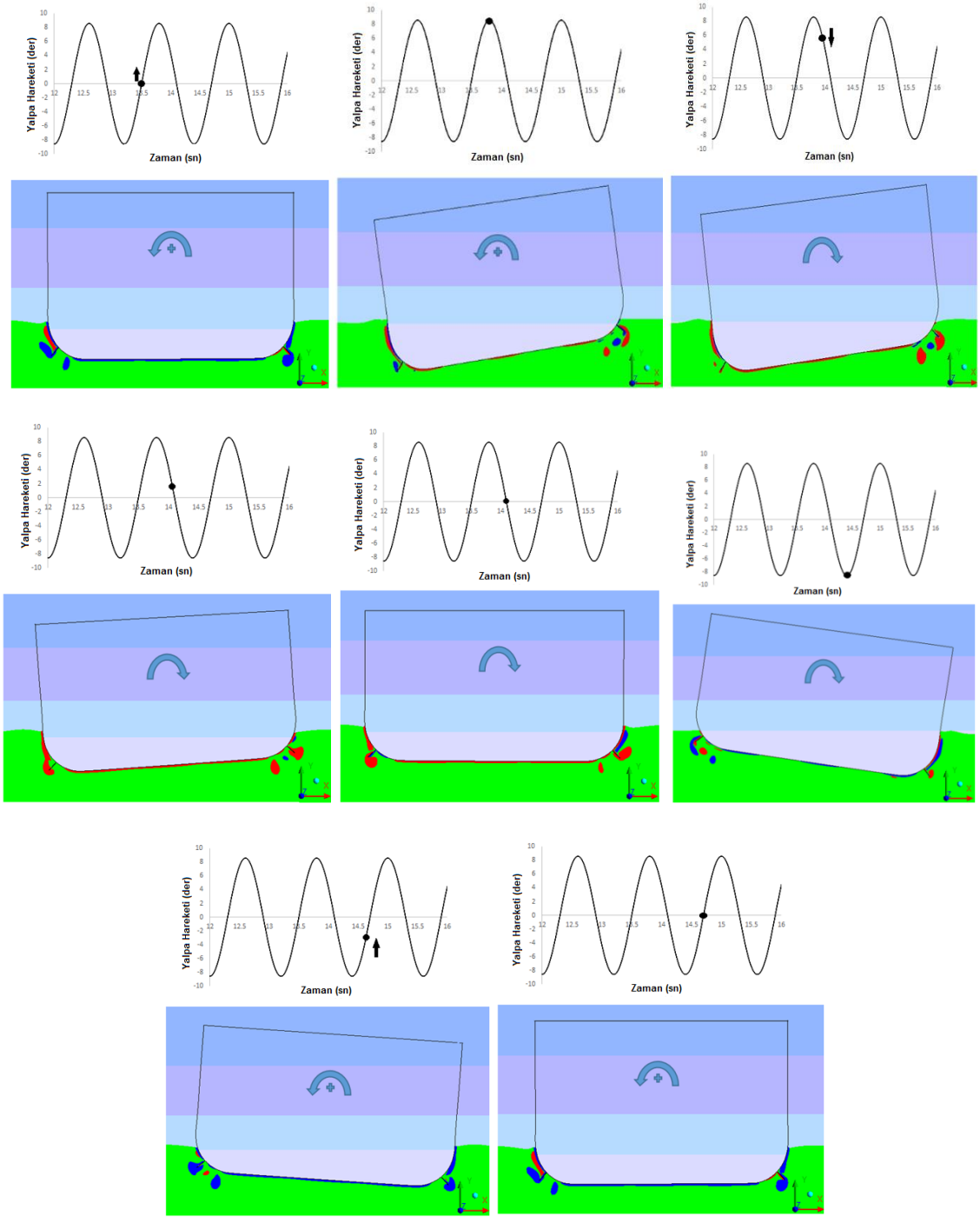


Şekil 5. 16 Normal su çekimi (d=72mm) durumunda girdap oluşumu

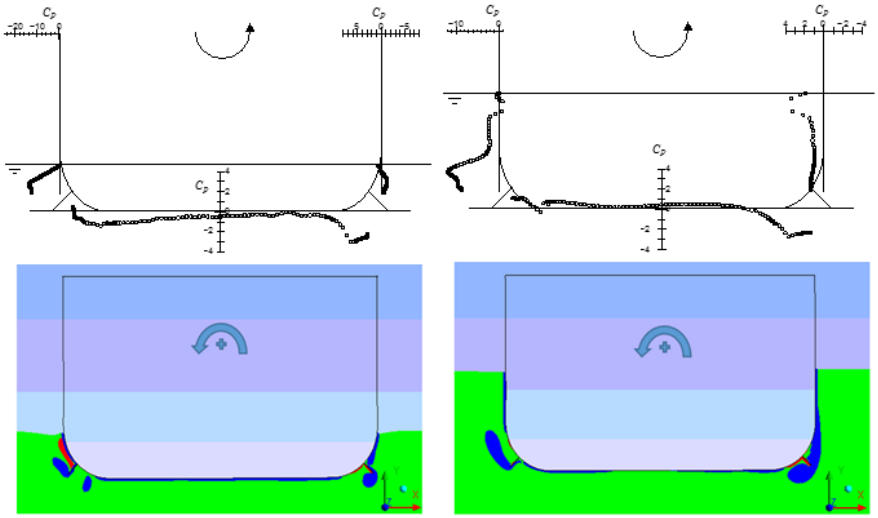
Aynı şekilde yalpa hareketi esnasında yalpa omurgaları etrafında oluşan girdaplar düşük su çekimi (d=30mm) durumu içinde sayısal olarak analiz edilmiştir. Şekil 5.17 bir tam salınım için yalpa omurgası etrafında oluşan girdapları göstermektedir. Şekilden de görüldüğü üzere düşük su çekimi için girdap oluşumu döngüsü normal su çekimi durumundan farklıdır. Tekne sıfır yalpa açısı durumunda iken oluşan negatif girdaplar sadece yalpa omurgasının arka yüzünde değil, iskele yalpa omurgasının ön yüzünde de

gözlemlenmiştir. Yalpa açısı arttıkça bu negatif girdaplar etkisini yitirmiş ve pozitif girdaplar oluşmaya başlamıştır. Normal su çekimi durumundan farklı olarak düşük su çekimi durumu için maksimum yalpa açısı durumunda pozitif girdaplar önceden oluşmuş ve hatta bir kısmı saçılmaya başlamıştır. Saçılan bu girdapların tekne tekrar sıfır yalpa durumuna geldiğinde hala etkin durumda olduğu gözlemlenmiştir ve saçılan bu girdaplar tekne üzerinde kuvvet oluşturmuşlardır. Oluşan bu kuvvetler tekne üzerindeki basınç dağılımını etkilemişlerdir. Bir önceki bölümde düşük su çekimi için tekne etrafında oluşan farklı basınç dağılımının sebebi saçılan bu girdaplardır. Ayrıca oluşan girdaplar normal su çekimi durumuna göre küçüktürler, serbest yüzey girdap oluşumunu etkilemiştir. Aynı durum geniş yalpa açısı durumunda da gözlemlenmiştir. Serbest yüzeye yaklaşan yalpa omurgası etrafındaki girdaplara serbest yüzey bir duvar gibi etki göstererek oluşan girdapları yok etmiştir ve girdap oluşumunu etkilemiştir. Bassler [50] geniş yalpa açıları için girdap oluşumunu detaylı bir şekilde incelemiştir ve düşük su çekimi durumu da geniş yalpa açısı durumu ile benzerlik göstermektedir.

Şekil 5.18 farklı iki su çekimi durumu için oluşan girdapların kıyaslanmasını göstermektedir. Önceden de vurgulandığı gibi oluşan bu farklı girdaplar farklı basınç dağılımına sebep olmuşlardır. Ikeda metodun da yalpa omurgasından saçılan girdaplar hesaba katılmamıştır ve bu sebepten dolayı düşük su çekimlerinde gerçeğinden farklı sonuçlar gözlemlenmektedir.



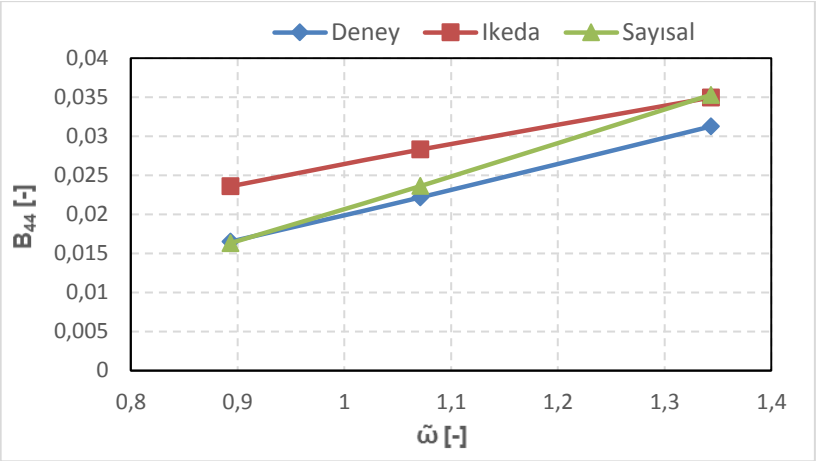
Şekil 5. 17 Düşük su çekimi (d=30mm) durumunda girdap oluşumu



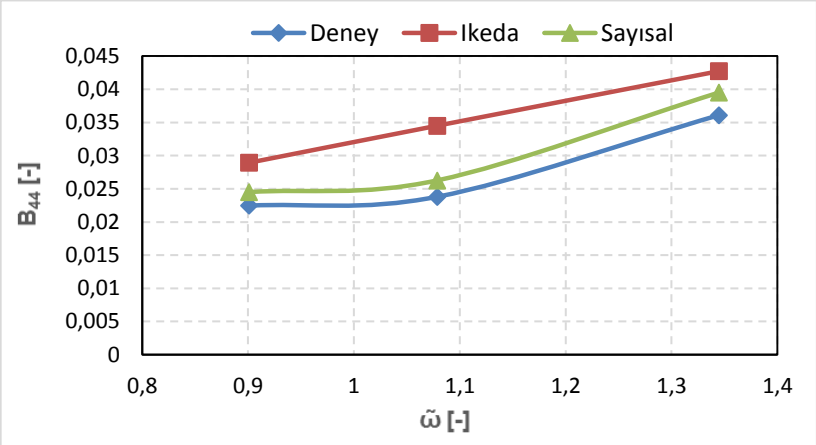
Şekil 5. 18 Farklı su çekimleri için girdap oluşumlarının basınç dağılımına etkisi

5.8 Yalpa Sönüm Katsayısının Yalpa Frekansı ve Açısına Göre Değişimi

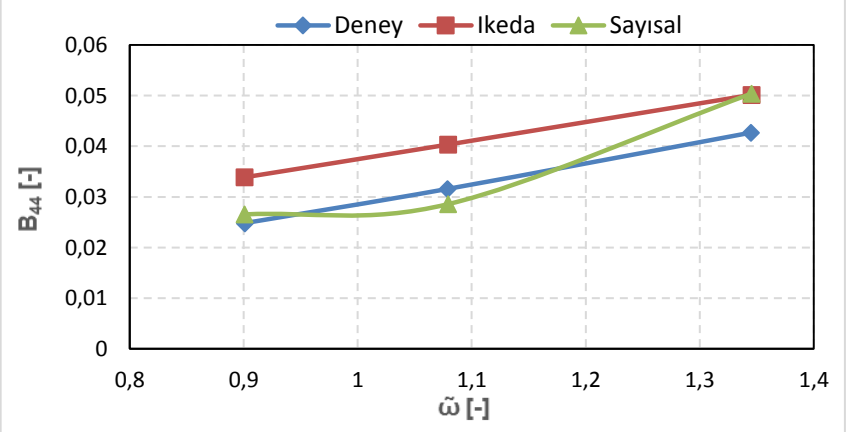
Bu bölümde yalpa sönüm katsayısının yalpa frekansı ve yalpa açısına göre değişimi incelenmiştir. Sayısal sonuçlar deney ve Ikeda metodunun sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Analizler üç farklı yalpa açısı ve üç farklı yalpa frekansı için gerçekleştirilmiştir. Analizler düşük su çekimi durumu için yapılmıştır. Bu şekilde düşük su çekiminde sayısal sonuçların bütün yalpa frekansları ve yalpa açılarında Ikeda metoduna göre deneylerle daha uyumlu sonuç verdiği gösterilmiştir. Şekil 5.19-5.21 düşük su çekiminde boyutsuz yalpa sönüm katsayısının yalpa frekansı ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Şekillerden de görüldüğü üzere yalpa frekansı arttıkça boyutsuz yalpa sönüm katsayısı da artmaktadır. Yalpa sönümünün doğrusal olmayan doğası sayısal sonuçlarda gözlemlenmektedir ve sayısal sonuçlar genel anlamda deneyler ile uyumlu sonuçlar vermiştir. Ikeda metodu ise görüldüğü üzere bütün frekanslarda yüksek sonuçlar vermiştir ve frekans arttıkça yalpa sönüm katsayıları da doğrusal bir şekilde artmıştır.



Şekil 5. 19 8.59° için boyutsuz yalpa sönüm katsayılarının frekansla değişimi



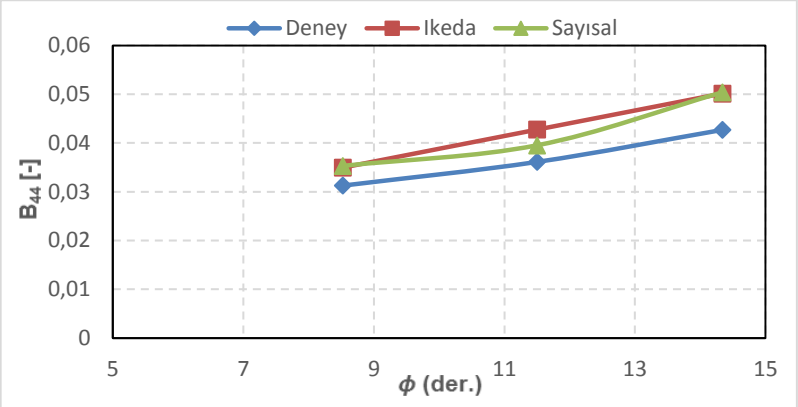
Şekil 5. 20 11.38° için boyutsuz yalpa sönüm katsayılarının frekansla değişimi



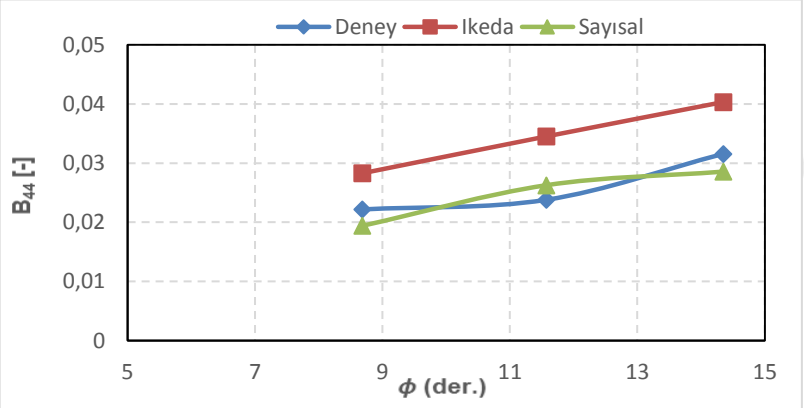
Şekil 5. 21 14.38° için boyutsuz yalpa sönüm katsayılarının frekansla değişimi

Şekil 5.22-5.24 düşük su çekiminde boyutsuz yalpa sönüm katsayısının yalpa açısı ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Şekillerden de görüldüğü üzere yalpa sönüm katsayısı artan yalpa açısı ile artmaktadır. Sayısal sonuçlar genel olarak tüm açılarda deney sonuçları ile uyumluluk göstermektedir. Bölümün girişinde de bahsedildiği gibi Ikeda

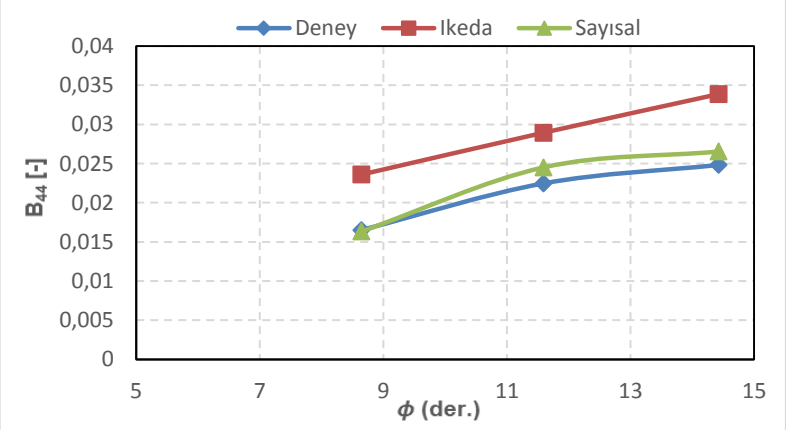
metodu sığ su çekimi gibi olayın lineerliğinin azaldığı durumlarda geçerliliğini yitirmektedir ve bu durumlar için sayısal hesaplamaların daha iyi bir alternatif olacağı öngörülmüştür. Yapılan bu analizlerle sayısal yöntemin yalpa sönüm katsayısı hesaplamada her açı ve frekansta deneyler ile uyumlu sonuçlar verdiği ve lineerliğin bozulduğu durumlarda Ikeda metodundan daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.



Şekil 5. 22 T=0.8 sn için yalpa sönüm katsayılarının yalpa açısına göre değişimi



Şekil 5. 23 T=1.0 sn için yalpa sönüm katsayılarının yalpa açısına göre değişimi



Şekil 5. 24 T=1.2 sn için yalpa sönüm katsayılarının yalpa açısına göre değişimi

BÖLÜM 6

GENİŞ YALPA AÇISININ YALPA SÖNÜMÜNE ETKİSİ

6.1 Giriş

Ağır hava şartları gemilerin geniş açılarda yalpaya maruz kalmasına ve bu durum da gemilerin devrilmesine sebep olabilir (Şekil 6.1). Bu sebepten dolayı geniş açılarda yalpa hareketinin doğru bir şekilde analiz edilmesi olası bir devrilme kazasının önüne geçilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Geniş yalpa açılarında gemi yalpa omurgası su yüzeyine çıkabilir ve bu da yalpa sönümünü doğal olarak da gemi yalpa hareketini etkiler. Yalpa hareketinin çok iyi bir şekilde analiz edilmesi için yalpa sönümünün doğru bir şekilde hesaplanması gerekmektedir. Günümüzde de en yaygın olarak bilinen ve kullanılan metot Ikeda tarafından geliştirilmiştir. Ancak, Ikeda yöntemi ile geniş açılarda yalpa sönümü hesabında sonuçlar farklılık göstermekte ve bunun nedeni ise bir önceki bölümde anlatılan sığ su çekimi etkisi ile benzerlikler göstermektedir. Geniş yalpa açılarında yalpa omurgası serbest su yüzeyine yaklaşmakta ve hatta bazı durumlarda sudan dışarı çıkmaktadır. Ikeda yönteminde serbest yüzey etkisi hesaba katılmadığından sönümü hesaplarken yalpa omurgası tamamen suya batmış bir şekilde düşünülmüştür. Bu sebepten dolayı da yalpa sönümü sonuçları geniş açılar için olması gerekenden daha yüksek olarak hesaplanmaktadır.

Geniş yalpa açılarında meydana gelen yalpa omurgasının sudan çıkması ve serbest yüzey etkisi gibi durumların hesaba katıldığı bir metot ile yalpa sönümünün hesaplanması daha doğru sonuçlar alınmasını sağlayacaktır.

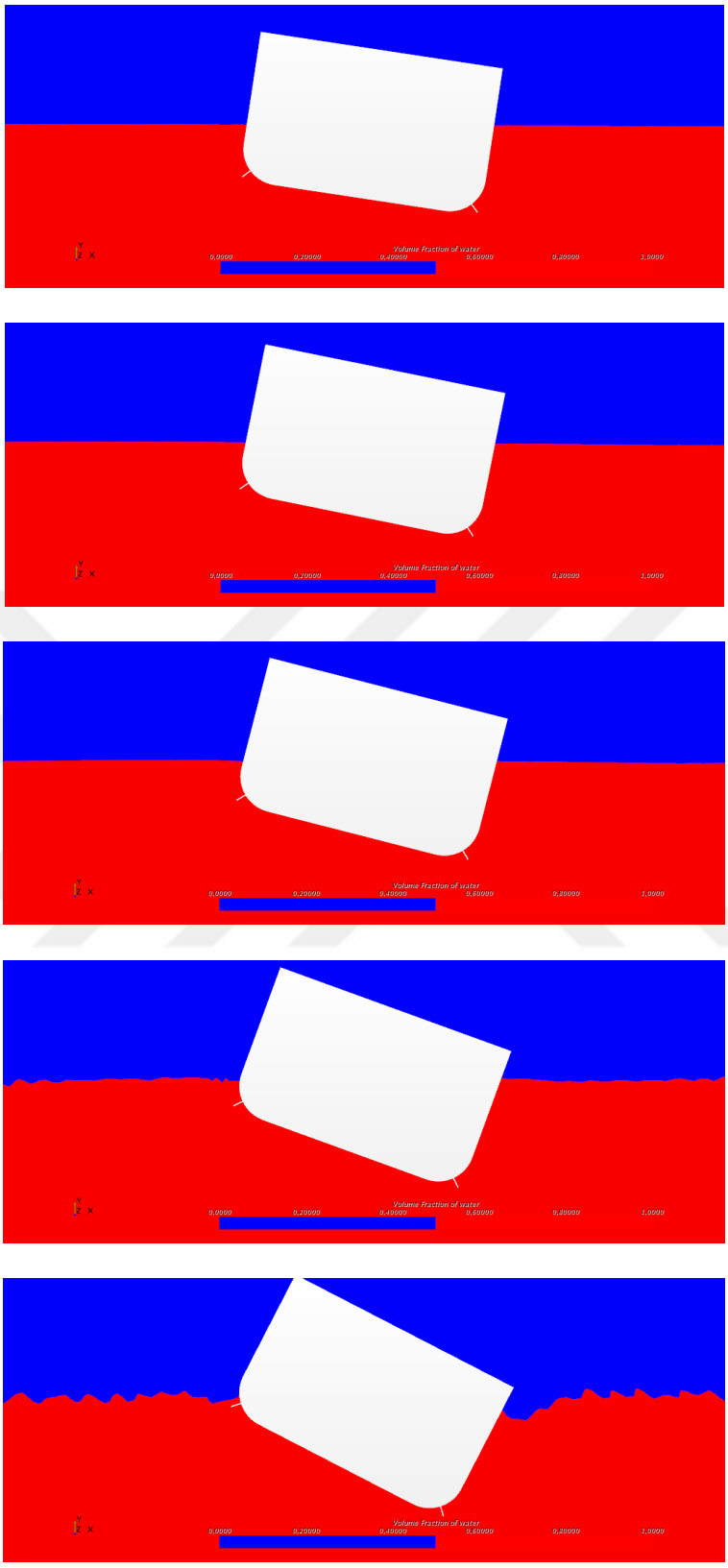


Şekil 6. 1 47° yalpa açısına maruz kalmış USS Cowpens

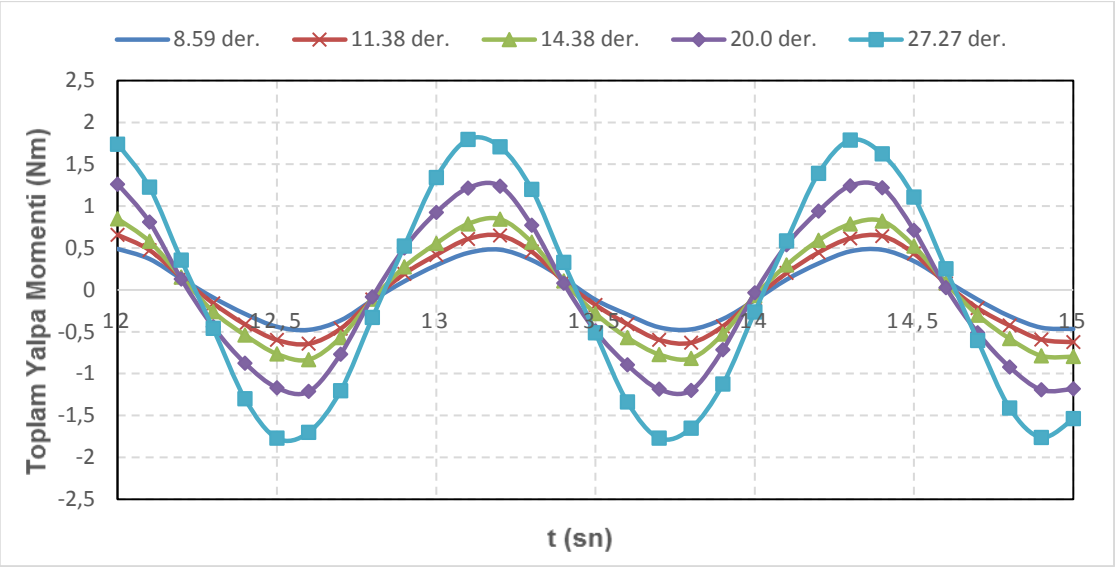
Daha önceden de belirtildiği gibi sayısal çözücüler bu etkileri göz önüne alarak hesapları gerçekleştirir ve daha doğru sonuçlar almamızı sağlayabilirler. Bu bölümde geniş yalpa açılarında yalpa sönüm katsayıları sayısal olarak hesaplanmış ve sonuçlar deney sonuçları ile doğrulanmıştır. Ayrıca sonuçlar Ikeda metodu ile karşılaştırılmış ve bu metodun geniş yalpa açılarında neden yetersiz kaldığı incelenmiştir. Zorlanmış yalpaya maruz bırakılan tekne etrafındaki akış, sayısal çözücü kullanılarak detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

6.2 Yalpa Momentlerinin Sayısal Olarak Hesaplanması

Bu bölümde geniş açılarda yalpa sönümünü sayısal olarak hesaplamak için zorlanmış yalpaya maruz bırakılan tekne üzerindeki momentler sayısal olarak beş farklı yalpa açısı için hesaplanmıştır. Yalpa periyodu, yalpa omurgası genişliği, yalpa merkezi, su çekimi vb. gibi parametreler sabit tutulmuştur. Tüm analizler için yalpa periyodu 1.2 sn, yalpa omurgası genişliği 0.01 m ve yalpa merkezi ve su çekimi 0.072m olarak belirlenmiştir. Yalpa açıları da 8.59^{o}, 11.38^{o}, 14.38^{o}, 20.0^{o} ve 27.27^{o} olarak belirlenmiştir. Bu açılardan 27.27^{o}'de yalpa omurgası serbest yüzeye çok yakın konumdadır. Şekil 6.2 farklı yalpa açısı durumlarında maksimum yalpa genliği durumunda yalpa omurgasının serbest yüzeye ne kadar yaklaştığını göstermektedir. Şekilden de anlaşıldığı üzere yalpa omurgası serbest yüzeye yaklaştıkça serbest yüzey deformasyonu artmaktadır. Bundan dolayı da yalpa omurgasından kaynaklanan sönüm etkilenmektedir.

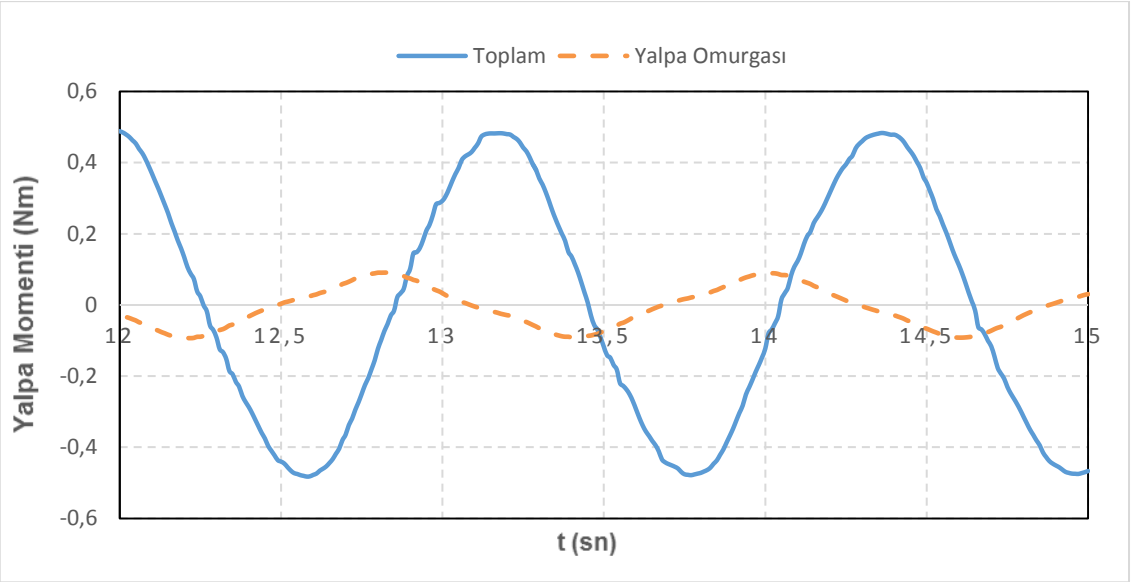


Şekil 6. 2 Farklı yalpa açılarında yalpa omurgasının serbest yüzeyden uzaklığı



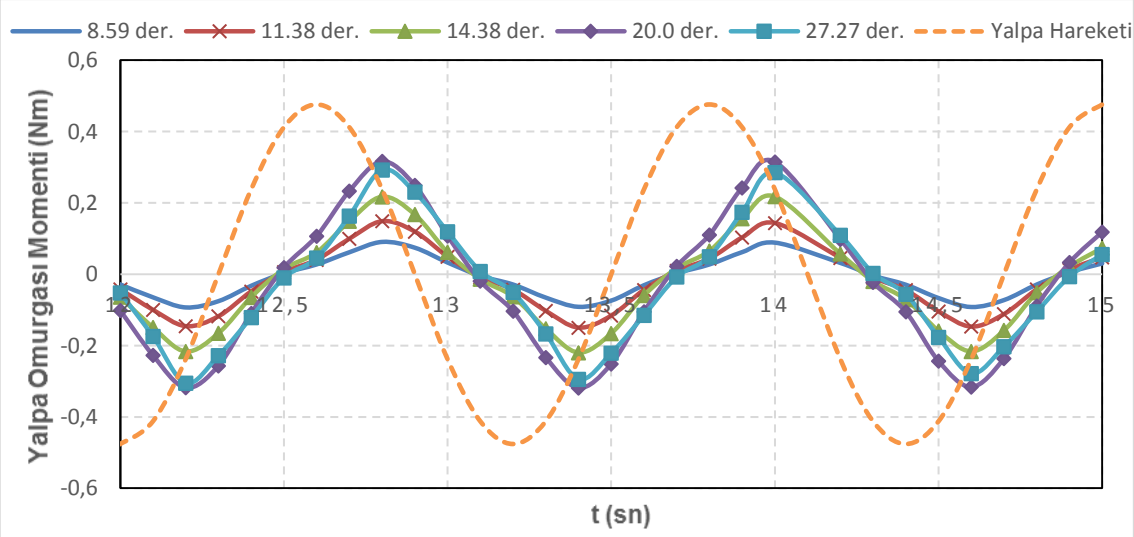
Şekil 6. 3 Farklı yalpa genlikleri için toplam yalpa momenti eğrileri

Şekil 6.3 farklı yalpa genliklerin de tekneye etki eden toplam yalpa moment eğrilerinin zamana göre değişimini göstermektedir. Şekilden de anlaşıldığı üzere yalpa genliği arttıkça tekneye etki eden toplam yalpa momentleri yükselmektedir. Buradan toplam yalpa sönümü de yükselmektedir gibi bir sonuca varılamaz çünkü yalpa momentinin yalpa açısıyla arasındaki faz farkı da yalpa sönümünü etkilemektedir. Yalpa sönümü hakkında moment eğrilerinden faydalanarak bir yorum yapmak için sadece yalpa omurgasına etki eden momentlere bakılması gerekir. Yalpa omurgasına etki eden moment toplam momentin küçük bir yüzdesi olduğundan, yalpa momentlerindeki değişim toplam moment eğrilerine yansımamaktadır. Şekil 6.4 8.59^{o} yalpa genliği durumunda tekneye etki eden toplam yalpa momentini ve yalpa omurgasına etki eden momenti göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi yalpa omurgasına etki eden moment toplam momentin küçük bir kısmıdır ve iki moment arasında bir faz farkı vardır. Ancak daha önceden de vurgulandığı gibi yalpa omurgasından kaynaklanan sönüm toplam yalpa sönümünün ortalama %50-60'lık bir kısmıdır.

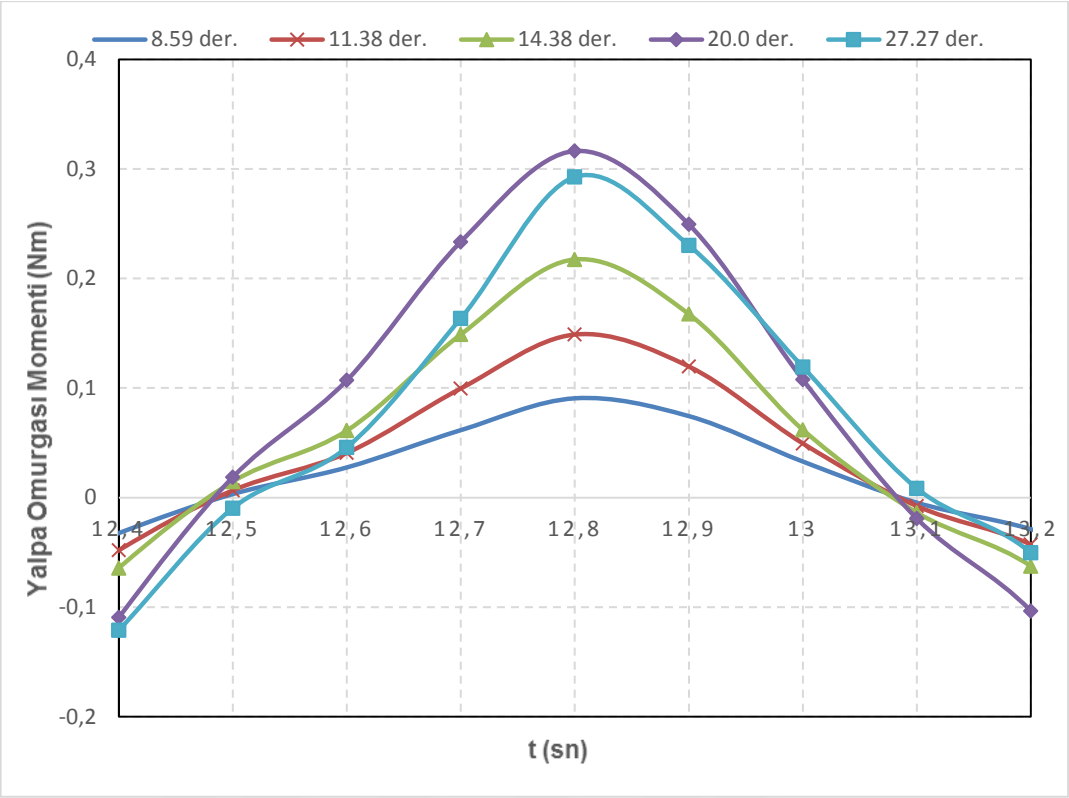


Şekil 6. 4 Toplam ve yalpa omurgası yalpa momenti

Farklı genlikte yalpa omurgasına etki eden moment eğrileri sayısal olarak hesaplanmış ve geniş yalpa açısında serbest yüzey etkisinin yalpa omurgası momentine etkisi incelenmiştir. Sayısal çözücü yardımıyla zorlanmış yalpaya maruz bırakılan teknenin yalpa omurgasına etki eden momentler hesaplanmıştır. Şekil 6.5 farklı yalpa açılarında yalpa omurgasına etki eden moment eğrilerini göstermektedir.

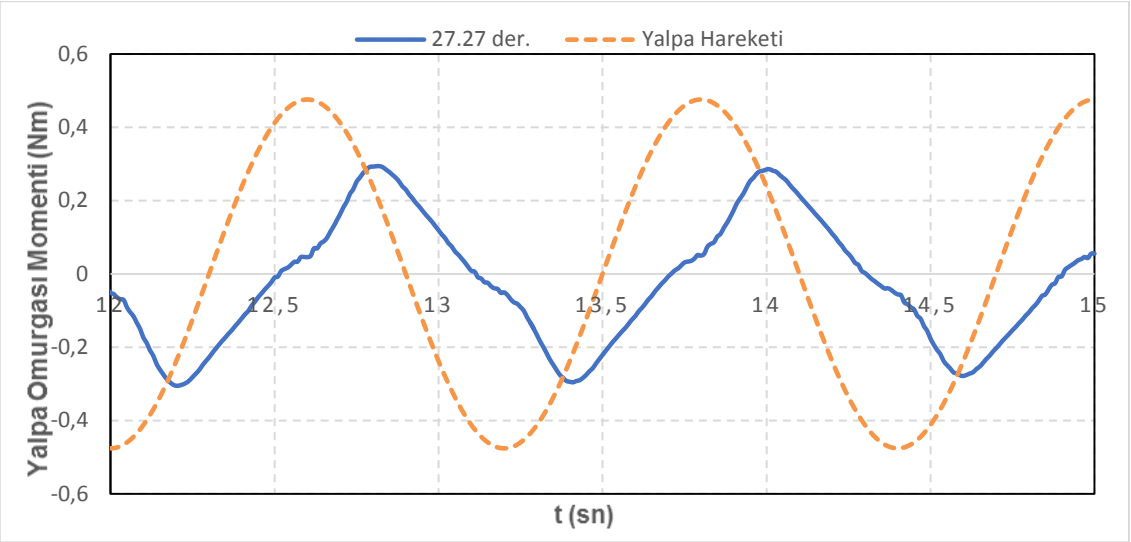


Şekil 6. 5 Farklı yalpa açıları için yalpa omurgası momenti eğrileri



Şekil 6. 6 Yalpa omurgası momenti eğrilerinin detaylı gösterimi

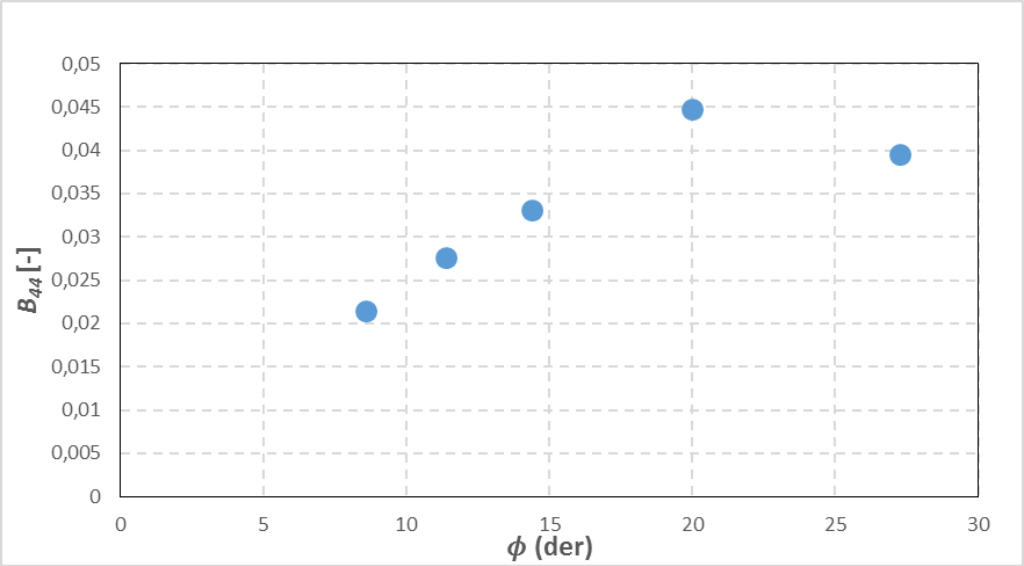
Şekil 6.5'de görüldüğü gibi yalpa omurgasına etkiyen momentler yalpa genliği arttıkça artmaktadır. Ancak yalpa açısı 27.27^{o}'ye geldiğinde yalpa omurgasına etkiyen moment azalmıştır. Bu açıda yalpa omurgası serbest yüzeye çok yakın konumdadır ve bu etki yalpa omurgasına etkiyen momenti azaltmaktadır. Bu serbest yüzey etkisi Ikeda metodunda hesaba katılmamıştır ve bu sebepten dolayı geniş açılarda yalpa sönümü hesaplarında yüksek değerler vermektedir. Serbest yüzey etkisinin yalpa omurgası momentine olan etkisini Şekil 6.7'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere yalpa genliğinin maksimum olduğu ya da yalpa omurgasının serbest yüzeye yaklaştığı noktalarda hesaplanan moment değerlerinde bozulmalar olmuştur.



Şekil 6. 7 Geniş yalpa açısında serbest yüzeyin yalpa omurgası momentine etkisi

6.3 Yalpa Sönüm Katsayıları

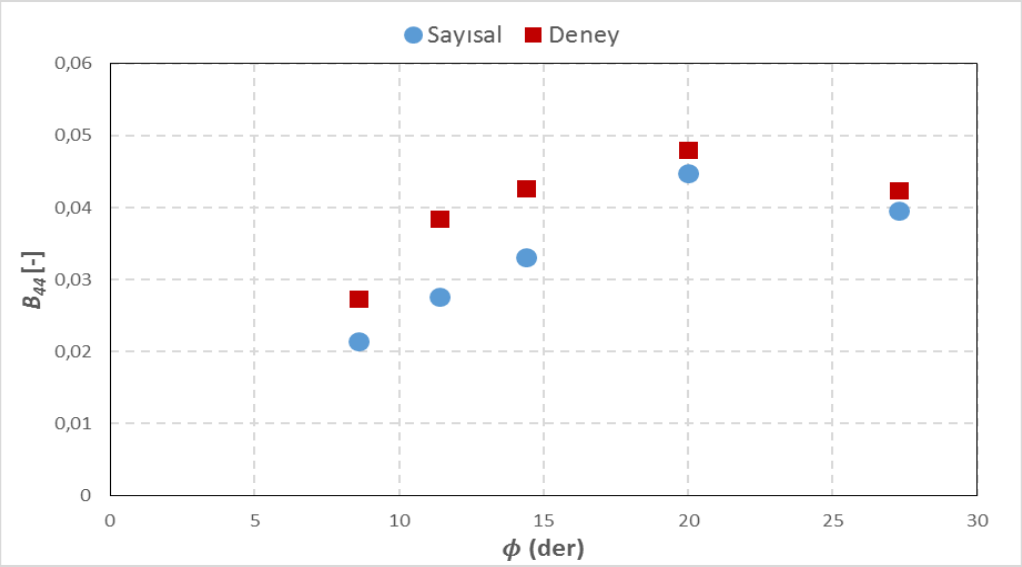
Bu bölümde zorlanmış yalpa hareketi yapan tekneye etki eden toplam momentler kullanılarak farklı açılar için boyutsuz yalpa sönüm katsayıları sayısal olarak elde edilmiştir ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.8 farklı yalpa açıları için elde edilen boyutsuz yalpa sönüm katsayı değerlerini göstermektedir.



Şekil 6. 8 Farklı yalpa açılarında boyutsuz yalpa sönüm katsayıları

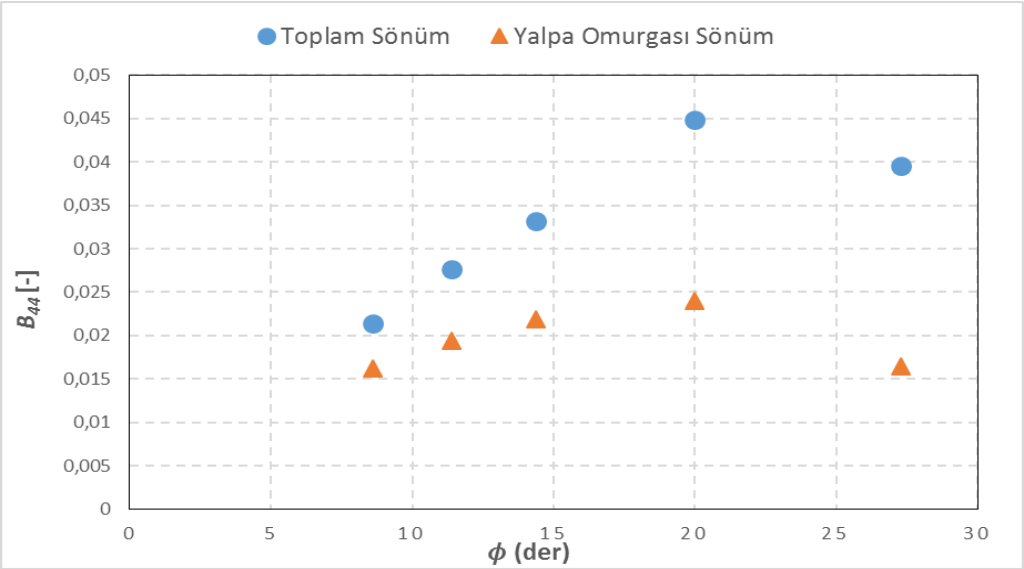
Şekilden de görüldüğü üzere yalpa sönüm değerleri belli bir açıya kadar yükselmiştir ve yalpa omurgasının serbest yüzeyle etkileşime geçtiği noktada yalpa sönüm değeri azalmıştır. Bu azalma yalpa omurgasına etkiyen momentin azalmasından

kaynaklanmaktadır. Sayısal analizler ile elde edilen sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Farklı yalpa genlikleri için yapılan deneylerden elde edilen yalpa sönüm katsayıları sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.9'da görüldüğü gibi sayısal sonuçlar deneysel sonuçlar ile uyum içerisindedir ve aynı eğilimi göstermektedir.

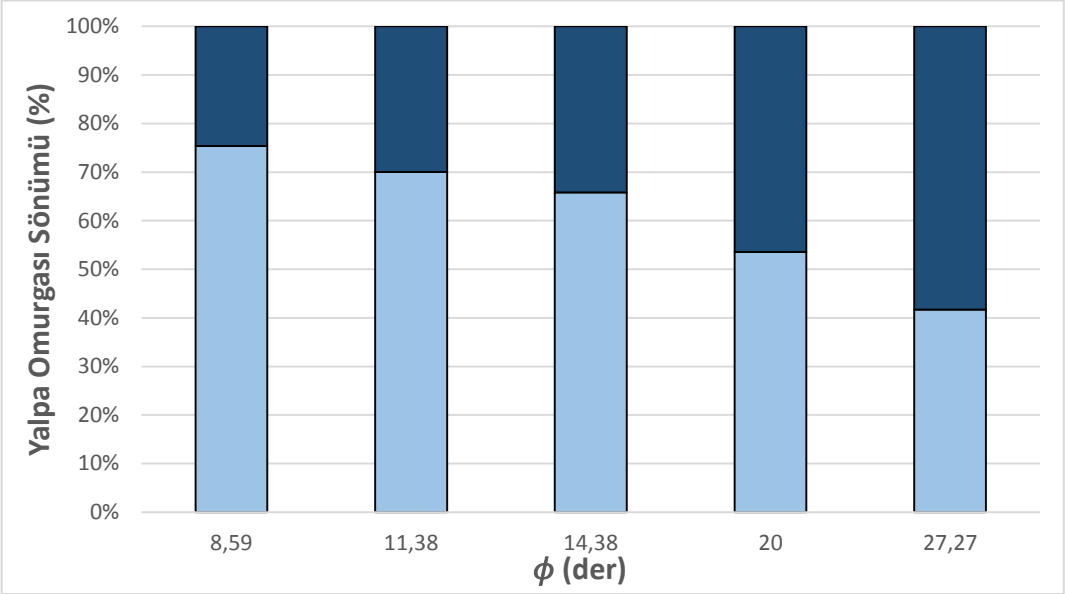


Şekil 6. 9 Boyutsuz yalpa sönüm katsayıları (sayısal ve deney)

Toplam sönümün büyük bir kısmının yalpa omurgasından kaynaklandığı daha önceki bölümlerde vurgulanmıştır. Yapılan sayısal ve deneysel çalışmalar yalpa omurgasından kaynaklanan sönümün serbest yüzey etkileşimi arttıkça azaldığını göstermiştir. Toplam yalpa sönüm katsayısı ve yalpa omurgasından kaynaklanan sönüm katsayısının yalpa açısına göre değişimi ve yalpa omurgasından kaynaklanan sönümün toplam sönüme göre dağılımı sırasıyla Şekil 6.10 ve 6.11'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere yalpa omurgasından kaynaklanan sönüm küçük açılarda toplam sönümün yarısından fazlasını oluştururken, bu değer yalpa omurgası serbest yüzeye yaklaştıkça aşağılara düşmüştür.



Şekil 6. 10 Boyutsuz toplam yalpa ve yalpa omurgası sönüm katsayıları

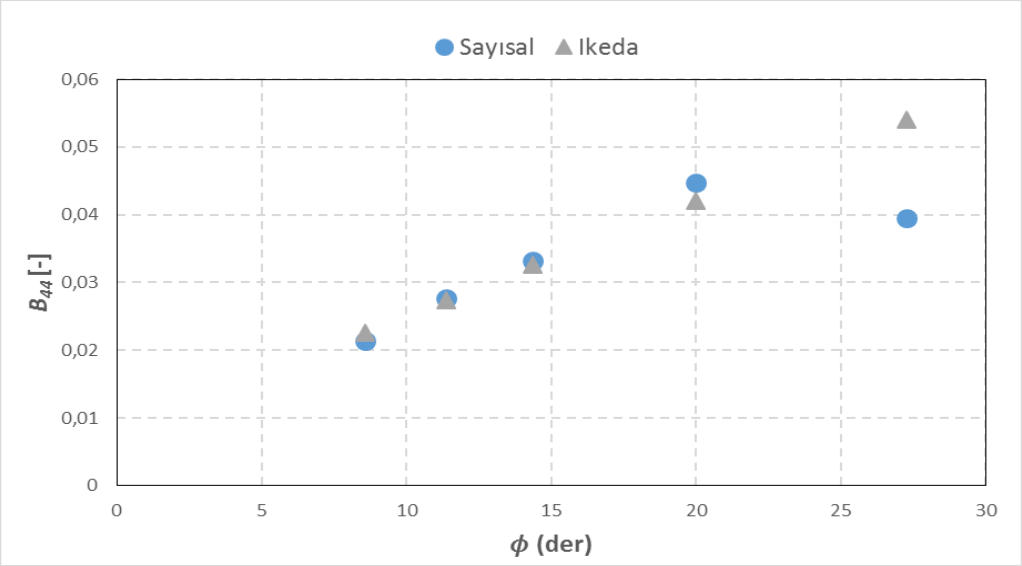


Şekil 6. 11 Farklı açılarda yalpa omurgası sönümü oranı

6.3.1 Sayısal Sonuçların Ikeda Metodu ile Karşılaştırılması

Bu bölümde farklı açılar için sayısal olarak hesaplanan yalpa sönüm katsayıları Ikeda metodu kullanılarak da hesaplanmıştır ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Serbest yüzey etkisinin hesaba katılmadığı Ikeda metodu yalpa omurgasının serbest yüzeye yaklaştığı geniş açı durumlarında yalpa sönüm katsayısı değerlerini olması gerekenden fazla hesaplamıştır. Yalpa omurgasının serbest yüzeye uzak olduğu durumlarda ise sayısal sonuçlar ile yaklaşık sonuçlar göstermiştir. Ikeda metodu problemin lineer olarak

düşünülebileceği durumlarda doğru sonuçlar vermektedir, yalpa omurgasının su yüzeyine yaklaştığı veya su yüzeyinden çıktığı gibi problemin lineer olarak düşünülemeyeceği durumlarda farklı sonuçlar göstermektedir ve Şekil 6.12'de bu sonuçları desteklemektedir. Sayısal sonuçlarda serbest yüzey etkisi ile beraber toplam yalpa sönümünde bir azalma gözlemlenmiştir ancak Ikeda metodunda açı arttıkça yalpa sönümündeki artışın devam ettiği gözlemlenmiştir.

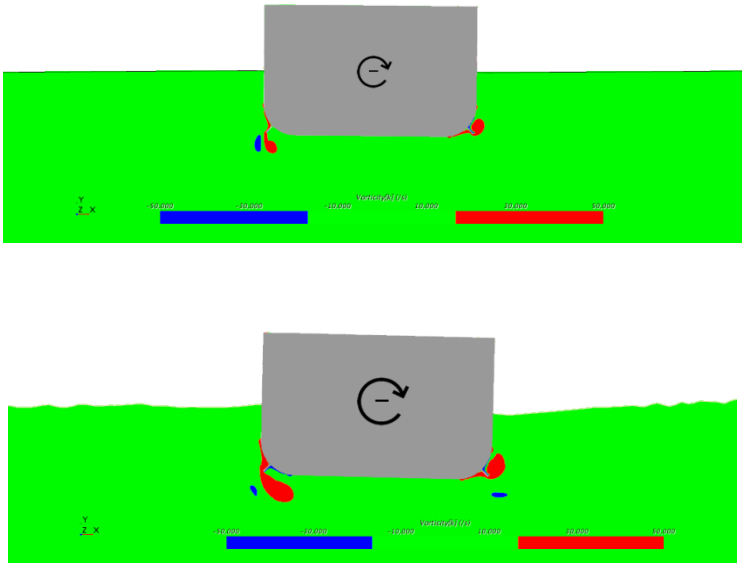


Şekil 6. 12 Farklı yalpa açılarında boyutsuz yalpa sönüm katsayıları

6.4 Tekne Etrafında Girdap Oluşumu ve Girdap Saçılışı

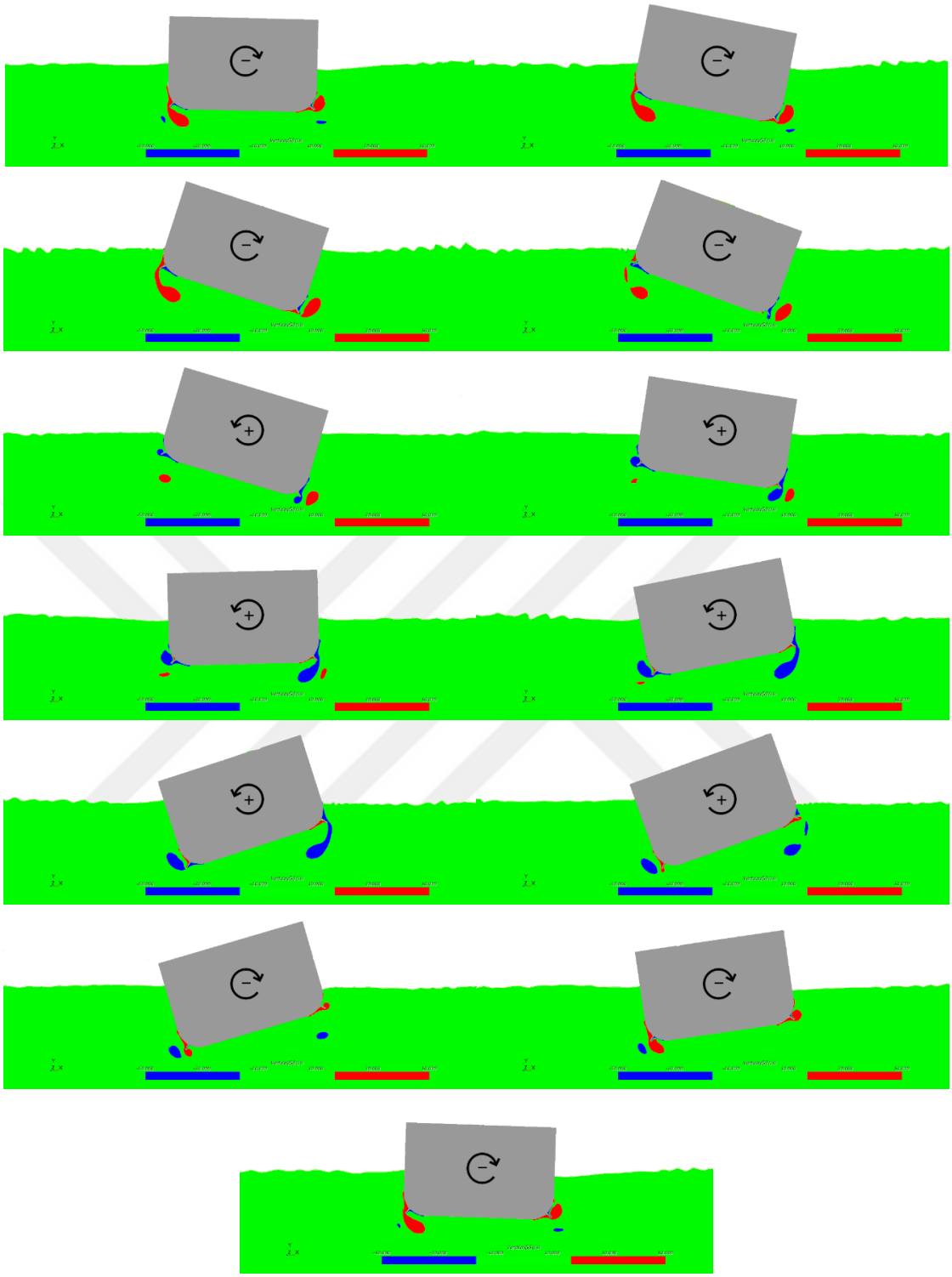
Daha önceki bölümlerde de vurgulandığı gibi yalpa hareketinde viskoz sönüm çok etkilidir ve viskoz sönümün ana kaynağı da yalpa omurgasından dolayı tekne etrafında oluşan girdaplardır. Bu girdaplar yalpa hareketi esnasında enerji kaybına neden olurlar ve yalpa hareketinin sönümlenmesine neden olurlar. Bu bölümde yalpa açısı arttıkça neden farklı yalpa sönümü değerleri elde edildiğini incelemek için tekne etrafında oluşan girdaplar sayısal çözücü kullanarak gösterilmiştir. Şekil 6.13 farklı iki yalpa açısında maksimum yalpa hızı durumunda tekne ve yalpa omurgası etrafında oluşan girdapları göstermektedir. Üstteki şekil 8.59^o yalpa açısı, alttaki şekil ise 20.0^o yalpa açısı durumunu göstermektedir. Her iki durumda da girdap büyüklük ölçekleri aynı olup -50/50 (1/sn) olarak şekil üzerinde gösterilmiştir. Kırmızı renk pozitif yönde (saat yönüne ters) oluşan girdapları, mavi renk ise negatif yönde (saat yönü) oluşan girdapları göstermektedir.

Şekilden de görüldüğü üzere her iki durumda da tekne negatif yönde dönerken yalpa omurgasının uçlarında pozitif yönde girdaplar oluşmuştur. Ayrıca bir önceki salınımdan kaynaklanan yalpa omurgasından saçılmış ve gittikçe gücünü ve büyüklüğünü kaybeden negatif girdaplar da görülmektedir. Büyük yalpa açısı durumunda tekne etrafında oluşan girdapların küçük yalpa açısı durumuna göre daha büyük ve yoğun olduğu gözlemlenmektedir. Viskoz yalpa sönümünün ana kaynağının tekne etrafında oluşan girdaplar olduğu düşünüldüğünde, geniş açı durumunda neden daha büyük yalpa sönümü değeri elde edildiği anlaşılmaktadır. Ayrıca dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta da farklı açılarda meydana gelen serbest yüzey deformasyonlarıdır. Şekil 6.13'e bakıldığında küçük açı durumunda serbest yüzeyde herhangi bir deformasyon görülmemektedir, ancak geniş açıya ait görüntüde serbest yüzeyde dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Bu da küçük açılarda Ikeda metodu kullanılarak hesaplanan yalpa sönüm katsayılarının sayısal sonuçlarla neden daha uyum içinde olduğunu göstermektedir. Bir önceki bölümde hesaplanan yalpa omurgasından kaynaklanan sönümün düşük açılarda daha büyük bir yüzdeye sahip olması da serbest yüzey deformasyonlarından anlaşılmaktadır. Serbest yüzeyin bozulması ile toplam yalpa sönümünün yalpa omurgasından kaynaklanan viskoz sönümü azalmıştır, buna karşın dalga bileşeninden kaynaklanan sönümü artmıştır.



Şekil 6. 13 Farklı yalpa açılarında tekne etrafında oluşan girdaplar

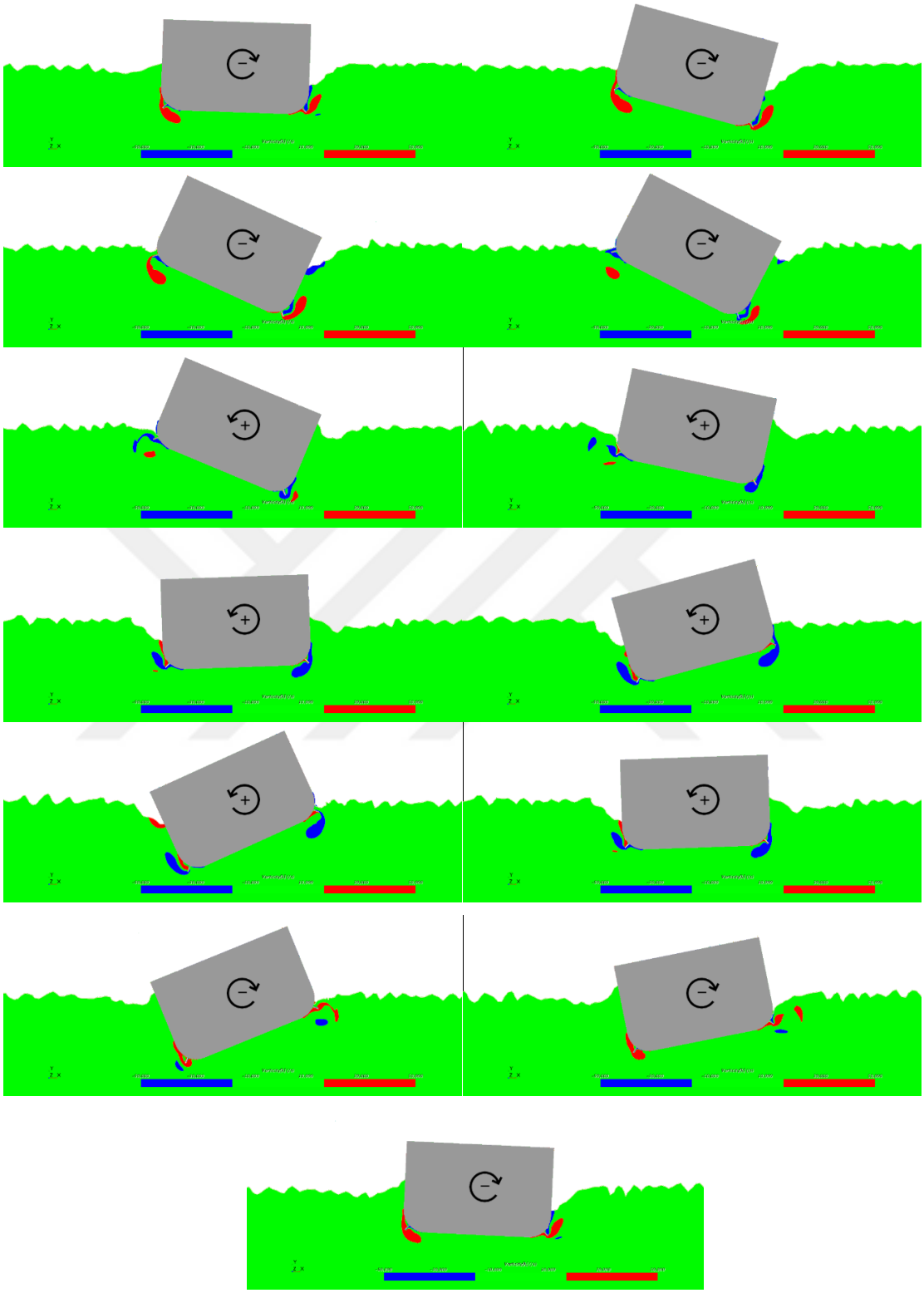
Yalpa omurgası serbest yüzey etkileşiminin tekne etrafında oluşan girdap oluşumuna etkisini incelemek için tekne etrafındaki girdaplar 0.1 sn aralıklarla bir tam salınım için 20.0^o (Şekil 6.14) ve 27.27^o (Şekil 6.15) yalpa açısı için gösterilmiştir. Şekil 6.14'de ilk resimden görüldüğü üzere tekne en başta sıfır yalpa açısında ya da maksimum yalpa hızı konumundadır. Tekne bu durumda iken saat yönünde (negatif) dönmektedir ve her iki yalpa omurgasının uçlarında pozitif girdaplar oluşmuştur. Tekne yalpa genliği arttıkça (sağa ve aşağı yöne doğru ilerledikçe) yalpa omurgasının oluşturduğu girdaplar yalpa omurgasının uçlarından saçılmaya başlamıştır. Tekne maksimum yalpa genliğine (20.0^o) ulaştığı durumda pozitif girdaplar yalpa omurgalarından tamamen kopmuştur ve teknenin saat yönüne ters (pozitif) dönmesiyle beraber yalpa omurgasının uçlarından negatif girdaplar oluşmaya başlamıştır. Tekne yalpa hızı arttıkça girdapların büyüklüğü ve gücü artmıştır. Tekne maksimum yalpa hızına ulaştığında oluşan girdaplar da maksimum büyüklüğe ulaşmıştır. Bir önceki bölümlerde gösterilen yalpa omurgasına etkiyen momentin sıfır yalpa açısı durumunda maksimum olması da böylelikle tekne etrafındaki girdaplar incelenerek gösterilmiştir. Ayrıca şekillerden görüldüğü üzere yalpa omurgasından saçılan pozitif girdaplar gittikçe gücünü ve büyüklüğünü kaybederek yok olmaya başlamıştır. Pozitif yönde yalpa genliği artmaya başladıkça oluşan negatif girdaplar yalpa omurgasından saçılmaya başlamıştır ve tekne maksimum yalpa genliğine ulaştığında tamamen kopmuştur ve tekneden uzaklaşmaya başlamıştır. Tekne tekrar negatif yönde dönmeye başlamıştır ve yalpa omurgası uçlarından pozitif girdaplar oluşmaya başlamıştır. Tekne tekrar sıfır yalpa açısı durumuna geldiğinde oluşan pozitif girdaplar maksimum büyüklüğüne ulaşmıştır. Şekilden de görüldüğü üzere son resim ve ilk resim aynıdır. Tekne bundan sonra yalpa hareketini devam ettirdikçe yeni bir girdap saçılma döngüsü başlayacaktır.



Şekil 6. 14 20.0^{o} yalpa açısında tekne etrafında oluşan girdaplar

Şekil 6.15 geniş yalpa açısı (27.27^{o}) durumunda tekne ve yalpa omurgası etrafında oluşan girdapları göstermektedir. Şekil 6.14'de olduğu gibi burada da tam bir yalpa salınımı için oluşan girdaplar 0.1 sn aralıklarla gösterilmiştir. Tekne en başta sıfır yalpa açısı durumunda ve negatif yönde yalpa hareketi yapmaktadır. Görüldüğü üzere oluşan pozitif girdaplar yalpa genliği negatif yönde arttıkça tekneden saçılmaya ve uzaklaşmaya başlamıştır. Tekne maksimum yalpa genliğine ulaştığında iskele yalpa omurgası serbest yüzeye çok yakın konumdadır ve bu etkileşim oluşan girdapları etkilemiştir. Şekilden de görüldüğü üzere tekne pozitif yönde yalpa hareketi yaptığında iskele taraftaki yalpa omurgası arkasında oluşan negatif girdapların bir kısmı serbest yüzey etkisiyle beraber tekne daha maksimum yalpa hızına ulaşmadan saçılmaya başlamıştır. Bu da oluşan girdabın büyümesine engel olmuştur ve doğal olarak da sönümün azalmasına neden olmuştur. Yalpa omurgası serbest yüzey etkileşiminin yalpa omurgasına etkiyen momenti ve sönümü azaltması geniş yalpa açısı durumunda tekne etrafında oluşan girdaplar ve girdap saçılışı gösterilerek şekillerle detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

Yalpa omurgasının serbest yüzeye yaklaşması yalpa omurgası arkasında oluşan girdap oluşumunu etkilemiş ve girdaplar küçük yalpa açısı durumuna göre daha erken saçılmaya başlamıştır. Saçılan girdaplar girdap büyüklüğünün artmasına engel olmuş ve bu da yalpa omurgasına etkiyen kuvvetin azalmasına neden olmuştur. Yalpa omurgasına etkiyen kuvvetin azalmasıyla da yalpa omurgasından kaynaklanan sönüm azalmıştır. Bir önceki bölümde yalpa omurgasına etkiyen kuvvet ve yalpa omurgası sönümü hesaplanarak gösterilen bu etkinin arkasındaki ana fiziksel neden bu şekilde tekne etrafındaki girdap oluşumu gösterilerek incelenmiştir. Bu bölümde dikkat edilmesi gereken bir diğer kısım da her iki yalpa açısı durumunda serbest yüzeyde oluşan deformasyonlardır. Şekil 6.15'den görüldüğü üzere yalpa omurgası serbest yüzey etkileşimi serbest yüzeyi ilk duruma göre daha fazla deforme etmiştir ve daha fazla dalga oluşturmuştur. Himeno [16] yalpa sönümü hesabında genellikle ihmal edilen yalpa omurgası dalga sönümünün geniş yalpa açılarında ihmal edilecek kadar küçük olmadığına ve hesaplanması gerektiğine dikkat çekmiştir. Şekil 6.15'de geniş açıda oluşan serbest yüzey deformasyonu da Himeno'nun bu önerisini desteklemektedir.



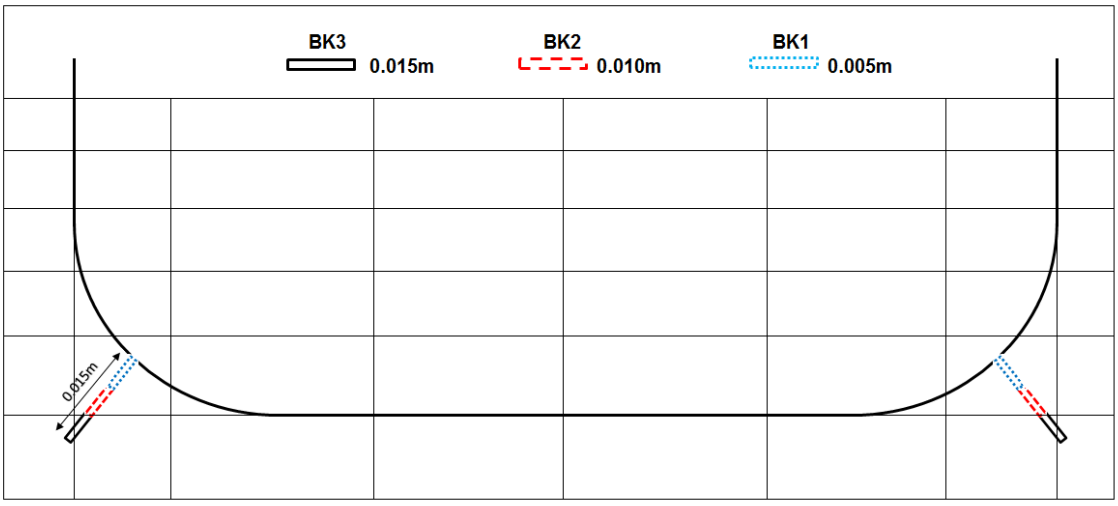
Şekil 6. 15 27.27^{o} yalpa açısında tekne etrafında oluşan girdaplar

BÖLÜM 7

YALPA OMURGASI GENİŞLİĞİNİN YALPA SÖNÜMÜNE ETKİSİ

7.1 Giriş

Yalpa omurgası yalpa sönümüne katkı sağlayan en büyük bileşendir. Bu katkıdan etkin bir şekilde yararlanmak için yalpa omurgasının yerinin ve boyutlarının doğru belirlenmesi gerekmektedir. Bu bölümde üç farklı yalpa omurgası genişliği için yalpa sönüm katsayıları sayısal olarak hesaplanmış ve yalpa sönümünü nasıl etkiledikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Analizler için seçilen yalpa omurgaları BK1, BK2 ve BK3 olarak adlandırılmış ve boyutları sırasıyla 0.005m,0.01m ve 0.015 m olarak belirlenmiştir. Analizleri yapılan yalpa omurgaları Şekil 7.1'de gösterilmiştir.



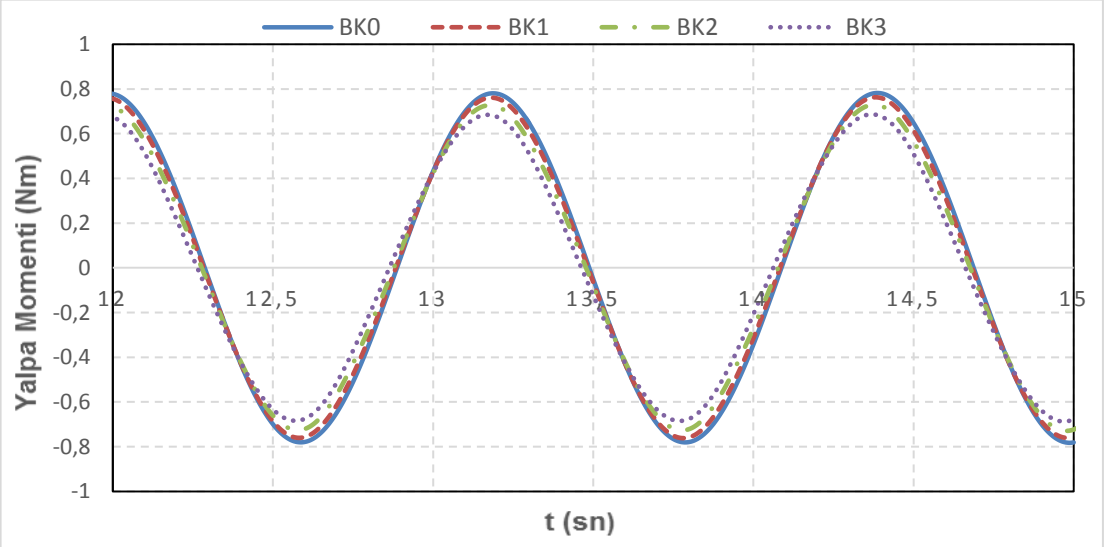
Şekil 7. 1 Farklı yalpa omurgası genişliklerinin gösterimi

Zorlanmış yalpaya maruz bırakılan farklı boyutlarda yalpa omurgasına sahip tekne için yalpa sönüm katsayıları sayısal analizler sonucu hesaplanmıştır. Zamana bağlı moment

eğrileri karşılaştırılarak yalpa omurgası genişliğinin yalpa sönümüne katkısı gösterilmiştir. Ayrıca yalpa omurgalarının etrafındaki hız vektörleri ve oluşan girdaplar farklı yalpa omurgaları için detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Analizler tek bir frekansta ve farklı yalpa açıları için yapılmıştır.

7.2 Yalpa Momentlerinin Sayısal Olarak Hesaplanması

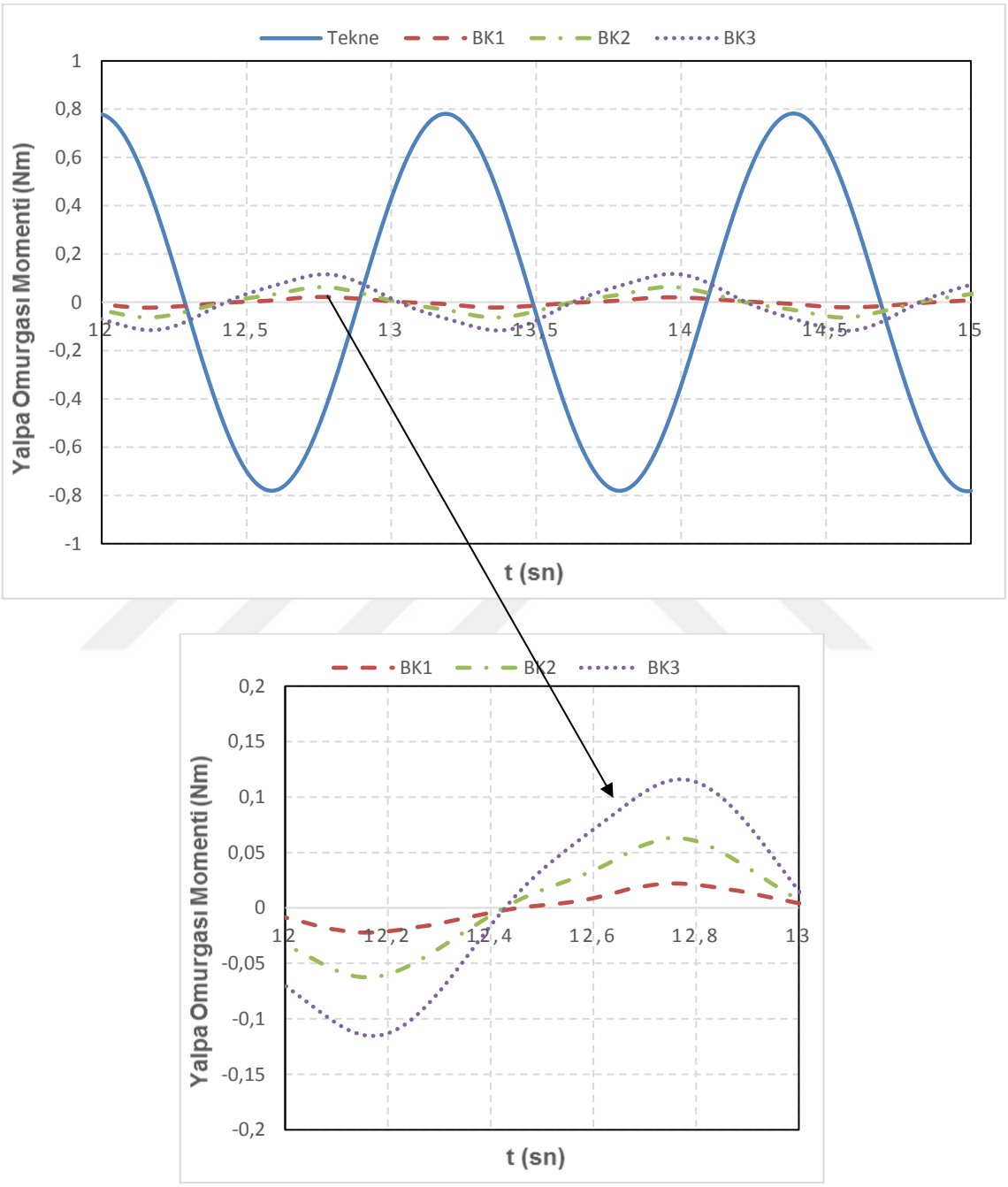
Bu bölümde üç farklı yalpa omurgasına ait moment değerleri sayısal olarak gösterilmiştir. Ayrıca yalpa omurgasız durum da yalpa omurgasının sönüme olan katkısını göstermek için hesaplanmıştır. Yalpa omurgasız durum BK0 olarak adlandırılmıştır. Zorlanmış yalpa yapan iki boyutlu modele ait moment eğrileri Şekil 7.2' de gösterilmiştir. Yalpa açısı ve yalpa frekansı üç farklı yalpa omurgası için de aynı alınmıştır. Böylelikle yalpa omurgası genişliğinin etkisi toplam yalpa momenti eğrilerinde gözlemlenmiştir çünkü diğer parametrelerin momente olan katkısı her bir durum için aynıdır. Şekilden de görüldüğü gibi yalpa omurgası genişliği arttıkça moment eğrilerinde bir düşüş gerçekleşmiştir, dolayısıyla geniş yalpa omurgası daha büyük oranda bir sönüm sağlamıştır. Yalpa omurgasız durumda yani sadece çıplak tekne olduğunda en yüksek moment sağlanmıştır çünkü bu momenti sönümleyecek negatif etki gösteren yalpa omurgası momenti yoktur.



Şekil 7. 2 Farklı yalpa omurgası genişlikleri için toplam yalpa momenti eğrileri

Yalpa omurgasının oluşturduğu bu negatif etkiyi göstermek için farklı boyutlardaki yalpa omurgalarına etkiyen momentler sayısal olarak hesaplanmış ve Şekil 7.3'de

gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yalpa omurgasının oluşturduğu momentler yalpa genişliği arttıkça, yükselmekte ve çıplak tekne momentine ters bir şekilde moment oluşturmaktadırlar. Bu da enerji kaybına yani hareketin sönümlenmesine sebep olmaktadır.



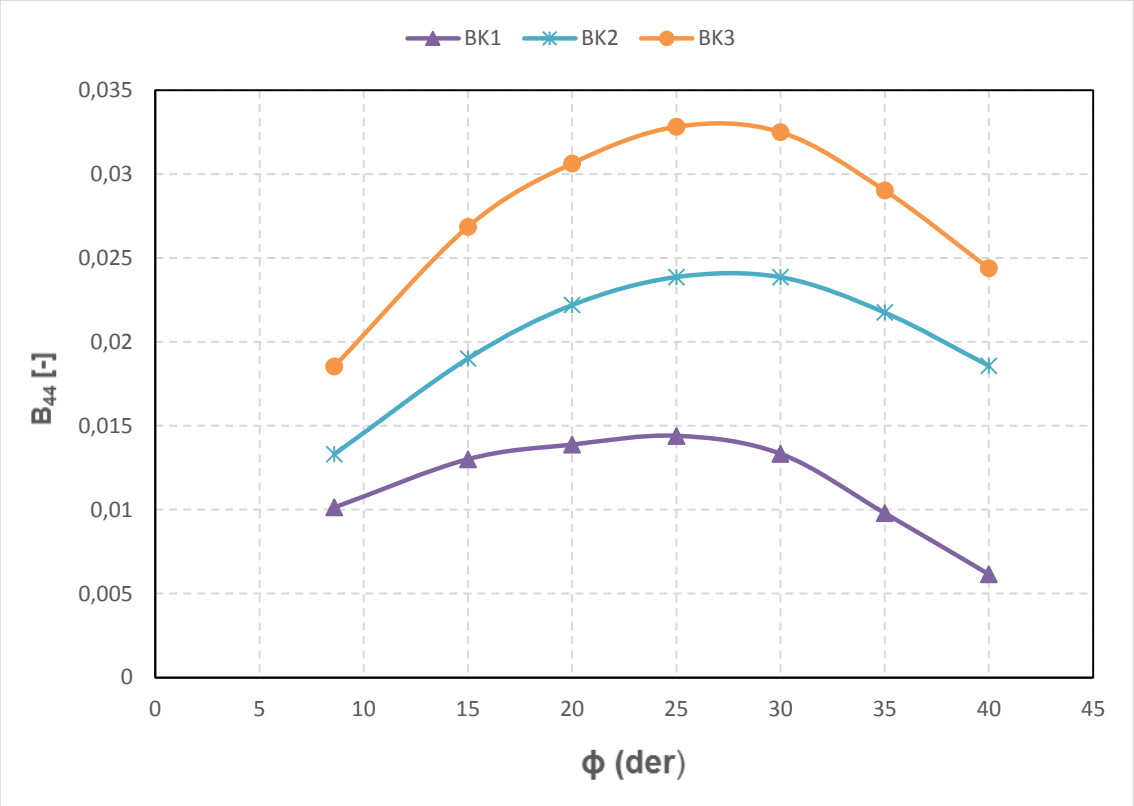
Şekil 7. 3 Farklı yalpa omurgası genişlikleri için yalpa omurgası momenti eğrileri

Şekilden de görüldüğü gibi yalpa omurgasının oluşturduğu moment teknenin oluşturduğu momente göre daha küçüktür ancak oluşturduğu sönüm tekne sönümü ile

aynı derecededir. Bir sonraki bölümde bununla ilgili sonuçlar detaylı bir şekilde verilmiştir.

7.3 Yalpa Sönüm Katsayıları

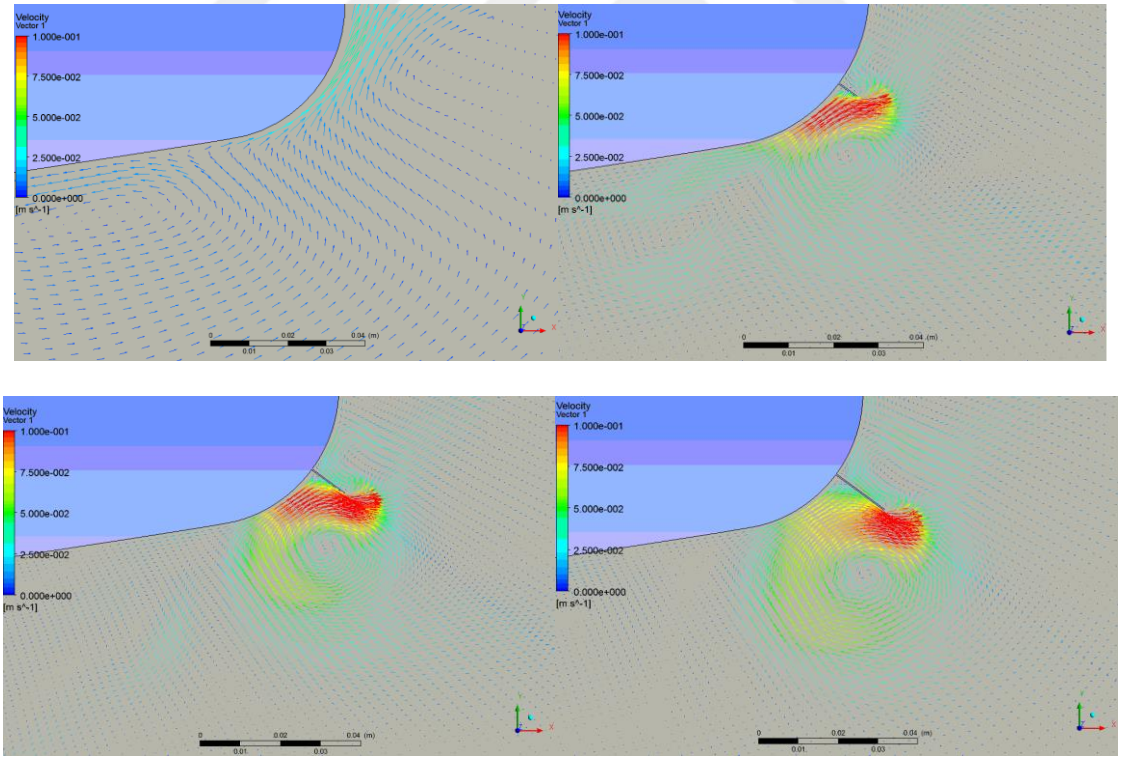
Bu bölümde, yalpa omurgası genişliklerinin yalpa sönüm katsayısına olan etkileri incelenmiştir. Farklı boyuttaki yalpa omurgaları için sayısal olarak hesaplanan moment değerleri kullanılarak boyutsuz yalpa sönüm katsayıları hesaplanmıştır. Bir önceki bölümlerde hesaplarla ilgili formüller detaylı bir şekilde verildiğinden bu bölümde sadece sonuçlar gösterilmiştir. Şekil 7.4 farklı yalpa omurga genişlikleri için boyutsuz yalpa sönüm katsayılarını göstermektedir. Analizler farklı yalpa açıları için gerçekleştirilmiştir. Bütün yalpa açılarında geniş yalpa omurgasına sahip olan tekne daha yüksek yalpa sönüm katsayısı değerine sahiptir.



Şekil 7. 4 Farklı yalpa omurgası genişlikleri için boyutsuz yalpa sönüm katsayıları

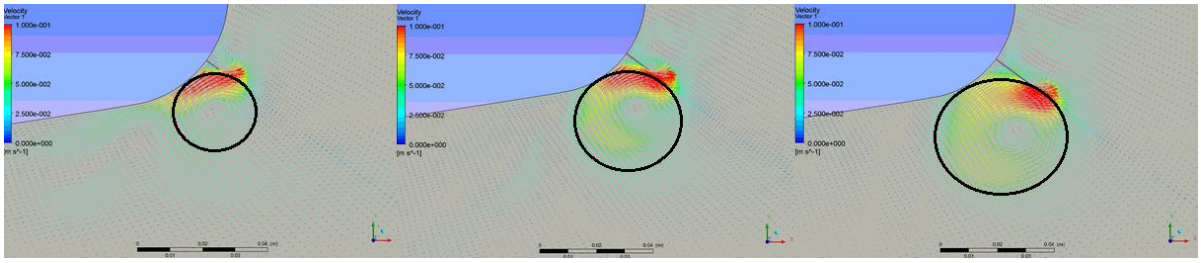
7.4 Tekne Etrafında Oluşan Hız Vektörleri ve Girdaplar

Yalpa omurgalarının gemilerde kullanılma amacı yalpa sönüm katsayılarını arttırmaktır. Yalpa omurgaları girdaplar üreterek enerji kaybına neden olurlar ve yalpa hareketinin sönümlenmesine katkı sağlarlar. Yalpa omurgası genişliğinin arttırılmasıyla bu katkının yükseldiği gösterilmiştir. Bu bölümde de bu katkıya sebep olan yalpa omurgası etrafındaki girdaplar farklı boyuttaki yalpa omurgaları için gösterilmiştir. Ayrıca yalpa omurgasız durumda ele alınmıştır böylelikle yalpa omurgasının önemi daha iyi bir şekilde anlaşılmıştır. Şekil 7.5 yalpa omurgasız durum ve üç farklı yalpa omurgası genişliği için sancak yalpa omurgası etrafındaki hız vektörlerini göstermektedir. Görüldüğü üzere yalpa omurgası olmadığı durumunda tekne etrafında oluşan bir girdap söz konusu değildir ve bu da yalpa omurgasız durumda yalpa sönümünün neden düşük olduğunu göstermiştir. Yalpa omurgalı durumlarda ise yalpa omurgası etrafında girdaplar oluşmuştur. Yalpa omurgası genişliği arttıkça oluşan girdapların da boyutu artmıştır.



Şekil 7. 5 Farklı yalpa omurgası genişlikleri için hız vektörleri

Şekil 7.6’da ise yalpa omurgası etrafında oluşan girdap bölgeleri daire içine alınmış ve daire büyüklüklerine bakarak oluşan girdapların büyüklüğünün daha iyi bir şekilde kıyaslanması sağlanmıştır. Böylelikle yalpa omurgasının genişliğinin artmasıyla yalpa sönümündeki artışın kaynağı gösterilmiştir. Geniş yalpa omurgasının oluşturduğu büyük ve yoğun girdaplar yalpa omurgasından kaynaklanan viskoz sönümü arttırmıştır.



Şekil 7. 6 Farklı yalpa omurgası genişlikleri için girdap büyüklükleri

BÖLÜM 8

SONUÇ VE ÖNERİLER

Gemi yalpa hareketinin doğru bir şekilde analiz edilmesi diğer gemi hareketlerine göre daha büyük bir önem taşımaktadır. Çünkü geniş yalpa açıları, özellikle rezonans bölgesinde, gemilerin devrilmesine yol açabilirler. Gemi yalpa hareketinin doğru bir şekilde analiz edilebilmesi için gemi yalpa sönümünün gerçekçi bir şekilde belirlenmesi gereklidir. Potansiyel teori kullanılarak yalpa sönümü doğru bir şekilde belirlenemez çünkü yalpa sönümünde viskoz etkiler çok baskındır. Ikeda tarafından bu viskoz etkiler göz önüne alınarak yapılan deneyler sonucunda yarı ampirik bir metot geliştirilmiş olup günümüzde de en bilinen ve doğru sonuç veren yalpa sönüm hesaplama metodu olarak kullanılmaktadır. Son zamanlarda HAD alanında yaşanan gelişmelerle yalpa sönümünün sayısal olarak hesaplanması konusunda önemli çalışmalar yapılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada, serbest yüzey etkisi altında zorlanmış yalpa hareketi yapan yalpa omurgasına sahip iki boyutlu gemi kesiti etrafındaki akış RANS çözücü kullanılarak incelenmiş ve yalpa sönüm katsayıları hesaplanmıştır. Analizler Ikeda metodunun yetersiz kaldığı durumlar için yapılmış ve sayısal sonuçların doğrulanması için aynı koşullarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuçların deneylerle uyum içinde olduğu gözlemlenmiş ve böylelikle yalpa sönüm hesabında sayısal çözücülerin kullanılabileceği gösterilmiştir. Buna göre ilk olarak farklı su çekimleri için sayısal analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda su çekiminin azalmasıyla birlikte yalpa sönümünün de azaldığı gözlemlenmiştir. Sayısal sonuçlar ve Ikeda metodu arasındaki fark su çekimi azaldıkça artmıştır. Bunun sebebi, su çekimi azaldıkça yalpa sönümü serbest yüzeye yaklaşmakta ve serbest yüzey yalpa omurgasına etkiyen kuvveti etkilemektedir. Ikeda metodu

serbest yüzeyi hesaba katmadığından su çekiminin sığ olduğu bölgeler için farklı sonuçlar vermektedir. Sığ su çekimi durumunda serbest yüzeyin yalpa omurgasına etkiyen kuvvete olan etkisini göstermek için yalpa omurgasına etkiyen kuvvet ve direnç katsayısı sayısal olarak ve Ikeda metodu yardımıyla hesaplanmıştır. Sayısal sonuçlar yalpa omurgasına etkiyen kuvvetin su çekimi azaldıkça ya da serbest yüzey etkisi arttıkça azaldığını göstermiştir. Ancak Ikeda metodu sonuçlarında tüm su çekimlerinde aynı direnç katsayısı elde edilmiştir. Ayrıca Ikeda metodunda tekne etrafındaki basınç dağılımı için bir varsayım yapılmıştır. Ikeda metodunun neden farklı sonuç verdiğini göstermek için tekne etrafındaki basınç dağılımı sayısal olarak hesaplanmıştır. Sayısal sonuçlar, tekne etrafındaki basınç dağılımının normal su çekimi koşullarında Ikeda metodu ile aynı sonucu verdiğini göstermiştir. Ancak su çekimi azaldıkça bu basınç dağılımı değişmiş ve yalpa omurgasının her iki tarafında da düşük basınç bölgeleri oluşmuştur. Bu basınç dağılımı değişimi de, yalpa omurgasına etkiyen kuvvetin ve yalpa omurgasından kaynaklanan sönümün neden azaldığını ispatlamıştır. Kullanılan sayısal çözücü yardımıyla yalpa hareketi sırasında tekne etrafındaki akım detaylı bir şekilde incelenmiştir. Tekne ve yalpa omurgası etrafında oluşan girdaplar gösterilerek tekne etrafında oluşan basınç dağılımındaki değişimin nedeni gösterilmiştir. Normal su çekimi ve sığ su çekimi durumlarında bir salınım periyodu için belli zaman aralıklarında tekne etrafındaki girdap oluşumları ve girdap saçılışları gösterilmiştir. Sonuç olarak sığ su çekiminde serbest yüzeyin girdap oluşumunu etkilediği ve normal su çekimi durumuna göre farklı bir girdap döngüsü meydana geldiği gözlemlenmiştir. Saçılan girdapların tekne altına doğru ilerlediği ve buradaki basınç dağılımını değiştirdiği görülmüştür. Ayrıca son olarak sayısal yöntemin doğruluğunun gösterilmesi için sığ su çekimi durumunda farklı yalpa açısı ve yalpa frekansları için yalpa sönüm katsayıları sayısal ve deneysel olarak hesaplanmış ve sayısal sonuçların deneylerle uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir. Özetle yalpa sönüm hesabında Ikeda metodunun farklı sonuçlar verdiği sığ su çekimi koşulunda sayısal metodun daha iyi bir yöntem olduğu tekne etrafındaki akış incelenerek detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

İkinci olarak, Ikeda metodunun yetersiz kaldığı geniş yalpa açısı durumu ele alınmıştır. Bu durum da sığ su çekimi ile benzerlikler göstermektedir çünkü geniş yalpa açısı durumunda da yalpa omurgası serbest yüzeye yaklaşmaktadır. Bu çalışma kapsamında

sayısal yöntemin farklı yalpa açılarında yalpa sönümünü doğru bir şekilde hesapladığı yapılan deneyler ile karşılaştırılarak gösterilmiştir. Yalpa açısı arttıkça yalpa sönümü artmış, ancak yalpa omurgasının serbest yüzeye yaklaştığı geniş yalpa açısında yalpa sönümü azalmıştır. Ikeda metodunda ise bu azalma görülmemiştir ve yalpa açısı arttıkça yalpa sönümü artmaya devam etmiştir. Geniş yalpa açısında Ikeda metodunun yetersiz kaldığı deney sonuçları ve sayısal sonuçlar ile kıyaslanarak gösterilmiştir. Geniş yalpa açısı durumunda yalpa sönümündeki azalmanın nedeni sayısal çözücü kullanılarak incelenmiştir. Farklı yalpa açıları için yalpa omurgasına etkiyen momentler sayısal olarak hesaplanmış ve geniş yalpa açısında yalpa omurgasına etkiyen momentin azaldığı görülmüştür. Bu azalmaya neden olan etki, tekne ve yalpa omurgası etrafındaki girdap oluşumları ve girdap saçılışları incelenerek gösterilmiştir. Farklı yalpa açıları için tekne etrafında oluşan girdaplar sayısal çözücü yardımıyla gösterilmiştir. Yalpa açısı arttıkça tekne etrafında oluşan girdapların büyüdüğü görülmüştür. Ancak geniş yalpa açısı durumunda serbest yüzey duvar etkisi göstermiş ve girdap oluşumunu etkilemiştir. Serbest yüzeye yaklaşan yalpa omurgası arka yüzündeki girdap serbest yüzey ile etkileşime girmiş ve erkenden saçılmaya başlamıştır. Bu da yalpa sönümünün azalmasına neden olmuştur. Ikeda metodu serbest yüzey etkileşimini ve girdap saçılışlarını hesaba katmadığından geniş yalpa açısı durumunda değerleri farklı hesaplamaktadır.

Bu çalışma kapsamında son olarak, farklı yalpa omurgası genişlikleri için sayısal analizler yapılmıştır. Yalpa omurgasından kaynaklanan sönüm toplam yalpa sönümünün büyük bir yüzdesini oluşturmaktadır. Bu sönüme neden olan en büyük etki de yalpa omurgasının oluşturduğu girdaplardır. Bu çalışma da farklı üç yalpa omurgası genişliği için sayısal analizler yürütülmüş ve analizler sonucu geniş yalpa omurgasının yalpa sönümünü arttırdığı görülmüştür. Üç farklı yalpa omurgası için yalpa omurgası etrafındaki girdaplar gösterilmiş ve yalpa omurgası genişliği arttıkça yalpa omurgası etrafından oluşan girdapların büyüklüğü de artmıştır. İşte bu artış yalpa omurgasından kaynaklanan viskoz yalpa sönümünün artmasına neden olmuştur.

Sonuç olarak sayısal sonuçlar Ikeda metodunun yetersiz kaldığı tüm koşullarda daha iyi sonuçlar vermiştir. Tekne etrafındaki akış incelenerek yalpa sönümündeki artışa ve azalışa neden olan etkiler detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar sayısal

yöntemin yalpa sönümünü hesaplamada iyi bir alternatif olduğunu ve ileride yapılacak çalışmalarda Ikeda metodunun geliştirilmesinde kullanılabileceğini göstermiştir. Böylelikle daha doğru sonuçlar veren bir metot geliştirilebilir. Bu çalışmada diğer hareketlerin etkisi ihmal edilmiştir ve ileriki çalışmalarda diğer gemi hareketlerinin yalpa sönümüne olan etkisi incelenebilir. Farklı gemi modelleri ve yalpa omurgası modelleri için analizler yapılabilir ve bunların yalpa sönümüne olan etkileri incelenebilir. Analizler gerçek bir gemi modeli için yapılarak üç boyutun yalpa sönümüne olan etkileri gözlemlenebilir.

KAYNAKLAR

[1] Froude, W., (1872). "On the Influence of Resistance Upon the Rolling of Ships", Naval Science, 1: 411-429.

[2] Vugts, J. H., (1968). “The Hydrodynamic Coefficients for Swaying, Heaving, and Rolling of Cylinders in a Free Surface”, NSRC Report 112S.

[3] Sasajima, H., (1954). “On the Action of Bilge Keels in Ship Rolling”, J. Society of Naval Architects of Japan, 86 (in Japanese).

[4] Tanaka, N., (1957). “A Study on the Bilge Keel- Part 1”, J. Society of Naval Architects of Japan, 101 (in Japanese).

[5] Tanaka, N., (1958). “A Study on the Bilge Keel- Part 2”, J. Society of Naval Architects of Japan, 103 (in Japanese).

[6] Tanaka, N., (1959). “A Study on the Bilge Keel- Part 3”, J. Society of Naval Architects of Japan, 105 (in Japanese).

[7] Tanaka, N., (1961). “A Study on the Bilge Keel- Part 4”, J. Society of Naval Architects of Japan, 109 (in Japanese).

[8] Martin, M., (1958). “Roll Damping Due to Bilge Keels”, Iowa University Institute of Hydraulics Research Report to the Office of Naval Research.

[9] Kato, H., (1957). “On the Frictional Resistance to the Rolling of Ships”, J. Society of Naval Architect of Japan, 102: 115-122 (in Japanese).

[10] Kato, H., (1965). “Effect of Bilge Keels on the Rolling of Ships.” J. Soc. Naval Arch., Japan, 117: 93–114.

[11] Ikeda, Y., Himeno, Y. ve Tanaka, N., (1978a). “On Roll Damping Force of Ship- Effect of Friction on Hull and Normal Force of Bilge Keels”, Report of the Department of Naval Architecture, University of Osaka Prefecture, No. 00401.

[12] Ikeda, Y., Komatsu, K., Himeno, Y. ve Tanaka, N., (1978b). “On Roll Damping Force of Ship- Effect of Hull Surface Pressure Created by Bilge Keels”, Report of the Department of Naval Architecture, University of Osaka Prefecture, No. 00402.

[13] Ikeda, Y., Himeno, Y. ve Tanaka, N., (1978c). “On Eddy Making Component of Roll Damping Force on Naked Hull”, Report of the Department of Naval Architecture, University of Osaka Prefecture, No. 00403.

[14] Ikeda, Y., Himeno, Y. ve Tanaka, N., (1978d). “Components of Roll Damping of Ship at Forward Speed”, Report of the Department of Naval Architecture, University of Osaka Prefecture, No. 00404.

[15] Ikeda, Y., Himeno, Y. ve Tanaka, N., (1978e). “A Prediction Method for Ship Roll Damping”, Report of the Department of Naval Architecture, University of Osaka Prefecture, No. 00405.

[16] Himeno, Y., (1981). “Prediction of Ship Roll Damping-State of the Art”, U. Michigan Dept. of Naval Arch. and Marine Engineering, Report 239.

[17] Faltinsen, O., (1990). “Sea Loads on Ships and Offshore Structures”, Cambridge University Press, UK, ISBN 0 521 45870 6.

[18] Oliveira, A. C., (2003). “Investigacoes Sobre A Teoria Bilinear Na Analise Do Blnco Transversal De Fpsos (Investigation About the Bilinear Theory for the Analysis of FPSO Rolling)”, Ocean Engineering, Federal University of Rio de Janeiro (In Portuguese).

[19] Fernandes, A. C., Kroft, S. A. B., (2000). “Bi-Linear Modelling of Wider, Longer and Continues Bilge Keels for Fpsos Roll Motion Control”, Proceedings of the ASME 2000 19th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, New Orleans, USA, OMAE2000-OFT-4072.

[20] Ikeda, Y. and Katayama, T., (2000). “Roll Damping Prediction Method for a High-Speed Planing Craft”, Proc. 7th Intl. Conf. on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, Tasmania, Australia.

[21] Ikeda, Y., (2004). “Prediction Methods of Roll Damping of Ships and Their Application to Determine Optimum Stabilization Devices”, Marine Technology, 41 (2), April.

[22] Tanaka, N., Himeno, Y., Ikeda, Y. ve Isomura, K., (1981) "Experimental Study on Bilge-Keel Effect for Shallow-Draft Ship”, Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, 180: 69-75 (in Japanese).

[23] Kawahara, Y., Maekawa, K. ve Ikeda, Y., (2009). “A Simple Prediction Formula of Roll Damping of Conventional Cargo Ships on the Basis of Ikeda’s Method and Its Limitation”, Proc. 10th Intl. Conf. on Stability of Ships and Ocean Vehicles, St. Petersburg, Russia.

[24] Kerwin, J. E., (1955). “Notes on Rolling in Longitudinal Waves”, International Shipbuilding Progress, 2: 597–614.

[25] Haddara M. R., (1971). “On the Stability of Ship Motion in Regular Oblique Waves”, International Shipbuilding Progress, 18 (207): 416–434.

[26] Dalzell, J. F., (1978). “Note on the Form of Ship Roll Damping”, Journal of Ship Research, 22 (3): 178–185.

[27] Haddara, M. R., (1984). “A Note on the Effect of Damping Moment Form on Rolling Response”, International Shipbuilding Progress, 31 (363): 285–290.

[28] Nayfeh, A. H. ve Khdeir, A. A., (1986). “Nonlinear Rolling of Ships in Regular Beam Seas”, International Shipbuilding Progress, 33: 40-49.

[29] Chakrabarti, S., (2001). “Empirical Calculation of Roll Damping for Ships and Barges”, Ocean Engineering, 28 (7): 915-932.

[30] Taylan, M., (2000). “The Effect of Nonlinear Damping and Restoring in Ship Rolling”, Ocean Engineering, 27 (9): 921-932.

[31] Yeung, R. ve Ananthakrishnan, P., (1992). "Oscillation of a Floating Body in a Viscous Fluid”, J. Eng. Math., 26: 211–230.

[32] Korpus, R. A. ve Falzarano, J. M., (1997). “Prediction of Viscous Ship Roll Damping by Unsteady Navier-Stokes Techniques”, J. Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 119: 108-113.

[33] Yeung, R. W, Liao, S. W. ve Roddier, D., (1998). “Hydrodynamic Coefficients of Rolling Rectangular Cylinders”, Intl. J. Offshore and Polar Engineering, 8(4).

[34] Sarkar, T., ve Vassalos, D., (2001). "A RANS-Based Technique for Simulation of the Flow Near a Rolling Cylinder at the Free Surface”, Journal of Marine Science and Technology, 5 (2): 66-77.

[35] Miller, R. W., Gorski, J. J. ve Fry, D., (2002). “Viscous Roll Predictions of a Circular Cylinder with Bilge Keels”, Proc. 24th Symp. on Naval Hydro., Fukuoka, Japan.

[36] Paap, M., (2005). "Verification of CFD Calculations With Experiments on a Rolling Circular Cylinder With Bilge Keels in a Free Surface”, Master Thesis, Delft University of Technology and Bluewater Energy.

[37] Wilson, R., Carrica P. M. ve Stern, F., (2006). "Unsteady RANS Method for Ship Motions With Application to Roll for a Surface Combatant”, Comput. Fluids, 35: 501–524

[38] Irvine, M., (2004). "Towing Tank Tests for Surface Combatant for Coupled Pitch and Heave and Free Roll Decay Motions”, Doctorial Thesis, University of Iowa, The Graduate College of the University of Iowa.

[39] Jaouen, F., Koop, A. ve Vaz, G., (2011). "Predicting Roll Added Mass and Damping of a Ship Hull Section Using CFD”, Proceedings of ASME 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Netherlands.

[40] Oliveira, A. C. ve Fernandes, A. C., (2006). "The Bilinear Behavior for FPSO Rolling Motions”, Proceedings of the 9th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, Brazil.

[41] Oliveira, A. C. ve Fernandes, A. C., (2014). "The Nonlinear Roll Damping of a FPSO Hull", Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 136(1), 011106.

[42] Wanderley, J. B. V. ve Levi, C. A., (2005). "Vortex Induced Loads on Marine Risers”, Ocean Engineering, 32, 1281-1295.

[43] Sadat-Hosseini, H., Stern, F., Olivieri, A., Campana, E. F., Hashimoto, H., Umeda, N., Bulian, G. ve Francescutto, A., (2010). "Head-Wave Parametric Rolling of a Surface Combatant”, Ocean Eng., 37: 859–878.

[44] Bangun, E. P., Wang, C. M. ve Utsunomiya, T., (2010). "Hydrodynamic Forces on a Rolling Barge With Bilge Keels”, Appl. Ocean Res., 32: 219–232.

[45] Yago, K., Ohkawa, Y., Chuji, T. ve Utsunomiya, T., (2008). "Experimental Study on Viscous Damping Force of Box-Shaped Body With Fin", J. Soc. Nav. Archit., Japan.

[46] Bonfiglo, L., Brizzolara, S. ve Chryssostomidis, C., (2011). "Added Mass and Damping of Oscillating Bodies a Fully Viscous Numerical Approach", Recent Adv. Fluid Mech. Heat Mass Transf Biol., 210–215.

[47] Henning, H. L., (2011). "Investigation of the Heave, Sway and Roll Motions of Typical Ship Like Hull Sections Using Rans Numerical Methods", Master Thesis, University of Stellenbosch.

[48] Yang, B., Wang, Z. C. ve Wu, M., (2012). "Numerical Simulation Of Naval Ships Roll Damping Based On CFD", Procedia Eng., 37: 14–18.

[49] Handschel, S., Kollisch, N., Soproni, J. P. ve Abdel-Maksoud, M., (2012). "A Numerical Method for Estimation of Ship Roll Damping for Large Amplitudes", 29th Symposium on Naval Hydrodynamics, Sweeden.

[50] Bassler, C. C., (2013). "Analysis and Modeling of Hydrodynamic Components for Ship Roll Motion in Heavy Weather", PhD. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.

[51] Gao, Q. ve Vassalos, D., (2011). "Numerical Study of the Roll Decay of Intact and Damaged Ship", Proceedings of the 12th International Ship Stability Workshop, 277–282.

[52] Avalos, G. O., Wanderley, J. B., Fernandes, A. C. ve Oliveira, A. C., (2014). "Roll Damping Decay of a FPSO With Bilge Keel", Ocean Engineering, 87 (111).

[53] Jiang, Y., (2014). "Computational Modeling in Three Dimensions of Multi-DOF Ship Motion in a Viscous Fluid", PhD. Thesis, Engineering - Mechanical Engineering in the Graduate Division of the University of California, Berkeley.

[54] Van Kampen, M. J., (2015). "Bilge Keel Roll Damping CFD and Local Velocities", Master Thesis, Offshore and Dredging Engineering, The Delft University of Technology.

[55] Yıldız, B., Çakıcı, F., Katayama, T. ve Yılmaz, H., (2016). "URANS Prediction of Roll Damping for a Ship Hull Section at Shallow Draft", Journal of Marine Science and Technology, 21 (1): 48-56.

[56] Wilcox, D. C., (2006). Turbulence Modeling for CFD. La Cãnada, Calif.: D C W Industries.

[57] Doğrul, A., (2015). "Gemi Direnci ve Serbest Yüzey Deformasyonlarının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

[58] Launder, B. E. ve Spalding, D. B., (1974). "The numerical computation of turbulent flows", Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 3 (2): 269–289.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Burak YILDIZ

Doğum Tarihi ve Yeri : 23/12/1987 İstanbul

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : yildizburak23@gmail.com, buraky@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Y. Lisans	Gemi İnş. ve Gemi Mak. Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lisans	Gemi İnş. ve Gemi Mak. Müh.	İstanbul Teknik Üniversitesi	2009
Lise	Fen Bilimleri	Üsküdar Lisesi	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2013-2014	Osaka Prefecture Üniversitesi	Misafir Araştırmacı
2010-…	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Makale

1. Yıldız, B., Çakıcı, F., Katayama, T. ve Yılmaz, H., (2016). "URANS Prediction of Roll Damping for a Ship Hull Section at Shallow Draft", Journal of Marine Science and Technology, 21 (1): 48-56.
2. Yıldız, B., Yılmaz, H., (2013). "Evaluation of IMO Second Generation Intact Stability Criteria", Journal of Maritime Transport and Engineering, 2(1): 89-94.

Bildiri

1. Yıldız, B., Yurtseven, A. ve Katayama, T., (2016). "Effect of Vortex Shedding and Free Surface Interaction on Roll Damping Due to Large Amplitude Roll", Proceedings of the 15th International Ship Stability Workshop, International Ship Stability Workshop, Stockholm, Sweeden, 13-15 June.
2. Kahramanoğlu, E., Yılmaz, H., ve Yıldız, B., (2015). "Comparative Stability Analysis of a Frigate According to the Different Navy Rules in Waves", Proceedings of the 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, Glasgow, Scotland, 14-19 June.
3. Çakıcı, F., Yıldız, B., ve Alkan, A. D., (2015). "Crew Comfort Investigation for Vertical and Lateral Responses of a Container Ship", Proceedings of the 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, Glasgow, Scotland, 14-19 June.
4. Katayama, T., Yıldız, B., ve Umeda, J., (2014). "Numerical Estimation and Validation of Shallow Draft Effect on Roll Damping", Proceedings of the 14th International Ship Stability Workshop, International Ship Stability Workshop, Kuala Lumpur, Malaysia, 29 September - 01 October.
5. Katayama, T., Umeda, J., ve Yıldız, B., (2014). "A Study on Bilge-keel Roll Damping Component for Shallow Draft", Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Nagazaki, Japan, 20-21 Nowember.
6. Katayama, T., Umeda, J., Hashimoto, H., ve Yıldız, B., (2013). "A Study on Roll Damping Estimation for Non Periodic Motion", Proceedings of the 13th International Ship Stability Workshop. International Ship Stability Workshop, Brest 23-26 September.