

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GEMİLERİN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ  
TAYİNİ İÇİN ÜÇ BOYUTLU HİDRO-ELASTİSİTE  
ANALİZİ**

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Yük. Müh. Levent KAYDIHAN

**FBE Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalında  
Hazırlanan**

**DOKTORA TEZİ**

**Tez Savunma Tarihi** : 24 Aralık 2009  
**Tez Danışmanı** : Prof. Dr. Mesut GÜNER, (YTÜ)  
**Jüri Üyeleri** : Prof. Dr. Ahmet ERGİN, (İTÜ)  
: Prof. Dr. Tamer YILMAZ, (YTÜ)  
: Prof. Dr. Şakir BAL, (İTÜ)  
: Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ, (YTÜ)

**İSTANBUL, 2009**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	v
KISALTIMA LİSTESİ .....	ix
ŞEKİL LİSTESİ .....	x
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xiv
ÖNSÖZ .....	xvi
ÖZET .....	xvii
ABSTRACT .....	xviii
1. GİRİŞ .....	1
1.1 Gemilerin Dinamik Davranışları .....	1
1.1.1 Rijit Cisim Hareketleri .....	2
1.1.2 Elastik Gemi Hareketleri .....	3
1.1.2.1 Global Gemi Titreşimleri .....	4
1.1.2.2 Yerel Gemi Titreşimleri .....	5
1.2 Akışkan Yapı Etkileşimi ve Gemilerin Hidro-Elastisitesi .....	5
1.2.1 2 Boyutlu Dilim Teori Hesaplamaları .....	7
1.2.2 Sınır Elemanlar Yöntemi ile Analizler .....	8
1.2.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Hidro-Elastik Analiz .....	10
1.3 Gemilerin Hidro-Elastik Analizleri .....	12
1.4 Literatür Araştırması .....	16
1.4.1 İki Boyutlu (2B) Hidro-Elastisite Teorileri .....	16
1.4.2 Üç Boyutlu Hidro-Elastisite Teorileri .....	18
1.5 Tez Çalışması .....	27
2. MATEMATİKSEL MODEL .....	31
2.1 Genelleştirilmiş Hareket Denklemi .....	31
2.2 Sınır Elemanlar Yöntemi ile Akışkan-Yapı Etkileşim Problemi .....	32
2.2.1 Genelleştirilmiş Akışkan-Yapı Etkileşim Kuvvetleri .....	35
2.2.2 Islak Frekans ve Mod Şekillerinin Hesaplanması .....	36
2.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Akışkan-Yapı Etkileşim Problemi .....	37
2.3.1 Akışkan Ortamı Modeli .....	37
2.3.2 Sınır Koşulları .....	38
2.3.3 Sonlu Elemanlar Formülasyonu .....	38
2.3.4 Öz-değer Hesabı .....	42
3. DENEYSEL ÇALIŞMA .....	45
3.1 Giriş .....	45
3.2 Deneysel Model .....	45

3.3	DeneySEL Ekipman ve Data Toplama/Analiz Sistemi.....	47
3.3.1	Uyarıcı Sistem .....	47
3.3.2	İvmeölçerler.....	49
3.3.3	Data Toplama/Analiz Sistemi.....	50
3.4	Deneyin Yapılışı .....	52
3.4.1	Silindir Kuru Hal Deneyi.....	52
3.4.2	Silindir Islak Hal Deneyleri.....	61
3.4.2.1	Silindirik Kabuğun Kendi Ağırlığı ile Yüzme Durumu .....	62
3.4.2.2	Silindirik Kabuğun Yarı Batırılmış Durumu .....	64
3.5	Tartışmalar.....	65
4.	SİLİNDİRİK KABUK HİDRO-ELASTİK HESAPLARI.....	66
4.1	Kuru Haldeki Analizler .....	68
4.2	Silindirik Kabuğun Yüzme Durumu Analizi (Su Çekimi = 121 mm).....	71
4.3	Silindirik Kabuğun Yüzme Durumu Analizi (Su Çekimi = 180 mm).....	76
4.4	Silindirik Kabuğun Tam Batmış Durumdaki Analizi.....	81
4.5	Yakınsaklık Analizleri.....	86
4.6	Tartışmalar.....	88
5.	BİR KONTEYNER GEMİSİNİN HİDRO-ELASTİK HESAPLAMALARI.....	90
5.1	Gemi Özellikleri ve Modelleme Aşamaları.....	90
5.2	Hidro-Elastik Analiz Sonuçları .....	96
5.3	Yakınsaklık Analizleri.....	99
5.4	Tartışmalar.....	101
6.	DÖKME YÜK GEMİSİ SERİSİNİN HİDRO-ELASTİK HESAPLAMALARI	102
6.1	Dökme Yük Gemileri .....	102
6.2	Gemiler ve Modelleme Aşamaları.....	103
6.2.1	20000 DWT Dökme Yük Gemisi .....	106
6.2.2	32000 DWT Dökme Yük Gemisi .....	110
6.2.3	53000 DWT Dökme Yük Gemisi .....	113
6.2.4	76000 DWT Dökme Yük Gemisi .....	117
6.2.5	140000 DWT Dökme Yük Gemisi .....	120
6.2.6	180000 DWT Dökme Yük Gemisi .....	124
6.3	Hidro-Elastik Analiz Sonuçları .....	127
6.3.1	20000 DWT Dökme Yük Gemisi Analiz Sonuçları.....	127
6.3.2	32000 DWT Dökme Yük Gemisi Analiz Sonuçları.....	131
6.3.3	53000 DWT Dökme Yük Gemisi Analiz Sonuçları.....	135
6.3.4	76000 DWT Dökme Yük Gemisi Analiz Sonuçları.....	139
6.3.5	140000 DWT Dökme Yük Gemisi Analiz Sonuçları.....	144
6.3.6	180000 DWT Dökme Yük Gemisi Analiz Sonuçları.....	148
6.4	Tartışmalar.....	152
7.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....	164
	KAYNAKLAR.....	168
	EKLER .....	176
	Ek 1 Gemilerin Genel Planları.....	177

Ek 2 Gemilerin Yükleme Durumları .....	184
ÖZGEÇMİŞ.....	195

## SİMGE LİSTESİ

$a$	Genelleştirilmiş kütle matrisi
$\mathbf{a}$	Genelleştirilmiş kütle matrisi
$A$	Genelleştirilmiş eksu kütle matrisi
$\mathbf{A}$	Genelleştirilmiş eksu kütle matrisi
$A_{rk}$	Genelleştirilmiş ek kütle
$b$	Genelleştirilmiş sönüm matrisi
$\mathbf{b}$	Genelleştirilmiş sönüm matrisi
$B$	Genelleştirilmiş hidrodinamik sönüm matrisi
$B$	Geminin genişliği
$\mathbf{B}$	Genelleştirilmiş hidrodinamik sönüm matrisi
$c$	Genelleştirilmiş katılık matrisi
$\mathbf{c}$	Genelleştirilmiş katılık matrisi
$C$	Genelleştirilmiş akışkan katılık matrisi
$\mathbf{C}$	Genelleştirilmiş akışkan katılık matrisi
$\mathbf{C}_v$	Yapısal sönüm matrisi
$C_s$	Yapı sönüm matrisi
$C_f$	Akışkan sönüm matrisi
$\mathbf{d}$	Şekil değiştirme modu
$D$	Geminin derinliği
$E$	Elastisite modülü
$E(t)$	Genelleştirilmiş dalga uyarıcı kuvvet vektörü
$\mathbf{F}(t)$	Genelleştirilmiş kuvvet vektörü
$f$	Frekans
$F$	Genelleştirilmiş kuvvet
$g$	Yerçekimi ivmesi
$G$	Green fonksiyonu
$h$	Anlık itme cevap matrisi
$H$	Frekans cevap matrisi
$I$	Atalet modülü
$\mathbf{K}$	Katılık matrisi
$\mathbf{K}_f$	Akışkan bulk modülü
$K_f$	Akışkanın katılık matrisi

$K_S$	Yapının katılık matrisi
$l$	Kiriş boyu
$L$	Geminin karakteristik boyu
$L$	Silindirin boyu
$m$	Silindir boyunca yarım dalga sayısı
$m_{fr}$	Frekans mertebesi
$\mathbf{M}$	Kütle matrisi
$M$	Analize dahil edilen mod şekli sayısı
$M_S$	Yapı kütle matrisi
$M_f$	Akışkan kütle matrisi
$n$	Silindirin etrafındaki çevresel tam dalga sayısını
$n$	Modal vektör sayısı
$\mathbf{n}$	Islak yüzey birim normal vektörü
$\mathbf{n}^-$	Akışkana doğru bakan normal vektörü
$\mathbf{n}$	Yapıya olan dışarı yöndeki normal vektörü
$N_{1D}$	Gemini birinci düşey eğilme modu frekansı
$N_{2D}$	Gemini ikinci düşey eğilme modu frekansı
$N_{3D}$	Gemini üçüncü düşey eğilme modu frekansı
$N_{4D}$	Gemini dördüncü düşey eğilme modu frekansı
$N_{1Y}$	Gemini birinci yatay eğilme modu frekansı
$N_{2Y}$	Gemini ikinci yatay eğilme modu frekansı
$N_{3Y}$	Gemini üçüncü yatay eğilme modu frekansı
$p$	Akışkan-yapı etkileşim yüzeyi üzerindeki basınçlar
$\mathbf{P}$	Dış kuvvetler matrisi
$P(t)$	Temel koordinat vektörü
$P_k$	Yapının $k$ 'inci modal titreşim şekli nedeni ile oluşan dinamik akışkan basınçları
$P_f^p$	Akışkan serbestlik derecesi $p^p$ için nodal sağ taraf terimi
$R$	Silindirik kabuğun yarıçapı
$S_w$	Islak yüzey alanı
$S_{im}$	İmaj sınır alanı
$S_{fp}$	Akışkan basınç $p$ değerinin tanımlandığı alanlar

$S_{fs}$	Akışkan-yapı etkileşim sınır koşullarının uygulandığı alanlar
$t$	Zaman
$t$	Silindirik kabuk kalınlığı
$\mathbf{t}$	Yapıya uygulanan yüzey traksiyon değeri
$T(x)$	Akışkan ile temasta bulunan yapı yüzeylerinde oluşabilecek etkileşimleri tanımlayan traksiyon terimi
$u_x$	Noktasal x yönü yer değiştirme
$u_y$	Noktasal y yönü yer değiştirme
$u_z$	Noktasal z yönü yer değiştirme
$u_{ni}$	$i$ 'inci panelin kontrol noktasında ve normal doğrultusu yönündeki yer değiştirmeler
$\mathbf{u}$	Yapının akışkan ile etkileşimli olduğu yüzeyin yer değiştirme vektörü
$\dot{\mathbf{u}}^f$	Akışkan partikülünün hızı
$\ddot{\mathbf{u}}^f$	Akışkan partikülünün ivmesi
$\mathbf{u}_r$	Vakumdaki $r$ 'inci modal yer değiştirme vektörü
$\mathbf{u}_j()$	Yapının vakumdaki esas mod şekillerini
$\mathbf{u}^s$	Yapının yer değiştirme vektörü
$\ddot{\mathbf{u}}^s$	Yapının herhangi bir noktasındaki ivme değeri
$\mathbf{U}$	Yapısal yer değiştirmeler
$\dot{\mathbf{U}}$	Yapısal hızlar
$\ddot{\mathbf{U}}$	Yapısal ivmeler
$W$	Kiriş toplam ağırlığı
$\mathbf{x}$	Akışkan partikülünün uzaydaki konumu
$\mathbf{v}$	Akışkan hız vektörü
$\bar{Z}_{rk}$	$k$ 'inci modal titreşim nedeni ile oluşan genelleştirilmiş akışkan-yapı etkileşim kuvvet genliğinin $r$ 'inci bileşeni
$\delta\mathbf{u}^s$	Varyasyonsal yer değiştirme alanı
$\delta\varepsilon$	Gerinim değişimi
$\delta p$	Rasgele seçilen varyasyonsal alan
$\Delta$	Geminin deplasmanı
$\varepsilon_j$	Rasgele dağıtılmış faz açısı
$\Xi$	Genelleştirilmiş kuvvetler

$\rho$	Yoğunluk
$\rho_f$	Akışkanın yoğunluğu
$\phi$	Katsayı
$\Phi$	Hız potansiyel fonksiyonu
$\phi_k$	Deformasyon potansiyeli
$\omega$	Frekans
$\omega_e$	Dalga karşılaşma frekansı
$\theta_x$	Noktasal x etrafı dönme
$\theta_y$	Noktasal y etrafı dönme
$\theta_z$	Noktasal z etrafı dönme
$\theta_i$	$i$ adet bağımsız değişkeni
$\sigma$	Kaynak şiddeti
$\sigma$	Yapı üzerindeki herhangi bir noktadaki gerilme
$\alpha_c$	Kütle orantılı sönüm faktörü
$\alpha_{ij}$	Etki katsayısı
$\gamma$	Hacimsel direnç
$\beta^N$	Gerinim interpolate edici terim



## KISALTMA LİSTESİ

2B	İki boyutlu
3B	Üç Boyutlu
ABS	Amerikan gemicilik klas kuruluşu
AC3D	Üç boyutlu abaqus yazılımı akustik elemanı
B31	Abaqus yazılımı giriş elemanı
BNC	Koaksiyel kablo bağlantı elemanı
C3D	Üç boyutlu abaqus yazılımı katı elemanı
DAA	Çift asimptotik yaklaşım
DWT	Geminin taşıma kapasitesi
FFT	Fast fourier transformasyonu
ISO	Uluslararası standardizasyon organizasyonu
İTÜ	İstanbul Teknik Üniversitesi
LNG	Sıvılaştırılmış doğal gaz
ROA	Transfer fonksiyonları
S4	Abaqus yazılımı kabuk elemanı
SWATH	Küçük su kesiti alanlı ikiz tekne
TEU	20 feet'lik bir konteyner

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Global gemi eksenleri.....	2
Şekil 1.2 Hidro-elastik titreşim analizi akış diyagramı.....	15
Şekil 2.1 Islak yüzey ve imaj sınır alanı.....	34
Şekil 3.1 Silindir deney modelinin genel görüntüsü.....	46
Şekil 3.2 Silindir deney modelinin kapak görüntüsü.....	47
Şekil 3.3 Bruel & Kjaer 8206-001 darbe çekici.....	48
Şekil 3.4 Bruel & Kjaer 4507 B Deltatron ivmeölçer.....	50
Şekil 3.5 Bruel & Kjaer 3560-B-040 data toplama sistemi.....	51
Şekil 3.6 Kuru haldeki deney düzeneğinin hazırlanma aşaması.....	52
Şekil 3.7 Uyarım ve ölçüm noktaları.....	53
Şekil 3.8 Deneyin yapım aşamasından bir görüntü.....	54
Şekil 3.9 Deneyin yapım aşamasından bir görüntü.....	54
Şekil 3.10 Nokta 1'den verilen uyarımın nokta 7'deki cevap fonksiyonu.....	55
Şekil 3.11 Nokta 2'den verilen uyarımın nokta 7'deki cevap fonksiyonu.....	55
Şekil 3.12 Nokta 3'den verilen uyarımın nokta 7'deki cevap fonksiyonu.....	56
Şekil 3.13 Nokta 4'den verilen uyarımın nokta 7'deki cevap fonksiyonu.....	56
Şekil 3.14 Nokta 5'den verilen uyarımın nokta 7'deki cevap fonksiyonu.....	57
Şekil 3.15 Nokta 6'dan verilen uyarımın nokta 7'deki cevap fonksiyonu.....	57
Şekil 3.16 Nokta 7'den verilen uyarımın nokta 7'deki cevap fonksiyonu.....	58
Şekil 3.17 Nokta 8'den verilen uyarımın nokta 7'deki cevap fonksiyonu.....	58
Şekil 3.18 Nokta 6'nın detaylı frekans cevap eğrisi.....	59
Şekil 3.19 Ölçüm yapılan kesitin mod şekilleri.....	60
Şekil 3.20 Modal ve yapısal analiz programı Me'scopeVES Arayüzü.....	60
Şekil 3.21 PULSE Lab/Shop yazılımı arayüzü.....	61
Şekil 3.22 Islak deney için ölçüm ve uyarım noktaları.....	62
Şekil 3.23 Islak deneyin yapım aşamasından bir görüntü.....	63
Şekil 3.24 Islak haldeki (121 mm) frekans cevap spektrumu.....	63
Şekil 3.25 Islak haldeki (180 mm) frekans cevap spektrumu.....	64
Şekil 4.1 Silindirik kabuk kuru hal sonlu elemanlar modeli.....	68
Şekil 4.2 Vakumdaki titreşim frekans ve şekilleri.....	69
Şekil 4.3 Vakumdaki titreşim frekans ve şekilleri.....	70
Şekil 4.4 Sonlu elemanlar ağı (Su Çekimi = 121 mm).....	71
Şekil 4.5 Sonlu elemanlar ağı (Su Çekimi = 121 mm).....	71

Şekil 4.6 Sonlu elemanlar ağı (Su Çekimi = 121 mm).....	72
Şekil 4.7 Su çekimi 121 mm yüzme durumu için analiz sonuçları .....	72
Şekil 4.8 Su çekimi 121 mm yüzme durumu için analiz sonuçları .....	73
Şekil 4.9 Su çekimi 121 mm yüzme durumu için analiz sonuçları .....	74
Şekil 4.10 Su çekimi 121 mm yüzme durumu için analiz sonuçları .....	75
Şekil 4.11 Sonlu elemanlar ağı (Su Çekimi = 180 mm).....	76
Şekil 4.12 Sonlu elemanlar ağı (Su Çekimi = 180 mm).....	76
Şekil 4.13 Sonlu elemanlar ağı (Su Çekimi = 180 mm).....	77
Şekil 4.14 Su çekimi 180 mm yüzme durumu için analiz sonuçları .....	77
Şekil 4.15 Su çekimi 180 mm yüzme durumu için analiz sonuçları .....	78
Şekil 4.16 Su çekimi 180 mm yüzme durumu için analiz sonuçları .....	79
Şekil 4.18 Sonlu elemanlar ağı (Tam batmış hal) .....	81
Şekil 4.19 Sonlu elemanlar ağı (Tam batmış hal) .....	81
Şekil 4.20 Sonlu elemanlar ağı (Tam batmış hal) .....	82
Şekil 4.21 Tam batmış durum için analiz sonuçları .....	82
Şekil 4.22 Tam batmış durum için analiz sonuçları .....	83
Şekil 4.23 Tam batmış durum için analiz sonuçları .....	84
Şekil 4.24 Tam batmış durum için analiz sonuçları .....	85
Şekil 5.1 1900 TEU kapasiteli konteyner gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)93	
Şekil 5.2 1900 TEU kapasiteli konteyner gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)94	
Şekil 5.3 1900 TEU kapasiteli konteyner gemisi sonlu elemanlar ağı.....	94
Şekil 5.4 1900 TEU kapasiteli konteyner gemisi sonlu elemanlar ağı.....	95
Şekil 5.5 1900 TEU kapasiteli konteyner gemisi sonlu elemanlar ağı (balast yüklemesi) .....	95
Şekil 5.6 Tam homojen yükleme için hidrodinamik paneller .....	96
Şekil 5.7 Titreşim mod şekilleri .....	97
Şekil 5.8 Titreşim mod şekilleri .....	98
Şekil 6.1 20000 DWT kuru dökme gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme) .....	107
Şekil 6.2 20000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme).....	108
Şekil 6.3 20000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı.....	108
Şekil 6.4 20000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı.....	109
Şekil 6.5 20000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (balast yüklemesi).....	109
Şekil 6.6 32000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme).....	111
Şekil 6.7 32000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme).....	111
Şekil 6.8 32000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı.....	112
Şekil 6.9 32000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı.....	112

Şekil 6.10 32000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (balast yüklemesi).....	113
Şekil 6.11 53000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)....	114
Şekil 6.12 53000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)....	115
Şekil 6.13 53000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı.....	115
Şekil 6.14 53000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı.....	116
Şekil 6.15 53000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (balast yüklemesi).....	116
Şekil 6.16 76000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)....	118
Şekil 6.17 76000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)....	118
Şekil 6.18 76000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı.....	119
Şekil 6.19 76000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı.....	119
Şekil 6.20 76000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (balast yüklemesi).....	120
Şekil 6.21 140000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)...	121
Şekil 6.22 140000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)...	122
Şekil 6.23 140000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı.....	122
Şekil 6.24 140000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı.....	123
Şekil 6.25 140000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (balast yüklemesi).....	123
Şekil 6.26 180000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)...	125
Şekil 6.27 180000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)...	125
Şekil 6.28 180000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı.....	126
Şekil 6.29 180000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı.....	126
Şekil 6.30 180000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (balast yüklemesi).....	127
Şekil 6.31 20000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	128
Şekil 6.32 20000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	129
Şekil 6.33 20000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	130
Şekil 6.34 20000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	131
Şekil 6.35 32000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	132
Şekil 6.36 32000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	133
Şekil 6.37 32000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	134
Şekil 6.38 32000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	135
Şekil 6.39 53000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	136
Şekil 6.40 53000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	137
Şekil 6.41 53000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	138
Şekil 6.42 53000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	139
Şekil 6.43 76000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	140
Şekil 6.44 76000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	141

Şekil 6.45 76000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	142
Şekil 6.46 76000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	143
Şekil 6.47 140000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	144
Şekil 6.48 140000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	145
Şekil 6.49 140000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	146
Şekil 6.50 140000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	147
Şekil 6.51 180000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	148
Şekil 6.52 180000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	149
Şekil 6.53 180000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	150
Şekil 6.54 180000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri .....	151
Şekil Ek 1.1 1900 TEU kapasiteli konteyner gemisi.....	177
Şekil Ek 1.2 20000 DWT dökme yük gemisi genel planı .....	178
Şekil Ek 1.3 32000 DWT dökme yük gemisi genel planı .....	179
Şekil Ek 1.4 53000 DWT dökme yük gemisi genel planı .....	180
Şekil Ek 1.5 76000 DWT dökme yük gemisi genel planı .....	181
Şekil Ek 1.6 140000 DWT dökme yük gemisi genel planı .....	182
Şekil Ek 1.7 180000 DWT dökme yük gemisi genel planı .....	183

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 Kuru halde ölçülen frekans değerleri .....	59
Çizelge 3.2 Islak halde ölçülen frekans değerleri (Su çekimi = 121 mm).....	62
Çizelge 3.3 Islak halde ölçülen frekans değerleri (Su çekimi = 180 mm).....	64
Çizelge 4.1 Vakumdaki titreşim frekanslarının deney ve analitik sonuçlarla karşılaştırması..	70
Çizelge 4.2 Su çekimi 121 mm yüzme durumunda sonuçların karşılaştırılması.....	75
Çizelge 4.3 Su çekimi 180 mm yüzme durumunda sonuçların karşılaştırılması.....	80
Çizelge 4.4 Tam batma durumu sonuçlarının deney ile karşılaştırılması.....	85
Çizelge 4.5 Yapısal elemanlar için yakınsaklık analizi eleman boyutları.....	86
Çizelge 4.6 Yapısal elemanlar için yakınsaklık analizi sonuçları .....	86
Çizelge 4.7 Akışkan elemanlar için yakınsaklık analizi eleman boyutları.....	87
Çizelge 4.8 Akışkan elemanlar için yakınsaklık analizi sonuçları .....	87
Çizelge 5.1 1900 TEU kapasiteli konteyner gemisi ana özellikleri .....	90
Çizelge 5.2 Yükleme koşulları ve gemi ile karşılaştırmaları.....	93
Çizelge 5.3 Tam homojen yükleme için analiz sonuçları.....	98
Çizelge 5.4 Balast yüklemesi için analiz sonuçları .....	99
Çizelge 5.5 Akışkan elemanlar için yakınsaklık analizi eleman boyutları.....	99
Çizelge 5.6 Akışkan elemanlar için yakınsaklık analizi sonuçları .....	100
Çizelge 5.7 Su hacim çapının yakınsaklık analizi sonuçları .....	101
Çizelge 6.1 Dökme yük gemilerinin sınıflandırılması (MAN, 2007) .....	103
Çizelge 6.2 20000 DWT dökme yük gemisi ana özellikleri.....	106
Çizelge 6.3 Yükleme koşulları ve gemi ile karşılaştırmaları.....	107
Çizelge 6.4 32000 DWT dökme yük gemisi ana özellikleri.....	110
Çizelge 6.5 Yükleme koşulları ve gemi ile karşılaştırmaları.....	110
Çizelge 6.6 53000 DWT dökme yük gemisi ana özellikleri.....	113
Çizelge 6.7 Yükleme koşulları ve gemi ile karşılaştırmaları.....	114
Çizelge 6.8 76000 DWT dökme yük gemisi ana özellikleri.....	117
Çizelge 6.9 Yükleme koşulları ve gemi ile karşılaştırmaları.....	117
Çizelge 6.10 140000 DWT dökme yük gemisi ana özellikleri.....	120
Çizelge 6.11 Yükleme koşulları ve gemi ile karşılaştırmaları .....	121
Çizelge 6.12 180000 DWT dökme yük gemisi ana özellikleri.....	124
Çizelge 6.13 Yükleme koşulları ve gemi ile karşılaştırmaları .....	124
Çizelge 6.14 20000 DWT dökme yük gemisi titreşim analizi sonuçları.....	131
Çizelge 6.15 32000 DWT dökme yük gemisi titreşim analizi sonuçları.....	135

Çizelge 6.16 53000 DWT dökme yük gemisi titreşim analizi sonuçları.....	139
Çizelge 6.17 76000 DWT dökme yük gemisi titreşim analizi sonuçları.....	143
Çizelge 6.18 140000 DWT dökme yük gemisi titreşim analizi sonuçları.....	147
Çizelge 6.19 180000 DWT dökme yük gemisi titreşim analizi sonuçları.....	151
Çizelge 6.20 Dökme yük gemilerinin teknik özellikleri.....	152
Çizelge 6.21 Gemilerin düşey eğilme modlarındaki <i>ıslak ve kuru</i> titreşim farkları.....	153
Çizelge 6.22 Gemilerin yatay eğilme modlarındaki <i>ıslak ve kuru</i> titreşim farkları .....	153
Çizelge 6.23 Gemilerin burulma modlarındaki <i>ıslak ve kuru</i> titreşim farkları .....	154
Çizelge 6.24 Gemilerin boylarına göre <i>ıslak</i> düşey eğilme frekansları.....	154
Çizelge 6.25 Gemilerin boylarına göre <i>ıslak</i> yatay eğilme frekansları .....	155
Çizelge 6.26 Gemilerin boylarına göre <i>ıslak</i> burulma frekansları.....	155
Çizelge 6.27 Gemilerin boylarına göre <i>ıslak</i> aksenal uzama frekansları .....	156
Çizelge 6.28 Gemilerin boylarına göre <i>ıslak</i> düşey eğilme frekansları.....	156
Çizelge 6.29 Gemilerin boylarına göre <i>ıslak</i> yatay eğilme frekansları .....	157
Çizelge 6.30 Gemilerin boylarına göre <i>ıslak</i> burulma frekansları.....	157
Çizelge 6.31 Gemilerin boylarına göre <i>ıslak</i> aksenal uzama frekansları .....	158
Çizelge 6.32 Gemileri düşey eğilme frekanslar için üstel eğriler (Tam homojen yükleme)..	160
Çizelge 6.33 Gemileri yatay eğilme frekanslar için üstel eğriler (Tam homojen yükleme) ..	160
Çizelge 6.34 Gemileri düşey eğilme frekanslar için üstel eğriler (Balast yüklemesi) .....	161
Çizelge 6.35 Gemileri yatay eğilme frekanslar için üstel eğriler (Balast yüklemesi).....	161
Çizelge Ek 2.1 1900 TEU kapasiteli konteyner gemisi tam homojen yükleme detayları .....	184
Çizelge Ek 2.2 1900 TEU kapasiteli konteyner gemisi balast yükleme detayları.....	185
Çizelge Ek 2.3 20000 DWT dökme yük gemisi tam homojen yükleme detayları .....	186
Çizelge Ek 2.4 20000 DWT dökme yük gemisi balast yükleme detayları.....	187
Çizelge Ek 2.5 32000 DWT dökme yük gemisi tam homojen yükleme detayları .....	188
Çizelge Ek 2.6 32000 DWT dökme yük gemisi balast yükleme detayları.....	188
Çizelge Ek 2.7 53000 DWT dökme yük gemisi tam homojen yükleme detayları .....	189
Çizelge Ek 2.8 53000 DWT dökme yük gemisi balast yükleme detayları.....	189
Çizelge Ek 2.9 76000 DWT dökme yük gemisi tam homojen yükleme detayları .....	190
Çizelge Ek 2.10 76000 DWT dökme yük gemisi balast yükleme detayları.....	191
Çizelge Ek 2.11 140000 DWT dökme yük gemisi tam homojen yükleme detayları .....	192
Çizelge Ek 2.12 140000 DWT dökme yük gemisi balast yükleme detayları.....	192
Çizelge Ek 2.13 180000 DWT dökme yük gemisi tam homojen yükleme detayları .....	193
Çizelge Ek 2.14 180000 DWT dökme yük gemisi balast yükleme detayları.....	194

## ÖNSÖZ

Gemilerin hidro-elastik davranışlarının önemini vurgulandığı bu çalışmada, akışkan-yapı etkileşimini inceleyen *hibrit* bir hidro-elastisite analiz yöntemi ve bir sonlu eleman hidro-elastisite analiz yöntemi incelenmiştir. Yöntemler, silindirik bir kabuk ve bir konteyner gemisi üzerinde karşılaştırıldıktan sonra bir dökme yük gemisi serisinin sonlu elemanlar ile hidro-elastisite analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda dökme yük gemilerinin dinamik karakteristiklerinin ön dizayn aşamasında tayini için kullanılacak grafikler çizilmiş ve formülasyonlar çıkarılmıştır.

Bu tez çalışmasında, akışkanlar ve gemi-pervane etkileşimi konularında yardımcı olup yol gösteren değerli danışmanım Prof. Dr. Mesut Güner, hocam Prof. Dr. Tamer Yılmaz ve Prof. Dr. Şakir Bal'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasında, hidro-elastisite ve gemi titreşimleri konusundaki deneyimlerini paylaşan ve yol gösterip her türlü yardımda bulunan değerli hocam sayın Prof. Dr. Ahmet Ergin'e teşekkürü bir borç bilirim.

Bana maddi manevi her türlü destekten hiç kaçınmayan ve bölüm müdürü olarak görev yaptığım Delta Denizcilik Mühendislik A.Ş. şirketi yönetim kurulu başkanı sayın Yük. Müh. Bülent Şener ve genel müdürümüz sayın Yük. Müh. Yaşar Gül'e desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezdeki deneysel çalışmalarda kullanılan silindirik kabuk modeli, detaylı ve hassas bir şekilde Delta Denizcilik Mühendislik A.Ş. tarafından imal edilmiştir. Modelin inşa aşamasındaki özeni ve yardımlarından dolayı sayın Timur Eriş'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezde kullanılan konteyner ve tüm dökme yük gemileri Delta Denizcilik Mühendislik A.Ş. tarafından son beş sene içerisinde Türk armatörleri için dizayn edilmiş gemilerdir. Gemilerin bazıları serviste, bazıları inşa aşamasında ve bazıları ise dizayn aşamasındadır. Şirket bünyesinde dizayn edilen bu gemilerin bu tezde kullanılmasına izin veren genel müdürümüz sayın Yük. Müh. Yaşar Gül'e desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında bana değerli katkıları bulunan sayın Serdar Köroğlu, Yrd. Doç. Dr. Bahadır Uğurlu, Yasin Uslu ve Delta Denizcilik Mühendislik A.Ş.'de görev yapan tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak anlayışı, sabrı ve teşvik edici tavrı ile bana çok yardımcı olan değerli eşim Sevil Kaydıhan'a da teşekkürü bir borç bilirim.



## ÖZET

Akışkan ile kısmen veya tamamen temasta olan elastik yapıların dinamik davranışlarının incelenmesi hidro-elastisitenin çalışma alanına girmektedir. Bu tezde hidro-elastisite teorisinin, gemi global titreşimlerinin hesabında nasıl uygulanacağı gösterilmiş ve bir dökme yük gemisi serisinin dinamik karakteristiklerinin (doğal titreşim frekansları, titreşim formları) ön dizayn aşamasında tayini için kullanılabilir grafikler çizilmiş ve formülasyonlar çıkarılmıştır.

Bu tezde, akışkan-yapı etkileşim kuvvetlerinin hesaplanması için iki farklı sayısal metod uygulanmıştır. Bunlar;

- Sınır elemanlar metodu (İTÜ Gemi inşaatı ve deniz bilimleri fakültesinde geliştirilen)
- Sonlu elemanlar metodu.

İlk grup sayısal çalışmada, bir denizaltı gövdesinin ölçekli bir modeli olan silindirik bir kabağın havada ve farklı su derinliklerindeki titreşim karakteristikleri incelenmiştir. Sınır elemanlar ve sonlu elemanlar metodları ile elde edilen sayısal değerler, yapılan deneysel ölçümler ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların iyi bir uyum içerisinde oldukları gözlemlenerek kullanılan metodların uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Hidro-elastik titreşim analizlerinde kullanılan üç boyutlu sınır elemanlar ve sonlu elemanlar metodları, 1900 TEU kapasiteli bir konteyner gemisine uygulanmıştır. Hesaplama sonuçlarında her iki yöntemin sonuçları tartışılıp birbirleri ile uyum içinde olduğu görülmüştür. Böylece bu iki yöntemin, etrafındaki akışkan ortamı ile etkileşimli bir şekilde yüzen elastik yapıların dinamik karakteristiklerinin incelenebilmesi için kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Sonlu elemanlar ile hidro-elastik analiz yöntemi, bir dökme yük gemisi serisine uygulanmıştır. Gemilerin *ıslak* frekansları ile *kuru* frekanslarının farkları grafikler şeklinde sunulmuştur ve gemi elastik yapısının dinamik karakteristiklerinin etrafındaki akışkan alanın atalet etkisi ile önemli bir şekilde değiştiği gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar tartışılmış ve yöntemin belli kısıtlar altında uygulanabilirliği gösterilmiştir. Dökme yük gemilerinin dinamik karakteristiklerinin ön dizayn aşamasında tayini için kullanılabilir grafikler çizilmiş ve formülasyonlar çıkarılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Hidro-elastisite, gemi titreşimleri, akışkan-yapı etkileşimi, sonlu elemanlar yöntemi, sınır elemanlar yöntemi, abaqus yazılımı, konteyner gemisi, dökme yük gemileri.

## ABSTRACT

### “A Three Dimensional Hydro-Elastic Analysis for Investigation the Dynamic Characteristics of Ships”

Investigation of the dynamic characteristic of partly or fully submerged structures with the interaction with surrounding fluid is in the working field of the hydro-elasticity. In this thesis, the application of the hydro-elasticity theory on the ship global vibration calculations is shown and graphics and formulations for investigation the dynamic characteristics of a series of bulk carrier ships in the preliminary design stage are obtained.

In this thesis, two different three dimensional hydro-elastic analysis methods for calculation the fluid-structure interaction forces are applied. These are;

- Boundary integral method, ( Developed in the İTU Naval architecture and ocean engineering faculty)
- Finite element method.

In first group of numerical studies, vibration characteristics of a cylindrical shell which is a scaled model of submarine hull are investigated in air and in water with different draughts. Numerical values that are obtained by boundary integral and finite element methods are compared with those experimental measurements which are performed as part of this thesis. It is observed that results are compared well between them and applicability of these two methods is shown.

These three dimensional boundary integral and finite element hydro-elastic analysis methods are applied to a 1900 TEU capacity container ship. Numerical results of the both methods are discussed and their compatibility is observed. Therefore, the applicability of these two methods for investigation the dynamic characteristics of the elastic floating structures with the interaction with surrounding fluid is shown.

The hydro-elastic analysis method by finite element method is applied to a series of bulk carrier ships. Differences between the *wetted* and *dry* frequencies of ships are presented by graphics and it is shown that the dynamic characteristics of ship elastic structure are significantly altered by inertial effects of the surrounding fluid domain. Obtained results are discussed and the applicability of the method under certain constraints is shown. Graphics and formulations for investigation the dynamic characteristics of bulk carrier ships in the preliminary design stage are obtained.

**Keywords:** Hydro-elasticity, ship vibrations, fluid-structure interaction, finite element method, boundary element method, abaqus software, container ship, bulk carrier ships.

## 1. GİRİŞ

### 1.1 Gemilerin Dinamik Davranışları

Gemiler, dalgalı veya sakin akışkan yüzeyinde ilerleyen yapılardır. Dalgalı denizlerde ilerleyen gemilerin elastik davranışlarının tayini, gemi yapısal hareketleri ve hidrodinamik kuvvetler arasındaki etkileşimler nedeni ile karmaşıktır. Gerçekte bütün gemi davranışları lineer olmayan bir karaktere sahiptir, ama lineer olmayan etkilerin göreceli olarak küçük olduğu birçok durumda lineer yaklaşımlar uygun sonuçlar vermektedir (Vorus,1988).

Gemilerin elastik dinamik davranışlarının incelenmesi için kurulacak matematik modellere, hem gemi yapısının kendisi, hem de etrafını çevreleyen akışkan ortamı dahil edilmelidir. Gemilerin yüzdüğü akışkan ortamının yoğunluğu, geminin yapıldığı ve mukavemet özelliklerini oluşturan malzemenin yoğunluğu ile mukayese edilebilir olması nedeni ile akışkan ortamın, gemi yapısının dinamik davranışları üzerinde önemli etkiler göstermesi beklenir.

Gemi yapıları, kullanılan çelik malzemesi ve konstrüksiyonları nedeni ile elastik yapılar olarak nitelendirilebilirler. Bununla birlikte, gemi dinamik davranışları açısından, akışkan içerisinde ilerleyen gemi yapıları hem bütünsel olarak hareket ederler, hem de yerel davranışlar gösterirler. 1950'lerde Korvin-Kroukovsky tarafından ortaya atılan bir yaklaşımda gemi dayanımı konusunda etki eden kuvvetlerin bulunması amacı ile gemi gövdesinin "Rijit Cisim" olarak kabul edilebilirliği ortaya konmuştur (Bishop ve Price 1991). Bu kabul, gemi dinamiğinde hareketlerin sınıflandırılması için bir kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. Bu kabulün kullanılması ile gemilerin dalgalı veya sakin akışkan ortamlarında ilerlerken gösterdiği dinamik davranışlar esas olarak ikiye ayrılabilir. Bunlar;

- Rijit cisim hareketleri
- Elastik gemi hareketleri

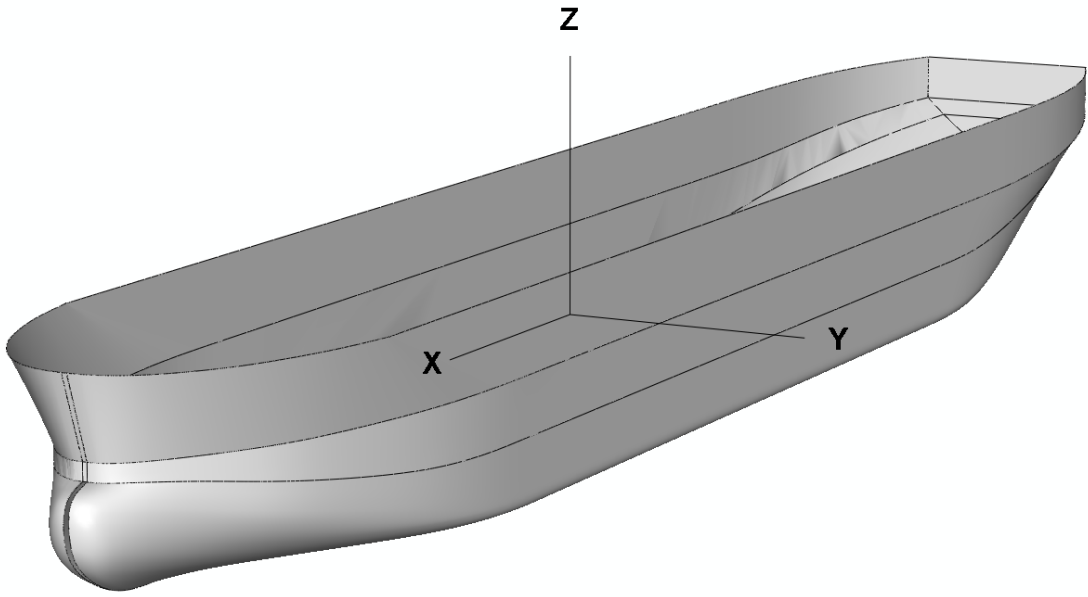
Gerçekte gemi, rijit cisim hareketleri yaparken aynı zamanda birçok elastik hareketi de birlikte yapabilir. Zaman içinde gemilerin boyları büyüdükçe ve malzeme kalitesindeki iyileşmeler nedeni ile birim hacimde kullanılan malzeme azaldıkça daha elastik gemi yapıları ortaya çıkmaktadır. Dolayısı ile rijit cisim hareketleri ile elastik gemi hareketleri arasında etkileşim olabilmektedir. Fakat hem sınıflandırmada ve gemi dinamik davranışlarını anlamada gösterdiği kolaylık hem de matematiksel modellerin kurulumundaki sağladığı avantaj nedeni ile gemi dinamik davranışlarının rijit cisim ve elastik gemi hareketleri olarak sınıflandırılması

uzun yıllardan beri kullanılan bir yöntemdir.

Gemi hidrodinamiği ana konusu altında, denizcilik (seakeeping), manevra, dinamik stabilite ve dinamik dalga yükleri gibi alt ana başlıkları sayılabilmektedir. Bu başlıklardan biri de gemilerin hidro-elastisitesidir. Bu tezde, gemilerin dinamik karakteristikleri (rezonans frekansları ve titreşim modları) hidro-elastik olarak incelenmiştir.

### 1.1.1 Rijit Cisim Hareketleri

Gemi, rijit bir cisim olarak düşünüldüğünde, altı serbestlik derecesine sahiptir ve bu serbestlik derecelerinde hareket eder. Bu hareketler Şekil 1.1’de görülen eksenler referans alınarak, x yönündeki öteleme, boy yönü öteleme, y yönündeki öteleme yanal öteleme, z yönündeki öteleme dalıp çıkma, x etrafında dönme yalpa, y etrafında dönme baş kış vurma ve z etrafında dönme hareketi savrulma olarak tanımlanır.



Şekil 1.1 Global gemi eksenleri

Rijit cisim dinamiğinde hareketler, kütle merkezi etrafındaki ötelemeler ve dönmeler olarak tanımlanır. Ayrıca gemi gövdesi, dinamik hareketleri sonucu oluşan akışkan kuvvetleri nedeni ile etrafındaki ortamdan izole bir sistem gibi alınamaz.

Rijit cisim kabulü ile gemi üzerine etki eden hidrodinamik basınçlar, geminin ıslak yüzeyi üzerinde integre edilir ve tüm sistemdeki kuvvetler, geminin ağırlık merkezinde üç ana ekseninde (boy, yan, düşey) etki eden kuvvetlere ve momentlere indirgenir. Bu hidrodinamik

kuvvetler, gemi ıslak yüzeyine etki eden basınç bileşenleri veya teğetsel yönde etki eden sürtünme veya kesme kuvvetlerinden oluşmaktadır (McGoldrick, 1960).

Geminin rijit cisim olarak kabul edilmesi ile elde edilen hareketler, teorik esasları aynı olsa da geleneksel olarak titreşim problemi olarak adlandırılmazlar ve genel olarak manevra ve denizcilik analizlerinin bir konusu olarak düşünülmektedir.

### 1.1.2 Elastik Gemi Hareketleri

Gemi yapıları dinamik yüklemeye maruz kaldıklarında (dalga kuvvetleri, pervane kuvvetleri vb.) uyarılan rijit cisim hareketlerine ek olarak elastik olarak da tepki verirler. Bu davranışlar o gemi yapısının doğal titreşim modlarındaki cevapları şeklinde ifade edilebilir. Bu hareketler bütün tekne boyunca veya yerel olarak görülebilir. Bu tezde de gemilerin elastik dinamik davranışları ve periyodik hareketleri incelendiği için bu hareketler titreşim olarak adlandırılabilirler.

Global tekne titreşimleri, vakumda bulunan serbest-serbest bir kirişin göstereceği hareketlere benzeştirilebilir ve dolayısı ile kiriş-tipi (beamlike) titreşimler olarak adlandırılırlar. Geminin içerisinde bulunduğu akışkan ortamı her ne kadar gemi titreşimleri üzerinde etkili rol oynasa da global titreşimlerinin kiriş-tipi karakteristiğini değiştirmezler.

Büyük gemilerin global gemi titreşim frekansları, küçük gemilerin frekanslarından daha küçüktür. Deniz ortamı ise göreceli olarak düşük frekanslı uyarıcı kaynak olarak kabul edildiğinden, rezonans olayının meydana gelebilmesi büyük gemilerde, küçük gemilere oranla daha muhtemeldir. Büyük gemiler bütünsel rijit cisim hareketlerinin yanı sıra elastik davranışlar da sergilerler (Bishop ve Price 1991).

Gemileri titreşime sokabilecek uyarıcı kuvvetler esas olarak ikiye ayrılabilir. Bunlar;

- Sürekli uyarıcı kuvvetler: Geminin sevk sisteminden ve ana makinesinden gelen ve gemi yolculuğu boyunca belli frekanslarda sürekli olarak gemi bünyesini uyarıcı kuvvetlerdir. Ticari gemiler hayatlarının büyük bir kısmını seferlerde geçirdikleri için bu tür sürekli kuvvetler gemi dayanımı, bünyesel yorulma ve yolcu ve ekip konforu açısından çok önemlidir ve detaylı incelenmeleri gerekmektedir. Yapısal hasarlara yol açabilecek, yolcu ve mürettebat konforunu bozabilecek ve ekipmanların performansları ile bir girişim yaratabilecek sürekli titreşimlerin kaynaklarının en önemlileri, dengelenmemiş periyodik ana makine kuvvetleri ve şaft ve pervane kuvvetleri olarak bilinirler. Bu titreşimler ve genlikleri uyarıcı kaynaklardaki

iyileştirmeler ile azaltılabilirler. Ana makinenin dengelenmemiş kuvvetlerinin azaltılması için makine dizaynı iyileştirilebilir, silindir sayısı değiştirilebilir veya günümüz makinelerinde kullanılan, ayarlanabilir karşı-ağırlıklar veya moment dengeleyici ek ekipmanlar kullanılabilir. Pervaneden gelen kuvvetlerin azaltılması için ise, pervane dengelenmemiş ağırlıkları minimuma indirilebilir, pervane hidrodinamik dizaynı ve pervanenin içinde çalışacağı gemi arkası iz dağılımı iyileştirilebilir ve gemi kızı ve pervane arasındaki açıklık optimize edilebilir

- Sürekli olmayan uyarıcı kuvvetler: Genel olarak denizden gelen uyarıcı kuvvet frekansları düşüktür ve uygulanma süreleri sürekli kuvvetlere oranla daha azdır. Geminin dalgalı denizdeki dövünmesinden ve dalgalardan gelen yükler bu kuvvetler içerisinde sayılabilir. Gemi bünyesi, kendisine harici kuvvetler uygulandığında titreşmeye başlayacaktır. Bu tür kuvvetler hem geminin rijit cisim hareketlerini hem de elastik titreşim hareketlerini tetiklerler.

Gemi yapıları üzerinde görülebilecek titreşimler esas olarak ikiye ayrılabilir (Todd,1961). Bunlar;

- Global gemi titreşimleri
- Yerel gemi titreşimleri

#### **1.1.2.1 Global Gemi Titreşimleri**

Gemi gövdesinin, dalga kuvvetleri, dövünme kuvvetleri, sevk sistemi kuvvetleri, ana makine kuvvetleri vb. gibi etkenler nedeni ile bütün olarak hareket ettiği titreşimlerdir. Geminin sevk sisteminden (pervanelerden) ve ana makinesinden gelen uyarımlar gemi yolculuğu boyunca sürekli olarak uygulandığı için gemi titreşimlerinin önemli kaynakları olarak bilinirler. Bu uyarımlar birçok şekilde meydana gelebilir. Bunlar, gemi bünyesine şaft yoluyla iletilen itme ve moment değişimlerinin sebep olduğu dinamik kuvvetlerin uyarımı ve pervanenin gemi yapısı üzerinde oluşturduğu değişken basınç alanının uyarımlarıdır.

Ana ve yardımcı makineler, içerilerindeki yanma aşamasında oluşan kuvvetlerin ve ayrıca dönen kütlelerin ve karşılıklı ilerleyen pistonların atalet etkileri nedeni ile kendi temelleri üzerinden gemi yapısına dinamik kuvvetler aktarırlar.

Bu dinamik uyarım kuvvetleri sonucunda, gemi bünyesinin kiriş-tipi titreşimleri uyarılabilmektedir. Sevk sisteminden gelen uyarıcı kuvvetlerin frekansları, şaftın dönüş

frekansı, pervane kanat frekansı ve bunların harmonikleri olabilmektedir. Ana makinenin bünyeye ilettiği dengelenmemiş kuvvetlerin oluşturduğu uyarımlar ise düşük devirli dizel makineler için, en fazla birinci ve ikinci derece shaft frekanslarında etkili olmaktadır.

Gemi yapısının global titreşim modları genel olarak aşağıdaki şekillerde olmaktadır (Bishop ve Price, 1979);

- Düşey eğilme titreşimleri,
- Yatay eğilme titreşimleri,
- Burulma titreşimleri,
- Gemi eksenel uzama titreşimleri,
- Etkileşimli eğilmeli burulma titreşimleri.

#### **1.1.2.2 Yerel Gemi Titreşimleri**

Gemi üst yapıları, güverte evleri, büyük sevk sistemleri, paneller, tulaniler, perdeler, platformlar veya makine temelleri üzerinde görülen titreşimlerdir. Ana yerel yapı olarak sayılabilecek gemi üst yapıları, güverte evleri ve büyük sevk sistemleri geminin global olarak gösterdiği titreşim karakteristiği üzerinde etkisi olabilecek bileşenlerdir ve analizlere dahil edilmelidir. Bu yerel yapılarda görülen titreşimler, yapıların kendi içerisindeki titreşimlerden veya yerel yapıların ana yapıya bağlantısına göre gösterdiği bütünsel titreşimlerden oluşabilmektedir. Bu tür titreşimler gemi yapısal entegrasyonu için tehlikeli olmasa da yolcu ve mürettebat konforu için önemli olabilmektedir.

Yerel titreşimler göreceli olarak global titreşimlerden daha yüksek frekans değerlerine sahiptir. Örnek verecek olursak, 180 metre boyunda 1900 TEU kapasiteli bir konteyner gemisinin global frekansları tam yüklü halde 1 Hz ile 2.5 Hz arasında olduğu görülürken (Ergin, Kaydıhan ve Uğurlu, 2007a; 2007b), üst binanın bütünsel titreşim modları 7.5 Hz ile 9.5 Hz arasında elde edilmiştir. Ayrıca üst bina içerisindeki güvertelerin yerel panel titreşim modlarının ise 22 Hz civarında başladığı görülmüştür.

## **1.2 Akışkan Yapı Etkileşimi ve Gemilerin Hidro-Elastisitesi**

Gemilerin aşırı titreşim barındırmadan seferlerini sürdürebilmesi, gemi yapısal entegrasyonu ve yolcu/mürettebat konforu için çok önemlidir ve dizayn aşamasında incelenmesi gereklidir.

Gemi gibi su ve hava ile etkileşimli bir durumda yüzen yapılar, bünyelerinde bulunan makinelerin, pervanelerin veya denizden gelen dalga kuvvetlerinin vb. etkileri ile titreşime zorlanabilirler.

Akışkan ile kısmen temasta olan yapıların etrafındaki akışkan ile etkileşimli olarak titreşim karakteristikleri ve davranışlarının hesaplanabilmesi, dizayn aşamasında gemi titreşimlerinin bulunması açısından çok önemlidir. Akışkan ile kısmen temasta olan yapıların doğal titreşim frekansları, *kuru* olarak tanımlanan vakumdaki doğal titreşim frekanslarından farklıdır. Bunun nedeni, yapı üzerine etkiyen akışkan-yapı etkileşim kuvvetleridir. Elastik veya rijit gemi titreşimleri gemi etrafındaki akışkana hareket vererek basınç alanını değiştirmekte ve buna karşılık ıslak gemi yüzeyine akışkan-yapı etkileşim kuvvetleri etkilenmektedir. Bu nedenle gemi titreşim problemleri, bir akışkan-yapı etkileşim problemi olup, bu yapıyı çevreleyen akışkanın etkisinin göz önüne alınarak titreşim probleminin çözülebilmesi için akışkan alanını tanımlayan denklemlerin de yapısal denklemler ile birlikte çözülmesi gerekmektedir.

Gemi hidrodinamiği problemlerinin karmaşıklığı, bazı basitleştirici kabullerin benimsenmesine yol açmıştır (Bishop ve Price, 1991). Yapısal ve hidrodinamik analizler genellikle ayrı olarak gerçekleştirilmişlerdir. Dalga nedenli rijit gemi hareketleri denizcilik konusu içerisinde etraflıca incelenmiştir. Dalga nedenli iç kuvvetler ve geminin yapısal davranışları incelenecekse, tüm akışkan kuvvetlerinin önceden hesaplanmış olduğu kabul edilir. Örnek olarak denizcilik teorisi verilebilir. Bu basitleştirici kabul, iki durum için tartışılabilir. Birincisi, eğer geminin elastik doğal frekansları, dalga yükleri spektrumu içinde ise yapı sürekli global elastik titreşimlere maruz kalabilir ki yaylanma (springing) olarak bilinir. İkinci olarak eğer gemi dövünme yüklerine maruz kalırsa geçici dövünme titreşimleri (whipping) oluşabilir. Dolayısı ile akışkan nedenli yapısal etkilerin doğru hesaplanabilmesi için yapı-akışkan etkileşimleri göz ardı edilmemelidir.

Gemi gibi elastik yapıların hareketleri, rijit cisim hareketleri ve elastik genelleştirilmiş modlardaki hareketlerin bileşimi olarak tanımlanırsa, birçok akışkan yapı etkileşim problemi, tekil genelleştirilmiş yaklaşım ile analiz edilebilir. Bu yaklaşım, Bishop ve Price (1979) tarafından, konvansiyonel gemilerin dalgalara karşı cevabının incelenmesi amacı ile rijit cisim hareketleri ve elastik titreşimlerinin birleşik analizi için başarılı bir şekilde kullanılmıştır.

Gemi girişinin simetrik ve/veya anti simetrik hareketlerinin ana lineer denklemi aşağıdaki formda verilebilir (Bishop, Price, 1979).

$$(a + A)\ddot{p}(t) + (b + B)\dot{p}(t) + (c + C)p(t) = \Xi \quad (1.1)$$



Burada,  $p = [p_0, p_1, p_2, \dots, p_N]^T$  incelemeye dahil edilecek rijit ve elastik titreşim modları için genelleştirilmiş koordinatlardır.  $a$ ,  $b$  ve  $c$  sırasıyla *kuru* yapının genelleştirilmiş kütle, sönüm ve katılık matrisleridir.  $A$ ,  $B$  ve  $C$  ise sırasıyla genelleştirilmiş hidrodinamik atalet, sönüm ve akışkan katılık matrisleridir.  $\Xi$  ise dış yükler için genelleştirilmiş kuvvetleri tarif etmektedir.

Bishop ve Price (1979) tarafından verilen bu hidro-elastisite teorisi aynı zamanda birleşik dilim-kiriş (strip-beam) teorisi olarak da bilinir. Akışkan hareketleri dilim teori (strip teori) ile tanımlanır (Gerritsma ve Bukkerman 1964; Salvesen, Tuck ve Faltinsen, 1970) ve genelleştirilmiş modlar, rijit cisim hareketlerinden ve vakumda titreşen değişken kesitli Timoshenko kirişi ile temsil edilmiş gemi yapısının *kuru* titreşim modlarından oluşmaktadır.

Zaman içerisinde bu iki boyutlu teorinin kısıtlamaları nedeni ile üç boyutlu teorilere doğru gidilmiştir. Üç boyutlu hidro-elastisite metotlarında, akışkan içerisinde titreşen ve ilerleyen elastik yapıların etrafındaki akışkan hareketinin tanımlanması için ara-yüzey sınır koşulları gerekmektedir. Price ve Wu (1985) elastik deniz yapılarındaki denizcilik problemleri için klasik kinematik rijit cisim sınır şartının (Timman ve Newman, 1962) ara-yüzey sınır şartı olarak genelleştirildiği lineer potansiyel akış teorisi sunmuşlardır. Price ve Wu (1985) ve Bishop, Price ve Wu (1986) tarafından geliştirilen bu üç boyutlu hidro-elastisite teorisinde, lineer bir sonlu elemanlar yaklaşımı ile üç boyutlu *kuru* yapının vakumdaki dinamik davranışları hesaplanmış, yapının hareketleri ve ilgili akışkan etkileri ise yüzen elastik yapılar etrafındaki üç boyutlu potansiyel akış teorisi ile hesaplanmıştır.

Gemilerin dinamik karakteristiklerinin hesabında, etrafındaki akışkan ile olan akışkan-yapı etkileşimini hesaplayabilmek için kullanılan bazı yöntemler aşağıda verilmiştir.

- 2 boyutlu dilim teori hesaplamaları,
- Sınır elemanlar yöntemi ile analizler,
- Sonlu elemanlar yöntemi ile analizler.

### 1.2.1 2 Boyutlu Dilim Teori Hesaplamaları

Gemi hidrodinamiğindeki ana gelişmelerden biri olarak kabul edilen çalışma Lewis (1929) tarafından, gemi bünyesinin yapısal titreşim modlarındaki eksu kütle değerlerinin bulunması ile ilgili yapılmıştır. Bu çalışmada karakteristik frekans değerinin yeterli derecede büyük olduğu kabul edilip, atalet etkilerinin baskın olduğu ve yer çekimi etkilerinin ihmal edilebileceği kabul edilmiştir. Böylece, dalga etkileri göz ardı edilip analiz basitleştirilmiştir.

Lewis (1929), gemi yapısının narin olduğu kabulünü yaparak, dilim teori yaklaşımını kullanmıştır. Bu yaklaşımda, gemi bünyesinin her bir enine kesitinin iki boyutlu karakteristikleri cinsinden hidrodinamik kuvvetler gemi boyunca integre edilir. Bu yaklaşım, dilim teorisinin gemi hidrodinamiğindeki ilk uygulaması olarak bilinmektedir (Newman,1978). Geliştirilen bu yaklaşım ile gemi benzeri kesitlerdeki eksu kütle ve sönüm katsayıları hesaplanabilmektedir.

Lewis (1929), konformal transformasyon yöntemi ile birim yarıçaplı yarı-daire benzetimi kullanarak, sonsuz derinlikteki suda batmış gemi benzeri kesitlere sahip olan sonsuz uzunluktaki bir seri silindirin düşey salınım halindeki eksu kütle katsayılarının, serbest yüzey etkisi göz ardı edilerek hesabı için bir yöntem geliştirdi.

Landwaber (1957), Lewis en kesitlerini kullanarak birçok teorik çalışma gerçekleştirip hem düşey yöndeki hem de yatay yöndeki eksu kütle katsayılarını geliştirdi. Ayrıca Kumai (1958), yine Lewis en kesitlerini kullanarak burulma (torsional) yöndeki eksu kütle katsayılarını hesaplamıştır.

Gemi titreşimleri açısından, 2 boyutlu dilim teori yöntemi kullanılarak, yapının düşey, yatay ve burulma titreşimleri durumlarında, geminin birim boyuna göre eksu kütle katsayıları, gemi en kesiti benzeri kesitler için bulunmuş eksu kütle katsayıları arasından okunarak belirlenen kesit sayısında hesap yapılır. Daha sonra bu değerler gemi boyunca integre edilerek toplam eksu kütle değerleri elde edilir. Bu katsayılar, batmış kısmın toplam alana oranına, kesitin genişlik ve derinlik değerlerine ve kesitin geometrisine bağlıdır. Bu yöntem ile geminin birinci düşey ve yatay eğilme ve burulma modları için yaklaşık sonuçlar elde edilebilmektedir.

### **1.2.2 Sınır Elemanlar Yöntemi ile Analizler**

İki boyutlu hidro-elastik teorilerin getirmiş olduğu sınırlamaların üstesinden gelebilmek ve giriş yaklaşımına uymayan elastik yapıların da davranışını inceleyebilmek amacı ile genel üç boyutlu lineer bir hidro-elastisite teorisi Wu (1984), Price ve Wu (1985) ve Bishop, Price ve Wu (1986) tarafından geliştirilmiştir. Üç boyutlu hidro-elastisite metotlarında, akışkan içerisinde titreşen ve ilerleyen elastik yapıların etrafındaki akışkan hareketinin tanımlanması için ara-yüzey sınır koşulları gerekmektedir. Price ve Wu (1985) elastik deniz yapılarındaki denizcilik problemleri için klasik kinematik rijit cisim sınır şartının (Timman ve Newman, 1962) ara-yüzey sınır şartı olarak genelleştirildiği lineer potansiyel akış teorisi sunmuşlardır. Price ve Wu (1985) ve Bishop, Price ve Wu (1986) tarafından geliştirilen bu üç boyutlu hidro-

elastisite teorisinde, lineer bir sonlu elemanlar yaklaşımı ile üç boyutlu kuru yapının vakumdaki dinamik davranışları hesaplanmış ve ıslak yapının hareketleri ve ilgili akışkan etkileri, yüzen elastik yapılar etrafındaki üç boyutlu potansiyel akış teorisi ile hesaplanmıştır.

Genelleştirilmiş hareket denklemi denklem (1.1)'e benzer formdadır. Akışkanın ideal ve hareketinin çevrimsiz olduğu kabulü ile genelleştirilmiş hidrodinamik atalet, sönüm ve akışkan katılık matrisleri olan  $A, B$  ve  $C$ , potansiyel akışın ıslak yüzey üzerindeki çözümünün integralleri olarak tanımlanmıştır. Tekilliklerin şiddetleri, ıslak yüzey boyunca ara-yüzey sınır şartının uygulanması ile çözülmüştür.

Bu 3B hidro-elastisite teorisi birçok akışkan-yapı etkileşim problemine uygulanmıştır. Bunlar arasında, rasgele dalgalar ile uyarılmış rasgele şekilli elastik yapılar, baştan veya omuzluktan gelen dalgalar arasında ilerleyen elastik yapıların dövünmesi ve su altı patlamalardaki zamana bağlı geçici yüklemelerin bulunması sayılabilir. Bütün bu durumlarda 3B hidro-elastisite teorisi, akışkan-yapı etkileşiminin fiziğinin tanımlanmasındaki kabiliyetini kanıtlamıştır.

Bu tezde detaylı incelenecek teorilerden bir tanesi de gemilerin akışkan-yapı etkileşim problemi üzerine Ergin ve Temarel (2002) tarafından yapılan çalışmadır. Bu çalışmada akışkan-yapı etkileşiminin tanımlanması için bir sınır elemanlar yöntemi sunulmuştur. Sınır integral denklemleri metodu olarak da bilinen bu metot akışkan içeren veya akışkan içerisinde bulunan yapıların dinamik karakteristiklerinin incelenmesi için geliştirilmiş bir metottur. Sınır integral denklemleri metodu, serbest yüzey sınır şartının uygun bir şekilde uygulanabilmesi için imaj metodu ile birlikte kullanılması ile elde edilmiştir. Akışkan ideal, viskoz olmayan, sıkıştırılmaz ve hareketinin çevrimsiz olduğu kabul edilmiştir. Akışkan kuvvetleri akışkanın atalet etkileri ile ilişkilendirilmiş ve ıslak yüzeydeki akışkan basınçları yapısal ivmelerle aynı fazda olduğu kabul edilmiştir. Yapının kuru haldeki titreşimleri sonlu elemanlar veya analitik yöntemler ile hesaplanabilir ve yapının su içerisinde de kuru haldeki titreşim şekillerinde titreştiği kabul edilip yapının ıslak yüzeyinde her bir titreşim modu için bir yüzey basınç dağılımı hesaplanır. Bu akışkan-yapı etkileşimleri genelleştirilmiş eksu kütle katsayısı cinsinden bulunur. Bu metot ile bulunan ıslak titreşim frekansları deney sonuçları ve analitik çözümler ile gayet güzel uyum içindedir.

Bu yöntem, gemi yapısının vakumdaki dinamik analizi için lineer bir sonlu elemanlar yöntemi kullanılması ve akışkan-yapı etkileşimi için ise yukarıda detayları verilen sınır elemanlar yöntemi kullanılması nedeni ile *hibrit* bir yöntem olarak da isimlendirilebilir.

### 1.2.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Hidro-Elastik Analiz

Gemi yapısının vakumdaki dinamik analizi için lineer sonlu elemanlar yöntemi ve akışkan-yapı etkileşimi için ise sınır elemanlar yöntemi kullanılması ile oluşturulan *hibrit* yöntemin uygulanması ile yapılan araştırmalarda, hesaplanan akışkan-yapı etkileşiminin yapının dinamik davranışı üzerindeki etkilerinin analitik yöntemler ile elde edilen sonuçlar ve deney sonuçları ile gayet güzel uyumluluk içinde olduğu görülmüştür (Bishop,1986; Ergin, Price, Randall ve Temarel (1992); Ergin ve Temarel, 2002).

Yapıların akışkan ile etkileşimi dinamik davranışlarının hesabında, lineer sınır elemanlar yerine lineer üç boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak da akışkan-yapı etkileşim kuvvetleri hesaplanabilmektedir.

Akışkan alanının üç boyutlu lineer sonlu elemanlar ile ve yapının da üç boyutlu lineer kabuk elemanlar ile birleşik olarak modellenmesi, eş zamanlı akışkan-yapı analizinin yapılmasına olanak sağlar.

Zienkiewicz, Irons ve Nath (1965) sonlu elemanlar yöntemini ilk olarak eksu kütlelerini bulmak amaçlı kullanmışlardır. Daha sonra Zienkiewicz ve Newton (1969) akışkan-yapı etkileşim probleminin genel bir uygulamasını sunmuşlardır. Su yüzeyi dalgalarını hesaba katan serbest su yüzeyi sınır koşulunu ve ayrıca radyasyon sınır koşullarını da formülasyona eklemişlerdir. Gemi eksu kütlesi ve sönüm hesabı, kararlı durum problemi olarak kabul edildiğinde, bu her iki sınır şartı da gerekli olmaktadır. Yazarlar ayrıca akışkanın sıkıştırılabilirlik özelliğini de formülasyona ekleyip, gemi eksu kütlesi açısından gemi rijit cisim hareketleri frekanslarında etkisi olduğunu göstermişlerdir. Uyguladıkları gemi örneklerinde yüzey dalgaları hesaba katılmamıştır.

Zienkiewicz ve Newton (1969) tarafından uygulanan yöntemde, yapı lineer kabuk elemanlar ile tanımlanır ve akışkan alanı ise sadece dinamik basınç serbestlik derecesi bulunan 3 boyutlu lineer akışkan elemanları ile tanımlanır. Bu yöntem Armand vd. (1978) tarafından 122000 kübik metre hacimli bir LNG tankerine pervane nedenli gemi titreşimlerinin hesabı için uygulanmış olup, sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Özellikle gemi kıç bölgesinde yapılmış olan deney sonuçları ile hesap sonuçlarının gayet uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Chenault (1970), sonlu elemanlar yöntemini, frekansa bağlı eksu kütlesi ve sönüm değerlerinin hesabı için ilk kullanan araştırmacıdır. Sonsuz derinlikte su hacminin modellenmesi için seçilen akışkan hacmi boyutları ile iki gemi formu için sonuçları elde

etmiştir.

Bai (1972), yüzey dalgalarını da içeren bir takım problemleri incelemek için sonlu elemanları kullanmıştır. Çalışmaları arasında, iki boyutta eksu kütlesi ve sönüm katsayıları hesabı ve üç boyutta aksi simetrik bir teknenin dalıp çıkma hareketi problemi bulunmaktadır. Hem analitik hem de sayısal sonuçları, radyasyon sınır şartının konumlandırılması için karşılaştırmalı olarak vermiştir.

Son 10–20 senelik süre zarfında bilgisayar teknolojilerindeki gelişme ile paralel olarak gelişen Abaqus, Ansys, Nastran gibi genel amaçlı sonlu elemanlar yazılımları büyük sonlu elemanlar ağlarının çözümü için kullanılır hale gelmiştir. Bu yazılımların önemlilerinden bir tanesi olan Abaqus 6.8 (2008) yazılımı içerisinde, teorisi Zienkiewicz ve Newton (1969)'un tarafından sunulan dinamik basınç serbestlik dereceli akışkan elemanından alınan ve bu tür akışkan-yapı etkileşim problemlerinde kullanılmak üzere bulunan bir akışkan elemanı mevcuttur. Genel olarak, Abaqus yazılımı içerisindeki akışkan elemanının sonlu elemanlar formülasyonunda, akustik-yapı etkileşimi, akışkan ve yapının yer değiştirmelerinin eşitlenmesi ile elde edilir. Dolayısı ile titreşim hareketi nedeni ile yapısal elemanlar üzerinde oluşan atalet etkileri, akışkan elemanı üzerine aktarılır. Böylece yapının ve akışkanın sonlu elemanlar ağı birbiri ile etkileşimli olarak çözülür.

Bu akışkan elemanı sayesinde, yapının sonlu elemanlar modeli direk olarak etrafındaki akışkan ile birlikte modellenerek analiz edilmekte ve akışkan ile etkileşimli dinamik hareketlerde bulunan yapıların hidro-elastik titreşim frekans ve şekilleri elde edilebilmektedir. Ayrıca istenildiği takdirde zorlanmış titreşim analizleri de yapılabilmektedir. Abaqus 6.8 (2008) yazılımı içerisindeki bu elemana serbest yüzey sınır şartı olarak basınç şartı girilebilmektedir. Bu elemanın sadece basınç serbestlik derecesine sahip olması nedeni ile akışkan serbest yüzeyindeki yer değiştirmeler hesaplanamamaktadır. Dolayısı ile titreşim hareketleri nedeni ile oluşan serbest yüzey dalgaları ihmal edilmektedir. Ayrıca dalgalı bir akışkan serbest yüzeyi de sınır şartı olarak girilememektedir.

Bu yöntemle elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlar, analitik sonuçlar ve sınır elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile gayet güzel bir uyum içerisinde ve ikinci ve daha yüksek dereceden gemi global kiriş titreşimleri içinde kullanılabilir. Bu yöntemle elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlar, analitik sonuçlar ve sınır elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile gayet güzel bir uyum içerisinde ve ikinci ve daha yüksek dereceden gemi global kiriş titreşimleri içinde kullanılabilir.

Ergin, Kaydihan ve Uğurlu (2007a; 2007b) tarafından yapılan bir çalışmada, Ergin ve Temarel (2002) tarafından yapılan çalışmayı baz alan bir 3B lineer hidro-elastisite metodu 1900 TEU taşıma kapasiteli bir konteyner gemisinin akışkan-yapı etkileşim problemine

uygulanmıştır. *Islak* rezonans frekansları ve mod şekilleri geminin tam yüklü ve balast yükleme koşulları için incelenmiştir. Hesaplanan *ıslak* titreşim frekans ve modları, sonlu elemanlar ile yapılan hidro-elastisite analizi (Abaqus) ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve gayet iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Gemi yapısı ve etrafını çevreleyen akışkan alanı, sırayla yapısal ve akışkan sonlu elemanlar ile ayrıklaştırılmıştır.

### 1.3 Gemilerin Hidro-Elastik Analizleri

Gemiler, konstrüksiyon olarak karmaşık yapılardır. Tüm gemi yapısının sonlu elemanlar ile ayrıklaştırma aşamasında birçok basitleştirici kabul uygulanabilmektedir. Gemi ana taşıyıcı yapısının sonlu elemanlar modeline dahil edilmesi ana modelleme gereksinimlerinden en önemlisidir. Global gemi titreşim analizi için ana sevk sistemi ve üst binaları da içeren üç boyutlu bir sonlu elemanlar modelinin oluşturulması gerekmektedir.

Gemi yapısının elastik ve atalet özelliklerini mümkün olduğunca gerçeğe yakın bir şekilde modele yansıtılabilmek için kontrol edilebilir limitler çerçevesinde makul sayıda sonlu eleman ve nokta sayısı seçilmelidir. Titreşim analizi için kurulan modellerde eleman boyutu olarak, kış ve üst bina hariç, stifner arası mesafenin veya posta arası mesafesinin üç veya dört katı kadar büyüklükte elemanlar seçilebilir. Eğilme özelliği olan kabuk eleman ve kiriş sonlu elemanlarının seçilmesi yapının katılığının daha doğru tanımlanabilmesi için uygundur. Ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gereken alanlarda ise daha detaylı eleman ağı kullanılabilir.

Ana makine ve temelleri modele dahil edilmelidir. Makine, katılığı ve ağırlık merkezi makinenin üreticisi tarafından verilen özellikler ile uyacak şekilde, katı sonlu elemanlar kullanılarak modellenebilir. Makinenin üst bağlantıları eğer varsa modele dahil edilmelidir. Ayrıca pervane shaftı da uygun katılık derecesini verecek şekilde kiriş elemanlar ile modellenebilir.

Geminin boş gemi (lightship) ağırlık dağılımı titreşim analizinde önemli bir etkidir ve gerçeğe uygun bir şekilde elde edilmelidir. Gemi yapısında bulunan bütün ekipmanlar modele, geminin gerçek ağırlık merkezini verecek şekilde kütle elemanlar ile eklenmelidir. Ayrıca üst binanın da kütle dağılımı gerçeğe uygun yapılmalıdır.

Gemide bulunan balast veya yakıt tankı gibi sıvı ağırlıklar da kütle elemanı ile modele dahil edilmelidir.

Geminin titreşim karakteristikleri gerçek yükleme durumlarında analiz edilmelidir. Bu yükleme durumlarından iki tanesi üzerinde durulabilir. Bunlar;

- Tam yüklü durum,
- Balast durumu.

Bu iki yükleme koşulu, geminin limit yükleme koşullarıdır ve gemi titreşimleri açısından bir aralık vermektedir. Eğer gemi üzerinde titreşim deneyi yapılması söz konusu ise deniz testinin yapılacağı yükleme koşulu özel olarak çözdürülebilir. Yükleme koşuluna bağlı olarak modele eklenecek yükler kütle olarak tanımlanıp modelin ilgili noktalarına dağıtılmalıdır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile hidro-elastik titreşim analiz yapılması durumunda, su hacminin sonlu elemanlar ağı oluşturulur ve model ıslak olarak çözdürülerek, *ıslak* frekanslar ve mod şekilleri elde edilir.

Hidro-elastik yöntem olarak sınır elemanlar yöntemi izlenirse, ilk önce modelin kuru titreşim modları hesaplanır. Islak elemanların frekansa bağlı titreşim hızı değerleri sınır eleman hidro-elastisite kodunda girdi olarak kullanılır ve *ıslak* titreşim modlarına ve şekilleri hesaplanır.

Zorlanmış analiz denilen frekans tepki analizi, yapının düzgün periyodik uyarımlara olan tepkisini incelemek amacı ile yapılmaktadır. Gemi yapısı ana makine sisteminden ve pervanelerden gelen periyodik uyarımlara maruz kalmaktadır.

Pervaneden gelen kuvvetler arasında bulunan pervane shaft kuvvetleri, pervanenin içinde çalıştığı iz nedeni ile oluşan değişken yük etkileri nedeni ile oluşur. Genel olarak boy yönündeki itme değişimleri ortalama itmenin %2'si ile %8'i arasındadır. En ve düşey yönündeki kuvvet değişimleri ise ortalama itmenin %1'i veya %2'si değerindedir. Enine eksen etrafındaki moment değişimleri ise ortalama momentin %5'i ile %20'si arasındadır ve düşey eksen etrafındaki moment değişimi ise ortalama momentin %1'i ile %10'u arasındadır (ABS, 2006).

Pervaneden gelen kuvvetler arasında en önemlisi pervane nedenli tekne yüzey basınç değişimleridir. Ticari gemilerde pervane optimizasyonu için kavitasyona bir dereceye kadar izin verilir. Pervane nedenli oluşan titreşimlerin yaklaşık %10'u yukarıda verilen yatak kuvvetleri nedeni ile geri kalan %90'ı ise tekne kış formu üzerinde oluşan pervane nedenli basınç değişimlerinden oluşur (ABS, 2006). Tekne üzerinde oluşan basınç değişimlerinin bulunabilmesi için birkaç yöntem vardır. Bunlar; Holden vd. (1980) tarafından 72 geminin tam ölçekli deneyleri sonucunda elde edilmiş verilerden oluşturulan ampirik formül, kaldırıcı çizgi, kaldırıcı yüzey veya vorteks ızgara yöntemi ile yapılan hesaplamalar (Güner vd., 2006; Güner vd., 1999; Bal ve Güner, 2009), sonlu hacimler yöntemi ile yapılan hesaplamalı

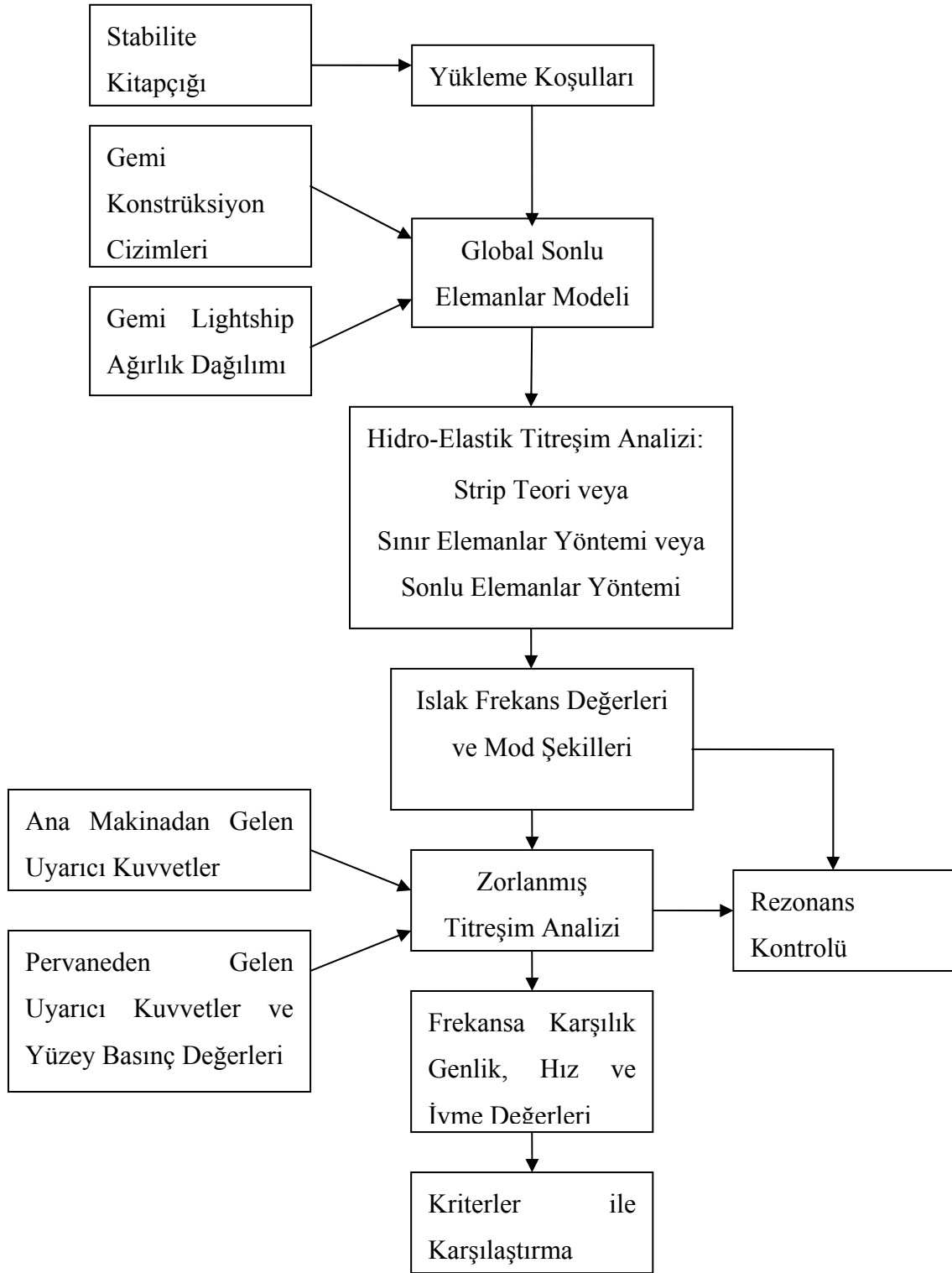
akışkanlar dinamiği hesapları ve deneysel ölçümlerdir.

Düşük devirli dizel makinelerin, temelleri üzerinden gemiye ilettiği uyarıcı kuvvet ve momentler, gemi titreşimlerinin diğer önemli kaynaklarından biridir. Makine üzerindeki etkin kuvvetler, yanma işlemi sırasında ortaya çıkan kuvvetler ve hareketli kütlelerin dengelenmemiş ataletsel kuvvetleridir. Bu kuvvetler nedeni ile boy ekseni ve yatay eksen etrafında moment yaratabilecek ve makine üzerinde burulma momenti oluşturabilecek kuvvet çiftleri oluşabilmektedir.

Ayrıca, ana makine ve pervaneden gelen uyarıcı kuvvetlerin modele uygulanması ile belli frekans aralıklarında yapılan zorlanmış titreşim analizi sonucunda ise gemi modeli üzerindeki düğüm noktalarında frekansa bağlı yer değiştirme, hız ve ivme değerleri elde edilebilir. Bu değerler ilgili kriterler (ISO 6954) ile karşılaştırılarak elde edilen titreşim değerlerinin limitlerin altında olup olmadığı kontrol edilebilir.

Şekil 1.2’de üç boyutlu tam gemi sonlu elemanlar modelinin hidro-elastik titreşim analizinde izlenen adımları gösteren genel bir akış diyagramı verilmiştir.





Şekil 1.2 Hidro-elastik titreşim analizi akış diyagramı.

## 1.4 Literatür Araştırması

### 1.4.1 İki Boyutlu (2B) Hidro-Elastisite Teorileri

1950'lerin sonu ile 1970'lerin başı arasında denizcilik problemleri için geliştirilen dilim teorileri (Korvin-Kroukovsky ve Jacobs, 1957; Salvesen vd., 1970), elastik gemi yapıları üzerinde oluşan hidrodinamik kuvvetlerin bulunması için etkili bir araç olmuştur. Böylece gemi yapılarının simetrik ve antisimetrik hareketlerinin tayini için iki boyutlu hidro-elastisite teorilerinin kurulmasında ana adımlardan biri olmuştur (Betts vd., 1977; Bishop ve Price, 1977, 1979).

Özetle, mevcut 2B teoriler gemi yapısını düzenli olmayan bir Timoshenko kirişi olarak kabul etmişlerdir. Dalga uyarılarına yapının verdiği tepkisel cevapları, kirişin vakumdaki temel modlarındaki hareketlerin toplamı olarak ifade etmişleridir. Gemi üzerindeki hidrodinamik kuvvetlerini dilim teori aracılığı ile tanımlamışlardır. Akışkan-yapı etkileşim problemi aşağıdaki formda verilen genelleştirilmiş hareket denklemi ile çözülmüştür;

$$(\mathbf{a} + \mathbf{A})\ddot{p}(t) + (\mathbf{b} + \mathbf{B})\dot{p}(t) + (\mathbf{c} + \mathbf{C})p(t) = \mathbf{E}(t) \quad (1.2)$$

Bu denklemde,  $p$  temel koordinat vektörü;  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  ve  $\mathbf{c}$  sırasıyla *kuru* yapının genelleştirilmiş kütle, sönüm ve katılık matrisleridir.  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  ve  $\mathbf{C}$  ise sırasıyla genelleştirilmiş hidrodinamik atalet, sönüm ve akışkan katılık matrisleridir. Burada  $\mathbf{E}$  ise genelleştirilmiş dalga uyarıcı kuvvet vektörüdür. Bu denklemin modal süper-pozisyon teoremi ile birlikte esas koordinatlarda çözümü, yapının her kesitindeki dinamik yer değiştirmeleri, ivme ve hız değerlerini, eğilme momentlerini ve kesme kuvvetlerini v.s vermektedir.

Bazı basitleştirici kabuller çerçevesinde Bishop vd. (1978) ve Belik (1980), bu frekans alanındaki analizi, baştan gelen düzensiz dalgalar içerisinde ilerleyen elastik gemi yapılarının dövünme etkilerini de kapsayacak şekilde olan cevabının, zamana bağlı simülasyonları için genişletmiştir. Bununla ilişkili temel koordinatlar aşağıdaki formda hesaplanabilir.

$$p(t) = \sum_j \sqrt{2S(\omega_{ej})} \Delta\omega_{ej} \mathbf{H}(\omega_{ej}) \mathbf{E}(\omega_{ej}) e^{i(\omega_{ej} + \varepsilon_j)t} + \int_0^t \mathbf{h}(\tau) \mathbf{F}(t - \tau) d\tau \quad (1.3)$$

Burada,  $S(\omega_{ej})$ , karşılaşma dalga frekansı olan  $\omega_{ej}$ 'nin fonksiyonu olan dalga spektrumudur.  $\mathbf{H}$ , denklem (1.2) deki frekans cevap matrisi,  $\mathbf{E}(\omega_{ej})$  birim genlikteki düzenli bir dalganın yarattığı genelleştirilmiş dalga uyarıcı kuvveti,  $\varepsilon_j$  rasgele dağıtılmış faz açısı,  $\mathbf{h}$  impuls tepki fonksiyonu ve  $\mathbf{H}$  nin Fourier transformasyonudur. Genelleştirilmiş kuvvet  $\mathbf{F}$  ise dövünme

darbe kuvvetini ve momentumunu modeller.

Bu yaklaşım, firkateynlerin dalga ve dövünme nedenli olan yapısal cevaplarının bulunmasında Belik vd. (1980) tarafından kullanılmıştır ve tam-ölçekli test sonuçları (Clark, 1968) ile uyum içinde olduğu görülmüştür. Bu teori temel alınarak, Dong vd. (1989) ve Dong ve Lin (1992) sığ su-çekimli tam gemi formlarının, dalga uyarımlı titreşim ve eğilme moment değerlerini incelemiş ve deneysel sonuçlara yaklaşımlarını göstermiştir. Aksu vd. (1991a) balast yüklemesindeki bir geminin dalgalar arasındaki dinamik davranışını incelemiştir. Bishop vd. (1991) Derbyshire petrol/kuru yük gemisinin kaybedilmesindeki nedenleri araştırıp benzer altı geminin kaybindan da bulunan benzer bulguları incelemiştir. Lin (1995) ise hesaplama ve test ile büyük petrol gemilerinde dalga nedenli yaylanma olayının varlığını ortaya koymuştur. Zhong vd. (1995) büyük gemiler için dalga nedenli gemi yapı titreşimlerinin rezonans frekanslarını hesabı için bir yöntem geliştirmiştir. Bishop ve Price (1979) tarafından geliştirilen gemilerin hidro-elastisite teorisine göre, Zhong ve Zhao (1998) dalga boyunun ve gemi ilerleme hızının doğal frekanslar ve dalga nedenli davranışlar üzerindeki etkilerini incelemiştir.

Temel 2B teori ayrıca Bishop vd. (1980) tarafından, anti simetrik dalga nedenli yalpa, baş-kıç vurma, rota sapma, yatay eğilme ve burulma davranışlarının da bulunabilmesi için geliştirilmiştir. Price ve Temarel (1982), Pedersen (1983) ve Wang vd. (1999) bir konteyner gemisinin çarpılma deformasyonlarını hesaba katabilmek için yatay eğilme ve burulma davranışlarını incelemişlerdir. Pedersen (1983) açık ve kapalı kesitli gemi yapıları arasındaki süreksizlik ilişkilerini çıkarmış ve bu ilişkilerin doğal frekans değerlerinin doğru hesabı için gerekli olduğunu göstermiştir.

Wu vd. (1991) narin gemi formları için bir hidro-elastisite teorisini, Newman (1978,1986) tarafından verilen birleşik teoriyi geliştirerek, gemi yapısındaki şekil değiştirmeleri de dahil etmiştir. Birleşik teori ile gemi boyunca kesitsel hidrodinamik kuvvet dağılımının daha iyi bulunabilmesi nedeni ile narin form teorisi yapısal dinamik davranışların hesabı açısından daha iyi bir değerlendirme imkanı sağlamıştır. Wang vd. (1991) ve Che vd. (1992, 1994) çok büyük yüzen yapıların (VLFS) ve küçük su kesit alanlı ikiz teknelerin (SWATH) dalgalar arasındaki hidro-elastik davranışlarının bulunması için gelişmiş bir hidro-elastisite teorisi sundular. Bu çalışmada, batmış ana yapısal elemanların hidrodinamik etkileşimi için enine kesitlerin düzlem içindeki elastik şekil değiştirmelerini esas alan yeni bir dilim teorisi geliştirilmiştir. Bilinen sonlu elemanlar yöntemi ise 3B gemi yapısının kuru dinamik analizi için kullanılmıştır. 3B sonlu elemanlar yöntemi kullanıldığı için bireysel elemanların kuvvet

ve gerilme gibi yapısal sonuçları direk olarak irdelenebilmektedir.

Faltinsen ve Zhao (1991) tarafından geliştirilmiş, yüksek hızlı tekneler için dilim teoriyi baz alan Hermundstad vd. (1999), yüksek süratli teknelerin lineer hidro-elastik analizini yapmıştır. Çift tekneli geminin tekneleri arasındaki hidrodinamik etkileşim simetri şartları kullanılarak uygun bir şekilde hesaba katılmıştır. Genel mod şekillerinin hesabı için gerekli hidrodinamik kuvvetlerin bulunmasında, integral teoreminin nasıl kullanılacağı gösterilmiştir.

Bereznitski (2001) dövünme probleminde hidro-elastisitenin, ne kadar büyük bir rol oynadığını hesaplarla gösterdi. Darbe zamanının kuru yapının ilk titreşim frekansının periyoduna oranının, yapısal davranışın belirlenmesinde hidro-elastik etkilerin dahil edilip edilmeyeceği kararına vermede anahtar rol üstlendiğini gösterilmiştir.

Liu vd. (2001) iki boyutlu su akışı içerisinde yüzen büyük yapıların düzenli dalgalar arasındaki elastik şekil değiştirme ve demirleme kuvvetlerinin tayini için deneysel çalışmalar gerçekleştirdi. Çalışmanın amacı kalınlık ve model boyunu değiştirerek, hidro-elastik etkilerin demirleme kuvvetleri üzerindeki etkisini incelemektir.

Tek tekneli gemiler için Jensen ve Mansour (2002,2003) dövünme ve güverte üzerine su çullanması gibi darbe etkilerinin, eğilme momenti değeri üzerindeki etkisinin yarı analitik bir yaklaşımla çözülmesi için bir prosedür geliştirdi.

#### 1.4.2 Üç Boyutlu Hidro-Elastisite Teorileri

İki boyutlu hidro-elastik teorilerin getirmiş olduğu sınırlamaların üstesinden gelebilmek ve kiriş şekilli olmayan elastik yapıların da davranışını inceleyebilmek amacı ile genel üç boyutlu lineer bir hidro-elastisite teorisi Wu (1984), Price ve Wu (1985) ve Bishop vd. (1986) tarafından geliştirilmiştir. Lineer bir sonlu elemanlar yaklaşımı, üç boyutlu kuru yapının vakumdaki dinamik davranışının tayinin için kullanılmıştır. Islak yapının hareketleri ve ilgili akışkan etkileri, yüzen elastik yapıları etrafındaki üç boyutlu potansiyel akış teorisi ile hesaplanmıştır.

Genelleştirilmiş hareket denklemi, denklem (1.2)'ye benzer formdadır. Fakat denklem katsayıları farklı bir şekilde hesaplanmaktadır. Akışkanın ideal ve hareketinin çevrimsiz olduğu kabulü ile genelleştirilmiş hidrodinamik atalet, sönüm ve akışkan katılık matrisleri olan  $A, B$  ve  $C$ , genelleştirilmiş dalga uyarım kuvveti  $E$  ile birlikte, potansiyel akışın ıslak yüzey üzerindeki çözümünün integralleri olarak tanımlanmıştır. Tekilliklerin şiddetleri, ıslak yüzey boyunca ara-yüzey sınır şartının uygulanması ile çözülmüştür. Bu bağlamda Xia ve Wu

(1993) akışkan-yapı etkileşim problemlerindeki ara-yüzey sınır şartının, tekne formu üzerindeki gerinim tensörü alanını hesaba katan genel bir formunu sunmuşlardır. Gerinim tensör alanı sıfıra eşit olunca form, rijit cisimler için Timman-Newman ilişkisinin basitleştirilmiş halini alır. Eğer elastik yapıların ıslak yüzeyinde etki eden teğetsel dış kuvvetler yoksa problem elastik cisimler için genelleştirilmiş Timman-Newman ilişkisine indirgenir (Wu, 1984; Price ve Wu, 1985).

Bu 3B hidro-elastisite teorisi birçok akışkan-yapı etkileşim problemine uygulanmıştır. Bunlar arasında, rasgele dalgalar ile uyarılmış rasgele şekilli elastik yapılar, baştan veya omuzluktan gelen dalgalar arasında ilerleyen elastik yapıların dövünmesi ve su altı patlamalardaki zamana bağlı geçici yüklemelere maruz yapılar sayılabilir. Bütün bu durumlarda 3B hidro-elastisite teorisi, akışkan-yapı etkileşiminin fiziğinin tanımlanmasındaki kabiliyetini kanıtlamış oldu.

Price ve Price (1985), Fu vd. (1987), Lundgren vd. (1988), Wu ve Du (1990), Aksu vd. (1991a), Kean vd. (1991), Ergin vd. (1992), Louarn vd. (1997), Wang vd. (2001), Phan ve Temarel (2002), Li vd. (2002) ve Fu vd. (2003) bu teoriyi farklı birçok yüzen yapıya uyguladılar. Price ve Wu (1989) teoriyi, viskoz sürtünme kuvvetleri için Morison tarzı yaklaşım baz alınarak, akışkan viskoz sönüm efektlerini teoriye eklemişlerdir. Aksu (1993) baştan ve çaprazdan gelen düzensiz dalgalardaki dövünme davranışının zaman alanında simülasyonu için teoriyi geliştirmiştir. Dövünmeye maruz kalan narin teknelerin iki ve üç boyutlu hidro-elastisite teorilerinden hesaplanan cevapların karşılaştırılması ile iyi bir uyum elde edilmiştir (Aksu vd. 1991b).

Denizde ilerleyen yüzen yapıların üç boyutlu hidro-elastik davranışlarını frekans alanında analiz eden bir metot Du (1996) tarafından sunulmuştur. Bu metot, Wu (1984), Price ve Wu (1985) tarafından genel lineer hidro-elastisite teorisinde verilmiş bütün terimleri sayısal analizlerde de kullanılmıştır. Böylece, ilerleyerek yüzen yapıların narinliği ve ilerleme hızları ile ilgili aşırı katı sınırlamalar olmadan, frekans alanındaki hidro-elastik analizleri daha kesin bir şekilde yapılabilmektedir.

Wang (1996), Wang ve Wu (1998) elastik deniz yapıları ve etrafındaki akış alanı arasındaki ara-yüz için Price ve Wu (1985) durumunu kullanarak, dalgalar arasında ilerleyen elastik yapılar etrafındaki 3B potansiyel akışın sınır integral denklemleri ile zaman alanındaki çözümünü elde etmiştir. Zamana bağlı problem için lineerleştirilmiş serbest yüzey şartını sağlayan Green fonksiyonu kullanılmıştır. Gemilerin yapısal davranışları, hareketleri ve oluşan yükleri sabit bir ileri hızda zaman alanında hesaplayan bir hidro-elastisite yaklaşımı

formüle edilmiştir.

Bir kabuk teorisini ve 3B akışkan sınır eleman metodunu baz alan Zhang vd. (1996) su içinde titreşen gemilerin akışkan-yapı etkileşiminin, 3B modeli için kuru model tekniğini kullanmıştır. Benzer şekilde, Suo ve Guo (1996) mevcut 3B hidro-elastisite teorisini su içinde ilerleyen ve dönen cisimlere uygulamıştır. Teorinin pervane kanatlarındaki uygulaması anlatılmıştır.

Liu ve Sakai (2000,2002) elastik yüzen yapıların hidro-elastik davranışının analizi için zaman alanında sayısal bir metot geliştirmiştir. Akışkan hareketinin analizi için sınır elemanlar yöntemi ve yapının elastik davranışı için sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Dinamik dalga-yapı etkileşiminin simülasyonu, her zaman adımında dalga yaratıcı bir sınır şartının tayin edilmesi ve akışkan-yapı ara-yüzünde basınç ve yer değiştirme sürekliliğinin sağlanması ile elde edilmiştir. Sayısal sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Ergin, Price, Randall ve Temarel (1992), vakumda ve serbest su yüzeyinin altında belli pozisyonlarda batmış bir şekilde titreşen elastik bir silindirin, dinamik karakteristiklerinin (rezonans frekansları ve mod şekilleri) teorik sonuçları ile deneysel sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Deneysel silindir, hem serbest yüzeye yakın hem de uzak birkaç pozisyonda test edilmiştir. Rezonans frekans sonuçları, batma pozisyonun, serbest yüzey etkisinin ve rijit sınırların etkisini göstermiştir. Bu makalede deneysel sonuçlar hem analitik hem de sayısal metotların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Analitik yöntem olarak Arnold ve Warburton (1953), Warburton (1961) tarafından verilen analitik denklemler, vakumdaki doğal frekansların ve su içindeki rezonans frekanslarının ve mod şekillerinin bulunması için çözülmüştür. Sayısal olarak kullanılan yöntem, kuru haldeki dinamik karakteristiklerin bulunması ve ayrı bir hidro-elastik analiz yapılması ile elde edilmiştir. Silindirin kuru haldeki titreşim karakteristikleri NASTRAN sonlu elemanlar yazılımı yardımı ile hesaplanmıştır. Islak analiz kısmında ise, elastik yapı üzerindeki akışkan etkileri dış yükleme olarak kabul edilmiştir. Islak yüzey panellere ayrılmıştır ve üç boyutlu hız potansiyel alanı uygulanmıştır. Paneller merkezlerinde sabit şiddetle titreşen kaynaklar bulundurulur. Bishop vd. (1986) tarafından ortaya konulan bu teoride serbest su yüzeyi etkileri, sonlu ve sonsuz akışkan derinlik etkilerini de içermektedir. Bu analiz ile eksu kütleleri, sönüm akışkan katılık kuvvet katsayıları bulunabilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçların analitik sonuçlar ile gayet uyum içinde olduğu görülmüştür. Hidro-elastik sayısal analiz yöntemi ile bulunan sonuçların deneysel sonuçlar ile yeterli yakınlık gösterdiği görülmüştür. Oluşan farkları daha detaylı modeller kurularak azaltılabileceği sonucuna varılmıştır. Çalışma

göstermiştir ki bu teori denizaltı gibi yapılara ve gemi benzeri yapılara başarı ile uygulanabilir.

Ergin (1997), tam batmış elastik silindirik yapıların davranışlarını, çift asimptotik yaklaşım (doubly asymptotic approximation, DAA) yardımı ile teorik olarak hesaplayan bir metot sunmuştur ve sonuçları deneyler ile karşılaştırmıştır. Bu DAA yöntemi ile basınçlar, yapının yüzey hareketleri cinsinden ifade edilebilmektedir. Bu metot ile anlık kuvvetle uyarılan sonlu boydaki silindirik yapıların ivme, hız ve yer değiştirme gibi davranışları bulunabilmektedir. Elde edilen sonuçların deneyler ile uyum içinde olduğu görülmüştür.

Ergin (1997), kısmen dolu ve batmış yatay silindirik kabukların titreşim karakteristiğini incelemek için analitik bir metot sunmuştur. Amabili ve Dalpiaz (1995), Amabili (1996) kısmen dolu silindirlerin dinamik davranışını analitik ve deneysel olarak incelemiş olup, Amabili (1997) bu titreşim davranışlarını kısmen dolu ve batmış bir durumda incelemiştir. Bu makalede ince silindirik kabuğun titreşimi için Love kabuk teorisi kullanılmıştır. Akışkan ise ideal, viskoz olmayan ve hareketinin çevrimsiz olduğu kabul edilip, akışkan basınçlarının ıslak yüzeydeki yapısal basınçlar ile aynı fazda olduğu kabul edilmiştir. Akışkan hız potansiyel fonksiyonu serbest yüzey için uygun sınır koşullarını sağlamamak ile birlikte ıslak kabuk yüzeyindeki kinematik sınır şartını sağlamaktadır. Akışkan-yapı etkileşimi Rayleigh-Ritz metodu ile çözümlenmiş, doğal frekanslar ve mod şekilleri hesaplanmış ve deneyler ile uyumluluk içinde olduğu görülmüştür.

Ergin ve Temarel (2002) ve Ergin ve Uğurlu (2000) kısmen dolu ve/veya batmış yatay silindirik kabukların doğal frekansları ve mod şekilleri gibi dinamik karakteristiklerini incelemek için bir sınır eleman-sonlu eleman sayısal metodu sunmuşlardır. Çalışmada akışkan ideal kabul edilip, akışkan kuvvetleri atalet kuvvetleri ile ilişkilendirilmiştir. Yapının ıslak yüzeyi üzerindeki akışkan basıncının yapının ivmeleri ile aynı fazda olduğu kabul edilmiştir. Silindirik kabuğun vakum ortamındaki titreşim karakteristikleri standart sonlu elemanlar yazılımları ile elde edilmiştir. Analizin ıslak kısmında ise yapının vakumdaki mod şekillerini kısmen su dolu ve/veya batmış halde de koruduğu kabulü yapılmıştır. Her mod şekli için kabuk üzerinde yüzey basınç dağılımı hesaplanmıştır. Akışkan-yapı etkileşimi sınır integral denklemleri metodu kullanılarak genelleştirilmiş eksu kütle cinsinden hesaplanmıştır. Sınır integral denklemleri metodu, serbest yüzey sınır şartının uygun bir şekilde uygulanabilmesi için imaj metodu ile birlikte kullanılması ile elde edilmiştir. Kısmen dolu ve/veya batmış haldeki akışkan etkilerinin bulunabilmesi için *ıslak* doğal frekansları ve ilgili mod şekilleri hesaplanmıştır ve mevcut analitik çözümler (Ergin, 1997) ve deneysel ölçümler ile

karşılaştırılıp yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Ergin ve Uğurlu (2003), Ergin ve Temarel (2002) tarafından verilen metodu, kısmen akışkana daldırılmış dörtgen plakalara uygulamışlardır. Bu metot akışkan-yapı etkileşimindeki yapıların dinamik davranışının incelemek için imaj metodu ile birlikte kullanılan sınır integral denklemleri metodudur. Sonuçların, Lindholm (1965) tarafından yapılan deneysel sonuçlar ile güzel bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Sonuçlar ayrıca Fu ve Price (1987) tarafından yapılan sayısal hesaplar ile de karşılaştırılmış ve uyum içinde olduğu ortaya çıkmıştır.

Ergin ve Uğurlu (2004), Ergin ve Temarel (2002) tarafından verilen metodu, akışkan depolama tanklarının hidro-elastik analizi için kullanmışlardır. Bu metot akışkan-yapı etkileşimindeki yapıların dinamik davranışının incelemek için imaj metodu ile birlikte kullanılan sınır integral denklemleri metodudur. Düşey silindir geometrisinde olan bu depolama tanklarının kısmen ve tam akışkan dolu hallerinde incelemeler yapılmıştır. İncelemeler 3 farklı durum için yapılmıştır. Bunlar; elastik silindirik tank ve rijit alt plaka, elastik alt plaka ve rijit silindirik tank ve elastik silindirik tank ve elastik alt/üst plakalar. Üç durumun da sonuçları Amabili (2000) tarafından verilen analitik incelemeler ve test sonuçları karşılaştırılıp, uyum içinde olduğu görülmüştür.

Uğurlu ve Ergin (2006), Ergin ve Temarel (2002) tarafından verilen metodu geliştirerek, aksenal hıza sahip bir akışkan içersinde kısmen ve/veya tam batmış yapıların titreşimleri için bir hidro-elastitise metodu sunmuşlardır. Çalışmada kullanılan sınır integral denklemleri metodu, serbest yüzeyde sonsuz frekans limit durumu sınır şartının uygulanabilmesi için imaj metodu ile birlikte kullanılması ile elde edilmiştir. Akışkan ideal kabul edilip akışkan kuvvetleri atalet kuvvetleri ile ilişkilendirilmiştir. Yapının ıslak yüzeyi üzerindeki akışkan basıncının yapının ivmelenmeleri ile aynı fazda olduğu kabul edilmiştir. Silindirik kabuğun vakum ortamındaki titreşim karakteristikleri, standart sonlu elemanlar yazılımları ile elde edilmiştir. Analizin ıslak kısmında ise ıslak yüzey hidrodinamik paneller ile ayrıklaştırılmış ve yapının vakumdaki mod şekillerini kısmen su dolu ve/veya batmış halde de koruduğu kabulü yapılmıştır. Her mod şekli için kabuk üzerinde basınç dağılımı hesaplanmıştır. Akışkan-yapı etkileşimi genelleştirilmiş eksu kütle katsayıları, genelleştirilmiş Coriolis akışkan kuvveti katsayıları ve genelleştirilmiş merkezkaç kuvvet katsayıları cinsinden hesaplanmıştır. Aksenal akışkan hızının yapının dinamik davranışları üzerindeki etkisini görmek için boyutsuz doğal frekans ve mod şekilleri, boyutsuz akışkan hızının fonksiyonu olarak verilmiştir. Sonuçların, Amabili ve Garziera (2002) ve Paidoussis (1998, 2004) tarafından verilen analitik çözümler ile karşılaştırıldığında iyi bir uyum içerisinde olduğu



görülmüştür.

Uğurlu ve Ergin (2008), Uğurlu ve Ergin (2006) tarafından verilen metodu, direk sınır integral denklemleri yöntemini uygulayarak ve yüksek dereceden hidrodinamik paneller kullanarak geliştirmişlerdir ve tamamen akan akışkan ile temasta olan ince silindirik kabukların davranışını incelemiştir. Analizler farklı sınır koşulları için tekrarlanmıştır. Bunlar; basit-basit, tam bağlı-tam bağlı, tam bağlı-basit ve ankastre silindir kabuk halidir. İncelemeler, yapının vakumdaki davranışları için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ve akışkan-yapı etkileşimi için de sınır integral denklemleri kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada ayrıca, akışkan içeren ve kesiti silindir boyunca lineer olarak değişen bir silindirik kabuğun, basit-basit sınır şartı durumundaki davranışı da incelenmiştir. Eksenel hıza sahip akışkanın yapının dinamik davranışları üzerindeki etkisini görmek için boyutsuz doğal frekans ve mod şekilleri, boyutsuz akışkan hızının fonksiyonu olarak verilmiştir. Yüksek mertebeden hidrodinamik panellerin kullanılması ile yapılan sayısal hesaplamaların yakınsaklığı, önceki çalışmalarda verilen sabit şiddetli hidrodinamik paneller ile yapılan sayısal hesaplamaların yakınsaklığından çok daha iyi olduğu görülmüştür. Sonuçlar literatürdeki analitik çözümler ile karşılaştırıp, iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür.

Uğurlu, Kutlu, Ergin ve Omurtag (2008) çalışmalarında elastik zeminin ve akışkanın, Kirchhoff plaklarının dinamik davranışlarındaki etkilerini incelemek için bir analiz metodu sunmuşlardır. Kirchhoff plağı ve Pasternak zemini arasındaki ilişki, Gateaux diferansiyeli kullanan birleşik sonlu elemanlar denklemleri ile elde edilmiştir. Plak yapısı, kenarları tam bağlı veya basit mesnetli olacak şekilde, Pasternak zemini üzerine oturmuş olarak düşünülmüştür. Plak ayrıca bir yüzünde kısmen veya tamamen su ile temas halindedir. Akışkan-yapı etkileşimi kuvvetleri ise sınır integral denklemleri metodunun, sonsuz frekans limit durumu serbest yüzey sınır şartının uygulanabilmesi için imaj metodu ile birlikte kullanılması ile elde edilmiştir. Akışkan ideal, viskoz olmayan ve hareketinin çevrimsiz olduğu kabul edilip akışkan kuvvetleri atalet kuvvetleri ile ilişkilendirilmiştir. Yapının ıslak yüzeyi üzerindeki akışkan basıncının yapının ivmelenmeleri ile aynı fazda olduğu kabul edilmiştir. Elastik zeminin ve akışkanın plak yapısının üzerindeki etkisinin görülmesi için doğal frekansları ve mod şekilleri hesaplanmıştır. Ayrıca daldırma derinliğinin dinamik davranış üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Ergin, Kaydıhan ve Uğurlu (2007a; 2007b) , Ergin ve Temarel (2002) tarafından yapılan çalışmayı temel alarak, 3B lineer hidro-elastisite metodunu 1900 TEU taşıma kapasiteli bir konteyner gemisinin hidro-elastik davranışlarını belirlemek için uyguladı. *Islak rezonans*

frekansları ve mod şekilleri geminin tam yüklü ve balast yükleme koşulları için incelendi. Serbest yüzeye sonsuz frekans limit koşulu uygulanmıştır ve bu durumun akışkan-yapı sisteminin yüksek frekanslı titreşimleri için geçerli olduğu kabul edilmektedir. Hesaplanan *ıslak* titreşim frekans ve modları, sonlu elemanlar ile yapılan hidro-elastik analiz sonuçları ile karşılaştırılmış ve gayet iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Gemi yapısı ve etrafını çevreleyen akışkan alanı, sırayla yapısal ve akışkan sonlu elemanlar ile ayrıştırılmıştır.

Hirdaris vd. (2006) düzenli dalgalar arasında ilerleyen bir dökme yük gemisinin simetrik ve antisimetrik hareketlerini inceleyen bir akışkan-yapı etkileşim modelini incelemiştir. 2B akışkan-yapı etkileşim modeli için dilim teorii Timoshenko kiriş teorisi ile birlikte uygulamışlardır. Ayrıca, ıslak yüzeyi üzerinde kaynak dağılımını kullanan 3B sınır eleman metodunu da 3B sonlu elemanlar ve Timoshenko kiriş teorisi ile birlikte kullanıp, 3B akışkan-yapı etkileşim kuvvetlerini hesaplamışlardır. Bu dökme yük gemisi için 2B ve 3B akışkan-yapı etkileşim modelleri arasındaki farkları inceleyip, Timoshenko kiriş teorisinin yapısal süreksizlikleri modelleme açısından eksikliklerini ve burulma ve çarpılma üzerindeki etkisini araştırmışlardır.

Remy vd. (2006) gemi geometrisini, gemi ve kargo kütlelerinin dağılımını ve yapısal modelin tanımını içeren bir hidro-elastisite analizi sunmuştur. Analizlerde ilk önce doğal frekans ve mod şekilleri gibi kuru dinamik özellikler hesaplanmıştır. Daha sonra modal hidrostatik katılık, modal eksu kütle, modal hidrodinamik katılık ve modal dalga uyarımları cinsinden akışkan-yapı etkileşim etkileri bulunmuştur. Son olarak *ıslak* doğal titreşim frekansları, *ıslak* mod şekilleri ve transfer fonksiyonları (RAO) yapının dalga uyarımlarına karşı olan cevabını inceleme amacı ile belirlenmiştir. Yazarlar aynı zamanda aşırı elastik bir dubanın (BGO First basin, Toulon, France) deneysel çalışmasını da yapmışlardır. Dubanın yüksek seviye hidro-elastik etkilere maruz kalabilmesi amacı ile oldukça elastik olacak bir şekilde konstrüksiyonu hazırlanmıştır. Model testleri JONSWAP spektrumu ile oluşturulmuş düzensiz dalgalar için yapılmıştır. Senjanović vd. (2008) bu elastik dubanın hidro-elastik tepkisel davranışlarını yukarıda bahsedilen metodoloji ile incelemiştir ve sonuçta çıkan RAO'ları bahsedilen ölçümlerle karşılaştırıp oldukça iyi bir uyum elde etmiştir.

Riggs vd. (2008), ISSC (2006) komite VI.2 tarafından başlatılan çok büyük yüzen yapılar (VLFS) çalışmasından bir grup model sonuçlarının detaylı karşılaştırmasını yapmıştır. Lineer hidro-elastisite için son yıllardaki mevcut kodların gelişimini tartışmışlardır. Kodlar hem akışkan-yapı etkileşim kuvvetlerinin bulunması için kullanılan akışkan modellerini (potansiyel ve lineer Green-Naghdi) hem de yapısal modelleri (3B ızgara sistem, 2B plaka, 3B

kabuk) içermektedir. 500 m boyu ve 100 m eni olan dörtgenel yüzer yapılarının dinamik davranışlarının hesaplanması için HYDRAN, VODAC ve LGN isimli kodlar kullanılmıştır. Bütün kodlarda akışkan sıkıştırılmaz, viskozitesiz ve akış çevrimsiz olarak kabul edilmiştir. HYDRAN, akışkan için geleneksel 3 boyutlu sabit panelli Green fonksiyonu denklemlerini ve yapı için ise üç boyutlu kabuk sonlu eleman modelini kullanmaktadır. VODAC ise akışkan için geleneksel üç boyutlu sabit panelli, Green fonksiyonu denklemlerini etkileşim teorisi ile birlikte kullanır ve yapı için ise üç boyutlu ızgara modelini kullanmaktadır. LGN ise akışkan için Green-Naghdi denklemlerini ve yapı için ise lineer Kirchoff plaka modelini kullanmaktadır. Üç model de güvenilir bir şekilde, özellikle ön dizayn aşaması için kullanılabilir.

Chen vd. (2006a) var olan hidro-elastisite teorilerini incelemiştir ve onları farklı kategorilere ayırmıştır. Bunlar; 2B lineer teori, 2B lineer olmayan teori, 3B lineer teori ve 3B lineer olmayan teori. Wu vd. (1997) tarafından verilen 3B lineer olmayan hidro-elastisite teorisi baz alınarak hareketin frekans alanında ve zaman alanında lineer olmayan denklemleri verilmiştir. Görülmüştür ki, ikinci dereceden kuvvetler VLFS nin dinamik tepkisel davranışında büyük etkiye sahip olabilmektedir. 2B ve 3B lineer teoriler oldukça olgunlaşmıştır ama 3B lineer olmayan teori ve lineer olmayan yapı hareketini içeren hidro-elastisite hala geliştirilmektedir. Ayrıca, zaman bazlı metotların tam lineer olmayan problemler için uygun olduğu ve efektif zaman bazlı lineer olmayan hidro-elastisite teorilerinin gelişimi yakın gelecekte ana odak olacağı sonucuna varılmıştır. Temarel (2008) hidro-elastisite teorisinde lineer olmayan ve viskoz etkileri de göz önüne alan gelişmeleri sunmuştur.

Mikami ve Kashiwagi (2008) hidrostatik akışkan katılık ve Froude-Krylov kuvvetlerindeki lineer olmayan geometrik özellikleri yakalayan lineer olmayan bir dilim teorisi sunmuştur. Radyasyon ve difraksiyon kuvvetlerindeki frekansa olan bağıllık, katlı integraller kullanılarak hesaba katılmıştır. Tekne, Timoshenko kiriş teorisi kullanılarak modellenmiştir. Dinamik davranış, modal ayrıştırma yöntemi ile zaman alanında analiz edilmiştir. Sayısal hesaplar, başında ve ortasında düşey hareketler cinsinden model test sonuçları bulunan 716 TEU kapasiteli bir konteyner gemisi için yapılmıştır. Park ve Temarel (2007) gemilerin simetrik davranışlarındaki lineer olmayan etkileri de içeren iki boyutlu bir hidro-elastisite teorisi sunmuşlardır. Düzgün baştan gelen dalgalarda ilerleyen bir S-175 konteyner gemisinin deneysel ölçümleri ile geniş bir karşılaştırma vermişlerdir. Eksu kütlesi ve akışkan sönümü nedeni ile oluşan yayılma kuvvet bileşenlerinin lineer olmayan modifikasyonunun, baş dönme ve lineer olmayan hidrostatik Froude-Krylov kuvvetleri kadar davranış analizlerinde

önemli olduğunu göstermişlerdir.

Tian ve Wu ( 2006 a, b) düzgün olmayan dalgalar arasında ilerleyen bir SWATH gemisinin lineer olmayan hidro-elastik tepkisel davranışlarını incelemişlerdir. Lineer olmayan akışkan-yapı etkileşim kuvvetlerinin nedeni, büyük genlikli hareketler ve anlık ıslak yüzey etkileridir. İkinci mertebeden hidrodinamik hareketler üzerinde ana etkileri olan birinci dereceden dalga potansiyelleri ve cevapları, 3B lineer hidro-elastisite teorisini baz alan, hareket eden ve titreşen Green fonksiyonları ve Kelvin daimi dalga akış çözümleri kullanılarak elde edilmiştir. 150 tonluk bir SWATH gemisinde düzgün ve düzgün olmayan baştan gelen dalgalar arasında 11 ve 12 knot hızlarda ilerlerken oluşan lineer ve lineer olmayan rijit cisim hareketleri, yapısal yer değiştirmeler ve gerilmeler sayısal olarak hesaplanmıştır. Görüşmüştür ki, lineer olmayan gerilme ve yer değiştirme hesaplamaları, lineer olan hesaplamalardan %20 ile %30 arası daha fazladır.

Taghipour vd. (2007) deniz yapılarının zaman alanında hidro-elastik analizini sunmuştur. Matematik model, Remy vd. (2006) tarafından verilen büyük elastik yüzer yapının deneysel sonuçları ile karşılaştırılmış ve uygunluğu görülmüştür. Yazar ayrıca, frekans alanında darbe cevaplı eğri geçirme ve regresyon hesap metodunu da uygulamıştır. Frekans alanlı regresyon sonuçları bir konteyner gemisi için karşılaştırılmıştır ve sonuç olarak iki yöntemin de eşit olarak geminin davranışını temsil ettiği görülmüştür.

Konteyner gemilerinin 400 metreye kadar olan boyları nedeni ile olası yaylanma problemleri ile ilgili endişeler artmıştır. Bu durum, dizayner tarafından hidro-elastik etkilerin incelenmesi gerekliliği sonucunu çıkarmaktadır. Malenica (2008) katlı integral tekniğini kullanan zaman bazlı modal analiz yöntemi ile bir global hidro-elastik metot sunmuştur. Bu metot ile konteyner gemilerindeki dövünme ve yaylanma etkileri incelenebilmektedir. Ayrıca bu gemiler omuzluktan gelen dalgalarda burulma yüklerine maruz kalabilmektedir. Malenica (2006) bir dubanın kiriş modeli ile tam 3B sonlu elemanlar modelinin sonuçlarını karşılaştırarak, basit kiriş modelinin birleşik burulma ve yatay eğilme titreşim modları için ön dizayn aşamasında kullanılabileceği sonucuna varmıştır. Kim ve Kim (2008) omuzluktan gelen dalgalarda ve sıfır ilerleme hızındaki yaylanma olayını incelemiştir. Yapısal cevap için kiriş sonlu elemanlar yöntemini ve hidrodinamik kuvvetler için ise 3B sınır elemanlar yöntemini kullanmıştır. Burada sonlu elemanlar ile sınır elmanlar yöntemleri arasındaki akışkan yapı etkileşimi geçişlerinde problem olduğu görülmüştür. Remy vd. (2006) ile yapılan karşılaştırmalar sonucunda düşey hareket transfer fonksiyonlarında (RAO) bir uyum bulunduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca elastik titreşimler nedeni ile bir duba için elastik ve rijit

tekne basınç dağılımları arasında fark olduğu görülmüştür.

### 1.5 Tez Çalışması

Bu tez çalışmasının amacı gemilerin etrafındaki akışkan ortamı ile etkileşimli olarak gösterdiği titreşim davranışlarının analizi için kullanılan yöntemlerin incelenmesi, bu yöntemlerin birbirleri ile ve deneysel çalışmalar ile karşılaştırılması ve bir dökme yük gemisi serisinin dinamik karakteristiklerinin (doğal titreşim frekansları, titreşim formları) incelenerek ön dizayn aşamasında kullanılabilir formülasyonların çıkarılmasıdır. Tezin bölümleri aşağıda verildiği gibidir;

Birinci bölümde, gemilerin dinamik davranışları hakkında genel bilgi verildikten sonra hareketler, rijit gemi ve elastik gemi hareketleri olarak sınıflandırılıp, incelenmiştir. Elastik gemi hareketleri kapsamına giren gemi titreşimleri, global ve yerel titreşimleri olarak ayrılmış ve genel bilgiler verilmiştir. Akışkan yapı etkileşiminin, global gemi titreşimleri üzerindeki etkileri, önemi ve *kuru* ve *ıslak* gemi titreşimlerinin farklarının nedenleri anlatılmıştır. Gemilerin akışkan ile etkileşimli olarak dinamik hareketlerinin incelenmesini konu alan hidro-elastisite teorisine giriş yapıldıktan sonra kullanılan bazı yöntemler hakkında bilgiler verilmiştir.

Bu yöntemler arasında bulunan iki boyutlu dilim teorisinde kullanılan Lewis (1929), Landwaber (1957) ve Kumai (1958) tarafında geliştirilen eksu kütle ve sönüm katsayılarının özellikleri verilmiştir. Diğer bir yöntem olan sınır elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan hidro-elastik analizlerin gelişimi anlatılmıştır. Price ve Wu (1985) ve Bishop, Price ve Wu (1986) tarafından tanıtılan ve daha sonraları Ergin ve Temarel (2002) tarafından geliştirilen üç boyutlu hidro-elastisite teorisinde, lineer bir sonlu elemanlar yaklaşımı ile üç boyutlu yapının vakumdaki dinamik davranışları hesaplandıktan sonra akışkan-yapı etkileşimi, akışkanın ideal, viskoz olmayan, sıkıştırılmaz ve hareketinin çevrimiz olduğu kabul edilen bir sınır elemanlar yöntemi ile hesaplanmıştır. Bu yöntem *hibrit yöntem* olarak isimlendirilmektedir.

Akışkan yapı etkileşiminin, sınır elemanlar yerine sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplandığı diğer bir yöntem olan sonlu elemanlar ile gemilerin hidro-elastik analizi hakkında bilgiler verilmiştir. Zienkiewicz ve Newton (1969) tarafından, akışkan-yapı etkileşim problemlerinde kullanılmak üzere sunulan dinamik basınç serbestlik dereceli akışkan elemanı anlatılmıştır ve literatürde geçen çalışmalar verilmiştir.

Gemi gibi akışkan ile etkileşimli olarak dinamik davranışlarda bulunan yapıların titreşim

analizlerindeki adımları anlatan bu bölümde bir titreşim analizi akış diyagramı verilmiş ve titreşim analizindeki ana adımlar anlatılmıştır. Bu adımlar arasında bulunan modelleme, sonlu elemanlar ağı oluşturma ve yüklemeler ile ilgili bilgiler verilmiş olup, eğer titreşim seviyelerinin hesabının istenmesi durumunda yapılacak zorlanmış frekans tepki analizi ve bu analiz için gerekli olan uyarıcı kuvvetler açıklanmıştır.

Literatür araştırması bölümünde, iki boyutlu ve üç boyutlu hidro-elastisite çalışmaları incelenmiştir.

1950'lerin sonunda denizcilik problemleri için geliştirilmeye başlanan dilim teorileri (Korvin-Kroukovsky ve Jacobs, 1957; Salvesen vd., 1970), elastik gemi yapıları üzerinde oluşan hidrodinamik kuvvetlerin bulunması için etkili bir araç olmuştur. Böylece gemi yapılarının simetrik ve antisimetrik hareketlerinin tayini için iki boyutlu hidro-elastisite teorilerinin kurulmasında ana adımlardan biri olmuştur (Betts vd., 1977; Bishop ve Price, 1977, 1979). İki boyutlu teorilerde gemi yapısı düzenli olmayan bir Timoşenko kirişi olarak kabul edilmiştir. Akışkan-yapı etkileşimi için genelleştirilmiş hareket denklemi verildikten sonra, Bishop vd. (1978, 1980, 1991), Price ve Temarel (1982), Newman (1978, 1986) ve Wu (1991b) gibi araştırmacıların konu hakkındaki makaleleri özetlenmiştir.

İki boyutlu hidro-elastik teorilerin getirmiş olduğu sınırlamaların üstesinden gelebilmek ve giriş şekilli olmayan elastik yapıların da davranışını inceleyebilmek amacı ile genel üç boyutlu lineer bir hidro-elastisite teorisi Wu (1984), Price ve Wu (1985) ve Bishop (1986) tarafından geliştirilmiştir. Lineer bir sonlu elemanlar yaklaşımı, üç boyutlu kuru yapının vakumdaki dinamik davranışının tayinin için kullanılmıştır. Islak yapının hareketleri ve ilgili akışkan etkileri, yüzen elastik yapıları etrafındaki üç boyutlu potansiyel akış teorisi ile hesaplanmıştır. Akışkan-yapı etkileşimi için genelleştirilmiş hareket denklemi verildikten sonra, Price vd. (1985), Fu vd. (1987), Lundgren vd. (1988), Wu ve Du (1990), Aksu vd. (1991a), Kean vd. (1991), Ergin vd. (1992), Louarn vd. (1997), Wang vd. (2001), Phan ve Temarel (2002), Li vd. (2002) ve Fu vd. (2003), Price ve Wu (1989), gibi araştırmacıların konu hakkındaki geliştirmeleri ilgili makaleleri özetlenmiştir. Bu tezde verilen sınır elemanlar ile hidro-elastik analiz yönteminin teorisini oluşturan Ergin ve Temarel (2002), Ergin (1997a, 1997b), Ergin vd. (1992, 2000, 2003, 2004, 2006, 2007a; 2007b, 2008,) tarafından verilen makaleler detaylı incelenmiştir.

İkinci bölümde incelenen sınır elemanlar yöntemi ve sonlu elemanlar yönteminin matematiksel modelleri verilmiştir. Her iki yöntem için de genel geçer olan genelleştirilmiş

hareket denklemleri verildikten sonra sınır elemanlar yöntemi ile akışkan-yapı etkileşim probleminin formülasyonu Ergin ve Temarel (2002) tarafından verilen yöntem izlenerek verilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile akışkan-yapı etkileşim probleminde ise Zienkiewicz ve Newton (1969) tarafından sunulan dinamik basınç serbestlik dereceli akışkan elemanının teorisi verilmiştir.

Üçüncü bölümde ise, bir denizaltı gövdesinin ölçekli modeli olan silindirik bir kabuk modelinin havadayken ve su içerisinde belli su çekimlerinde yüzerken dinamik karakteristiklerinin incelenmesi için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deney sonuçları Abaqus yazılımı içerisinde akışkan-yapı etkileşiminin yazılım tarafından çözüldüğü sonlu elemanlar analizinin sonuçları ile ve İTÜ Gemi inşaatı ve deniz bilimleri fakültesinde geliştirilmiş *hibrit* sınır elemanlar hidro-elastisite kodunun sonuçları ile karşılaştırılması ve sayısal analizlerin doğrulanması amacı ile kullanılacaktır.

Silindir kabuğun detayları aşağıdaki gibidir;

- Tam boy = 1284 mm,
- İç yarıçap = 180 mm,
- Kalınlık = 3 mm,
- Malzeme = AISI 316L,
- Yoğunluk = 7850 kg/m<sup>3</sup>,
- Young modülü = 206000 N/mm<sup>2</sup>
- Poisson oranı = 0.29

İki grup deney yapılmıştır. Bunlar;

- Birinci grup deneyler yapının havadaki doğal frekans değerleri ve mod şekillerini elde etmek için yapılmıştır.
- İkinci grup deneyler ise silindirin su yüzeyinde kendi ağırlığında yüzmeye ve yarı batmış olarak yüzmeye durumlarındaki *ıslak* doğal frekans değerlerini (rezonans frekansları) elde etmek amacı ile yapılmıştır. Islak deneyler İTÜ Gemi inşaatı ve Deniz bilimleri fakültesi Ata Nutku deney laboratuvarı stabilite tankında yapılmıştır.

Bu deneysel çalışmalarda Bruel & Kjaer ölçme ve analiz sistemleri kullanılmıştır. Sistemler

ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde, üçüncü bölümde deneyleri yapılan silindirik kabuğun sayısal çalışmaları yapılmıştır. Abaqus yazılımı içerisinde silindir kabuğun vakumdaki ve iki farklı su çekimi durumunda ıslak olarak yüzmeye halindeki modelleri kurulmuştur. Yapılan analizlerin sonuçları Bölüm 3'deki deney sonuçları ile ve *hibrit* hidro-elastisite yöntemi ile yapılan analizlerin sonuçları karşılaştırılmıştır.

Ayrıca silindirin tam batmış halindeki analizleri de yapıp Ergin, Price, Randall ve Temarel (1992) tarafından benzer model için yapılmış deney sonuçları, sayısal ve analitik çözümlerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların deney sonuçları ile güzel bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Bu silindirik kabuk modeli için yapısal elemanların optimum boyutları ve yapı ile temasta olan akışkan elemanlarının optimum boyutlarının tayini için yakınsaklık analizleri yapılmıştır ve sonuçlar verilmiştir.

Beşinci bölümde 1900 TEU kapasiteli bir konteyner gemisinin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan hidro-elastik titreşim analiz sonuçları, Ergin ve Temarel (2002) ve Uğurlu ve Ergin (2006) tarafından geliştirilen üç boyutlu *hibrit* hidro-elastisite analizi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ergin, Kaydıhan ve Uğurlu (2007a; 2007b) tarafından yayınlanan bildirimlerde de verildiği gibi iki yöntemin birbirlerine gayet yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Ayrıca bu konteyner gemisi modelinde, gemilerin hidro-elastik analizlerinde kullanılmak üzere akışkan hacim alanının optimum boyutları ve gemi ile temasta olan akışkan elemanlarının optimum boyutlarının tayini için yakınsaklık analizleri yapılmıştır ve sonuçlar verilmiştir.

Altıncı bölümde, önceki bölümlerde hem deneysel hem de sayısal hesaplamalar ile yakınlığı gösterilmiş yöntem olan akışkan-yapı etkileşiminin sonlu elemanlar ile çözülmesi yöntemi bir dökme yük gemisi serisine uygulanmıştır. Analizler sonucunda elde edilen frekans değerleri, gemilerin genel mukavemet özelliklerini temsil eden değişkenler ile birlikte tekrardan incelenerek düşey eğilme ve yatay eğilme frekans değerleri için üstel formda ampirik formüller çıkarılmıştır. Bu formüller ile analizlerde kullanılan gemilerin taşıma kapasiteleri, boyutları ve boyut oranları sınırları içerisinde kalan dökme yük gemilerinin titreşim frekans değerlerine ön dizayn aşamasında bir yaklaşım yapılması amaçlanmıştır.



## 2. MATEMATİKSEL MODEL

### 2.1 Genelleştirilmiş Hareket Denklemi

Ayrıklaştırılmış elastik yapıların dış uyarılara gösterdiği cevabın tanımlanması için kullanılan genelleştirilmiş hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}_v\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{P} \quad (2.1)$$

Burada  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}_v$  ve  $\mathbf{K}$ , sırasıyla kütle, yapısal sönüm ve katılık matrislerini ifade eder.  $\mathbf{U}$ ,  $\dot{\mathbf{U}}$  ve  $\ddot{\mathbf{U}}$  ise sırasıyla yapısal yer değiştirmeleri, hızları ve ivmeleri,  $\mathbf{P}$  ise dış kuvvetler vektörünü ifade eder. Ayrıklaştırılmış yapı için yer değiştirmeler aşağıdaki şekilde verilir.

$$\mathbf{U}^T = [\mathbf{U}_1 \mathbf{U}_2 \dots \mathbf{U}_j \dots \mathbf{U}_n] \quad (2.2)$$

Burada,  $\mathbf{U}_j$ , j'inci noktadaki noktasal yer değiştirmeyi, n ise ayrıklaştırmada kullanılan nokta sayısını belirtir. Global  $xyz$  koordinat sisteminde bir kabuk eleman her bir noktası için 6 serbestlik derecesine sahip olabilir. Bunlar, üç öteleme  $u_x$ ,  $u_y$  ve  $u_z$  ve üç dönme  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  ve  $\theta_z$  terimleridir. Böylece j'inci noktadaki noktasal yer değiştirmeler aşağıdaki formda yazılabilir;

$$\mathbf{U}_j^T = [u_x u_y u_z \theta_x \theta_y \theta_z] \quad (2.3)$$

Vakumdaki bir analizde yapının, herhangi bir yapısal sönüm ve dış kuvvetler etkisi olmaksızın titreştiği kabul edilmiştir. Böylece denklem (2.1) aşağıdaki hali alır.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{0} \quad (2.4)$$

Bu tür denklemler için önerilen çözüm formlarında biri olan  $\mathbf{U} = \mathbf{d}e^{i\omega t}$  çözümü denklem (2.4) de yerine koyularak ve  $e^{i\omega t}$  terimine bölünerek aşağıdaki denklem elde edilir.

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + \mathbf{K})\mathbf{d} = \mathbf{0} \quad (2.5)$$

Bu denklem serbest sönümsüz yapıların basit harmonik hareketlerini tanımlar ve vakumdaki şekil değiştirme modları ( $\mathbf{d}$ ) ve doğal frekansları ( $\omega$ ) bu denklemden elde edilir.

Modal vektörlerin ortogonalite karakterine dayanarak, baz vektörleri modal vektörlerden oluşan bir vektör uzayı tanımlanabilir ve sistemin genel dinamik davranışı, her bir modal vektöre karşılık gelen davranışlarının bir toplamı olarak aşağıdaki şekilde verilebilir.

$$\mathbf{U} = \mathbf{D}\mathbf{p}(t) \quad (2.6)$$

Burada  $\mathbf{D} = [\mathbf{d}_1, \dots, \mathbf{d}_n]$  şekil değiştirme modal matrisidir. Bu matrisin sütunları, yapının vakumdaki sönümsüz şekil değiştirme mod vektörleridir ( $\mathbf{d}$ ).  $\mathbf{p} = \{p_1, \dots, p_n\}^T$  ise hareketin modal vektör uzayındaki bileşenlerinden oluşan asal koordinat vektörüdür.  $n$ , vakum analiz sırasında hesaplanan modal vektör sayısını göstermektedir. Denklem (2.6)'yı denklem (2.1)'de yerine koyarsak ve eşitliğin  $\mathbf{D}^T$  ile önden çarpılması ile asal koordinatlar cinsinden aşağıdaki genelleştirilmiş hareket denklemi elde edilir.

$$\mathbf{a}\ddot{\mathbf{p}}(t) + \mathbf{b}\dot{\mathbf{p}}(t) + \mathbf{c}\mathbf{p}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (2.7)$$

Burada  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  ve  $\mathbf{c}$ , sırası ile genelleştirilmiş kütle, sönüm ve katılık matrislerini ifade ederler ve aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\mathbf{a} = \mathbf{D}^T\mathbf{M}\mathbf{D}, \quad \mathbf{b} = \mathbf{D}^T\mathbf{C}_v\mathbf{D}, \quad \mathbf{c} = \mathbf{D}^T\mathbf{K}\mathbf{D}, \quad \mathbf{F} = \mathbf{D}^T\mathbf{P} \quad (2.8)$$

Belirtmelidir ki,  $\mathbf{a}$  genelleştirilmiş kütle ve  $\mathbf{c}$  katılık matrisi diyagonaldır ama  $\mathbf{b}$  genelleştirilmiş sönüm matrisi diyagonal olmayabilir. Genelleştirilmiş kuvvet vektörü,  $\mathbf{F}(t)$  burada akışkan-yapı etkileşim kuvvetleri ve bütün diğer dış kuvvetleri ( dalga kuvvetleri v.b. ) temsil etmektedir ve aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\mathbf{F}(t) = -(\mathbf{A}\ddot{\mathbf{p}}(t) + \mathbf{B}\dot{\mathbf{p}}(t) + \mathbf{C}\mathbf{p}(t)) + \Xi(t) \quad (2.9)$$

Burada  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  ve  $\mathbf{C}$ , sırası ile genelleştirilmiş eksü kütle, genelleştirilmiş akışkan sönüm ve genelleştirilmiş akışkan katılık matrisidir ve  $\Xi(t)$  ise genelleştirilmiş dış kuvvetleri (dalga kuvvetleri, mekanik uyarımlar v.b.) ifade eder.

Böylece denklem (2.7) aşağıdaki formda tekrar yazılabilir.

$$(\mathbf{a} + \mathbf{A})\ddot{\mathbf{p}}(t) + (\mathbf{b} + \mathbf{B})\dot{\mathbf{p}}(t) + (\mathbf{c} + \mathbf{C})\mathbf{p}(t) = \Xi(t) \quad (2.10)$$

## 2.2 Sınır Elemanlar Yöntemi ile Akışkan-Yapı Etkileşim Problemi

Formülasyonda akışkan, ideal yani viskozitesiz ve sıkıştırılmaz ve ayrıca hareketinin de çevrimsiz olduğu ve ayrıca bir akışkan hız vektörünün ( $\mathbf{v}$ ) varlığı kabul edilmiştir. Akışkan hız vektörü, hız potansiyel fonksiyonu  $\Phi$  'nin gradyanı olarak aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\mathbf{v}(x, y, z, t) = \nabla\Phi(x, y, z, t) \quad (2.11)$$

Burada;

$$\Phi(x, y, z, t) = \text{Re}[i\omega\phi(x, y, z)e^{i\omega t}] \quad (2.12)$$

$\phi(x, y, z)$ , hız potansiyeli akış alanı boyunca Laplace denklemini sağlamaktadır;

$$\nabla^2\phi(x, y, z) = 0 \quad (2.13)$$

Akışkan içerisinde titreşen bir yapının ıslak yüzeyindeki akışkan normal doğrultu hızları, yapının normal doğrultu hızlarına eşit olmalıdır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$\frac{\partial\phi}{\partial\mathbf{n}} = -\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \quad (2.14)$$

Burada  $\mathbf{u}$ , yapının akışkan ile etkileşimli olduğu yüzeyinin yer değiştirme vektörüdür.  $\mathbf{n}$  ise, ıslak yüzeyin birim normal vektörüdür.

Akışkan-yapı etkileşim probleminin çözümü için verilen bu sınır elemanlar yönteminde, akışkan serbest yüzey dalgalarının etkisinin ihmal edilebilmesi amacı ile yapının göreceli olarak yüksek frekanslarda titreştiği kabul edilmiştir. Böylece,  $\phi$  için serbest yüzey şartı aşağıdaki gibi verilebilir;

$$\phi = 0 \quad (2.15)$$

Bu sınır şartının sağlanabilmesi için kullanılacak yöntemlerden bir tanesi imaj metodu olarak bilinir (Ergin ve Temarel, 2002). Islak yüzey modeline imaj sınır alanı eklenerek denklem (2.15) de verilen şart, yatay serbest yüzey için ihmal edilebilir. Böylece problem klasik Neumann durumuna indirgenmiştir. İmaj yönteminin uygulandığı Şekil 2.1 de görülebilmektedir. Burada  $S_w$ , ıslak yüzeyi,  $S_{im}$  ise imaj sınır alanını belirtmektedir.

Yapının içerisinde akışkan bulunması durumunda ise, akışkan normal hızı isteğe göre belirlenmemektedir ve sıkıştırılamazlık şartını sağlamak zorundadır.

$$\iint_{S_w+S_{im}} \frac{\partial\phi}{\partial n} dS = 0 \quad (2.16)$$



$$2\pi\sigma(x, y, z) - \iint_{S_w + S_m} \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \left( \frac{1}{r(x, y, z; \xi, \eta, \zeta)} \right) \sigma(\xi, \eta, \zeta) dS(\xi, \eta, \zeta) = \mathbf{u}(x, y, z) \cdot \mathbf{n}(x, y, z) \quad (2.18)$$

İntegral denklemi (2.18), ikinci tür iki boyutlu Fredholm denklemidir. Çözümün sürekli olan formülasyonu gösterir ki, denklem (2.18) yapının ıslak ve imaj yüzeylerinin üzerindeki bütün noktalarda sağlanmalıdır. Problem sayısal olarak yapının ıslak ve imaj yüzeylerinin panellere bölünmesi ile çözülebilir.  $\bar{N}$  adet dörtgen panele bölünmüş  $\Delta S_j (j = 1, 2, \dots, \bar{N})$  alanında paneller üzerindeki kaynak şiddeti  $\sigma$ , panel üzerinde sabittir. Denklem (2.18)'in ayrıklaştırılmış sayısal çözümü, böylece sadece seçilmiş kontrol noktalarında sağlanmış olur ve bu kontrol noktaları panellerin merkezleri olarak alınabilir. Böylece, denklem (2.18)'deki yüzey integrali,  $\Delta S_j (j = 1, 2, \dots, \bar{N})$  alanının  $\bar{N}$  adet dörtgen panellerinin kendi integrallerinin toplamı olarak yazılabilir. Denklem (2.18) aşağıdaki formu alır;

$$2\pi\sigma - \sum_{j=1}^{\bar{N}} \alpha_{ij} \sigma_j = u_{ni} \quad (i = 1, 2, \dots, \bar{N}) \quad (2.19)$$

Burada;

$$\alpha_{ij} = \iint_{\Delta S_j} \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \left( \frac{1}{r(x_i, y_i, z_i; \xi, \eta, \zeta)} \right) dS \quad (2.20)$$

ve  $u_{ni}$ ,  $i$ 'inci panelin kontrol noktasında ve normal doğrultusu yönündeki yer değiştirmeleri temsil eder. Böylece, etki katsayısı  $\alpha_{ij}$ ,  $j$ 'inci panel üzerinde uniform olarak dağıtılmış birim şiddet kaynağı tarafından,  $i$ 'inci kontrol noktasında yüzeye normal yönde oluşturulmuş hızı ifade etmektedir. Bütün  $u_{ni}$  değerlerinin önceden vakum durumunda elde edilen analiz sonuçlarından bilindiği kabul edilmiştir. Böylece ilişkin bilinmeyen kaynak şiddetleri  $\sigma_i$ , denklem (2.19)'un her bir asıl mod şekli için çözümünden elde edilir.

## 2.2.1 Genelleştirilmiş Akışkan-Yapı Etkileşim Kuvvetleri

Vakumdaki mod şekillerinde titreşen bir cismin oluşturduğu deformasyon potansiyelinin  $\phi_k$  elde edilmesinden sonra,  $k$ 'ıncı modal titreşim nedeni ile oluşan genelleştirilmiş akışkan-yapı etkileşim kuvvet genliğinin  $r$ 'inci bileşeni, yapının ıslak yüzeyinde etki eden basınçlar cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\bar{Z}_{rk} = \iint_{S_w} \mathbf{n} \mathbf{u}_r \bar{p}_k dS \quad (2.21)$$

Burada  $\mathbf{u}_r$ , vakumdaki  $r$ 'inci modal yer değiştirme vektörüdür. Belirtilmelidir ki, akışkan tarafından uygulanan tanjantsal kuvvetler sıfır olduğundan sadece normal genelleştirilmiş kuvvetler ele alınmıştır.

Bernoulli denklemi kullanılarak ve ikinci dereceden terimler ihmal edilerek, elastik bir yapının ıslak yüzeyinde, yapının  $k$ 'inci modal titreşim şekli nedeni ile oluşan dinamik akışkan basınçları aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$P_k = \text{Re}[\bar{p}_k e^{i\omega t}] = -\rho \frac{\partial \Phi_k}{\partial t} \quad (2.22)$$

Denklem (2.12)'yi denklem (2.22)'de yerine koyarsak basınçlar için aşağıdaki ifadeyi elde ederiz.

$$P_k = \omega^2 \rho \Phi_k \quad (2.23)$$

$k$ 'inci modal titreşim nedeni ile oluşan genelleştirilmiş akışkan-yapı etkileşim kuvvet genliğinin  $r$ 'inci bileşeni de aşağıdaki formu alır.

$$\bar{Z}_{rk} = \iint_{S_w} \mathbf{n} \mathbf{u}_r (\omega^2 \rho \Phi_k) dS \quad (2.24)$$

Böylece genelleştirilmiş eksu kütle aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$A_{rk} = \frac{\rho}{\omega^2} \iint_{S_w} \mathbf{n} \mathbf{u}_r \omega^2 \Phi_k dS \quad (2.25)$$

Eğer,  $k$ 'inci asal koordinat  $p_k(t) = p_k e^{i\omega t}$  formunda ise, yapının  $k$ 'inci cevabı nedeni ile oluşan genelleştirilmiş akışkan-yapı etkileşim kuvvetin  $r$ 'inci bileşeni aşağıdaki şekli alır (Ergin, Price, Randall ve Temarel (1992)).

$$\begin{aligned} Z_{rk}(t) &= \omega^2 A_{rk} p_k e^{i\omega t} \\ Z_{rk}(t) &= -A_{rk} \ddot{p}_k(t) \end{aligned} \quad (2.26)$$

## 2.2.2 Islak Frekans ve Mod şekillerinin Hesaplanması

Eğer bir yapının, dış uyarıcı kuvvetlerin  $\Xi(t)$  ve sönümün yokluğunda, katılığı ihmal edilen

bir akışkanın içerisinde serbestçe titreştiği kabul edilirse, genelleştirilmiş hareket denklemi (2.7),  $\mathbf{p}(t) = \mathbf{p}_0 e^{i\omega t}$  formunda ifade edilebilir. Böylece, denklem (2.7) aşağıdaki forma indirgenir.

$$\left[ -\omega^2 (\mathbf{a} + \mathbf{A}) + \mathbf{c} \right] \mathbf{p}_0 = 0 \quad (2.27)$$

Bu öz-değer probleminin çözülmesi ile akışkan ile etkileşimli haldeki kabukların birbirlerinden ayrılmış mod şekilleri ve ilgili frekansları elde edilir. Her bir *ıslak* frekans  $\omega_r$ 'ye karşılık denklem (2.27)'yi sağlayan bir ilişkili *ıslak* öz-vektör  $\mathbf{p}_{0r} = \{p_{r1}, p_{r2}, p_{r3}, \dots, p_{rM}\}$  bulunur. Akışkan ile etkileşimli haldeki yapıların birbirlerinden ayrılmış mod şekilleri aşağıdaki şekilde elde edilir (Bishop, Price (1979)).

$$\bar{\mathbf{u}}_r(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \{\bar{u}_r, \bar{v}_r, \bar{w}_r\} = \sum_{j=1}^M \mathbf{u}_j(x, y, z) \mathbf{p}_{rj} \quad (2.28)$$

Burada  $\mathbf{u}_j(x, y, z) = \{u_r, v_r, w_r\}$  yapının vakumdaki esas mod şekillerini,  $M$  ise analize dahil edilen mod şekli sayısını ifade eder. Belirtilmelidir ki, akışkanın ataletsel etkileri ile ilgili hidrodinamik kuvvetler, vakum modal şekillerindeki kuvvetler ile aynı uzaysal dağılıma sahip değillerdir. Bu nedenle, modlar arasında hidrodinamik eşleşme mevcuttur. Bu eşleşme etkisi denklem (2.27)'ye eksu kütle matrisi  $\mathbf{A}$  ile dahil edilmiştir.

## 2.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Akışkan-Yapı Etkileşim Problemi

### 2.3.1 Akışkan Ortamı Modeli

Hıza bağlı momentum kayıplı, sıkıştırılabilir ve adyabatik bir akışkanın küçük hareketleri için verilen denge denklemi aşağıdaki gibidir (Abaqus, 2008).

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \gamma(\mathbf{x}, \theta_i) \dot{\mathbf{u}}^f + \rho_f(\mathbf{x}, \theta_i) \ddot{\mathbf{u}}^f = 0 \quad (2.29)$$

Burada  $p$ , akışkandaki basınç artışıdır (herhangi bir yerdeki statik basıncı aşan basınç),  $\mathbf{x}$  akışkan partikülünün uzaydaki konumu,  $\dot{\mathbf{u}}^f$  akışkan partikülünün hızı,  $\ddot{\mathbf{u}}^f$  akışkan partikülünün ivmesi,  $\rho_f$  akışkanın yoğunluğu,  $\gamma$  hacimsel direnç (birim hız artışı başına birim hacimdeki kuvvet) ve  $\theta_i$ ,  $i$  adet bağımsız değişkendir. Bu değişkenler  $\rho_f$  ve  $\gamma$  nin bağlı olabileceği su tuzluluğu, hava nemi, sıcaklık gibi bağımsız alan değişkenleri olabilmektedir. Bu d'Alambert denklemi, konveksiyon olmaksızın ve akışkanın sürekli bir akış hızının bulunmadığı kabulü

yapılarak yazılmıştır. Bu kabul genellikle 0.1 Mach hızına kadar olan sürekli akışkan hızları için yeterli doğruluğu sağlamaktadır.

Akışkanın esas karakteristiği, viskozitesiz, lineer ve sıkıştırılabilir olarak kabul edilmiştir ve aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$p = -K_f(\mathbf{x}, \theta_i) \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{u}^f \quad (2.30)$$

Burada,  $K_f$  akışkanın Bulk modülüdür.

Hacimsel direnç katsayısı  $\gamma$ , akışkan hızına bağlı basınç genlik düşümü problemlerini tanımlamakta kullanılır. Örnek olarak akışkan ortamın gözenekli bir matris malzemenin içinden akması ile oluşan direncin modellenmesi (fiber bir izolasyon malzemesinin içindeki ses azalması analizi gibi) verilebilir.

### 2.3.2 Sınır Koşulları

Denklem 2.29 ve 2.30'u sağlayan akışkan ortamların sınırları aşağıdaki şartlarda belirtilen  $S$  alt sınırlara ayrılabilirler.

- $S_{fp}$ , akışkan basınç  $p$  değerinin tanımlandığı alanlardır.
- $S_{fs}$ , akışkan-yapı etkileşim sınır koşullarının uygulandığı alanlardır. Bu koşulda akışkan ortamın hareketi direk olarak yapının hareketi ile eşlenmiştir. Bu sınır koşulunda, akışkan ve yapı ortamlarının sınıra normal yöndeki yer değiştirme değerleri aynıdır ama tanjantsal yöndeki değerleri eşlenmemiştir.

### 2.3.3 Sonlu Elemanlar Formülasyonu

Kısmi diferansiyel denklemin bulunabilmesi için denklem (2.29), akışkan yoğunluğu  $\rho_f$  ile bölünür,  $\mathbf{x}$ 'e göre gradyanı alınır ve denklem (2.30) un zaman türevlerinin sonuçları ile birleştirilir. Böylece akışkan hareketinin denklemi akışkan basıncı cinsinden aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{1}{K_f} \ddot{p} + \frac{\gamma}{\rho_f K_f} \dot{p} - \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \cdot \left( \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial \mathbf{x}} \right) = 0 \quad (2.31)$$

Burada  $\gamma/\rho_f$  teriminin gradyanının küçük ve süreksizliklerde (iki elemanın sınırları arasında)



ihmal edilebileceği kabul edilmiştir.

Hareket denklemi (2.31)'e eşit ama zayıf formdaki denklem, rasgele seçilen varyasyonsal alan  $\delta p$  denkleme dahil edilip akışkan üzerinde integre edilmesi ile aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\int_{V_f} \delta p \left( \frac{1}{K_f} \ddot{p} + \frac{\gamma}{\rho_f K_f} \dot{p} - \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \cdot \left( \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial \mathbf{x}} \right) \right) dV = 0 \quad (2.32)$$

Green teoremi kullanılarak denklem yeniden yazılır.

$$\int_{V_f} \left[ \delta p \left( \frac{1}{K_f} \ddot{p} + \frac{\gamma}{\rho_f K_f} \dot{p} \right) + \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \delta p}{\partial \mathbf{x}} \cdot \frac{\partial p}{\partial \mathbf{x}} \right] dV + \int_S \delta p \left( \frac{1}{\rho_f} \mathbf{n}^- \cdot \frac{\partial p}{\partial \mathbf{x}} \right) dS = 0 \quad (2.33)$$

Burada  $\mathbf{n}^-$  akışkana doğru bakan normal vektördür.  $S_{fp}$  yüzeyleri için, akışkan basınç  $p$  değerinin tanımlandığı kabul edilip, geri kalan sınır yüzeyleri için basınç gradyanını sınır hareketlerine ilişkilendirmek için denklem (2.29) aşağıdaki gibi kullanılır.

$$\mathbf{n}^- \cdot \left( \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\gamma}{\rho_f} \dot{\mathbf{u}}^f + \ddot{\mathbf{u}}^f \right) = 0 \quad S - S_{fp} \text{ üzerinde} \quad (2.34)$$

Bu denklem kullanılarak,  $\mathbf{n}^- \cdot \frac{\partial p}{\partial \mathbf{x}}$  terimi denklem (2.33) den çıkartılır ve aşağıdaki hal elde edilir.

$$\int_{V_f} \left[ \delta p \left( \frac{1}{K_f} \ddot{p} + \frac{\gamma}{\rho_f K_f} \dot{p} \right) + \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \delta p}{\partial \mathbf{x}} \cdot \frac{\partial p}{\partial \mathbf{x}} \right] dV + \int_S \delta p (T(x)) dS = 0 \quad (2.35)$$

Burada  $T(x)$ , akışkan ile temasta bulunan yapı yüzeylerinde oluşabilecek etkileşimleri tanımlayan traksiyon terimidir ve aşağıdaki gibi verilir.

$$T(x) = \mathbf{n}^- \cdot \left( \ddot{\mathbf{u}}^f + \frac{\gamma}{\rho_f} \dot{\mathbf{u}}^f \right) = \mathbf{n}^- \cdot \left( \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial \mathbf{x}} \right) \quad S - S_{fp} \text{ üzerinde} \quad (2.36)$$

Direk tanımlanan basınç terimi  $S_{fp}$  dışında bir üst bölümde belirtilen bütün sınır şartları  $T(x)$  cinsinden formüle edilebilmektedir. Bu terim, ivme boyutuna sahiptir ve  $\gamma$  hacimsel direncin olmaması durumunda, akışkan ortam partiküllerinin su hacmine doğru olan ivme değerlerine eşittir.

$$T(x) = \mathbf{n}^- \cdot \ddot{\mathbf{u}}^f \quad S - S_{fp} \text{ üzerinde} \quad (2.37)$$

Su içerisinde titreşen cisimlerin dinamik titreşim karakteristiklerinin bulunması amacı ile yapılacak olan analizlerde akışkan ortam olan su hacminin,  $\gamma$  hacimsel direnç katsayısının bulunmadığı kabul edilmiştir. Ayrıca bu tür analizlerde kullanılan sınır şartının sadece  $S_{fs}$  yani akışkan-yapı etkileşim sınır şartı olduğu kabul edilip bundan sonraki denklemler sadece  $S_{fs}$  göz önüne alınarak çıkarılacaktır.

$S_{fs}$ , akışkan-yapı etkileşim sınır alanları üzerindeki şart, akışkan ve yapının yer değiştirmelerinin eşitlenmesi ile elde edilir.

$$\mathbf{n}^- \cdot \mathbf{u}^f = \mathbf{n}^- \cdot \mathbf{u}^s \quad (2.38)$$

Burada,  $\mathbf{u}^s$  yapının yer değiştirme vektörüdür.

Sınır koşulu terimi denklem (2.38), denklem (2.35)'de yerine konulursa, akışkan ortam için verilen varyasyonsal halin son halini elde etmiş oluruz. Akışkan ortam için verilen bu varyasyonsal hal, yapı için verilen sanal iş (virtual work) haline eşittir.

$$\int_{V_f} \left[ \delta p \left( \frac{1}{\mathbf{K}_f} \ddot{p} + \frac{\gamma}{\rho_f \mathbf{K}_f} \dot{p} \right) + \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \delta p}{\partial \mathbf{x}} \cdot \frac{\partial p}{\partial \mathbf{x}} \right] dV + \int_{S_{fs}} \delta p \mathbf{n}^- \cdot \ddot{\mathbf{u}}^s dS = 0 \quad (2.39)$$

Yapının davranış karakteristiği ise sanal iş prensibine göre aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\int_V \delta \varepsilon : \boldsymbol{\sigma} dV + \int_V \alpha_c \rho \delta \mathbf{u}^s \cdot \ddot{\mathbf{u}}^s dV + \int_V \rho \delta \mathbf{u}^s \cdot \ddot{\mathbf{u}}^s dV + \int_{S_{fs}} p \delta \mathbf{u}^s \cdot \mathbf{n} dS - \int_{S_t} \delta \mathbf{u}^s \cdot \mathbf{t} dS = 0 \quad (2.40)$$

Burada  $\boldsymbol{\sigma}$  yapı üzerindeki herhangi bir noktadaki gerilme,  $p$  akışkan-yapı etkileşim yüzeyi üzerindeki basınçlar,  $\mathbf{n}$  yapıya olan dışarı yöndeki normal vektörü,  $\rho$  malzemenin yoğunluğu,  $\alpha_c$  kütle orantılı sönüm faktörü,  $\ddot{\mathbf{u}}^s$  yapının herhangi bir noktasındaki ivme değeri,  $\mathbf{t}$  yapıya uygulanan yüzey traksiyon değeri,  $\delta \mathbf{u}^s$  varyasyonsal yer değiştirme alanı,  $\delta \varepsilon$  ise  $\delta \mathbf{u}^s$  ile uyumlu gerinim değişimidir. Basitleştirme amaçlı olarak akışkan basıncı ve  $\mathbf{t}$  yüzey traksiyonu dışındaki tüm yükleme terimleri ihmal edilmiştir.

Sonlu elemanlar denklemlerinin ayrıklaştırılması, interpolasyon fonksiyonlarının denkleme girilmesi ile yapılır. Denklemler (2.39) ve (2.40), eşlenmiş ortamlar  $\ddot{\mathbf{u}}^s$  ve  $p$  için varyasyonsal problemi tanımlarlar. Dolayısı ile problemi ayrıklaştırmak için akışkan ortamında,

$p = H^P p^P$  interpolasyon fonksiyonu ve yapı ortamında,  $\mathbf{u}^s = \mathbf{N}^N u^N$  interpolasyon fonksiyonu kullanılır.  $p=1,2,\dots$  burada yapıdaki basınç nod sayısı ve  $n=1,2,\dots$  burada yer değiştirme serbestlik derecesi sayısıdır. Buradaki ve aşağıdaki denklemlerde  $P,Q$  üst simgeleri akışkandaki basınç serbestlik derecesini ve  $N,M$  üst simgeleri de yapıdaki yer değiştirme serbestlik derecelerinin belirtir.

Yapısal sistem için Galerkin yöntemi kullanılır ve varyasyonsal ortam yer değiştirme ile aynı forma sahiptir:  $\delta \mathbf{u}^s = \mathbf{N}^N \delta u^N$ . Akışkan için ise  $\delta p = H^P \delta p^P$  kullanılır ama Petrov-Galerkin değiştirmesi ile aşağıdaki formu alır.

$$\delta p^P = \frac{d^2}{dt^2} (\tilde{\delta p}^P) \quad (2.41)$$

Yeni fonksiyon  $\tilde{\delta p}^P$  yardımı ile denklem (2.39) ile denklem (2.40)'ın toplamından elde edilen tek varyasyonsal denklem, boyut açısından uyumlu hale gelir.

$$\begin{aligned} & -\tilde{\delta p}^P \left\{ M_f^{PQ} \ddot{p}^Q + C_f^{PQ} \dot{p}^Q + K_f^{PQ} p^Q - S_{fs}^{PM} \ddot{u}^s - P_f^P \right\} \\ & + \delta u^N \left\{ I_s^N + M_s^{NM} \ddot{u}^M + C_s^{NM} \dot{u}^M + [S_{fs}^{QN}]^T p^Q - P_s^N \right\} = 0 \end{aligned} \quad (2.42)$$

Burada;

$$M_f^{PQ} = \int_{V_f} \frac{1}{\mathbf{K}_f} H^P H^Q dV,$$

$$C_f^{PQ} = \int_{V_f} \frac{\gamma}{\rho_f} \frac{1}{\mathbf{K}_f} H^P H^Q dV,$$

$$K_f^{PQ} = \int_{V_f} \frac{1}{\rho_f} \frac{\delta H^P}{\delta \mathbf{x}} \frac{\delta H^Q}{\delta \mathbf{x}} dV,$$

$$S_{fs}^{PM} = \int_{S_{fs}} H^P \mathbf{n}^- \cdot \mathbf{N}^M dV,$$

$$P_f^P = \int_{S_f} H^P T_0 dS,$$

$$M_s^{NM} = \int_V \rho \mathbf{N}^N \cdot \mathbf{N}^M dV,$$

$$C_S^{NM} = \int_V \alpha_c \rho N^N \cdot N^M dV ,$$

$$I_S^N = \int_V \beta^N : \boldsymbol{\sigma} dV ,$$

$$P_S^N = \int_{S_i} N^N \cdot \mathbf{t} ds .$$

Burada,  $\beta^N$  gerinim interpolate edici terimdir.  $S$  alt indisi yapısal terimleri,  $f$  alt indisi de akışkan ile ilgili olan terimleri tanımlar. Bu denklem ayrıklaştırılmış modeli tanımlar. Görünür ki hacimsel direnç ile ilgili terimler “kütle-gibi” akışkan eleman kütle matrisi ile orantılı terimlerdir.

$P_f^P$  terimi, akışkan serbestlik derecesi  $p^P$  için nodal sağ taraf terimidir veya bu serbestlik derecesi için uygulanan “kuvvet”dir. Bu terim, yüzey üzerinde akışkan ortamın birim yoğunluğu başına düşen basınç değerinin normal türevinin integrale edilmesi ile elde edilir.

Eşlenmiş sistemlerde, yapı üzerinde akışkan nedeni ile oluşan kuvvetlerin  $[S_{fs}^{QN}]^T p^Q$ , geri kalan yapısal kuvvetlere oranla küçük olduğu durumlarda sistem sıralı olarak (sequentially coupled) çözülebilir. Yapısal denklemler  $[S_{fs}^{QN}]^T p^Q$  terimi ihmal edilerek yani akışkan etkisi yokmuş gibi çözülebilir. Daha sonra akışkan denklemleri  $S_{fs}^{PM} \ddot{u}^s$  teriminin sınır şartı olarak uygulanması ile birlikte çözülebilir. Bu iki adımlı analiz, su içerisinde titreşen çelik yapıların dinamik davranışının hesabı için daha az maliyetli ve avantajlıdır.

### 2.3.4 Öz-değer Hesabı

Ayrıklaştırılmış denklem (2.42) kullanılarak frekans alanındaki problem aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} K_S & S_{fs}^T \\ 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ p \end{Bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} C_S & 0 \\ 0 & C_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ p \end{Bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} M_S & 0 \\ -S_{fs} & M_f \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_S \\ P_S \end{Bmatrix} \quad (2.43)$$

Burada  $\omega$  doğal frekans değeridir ve  $S$  alt indisi yapısal terimleri ve  $f$  alt indisi de akışkan ile ilgili olan terimleri tanımlar. Üst indisler basitleştirme amaçlı yazılmamıştır. Sönüm katsayılarının ve kuvvetlerin ihmal edilmesi ile denklem aşağıdaki hali alır.

$$\begin{bmatrix} K_S & S_{fs}^T \\ 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ p \end{Bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} M_S & 0 \\ -S_{fs} & M_f \end{bmatrix} = 0 \quad (2.44)$$

Bu denklem  $\omega^2$ 'nin öz-değeri temsil ettiği lineer bir öz-değer problemidir.

Akışkan-yapısal etkileşimli doğal frekans analizinde gerçek değerli eşlenmiş modları, Lanchos öz-frekans çıkartma prosedürü kullanarak hesaplanabilmektedir. Bu yöntemle çıkartılan modların çoğunda akışkan-yapı etkileşim etkileri görülebilirken bazı modlarda ağırlıklı olarak yapısal katkılar ve bazılarında ise ağırlıklı olarak akışkan katkıları görülebilmektedir. Eşlenmiş akışkan-yapısal öz-frekans değerleri aşağıdaki gibi kategorize edilebilir.

- En genel olarak, bir titreşim mod'unda hem akışkan hem de yapının kendisinin katkıları görülebilir. Bu mod “eşlenmiş titreşim mod” u olarak tanımlanır.
- İkinci olarak yapının rezonans modları vardır. Bunlar, yapının akışkan ortamın yokluğunda da yapabileceği modlar ile ilişkilidir. Akışkan ortamın varlığı, göreceli olarak bu frekans ve mod şekilleri üzerinde çok az etkilidir.
- Üçüncü olarak akışkan ortamın kavite rezonans modları vardır. Bunlar, frekansları sıfırdan farklı olan ve hesaplanan akışkan basınçların önemli katkılarının görüldüğü eşlenmiş modlardır.
- Dördüncü olarak eğer modelin yapısal kısmı üzerine eksik sınır şartı tanımlanması durumunda, frekans hesaplama prosedürü rijit cisim modlarını bulabilir. Bu modlar sıfır öz-frekansa sahiptir (bazen çok küçük pozitif veya negatif değerler de olabilir). Yeterli derecede sınır şartı uygulandığı durumda bu modlar çıkmayacaktır.
- Son olarak ise akışkan ortamın tekil akışkan modları sayılabilir. Bunlar sıfır öz-frekansa ve sabit akışkan basınç değerine sahiptirler. Matematik olarak yapının rijit modları ile benzerlik gösterir. Tekil akışkan modların yapısal kısmı, sınırlanmamış akışkan alan içerisinde sabit basınca gösterilen yarı-statik yapısal cevaba karşılık gelmektedir. Bu modlar baskın olarak akışkan özelliklidir ve akışkan yüklerin bulunması durumundaki mod-bazlı analizlerde en düşük frekanslı akışkan cevabın tanımlanmasında önemlidir. Benzer şekilde yapısal hareketin tanımlanması için de rijit cisim modları önemlidir. Genel olarak bir sınırlandırılmamış akışkan ortama sahip modellerde sadece bir akışkan tekil mod hesaplanacaktır (akışkan ortam

elemanları sadece bir serbestlik derecesine sahiptirler) ve Lanchos çözücüsü ilk olarak bu modu raporlar.

Genelleştirilmiş kütle ve efektif kütle değerleri bu birçok farklı modları birbirinden ayırmaya yardım ederler. Ek olarak, genelleştirilmiş kütleye olan akışkan katkı, her mod için bir oran olarak rapor edilir. Birim değere yakın olan değerlerin akışkan katkıları daha belirgindir. Akışkan efektif kütle değeri de her mod için hesaplanmaktadır. Bu sayısal değer, bütün modlar hesaplandığında modların akışkan efektif kütle değerlerinin toplamı 1'e eşit olacak şekilde ölçeklendirilir. Akışkan efektif kütle değeri iki mod arasında şu şekilde karşılaştırılır; yüksek akışkan efektif kütle değeri, akışkan basıncın doğru tanımlanabilmesi için önemlidir. Örnek olarak akışkan kavite akışkan rezonans modları diğer modlardan daha fazla akışkan efektif kütle değerine sahip olacaktır.

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 3.1 Giriş

Bir denizaltı gövdesinin ölçekli modeli olan silindirik bir kabuk modelinin havadayken ve su içerisinde belli su çekimlerinde yüzerken dinamik karakteristiklerinin incelenmesi için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel sonuçları Abaqus yazılımı içerisinde akışkan-yapı etkileşiminin yazılım tarafından çözüldüğü sonlu elemanlar analizinin sonuçları ile ve İTÜ Gemi inşaatı ve deniz bilimleri fakültesinde geliştirilmiş *hibrit* sınır elemanlar hidro-elastisite kodunun sonuçları ile karşılaştırılması ve sayısal analizlerin doğrulanması amacı ile kullanılmıştır.

İki grup deney yapılmıştır. Birincisi, yapının havadaki doğal frekans değerleri ve mod şekillerini elde etmek için yapılmıştır. İkinci grup deneyler ise silindirin su yüzeyinde kendi ağırlığında yüzmeye ve yarı batmış olarak yüzmeye durumlarındaki *ıslak* doğal frekans değerlerini (rezonans frekansları) elde etmek amacı ile yapılmıştır. Islak deneyler İTÜ Gemi inşaatı ve Deniz bilimleri fakültesi Ata Nutku deney laboratuvarında stabilite tankında yapılmıştır.

Bu bölümde deneysel model, deney ekipmanları ve deneylerin yapılışı hakkında bilgiler verilip deneyler sonucunda elde edilen frekans cevap grafikleri verilecektir.

#### 3.2 Deneysel Model

Deneysel çalışmalar için dizayn ve imal edilen model, iki ucu dairesel plakalar ile kapatılmış silindirik bir kabuktur. Modelin boyutları,  $L = 1284$  mm, iç yarıçap,  $R = 180$  mm ve plaka kalınlığı  $t = 3$  mm. Modelin imalatında kullanılan malzeme, paslanmaz çelik AISI 316L'dir. Modelin  $(L/R)$  ve  $(t/R)$  oranları özel bir sınıf denizaltı gövdesini temsil etmektedir. Ayrıca test modelinin  $(R/t)$  oranının yüksek olması (yaklaşık 60) nedeni ile model bir kabuk yapı olarak kabul edilebilir. Deneysel model Delta Denizcilik Mühendislik A.Ş. tarafından bu doktora çalışmasında kullanılmak üzere hassas bir şekilde imal edilmiştir. Model, Şekil 3.1 ve 3.2 de görülebilir.

Silindir düz plakadan imal edilmiştir. Plaka ilk önce yuvarlatılmış ve sonra kaynak ile birleştirilmiştir. Şekillerden görülebildiği gibi silindirin sonlarını kapatacak şekilde dizayn edilen dairesel kapaklar, silindire kaynaklı bağlantı ile birleştirilmiştir. Kapakların ortasında 200 mm çapında kapak yeri açılmıştır ve ikinci kapaklar 8 adet civata ile birleştirilmiştir. Bu ikinci kapaklar gerektiğinde sökülerek silindir içine sensör yerleştirme gibi işlemler için

kullanılabilmektedir. Bu ikinci kapaklar sızdırmaz conta kullanılarak dairesel yan kapaklara cıvatalanmaktadır. Ayrıca bu ikincil kapaklar üzerinde birbirinden 140 mm mesafede bulunan iki adet 25.4 mm çapında bağlantılara sahiptir. Bu bağlantılar içeride bulunan sensör ve benzeri ekipmanın kablolarının geçişi için düşünülmüş olup sızdırmaz bir şekilde kapatılabilmektedir. Silindir deneysel modelin toplam ağırlığı 38 kg'dır.



Şekil 3.1 Silindir deney modelinin genel görüntüsü





Şekil 3.2 Silindir deney modelinin kapak görüntüsü

### 3.3 Deneysel Ekipman ve Data Toplama/Analiz Sistemi

Deneysel titreşim ölçüm sistemleri esas olarak 3 kısımdan oluşmaktadır. Bunlar;

- Uyarıcı sistem: Ölçüm yapılacak yapıyı titreşime sokabilecek sistem.
- Sensörler: İstenilen parametreleri ölçebilecek dönüştürücüler.
- Data kayıt ve analiz sistemi: Ölçülen dataların kaydını tutabilecek ve istenilen bilgileri bu datalardan çıkartabilecek sistem.

Bu deneysel çalışmada, İTÜ Gemi inşaatı ve Deniz bilimleri fakültesi bünyesinde bulunan Bruel & Kjaer ölçme ve analiz sistemleri kullanılmıştır. Sistemler ile ilgili detaylar aşağıda verildiği gibidir.

#### 3.3.1 Uyarıcı Sistem

Yapılar birçok değişik araç ile anlık olarak uyarılarak titreşime bırakılabilirler. Bu araçlar temassız ve temaslı olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Bir sualtı patlama testi uyarımları için temassız uyarım araçları kullanılmaktadır. Temaslı uyarım araçları içinde bulunan darbe çekici ise bu çalışmada kullanılan uyarım aracıdır. Anlık bir uyarım yaratabilmek için bir

darbe çekici kullanılması ile yapıya kuvvet uygulanabilmektedir.

Bu deneysel çalışmada kullanılan darbe çekici Bruel & Kjaer 8206-001 darbe çekicidir. Farklı malzemeden oluşan birkaç darbe ucuna sahip bu çekiç, piezoelektrik kuvvet sensörüne sahiptir ve çekiç tarafından hissedilen kuvvet yapıya uygulanan kuvvete eşit ve ters yönlü olarak kabul edilir. Çekiç üç farklı darbe ucu ile kullanılabilir. Bunlar, alüminyum, plastik (delrin) ve lastik uçlardır. Uç seçimi uygulanacak darbenin şiddet ve süresini etkilemektedir. Bu çalışmada yapılan deneylerde, alüminyum ucun metal yüzeye vurulması durumunda oluşan anlık çok büyük şiddet ve olası çift darbe etkilerinden kaçınmak amacı ile plastik uç kullanılmıştır. Plastik uç ile elde edilen darbe şiddeti alüminyum uç ile elde edilen darbe şiddetinden daha azdır.

Bruel & Kjaer 8206-001 darbe çekici, 11.4 mV/N tipik voltaj hassaslığına, 445 N tam ölçek kuvvet aralığına, 100 gram toplam ağırlığa ( 40 gr arttırılabilir ağırlık da kullanılabilir) sahiptir. Çekiç paslanmaz çelik ve fiberglastan imal edilmiş olup BNC tip bağlantıya sahiptir. Çekiç Şekil 3.3 de görülebilmektedir.



Şekil 3.3 Bruel & Kjaer 8206-001 darbe çekici

### 3.3.2 İvmeölçerler

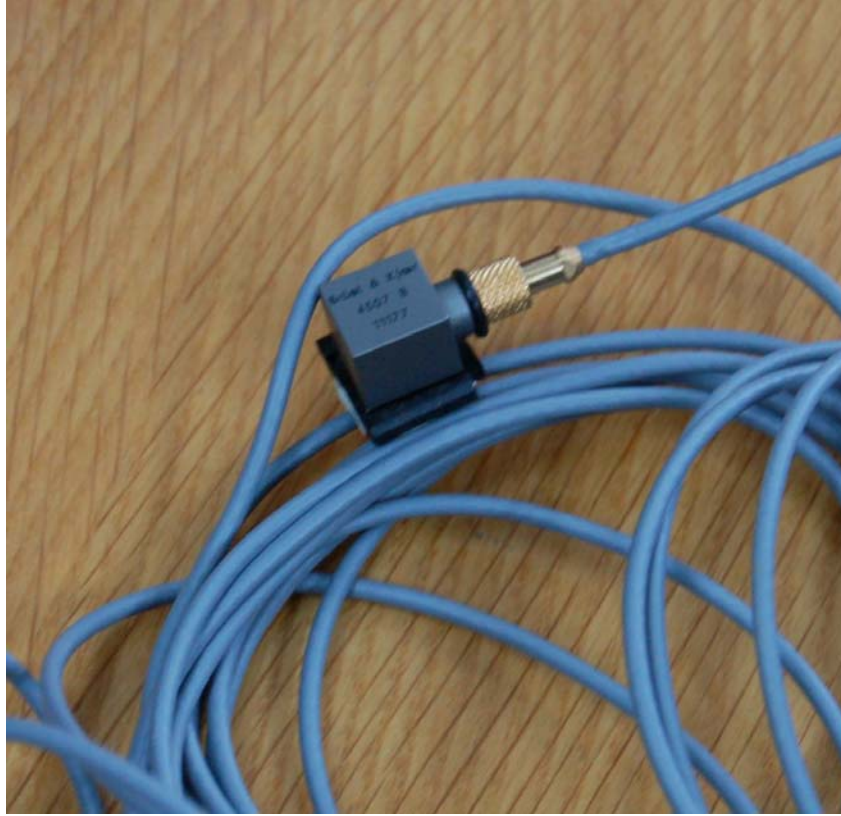
Piozoelektrik tip ivmeölçerler, gerilime maruz kaldığında voltaj üreten piezoelektrik elemanlara sahip elektromekanik dönüştürücülerdir. Bu elemanlar, ivmeölçer tabanını sismik bir kütleyle bağlayan yaylar gibi davranırlar. İvmeölçer titreştiği zaman kütle, bağlı olduğu piezoelektrik elemana titreşim ivmelerine orantılı olarak değişen kuvvet uygular. Kütle yay sistemi ile benzeştirilebilen bu ivmeölçerlerin ilk rezonans frekansında daha düşük uyarıcı frekanslarda kütle ivmesi, ivmeölçer tabanının ivmesine çok yakın olacaktır ve çıkış sinyal seviyesi, ivmeölçerin bağlandığı yüzeyin ivmesi ile orantılı olacaktır (Serridge, Licht, 1986). İvmeölçerin çalışma aralığının tanımlanmasında, en düşük rezonans frekansının bilinmesi gerekmektedir. Bu özellik ayrıca ivmeölçerin bağlandığı yapıya ve bağlantı şekli ile de ilgili olmaktadır. Frekans cevabı, hassasiyet ve çalışma aralığı, bir ivmeölçerin uygunluğunun değerlendirilmesinde ana faktörlerdir (Ergin, 1992).

Yapılan deneylerde ivmeölçer olarak, Bruel & Kjaer 4507 B Deltatron ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçerin hassaslığı, 9.63 mV/ms<sup>-2</sup>, frekans aralığı, 0.3 Hz – 6 kHz, bağlanmış halde rezonans frekansı, 18 kHz, ölçüm aralığı, +/- 71g'dir. İvmeölçerin taban malzemesi, titanyum ATM grade 2, sensörü, piezoelektrik PZ 23 ve ölçerin toplam ağırlığı 4.8 gr'dır.

Bir ivmeölçerin hassaslığı, elektriksel çıkış ve o çıkışa neden olan ivme arasındaki orandır. Yüksek hassaslık, daha büyük ve ağır ivmeölçer kullanılarak elde edilebilir. Ancak, silindirik ince bir kabuk için, ivmeölçer ağırlığının yapının titreşim karakteristiğini etkilememesi amacı ile olası en düşük ağırlıklı ivmeölçerin kullanılması gerekmektedir.

İvmeölçerin çıkışı, tabanının ivmesi ile lineer olarak orantılı olmalıdır. Teorik olarak ivme sıfıra gittikçe çıkış da sıfıra yaklaşmalıdır ama pratikte alt limit ölçüm sistemindeki gürültü ile sınırlanmıştır. Tam tersi olarak da eğer ivmeölçer dinamik limitinin üzerinde kullanılmaya çalışılırsa da, lineer olmayan bir cevap vermeye başlayacaktır. Bir ivmeölçerin dinamik limitleri, elektriksel çıkışın taban ivmesine direk olarak orantılı olduğu aralığı tanımlamaktadır.

İvmeölçerin uygun bir şekilde ölçüm yapılacak yapıya bağlanması özellikler yapının yüksek frekans cevabının ölçülmesi için önemlidir. Yapılan deneylerde yapıştırıcı dolgu maddesi ile ivmeölçer ilgili yerine sabitlenmiştir. İvmeölçer Şekil 3.4'de görülebilmektedir.



Şekil 3.4 Bruel & Kjaer 4507 B Deltatron ivmeölçer

### 3.3.3 Data Toplama/Analiz Sistemi

Deneylerde kullanılan data toplama sistemi Bruel & Kjaer 3560-B-040 PULSE 5 kanallı data toplama sistemidir. Sistemin frekans aralığı 0 Hz ile 25.6 kHz dir. Sistemde 5 giriş kanalı ve 1 adet çıkış bulunmaktadır ayrıca 24 bit analog dijital çevirici ve 24 bit data transferine sahiptir.

Data toplama sistemi tarafından alınan datalar, PULSE Lab/Shop ve modal ve yapısal analiz programı Me'scopeVES tarafından işlenir ve frekans cevap fonksiyonları elde edilir. Data işleme adımları şöyle özetlenebilir. İvmeölçerden gelen analog datalar yüksek frekanslı sinyallerin temizlenmesi için anti-aliasing filtresinden geçirildikten sonra analog-dijital sinyal çeviricisi tarafından 24 bit işleme kapasitesi ile dijitale çevirir. FFT (fast fourrier transform) transformasyonu ile zaman alanında ölçülen data frekans alanına dönüştürülür. Burada, FFT transformasyonun periyodiklik gereksinimini daha iyi karşılayabilmek için “weighting” fonksiyonları kullanılır. Böylece “leakage” bozulma etkileri minimize edilir.

FFT ile elde edilen lineer uyarıcı ve cevap spektrumlarının ortalama işlemleri yapıldıktan sonra giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki giriş spektrumu, çıkış spektrumu ve çapraz spektrum elde edilir.

Bu fonksiyonlar modal data analizinde önemli olan frekans cevap spektrumu (FRF) ve tutarlılık (coherence) fonksiyonunun hesabı için kullanılırlar. Tutarlılık fonksiyonu data kalite inceleme aracı olarak kullanılır ve çıkış sinyalinin ne kadarının ölçülen giriş sinyali ile ilişkili olduğunu tanımlar. FRF fonksiyonu ise sistemin frekans değerlerini, sönüm değerlerini ve sistemin mod şeklinin çıkarılması için gerekli olan FRF ölçümlerinin bilgilerini içerir.

Data toplama sistemi Bruel & Kjaer 3560-B-040 Şekil 3.5 de görülebilmektedir.



Şekil 3.5 Bruel & Kjaer 3560-B-040 data toplama sistemi

### 3.4 Deneyin Yapılışı

İki grup deney yapılmıştır. Bunlar;

- Silindirin havadaki doğal frekans değerleri ve mod şekillerini elde etmek için yapılan deney.
- Silindirin su yüzeyinde kendi ağırlığında yüzme ve yarı batmış olarak yüzme durumlarındaki *ıslak* doğal frekans değerlerini (rezonans frekansları) elde etmek amacı ile yapılan deneyler.

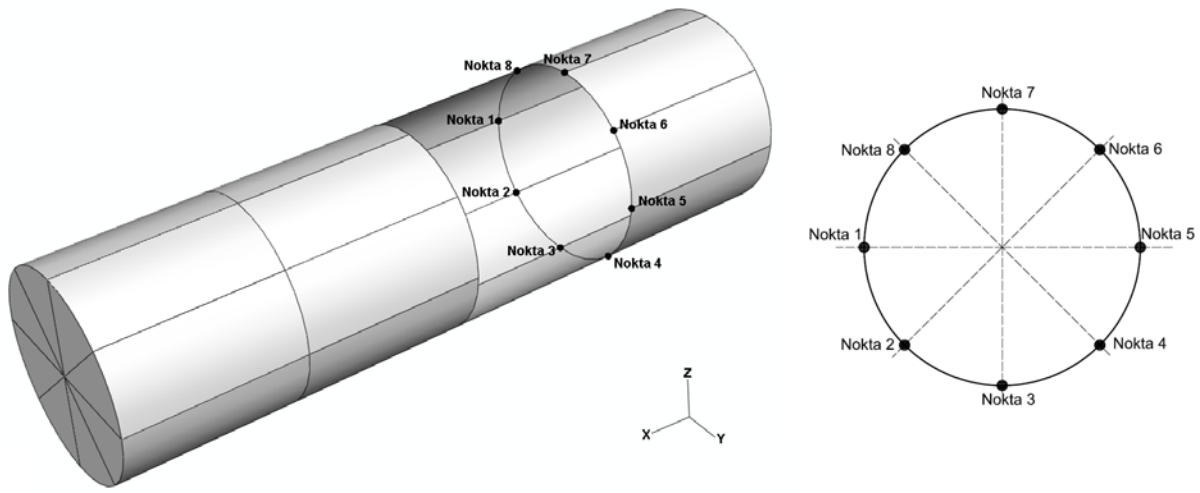
#### 3.4.1 Silindir Kuru Hal Deneyi

Silindirik kabuk yapı için ilk yapılan deneyler havada yapılmıştır. Bu amaçla model, uçlarındaki kapaklarda bulunan bağlantılardan desteklenmiştir. Ayrıca silindirin sonlarında bulunan dairesel plakalar, silindir kabuğunun uçları için basit mesnet koşulu sağladığı kabul edilmiştir. Silindirin kuru haldeki deneyi için desteklenme durumu Şekil 3.6'de görülebilmektedir.



Şekil 3.6 Kuru haldeki deney düzeneğinin hazırlanma aşaması

Kuru haldeki deneyin sonucunda amacımız hem doğal frekans değerlerini hem de bir en kesitteki mod şekillerini elde etmektir. Silindirin boy yönündeki titreşim formunun sağlıklı bir şekilde ölçülebilmesi amacı ile silindirin 1284 mm'lik boyu 4 eşit parçaya bölünmüştür ve silindirin bir ucundan 321 mm mesafedeki en kesitin ölçüm kesiti olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Böylece ölçümler sonucu hem bir en kesitin mod şekilleri elde edilecek hem de silindir kabuğunun 3. mertebeden eğilme titreşimlerine kadar olan doğal frekanslar ölçülebilecektir.\* Dolayısı ile silindirin bir ucundan 321 mm mesafedeki bir dairesel kesit etrafında eşit aralıklarla belirlenmiş sekiz adet farklı nokta ölçümlerde kullanılmak üzere işaretlenmiştir. Noktalar Şekil 3.7 de görülebilmektedir.

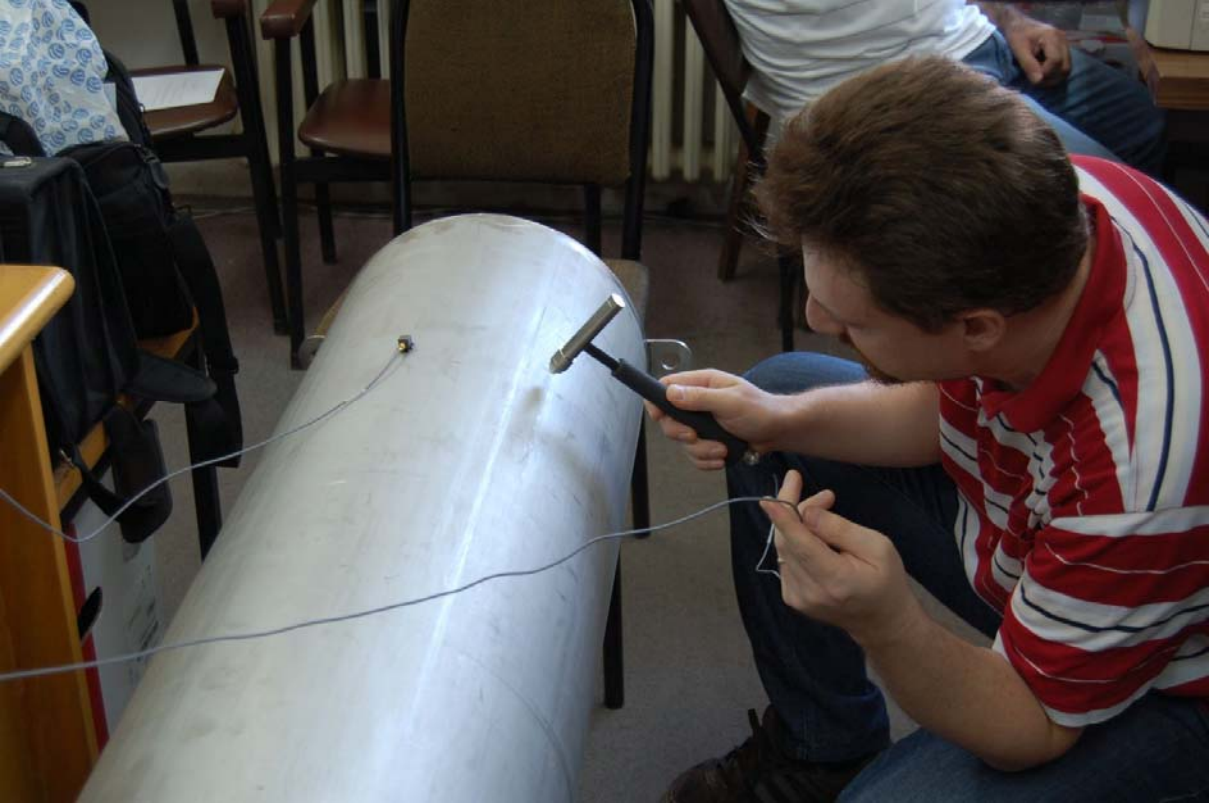


Şekil 3.7 Uyarım ve ölçüm noktaları

Deneyde, silindirin ucundan 321 mm mesafedeki kesitteki mod şekillerinin çıkarılması amacı ile ivmeölçer 7 numaralı noktaya sabitlenmiştir. Daha sonra sırası ile her noktaya çekiç ile vurularak 7 numaralı noktadaki ivmeölçerden cevaplar ölçülmüştür. Her bir nokta için ölçüm 3 defa tekrarlanmış ve ortalama değerler hesaplarda kullanılmıştır. Deneyin yapım aşamasında alınan fotoğraflar Şekil 3.8 ve 3.9'da görülebilmektedir.

Sırası ile her bir noktanın çekiç ile uyarılması sonucu nokta 7'de elde edilen ortalama frekans cevap fonksiyonları Şekil 3.10 ile Şekil 3.17 arasında görülmektedir.

\* Bilindiği gibi silindir serbest boyunun dört de birine konan ivmeölçer, bulunduğu yer itibari ile kabuğun dördüncü eğilme mod'unda durma noktasına denk gelecektir ve titreşim cevabı ölçemeyecektir. Bu çalışmada yapılan deneyler için seçilen silindir ucundan 321 mm mesafedeki titreşim ölçüm noktaları ile ilk üç silindir boy yönü eğilme mod'unun sağlıklı ölçülmesi garantilenmiştir ve yeterli olduğu kabul edilmiştir.

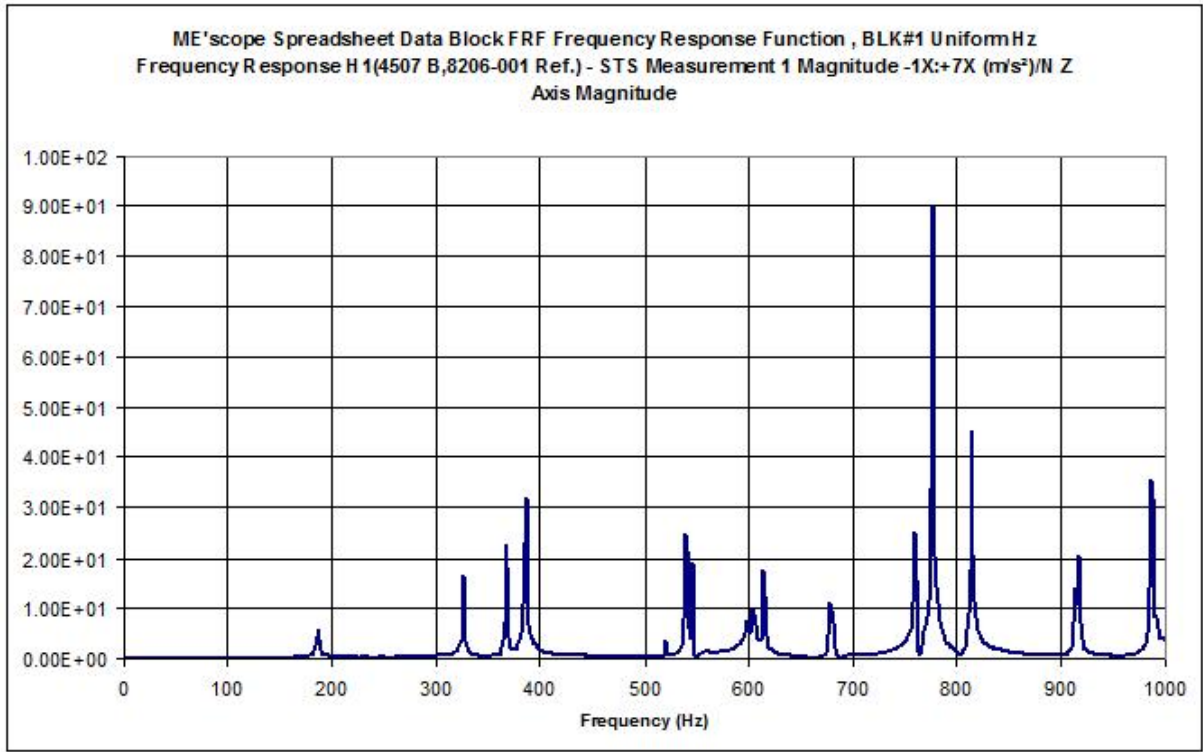


Şekil 3.8 Deneyin yapım aşamasından bir görüntü

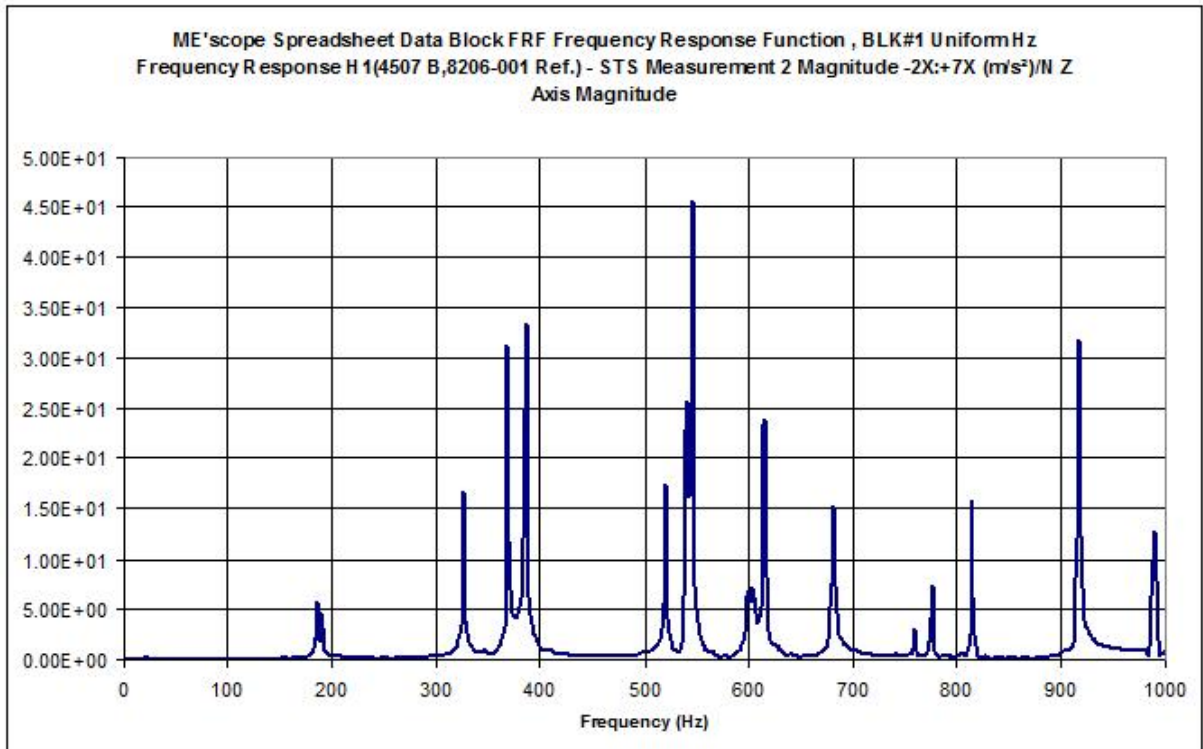


Şekil 3.9 Deneyin yapım aşamasından bir görüntü

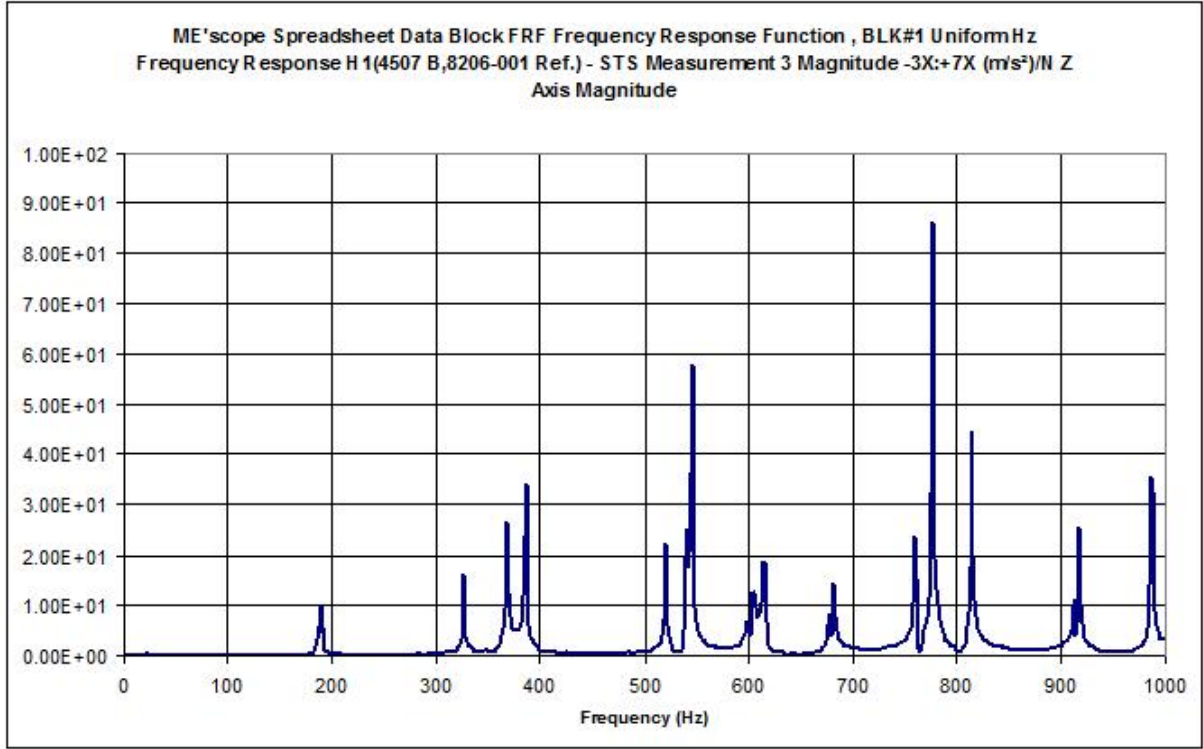




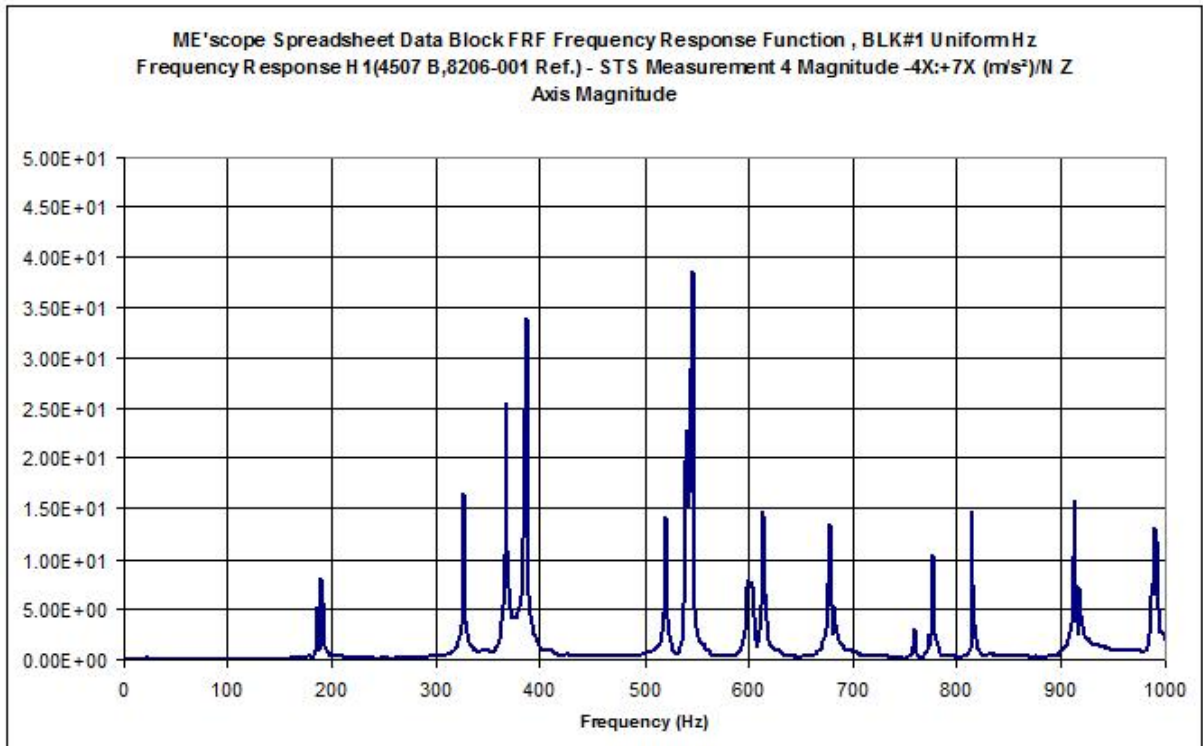
Şekil 3.10 Nokta 1'den verilen uyarımın nokta 7'deki cevap fonksiyonu



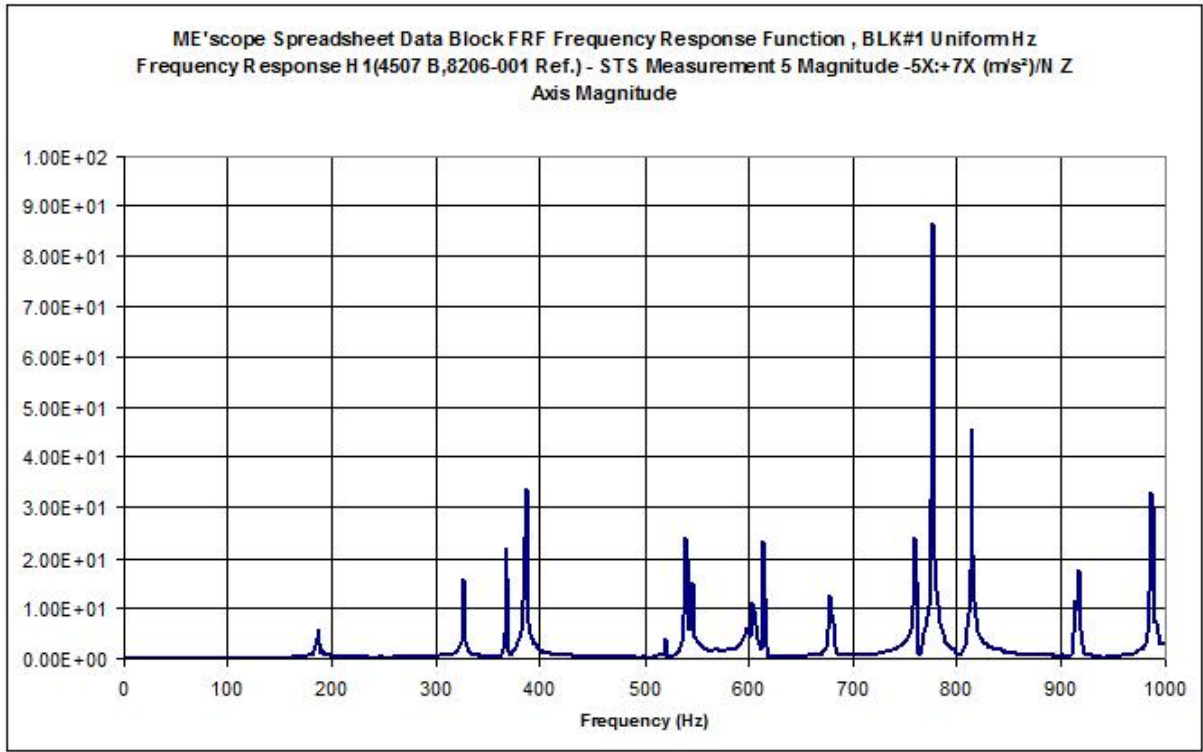
Şekil 3.11 Nokta 2'den verilen uyarımın nokta 7'deki cevap fonksiyonu



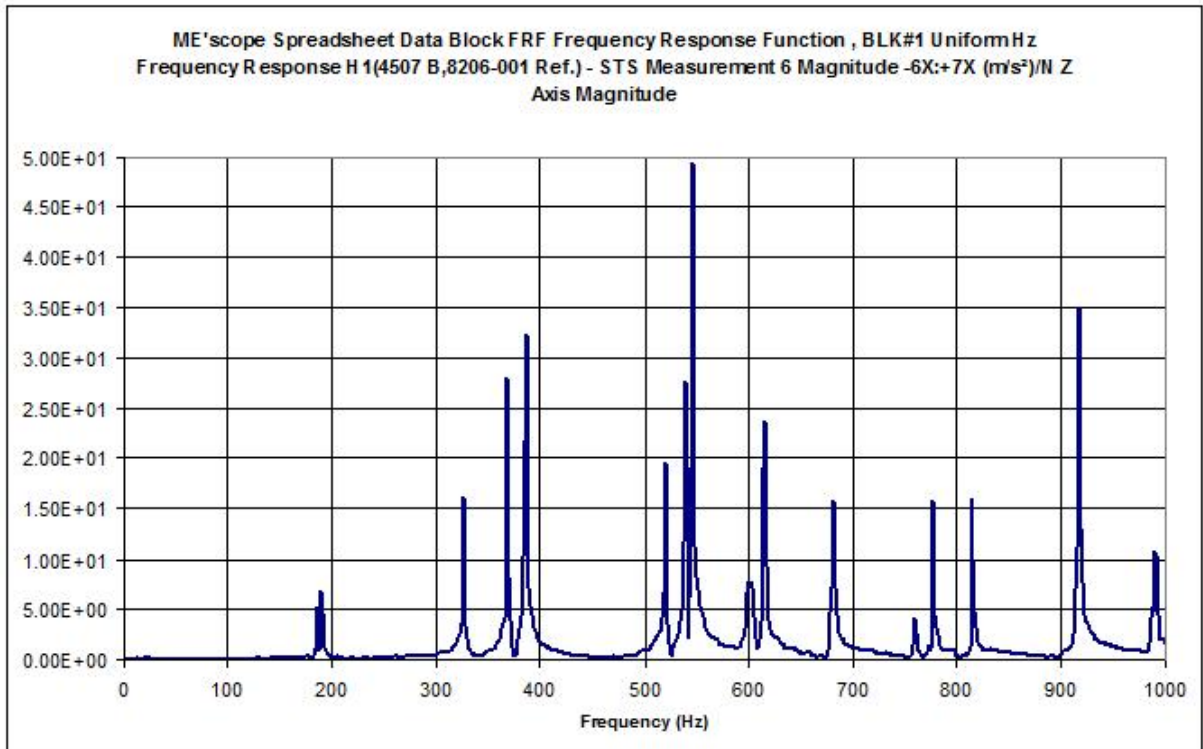
Şekil 3.12 Nokta 3'den verilen uyarımın nokta 7'deki cevap fonksiyonu



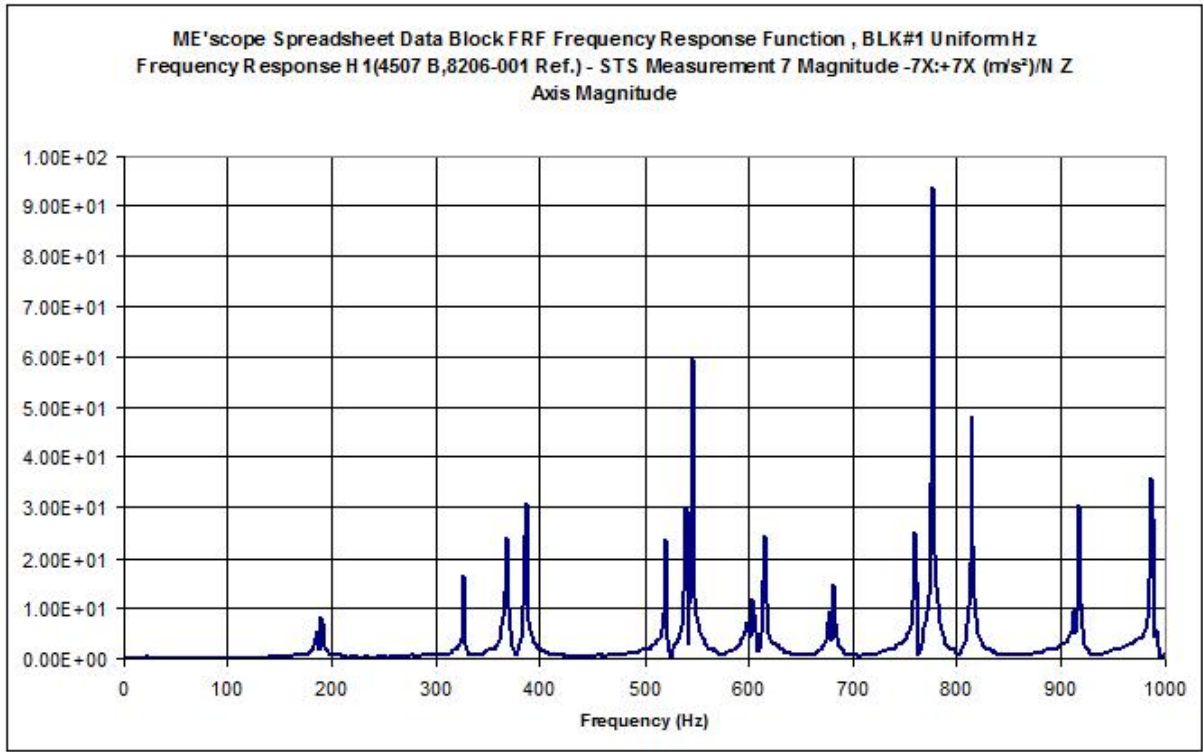
Şekil 3.13 Nokta 4'den verilen uyarımın nokta 7'deki cevap fonksiyonu



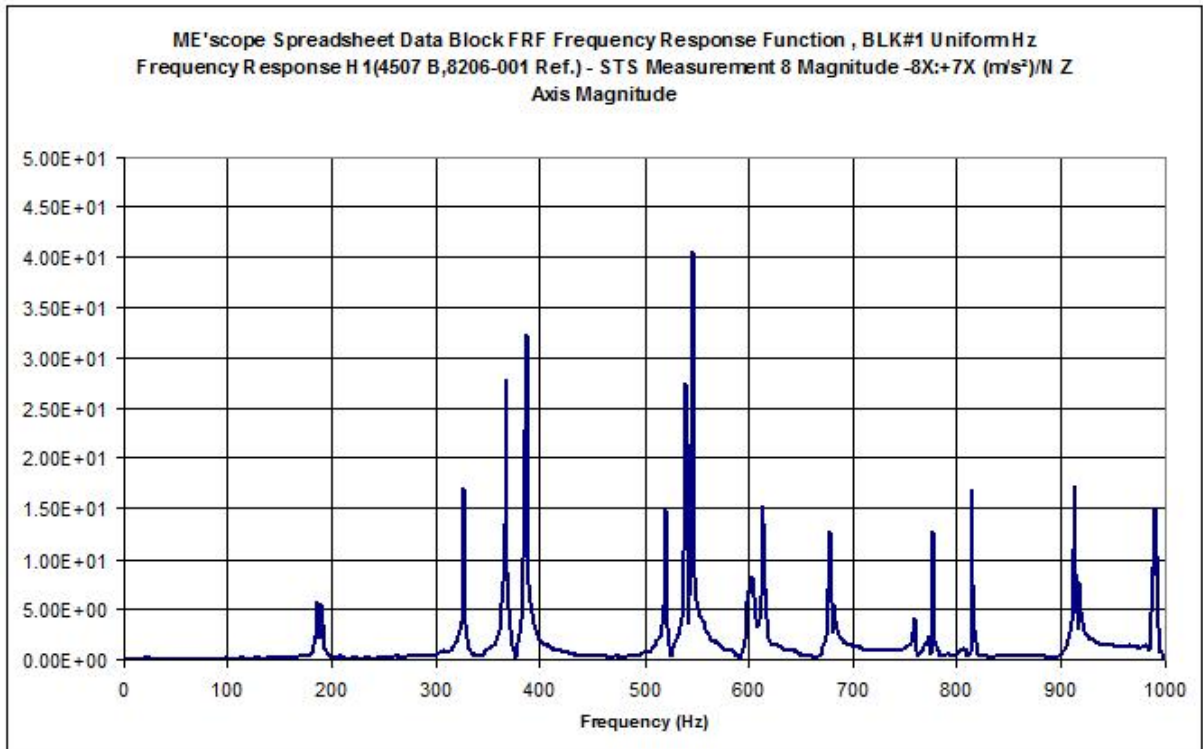
Şekil 3.14 Nokta 5'den verilen uyarımın nokta 7'deki cevap fonksiyonu



Şekil 3.15 Nokta 6'dan verilen uyarımın nokta 7'deki cevap fonksiyonu

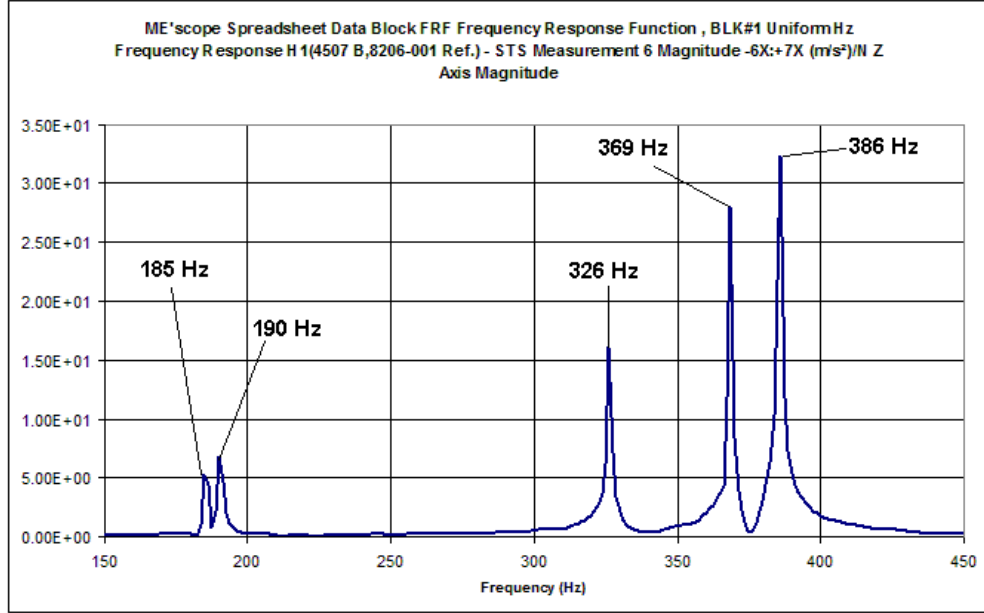


Şekil 3.16 Nokta 7'den verilen uyarımın nokta 7'deki cevap fonksiyonu



Şekil 3.17 Nokta 8'den verilen uyarımın nokta 7'deki cevap fonksiyonu

Silindirik kabuğun deneysel sonuçlarından 0-500 hz arasındaki rezonans frekanslarını çıkarmak için ölçülen bir noktanın frekans cevap fonksiyon eğrisini detaylı incelememiz gerekmektedir. Şekil 3.18 de nokta 6'nın detaylı frekans cevap eğrisi verilmiştir ve eğrinin tepe yaptığı noktalar yani yapının rezonans frekans değerleri işaretlenmiştir.



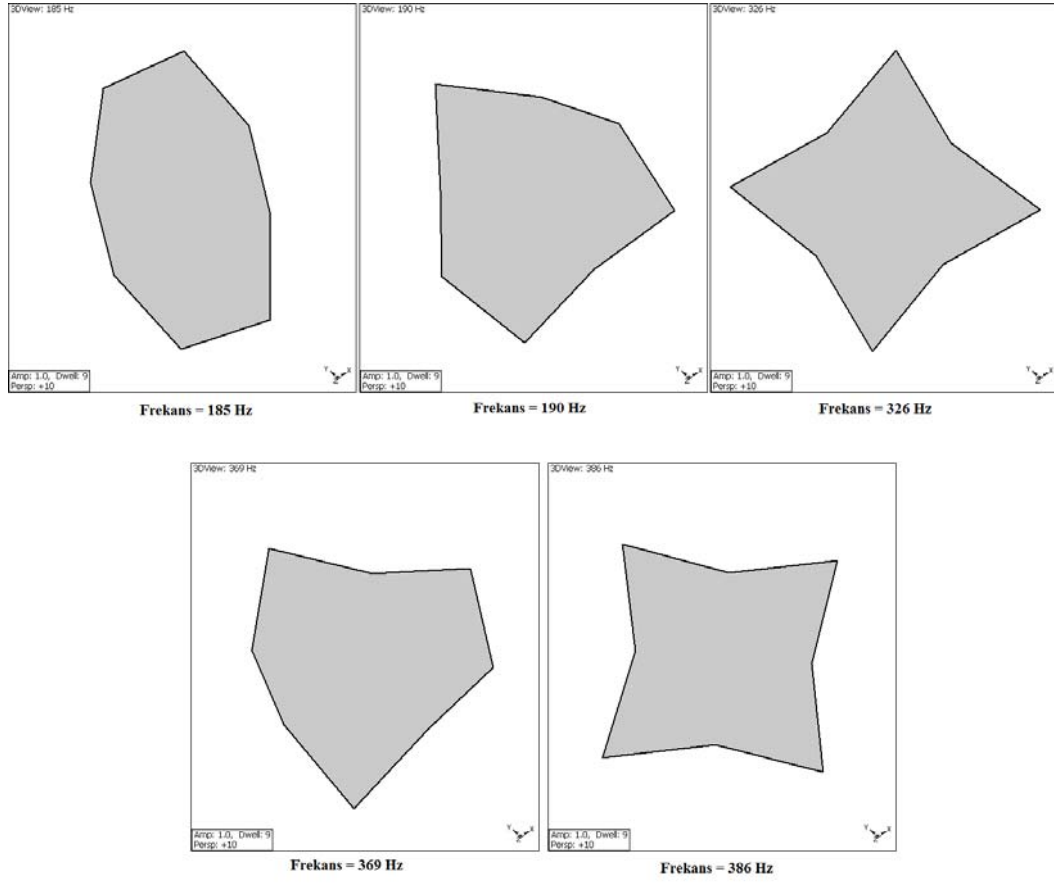
Şekil 3.18 Nokta 6'nın detaylı frekans cevap eğrisi

Ölçüm yapılan kesitteki 8 noktanın değerleri PULSE modal ve yapısal analiz programı Me'scopeVES tarafından işlenmiştir ve mod şekilleri Şekil 3.19 da görüldüğü gibi elde edilmiştir. Ayrıca PULSE Lab/Shop ve modal ve yapısal analiz programı Me'scopeVES yazılımlarının data işleme ve mod şekli çıkarma ara yüzlerinin görüntüleri de Şekil 3.20 ve 3.21 de verilmiştir.

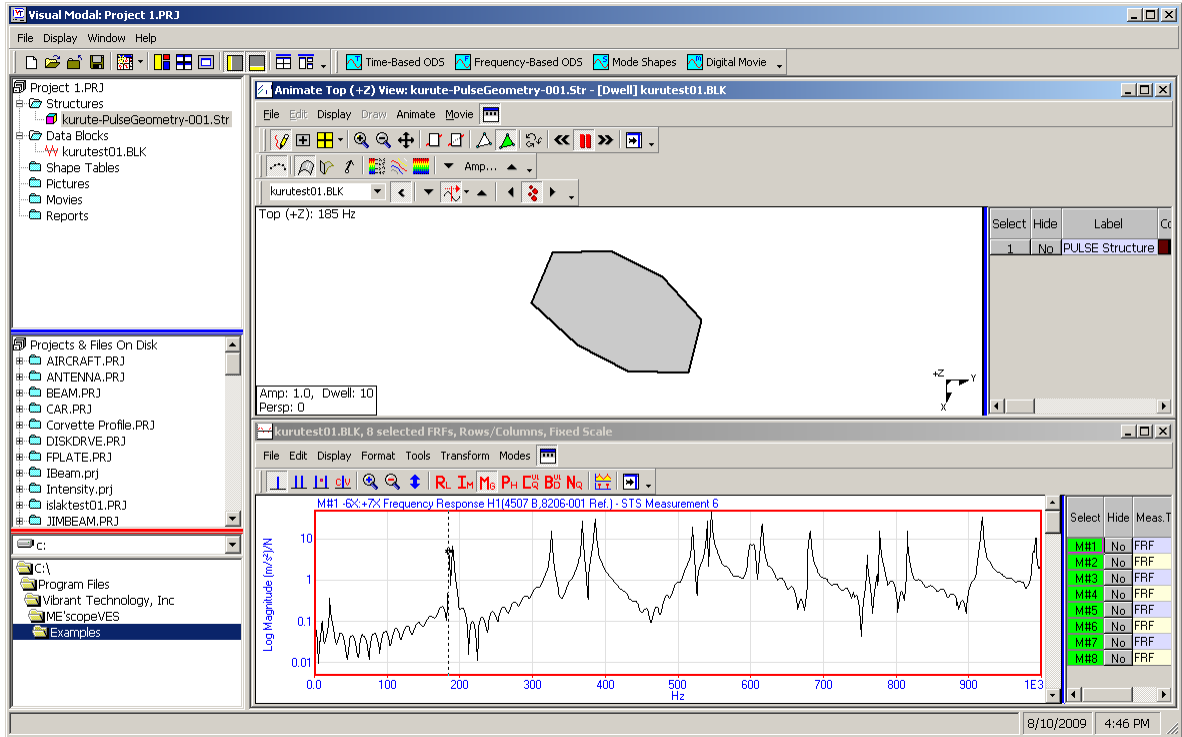
Elde edilen deney sonuçları Çizelge 3.1'de toplu halde verilmiştir. Çizelgede görülen frekans değerleri ilk beş titreşim mod'u için verilmiştir. Titreşim modları, silindirik kabuk için  $m$  ve  $n$  dalga sayıları ile tarif edilmektedir.  $n$  silindirin etrafındaki çevresel tam dalga sayısını,  $m$  ise silindirin boyunca olan yarım dalga sayısını göstermektedir. Örnek olarak ilk titreşim modu olan ( $m=1$ ,  $n=2$ ) için silindirin çevresi etrafında iki adet tam dalga, silindir boyunca ise bir adet yarım dalga yer almaktadır.

Çizelge 3.1 Kuru halde ölçülen frekans değerleri

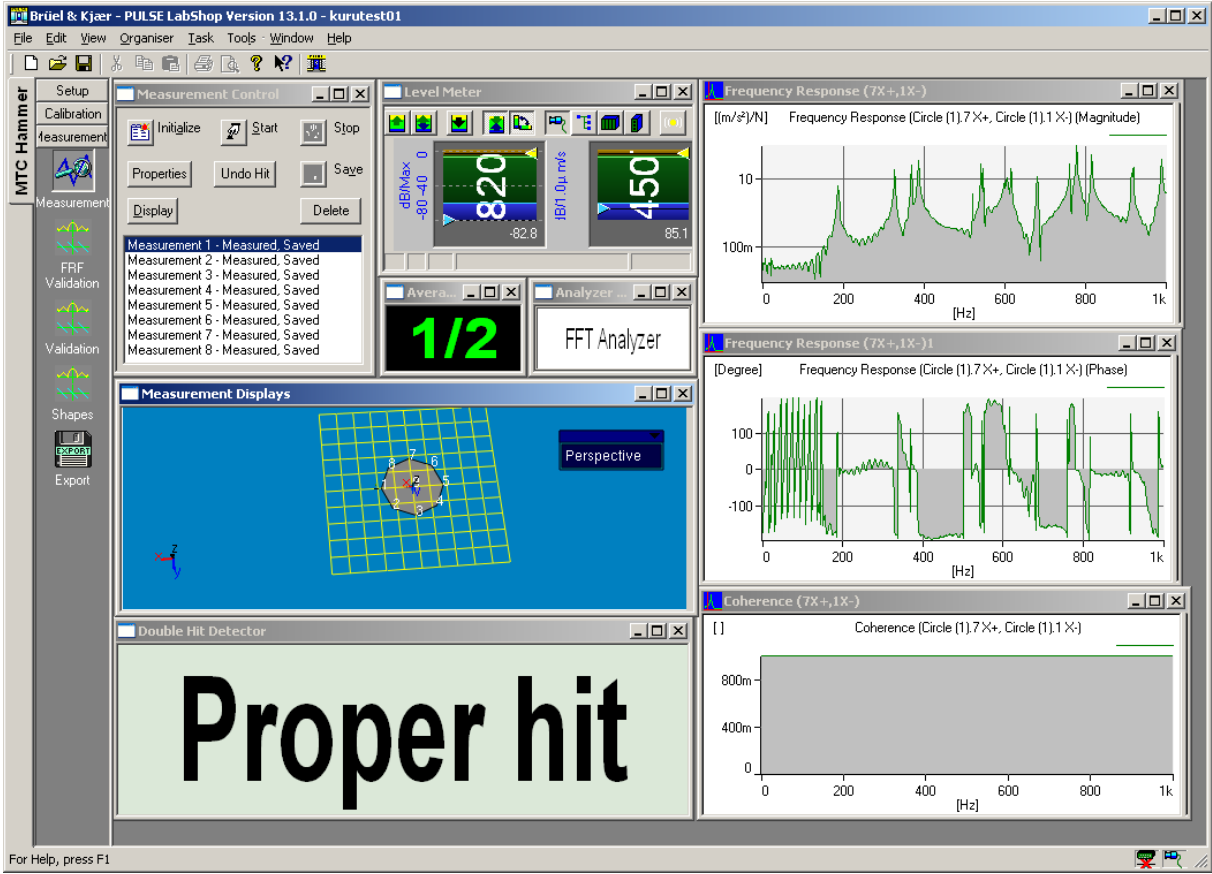
Titreşim Modu ( $m,n$ )	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(2,3)	(2,4)
Deney (Hz)	185	190	326	369	386



Şekil 3.19 Ölçüm yapılan kesitin mod şekilleri



Şekil 3.20 Modal ve yapısal analiz programı Me'scopeVES Arayüzü

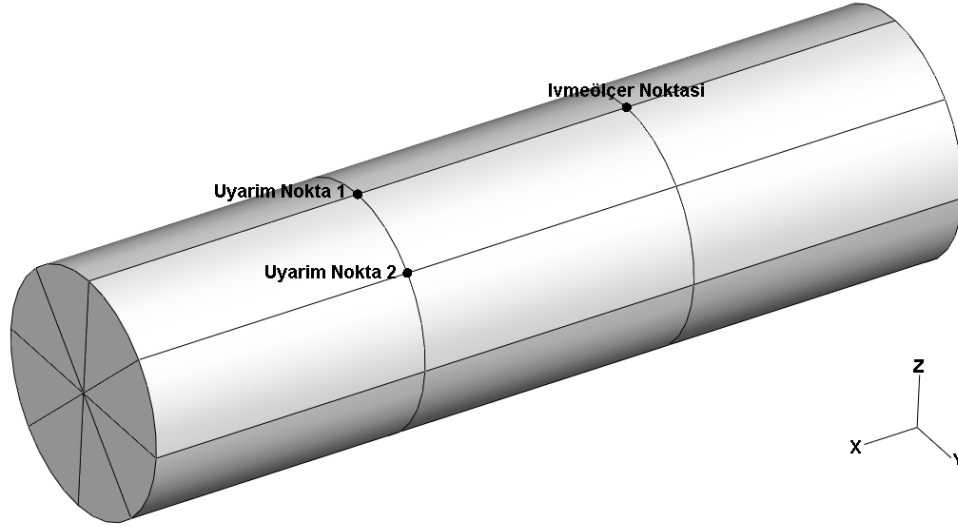


Şekil 3.21 PULSE Lab/Shop yazılımı arayüzü

### 3.4.2 Silindir Islak Hal Deneyleri

Silindirin ıslak haldeki deneylerin yapılması için İTÜ Gemi inşaatı ve Deniz bilimleri fakültesi Ata Nutku deney laboratuvarındaki stabilite tankı kullanılmıştır. Tankın boyu 2.5 metre genişliği 1.5 metre ve su derinliği yaklaşık 1 metredir.

Islak haldeki mod şekillerinin bulunması için çekicin veya ivmeölçerin su içine daldırılması gereklidir. Ancak elimizdeki ekipmanın su altında çalışmıyor olması nedeni ile ıslak halde mod şekli bulunması işlemi yapılmamıştır. Silindirin sadece rezonans frekanslarının bulunması amaçlanmıştır. Rezonans frekanslarının mod şekilleri ise bir sonraki kısımda yapılacak olan sayısal çalışmalardan çıkacak mod şekilleri ile kıyaslanarak tanımlanacaktır. Ölçüm için model boyunun 3 de birine ve modelin kuru olan kısmına ivmeölçer yapııştırılmıştır. Buna karşılık iki farklı yerden çekiçle uyarım verilerek cevaplar elde edilmiştir. Ölçüm yeri ve çekiç vurma yerleri Şekil 3.22 de görülebilmektedir.



Şekil 3.22 Islak deney için ölçüm ve uyarım noktaları

İki farklı ıslak durum için deney yapılmıştır. Bunlar;

- Silindirik kabuğun kendi ağırlığı ile serbest yüzme durumu. Su çekimi 121 mm.
- Silindirik kabuğun yarı batırılmış durumu. Su çekimi 180 mm.

#### 3.4.2.1 Silindirik Kabuğun Kendi Ağırlığı ile Yüzme Durumu

Silindirik kabuk kendi ağırlığı olan 38 kg ile serbest olarak yüzmeye bırakılmıştır. Bu durumda su çekimi 121 mm olarak ölçülmüştür. Silindir suda serbest yüzerken yapılan deneyden bir fotoğraf Şekil 3.23 de görülebilir.

Nokta 1 ve nokta 2 ye darbe çekici ile verilen uyarımların ivmeölçerdeki frekans cevap fonksiyon eğrileri Şekil 3.24 de üst üste görülebilmektedir. Bu frekans cevap eğrilerinden silindirin *ıslak* titreşim frekansları elde edilmiştir ve Şekil 3.24 üzerinde işaretlenmiştir. Bu rezonans titreşim frekanslarının mod şekilleri ile ilgili yorumlar bir sonraki bölümde sayısal çalışmaların sonuçları ile birlikte yapılacaktır.

*Islak* titreşim frekansları Çizelge 3.2’de toplu halde görülebilmektedir.

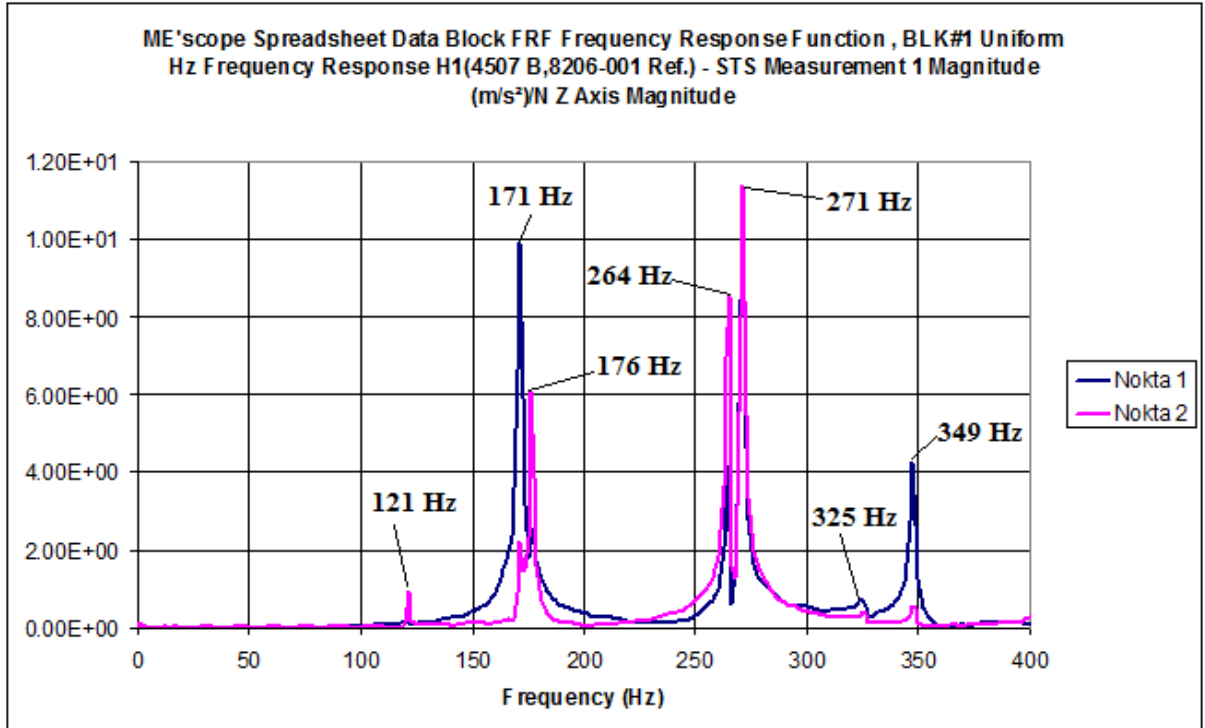
Çizelge 3.2 Islak halde ölçülen frekans değerleri (Su çekimi = 121 mm)

Titreşim Modu	1	2	3	4	5	6	7
Deney (Hz)	121	171	176	264	271	325	349





Şekil 3.23 Islak deneyin yapım aşamasından bir görüntü



Şekil 3.24 Islak haldeki (121 mm) frekans cevap spektrumu

### 3.4.2.2 Silindirik Kabuğun Yarı Batırılmış Durumu

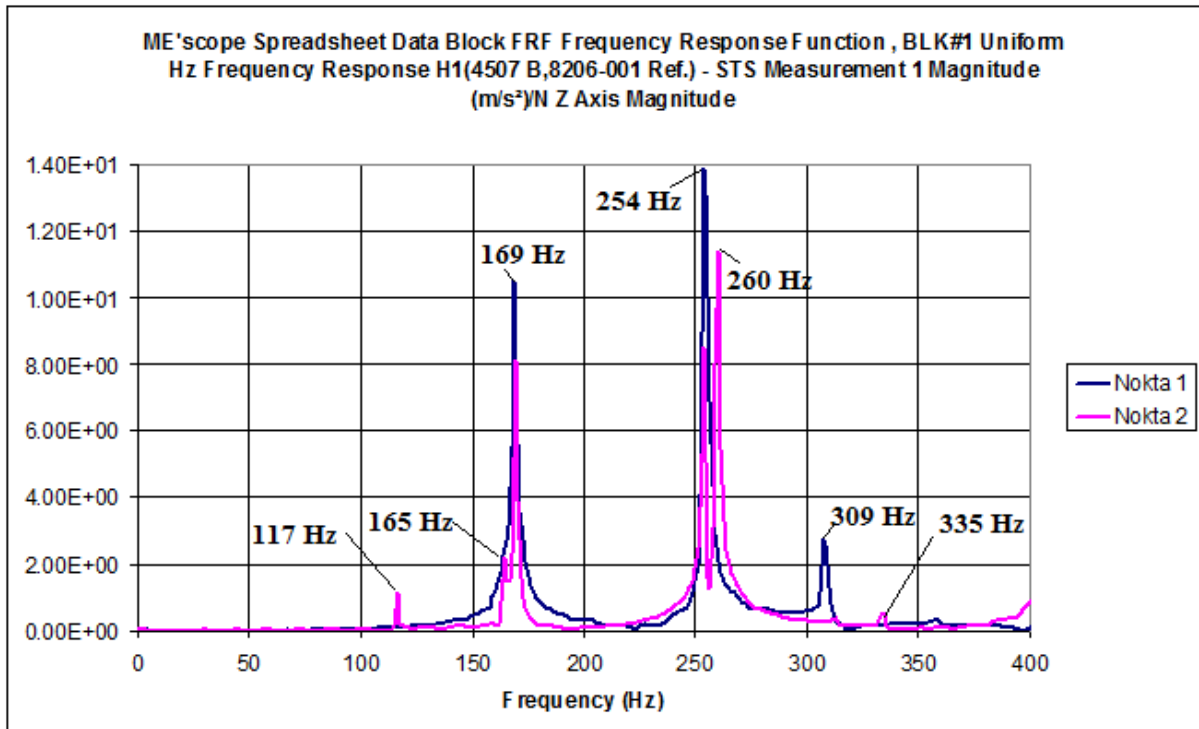
İkinci deneyde silindirik kabuk su çekimi 180 mm olacak şekilde yarısına kadar batırılmıştır. Silindir kabuğun 180 mm seviyesindeki su çekimi model üzerinde işaretlendikten sonra iki ucundaki mapalardan bastırılarak modelin 180 mm su çekimine batırılması sağlanmıştır ve aynı deney tekrarlanmıştır.

Nokta 1 ve nokta 2 ye darbe çekici ile verilen uyarımların ivmeölçerdeki frekans cevap fonksiyon eğrileri Şekil 3.25 de üst üste görülebilmektedir. Bu frekans cevap eğrilerinden silindirin *ıslak* titreşim frekansları elde edilmiştir ve Şekil 3.25 üzerinde işaretlenmiştir. Bu rezonans titreşim frekanslarının mod şekilleri ile ilgili yorumlar bir sonraki bölümde sayısal çalışmaların sonuçları ile birlikte yapılacaktır.

*Islak* titreşim frekansları Çizelge 3.3’de toplu halde görülebilmektedir.

Çizelge 3.3 Islak halde ölçülen frekans değerleri (Su çekimi = 180 mm)

Titreşim Modu	1	2	3	4	5	6	7
Deney (Hz)	117	165	169	254	260	309	335



Şekil 3.25 Islak haldeki (180 mm) frekans cevap spektrumu

### 3.5 Tartışmalar

Deneysel çalışmalar için dizayn ve imal edilen model, iki ucu dairesel plakalar ile kapatılmış silindirik bir kabuktur. Modelin boyutları,  $L = 1284$  mm, iç yarıçap,  $R = 180$  mm ve plaka kalınlığı  $t = 3$  mm. Modelin imalatında kullanılan malzeme, paslanmaz çelik AISI 316L'dir.

Modelin kuru ve iki farklı su çekiminde yüzme durumları için deneyler yapılmıştır. Deneylerde silindirin uçlarında bulunan kapakların tepkisel cevapları incelenmediğinden onlar için bir ölçüm yapılmamıştır.

Kuru haldeki deneyler için, silindir, uçlarındaki kapaklarda bulunan bağlantılardan desteklenerek basit mesnet sınır şartı elde edilmiştir. Bu destekleme durumunun silindirin serbest titreşim frekansları üzerinde herhangi bir etki yapmayacağı kabul edilmiştir. Kuru haldeki deneyin sonucunda hem doğal frekans değerleri hem de bir en kesitteki mod şekillerini elde edilmiştir. Bu değerler daha sonra Abaqus yazılımı içerisinde modellenen silindirin vakumdaki analiz sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

Islak deneyler stabilite tankı içerisinde yapılmıştır. Tankın boyu 2.5 metre, genişliği 1.5 metre ve su derinliği yaklaşık 1 metredir. Deneyler, silindiri tankın ortasında konumlandırarak yapılmaya çalışılmıştır. Elimizdeki titreşim ölçme çekicinin ve ivmeölçerin su içerisinde çalışmaması nedeni ile kısıtlı deneyler yapılabilmektedir. Bu nedenle ıslak deneylerde mod şekli çıkarma işlemi yapılmamıştır. İvmeölçer modelin kuru kısımlarında konumlandırılarak frekans cevap eğrisi çıkarılmıştır ve frekanslar elde edilmeye çalışılmıştır. Frekans mod şekilleri ise bir sonraki bölümde anlatılacak olan sayısal hesaplamalar sonucunda elde edilen mod şekilleri ile eşleştirilecektir.

Islak deneylerdeki bu kısıtlamalar ve ivmeölçerin deney esnasındaki konumu nedeni ile bazı mod şekillerinin ölçülemediği görülmüştür.

#### 4. SİLİNDİRİK KABUK HİDRO-ELASTİK HESAPLARI

Aşağıda detayları verilmiş elastik silindirik kabuğun deneysel modelinin, kuru haldeki ve iki farklı su çekimi durumunda ıslak olarak yüzme halindeki deney sonuçları Bölüm 3’de detaylı olarak verilmiştir. Silindir kabuğun detayları aşağıdaki gibidir;

- Tam boy = 1284 mm,
- İç yarıçap = 180 mm,
- Kalınlık = 3 mm,
- Malzeme = AISI 316L,
- Yoğunluk = 7850 kg/m<sup>3</sup>,
- Young modülü = 206000 N/mm<sup>2</sup>
- Poisson oranı = 0.29

Bölüm 1.2.3 ve Bölüm 2.2’de detayları verildiği gibi, akışkan alanının üç boyutlu lineer sonlu elemanlar ile ve yapının da üç boyutlu lineer kabuk elemanlar ile birleşik olarak modellenmesi ile Abaqus sonlu elemanlar yazılımı içerisinde akışkan-yapı etkileşim analizi yapılabilmekte ve sonuçta hidro-elastik titreşim karakteristikleri elde edilebilmektedir.

İTÜ Gemi inşaatı ve deniz bilimleri fakültesinde geliştirilen ve Bölüm 1.2.2 ve Bölüm 2.3’de detayları verilen *hibrit* hidro-elastisite yöntemi ile yapının vakumdaki dinamik analizi için lineer bir sonlu elemanlar yöntemi kullanılması ve akışkan-yapı etkileşimi için ise sınır elemanlar yönteminin kullanılması ile akışkan-yapı etkileşimi çözülebilmektedir.

Abaqus yazılımı içerisinde silindir kabuğun vakumdaki ve iki farklı su çekimi durumunda ıslak olarak yüzme halindeki modelleri kurulmuştur. Yapılan analizlerin sonuçları Bölüm 3’deki deney sonuçları ile ve *hibrit* hidro-elastisite yöntemi ile yapılan analizlerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca silindirin tam batmış halindeki analizleri de yapıp Ergin, Price, Randall ve Temarel (1992) tarafından benzer model için yapılmış deney sonuçları, sayısal ve analitik çözümlerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Abaqus yazılımı içerisinde kurulan sonlu eleman modellerinde, silindir kabuk için modelde kullanılan eleman S4 isimli Abaqus dörtgen kabuk elemanıdır. Plaka kalınlığının arttığı durumlarda kalın kabuk (thick shell) teorisini ve kalınlığın az olduğu durumlarda ise otomatik olarak Kirchoff ince kabuk elemanı (discrete Kirchoff thin shell element) teorisi kullanılır. Bu

eleman ayrıca kesme deformasyonuna izin verebilmektedir. Bu eleman 3 veya 4 düğüm noktalı genel amaçlı gerilme/yer değiştirme elemanıdır ve her düğüm noktasında 6 serbestlik derecesi bulunur.

Silindirik kabuğun sonlu elemanlar modelinde kapaklar hariç silindirik kabuk üzerinde 1600 adet sonlu eleman bulunmaktadır. Kapaklar ile birlikte toplamda 1880 adet dörtgen sonlu eleman bulunmaktadır.

Silindirin etrafındaki su hacminin modellenmesinde kullanılan akışkan elemanı Abaqus AC3D elemanıdır. Detayları Bölüm 2.2’de verilen bu eleman, teorisi Zienkiewicz ve Newton (1969)’un tarafından sunulan dinamik basınç serbestlik dereceli bir akışkan elemanıdır ve akışkan-yapı etkileşim problemlerinde kullanılır. Abaqus yazılımı içerisindeki bu akışkan elemanı “akustik” eleman olarak bilinmektedir. Bu elemanın kullanılması ile titreşim hareketi nedeni ile yapısal elemanlar üzerinde oluşan atalet kuvvetlerinden akışkan elemanı üzerinde oluşan basınç değerlerine geçilir. Böylece yapının ve akışkanın sonlu elemanlar ağı birbiri ile etkileşimli olarak çözülür.

Su hacmi için modellerde kullanılan toplam akışkan eleman sayısı aşağıda verilmiştir;

- Su çekimi = 121 mm durumu için, 12150 adet AC3D akışkan elemanı,
- Su çekimi = 180 mm durumu için, 13846 adet AC3D akışkan elemanı,
- Tam batmış durum için 27200 adet AC3D akışkan elemanı.

Silindirik kabuk ıslak yüzeyi ile su arasındaki yüzeyler birbirleri arasında Abaqus yazılımının bir özelliği olan *Tie* özelliği ile bağlanmıştır ve suyun serbest yüzey alanları üzerine sıfır basınç şartı tanımlanmıştır.

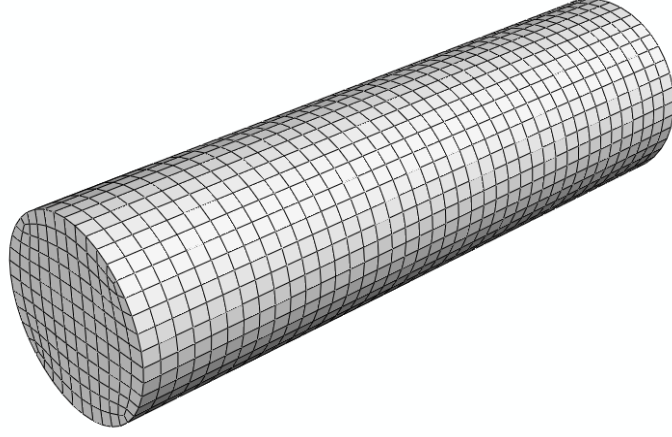
Analizlerde kullanılan su hacmi boyutu 6284 mm ye 5000 mm’dir ve suyun özellikleri şöyledir;

- Bulk Modülü =  $2100 \text{ N/mm}^2$ ,
- Yoğunluk =  $1000 \text{ kg/m}^3$

Analizlerde kullanılacak optimum eleman boyutlarının belirlenebilmesi için ayrıca yakınsaklık analizleri de yapılmıştır. Optimum yapısal eleman boyutu için kuru haldeki modelde ve optimum akışkan elemanı boyutu için tam batmış haldeki modelde yapılan yakınsaklık analizlerinin detayları Bölüm 4.5’de verilmiştir.

#### 4.1 Kuru Haldeki Analizler

Kuru haldeki analizlerde yapının, herhangi bir dış yük ve yapısal sönüm olmaksızın vakumda serbestçe titreşebildiği kabul edilmiştir. Silindirik kabuk sonlu elemanlar modeli Abaqus yazılımının içerisinde kurulmuştur. Sonlu elemanlar modeli Şekil 4.1’de görülebilir.

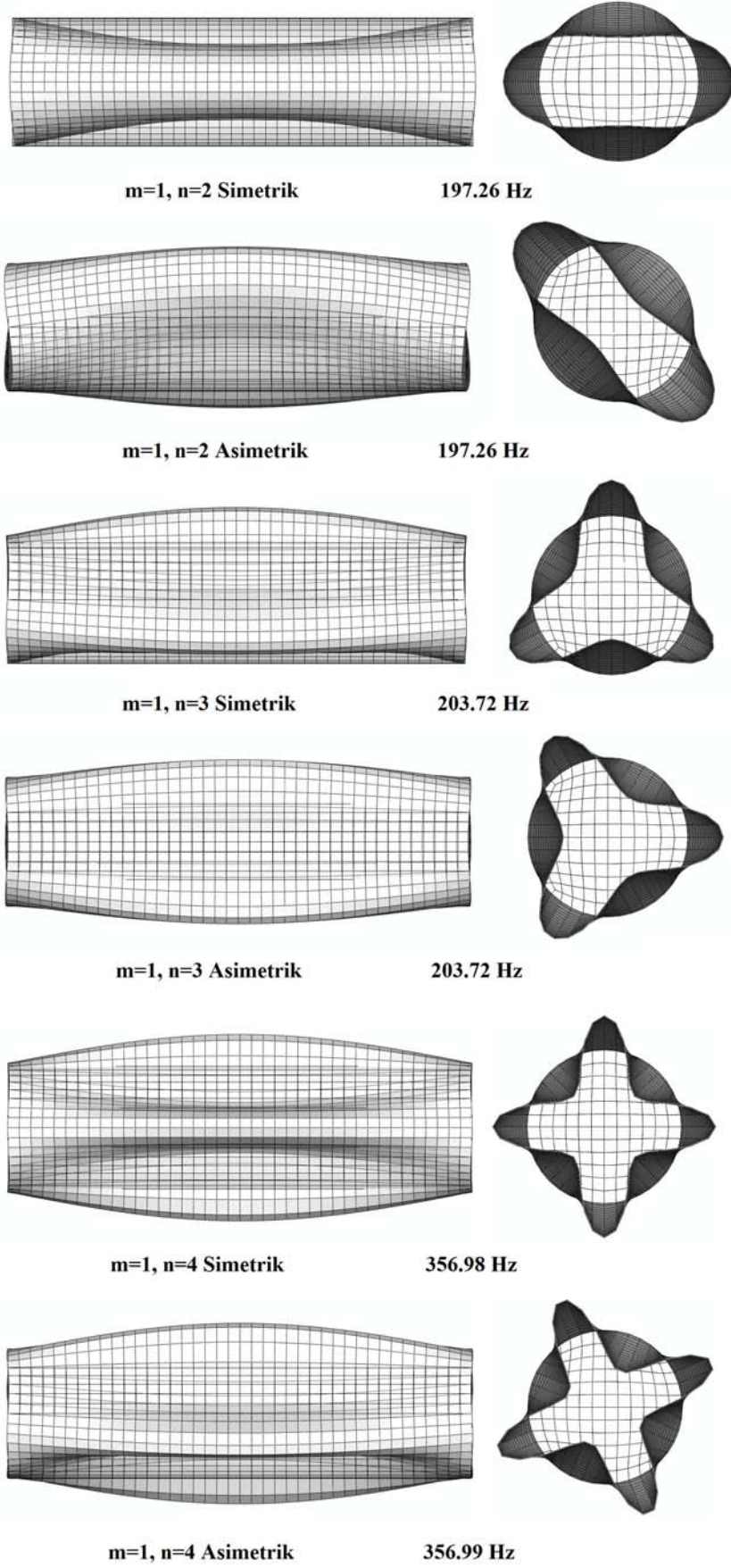


Şekil 4.1 Silindirik kabuk kuru hal sonlu elemanlar modeli

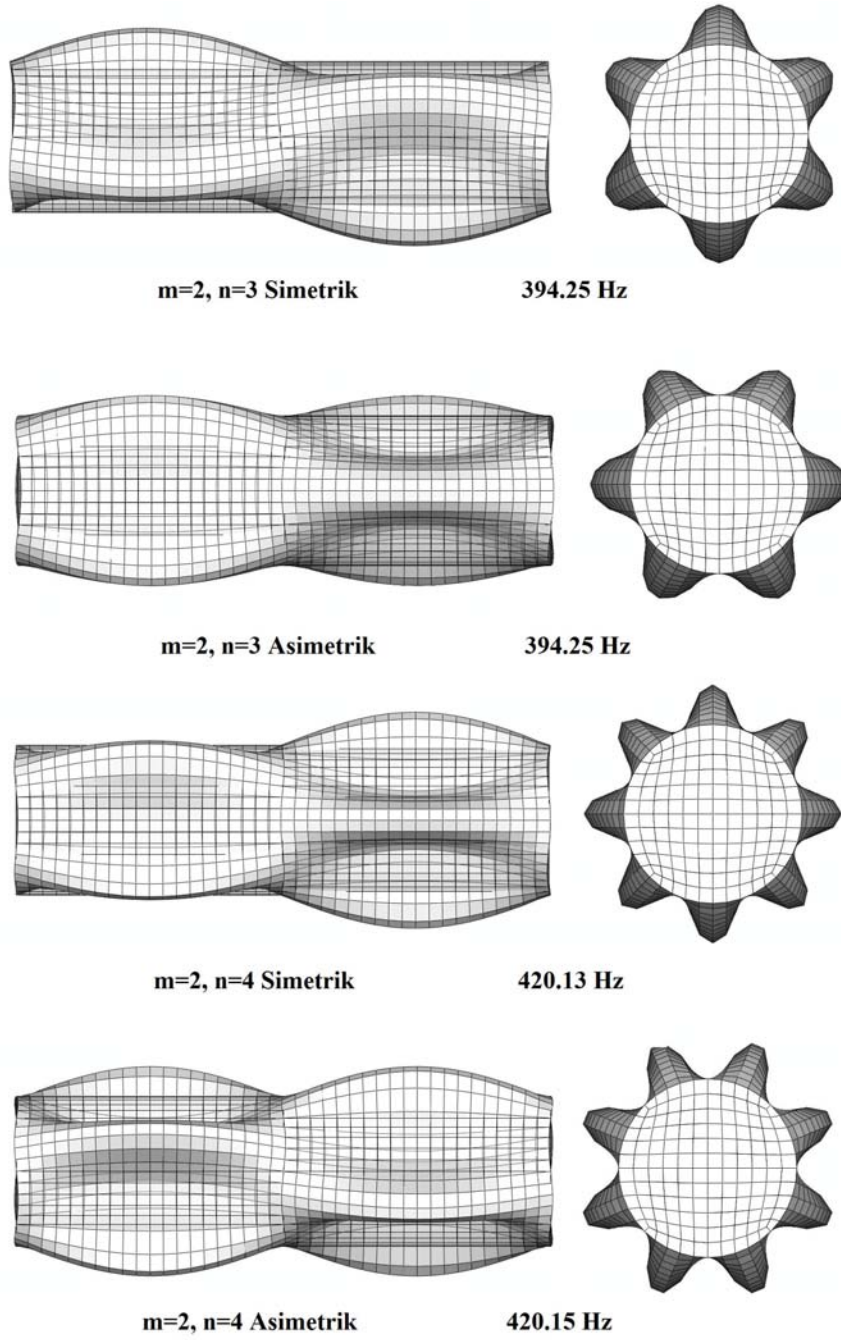
Sonlu elemanlar modelinde kapaklar hariç silindirik kabuk üzerinde 1600 adet sonlu eleman bulunmaktadır. Kapaklar ile birlikte toplamda 1880 adet dörtgen sonlu eleman bulunmaktadır.

Silindirik kabukların titreşim şekilleri,  $m$  ve  $n$  dalga sayıları ile tarif edilmektedir.  $n$  silindirin etrafındaki çevresel tam dalga sayısını,  $m$  ise silindirin boyunca olan yarım dalga sayısını göstermektedir. Örnek olarak ilk titreşim modu olan ( $m=1$ ,  $n=2$ ) için silindirin çevresi etrafında iki adet tam dalga, silindir boyunca ise bir adet yarım dalga yer almaktadır.

Abaqus yazılımı ile çözülen öz-değer problemi sonucunda hesaplanan öz-vektörler normalize edilmiş olarak Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de görülmektedir. Hesaplar sonucu elde edilen öz-vektörler arasında enerji geçişi olmamaktadır dolayısı ile ortogonallik bulunmaktadır. Hesaplanan frekansların Bölüm 3.4.1’deki deney sonuçları ile ve Ergin, Price, Randall ve Temarel (1992) tarafından yayınlanan makaledeki analitik sonuçlar ile karşılaştırması Çizelge 4.1’de görülebilir.



Şekil 4.2 Vakumdaki titreşim frekans ve şekilleri



Şekil 4.3 Vakumdaki titreşim frekans ve şekilleri

Çizelge 4.1 Vakumdaki titreşim frekanslarının deney ve analitik sonuçlarla karşılaştırması

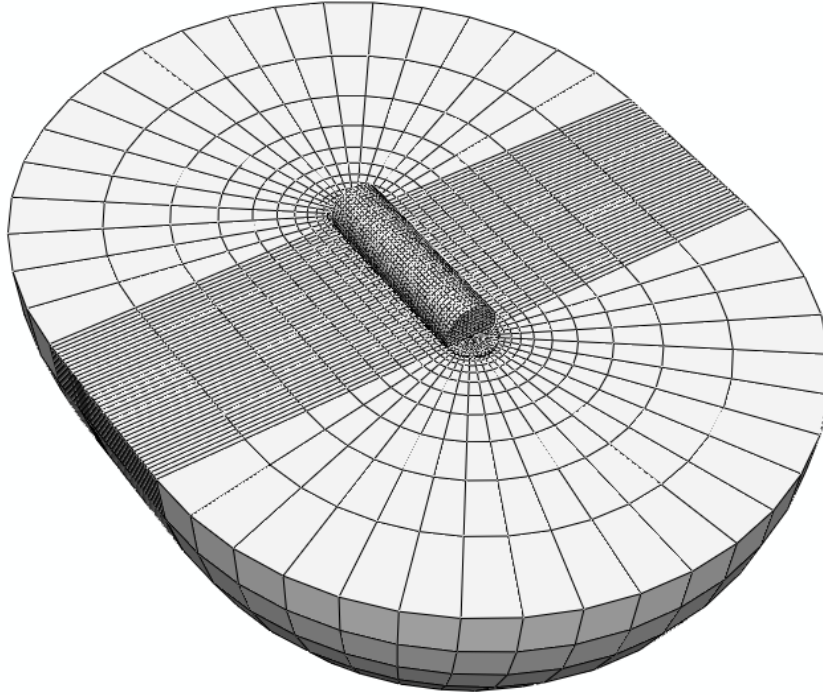
Titreşim Modu ( $m,n$ )	Deney (Hz)	Abaqus (Hz)	Analitik ( Hz)
(1,2)	185	197.26	198.6
(1,3)	190	203.72	203.5
(1,4)	326	356.98	349.5
(2,3)	369	394.25	392.6
(2,4)	386	420.13	412



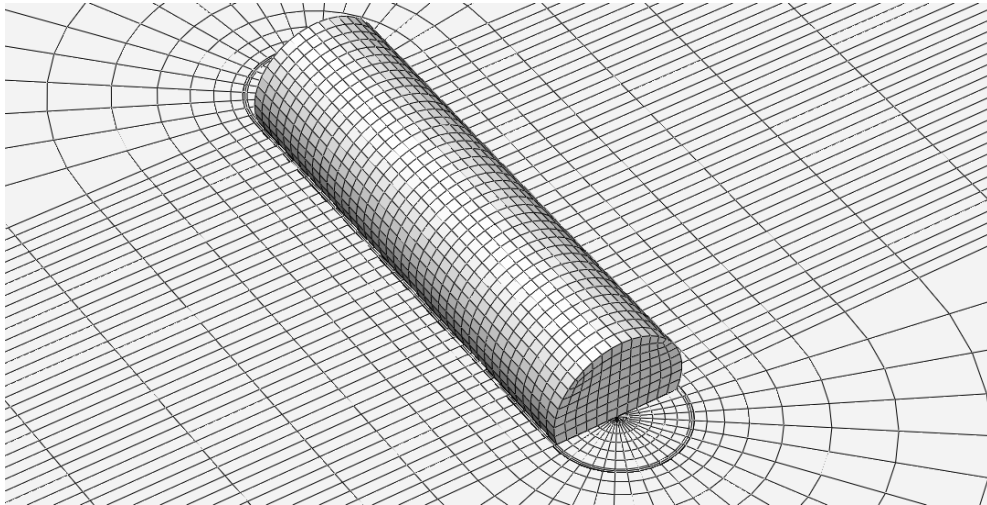
#### 4.2 Silindirik Kabuğun Yüzme Durumu Analizi (Su Çekimi = 121 mm)

Silindirik kabuk, su çekimi 121 mm ile batmış olarak Abaqus yazılımı içerisinde modellenmiştir. Sonlu elemanlar modeli Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6'da görülebilmektedir.

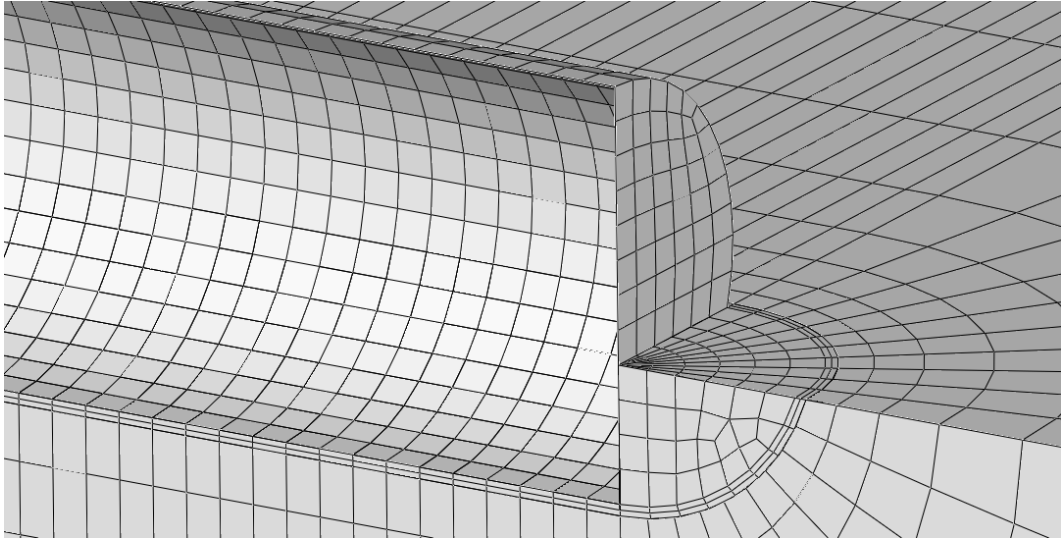
Analiz sonucunda elde edilen *ıslak* rezonans frekansları ve mod şekilleri Şekil 4.7, 4.8, 4.9 ve 4.10'da görülmektedir. Bölüm 3.4.2.1'de verilen deneysel sonuçlar ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması ise Çizelge 4.2'de görülebilmektedir.



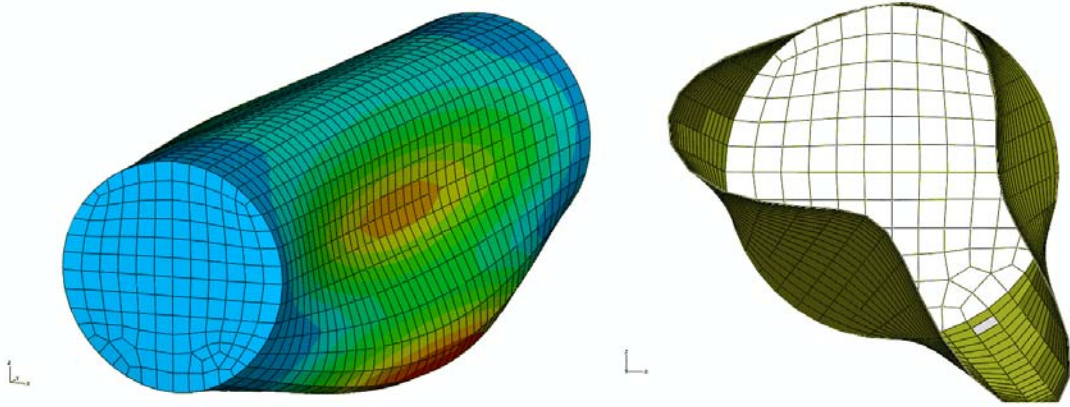
Şekil 4.4 Sonlu elemanlar ağı (Su Çekimi = 121 mm)



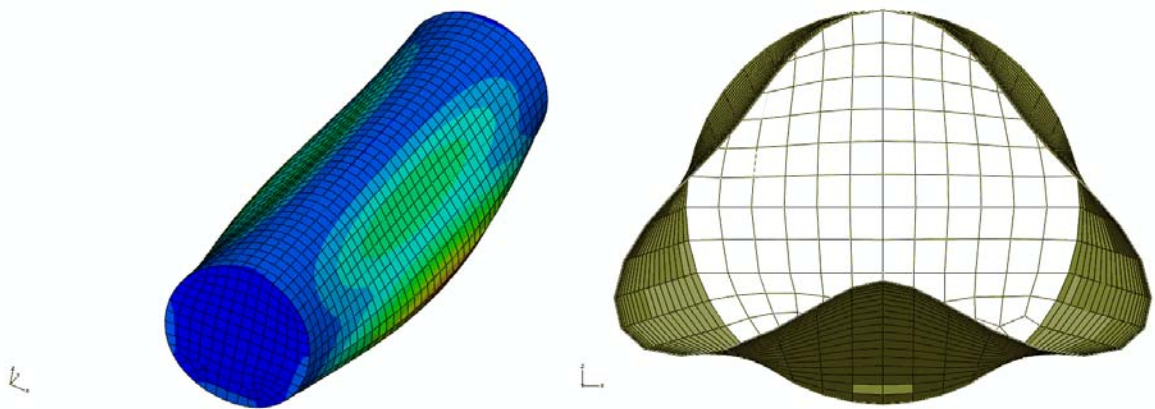
Şekil 4.5 Sonlu elemanlar ağı (Su Çekimi = 121 mm)



Şekil 4.6 Sonlu elemanlar ağı (Su Çekimi = 121 mm)

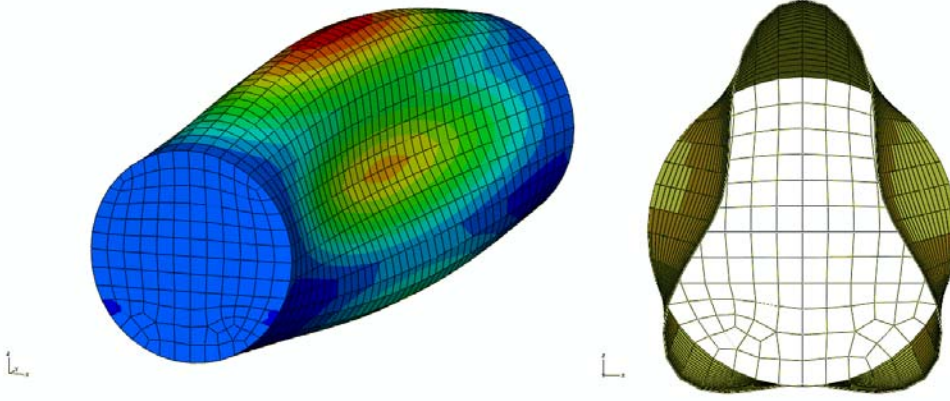


Frekans 124.00 Hz

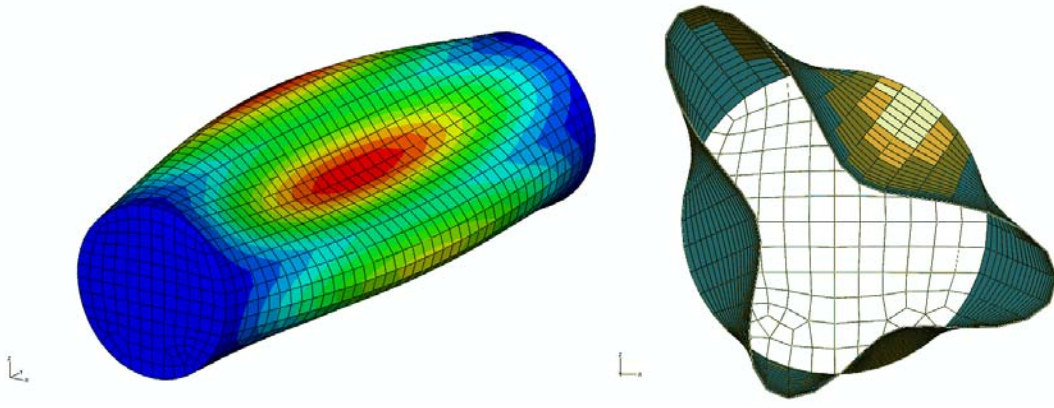


Frekans 131.95 Hz

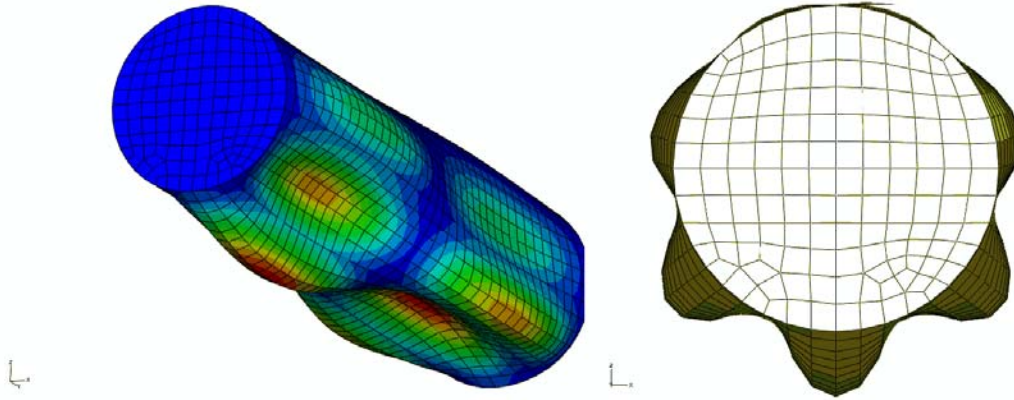
Şekil 4.7 Su çekimi 121 mm yüzme durumu için analiz sonuçları



Frekans 182.33 Hz

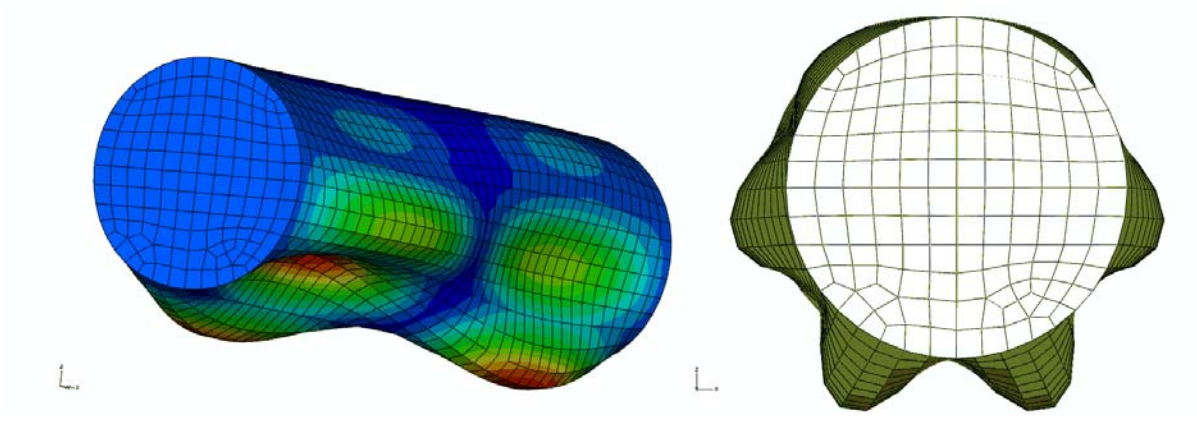


Frekans 191.02 Hz

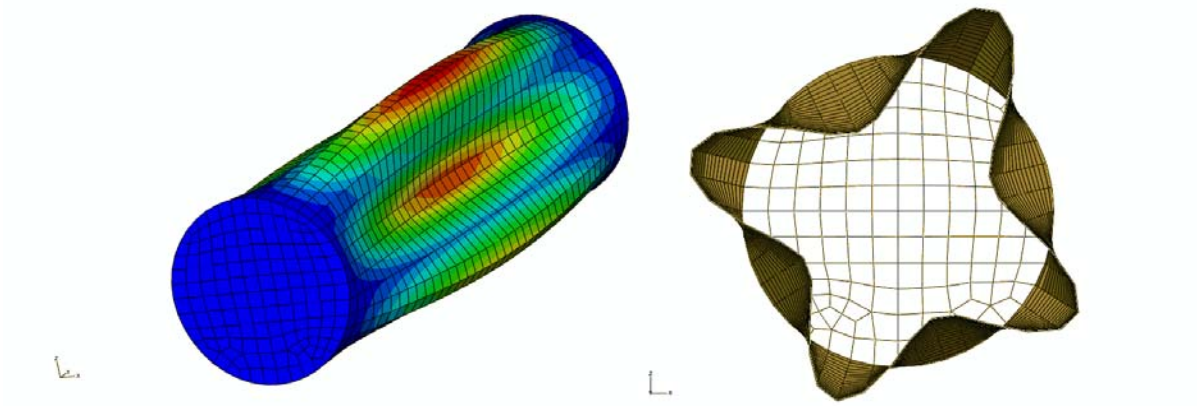


Frekans 253.72 Hz

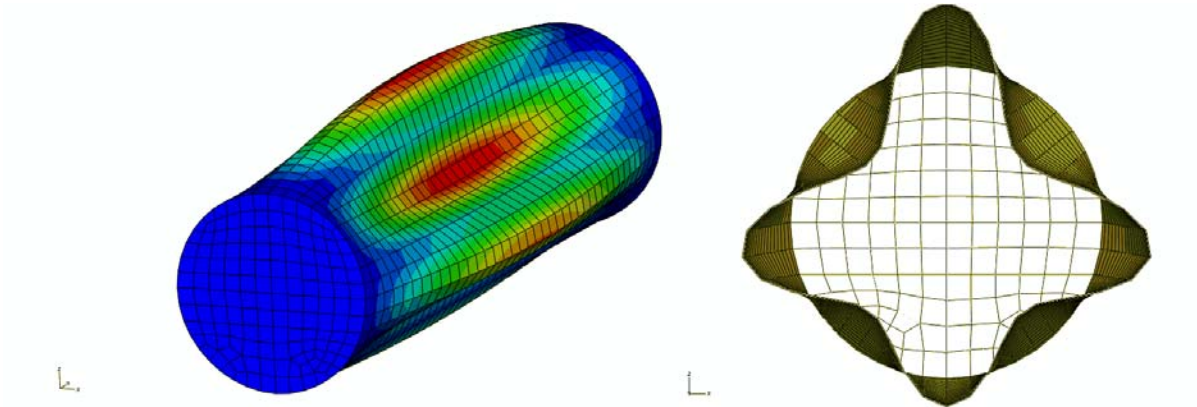
Şekil 4.8 Su çekimi 121 mm yüzme durumu için analiz sonuçları



Frekans 259.67 Hz

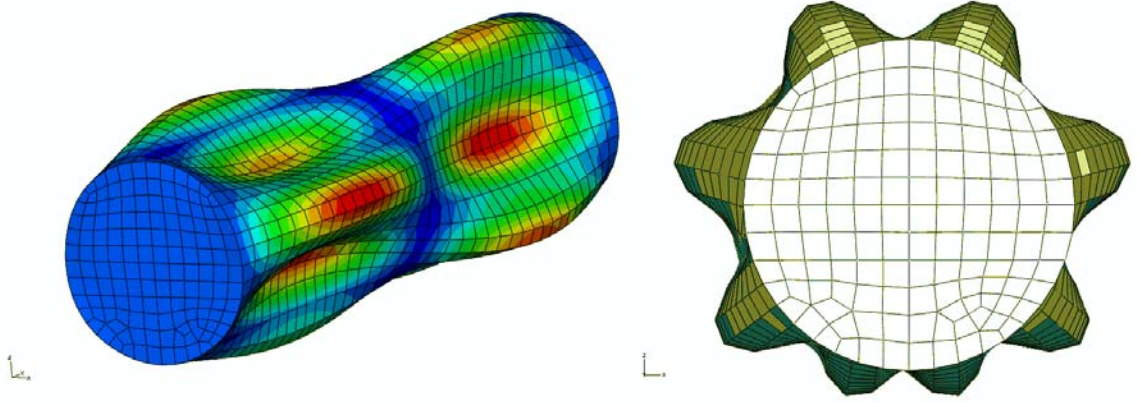


Frekans 289.60 Hz

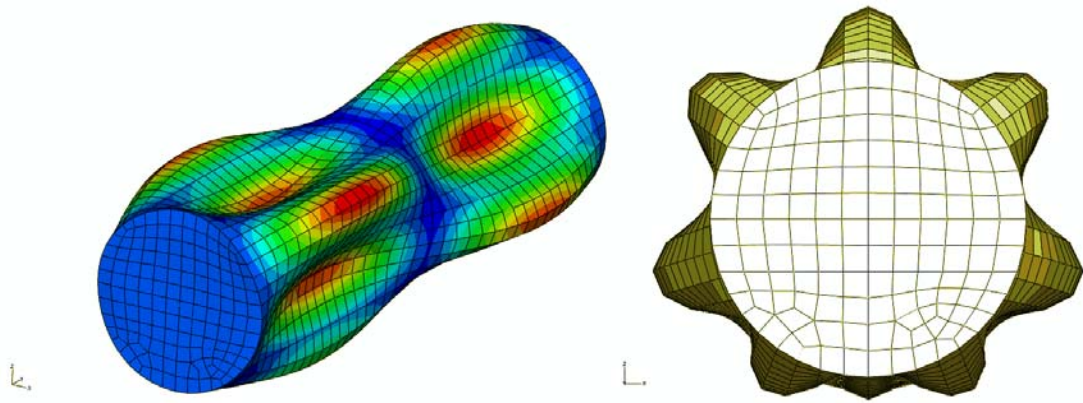


Frekans 295.05 Hz

Şekil 4.9 Su çekimi 121 mm yüzme durumu için analiz sonuçları



Frekans 356.80 Hz



Frekans 380.25 Hz

Şekil 4.10 Su çekimi 121 mm yüzme durumu için analiz sonuçları

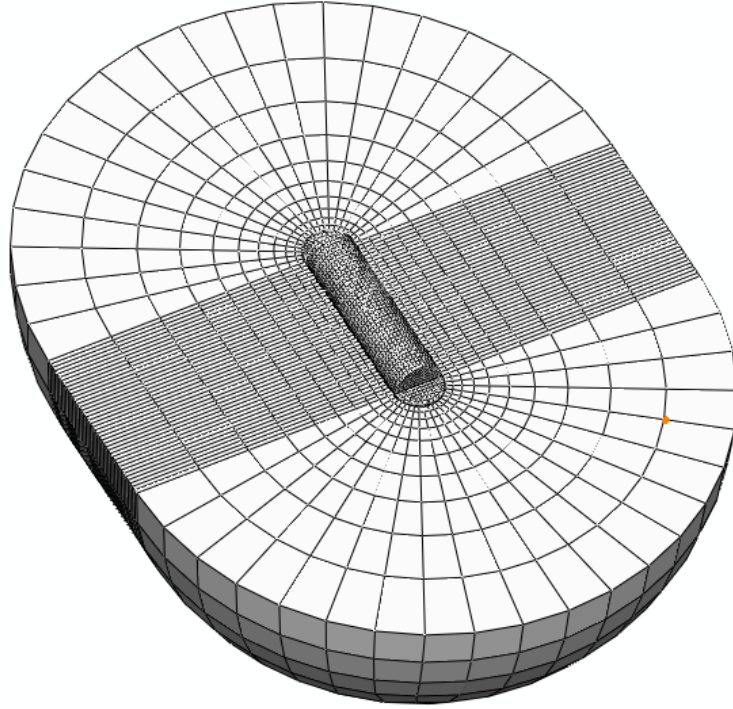
Çizelge 4.2 Su çekimi 121 mm yüzme durumunda sonuçların karşılaştırılması

Titreşim Modu ( $m,n$ )	Deney (Hz)	Sonlu Elemanlar (Hz)	Sınır Elemanlar (Hz)
m=1, n=3 Asimetrik	-	124.00	112.75
m=1, n=3 Simetrik	121	131.95	122.23
m=1, n=3 Simetrik	171	182.33	168.41
m=1, n=3 Asimetrik	176	191.02	183.38
m=2, n=3 Simetrik	-	253.72	246.78
m=2, n=3 Asimetrik	-	259.67	256.80
m=1, n=4 Asimetrik	264	289.60	280.53
m=1, n=4 Simetrik	271	295.05	286.39
m=2, n=4 Asimetrik	325	356.80	346.52
m=2, n=4 Simetrik	349	380.25	372.39

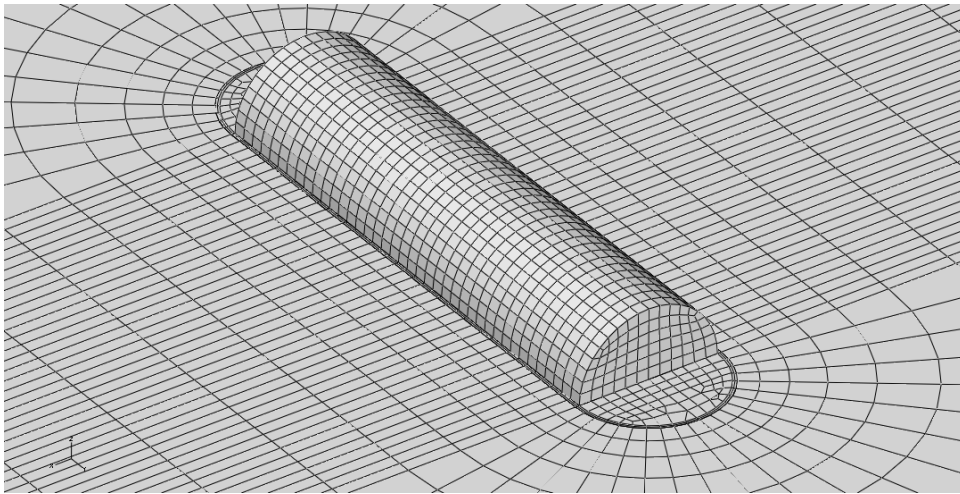
### 4.3 Silindirik Kabuğun Yüzme Durumu Analizi (Su Çekimi = 180 mm)

Silindirik kabuk, su çekimi 180 mm ile batmış olarak Abaqus yazılımı içerisinde modellenmiştir. Sonlu elemanlar modeli Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13’de görülebilmektedir.

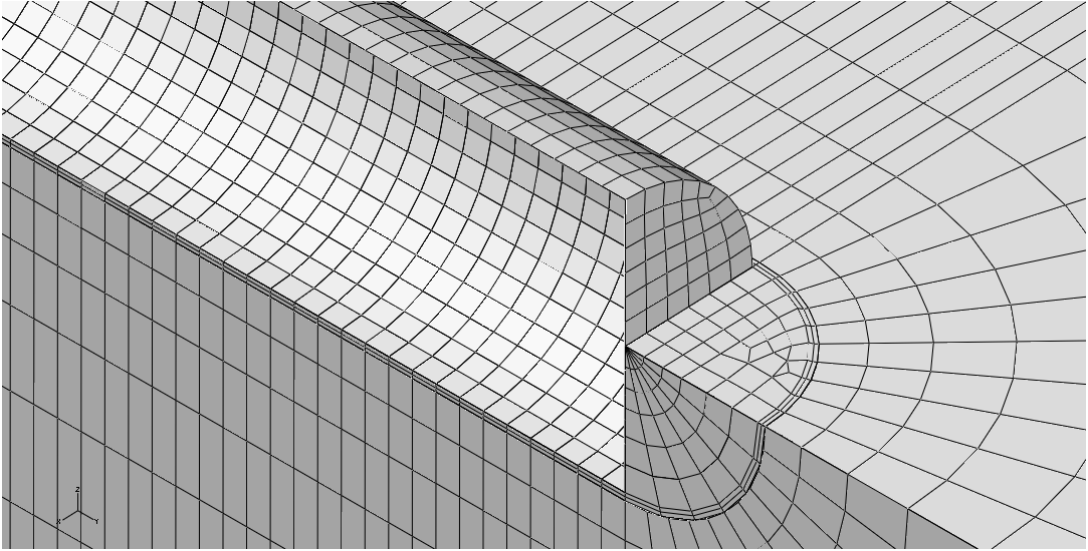
Analiz sonucunda elde edilen *ıslak* rezonans frekansları ve mod şekilleri Şekil 4.14, 4.15, 4.16 ve 4.17’de görülmektedir. Bölüm 3.4.2.1’de verilen deneysel sonuçlar ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması ise Çizelge 4.3’de görülebilmektedir.



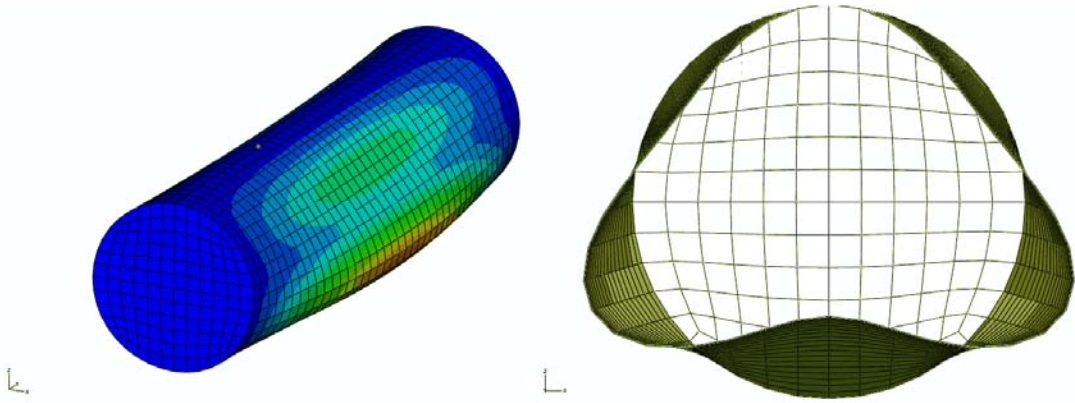
Şekil 4.11 Sonlu elemanlar ağı (Su Çekimi = 180 mm)



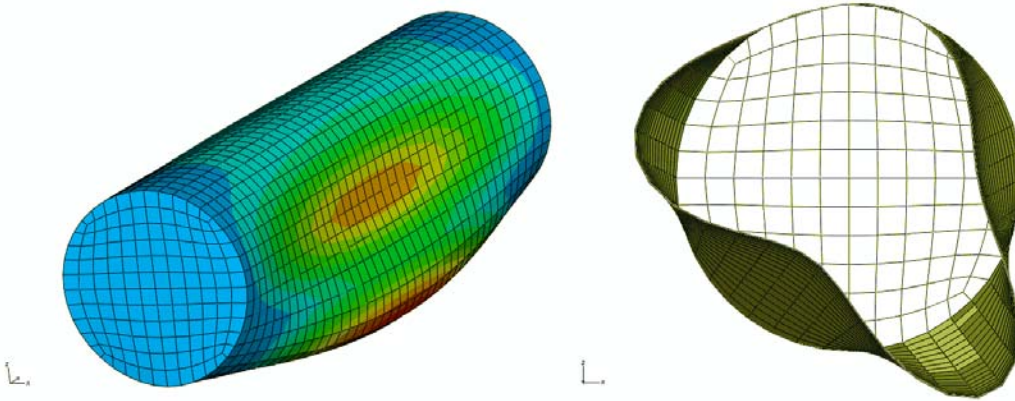
Şekil 4.12 Sonlu elemanlar ağı (Su Çekimi = 180 mm)



Şekil 4.13 Sonlu elemanlar ağı (Su Çekimi = 180 mm)

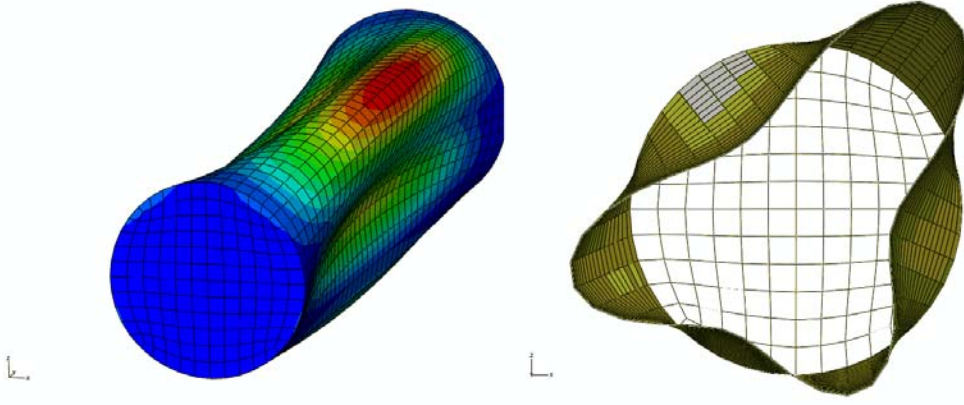


Frekans 117.71 Hz

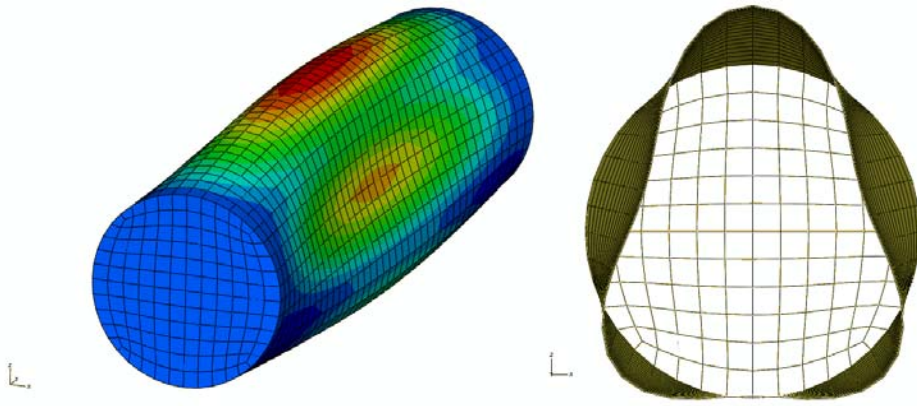


Frekans 122.09 Hz

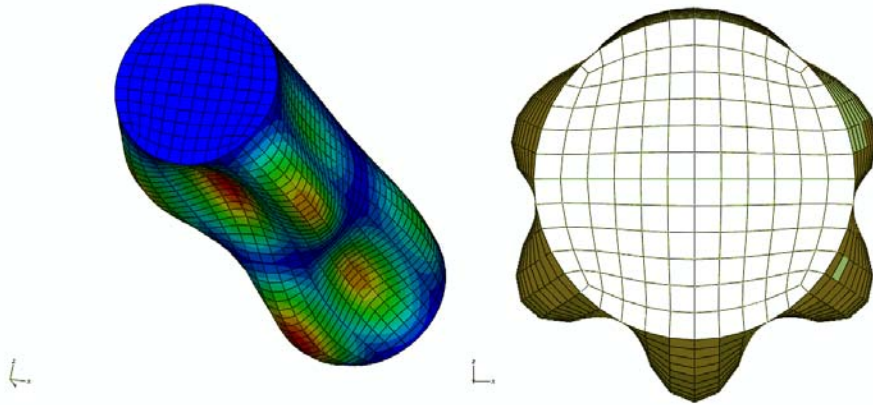
Şekil 4.14 Su çekimi 180 mm yüzme durumu için analiz sonuçları



Frekans 169.41 Hz



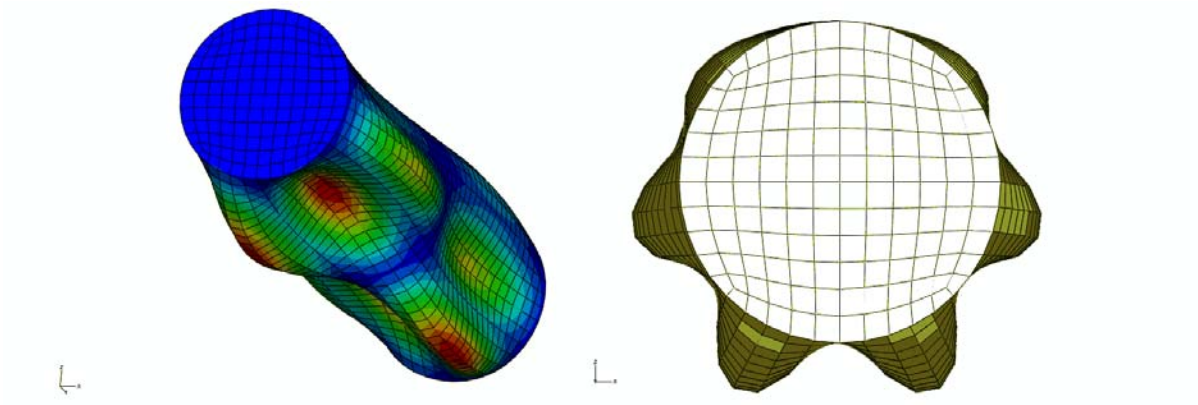
Frekans 179.99 Hz



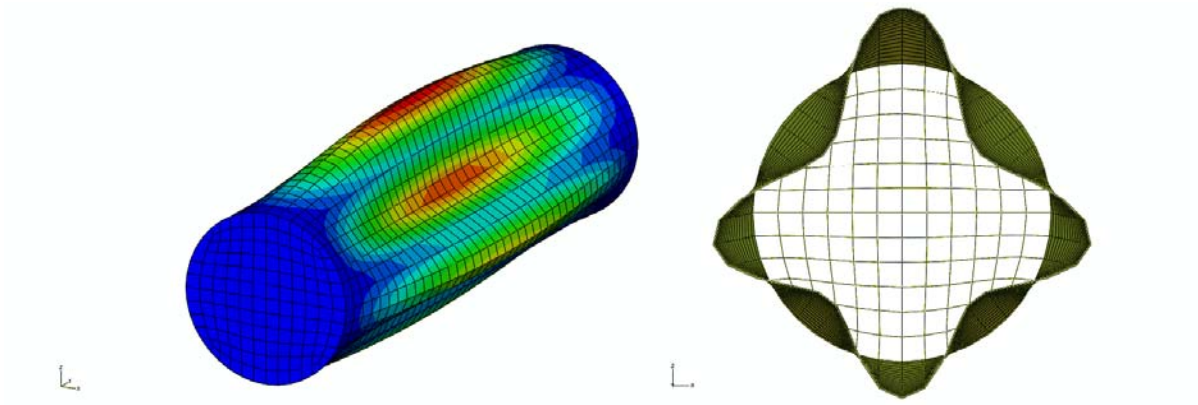
Frekans 242.38 Hz

Şekil 4.15 Su çekimi 180 mm yüzme durumu için analiz sonuçları

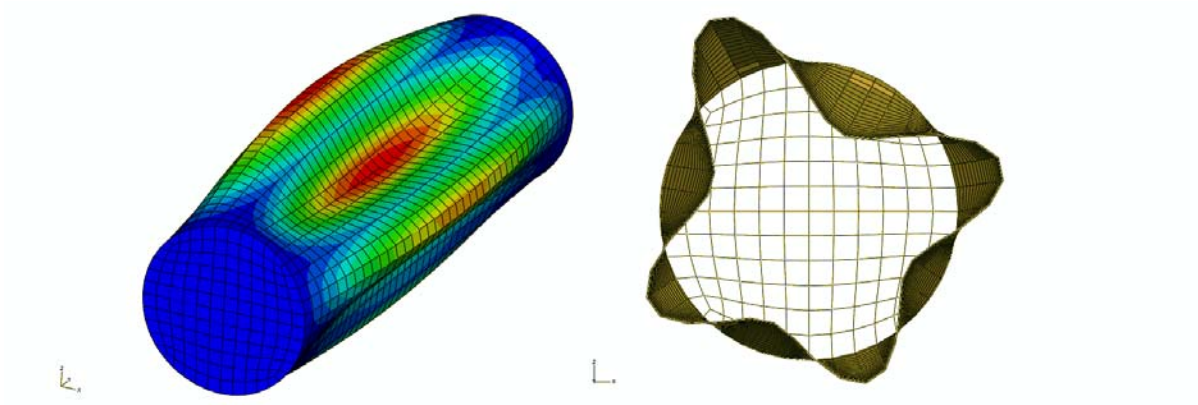




Frekans 247.55 Hz

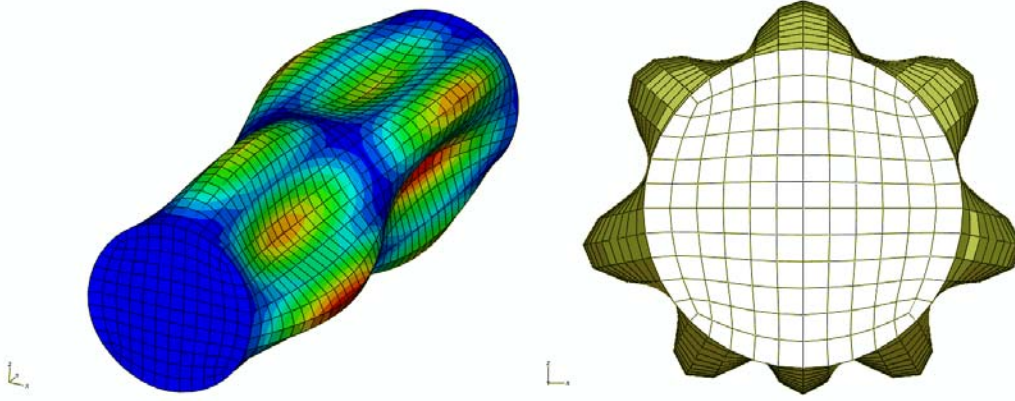


Frekans 277.04 Hz

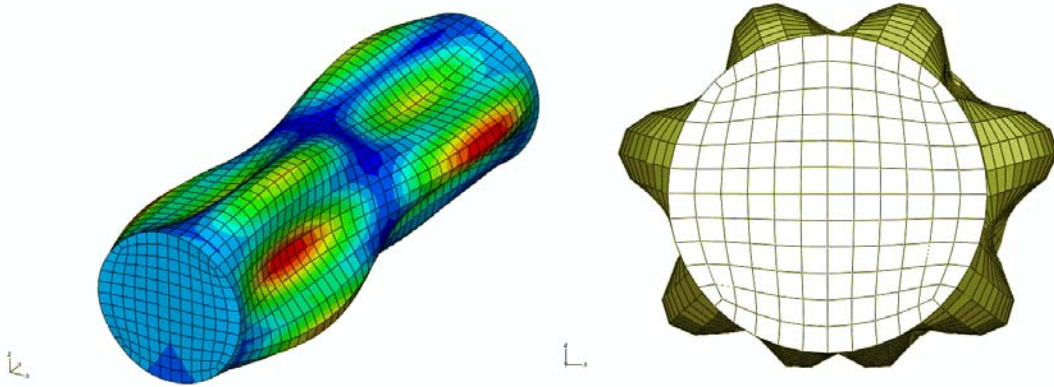


Frekans 280.31 Hz

Şekil 4.16 Su çekimi 180 mm yüzme durumu için analiz sonuçları



Frekans 333.45 Hz



Frekans 338.36 Hz

Şekil 4.17 Su çekimi 180 mm yüzme durumu için analiz sonuçları

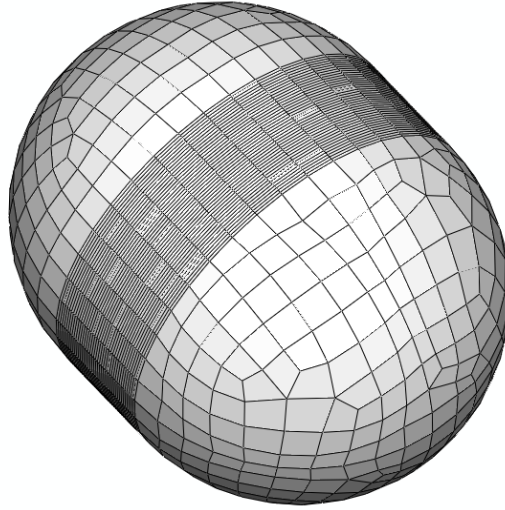
Çizelge 4.3 Su çekimi 180 mm yüzme durumunda sonuçların karşılaştırılması

Titreşim Modu ( $m, n$ )	Deney (Hz)	Sonlu Elemanlar (Hz)	Sınır Elemanlar (Hz)
m=1, n=3 Simetrik	-	117.71	112.04
m=1, n=3 Asimetrik	117	122.09	113.97
m=1, n=3 Asimetrik	165	169.41	162.61
m=1, n=3 Simetrik	169	179.99	168.57
m=2, n=3 Simetrik	-	242.38	241.20
m=2, n=3 Asimetrik	-	247.55	245.68
m=1, n=4 Simetrik	254	277.04	274.29
m=1, n=4 Asimetrik	260	280.31	275.36
m=2, n=4 Simetrik	309	333.45	333.55
m=2, n=4 Asimetrik	335	338.36	343.29

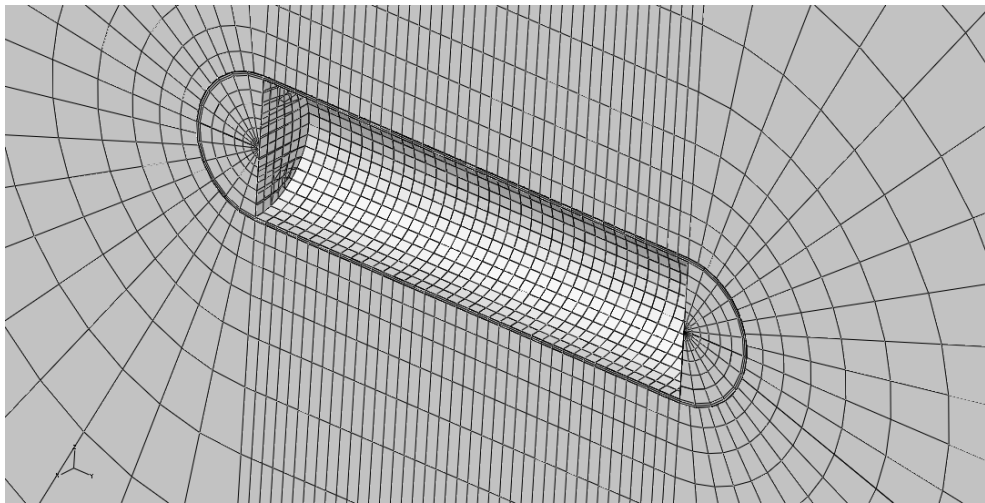
#### 4.4 Silindirik Kabuğun Tam Batmış Durumdaki Analizi

Silindirik kabuk, tam batmış olarak Abaqus yazılımı içerisinde modellenmiştir. Sonlu elemanlar modeli Şekil 4.18, 4.19 ve 4.20’de görülebilmektedir.

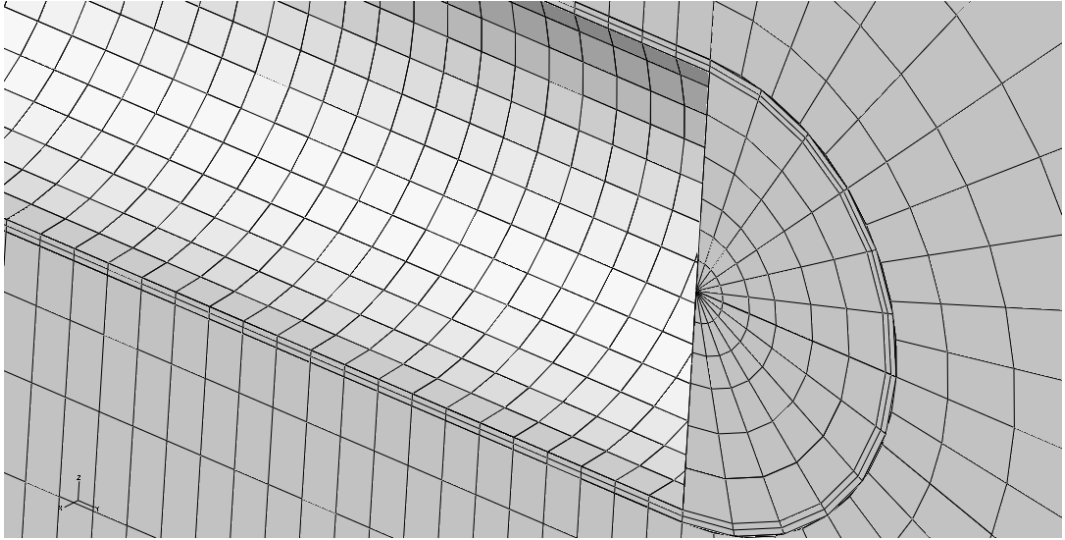
Analiz sonucunda elde edilen *ıslak* rezonans frekansları ve mod şekilleri Şekil 4.21, 4.22, 4.23 ve 4.24’de görülmektedir. Analiz sonuçları, Ergin, Price, Randall ve Temarel (1992) tarafından yayınlanan makalede verilmiş, serbest yüzeyden 0.68 metre derinde yapılmış deney sonuçları ile, Warburton (1961) tarafından verilmiş analitik denklemlerin çözümü ile ve Bishop, Price (1986) tarafından sunulan hidro-elastisite teorisi ile silindirin sayısal olarak çözümlü ile (serbest yüzeyden 0.68 metre derinde, sonsuz derinlikli suda) karşılaştırılmıştır ve sonuçlar Çizelge 4.4’de görülebilmektedir.



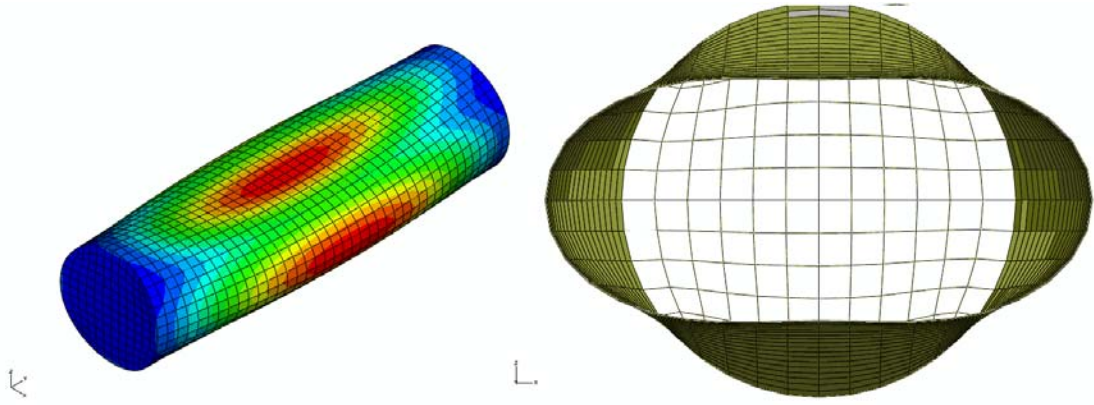
Şekil 4.18 Sonlu elemanlar ağı (Tam batmış hal)



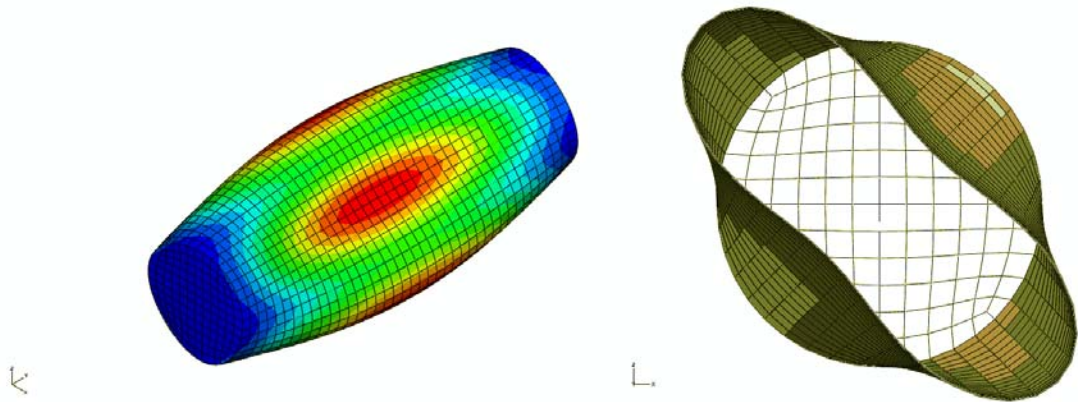
Şekil 4.19 Sonlu elemanlar ağı (Tam batmış hal)



Şekil 4.20 Sonlu elemanlar ağı (Tam batmış hal)

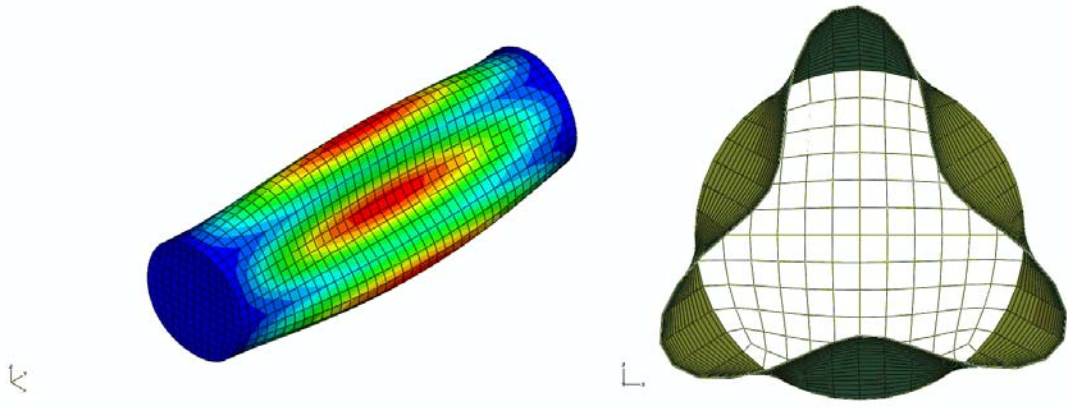


Frekans 99.37 Hz Simetrik

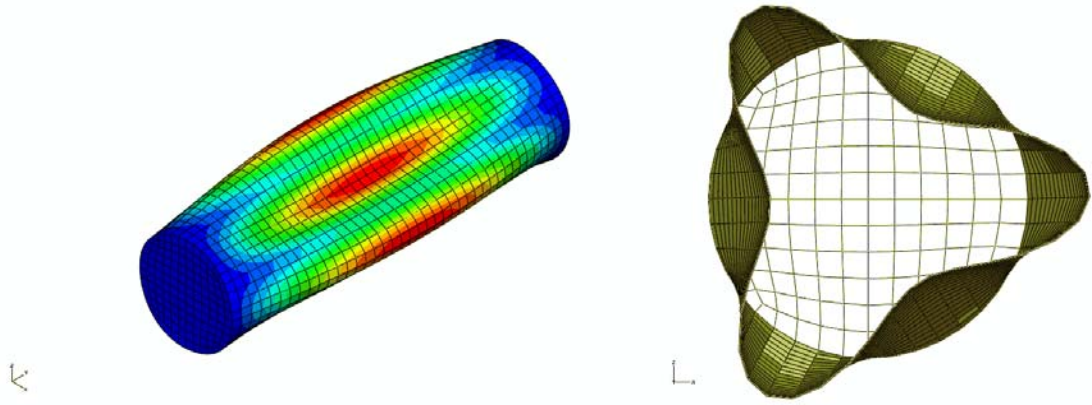


Frekans 99.37 Hz Asimetrik

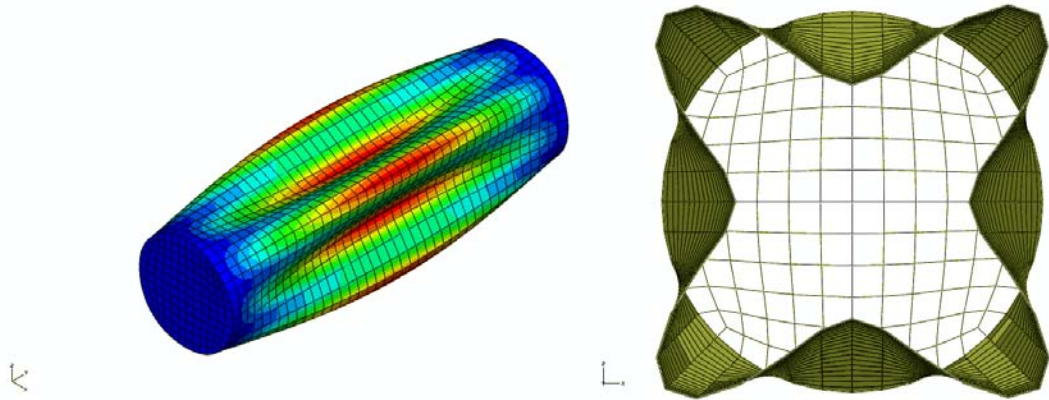
Şekil 4.21 Tam batmış durum için analiz sonuçları



Frekans 111.70 Hz Simetrik

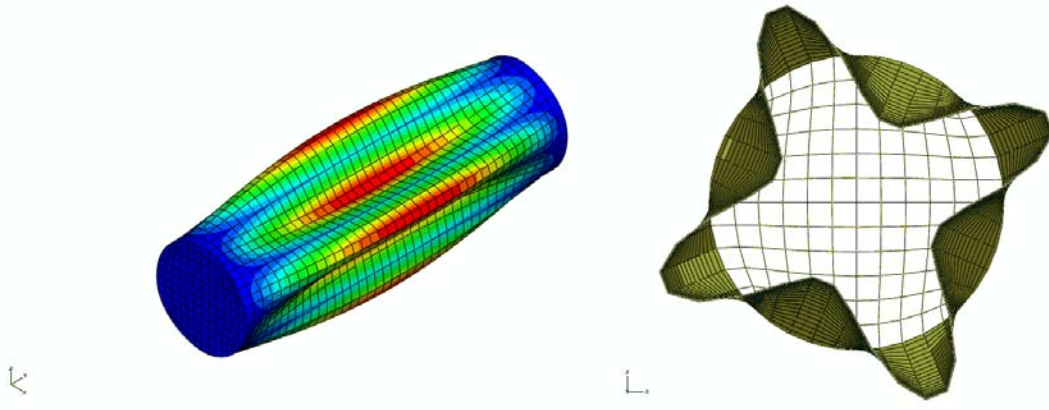


Frekans 111.70 Asimetrik

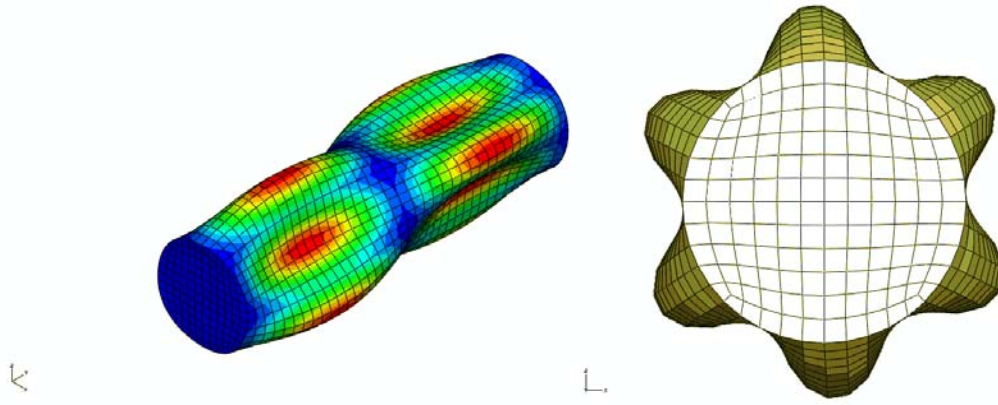


Frekans 209.13 Hz Simetrik

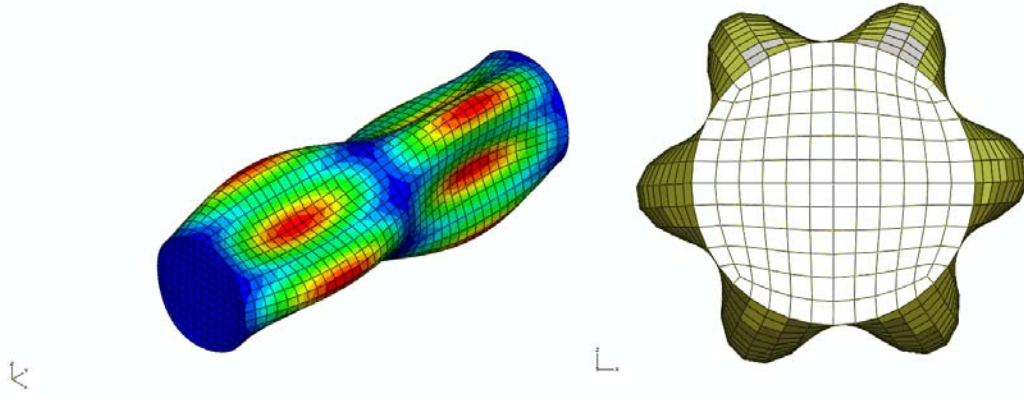
Şekil 4.22 Tam batmış durum için analiz sonuçları



Frekans 209.13 Hz Asimetrik

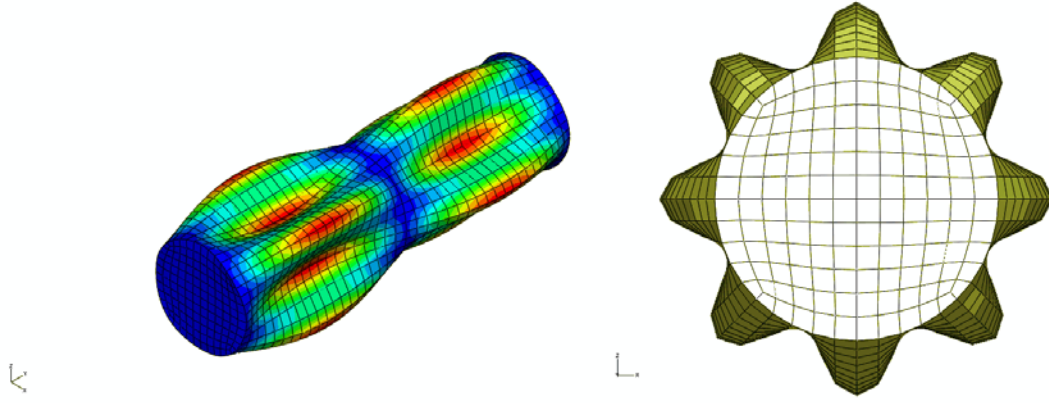


Frekans 219.01 Hz Simetrik

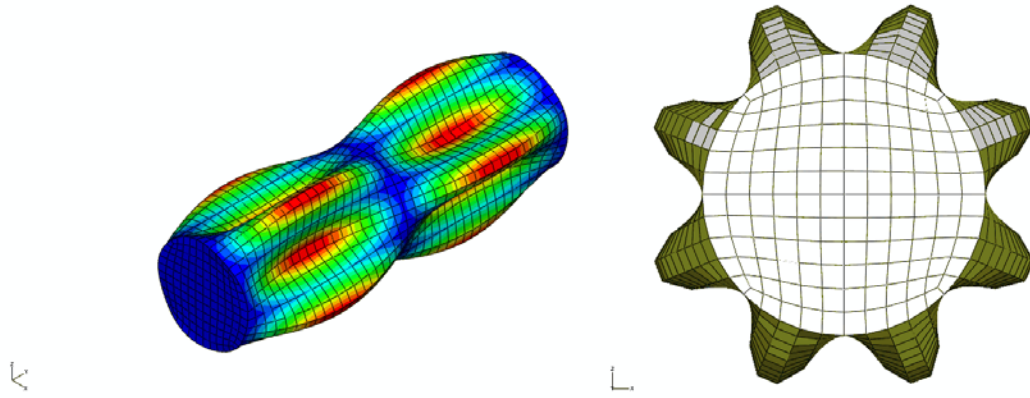


Frekans 219.01 Hz Asimetrik

Şekil 4.23 Tam batmış durum için analiz sonuçları



Frekans 247.56 Hz Simetrik



Frekans 247.57 Hz Asimetrik

Şekil 4.24 Tam batmış durum için analiz sonuçları

Çizelge 4.4 Tam batma durumu sonuçlarının deney ile karşılaştırılması

Titreşim Modu ( $m,n$ )	Deney (Hz)	Analitik (Hz)	Nümerik (Hz)	Abaqus (Hz)
m=1, n=2 Simetrik	97.5	100.00	99.30	99.37
m=1, n=2 Asimetrik	97.5	100.00	99.30	99.37
m=1, n=3 Simetrik	108.7	110.00	114.70	111.70
m=1, n=3 Asimetrik	108.7	110.00	114.70	111.70
m=1, n=4 Simetrik	200.9	203.50	217.80	209.13
m=1, n=4 Asimetrik	200.9	203.50	217.80	209.13
m=2, n=3 Simetrik	217.0	219.00	225.60	219.01
m=2, n=3 Asimetrik	217.0	219.00	225.60	219.01
m=2, n=4 Simetrik	241.3	243.00	261.00	247.56
m=2, n=4 Asimetrik	241.3	243.00	261.00	247.57

#### 4.5 Yakınsaklık Analizleri

Analizlerde kullanılacak optimum eleman boyutlarının belirlenebilmesi için yakınsaklık analizleri yapılmıştır.

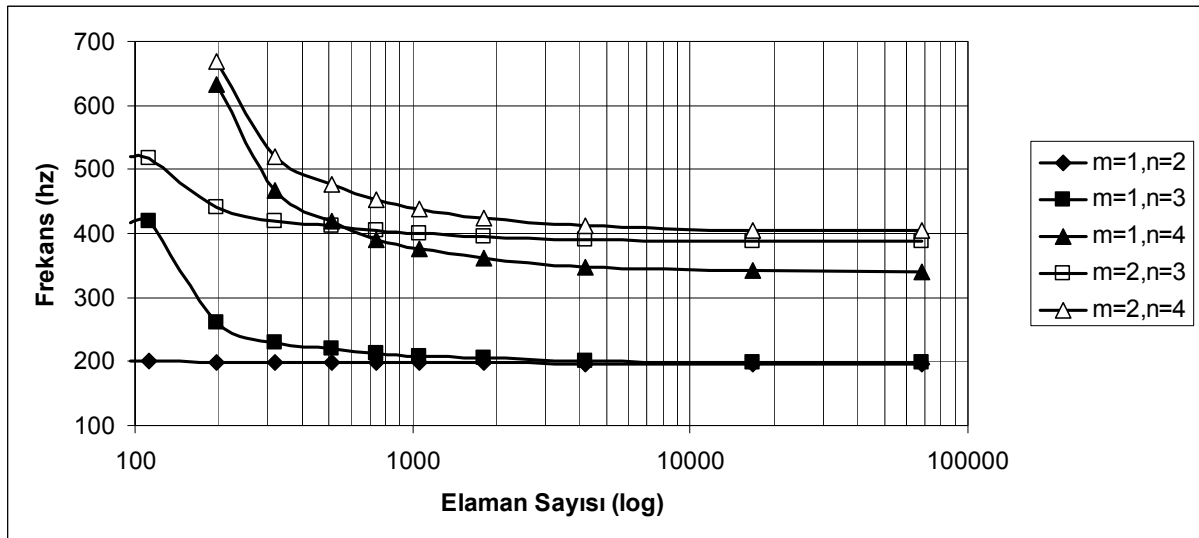
Optimum yapısal eleman boyutunu belirlemek için vakumdaki modelde aşağıdaki eleman boyutları ve sayıları için analizler yapılmıştır;

Çizelge 4.5 Yapısal elemanlar için yakınsaklık analizi eleman boyutları

Eleman boyutu (mm)	Eleman sayısı
150	96
120	112
100	196
80	320
60	508
50	744
40	1058
30	1794
20	4200
10	16800
5	68394

Analizlerde kullanılan kabuk elemanların boyut oranları (aspect ratio) mümkün olduğu kadar bir'e yakın olacak şekilde sonlu elemanlar ağırları oluşturulmuştur. Analizlerin sonuçları Bölüm 4.1'de incelenen simetrik titreşim modları için aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.6 Yapısal elemanlar için yakınsaklık analizi sonuçları





Optimum akışkan eleman boyutunu belirlemek için tam batmış haldeki modelde aşağıdaki akışkan eleman boyutları ve sayıları için analizler yapılmıştır;

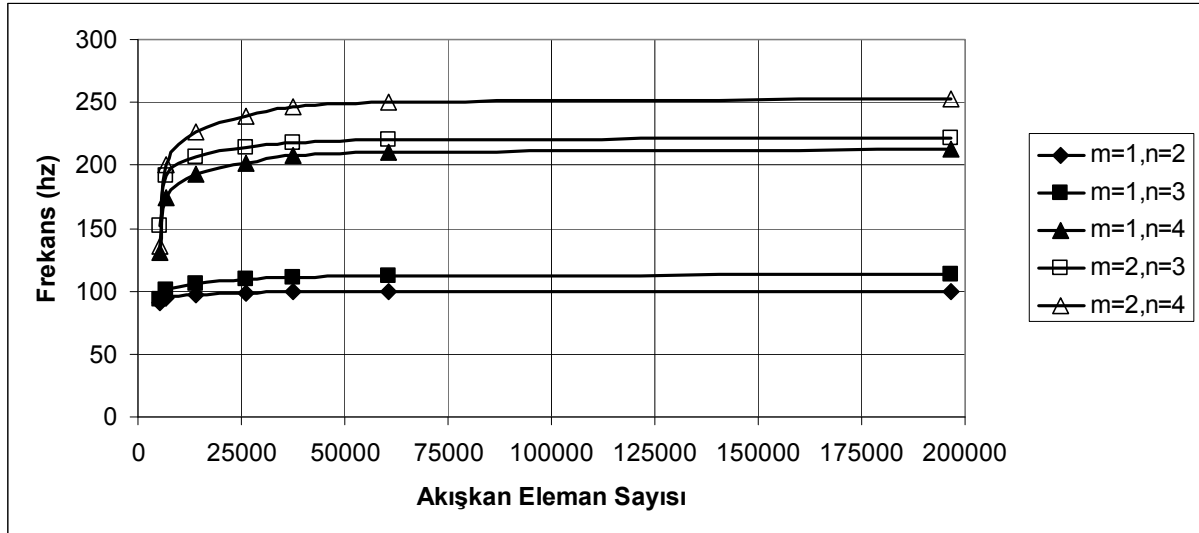
Çizelge 4.7 Akışkan elemanlar için yakınsaklık analizi eleman boyutları

Eleman boyutu (mm)	Eleman sayısı
150	5317
100	6920
60	14122
40	26057
30	37609
20	60714
10	196449

Yapısal elemanlar ile temasta olan ilk sıra 3B dörtgen prizma katı akışkan elemanların boyut oranları (aspect ratio) mümkün olduğu kadar bir'e yakın olacak şekilde ve geri kalan elemanların su sınırlarına doğru uygun bir artış oranı ile büyüyecek şekilde akışkan sonlu elemanlar ağırları oluşturulmuştur.

Analizlerin sonuçları Bölüm 4.4'de incelenen titreşim modları için aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.8 Akışkan elemanlar için yakınsaklık analizi sonuçları



Analizler sonucunda yakınsaklık ve çözüm süreleri açısından, yapısal elemanlar ve akışkan elemanlar için 30 mm eleman boyutunun uygun olduğu sonucuna varılmıştır ve Bölüm 4.1, Bölüm 4.2, Bölüm 4.3 ve Bölüm 4.4'de sonuçları verilmiş analizlerde kullanılmıştır.

#### 4.6 Tartışmalar

Abaqus yazılımı içerisinde vakumda yapılan analiz sonucunda,  $m=2$ ,  $n=4$  titreşim mod şekline kadar olan *kuru* titreşim frekans ve mod şekilleri hesaplanmıştır. Burada,  $n$  silindirin etrafındaki çevresel tam dalga sayısını,  $m$  ise silindir boyunca olan yarım dalga sayısını belirtmektedir. Hesap sonuçları, Bölüm 3’de verilen deney sonuçları ve Ergin, Price, Randall ve Temarel (1992) tarafından yayınlanan makalede verilmiş analitik hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır. Abaqus yazılımı sonuçlarının analitik sonuçlar ile gayet güzel bir uyum içinde olduğu ve deney sonuçları ile de yeterli yakınlıkta olduğu sonucuna varılmıştır. Deney ve analiz sonuçları arasında  $m=1$ ,  $n=2$  mod şekli için bulunan % 6.6’lık fark  $m=1$ ,  $n=3$  ve  $m=1$ ,  $n=4$  mod şekilleri için artmakta fakat  $m=2$ ,  $n=3$  mod şekli için tekrar aynı seviyeye inmektedir. Dolayısı ile silindirin etrafındaki çevresel tam dalga sayısı arttıkça deney ile hesap arasındaki fark açılmaktadır. Bu farkların deney silindirik kabuğu ile model arasında olabilecek yapısal veya uç koşulları farkından dolayı olabileceği sonucuna varılmıştır.

Silindirik kabuğun 121 mm’lik bir su çekiminde silindirin serbest yüzmesi durumunda ve 180 mm su çekiminde yarı batırılmış olarak yüzmesi durumunda Abaqus yazılım içerisinde yapılan ıslak analiz sonuçları, deney sonuçları ve *hibrit* hidro-elastisite yöntemi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizlerde  $m=2$ ,  $n=4$  titreşim mod şekline kadar olan frekanslar hesaplanmıştır. Bölüm 3’de de belirtildiği gibi ıslak deney durumları için mod şekli çıkarma işlemi yapılmamış olup, sadece frekans ölçme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda elde frekanslar ile hesap sonucunda çıkan mod şekilleri karşılaştırılarak eşleştirme yapılmıştır. Yapılan eşleştirme sonucunda, bazı mod şekillerinin ölçülemediği görülmüştür. İvmeölçerin deney esnasındaki konumu nedeni ile bazı titreşim frekanslarının ölçülemediği sonucuna varılmıştır. Ölçülebilen frekanslar ile hem sonlu elemanlar yöntemi ile hem de *hibrit* hidro-elastisite yöntemi hesaplanan frekanslar arasındaki karşılaştırma sonucunda ise değerlerin iyi bir uyum içerisinde oldukları görülmüştür.

Tam batmış halde yapılan analiz sonuçları ise Ergin, Price, Randall ve Temarel (1992) tarafından yayınlanan makalede verilmiş, serbest yüzeyden 0.68 metre derinde yapılmış deney sonuçları ile, Warburton (1961) tarafından verilmiş analitik denklemlerin çözümü ile ve Bishop, Price (1986) tarafından sunulan hidro-elastisite teorisi kullanılarak silindirin sayısal olarak çözümlü ile (serbest yüzeyden 0.68 metre derinde, sonsuz derinlikli suda) karşılaştırılmıştır.  $m=2$ ,  $n=4$  titreşim mod şekline kadar yapılan hesaplar ile karşılaştırmalar neticesinde elde edilen sonuçların gayet iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Silindirik kabuk için yapılan yakınsaklık analizleri sonucunda bu tür yapılar için, hem yapısal elemanların hem de ilk sıra akışkan elemanlarının boyutunun yapının karakteristik boyunun yaklaşık 1/40'ı kadar kabul edilmesinin yeterli doğrulukta sonuç verdiği görülmüştür.

## 5. BİR KONTEYNER GEMİSİNİN HİDRO-ELASTİK HESAPLAMALARI

Detayları Bölüm 2’de verilmiş olan, Ergin ve Temarel (2002) tarafından geliştirilen üç boyutlu *hibrit* hidro-elastisite analizi yöntemi ile sonlu elemanlar ile yapılan hidro-elastisite analizi yöntemini karşılaştırmak amacı ile 1900 TEU kapasiteli bir konteyner gemisinin hidro-elastik titreşim analizleri yapılmıştır.

Optimum akışkan eleman boyutunun ve su hacminin bulunabilmesi için ayrıca yakınsaklık analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçları Bölüm 5.3’de verilmiştir.

### 5.1 Gemi Özellikleri ve Modelleme Aşamaları

1900 TEU konteyner taşıma kapasiteli bu konteyner gemisi, çift cidarlı yan ve dip yapı konstrüksiyonuna sahiptir. Geminin ana özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Geminin genel planı ise Ek 1’de görülebilmektedir.

Çizelge 5.1 1900 TEU kapasiteli konteyner gemisi ana özellikleri

Gemi Ana Özellikleri	
Tam Boy	: 182.85 m
Boy P.P.( Dikmeler Arası)	: 171.00 m
Genişlik	: 28.00 m
Derinlik	: 16.10 m
Su Çekimi (Dizayn)	: 10.00 m
Su Çekimi (Scanting)	: 11.00 m
Deadweight (Dizayn)	: 24100 t
Deadweight (Scantling)	: 26200 t
Servis Hızı	: 19.5 kn
Ana Makine	: Man B&W 8S50MC

Abaqus 6.8 (2008) genel amaçlı sonlu elemanlar yazılımı, katı model kurulumu, sonlu elemanları ağının oluşturulması, çözümlerin elde edilmesi ve sonuçların incelenmesi aşamalarında kullanılmıştır.

Gemi yapısının elastik ve ataletsel özelliklerini mümkün olduğunca gerçeğe yakın bir şekilde sonlu elemanlar modellerine yansıtılabilmek için gemi katı modeli, birincil ana konstrüksiyon elemanlarını tamamını içerecek şekilde modellenir. Yapıdaki ikincil konstrüksiyon elemanları, (stiffener vb.) gerektiğinde direk bir sonlu eleman ile veya ilişkili oldukları plakalara profil kesit özellikleri tanımlanarak modele dahil edilmektedir. Ayrıca, gemi kış yapısının detayları, sevk sistemi ve üst binaların konstrüksiyonu da modele eklenmektedir.

Gemi etrafındaki su hacmi katı model olarak modellenerek, Abaqus akışkan elemanı özelliği ile ayrıklaştırılmıştır. Gemi etrafındaki su hacminin boyutları seçilirken sınır şartlarının sonuçlar üzerindeki etkisinin minimumda tutulabilmesi için hacmin genişliği ve derinliği en az bir gemi boyu kadar ve boyu ise gemi boyunun en az iki katı kadar seçilmiştir.

Gemide yükleme durumlarına göre bulunması gereken kargo yükleri, balast yükleri, yakıt ağırlıkları, ambar kapakları, kreynler gibi gemi global mukavemeti açısından etkisiz olan ağırlıklar Abaqus yazılımı içerisinde tek noktali kütle eleman kullanılarak modele dahil edilmiştir. Geminin sevk sistemleri ise, ana makinelerin üç boyutlu katı sonlu elemanlar, şaft sisteminin kiriş elemanlar ve pervanenin kütle elemanlar kullanılarak modellenmesi ile oluşturulmuştur. Ayrıca modelin boş gemi (lightweight) ağırlığının ve ağırlık merkezinin gerçek geminin değerlerine yakınlştırılması için malzeme yoğunluklarının değiştirilmesi ve küçük ağırlıklı ekipman gruplarının birleştirilerek modele kütle eleman eklenmesi yoluna gidilmiştir.

Geminin kış ve üst binalarında kullanılan sonlu elemanların boyutları gemi başında kullanılan elemanların boyutlarından daha küçük seçilmiştir. Bunun nedeni analizler sonucunda makine dairesi ve üst binalardaki detaylı kat titreşimlerinin de hesaplanmasının istenmesidir.

Modelde kullanılan kabuk eleman, S4 isimli Abaqus dörtgen kabuk elemanıdır. Plaka kalınlığının arttığı durumlarda kalın kabuk teorisini ve kalınlığın az olduğu durumlarda ise otomatik olarak Kirchhoff ince kabuk elemanı teorisi kullanılır. Bu eleman ayrıca kesme deformasyonuna izin verebilmektedir. Bu eleman 3 veya 4 düğüm noktali genel amaçlı gerilme/yer değiştirme elemanıdır ve her düğüm noktasında 6 serbestlik derecesi bulunur.

Kiriş destek elemanları (stiffener, punteller vb.) için kullanılan eleman, B31 Abaqus kiriş elemanıdır. Bu eleman iki noktali lineer ve enine kayma deformasyonuna izin veren Timoshenko kirişidir. Bu eleman hem ince uzun narin kirişler için kullanıldığı gibi hem de dolgun kirişler için de kullanılabilir. Abaqus yazılımı içerisinde bu kiriş elemanının enine kayma davranışı lineer elastik ve sabit modüllü olarak kabul edilir.

Modelde kullanılan katı sonlu eleman ise üç boyutlu C3D Abaqus katı elemanıdır. Bu eleman 8 veya 6 noktali, lineer gerilme-yer değiştirme elemanıdır ve her noktasında 3 serbestlik (x, y ve z eksenlerindeki öteleme hareketleri) dercesine sahiptir.

Geminin etrafındaki su hacminin ayrıklaştırılmasında kullanılan eleman Abaqus AC3D elemanıdır. Detayları Bölüm 2.2'de verilen bu eleman, teorisi Zienkiewicz ve Newton (1969)'un tarafından sunulan dinamik basınç serbestlik dereceli bir akışkan elemanıdır ve

akışkan-yapı etkileşim problemlerinde kullanılır.

Abaqus yazılımı içerisinde farklı sonlu elemanlar ayrıklaştırmasına sahip kısımlar yazılımın *Tie* özelliği kullanılarak birleştirilirler. Örnek olarak, gemi yapısı ile su arasındaki ara yüz verilebilir. *Tie* özelliği ile sonlu elemanlar ağ yapısı sürekli olmayan iki kısım arasında, lineer interpolasyon tekniği kullanılarak kısımlar arasındaki süreklilik sağlanır.

Modelde ağırlık dağılımının gerçeğe yakınlaştırılması için kullanılan kütle elemanlar tek noktalı elemanlardır. Bu elemanlar, üzerlerine tanımlanan kütlelerin bağlantılı olduğu yapısal noktalar ile yazılımın *Coupling* özelliği kullanılması ile birleştirilmektedir. Bu birleştirme özelliği ile kütle değerleri, modelin ağırlık merkezi değişmeksizin yapının ilgili noktalarına lineer olarak dağıtılmış olur.

Geminin katı modellerinin hazırlanması ve malzeme ve kalınlık değerlerinin modele atanması aşamalarında, Delta Denizcilik Mühendislik A.Ş. tarafından hazırlanmış detaylı konstrüksiyon çizimleri kullanılmıştır. Gemide kullanılan malzeme St42 normal gemi inşaat çeliği ve AH36 yüksek mukavemetli gemi inşaat çeliğidir. Özellikleri aşağıda verilmiştir;

- Yoğunluk = 7850 kg/m<sup>3</sup>,
- Youngs modülü = 206000 N/mm<sup>2</sup>
- Poisson oranı = 0.29

Su hacminin malzeme modeli için tuzlu su kullanılmıştır ve özellikleri şöyledir;

- Bulk Modülü = 2300 N/mm<sup>2</sup>
- Yoğunluk = 1025 kg/m<sup>3</sup>

Modellerde uygulanan sınır şartları aşağıda verilmiştir;

- Gemi ve su ara yüzeyine akışkan-yapı etkileşim şartı,
- Serbest su yüzeyine sıfır basınç şartı,
- Su hacminin dış yüzeylerine duvar şartı.

Gemi ve etrafındaki su hacminin modeli iki yükleme koşulu için kurulmuştur. Bunlar,

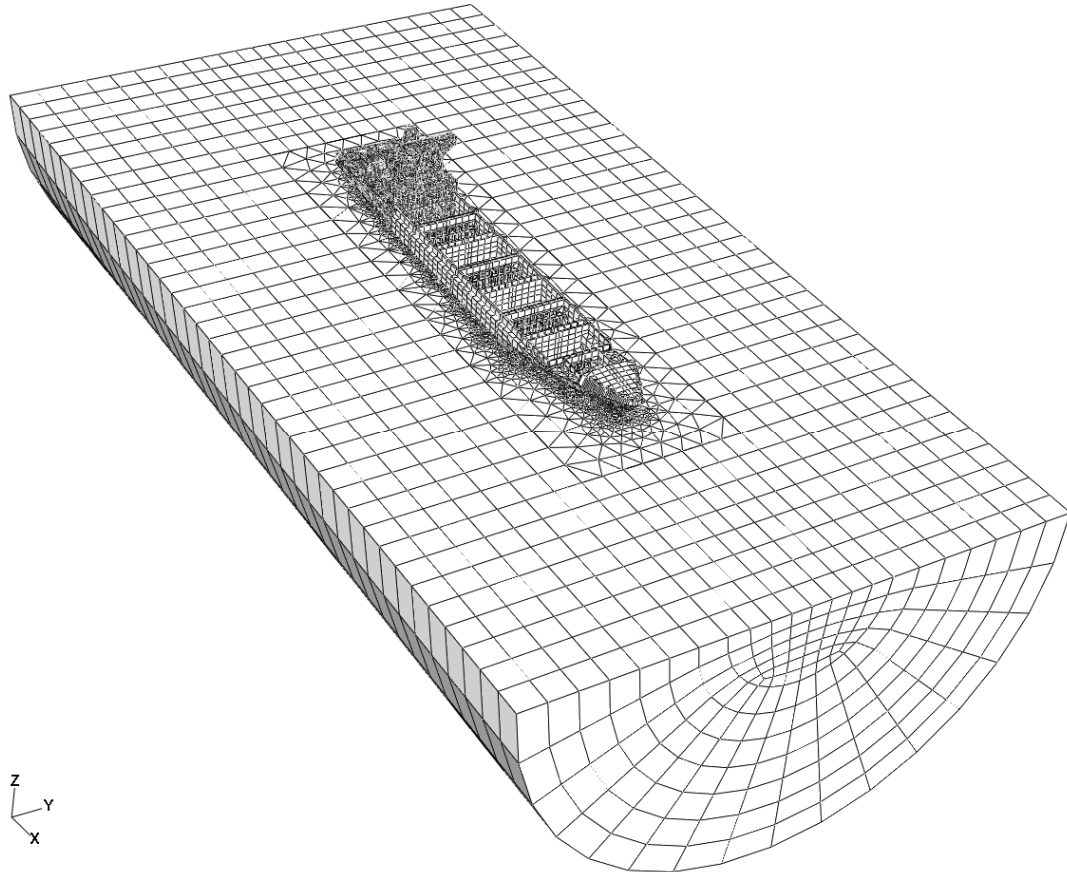
- Tam homojen yükleme, Su çekimi = 9.990 m,
- Balast yüklemesi, Su çekimi = 7.705 m.

Geminin sonlu elemanlar modeli Şekil 5.1 ile Şekil 5.5 arasında görülebilir. Geminin sonlu elemanlar modelinde toplamda 176800 adet yapısal eleman, tam homojen yükleme su çekiminde 60300 adet su elemanı ve balast yüklemesindeki su çekiminde 55750 su elemanı mevcuttur.

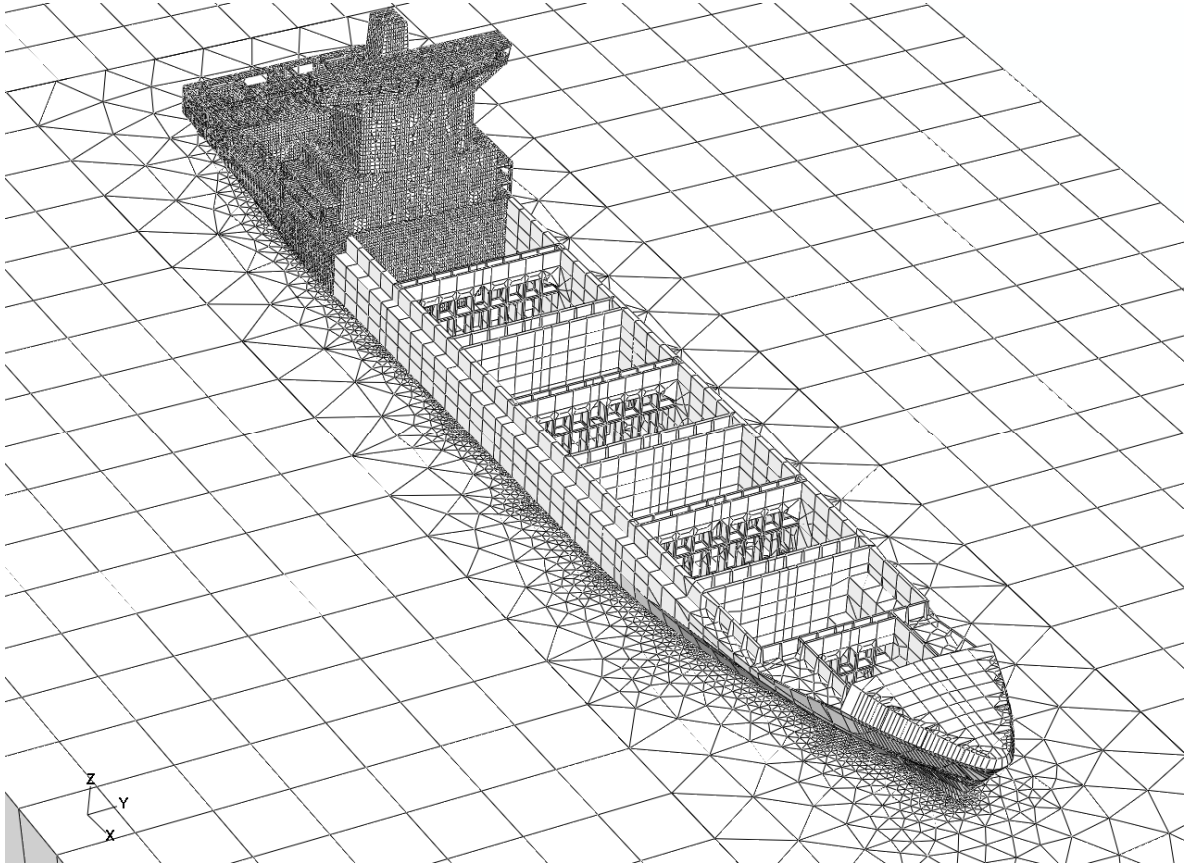
Ek 2’de verilen geminin yükleme koşulu detaylarına göre yapılan tam homojen ve balast yüklemesi sonucu, modelin ve gemini ağırlık ve ağırlık merkezi karşılaştırmaları Çizelge 5.2’de görülebilmektedir.

Çizelge 5.2 Yükleme koşulları ve gemi ile karşılaştırmaları

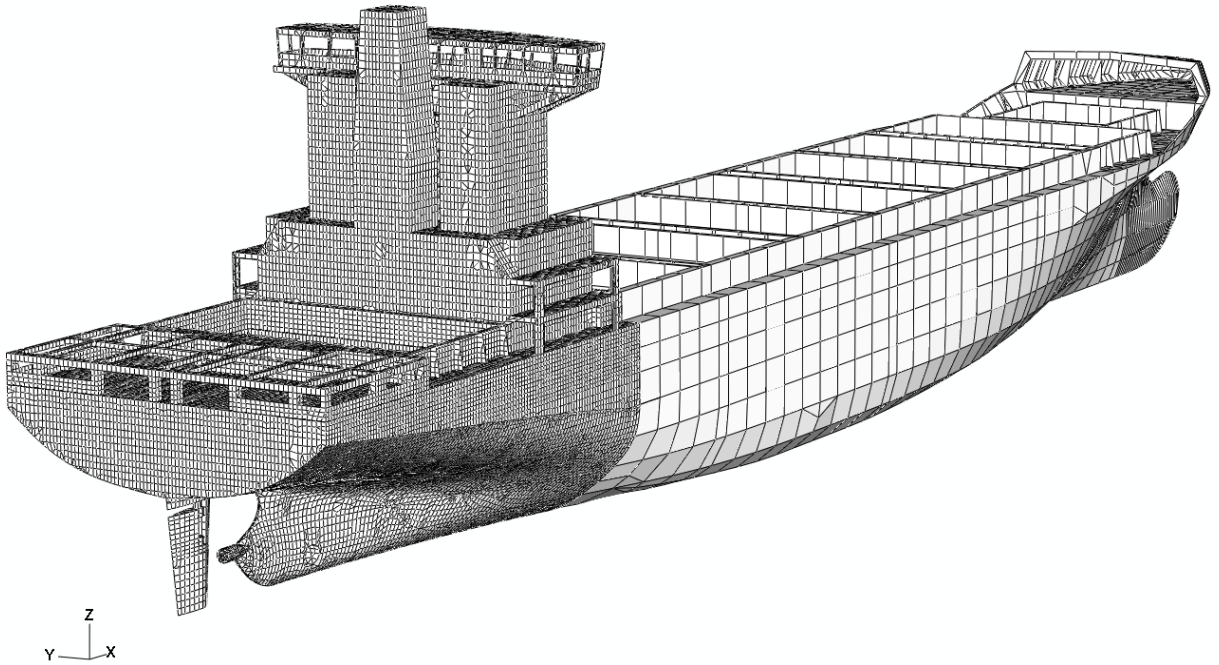
		Homojen Tam Yükleme		Balast yüklemesi	
		Toplam Ağırlık (ton)	LCG - Ağırlık Merkezi (m)	Toplam Ağırlık (ton)	LCG - Ağırlık Merkezi (m)
Gemi	Boş Gemi	9000.0	75.00	9000.0	75.00
	Deadweight	22595.7	81.79	11795.0	85.69
	Toplam	31595.7	79.85	20795.0	81.06
Model	Toplam	31520.0	80.30	20810.0	80.95



Şekil 5.1 1900 TEU kapasiteli konteyner gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)

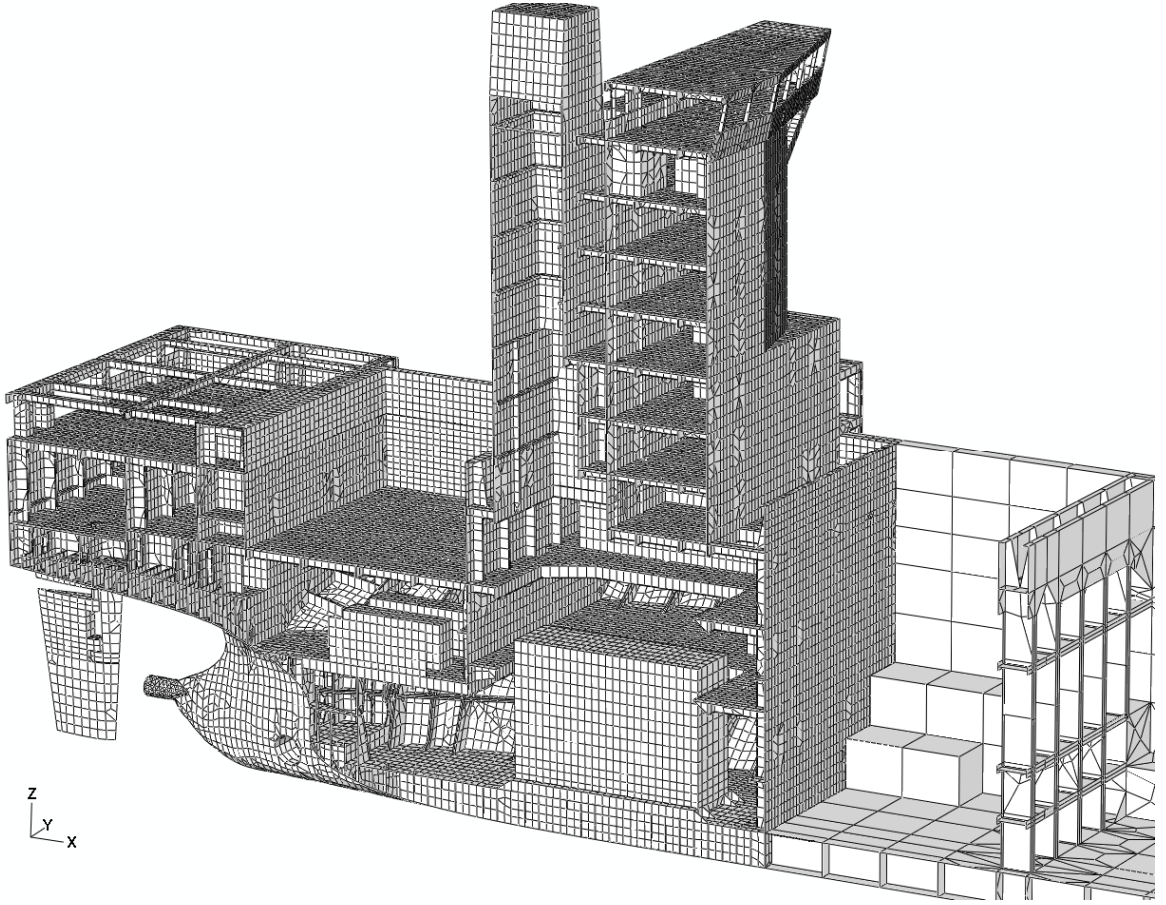


Şekil 5.2 1900 TEU kapasiteli konteyner gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)

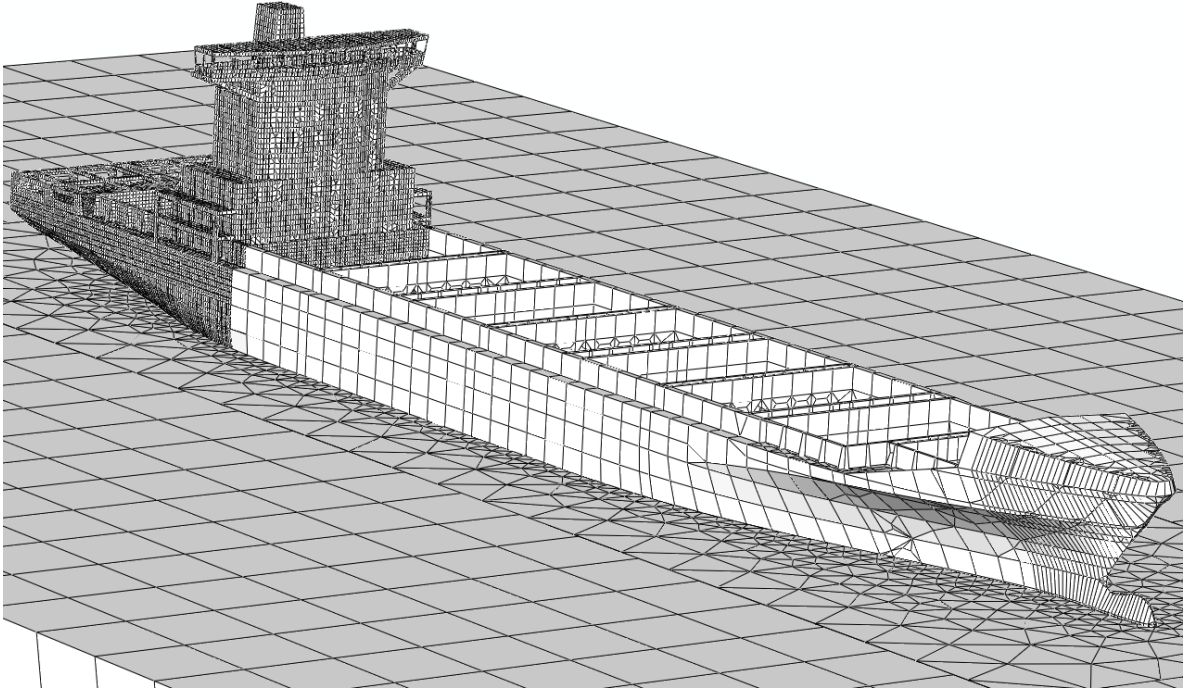


Şekil 5.3 1900 TEU kapasiteli konteyner gemisi sonlu elemanlar ağı





Şekil 5.4 1900 TEU kapasiteli konteyner gemisi sonlu elemanlar ağı



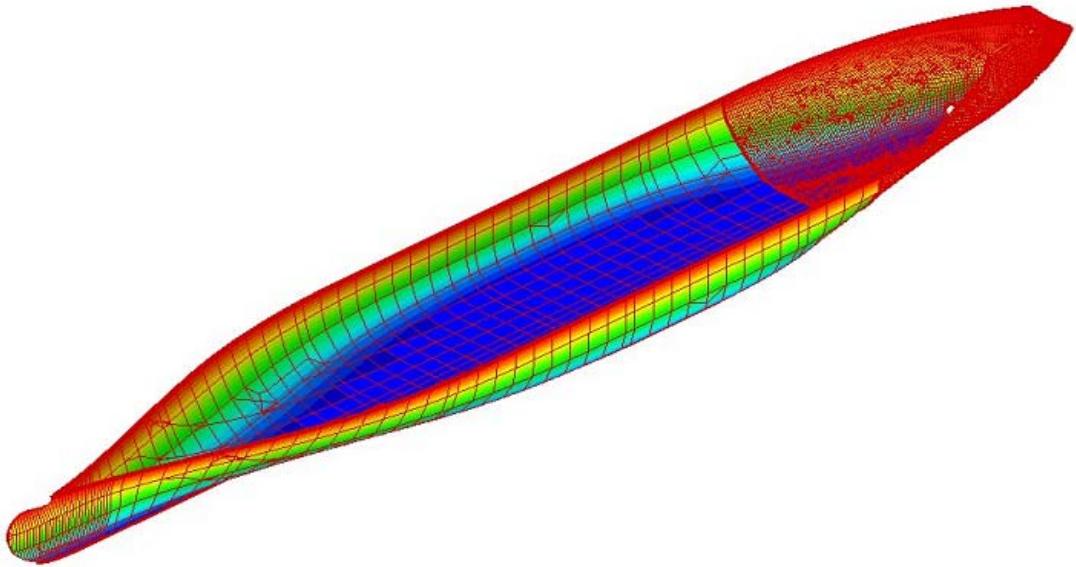
Şekil 5.5 1900 TEU kapasiteli konteyner gemisi sonlu elemanlar ağı (balast yüklemesi)

## 5.2 Hidro-Elastik Analiz Sonuçları

Geminin analizleri, hem detayları Bölüm 2’de verilmiş olan, Ergin ve Temarel (2002) tarafından geliştirilen üç boyutlu *hibrit* hidro-elastisite analizi yöntemi ile hem de Abaqus 6.8 (2008) yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır.

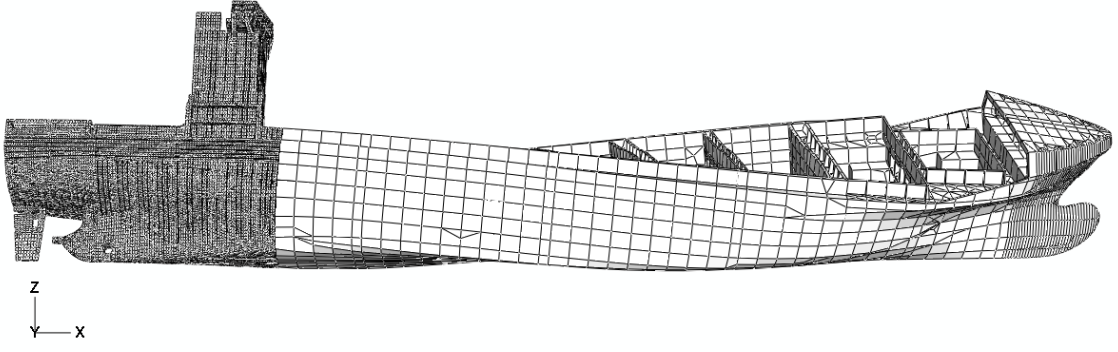
Geminin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü, Abaqus yazılımı içerisinde Lanczos özdeğer hesap yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Geminin tam homojen ve balast yükleme koşullarındaki analizlerinde, ilk beş hidro-elastik titreşim frekansları ve mod şekilleri hesaplanmıştır. Ayrıca geminin etrafındaki su hacmi ile akışkan-yapı etkileşimi olmadan vakum halindeki serbest titreşim analizleri de yapılmıştır.

Ergin ve Temarel (2002) tarafından geliştirilen üç boyutlu *hibrit* hidro-elastisite analizi yönteminde ise, gemi ıslak yüzeyinde hidrodinamik paneller oluşturulmuştur. Şekil 5.6’da görülen bu paneller tam homojen yükleme için 10772 ve balast yüklemesi için 6739 adettir. Abaqus yazılımı ile hesaplanan vakum haldeki ilk 12 *kuru* titreşim modunun sonuçları kullanılarak hidrodinamik paneller üzerindeki kinematik sınır koşulları elde edilmiştir ve akışkan-yapı etkileşimli sistemin *ıslak* frekans ve mod şekilleri hesaplanmıştır.

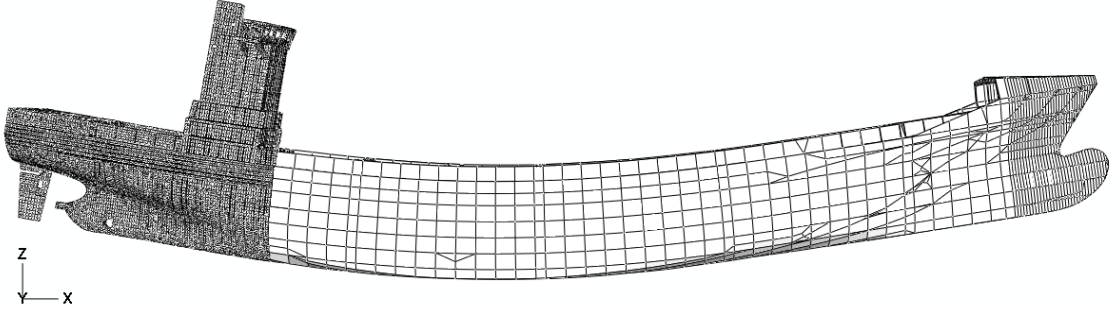


Şekil 5.6 Tam homojen yükleme için hidrodinamik paneller

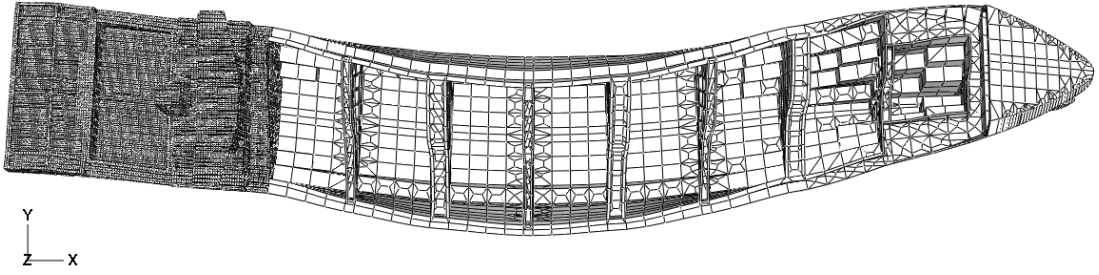
Geminin hidro-elastik mod şekilleri Şekil 5.7 ve 5.8’de görülebilir. Ergin ve Temarel (2002) tarafından geliştirilen üç boyutlu *hibrit* hidro-elastisite analizi yöntemi ile Abaqus 6.8 (2008) sonlu elemanlar hidro-elastisite analizi yöntemi karşılaştırması ise Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4’de görülebilmektedir.



Birinci Burulma Modu

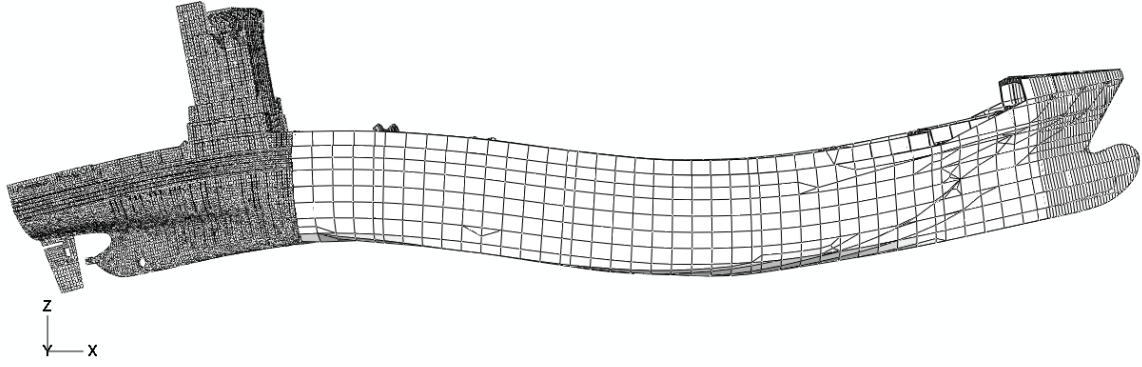


Birinci Düşey Eğilme Modu

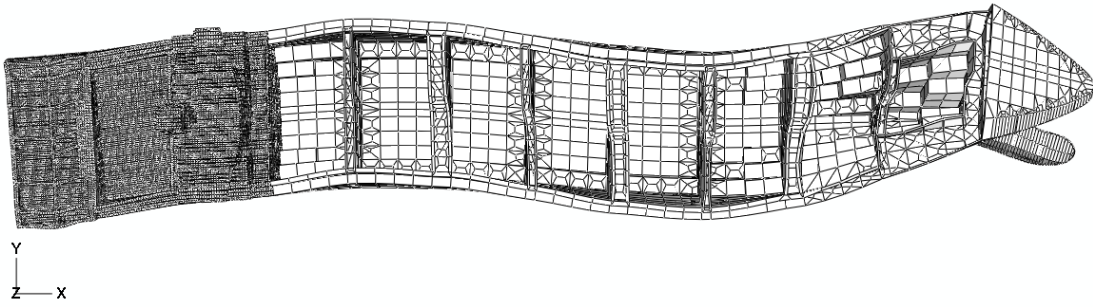


Birinci Yatay Eğilme Modu

Şekil 5.7 Titreşim mod şekilleri



İkinci Düşey Eğilme Modu



İkinci Yatay Eğilme Modu

Şekil 5.8 Titreşim mod şekilleri

Çizelge 5.3 Tam homojen yükleme için analiz sonuçları

Mod Şekilleri	Frekanslar (hz)			
	<i>Kuru</i> Abaqus	<i>Islak</i> Abaqus	<i>Islak</i> Hibrit	Fark %
Birinci Burulma Modu	1.119	0.998	0.999	0.1
Birinci Düşey Eğilme Modu	1.331	1.015	1.041	2.5
Birinci Yatay Eğilme Modu	1.515	1.328	1.349	1.6
İkinci Yatay Eğilme Modu	2.547	2.325	2.344	0.8
İkinci Düşey Eğilme Modu	2.676	2.059	2.072	0.6

Çizelge 5.4 Balast yüklemesi için analiz sonuçları

Mod Şekilleri	Frekanslar (hz)			
	<i>Kuru</i>	<i>Islak</i>	<i>Islak</i>	Fark
	Abaqus	Abaqus	Hibrit	%
Birinci Burulma Modu	1.34	1.221	1.217	0.3
Birinci Düşey Eğilme Modu	1.608	1.29	1.21	6.2
Birinci Yatay Eğilme Modu	1.981	1.787	1.776	0.6
İkinci Düşey Eğilme Modu	3.336	2.504	2.386	4.7
İkinci Yatay Eğilme Modu	3.455	3.095	3.129	0.1

### 5.3 Yakınsaklık Analizleri

Analizlerde kullanılacak optimum akışkan eleman boyutlarının ve akışkan alan genişliğinin belirlenebilmesi için yakınsaklık analizleri yapılmıştır.

Optimum akışkan eleman boyutunu belirlemek için geminin tam homojen yüklü haldeki modelinde aşağıdaki eleman boyutları ve sayıları için analizler yapılmıştır;

Çizelge 5.5 Akışkan elemanlar için yakınsaklık analizi eleman boyutları

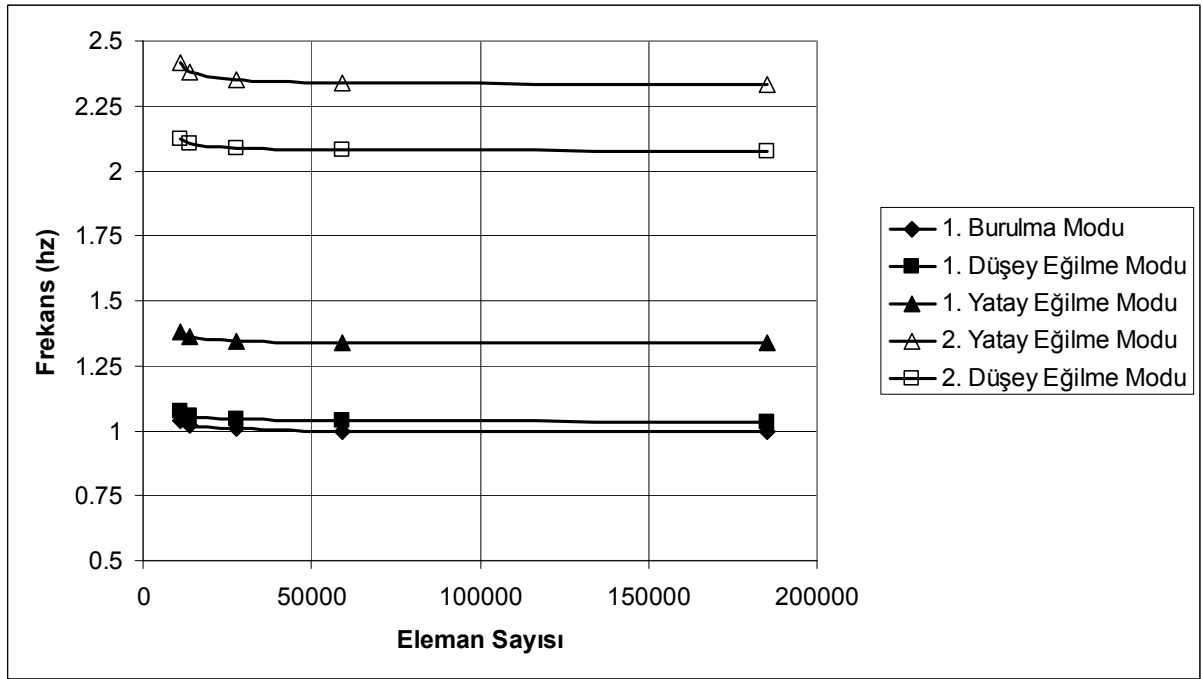
Eleman Boyutu (mm)	Eleman sayısı
6000	11246
4000	13686
2000	27868
1200	59350
600	185342

Eleman boyutları akışkan elemanlarının karakteristik eleman boyutunu belirtmektedir. Gemi gibi yapıların sonlu elemanlar ile hidro-elastisite analizlerinde gemi yüzeyinin geometrik karmaşıklığı nedeni ile su hacminin gemi yüzeyine yakın olan bir kısmının sonlu elemanlar ağında, 3B üçgen piramit katı akışkan elemanları kullanılmaktadır.

Gemi yapısal elemanları ile temasta olan bu ilk kısım üçgen piramit katı akışkan elemanların boyut oranları (aspect ratio) mümkün olduğu kadar bir'e yakın olacak şekilde ağ oluşturulmuştur. Geri kalan elemanların sonlu elemanlar ağı ise, su sınırlarına doğru uygun bir artış oranı ile büyüyecek bir şekilde oluşturulmuştur.

Analizlerin sonuçları Bölüm 5.2'de verilen titreşim frekans modları için aşağıda Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6 Akışkan elemanlar için yakınsaklık analizi sonuçları



Analizler sonucunda 1200 mm akışkan eleman boyutunun gayet yeterli sonuçlar verdiği görülmüştür ve detayları Bölüm 5.2’de verilen analizlerde kullanılmıştır.

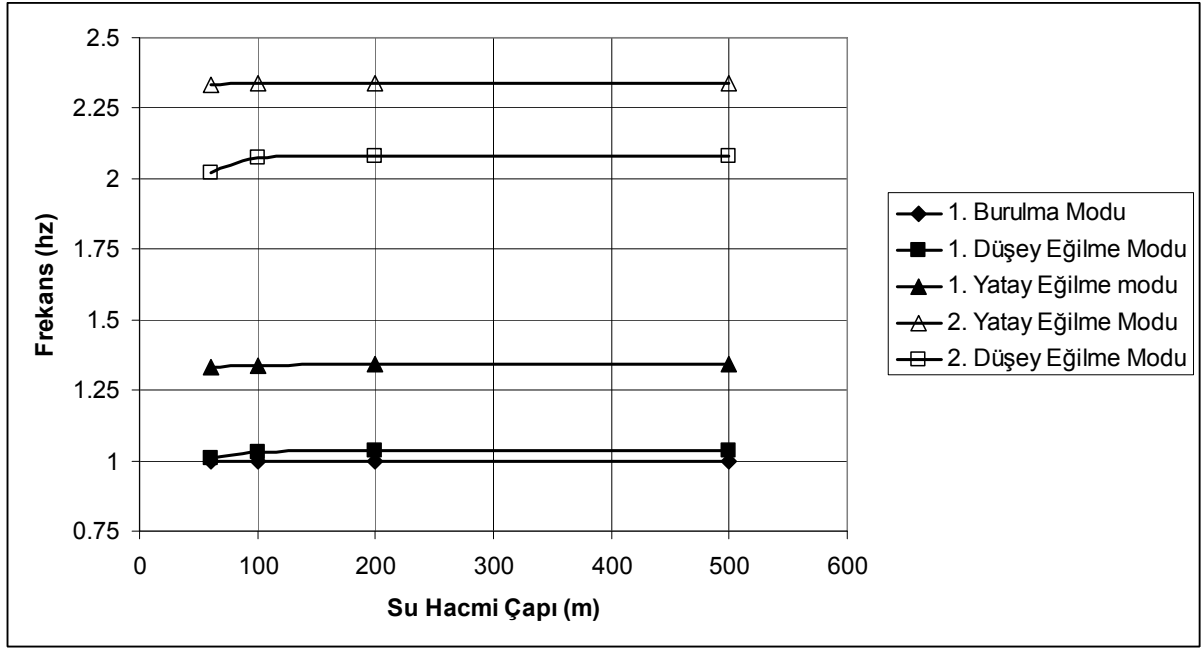
Akışkan hacminin optimum boyutlarını bulabilmek ve titreşim frekansları üzerindeki etkilerini görebilmek amacı ile çeşitli genişliklerdeki su hacimleri için analizler tekrarlanmıştır. Bu tekrarlanan analizlerde gemiye temas halindeki ilk sıra akışkan elemanlarının boyutu 1200 mm olarak alınmıştır.

Analizlerdeki su hacminin şekli yarım silindiridir. Yakınsaklık analizleri, çeşitli çap değerlerindeki su hacim silindirleri için yapılmıştır. Bu çap değerlerine karşılık Bölüm 5.2’de verilen titreşim frekans mod şekilleri için elde edilen frekans değerleri aşağıda Çizelge 5.7’de verilmiştir.

Çizelge 5.7’den görülebildiği gibi yaklaşık bir gemi boyuna denk gelen su hacim genişliği olan 200 m için sonuçların gayet güzel elde edilebildiği sonucuna varılmıştır.

Analizlerdeki su hacminin boyu gemi boyunun 2.5 katı alınmıştır. Yapılan deneme analizlerinde su hacmi silindirinin boyunun sonuçlar üzerinde çok fazla etkili olmadığı görülmüş ve analizlerde gemi boyunun minimum 2 katı alınmasının yeterli olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.7 Su hacim çapının yakınsaklık analizi sonuçları



#### 5.4 Tartışmalar

Konteyner gemisinin analizleri sonucunda Çizelge 5.3 ve 5.4'de görüldüğü üzere, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan hidro-elastik analiz (Abaqus) ile sınır elemanlar ve sonlu elemanlar *hibrit* yöntemi kullanılarak yapılan hidro-elastik analiz sonuçları arasında güzel bir uyum bulunmaktadır. En büyük farklar tam homojen yükleme için % 2.5 ve balast yüklemesi için % 6.2 olarak elde edilmiştir. Ayrıca geminin ıslak yüzeyinin artması ile frekanslarda azalma olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.6 ve 5.7'de görülebilen yakınsaklık analizleri sonucunda ise bundan sonraki gemi analizlerinde akışkan hacim silindirinin boyutları için, uzunluğu gemi boyunun 2 – 2.5 katı ve çapı yaklaşık gemi uzunluğu boyutunda olan yarım silindirik bir hacmin kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Ayrıca analizlerde, gemi ile temasta olan akışkan elemanlarının boyutu olarak gemi boyunun yaklaşık 1/150'si alınabileceği sonucuna varılmıştır.

## 6. DÖKME YÜK GEMİSİ SERİSİNİN HİDRO-ELASTİK HESAPLAMALARI

### 6.1 Dökme Yük Gemileri

Bir dökme yük gemisi, kargonun, konteyner vb. gibi araçlar ile paketlenmiş olarak taşınması yerine dökme olarak direk ambar içinde taşındığı bir gemi çeşididir. Kargo genellikle homojen ve yerçekimi etkisi ile yüklenebilmektedir. Dökme yük gemileri ikiye ayrılmaktadır. Bunlar, kuru dökme yük gemileri ve ıslak dökme yük gemileri yani tanker olarak bilinen gemilerdir. Genel olarak kuru dökme yük gemileri, dökme yük gemisi veya dökme olarak adlandırılırlar.

Dökme yük gemileri 1950'li senelerde büyük miktarlarda paketlenmemiş yükleri (hububat, kömür, vb.) taşımak için ve taşıma maliyetlerini azaltmak amacı ile geliştirilmişlerdir. Dökme yük gemileri, ana üç ticari gemi tipinden (konteyner ve tankerler ile birlikte) bir tanesidir ve tonaj bakımından dünya filosunun üçte birini oluştururlar (MAN, 2007).

Dünyada şu ana kadar yapılan en büyük dökme yük gemisi, 365000 taşıma kapasitesi ile 1986 yılında inşa edilmiştir. Demir cevheri taşıyan bu geminin (M/V Berge Stahl), tam boyu 343 metre, genişliği 63.5 metre ve su çekimi 23 metredir.

Çift cidarlı tekne yapısı, uzun bir süredir, güvenlik ve çevresel nedenler ile yeni yapılan tankerler için zorunludur. Fakat dökme yük gemilerinin standart dizaynı 1960'lardan beri tek cidarlı yan yapı ve çift cidarlı dip yapı şeklindedir. Dökme yük gemi kayıplarının ana sebebi olarak yan yapıdan gelen tahribatlar görülmüştür. Esas olarak, çift cidar konstrüksiyonun dökme yük gemilerine uygulanması güvenliği artırıp, kazalar sonucu oluşan gemi kayıplarını azaltacaktır. Buna rağmen 2007 yılı itibari ile mevcut dökme yük gemilerinin %5'i çift cidarlıdır.

Çift cidarlı yan yapı kullanılması ile yan yapı çerçeve elemanları ve braketler ortadan kalkacak ve kargo düz saç plaka ile temas halinde olacaktır. Böylece, güvenliğin ve çarpışma dayanıklılığın artmasının yanı sıra kargo idaresi daha efektif hale gelecektir.

Bugün itibari ile dökme yük gemilerinin dizaynının çift cidarlı yapılması ile ilgili zorunlu bir yönetmelik bulunmamaktadır. Buna rağmen bazı gemi dizayn ofisleri, güvenlik ve daha etkili kargo idaresi (özellikle yapışkan kok kömürü vb. yükler için) açısından çift cidarlı dökme yük gemileri dizaynı yapmaktadırlar. Artan güvenliğe ve yük idaresinin kolaylaşmasına karşılık olarak, tamamen çift cidarlı yapıya geçiş ile gemi boş ağırlığının artabilmektedir. İlgili yapısal hesaplamalar sonucunda daha ince saçların kullanılması ile bu sorun halledilebilse de artan



kaynak ihtiyaçları ve artan konstrüksiyon detayları işçilik adam-saat'lerini ve dolayısı ile geminin maliyetini arttırabilmektedir.

Dökme yük gemileri, taşıma kapasiteleri ve tekne boyutlarına göre Çizelge 6.1'de görüldüğü gibi sınıflandırılabilirler.

Çizelge 6.1 Dökme yük gemilerinin sınıflandırılması (MAN, 2007)

Dökme Yük Gemisi Tipleri	Boyutlar	Gemi Deadweight (Scantling)
<b>Small</b> Tam gemi boyu	yaklaşık 115 m	< 10000 dwt
<b>Handysize</b> Scantling su çekimi	yaklaşık 10 m	10000 - 35000 dwt
<b>Handymax</b> Tam gemi boyu	maksimum 190 m	35000 - 55000 dwt
<b>Panamax</b> Gemi genişliği Tam gemi boyu ( Re port ) Tam gemi boyu ( Re canal lock chamber) Su çekimi	maksimum 32.2/32.3 m 225 m 289.6 m maksimum 12.04 m	60000 - 80000 dwt
<b>Capesize</b>		80000 - 200000 dwt
<b>Kamsarmax</b> (Equator Guinea Kamsar Limanı için) Boyu arttırılmış Panamax, Tam boy	229 m	yaklaşık 82000 dwt
<b>Dunkirkmax</b> (Fransız Dunkirk Limanı için) Tam boy Genişlik	maksimum 289 m maksimum 45 m	yaklaşık 175000 dwt
<b>Newcastlemax</b> (Avustralya Newcatsle limanı için) Genişlik	maksimum 47 m	yaklaşık 185000 dwt
<b>Setouchmax</b> (Japon setouch denizi limanları için) Tam boy Su çekimi	maksimum 299.9 m 16.1 m	yaklaşık 205000 dwt
<b>VLBC - Çok büyük dökme yük gemileri</b> Tam boy	300 m üstü	> 200000 dwt

## 6.2 Gemiler ve Modelleme Aşamaları

Çalışmanın bu bölümünde bir dökme yük gemisi serisine ait bir grup geminin hidro-elastik titreşim karakteristikleri incelenecektir. Analizleri yapılacak dökme yük gemileri Delta Denizcilik Mühendislik A.Ş. tarafından son beş sene içerisinde Türk armatörleri için dizayn edilmiş gemilerdir. Gemilerin bazıları serviste, bazıları inşa aşamasında ve bazıları ise dizayn aşamasındadır. Hidro-elastik analizleri yapılacak gemiler aşağıda verilmiştir;

- 20000 DWT kapasiteli *Handysize* dökme yük gemisi,
- 32000 DWT kapasiteli *Handysize* dökme yük gemisi,
- 53000 DWT kapasiteli *Handymax* dökme yük gemisi,

- 76000 DWT kapasiteli *Panamax* dökme yük gemisi,
- 140000 DWT kapasiteli *Capesize* dökme yük gemisi.
- 180000 DWT kapasiteli *Capesize* dökme yük gemisi

Gemilerin genel planları Ek 1’de verilmiştir.

Abaqus 6.8 (2008) genel amaçlı sonlu elemanlar yazılımı, katı model kurulumu, sonlu elemanları ağının oluşturulması, çözümlerin elde edilmesi ve sonuçların incelenmesi aşamalarında tüm gemiler için kullanılmıştır.

Gemi yapılarının elastik ve ataletsel özelliklerini mümkün olduğunca gerçeğe yakın bir şekilde sonlu elemanlar modellerine yansıtılabilmek için gemilerin katı modelleri, birincil ana konstrüksiyon elemanlarını tamamı ile içerecek şekilde modellenir. Yapıdaki ikincil konstrüksiyon elemanları, (stiffener, destek elemanları vb.) gerektiğinde direk bir sonlu eleman ile veya ilişkili oldukları plakalara profil kesit özellikleri tanımlanarak modele dahil edilmektedir. Ayrıca, gemi kış yapısının detayları, sevk sistemi ve üst binaların konstrüksiyonu da modele eklenmektedir.

Gemi etrafındaki su hacmi katı model olarak modellenerek, Abaqus akışkan elemanı özelliği ile ayrıştırılmıştır. Gemi etrafındaki su hacminin boyutları seçilirken sınır şartlarının sonuçlar üzerindeki etkisinin minimumda tutulabilmesi için hacmin genişliği ve derinliği en az bir gemi boyu kadar ve boyu ise gemi boyunun en az iki katı kadar seçilmiştir.

Gemilerde yükleme durumlarına göre bulunması gereken kargo yükleri, balast yükleri, yakıt ağırlıkları, ambar kapakları, kreynler gibi gemi global mukavemeti açısından etkisiz olan ağırlıklar Abaqus yazılımı içerisinde tek noktalı kütle eleman kullanılarak modele dahil edilmiştir. Gemilerin sevk sistemleri ise, ana makinelerin üç boyutlu katı sonlu elemanlar, şaft sisteminin kiriş elemanlar ve pervanelerin kütle elemanlar kullanılarak modellenmesi ile oluşturulmuştur. Ayrıca modellerin boş gemi (lightweight) ağırlıklarının ve ağırlık merkezlerinin gerçek gemilerin değerlerine yakınlaştırılması için gerekli görüldüğünde malzeme yoğunluklarının değiştirilmesi ve küçük ağırlıklı ekipman gruplarının birleştirilerek modele kütle eleman eklenmesi yoluna gidilmiştir.

Gemilerin kış ve üst binalarında kullanılan sonlu elemanların boyutları gemi başında kullanılan elemanların boyutlarından genelde daha küçük seçilmiştir. Bunun nedeni analizler sonucunda makine dairesi ve üst binalardaki detaylı kat titreşimlerinin de hesaplanmasının istenmesidir.

Modellerde kullanılan kabuk eleman, S4 isimli Abaqus dörtgen kabuk elemanıdır. Plaka kalınlığının arttığı durumlarda kalın kabuk teorisini ve kalınlığın az olduğu durumlarda ise otomatik olarak Kirchoff ince kabuk elemanı teorisi kullanılır. Bu eleman ayrıca kesme deformasyonuna izin verebilmektedir. Bu eleman 3 veya 4 düğüm noktalı genel amaçlı gerilme/yer değiştirme elemanıdır ve her düğüm noktasında 6 serbestlik derecesi bulunur.

Kiriş destek elemanları (stiffener, punteller vb.) için kullanılan eleman, B31 Abaqus kiriş elemanıdır. Bu eleman iki noktalı lineer ve enine kayma deformasyonuna izin veren Timoshenko kirişidir. Bu eleman hem ince uzun narin kirişler için kullanıldığı gibi hem de dolgun kirişler için de kullanılabilir. Abaqus yazılımı içerisinde bu kiriş elemanının enine kayma davranışı lineer elastik ve sabit modüllü olarak kabul edilir.

Modellerde kullanılan katı sonlu eleman ise üç boyutlu C3D Abaqus katı elemanıdır. Bu eleman 8 veya 6 noktalı, lineer gerilme-yer değiştirme elemanıdır ve her noktasında 3 serbestlik (x, y ve z eksenlerindeki öteleme hareketleri) derecesine sahiptir.

Gemilerin etrafındaki su hacminin ayrıklaştırılmasında kullanılan eleman Abaqus AC3D elemanıdır. Detayları Bölüm 2.2’de verilen bu eleman, teorisi Zienkiewicz ve Newton (1969)’un tarafından sunulan dinamik basınç serbestlik dereceli bir akışkan elemanıdır ve akışkan-yapı etkileşim problemlerinde kullanılır.

Abaqus yazılımı içerisinde farklı sonlu elemanlar ayrıklaştırmasına sahip kısımlar yazılımın *Tie* özelliği kullanılarak birleştirilirler. Örnek olarak, gemi yapısı ile su arasındaki ara yüz verilebilir. *Tie* özelliği ile sonlu elemanlar ağ yapısı sürekli olmayan iki kısım arasında, lineer interpolasyon tekniği kullanılarak kısımlar arasındaki süreklilik sağlanır.

Modellerde ağırlık dağılımının gerçeğe yakınlaştırılması için kullanılan kütle elemanlar tek noktalı elemanlardır. Bu elemanlar, üzerlerine tanımlanan kütleli bağlantılı olduğu yapısal noktalar ile yazılımın *Coupling* özelliği kullanılması ile birleştirilmektedir. Bu birleştirme özelliği ile kütle değerleri, modelin ağırlık merkezi değişmeksizin yapının ilgili noktalarına lineer olarak dağıtılmış olur.

Gemilerin katı modellerinin hazırlanması ve malzeme ve kalınlık değerlerinin modele atanması aşamalarında, Delta Denizcilik Mühendislik A.Ş. tarafından hazırlanmış detaylı konstrüksiyon çizimleri kullanılmıştır.

Gemilerde kullanılan malzeme St42 normal gemi inşaat çeliği ve AH36 yüksek mukavemetli gemi inşaat çeliğidir. Özellikleri aşağıda verilmiştir;

- Yoğunluk = 7850 kg/m<sup>3</sup>,
- Young modülü = 206000 N/mm<sup>2</sup>
- Poisson oranı = 0.29

Su hacminin malzeme modeli için tuzlu su kullanılmıştır ve özellikleri şöyledir;

- Bulk Modülü = 2300 N/mm<sup>2</sup>
- Yoğunluk = 1025 kg/m<sup>3</sup>

Modellerde uygulanan sınır şartları aşağıda verilmiştir;

- Gemi ve su ara yüzeyine akışkan-yapı etkileşim şartı,
- Serbest su yüzeyine sıfır basınç şartı,
- Su hacminin dış yüzeylerine duvar şartı.

Genel planları Ek 1'de verilmiş olan gemilerin modelleme aşamaları ve yükleme durumları ile ayrıntılar aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

### 6.2.1 20000 DWT Dökme Yük Gemisi

20000 DWT taşıma kapasiteli bu dökme yük gemisi *Handysize* sınıfına ait olup, çift cidarlı yan ve dip yapı konstrüksiyonuna sahiptir. Geminin ana özellikleri Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2 20000 DWT dökme yük gemisi ana özellikleri

Tam Boy	:	157.90 m
Boy P.P.( Dikmeler Arası)	:	151.50 m
Genişlik	:	23.20 m
Derinlik	:	12.50 m
Su Çekimi (Dizayn)	:	8.60 m
Su Çekimi (Scantling)	:	9.00 m
Deadweight (Dizayn)	:	20000 t
Deadweight (Scantling)	:	21000 t
Servis Hızı	:	14.0 kn
Ana Makine	:	Man B&W 8S35MC

Gemi ve etrafındaki su hacminin modeli iki yükleme koşulu için kurulmuştur. Bunlar,

- Tam homojen yükleme, Su çekimi = 8.915 m,

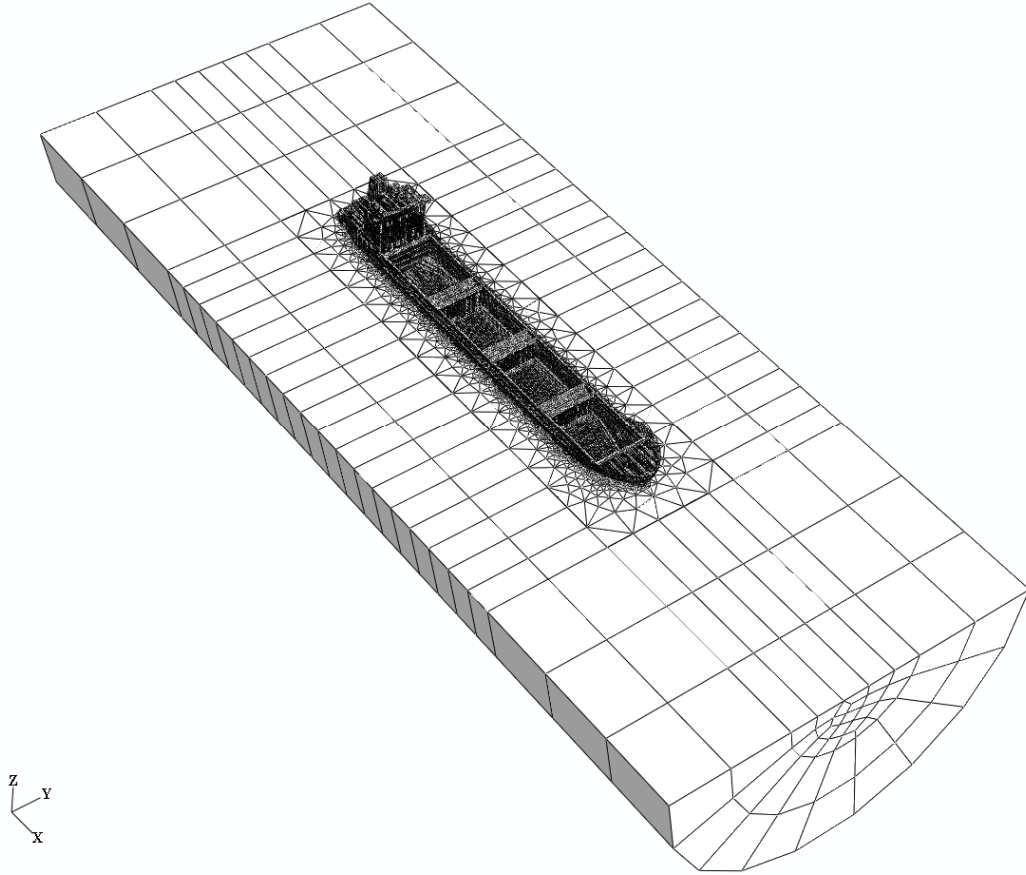
- Balast yüklemesi, Su çekimi = 5.287 m.

Geminin sonlu elemanlar modeli Şekil 6.1 ile Şekil 6.5 arasında görülebilir. Geminin sonlu elemanlar modelinde toplamda 135700 adet yapısal eleman, tam homojen yükleme su çekiminde 57886 adet su elemanı ve balast yüklemesindeki su çekiminde 37930 su elemanı mevcuttur.

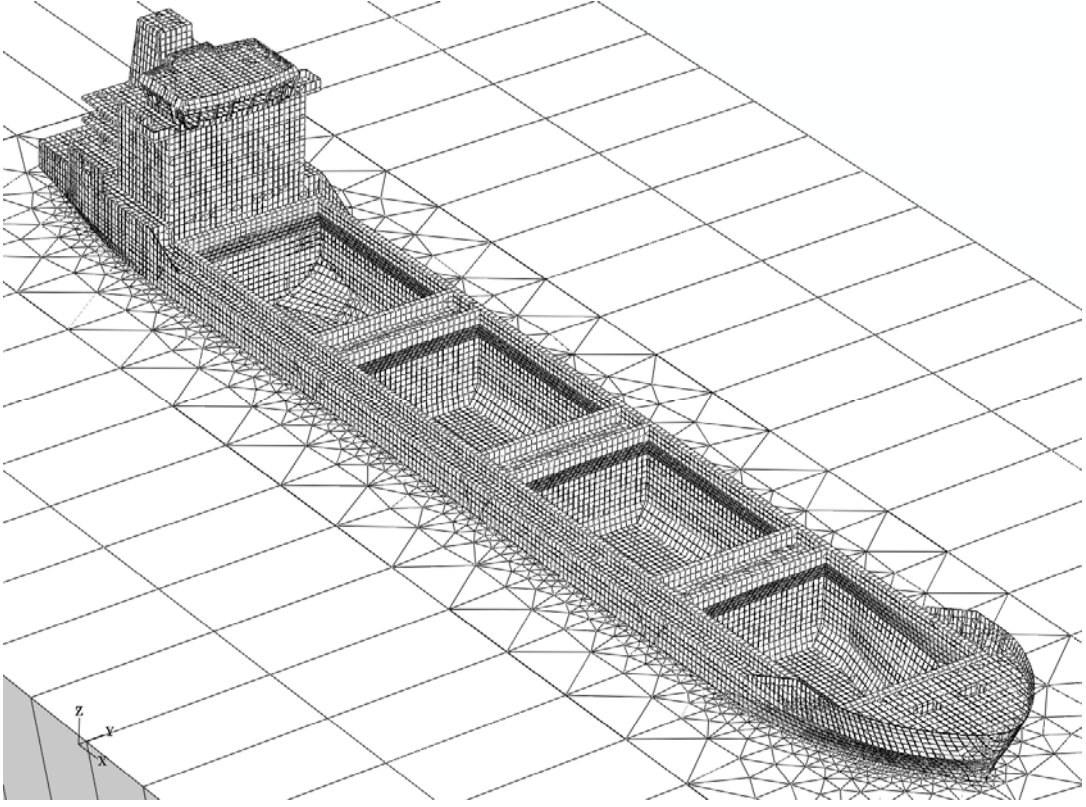
Ek 2’de verilen geminin yükleme koşulu detaylarına göre yapılan tam homojen ve balast yüklemesi sonucu, modelin ve gemini ağırlık ve ağırlık merkezi karşılaştırmaları Çizelge 6.3’de görülebilmektedir.

Çizelge 6.3 Yükleme koşulları ve gemi ile karşılaştırmaları

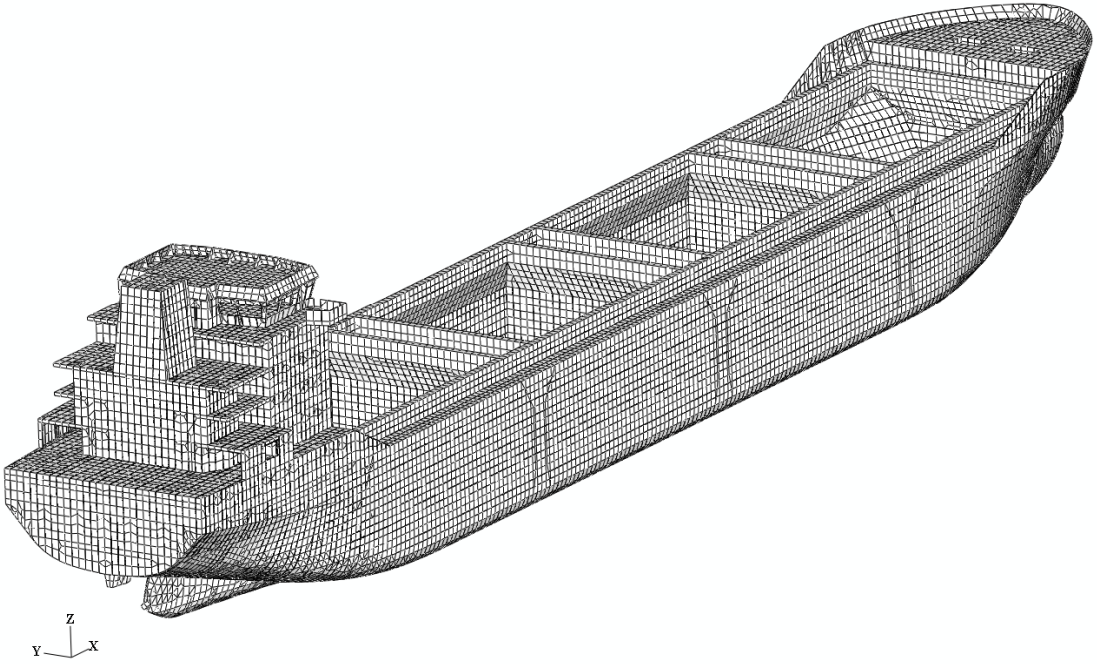
		Homojen Tam Yükleme		Balast yüklemesi	
		Toplam Ağırlık (ton)	LCG - Ağırlık Merkezi (m)	Toplam Ağırlık (ton)	LCG - Ağırlık Merkezi (m)
Gemi	Boş Gemi	6506.5	64.73	6506.5	64.73
	Deadweight	20785.8	76.51	8836.4	78.31
	Toplam	27292.3	73.70	15342.9	72.55
Model	Toplam	27337.8	74.78	15150.3	71.63



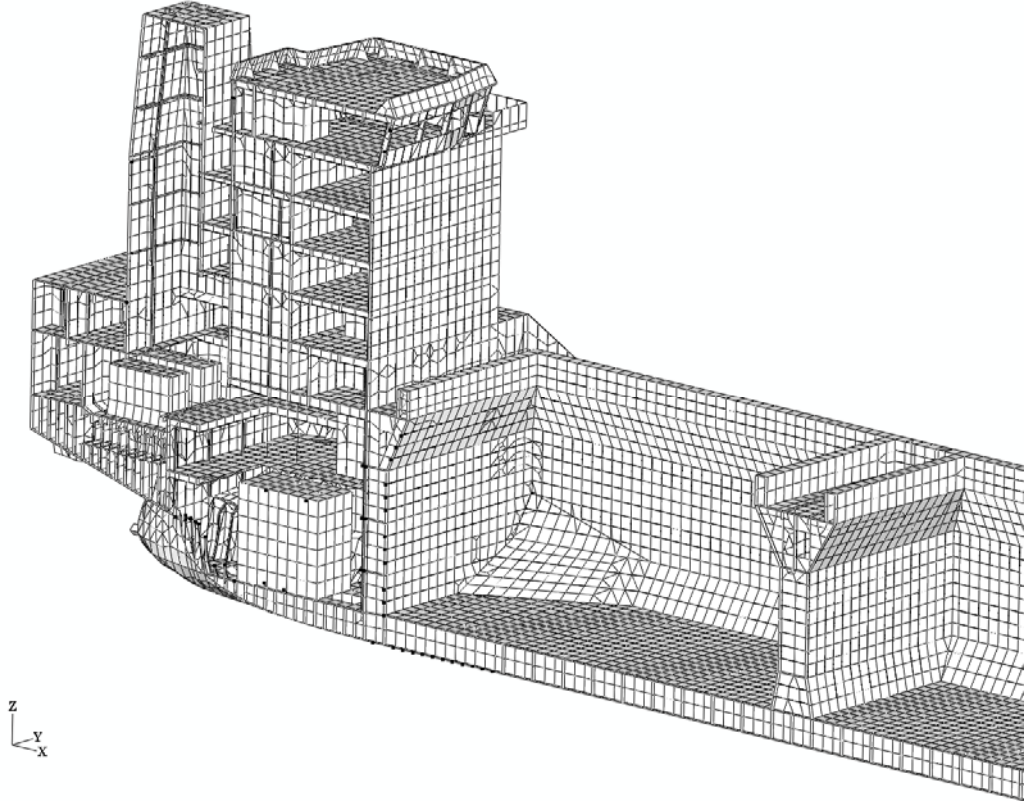
Şekil 6.1 20000 DWT kuru dökme gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)



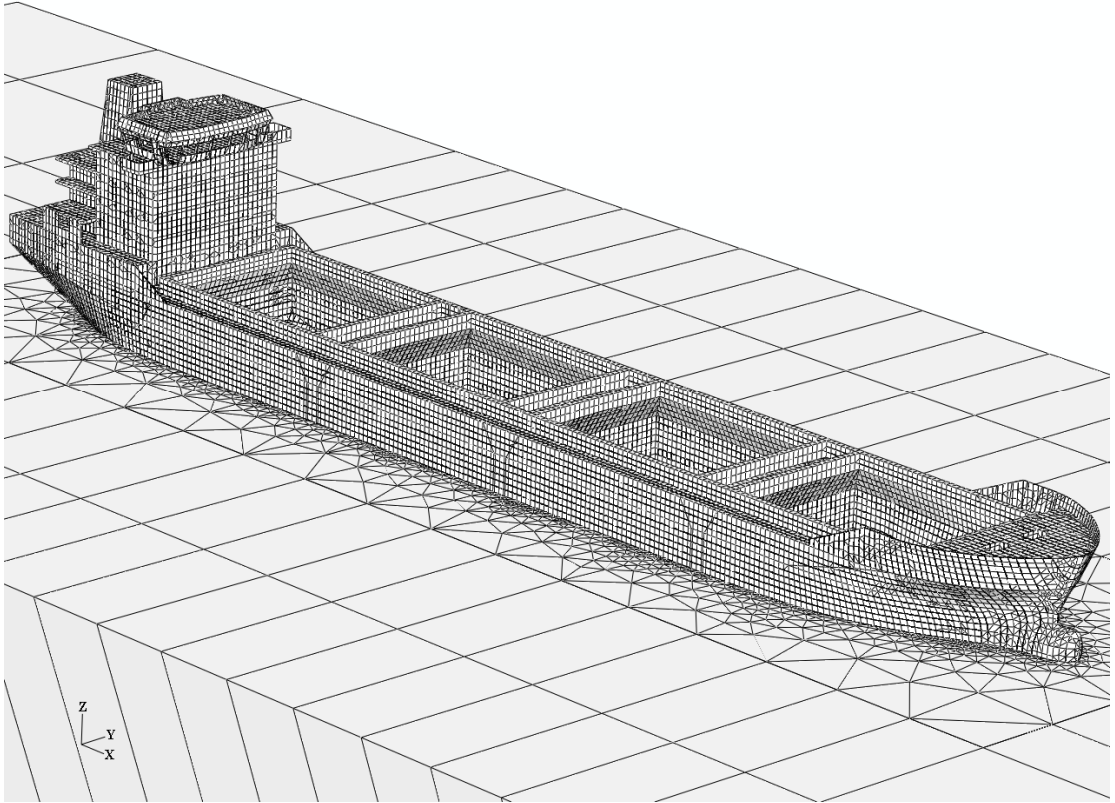
Şekil 6.2 20000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)



Şekil 6.3 20000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı



Şekil 6.4 20000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı



Şekil 6.5 20000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (balast yüklemesi)

### 6.2.2 32000 DWT Dökme Yük Gemisi

32000 DWT taşıma kapasiteli bu dökme yük gemisi *Handysize* sınıfına ait olup, çift cidarlı yan ve dip yapı konstrüksiyonuna sahiptir. Geminin ana özellikleri Çizelge 6.4’de verilmiştir.

Çizelge 6.4 32000 DWT dökme yük gemisi ana özellikleri

Gemi Ana Özellikleri	
Tam Boy	: 180.00 m
Boy P.P.( Dikmeler Arası)	: 175.00 m
Genişlik	: 28.00 m
Derinlik	: 14.16 m
Su Çekimi (Dizayn)	: 9.30 m
Su Çekimi (Scanting)	: 9.80 m
Deadweight (Dizayn)	: 30000 t
Deadweight (Scantling)	: 32000 t
Servis Hızı	: 14.3 kn
Ana Makine	: Man B&W 6S42MC

Gemi ve etrafındaki su hacminin modeli iki yükleme koşulu için kurulmuştur. Bunlar,

- Tam homojen yükleme, Su çekimi = 9.854 m,
- Balast yüklemesi, Su çekimi = 5.525 m.

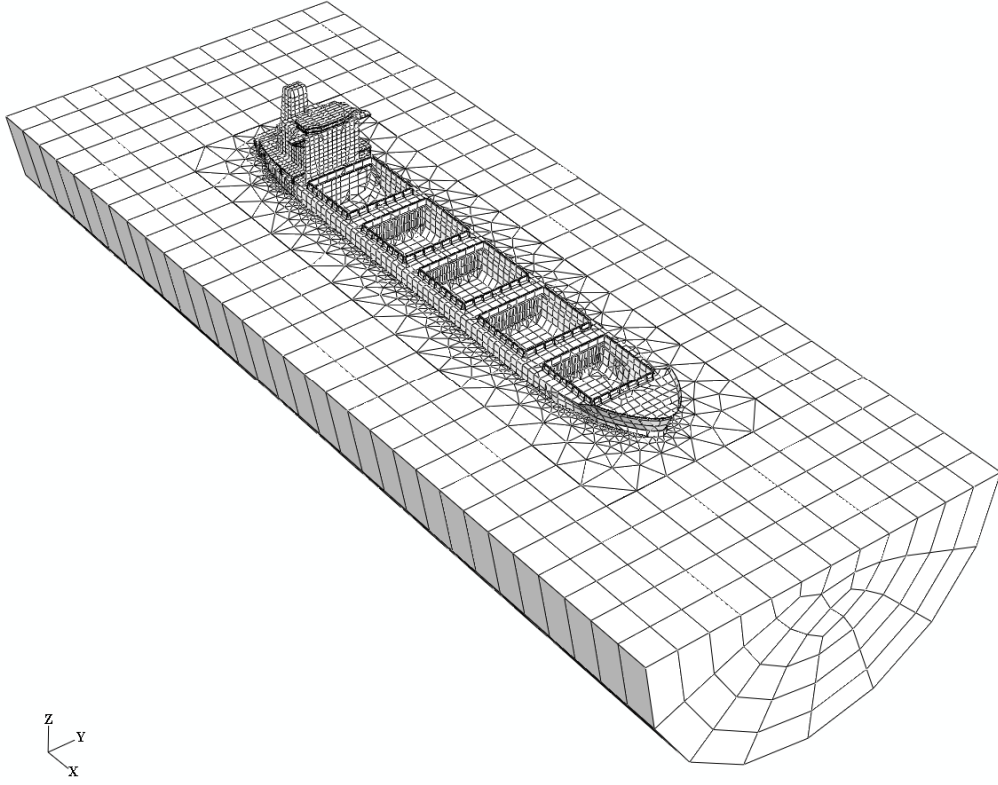
Geminin sonlu elemanlar modeli Şekil 6.6 ile Şekil 6.10 arasında görülebilir. Geminin sonlu elemanlar modelinde toplamda 24462 adet yapısal eleman, tam homojen yükleme su çekiminde 45230 adet su elemanı ve balast yüklemesindeki su çekiminde 42360 su elemanı mevcuttur.

Ek 2’de verilen geminin yükleme koşulu detaylarına göre yapılan tam homojen ve balast yüklemesi sonucu, modelin ve gemini ağırlık ve ağırlık merkezi karşılaştırmaları Çizelge 6.5’de görülebilmektedir.

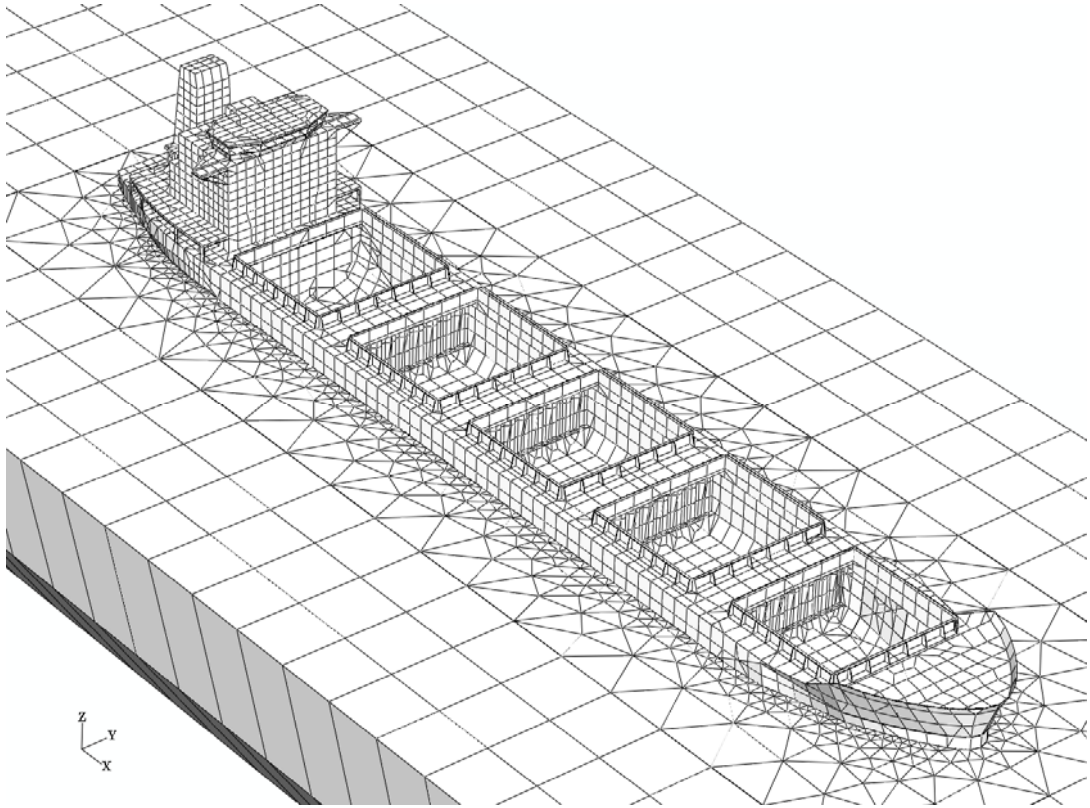
Çizelge 6.5 Yükleme koşulları ve gemi ile karşılaştırmaları

		Homojen Tam Yükleme		Balast yüklemesi	
		Toplam Ağırlık (ton)	LCG - Ağırlık Merkezi (m)	Toplam Ağırlık (ton)	LCG - Ağırlık Merkezi (m)
Gemi	Boş Gemi	9300.0	77.20	9300.0	77.20
	Deadweight	32518.1	86.75	12846.5	92.18
	Toplam	41818.1	84.62	22146.5	85.89
Model	Toplam	41654.4	85.92	22054.1	86.74

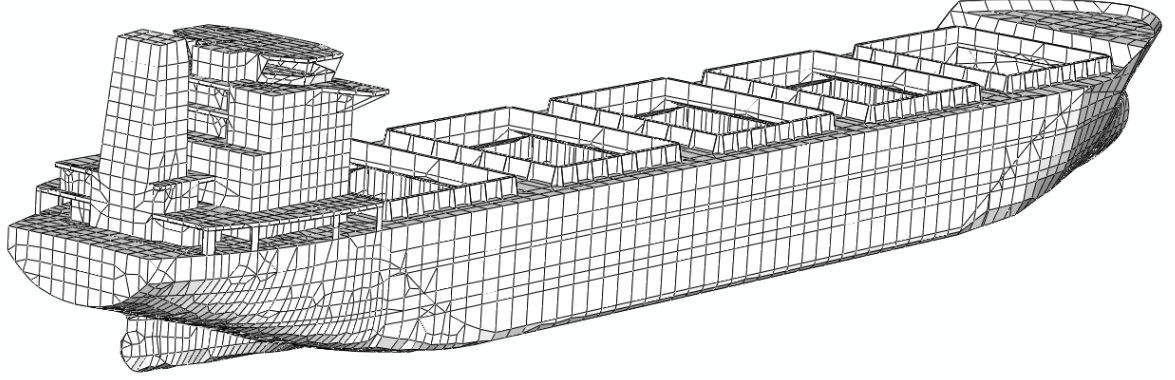




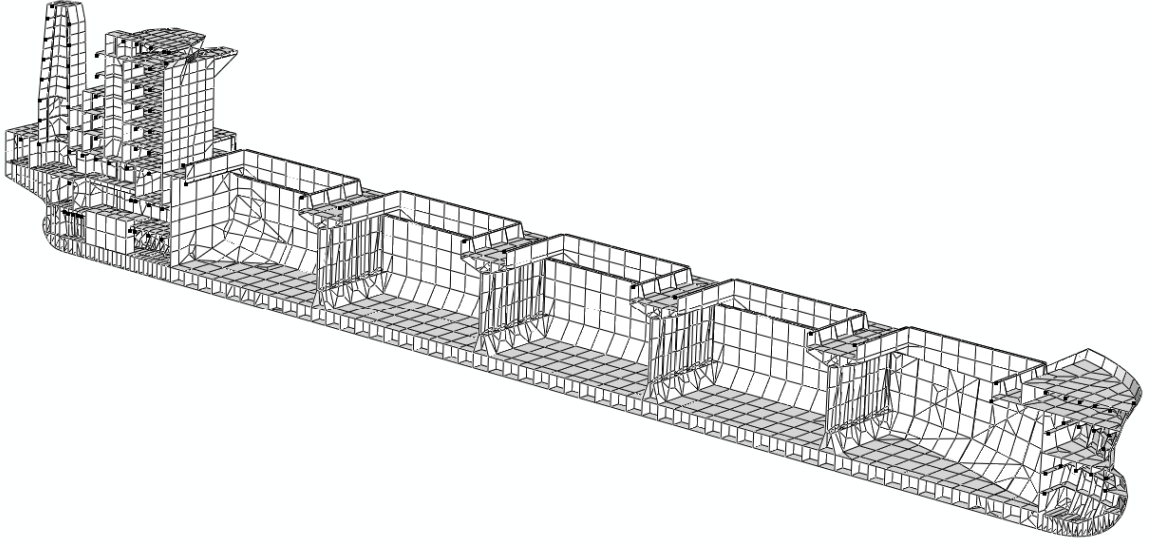
Şekil 6.6 32000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)



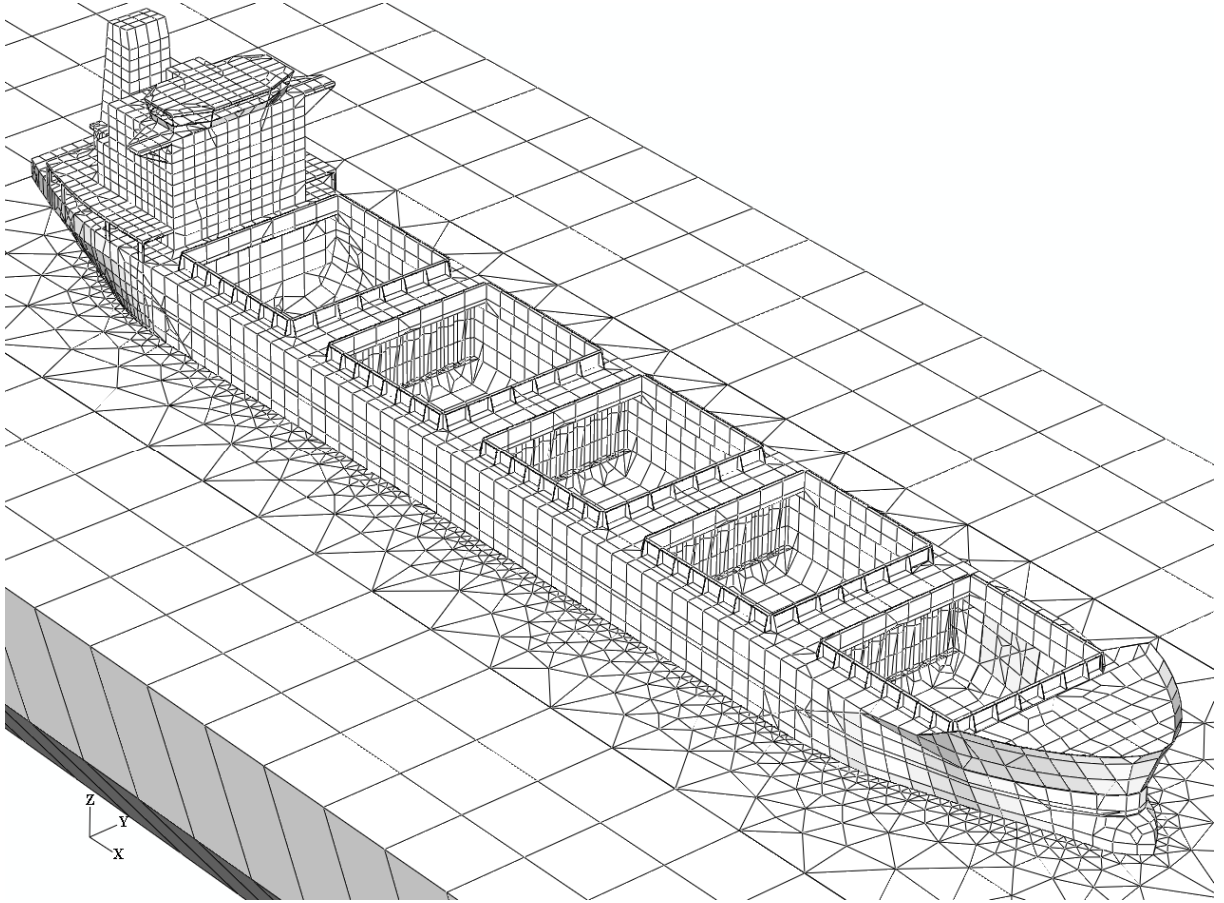
Şekil 6.7 32000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)



Şekil 6.8 32000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı



Şekil 6.9 32000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı



Şekil 6.10 32000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (balast yüklemesi)

### 6.2.3 53000 DWT Dökme Yük Gemisi

53000 DWT taşıma kapasiteli bu dökme yük gemisi *Handymax* sınıfına ait olup, çift cidarlı yan ve dip yapı konstrüksiyonuna sahiptir. Geminin ana özellikleri Çizelge 6.6'de verilmiştir.

Çizelge 6.6 53000 DWT dökme yük gemisi ana özellikleri

Gemi Ana Özellikleri	
Tam Boy	: 190.00 m
Boy P.P.( Dikmeler Arası)	: 183.25 m
Genişlik	: 32.26 m
Derinlik	: 17.50 m
Su Çekimi (Dizayn)	: 11.10 m
Su Çekimi (Scantling)	: 12.60 m
Deadweight (Dizayn)	: 44500 t
Deadweight (Scantling)	: 53000 t
Servis Hızı	: 14.0 kn
Ana Makine	: Man B&W 6S50MC

Gemi ve etrafındaki su hacminin modeli iki yükleme koşulu için kurulmuştur. Bunlar,

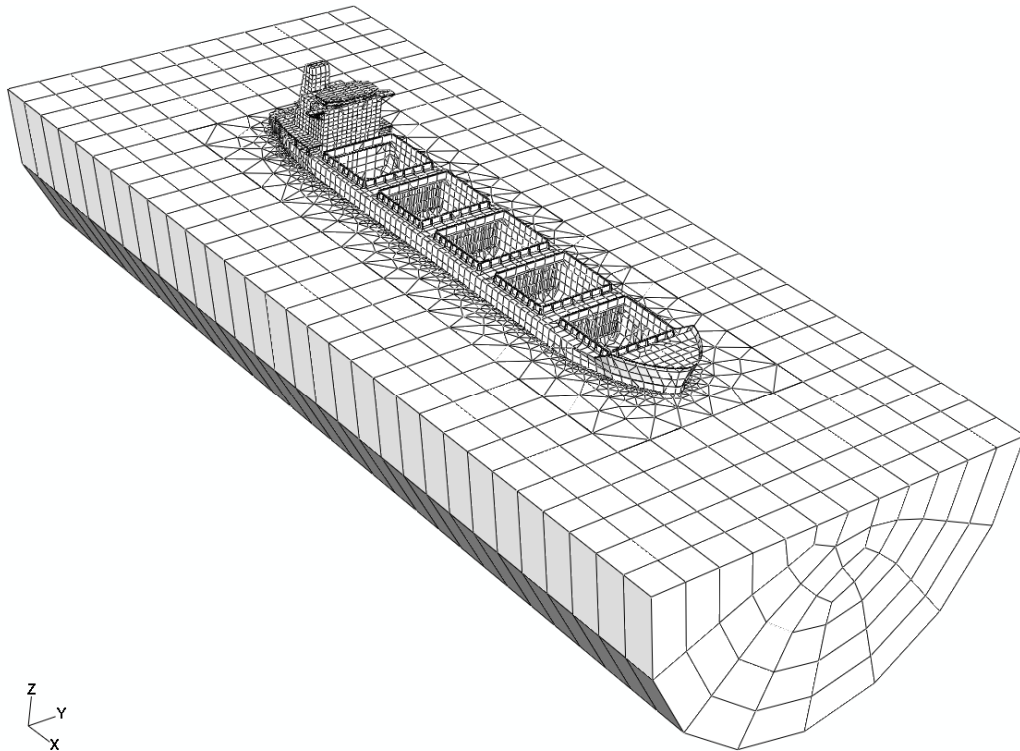
- Tam homojen yükleme, Su çekimi = 12.18 m,
- Balast yüklemesi, Su çekimi = 6.795 m.

Geminin sonlu elemanlar modeli Şekil 6.11 ile Şekil 6.15 arasında görülebilir. Geminin sonlu elemanlar modelinde toplamda 24546 adet yapısal eleman, tam homojen yükleme su çekiminde 46820 adet su elemanı ve balast yüklemesindeki su çekiminde 41446 su elemanı mevcuttur.

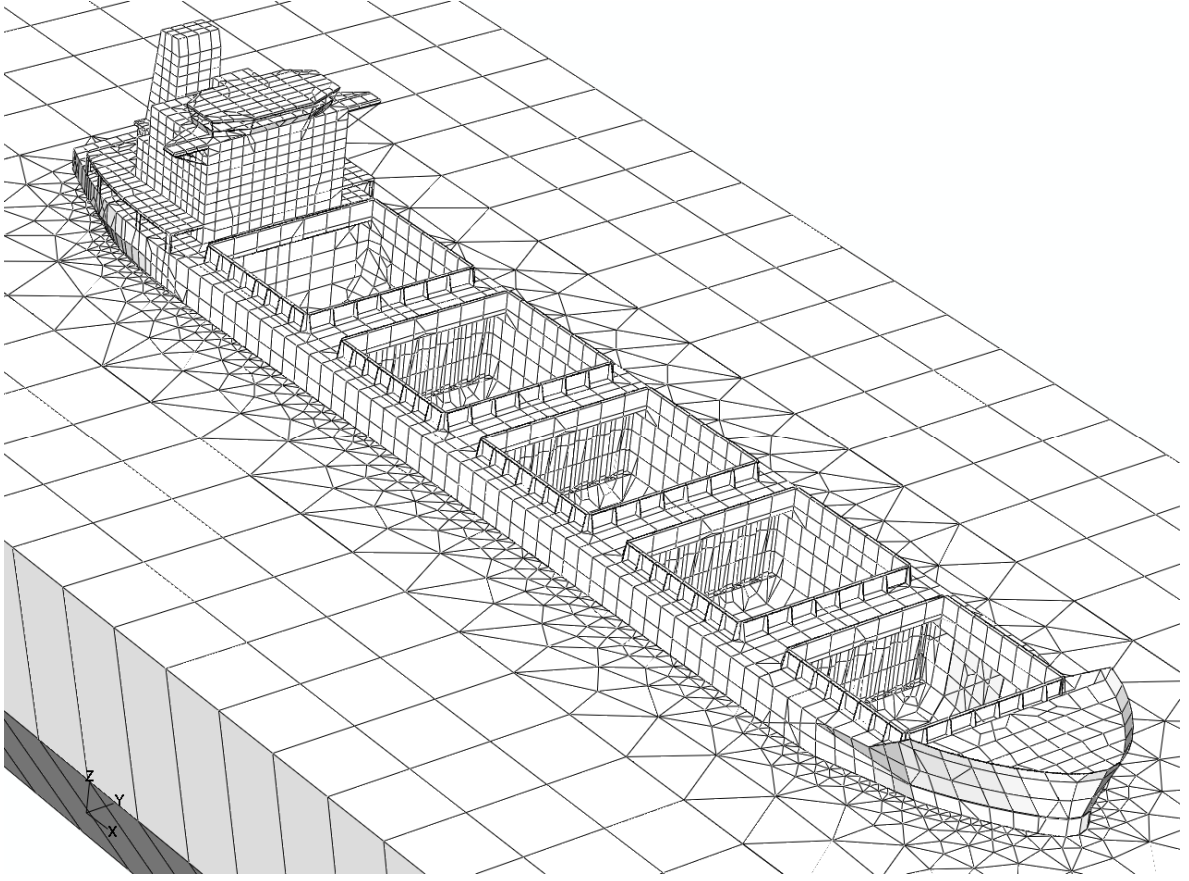
Ek 2’de verilen geminin yükleme koşulu detaylarına göre yapılan tam homojen ve balast yüklemesi sonucu, modelin ve gemini ağırlık ve ağırlık merkezi karşılaştırmaları Çizelge 6.7’de görülebilmektedir.

Çizelge 6.7 Yükleme koşulları ve gemi ile karşılaştırmaları

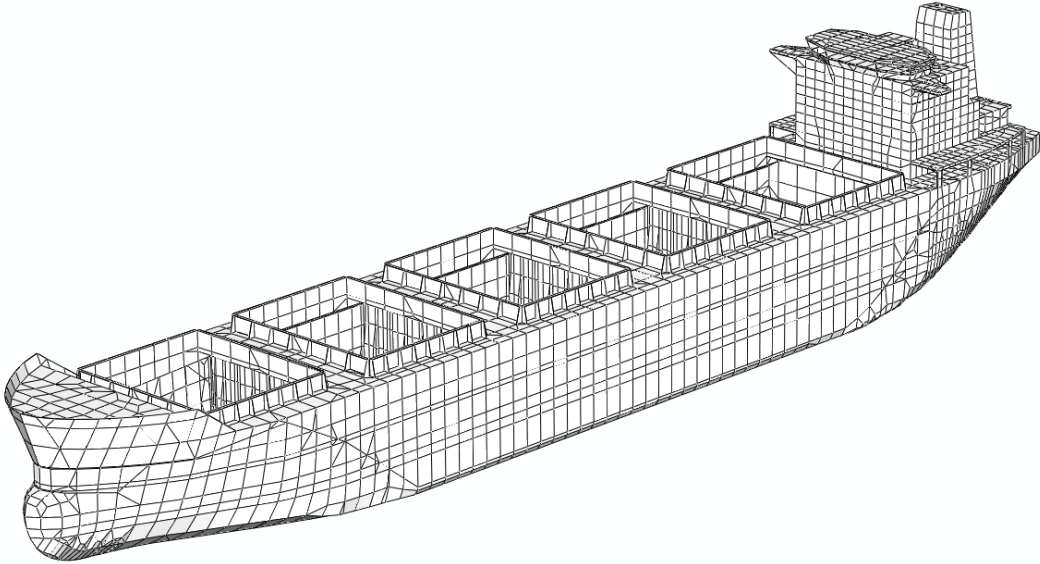
		Homojen Tam Yükleme		Balast yüklemesi	
		Toplam Ağırlık (ton)	LCG - Ağırlık Merkezi (m)	Toplam Ağırlık (ton)	LCG - Ağırlık Merkezi (m)
Gemi	Boş Gemi	12405.0	80.28	12405.0	80.28
	Deadweight	52926.6	90.21	21276.2	95.85
	Toplam	65331.6	88.32	33681.2	90.11
Model	Toplam	64895.1	87.36	33032.3	88.94



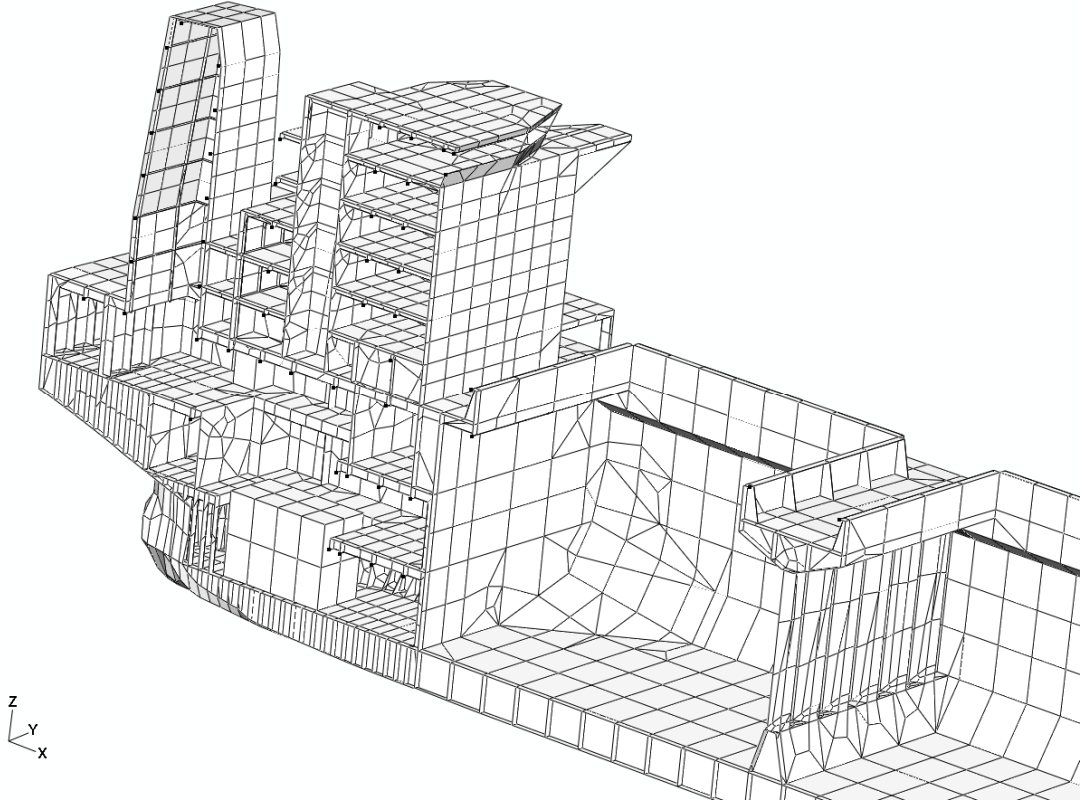
Şekil 6.11 53000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)



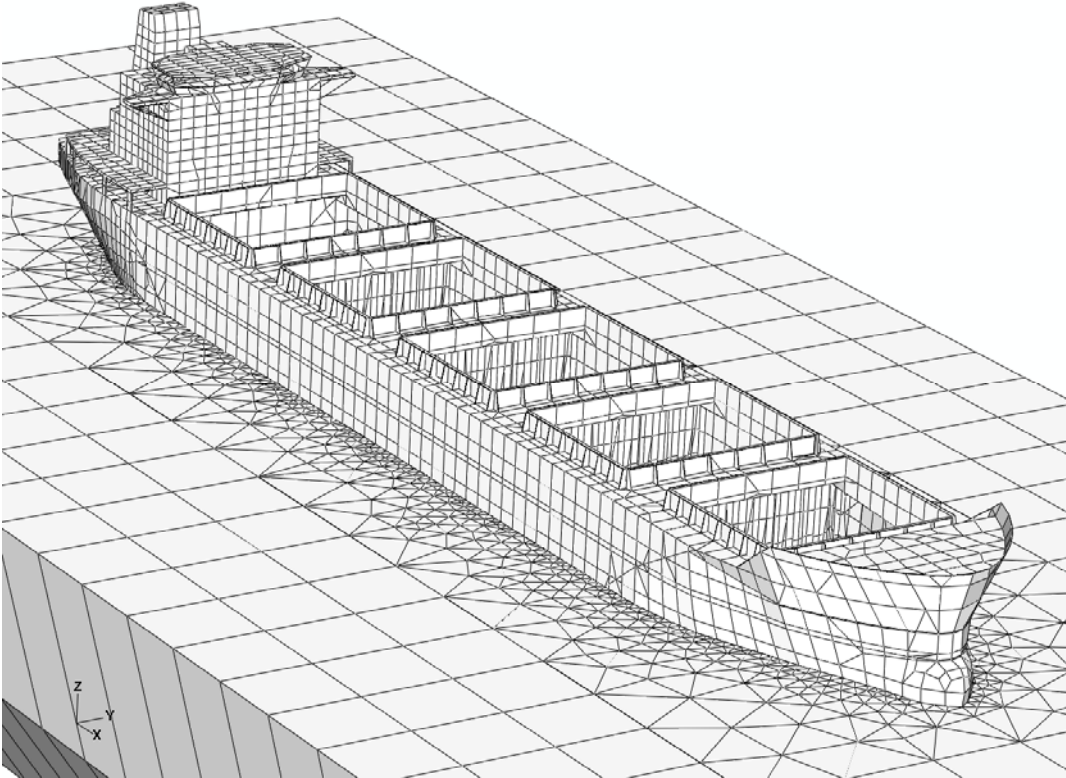
Şekil 6.12 53000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)



Şekil 6.13 53000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı



Şekil 6.14 53000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı



Şekil 6.15 53000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (balast yüklemesi)

#### 6.2.4 76000 DWT Dökme Yük Gemisi

76000 DWT taşıma kapasiteli bu dökme yük gemisi *Panamax* sınıfına ait olup, tek cidarlı yan ve çift cidarlı dip yapı konstrüksiyonuna sahiptir. Geminin ana özellikleri Çizelge 6.8’de verilmiştir.

Çizelge 6.8 76000 DWT dökme yük gemisi ana özellikleri

Gemi Ana Özellikleri	
Tam Boy	: 248.80 m
Boy P.P.( Dikmeler Arası)	: 235.00 m
Genişlik	: 32.25 m
Derinlik	: 19.30 m
Su Çekimi (Dizayn)	: 14.00 m
Su Çekimi (Scanting)	: 14.50 m
Deadweight (Dizayn)	: 76000 t
Deadweight (Scantling)	: 80000 t
Servis Hızı	: 14.1 kn
Ana Makine	: Man B&W 6S60MC

Gemi ve etrafındaki su hacminin modeli iki yükleme koşulu için kurulmuştur. Bunlar,

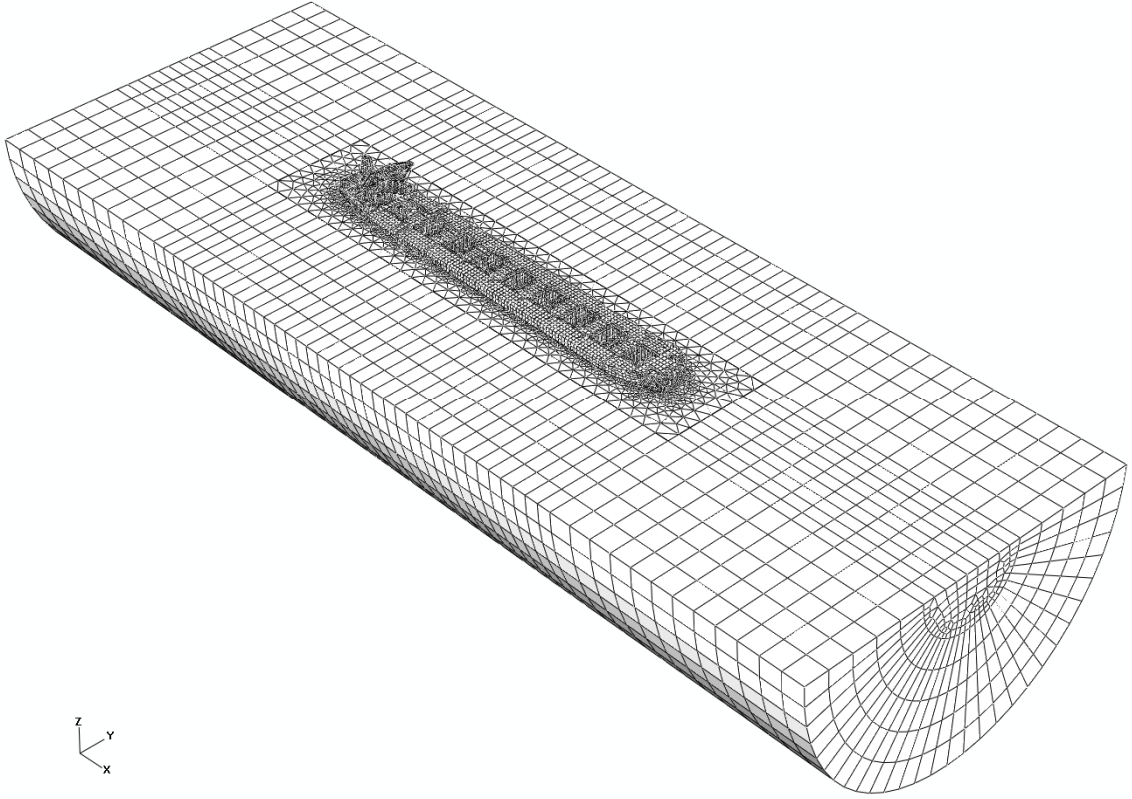
- Tam homojen yükleme, Su çekimi = 14.020 m,
- Balast yüklemesi, Su çekimi = 7.087 m.

Geminin sonlu elemanlar modeli Şekil 6.16 ile Şekil 6.20 arasında görülebilir. Geminin sonlu elemanlar modelinde toplamda 70609 adet yapısal eleman, tam homojen yükleme su çekiminde 55590 adet su elemanı ve balast yüklemesindeki su çekiminde 51280 su elemanı mevcuttur.

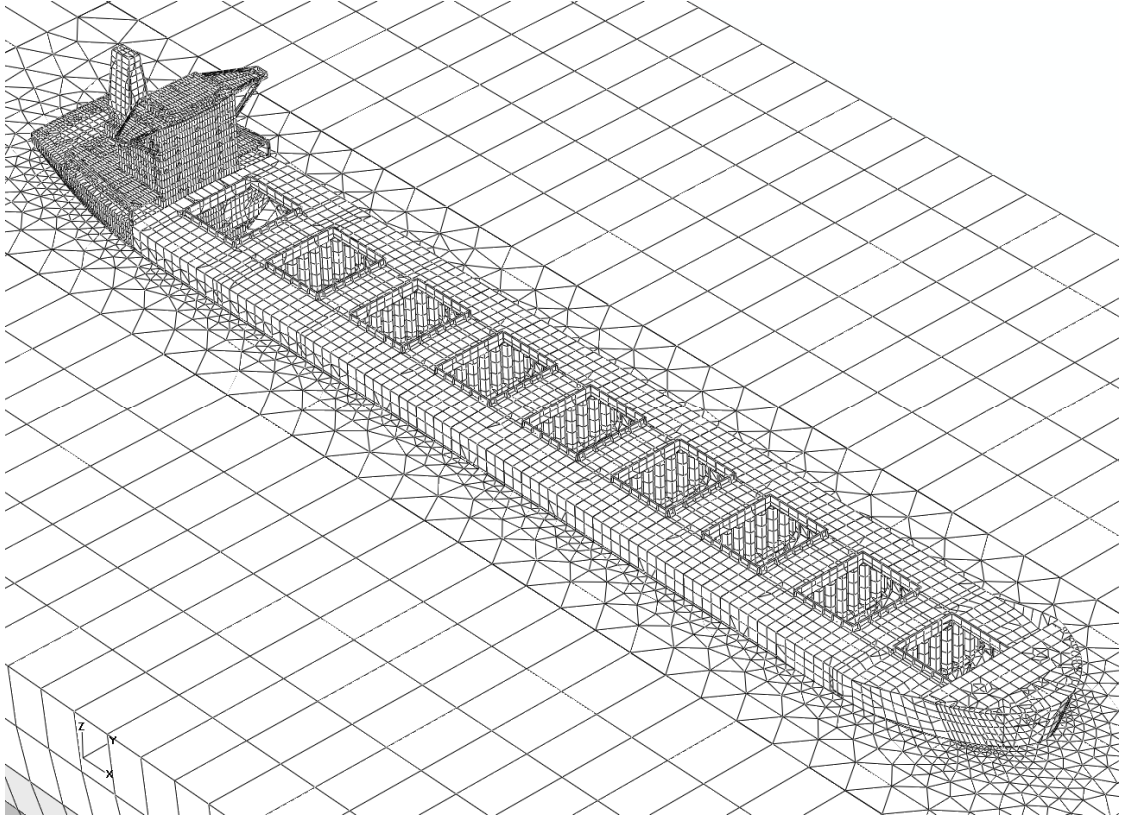
Ek 2’de verilen geminin yükleme koşulu detaylarına göre yapılan tam homojen ve balast yüklemesi sonucu, modelin ve gemini ağırlık ve ağırlık merkezi karşılaştırmaları Çizelge 6.9’da görülebilmektedir.

Çizelge 6.9 Yükleme koşulları ve gemi ile karşılaştırmaları

		Homojen Tam Yükleme		Balast yüklemesi	
		Toplam Ağırlık (ton)	LCG - Ağırlık Merkezi (m)	Toplam Ağırlık (ton)	LCG - Ağırlık Merkezi (m)
Gemi	Boş Gemi	15583.0	105.40	15583.0	105.40
	Deadweight	76011.4	127.50	28255.6	135.95
	Toplam	91594.4	123.80	43838.6	125.09
Model	Toplam	91153.5	122.75	43431.5	123.20

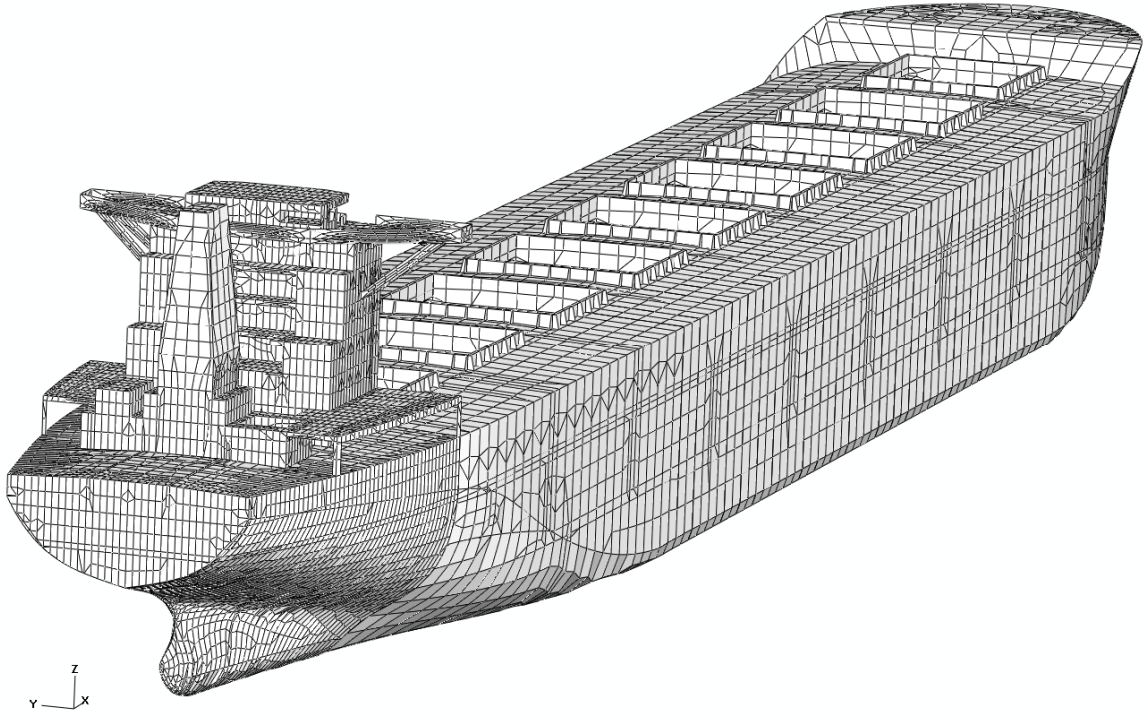


Şekil 6.16 76000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)

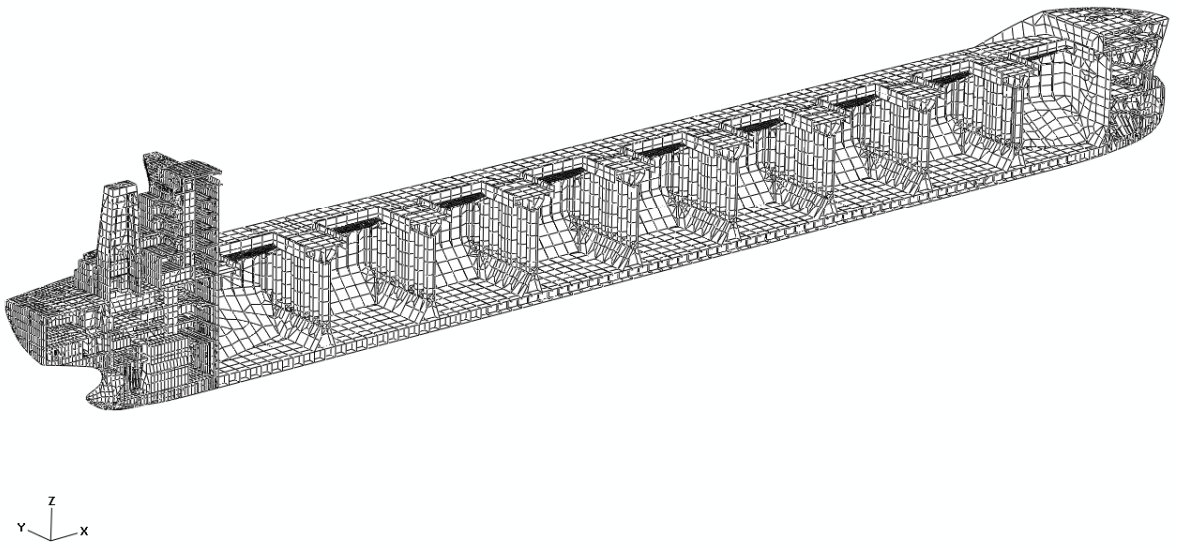


Şekil 6.17 76000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)

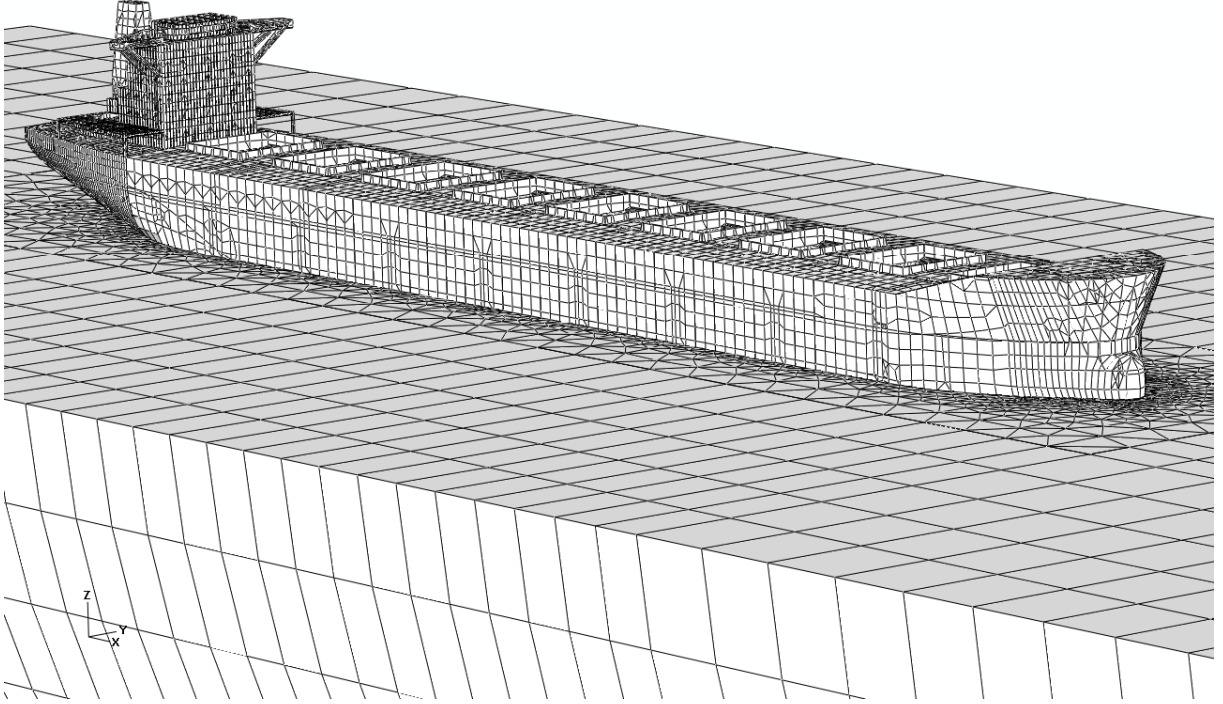




Şekil 6.18 76000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı



Şekil 6.19 76000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı



Şekil 6.20 76000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (balast yüklemesi)

### 6.2.5 140000 DWT Dökme Yük Gemisi

140000 DWT taşıma kapasiteli bu dökme yük gemisi *Capesize* sınıfına ait olup, tek cidarlı yan ve çift cidarlı dip yapı konstrüksiyonuna sahiptir. Geminin ana özellikleri Çizelge 6.10'de verilmiştir.

Çizelge 6.10 140000 DWT dökme yük gemisi ana özellikleri

Gemi Ana Özellikleri	
Tam Boy	: 237.40 m
Boy P.P.( Dikmeler Arası)	: 228.90 m
Genişlik	: 45.00 m
Derinlik	: 23.00 m
Su Çekimi (Dizayn)	: 15.00 m
Su Çekimi (Scantling)	: 16.90 m
Deadweight (Dizayn)	: 122000 t
Deadweight (Scantling)	: 140000 t
Servis Hızı	: 13 kn
Ana Makine	: Man B&W 7S60MC

Gemi ve etrafındaki su hacminin modeli iki yükleme koşulu için kurulmuştur. Bunlar,

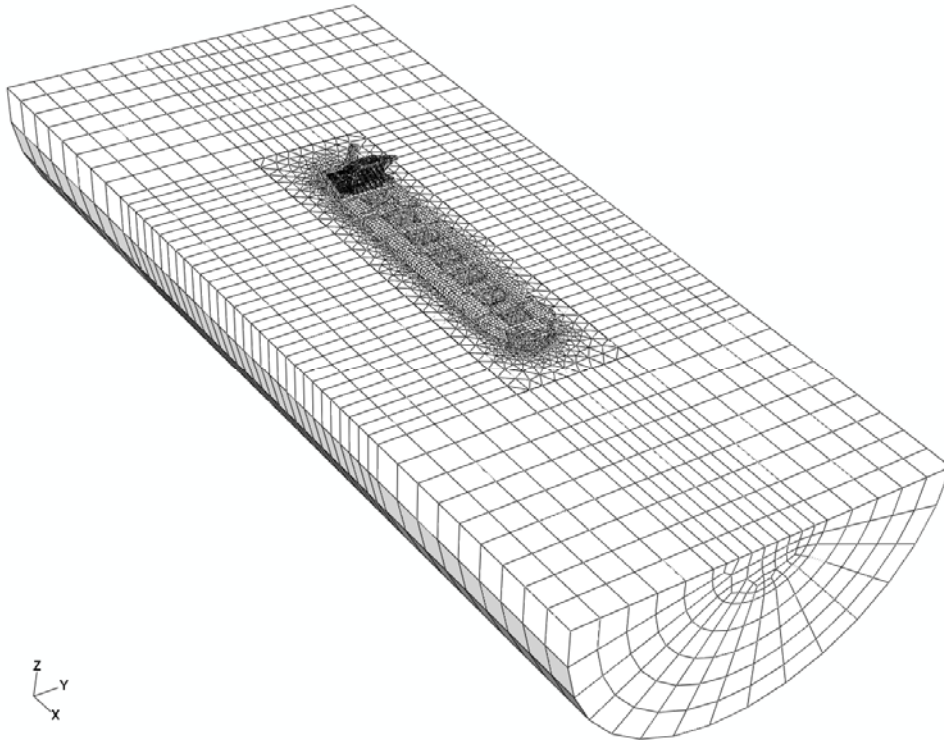
- Tam homojen yükleme, Su çekimi = 16.90 m,
- Balast yüklemesi, Su çekimi = 7.970 m.

Geminin sonlu elemanlar modeli Şekil 6.21 ile Şekil 6.25 arasında görülebilir. Geminin sonlu elemanlar modelinde toplamda 64810 adet yapısal eleman, tam homojen yükleme su çekiminde 51810 adet su elemanı ve balast yüklemesindeki su çekiminde 36433 su elemanı mevcuttur.

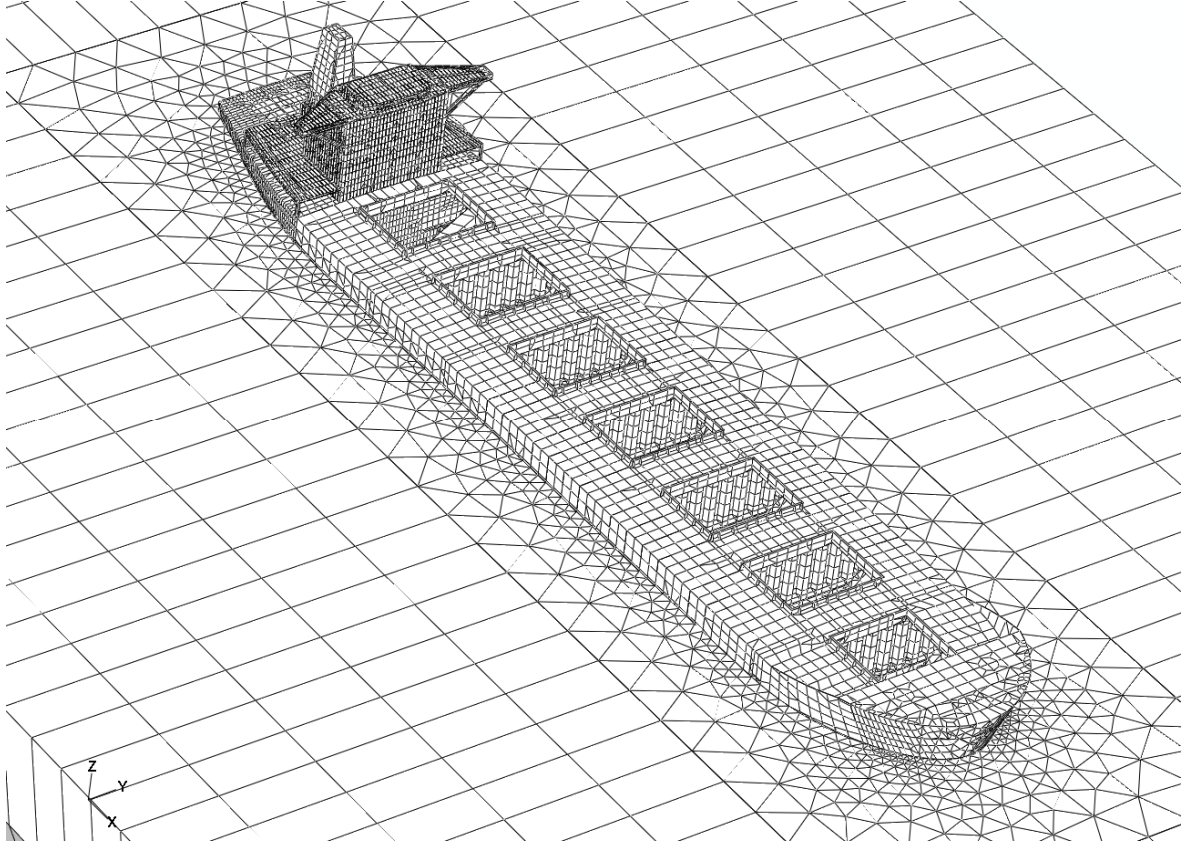
Ek 2’de verilen geminin yükleme koşulu detaylarına göre yapılan tam homojen ve balast yüklemesi sonucu, modelin ve gemini ağırlık ve ağırlık merkezi karşılaştırmaları Çizelge 6.11’de görülebilmektedir.

Çizelge 6.11 Yükleme koşulları ve gemi ile karşılaştırmaları

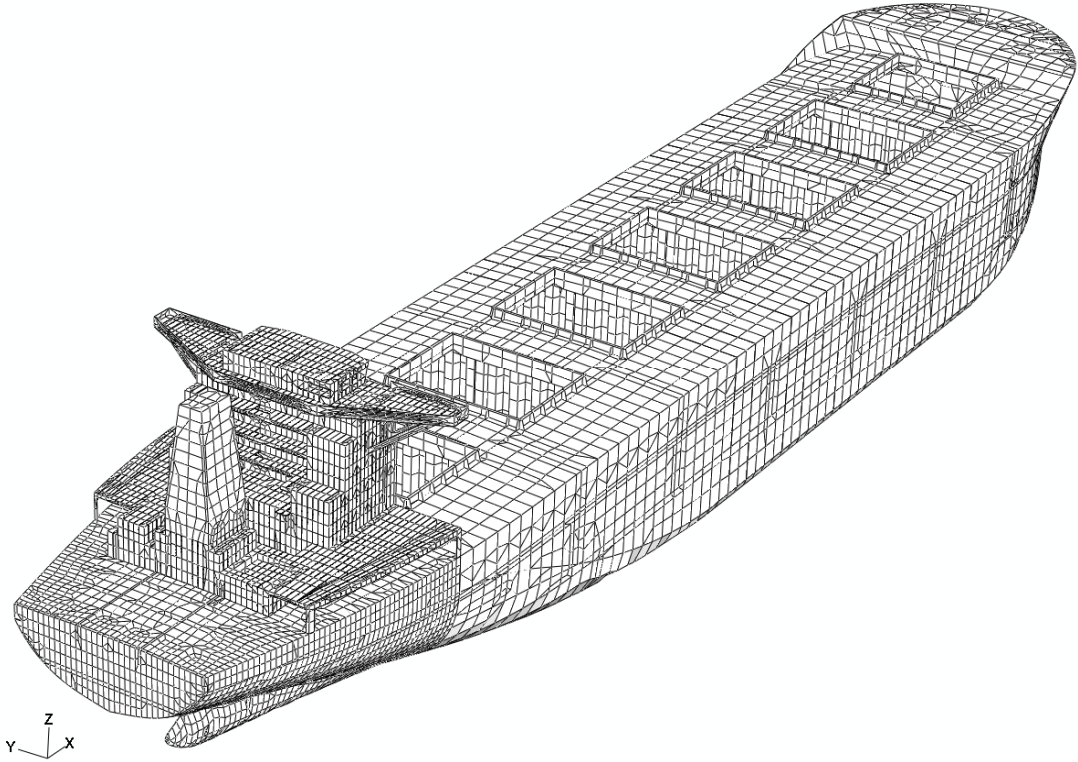
		Homojen Tam Yükleme		Balast yüklemesi	
		Toplam Ağırlık (ton)	LCG - Ağırlık Merkezi (m)	Toplam Ağırlık (ton)	LCG - Ağırlık Merkezi (m)
Gemi	Boş Gemi	19500.0	107.50	19500.0	107.50
	Deadweight	139892.0	121.38	51552.0	121.26
	Toplam	159392.0	119.68	71052.0	117.48
Model	Toplam	159186.4	120.21	69750.2	115.10



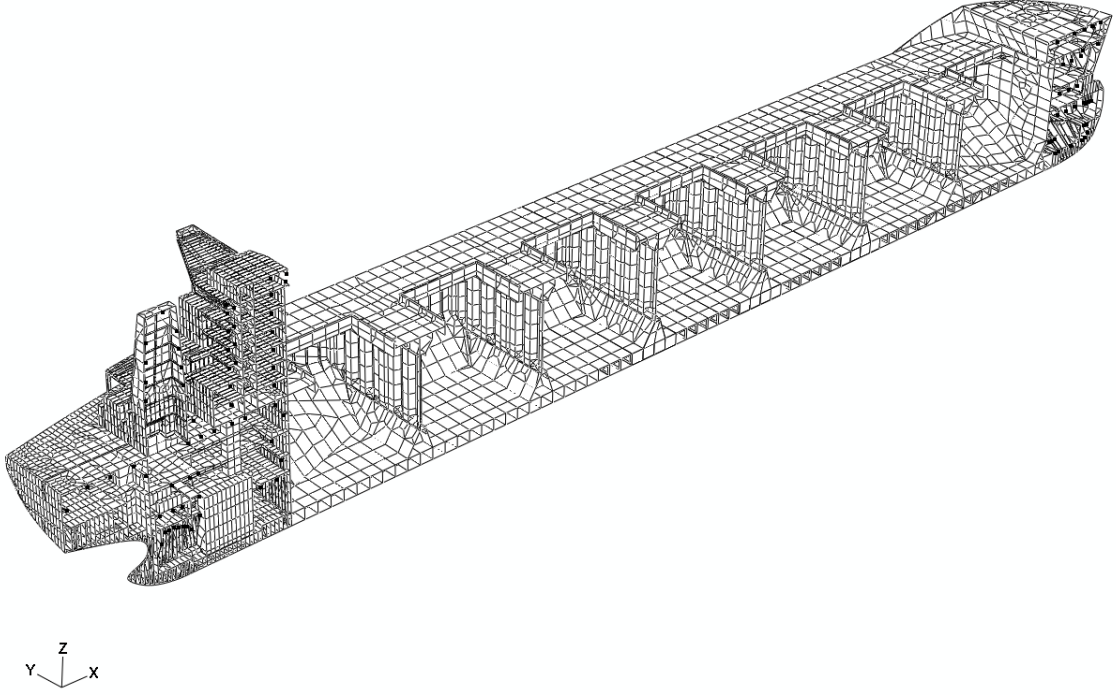
Şekil 6.21 140000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)



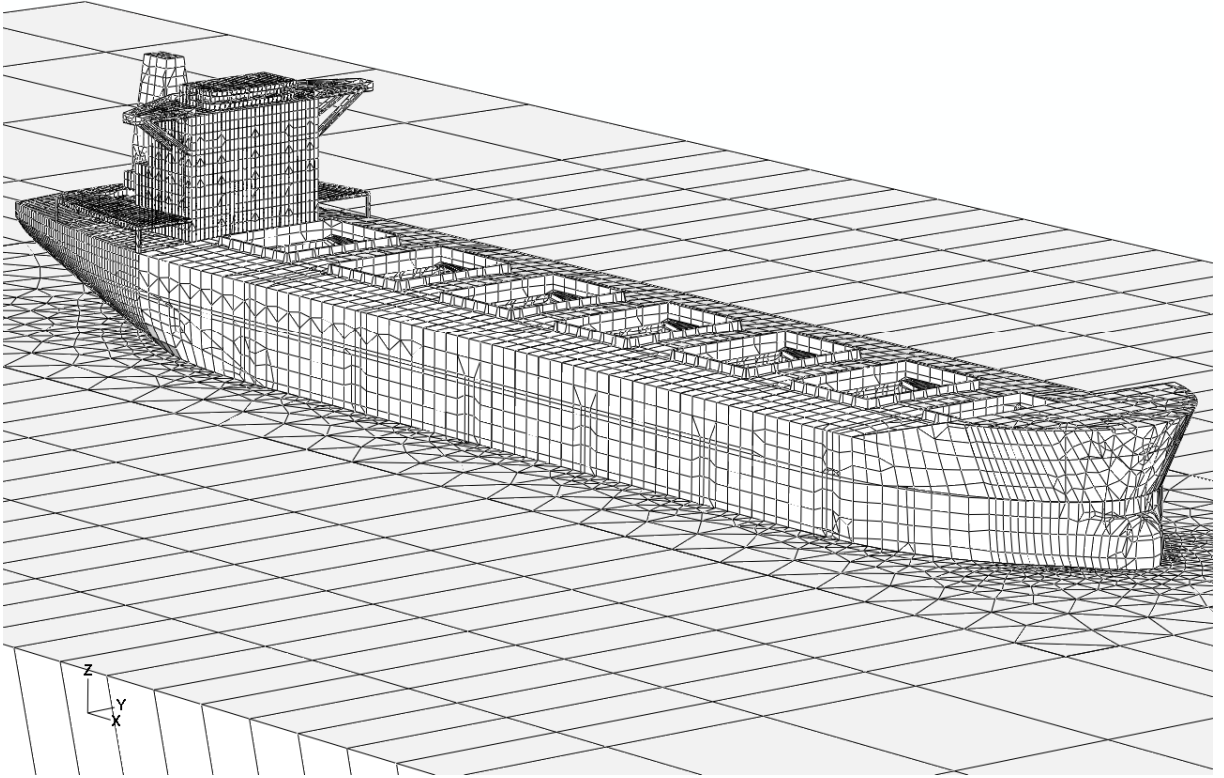
Şekil 6.22 140000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)



Şekil 6.23 140000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı



Şekil 6.24 140000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı



Şekil 6.25 140000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (balast yüklemesi)

### 6.2.6 180000 DWT Dökme Yük Gemisi

180000 DWT taşıma kapasiteli bu dökme yük gemisi *Capesize* sınıfına ait olup, tek cidarlı yan ve çift cidarlı dip yapı konstrüksiyonuna sahiptir. Gemi yeni CSR (common structural rules) kurallarına göre dizayn edilmiştir. Geminin ana özellikleri Çizelge 6.12’de verilmiştir.

Çizelge 6.12 180000 DWT dökme yük gemisi ana özellikleri

Gemi Ana Özellikleri	
Tam Boy	: 289.00 m
Boy P.P.( Dikmeler Arası)	: 280.50 m
Genişlik	: 45.00 m
Derinlik	: 24.80 m
Su Çekimi (Dizayn)	: 16.10 m
Su Çekimi (Scanting)	: 18.25 m
Deadweight (Dizayn)	: 154700 t
Deadweight (Scantling)	: 181000 t
Servis Hızı	: 14.5 kn
Ana Makine	: Man B&W 6S70MC

Gemi ve etrafındaki su hacminin modeli iki yükleme koşulu için kurulmuştur. Bunlar,

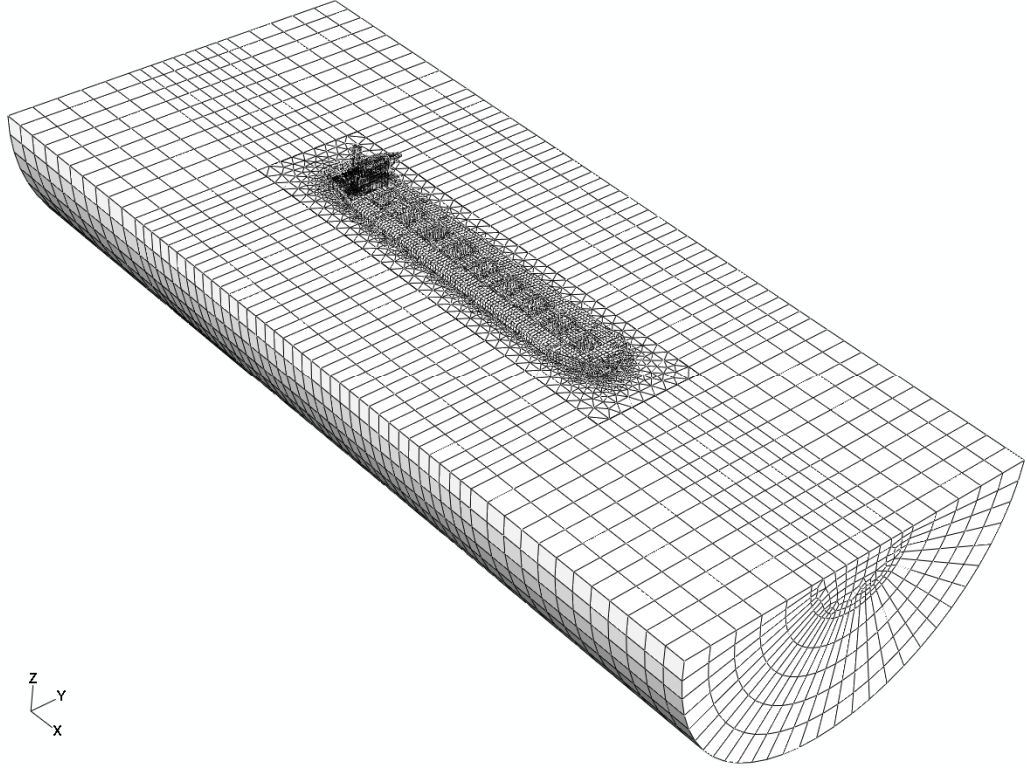
- Tam homojen yükleme, Su çekimi = 18.264 m,
- Balast yüklemesi, Su çekimi = 8.703 m.

Geminin sonlu elemanlar modeli Şekil 6.26 ile Şekil 6.30 arasında görülebilir. Geminin sonlu elemanlar modelinde toplamda 78370 adet yapısal eleman, tam homojen yükleme su çekiminde 61060 adet su elemanı ve balast yüklemesindeki su çekiminde 54660 su elemanı mevcuttur.

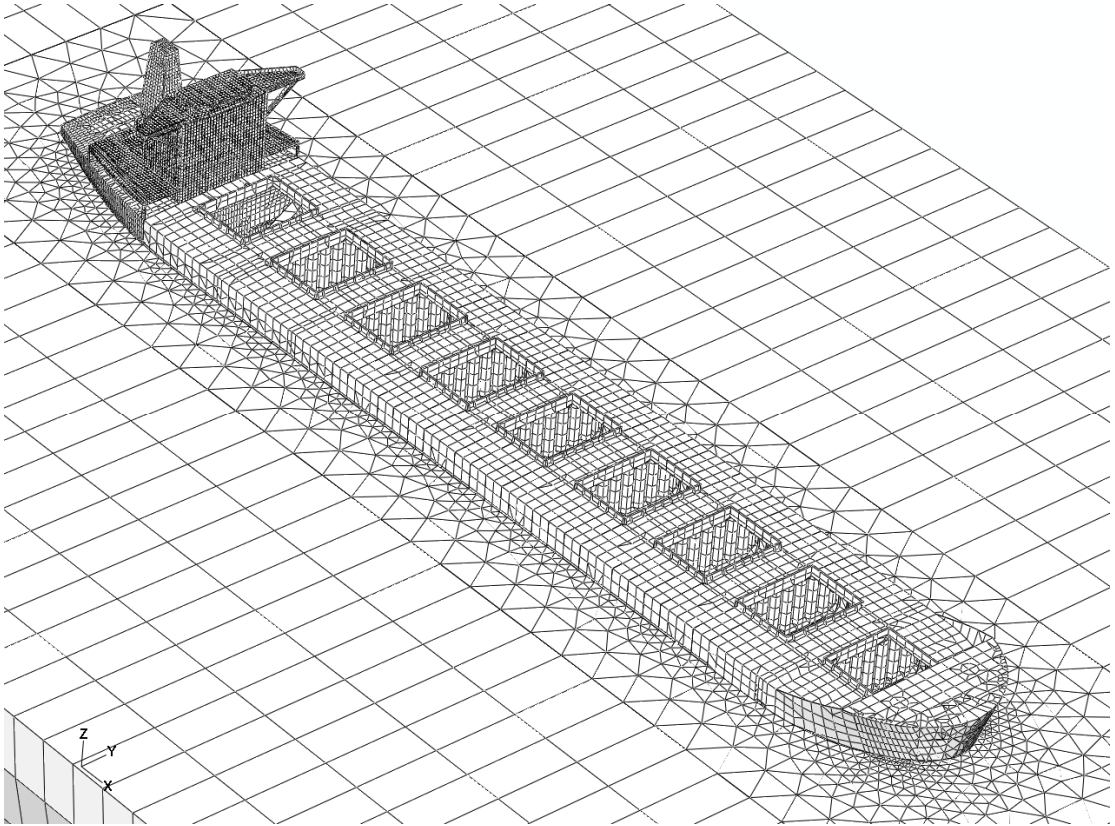
Ek 2’de verilen geminin yükleme koşulu detaylarına göre yapılan tam homojen ve balast yüklemesi sonucu, modelin ve gemini ağırlık ve ağırlık merkezi karşılaştırmaları Çizelge 6.13’de görülebilmektedir.

Çizelge 6.13 Yükleme koşulları ve gemi ile karşılaştırmaları

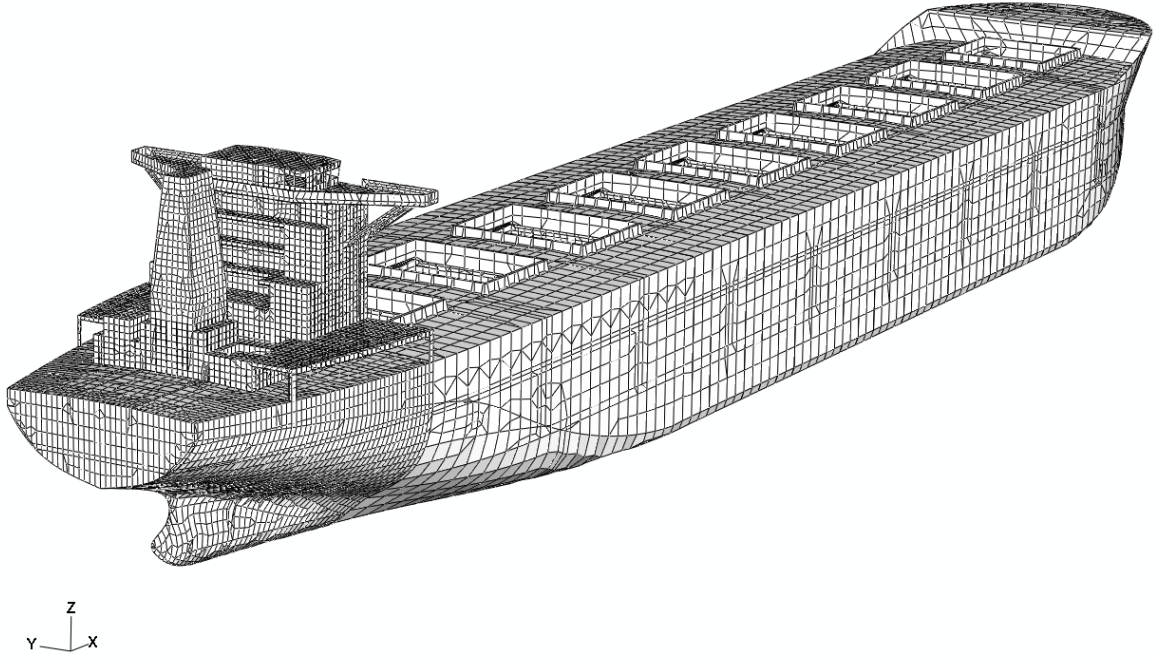
		Homojen Tam Yükleme		Balast yüklemesi	
		Toplam Ağırlık (ton)	LCG - Ağırlık Merkezi (m)	Toplam Ağırlık (ton)	LCG - Ağırlık Merkezi (m)
Gemi	Boş Gemi	25000.0	134.25	25000.0	134.25
	Deadweight	179466.9	147.76	65075.3	147.32
	Toplam	204466.9	146.10	90075.3	143.69
Model	Toplam	204389.6	146.06	89752.2	141.02



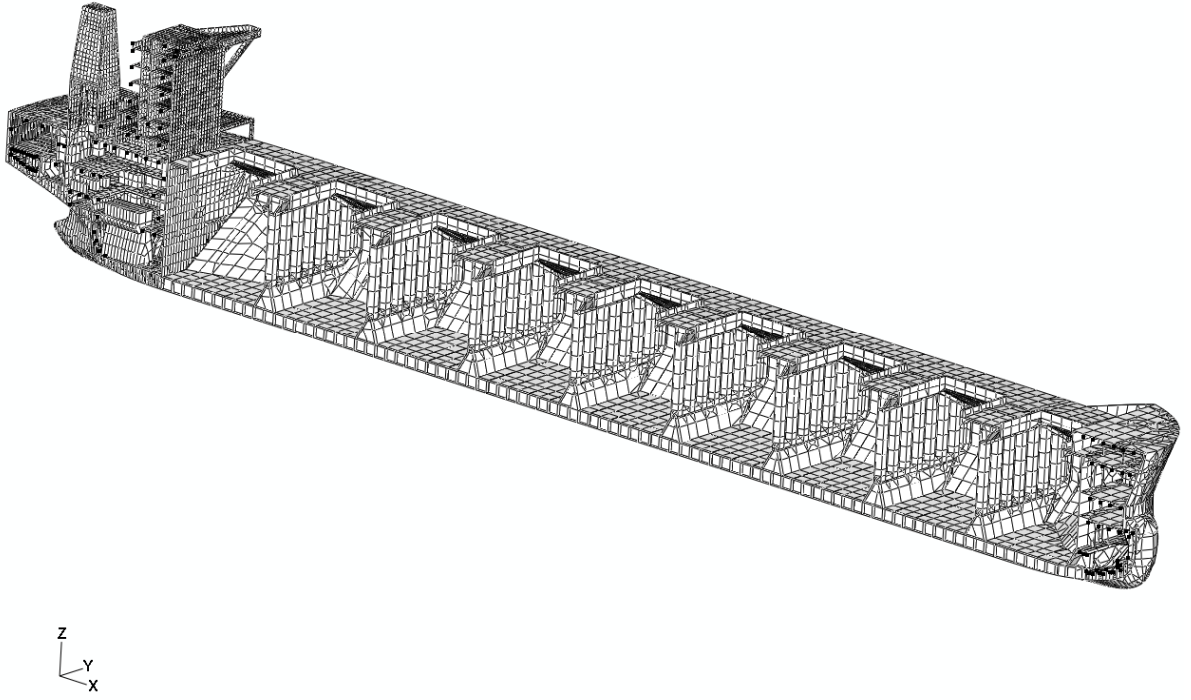
Şekil 6.26 180000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)



Şekil 6.27 180000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (tam homojen yükleme)

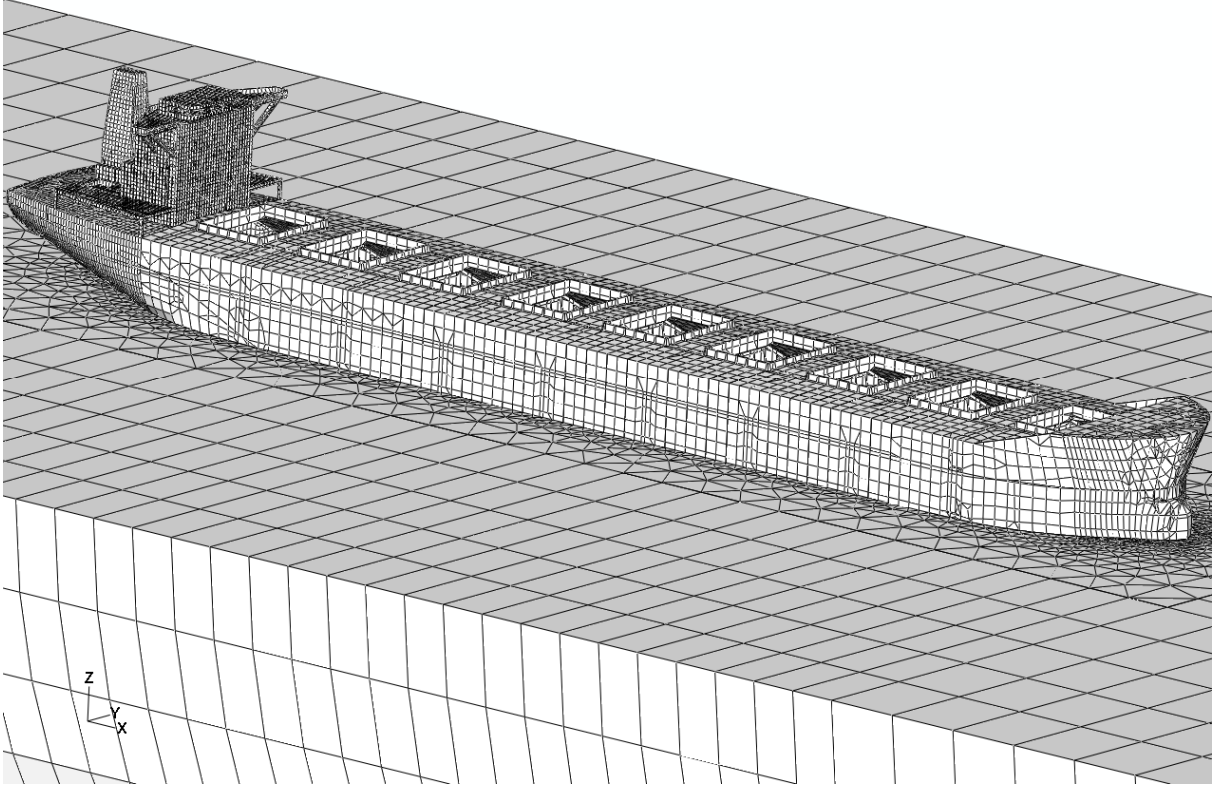


Şekil 6.28 180000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı



Şekil 6.29 180000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı





Şekil 6.30 180000 DWT dökme yük gemisi sonlu elemanlar ağı (balast yüklemesi)

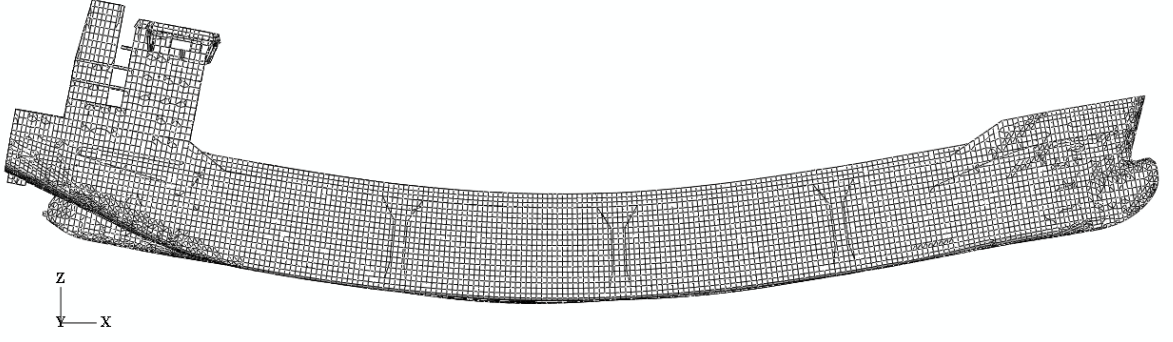
### 6.3 Hidro-Elastik Analiz Sonuçları

Gemilerin hidro-elastik titreşim analizleri Abaqus yazılımı Lanczos özdeğer hesap yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Her bir geminin tam homojen ve balast yükleme koşullarındaki analizlerinde, ilk yirmi hidro-elastik titreşim frekansları ve mod şekilleri hesaplanmıştır. Ayrıca karşılaştırma amaçlı olarak, gemilerin etrafındaki su hacmi ile akışkan-yapı etkileşimi olmadan yani vakum halindeki serbest titreşim analizleri de yapılmıştır.

Gemilerin, genel titreşim mod şekilleri ve her bir yüklemeye ıslak halde ve vakumdaki titreşim frekans değerleri karşılaştırmalı olarak aşağıda verilmiştir.

#### 6.3.1 20000 DWT Dökme Yük Gemisi Analiz Sonuçları

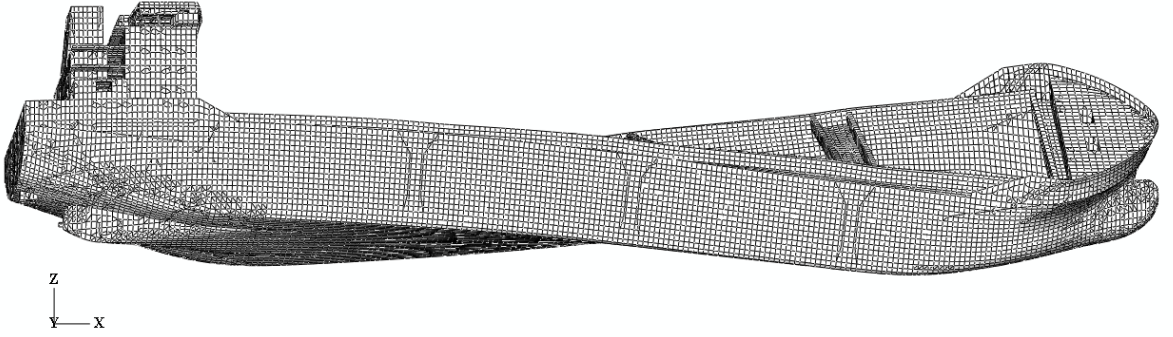
Geminin elastik mod şekilleri Şekil 6.31, 6.34 arasında ve ilgili yüklemelerdeki frekans değerleri Çizelge 6.14’de görülebilmektedir.



Birinci Düşey Eğilme Modu

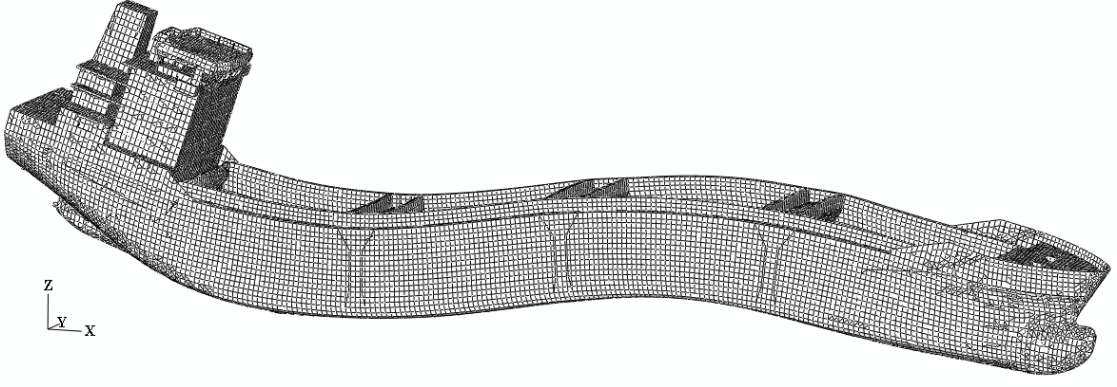


Birinci Yatay Eğilme Modu

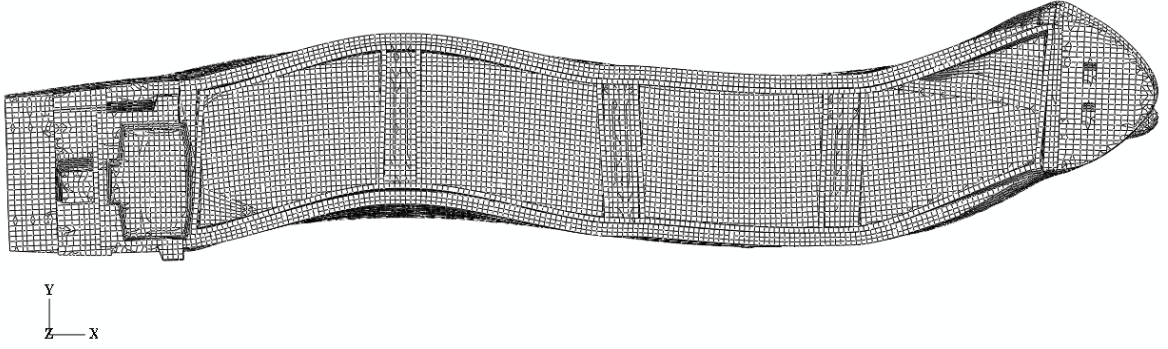


Birinci Burulma Modu

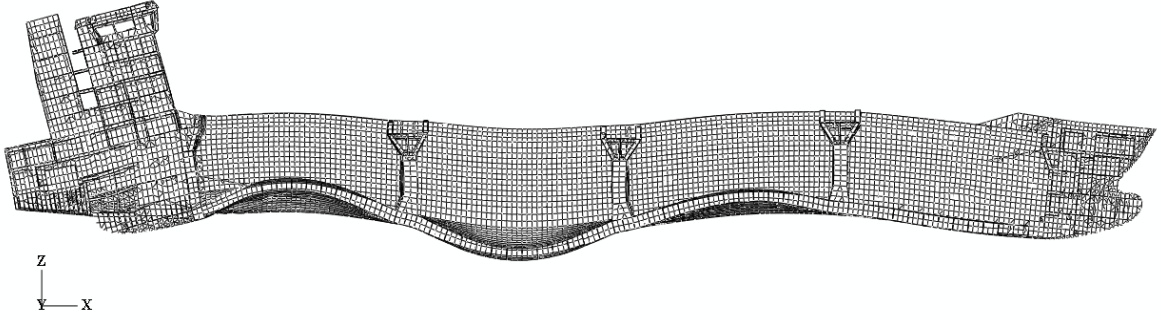
Şekil 6.31 20000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri



İkinci Düşey Eğilme Modu

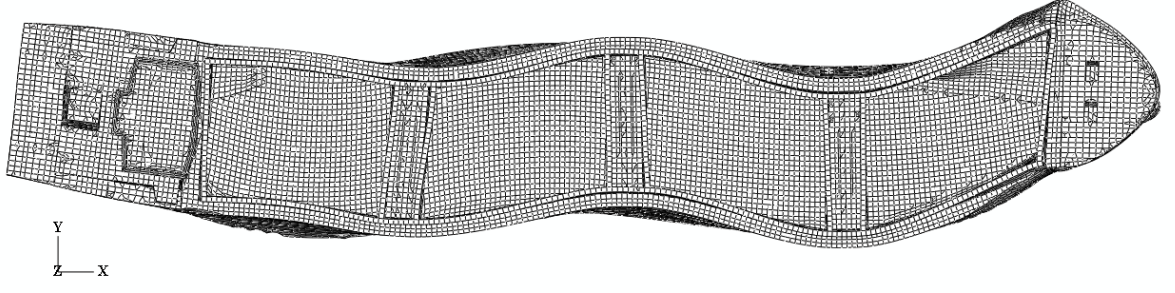


İkinci Yatay Eğilme Modu

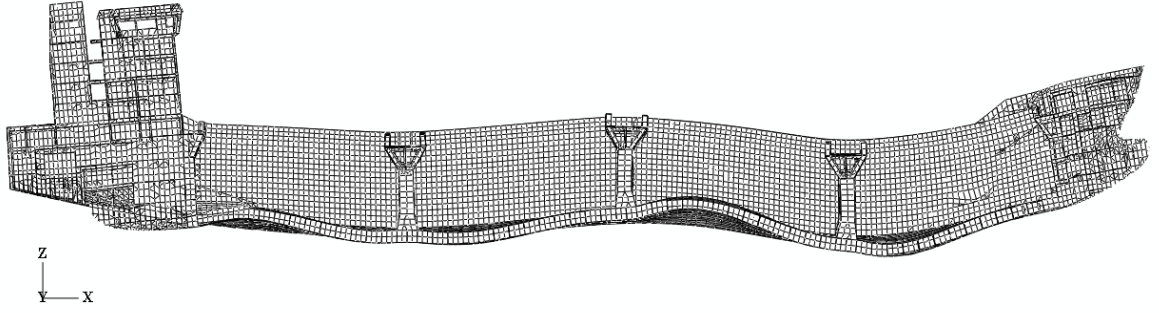


Üçüncü Düşey Eğilme Modu

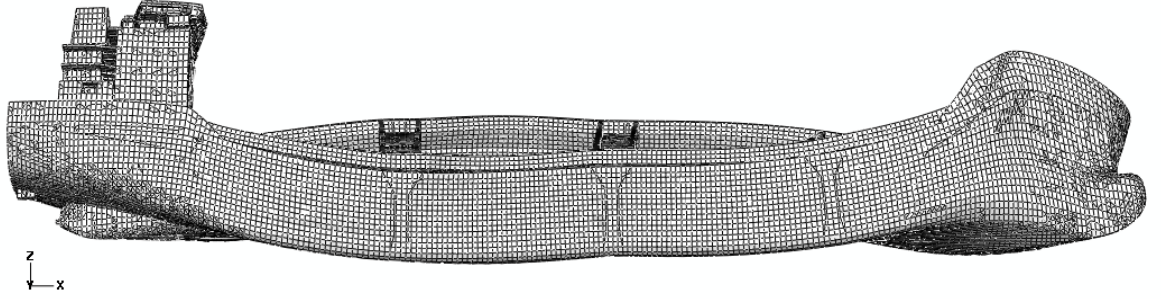
Şekil 6.32 20000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri



Üçüncü Yatay Eğilme Modu

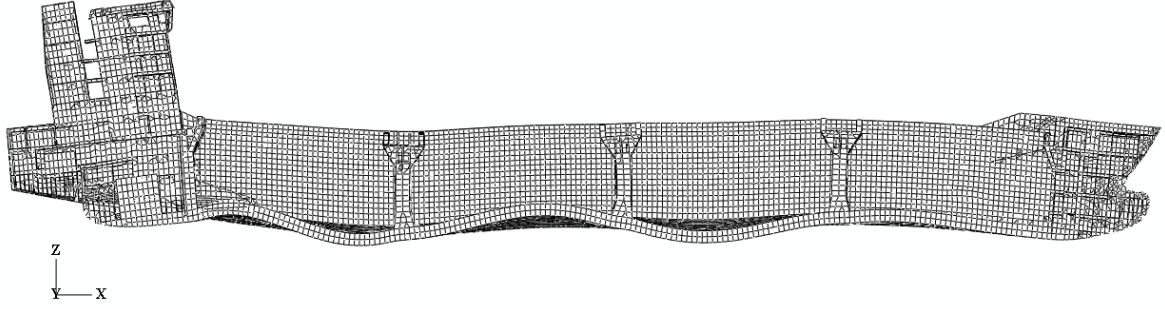


Dördüncü Düşey Eğilme Modu



İkinci Burulma Modu

Şekil 6.33 20000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri



### Eksenel Uzama Modu

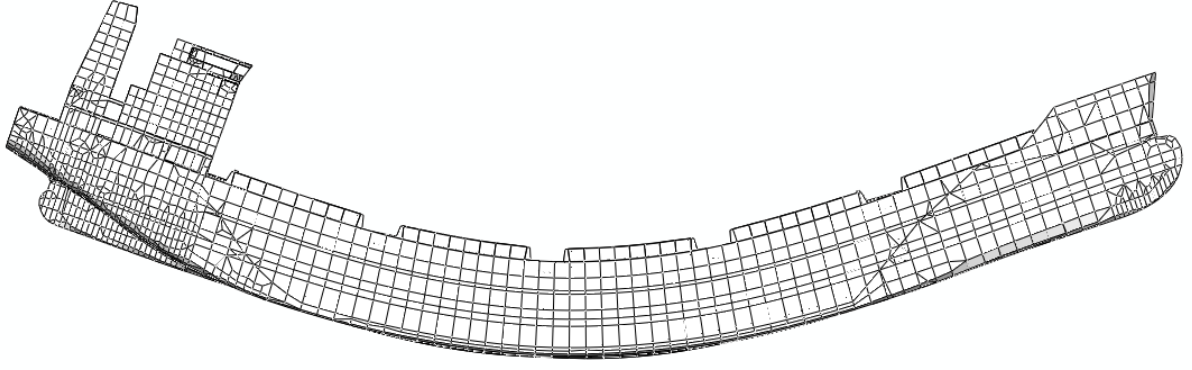
Şekil 6.34 20000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri

Çizelge 6.14 20000 DWT dökme yük gemisi titreşim analizi sonuçları

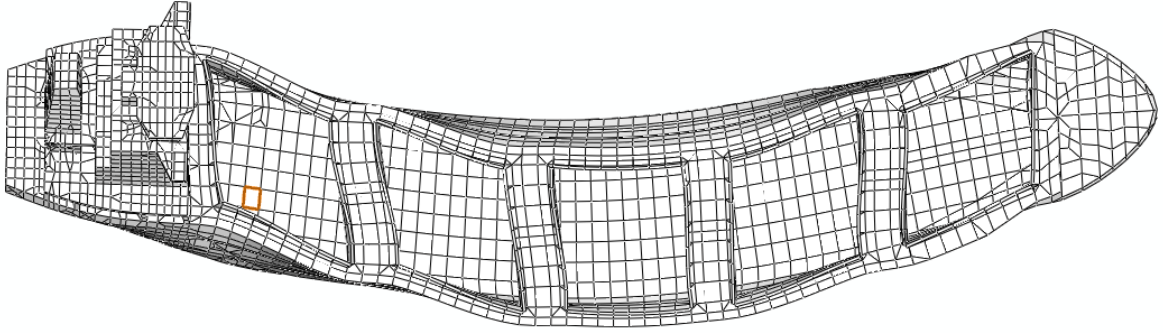
Titreşim Mod Şekilleri	Frekans Değerleri (hz)			
	Tam Homojen Yükleme		Balast Yüklemesi	
	Islak	Vakum	Islak	Vakum
Birinci Düşey Eğilme Modu	1.003	1.437	1.181	1.740
Birinci Yatay Eğilme Modu	1.301	1.529	1.836	2.080
Birinci Burulma Modu	1.429	1.643	1.416	1.637
İkinci Düşey Eğilme Modu	2.238	3.226	2.570	3.922
İkinci Yatay Eğilme Modu	2.917	3.409	3.929	4.447
Üçüncü Düşey Eğilme Modu	3.323	4.895	3.718	5.317
Üçüncü Yatay Eğilme Modu	4.908	5.871	6.521	7.314
Dördüncü Düşey Eğilme Modu	5.038	7.812	5.239	8.066
İkinci Burulma Modu	5.302	6.265	5.080	5.884
Eksenel Uzama Modu	5.546	5.975	8.733	8.760

### 6.3.2 32000 DWT Dökme Yük Gemisi Analiz Sonuçları

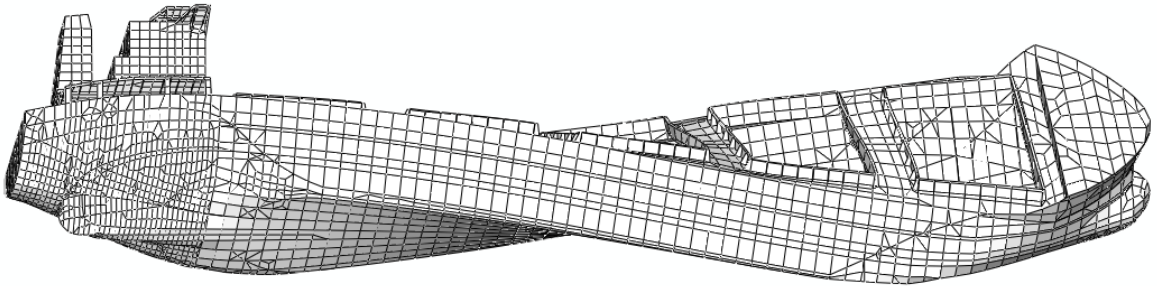
Geminin elastik mod şekilleri Şekil 6.35, 6.38 arasında ve ilgili yüklemelerdeki frekans değerleri Çizelge 6.15’de görülebilmektedir.



Birinci Düşey Eğilme Modu

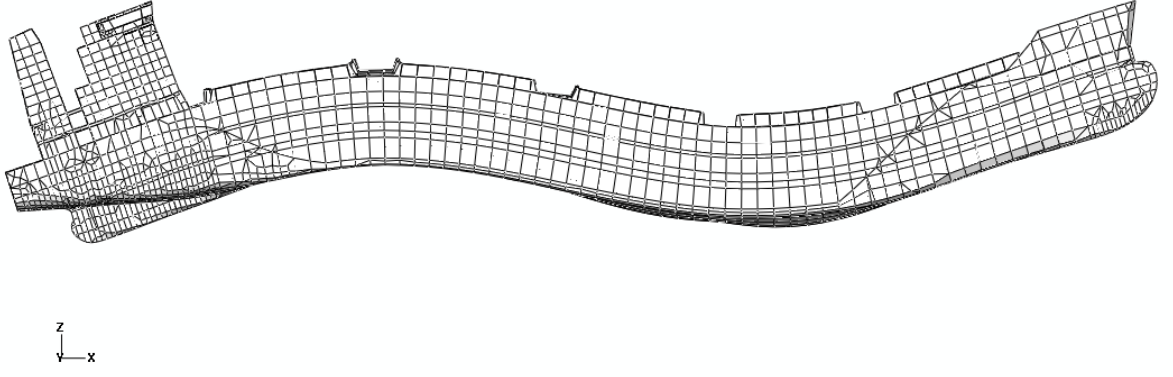


Birinci Yatay Eğilme Modu

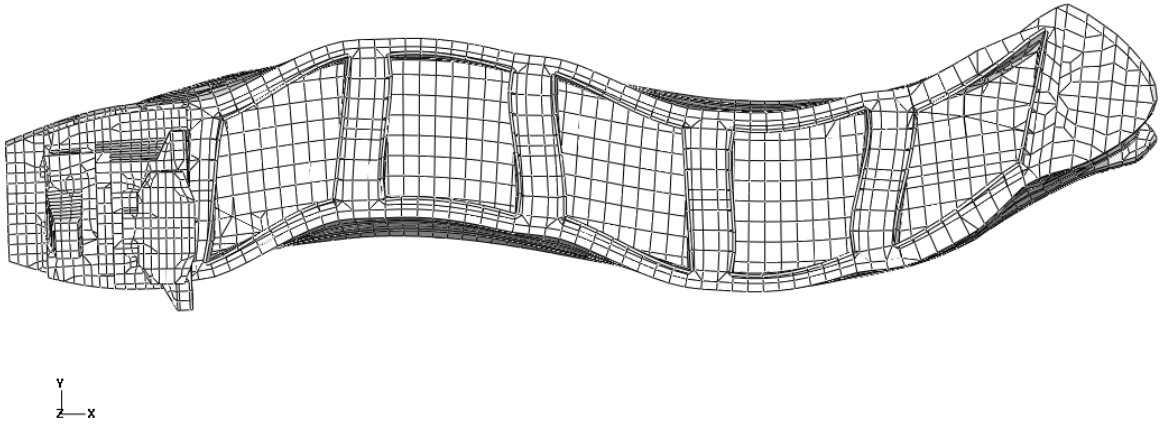


Birinci Burulma Modu

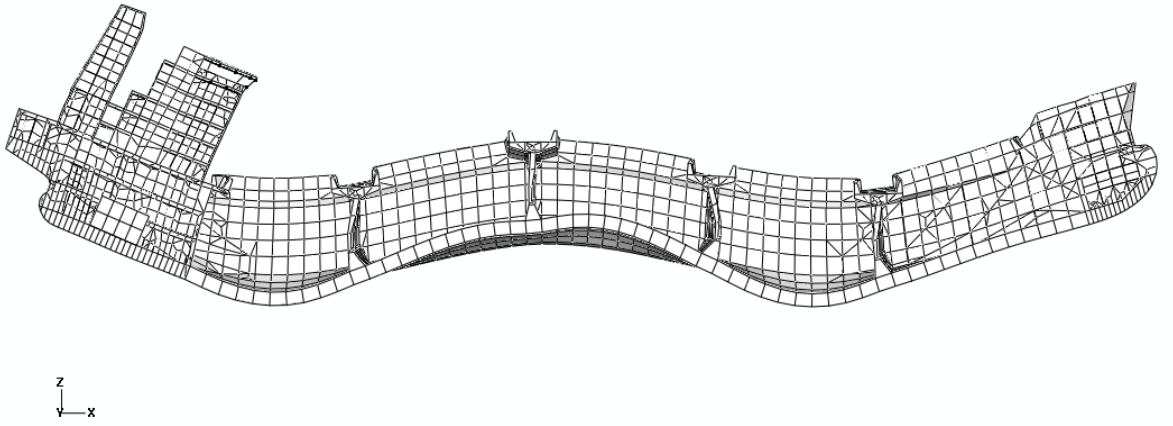
Şekil 6.35 32000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri



İkinci Düşey Eğilme Modu

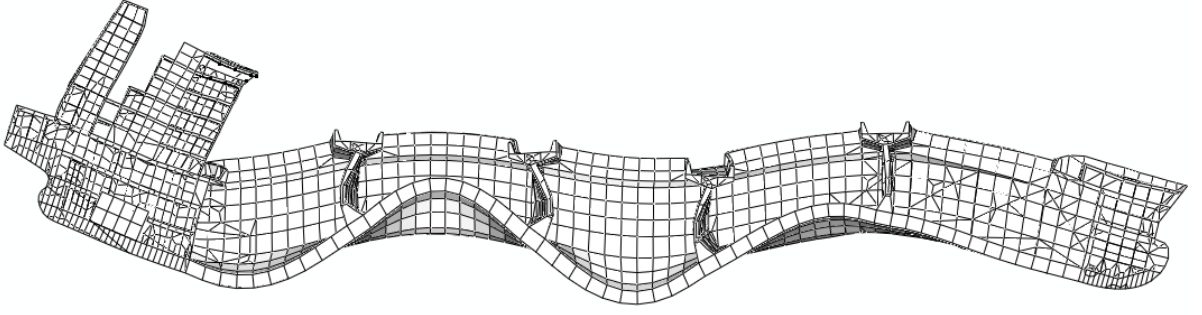


İkinci Yatay Eğilme Modu

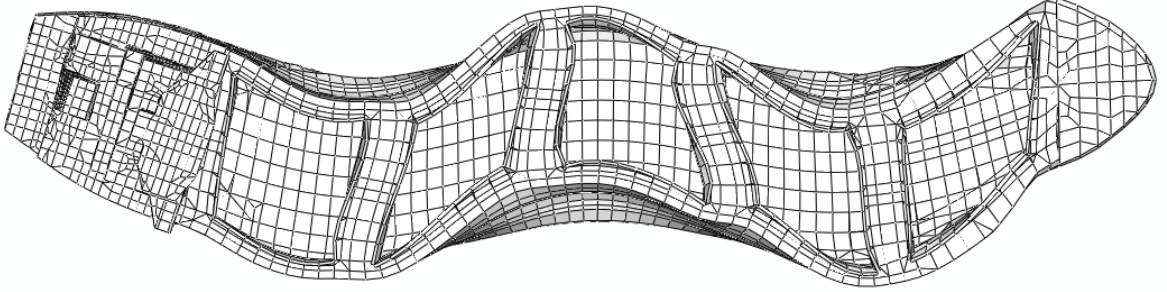


Üçüncü Düşey Eğilme Modu

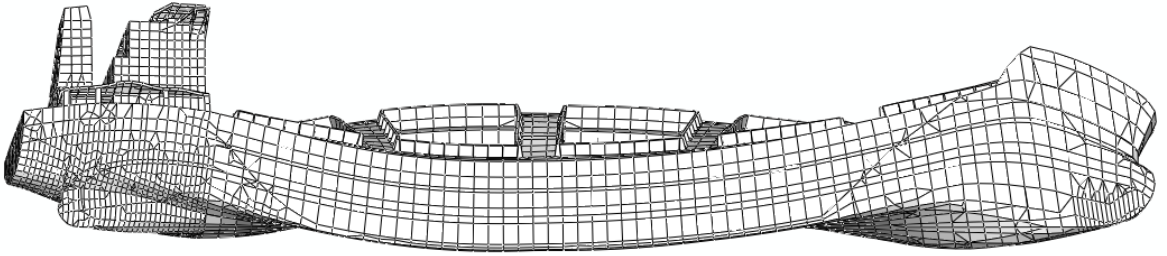
Şekil 6.36 32000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri



Dördüncü Düşey Eğilme Modu



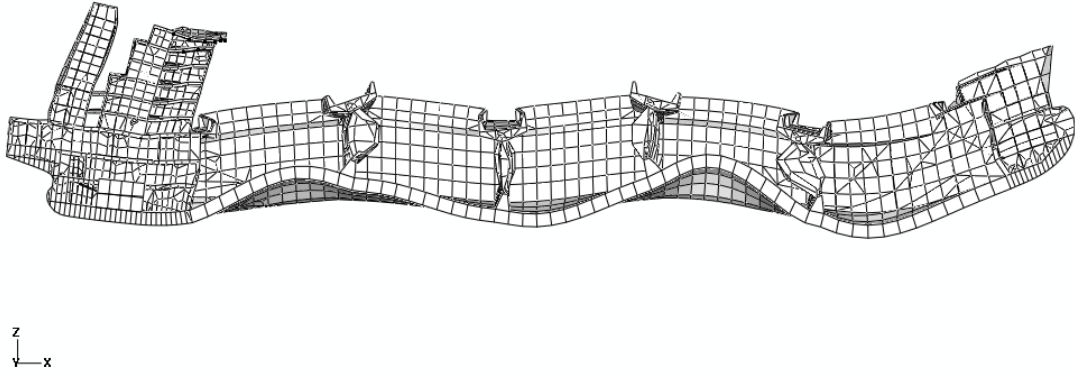
Üçüncü Yatay Eğilme Modu



İkinci Burulma Modu

Şekil 6.37 32000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri





Eksenel Uzama Modu

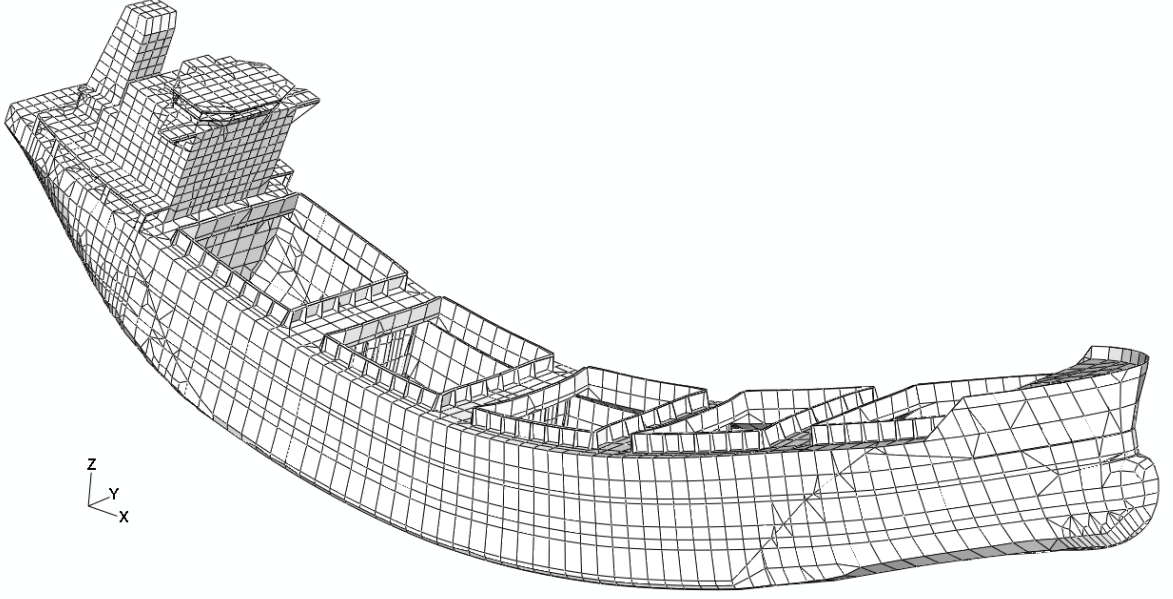
Şekil 6.38 32000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri

Çizelge 6.15 32000 DWT dökme yük gemisi titreşim analizi sonuçları

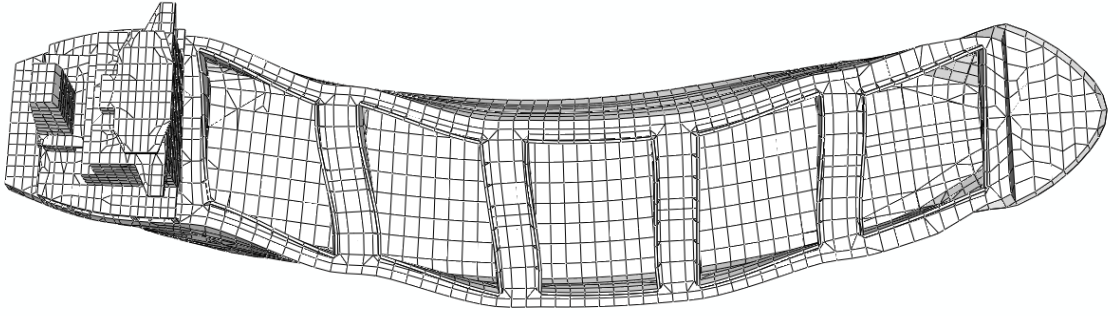
	Frekans Değerleri (hz)			
	Tam Homojen Yükleme		Balast Yükleme	
Titreşim Mod Şekilleri	Islak	Vakum	Islak	Vakum
Birinci Düşey Eğilme Modu	0.875	1.285	0.943	1.326
Birinci Yatay Eğilme Modu	1.337	1.553	1.729	1.931
Birinci Burulma Modu	1.510	1.833	1.491	1.805
İkinci Düşey Eğilme Modu	1.960	2.919	2.046	3.228
İkinci Yatay Eğilme Modu	2.832	3.263	3.751	4.141
Üçüncü Düşey Eğilme Modu	3.055	4.539	3.189	5.060
Dördüncü Düşey Eğilme Modu	4.135	6.576	4.205	6.993
Üçüncü Yatay Eğilme Modu	4.687	5.538	6.247	7.055
İkinci Burulma Modu	5.117	6.214	4.535	5.428
Eksenel Uzama Modu	5.263	5.574	6.623	6.728

### 6.3.3 53000 DWT Dökme Yük Gemisi Analiz Sonuçları

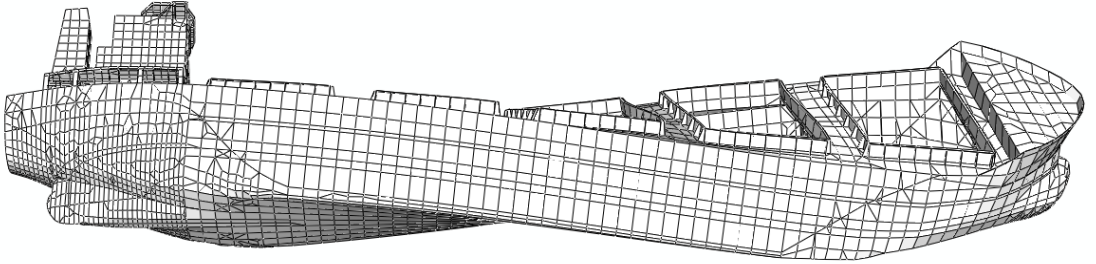
Geminin elastik mod şekilleri Şekil 6.39, 6.42 arasında ve ilgili yüklemelerdeki frekans değerleri Çizelge 6.16'da görülebilmektedir.



Birinci Düşey Eğilme Modu

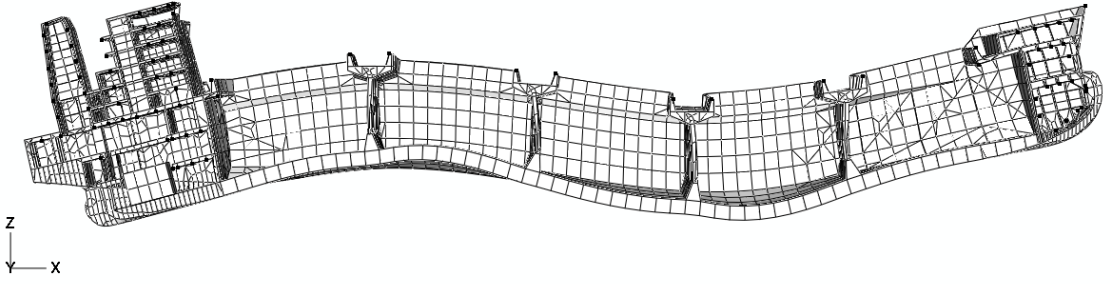


Birinci Yatay Eğilme Modu

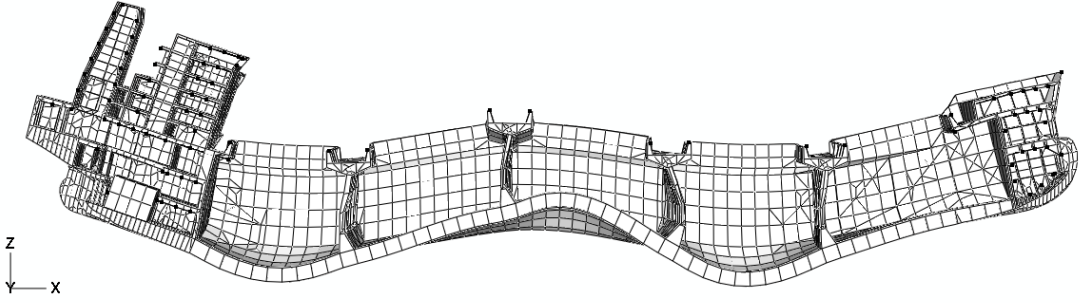


Birinci Burulma Modu

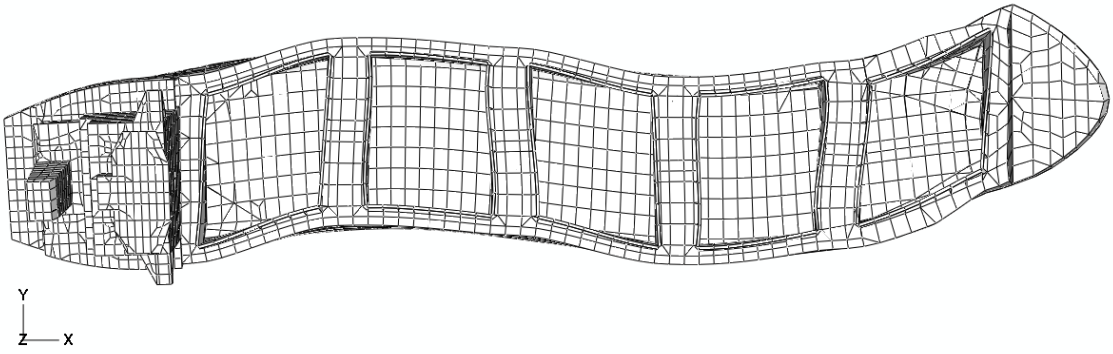
Şekil 6.39 53000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri



İkinci Düşey Eğilme Modu

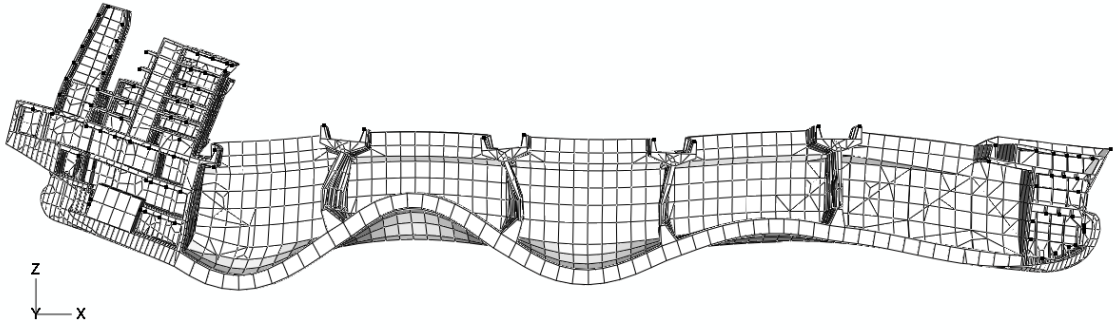


Üçüncü Düşey Eğilme Modu

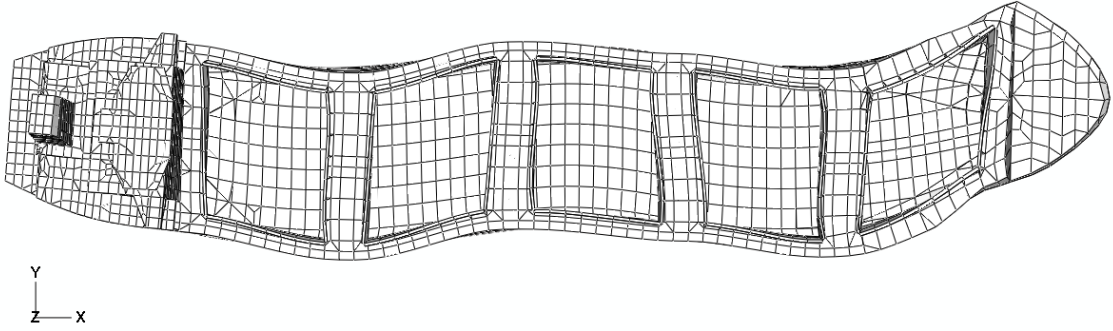


İkinci Yatay Eğilme Modu

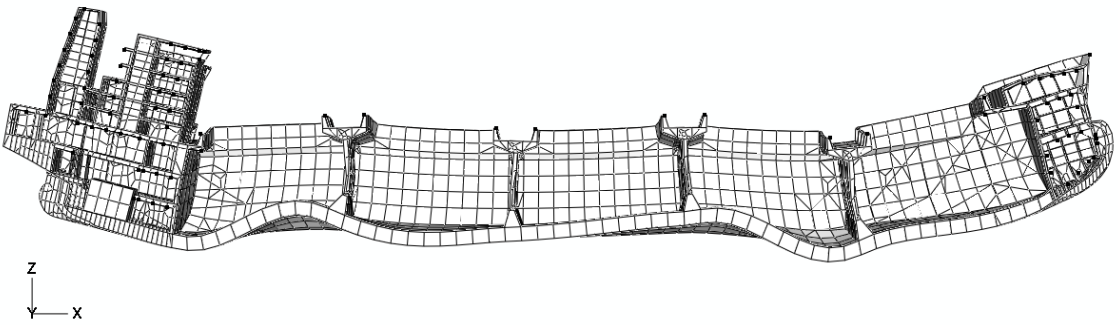
Şekil 6.40 53000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri



Dördüncü Düşey Eğilme Modu

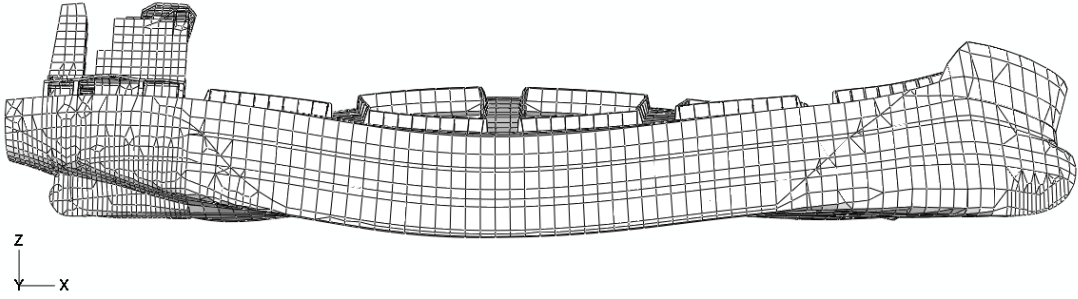


Üçüncü Yatay Eğilme Modu



Eksenel Uzama Modu

Şekil 6.41 53000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri



### İkinci Burulma Modu

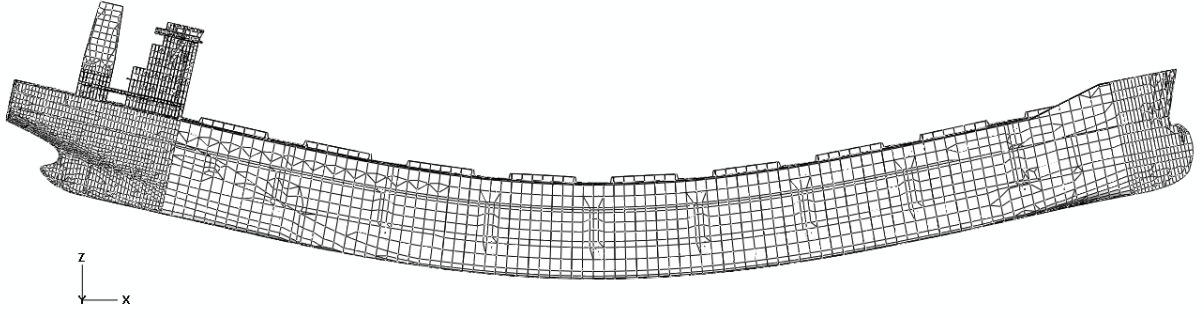
Şekil 6.42 53000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri

Çizelge 6.16 53000 DWT dökme yük gemisi titreşim analizi sonuçları

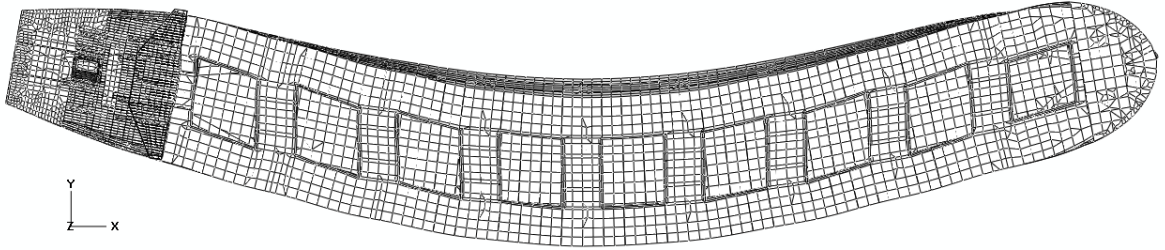
Titreşim Mod Şekilleri	Frekans Değerleri (hz)			
	Tam Homojen Yükleme		Balast Yükleme	
	Islak	Vakum	Islak	Vakum
Birinci Düşey Eğilme Modu	0.927	1.347	0.993	1.380
Birinci Yatay Eğilme Modu	1.316	1.556	1.661	1.841
Birinci Burulma Modu	1.485	1.842	1.454	1.781
İkinci Düşey Eğilme Modu	1.992	2.936	2.073	3.205
İkinci Yatay Eğilme Modu	2.707	3.178	3.461	3.752
Üçüncü Düşey Eğilme Modu	3.010	4.238	3.147	4.879
Dördüncü Düşey Eğilme Modu	4.012	6.137	4.077	6.442
Üçüncü Yatay Eğilme Modu	4.423	5.259	5.448	5.905
Eksenel Uzama Modu	4.434	4.828	5.320	5.587
İkinci Burulma Modu	4.843	6.044	4.285	5.173

#### 6.3.4 76000 DWT Dökme Yük Gemisi Analiz Sonuçları

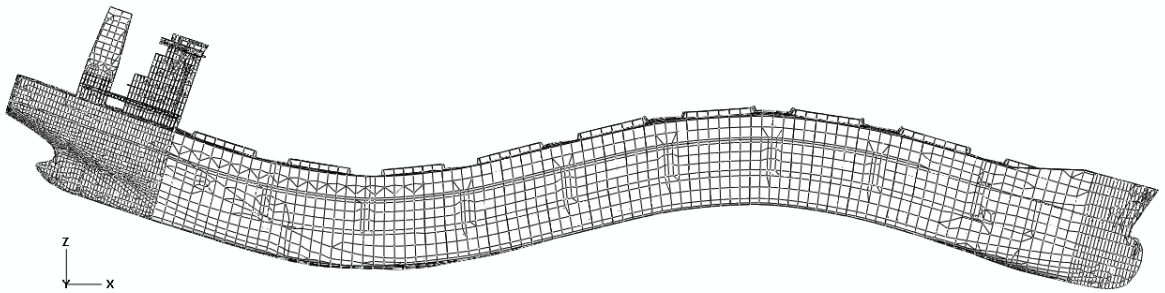
Geminin elastik mod şekilleri Şekil 6.43, 6.46 arasında ve ilgili yüklemelerdeki frekans değerleri Çizelge 6.17’de görülebilmektedir.



Birinci Düşey Eğilme Modu

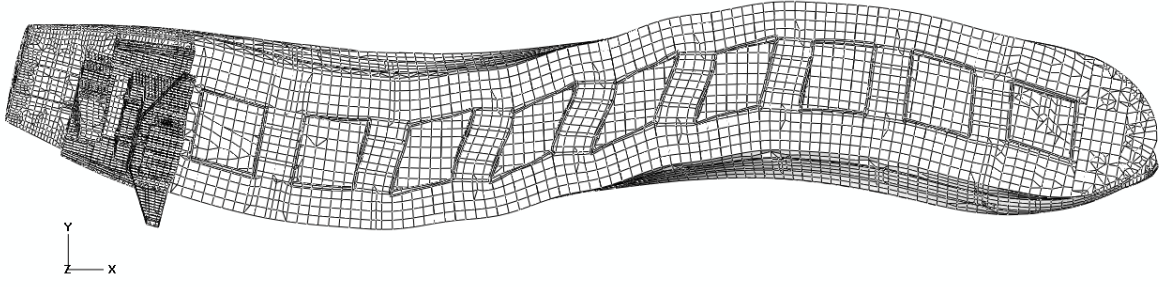


Birinci Yatay Eğilme Modu

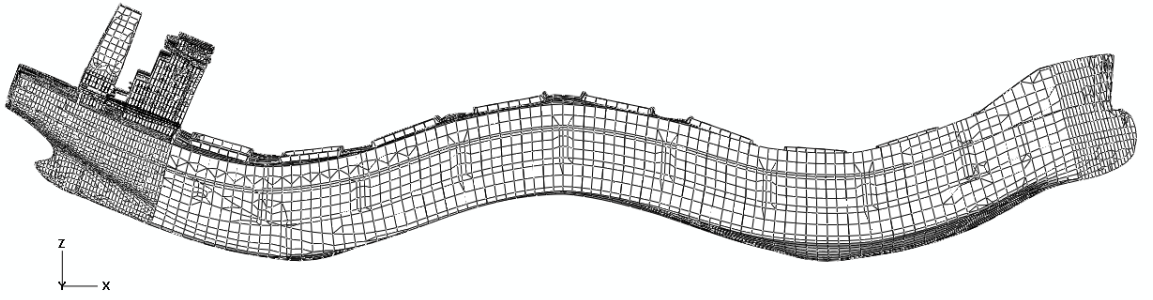


İkinci Düşey Eğilme Modu

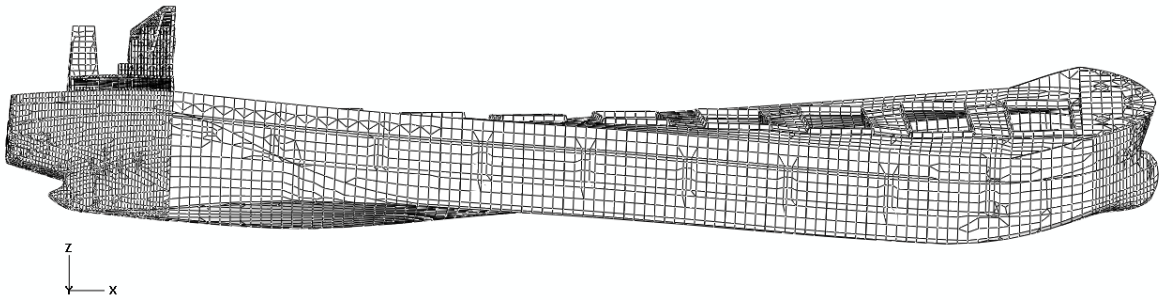
Şekil 6.43 76000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri



İkinci Yatay Eğilme ve Burulma Modu

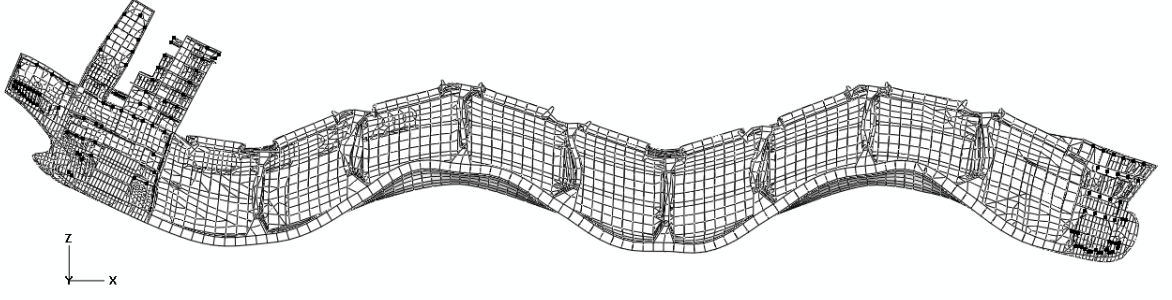


Üçüncü Düşey Eğilme Modu

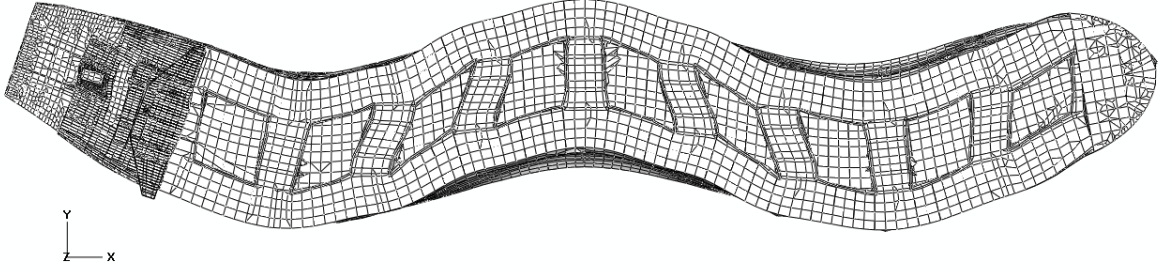


Birinci Burulma Modu

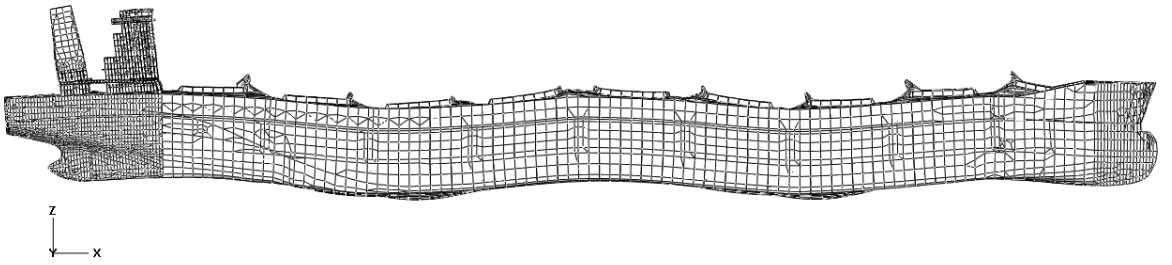
Şekil 6.44 76000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri



Dördüncü Düşey Eğilme Modu



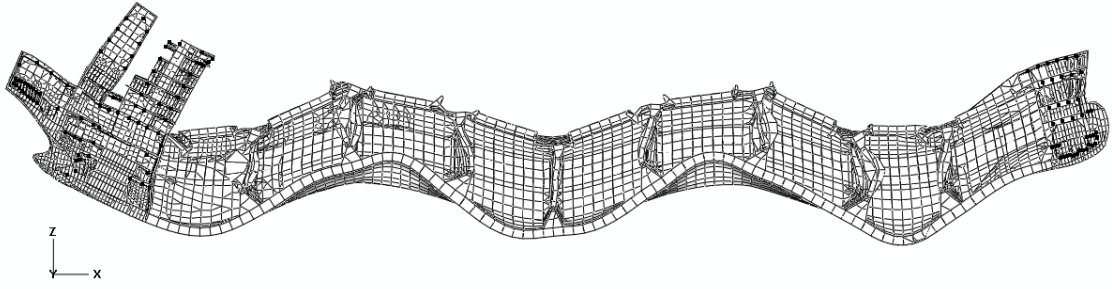
Üçüncü Yatay Eğilme Modu



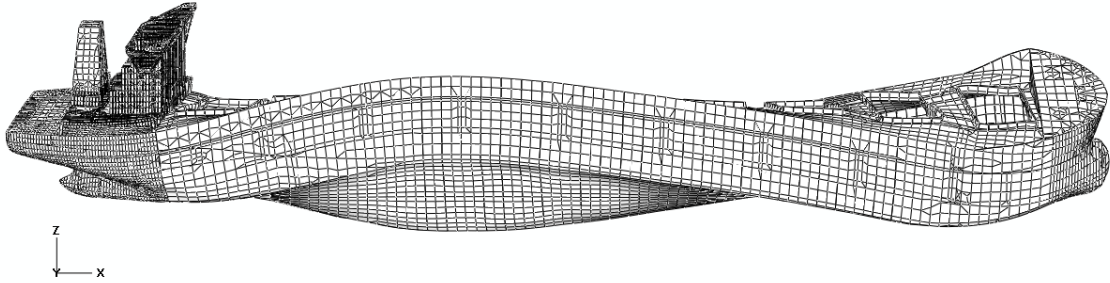
Eksenel Uzama Modu

Şekil 6.45 76000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri





Beşinci Düşey Eğilme Modu



İkinci Burulma Modu

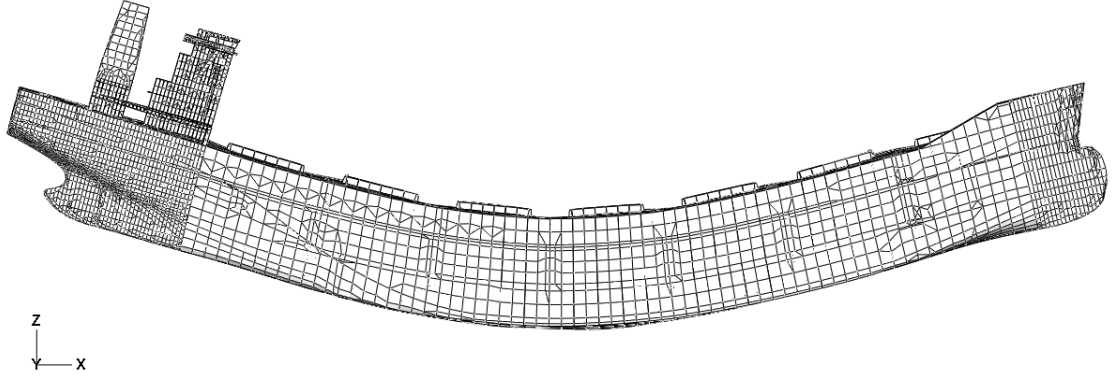
Şekil 6.46 76000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri

Çizelge 6.17 76000 DWT dökme yük gemisi titreşim analizi sonuçları

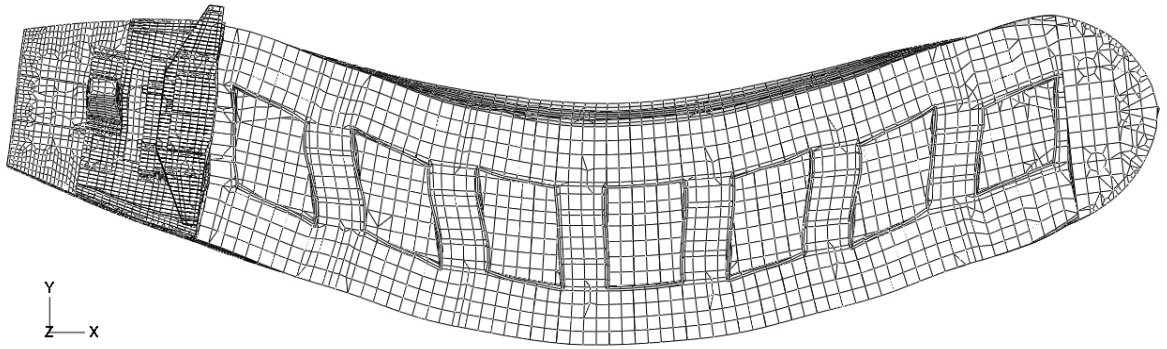
Titreşim Mod Şekilleri	Frekans Değerleri (hz)			
	Tam Homojen Yükleme		Balast Yükleme	
	Islak	Vakum	Islak	Vakum
Birinci Düşey Eğilme Modu	0.519	0.716	0.613	0.881
Birinci Yatay Eğilme Modu	0.829	0.958	1.135	1.220
İkinci Düşey Eğilme Modu	1.171	1.618	1.355	2.143
İkinci Yatay Eğilme Modu	1.739	2.029	2.601	2.804
Üçüncü Düşey Eğilme Modu	1.876	2.577	2.163	3.449
Birinci Burulma Modu	1.886	2.327	1.874	2.292
Dördüncü Düşey Eğilme Modu	2.582	3.577	2.939	4.688
Üçüncü Yatay Eğilme Modu	2.826	3.287	4.371	4.484
Eksenel Uzama Modu	2.960	3.018	4.034	4.149
Beşinci Düşey Eğilme Modu	3.267	4.486	3.621	5.878
İkinci Burulma Modu	3.727	5.204	3.653	5.149

### 6.3.5 140000 DWT Dökme Yük Gemisi Analiz Sonuçları

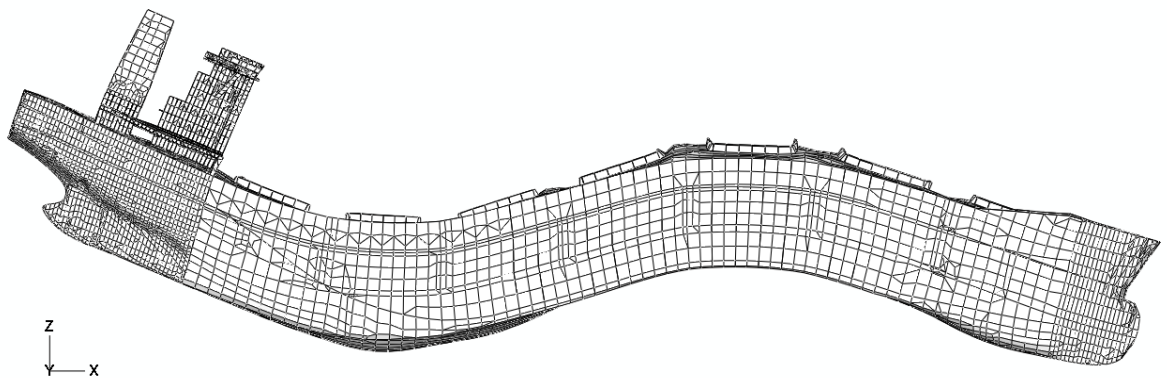
Geminin elastik mod şekilleri Şekil 6.47, 6.50 arasında ve ilgili yüklemelerdeki frekans değerleri Çizelge 6.18’de görülebilmektedir.



Birinci Düşey Eğilme Modu

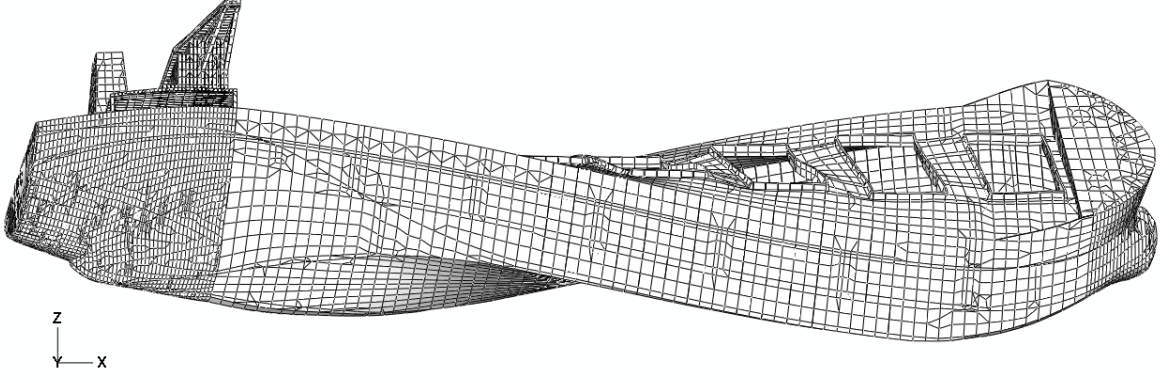


Birinci Yatay Eğilme Modu

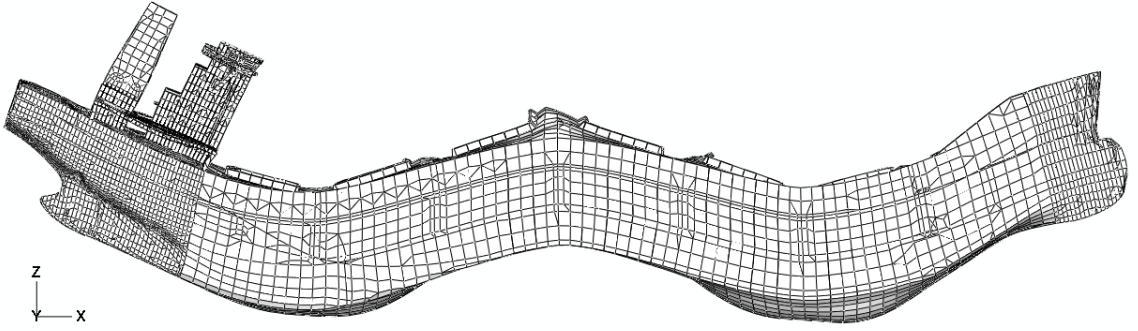


İkinci Düşey Eğilme Modu

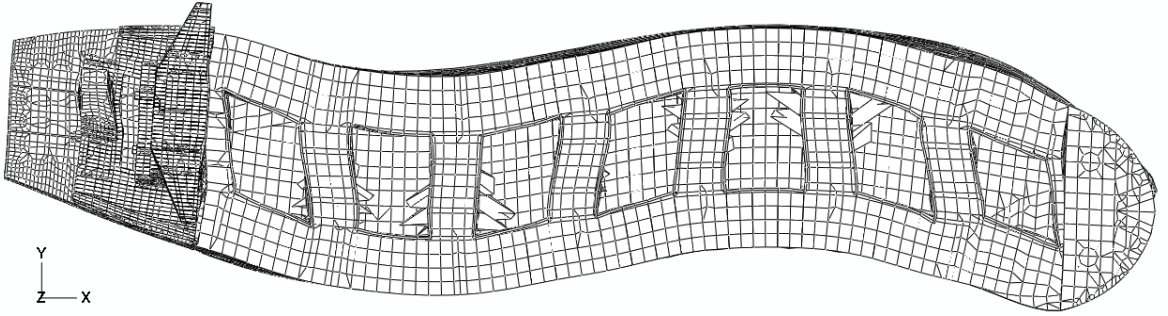
Şekil 6.47 140000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri



Birinci Burulma Modu

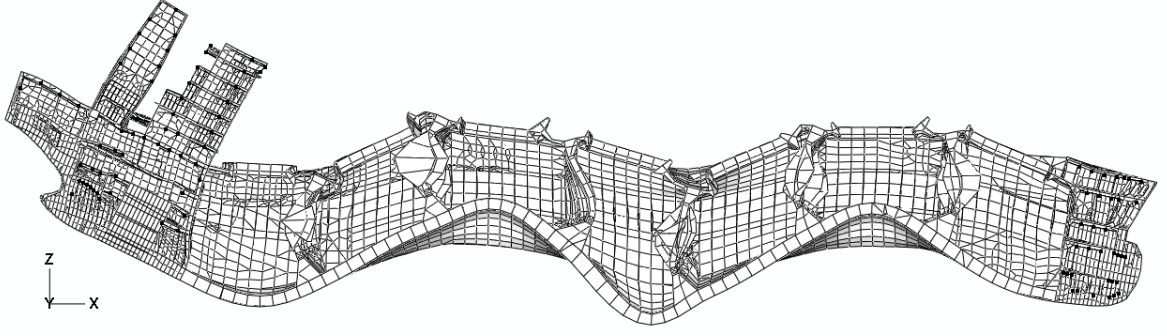


Üçüncü Düşey Eğilme Modu

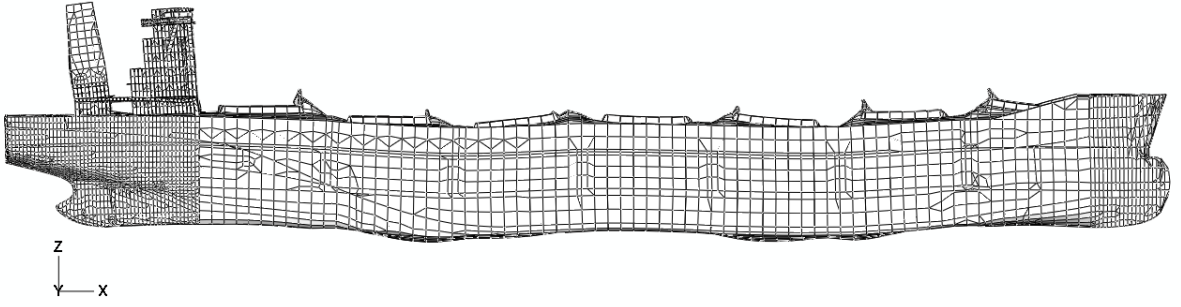


İkinci Yatay Eğilme Modu

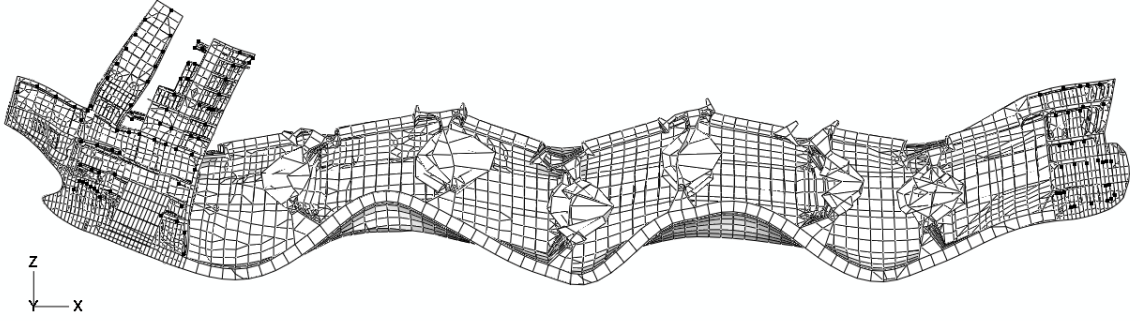
Şekil 6.48 140000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri



Dördüncü Düşey Eğilme Modu

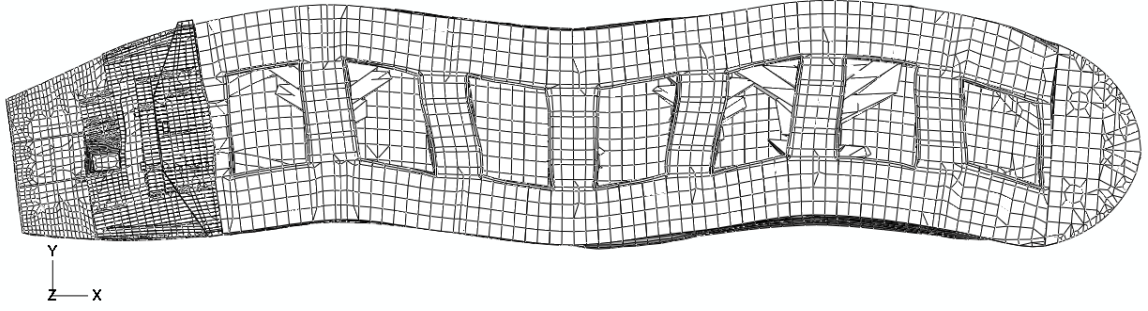


Eksenel Uzama Modu

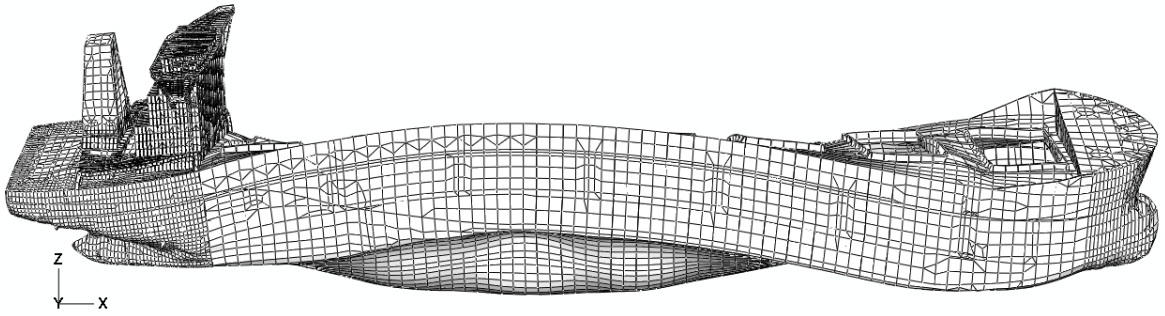


Beşinci Düşey Eğilme Modu

Şekil 6.49 140000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri



Üçüncü Yatay Eğilme Modu



İkinci Burulma Modu

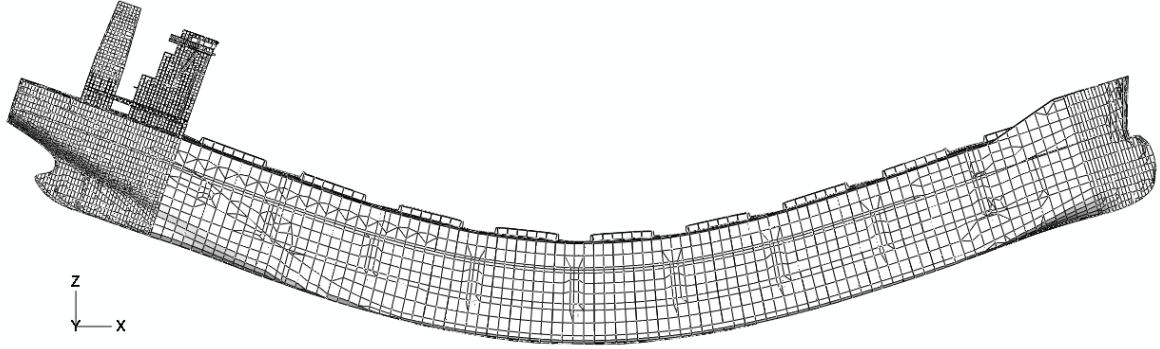
Şekil 6.50 140000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri

Çizelge 6.18 140000 DWT dökme yük gemisi titreşim analizi sonuçları

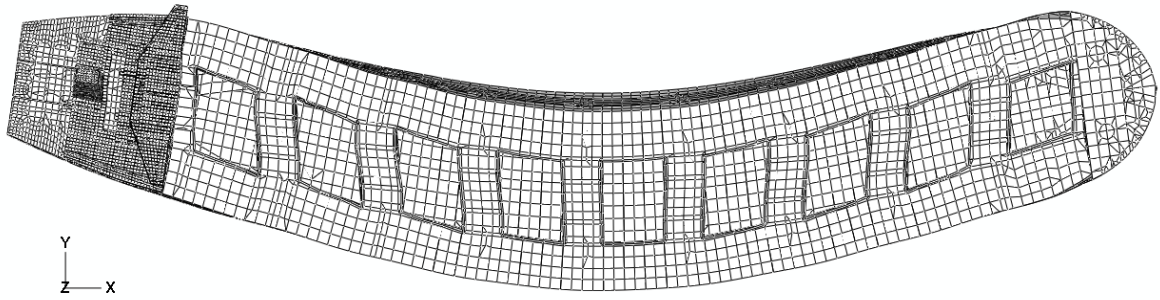
Titreşim Mod Şekilleri	Frekans Değerleri (hz)			
	Tam Homojen Yükleme		Balast Yüklemesi	
	Islak	Vakum	Islak	Vakum
Birinci Düşey Eğilme Modu	0.656	0.923	0.848	1.260
Birinci Yatay Eğilme Modu	1.142	1.312	1.699	1.857
İkinci Düşey Eğilme Modu	1.295	1.789	1.629	2.543
Birinci Burulma Modu	1.797	2.339	1.875	2.413
Üçüncü Düşey Eğilme Modu	1.886	2.540	2.348	3.750
İkinci Yatay Eğilme Modu	2.245	2.590	3.391	3.710
Dördüncü Düşey Eğilme Modu	2.420	3.183	2.985	4.716
Eksenel Uzama Modu	2.824	2.848	4.572	4.591
Beşinci Düşey Eğilme Modu	2.982	3.729	3.554	5.622
Üçüncü Yatay Eğilme Modu	3.249	3.634	5.064	5.322
İkinci Burulma Modu	3.837	5.598	3.881	5.893

### 6.3.6 180000 DWT Dökme Yük Gemisi Analiz Sonuçları

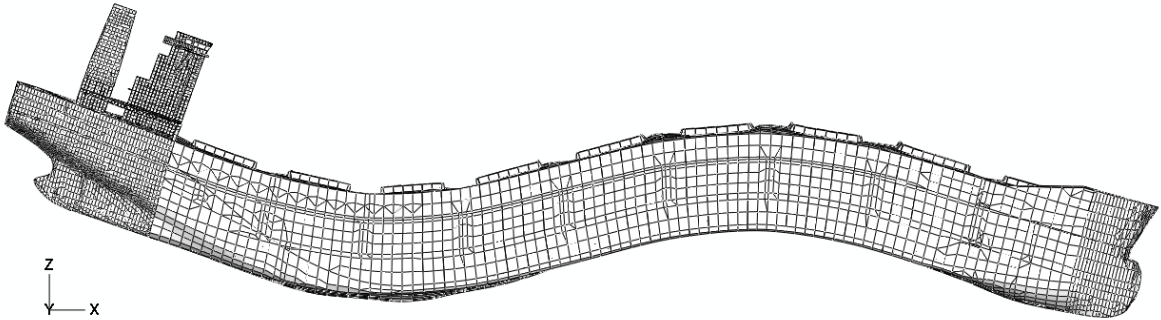
Geminin elastik mod şekilleri Şekil 6.51, 6.54 arasında ve ilgili yüklemelerdeki frekans değerleri Çizelge 6.19’da görülebilmektedir.



Birinci Düşey Eğilme Modu

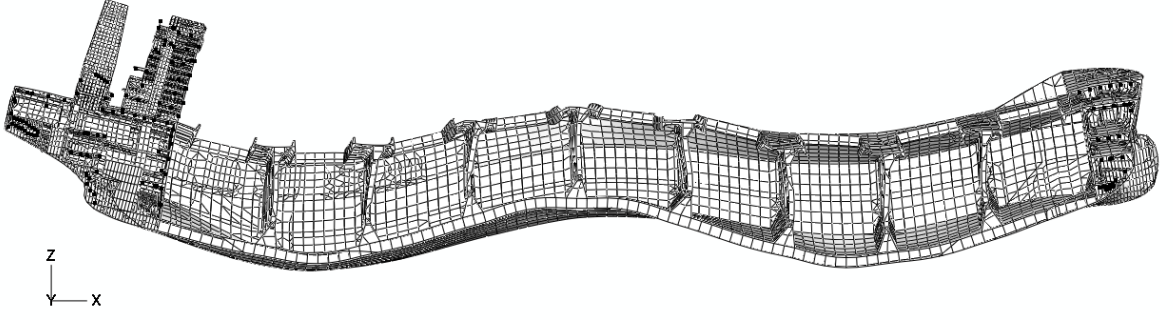


Birinci Yatay Eğilme Modu

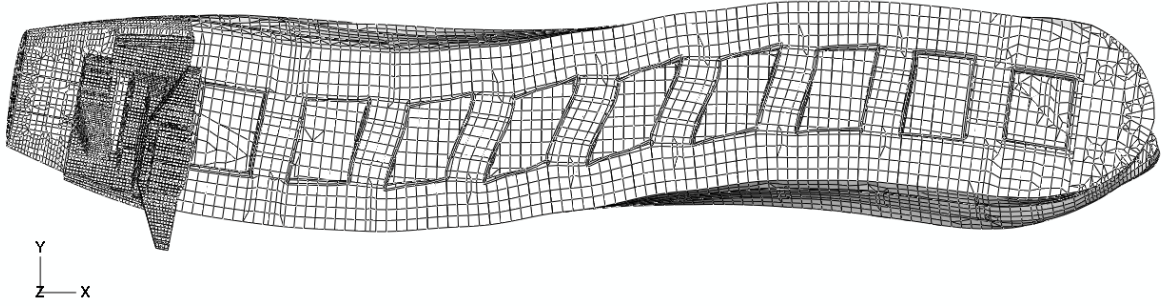


İkinci Düşey Eğilme Modu

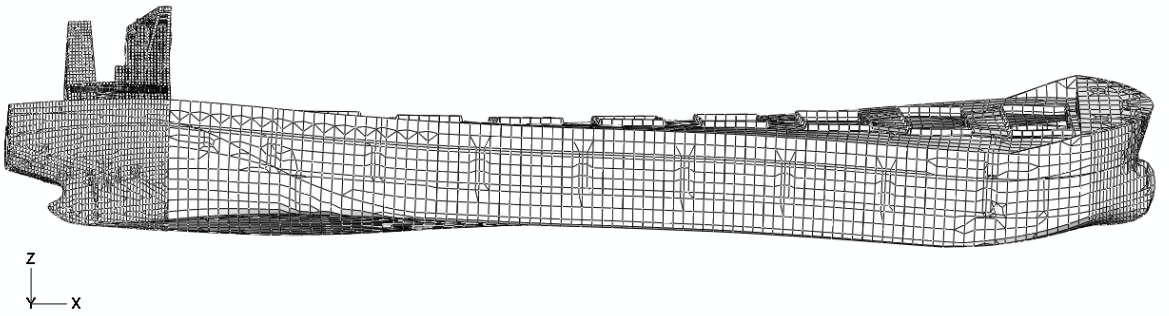
Şekil 6.51 180000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri



Üçüncü Düşey Eğilme Modu

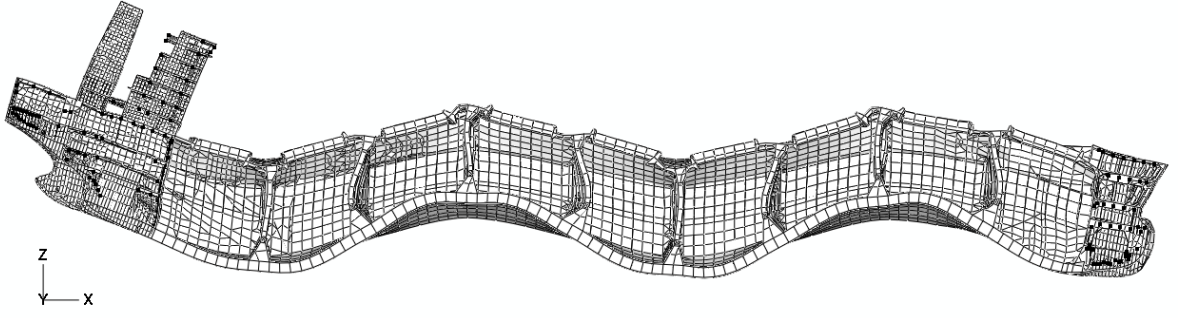


İkinci Yatay Eğilme Modu

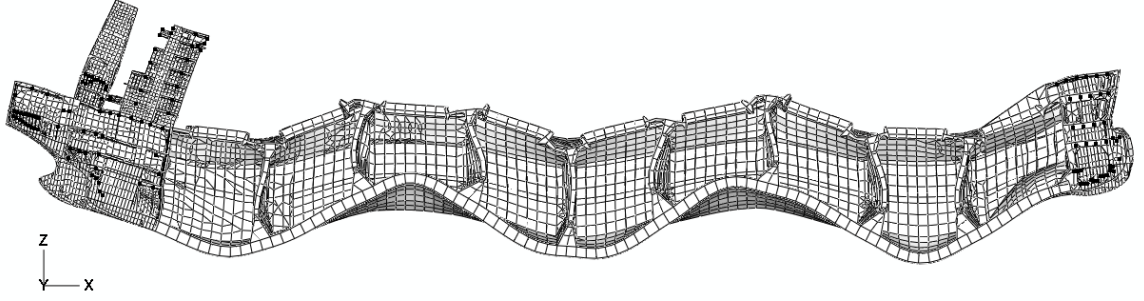


Birinci Burulma Modu

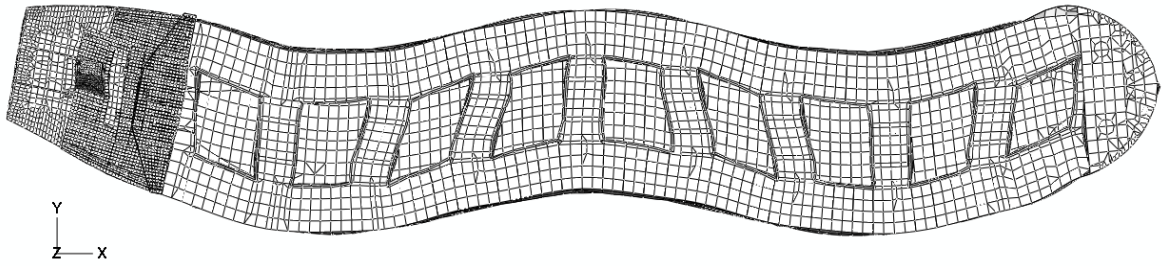
Şekil 6.52 180000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri



Dördüncü Düşey Eğilme Modu



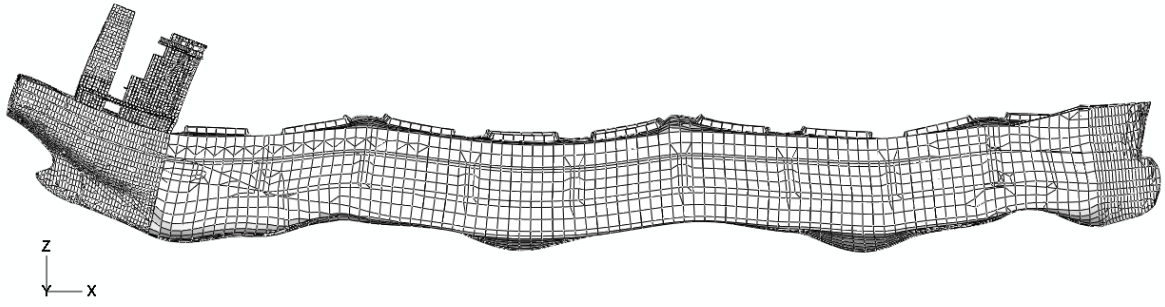
Beşinci Düşey Eğilme Modu



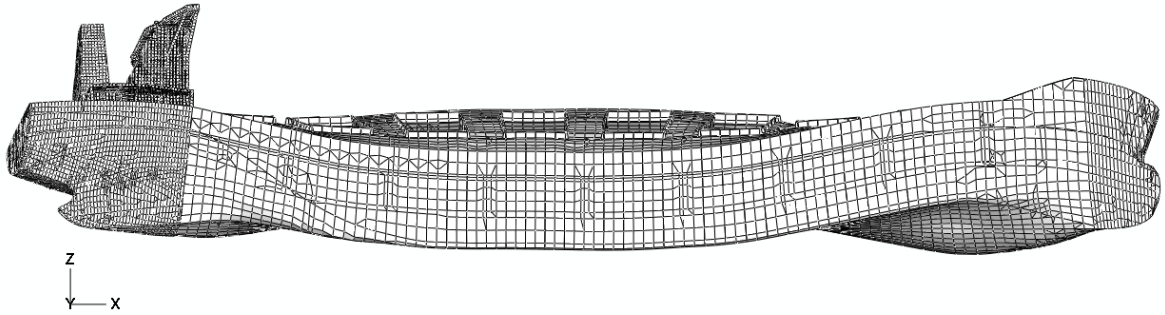
Üçüncü Yatay Eğilme Modu

Şekil 6.53 180000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri





Eksenel Uzama Modu



İkinci Burulma Modu

Şekil 6.54 180000 DWT dökme yük gemisi titreşim mod şekilleri

Çizelge 6.19 180000 DWT dökme yük gemisi titreşim analizi sonuçları

Titreşim Mod Şekilleri	Frekans Değerleri (hz)			
	Tam Homojen Yükleme		Balast Yüklemesi	
	Islak	Vakum	Islak	Vakum
Birinci Düşey Eğilme Modu	0.475	0.671	0.518	0.668
Birinci Yatay Eğilme Modu	0.788	0.909	0.868	0.905
İkinci Düşey Eğilme Modu	1.022	1.434	1.087	1.413
Birinci Burulma Modu	1.499	2.089	1.543	2.086
Üçüncü Düşey Eğilme Modu	1.562	2.153	1.628	2.120
İkinci Yatay Eğilme Modu	1.639	1.794	1.815	1.800
Dördüncü Düşey Eğilme Modu	2.089	2.897	2.128	2.798
Eksenel Uzama Modu	2.333	2.381	2.509	2.596
Üçüncü Yatay Eğilme Modu	2.498	2.834	2.727	2.892
Beşinci Düşey Eğilme Modu	2.607	3.470	2.655	3.370
İkinci Burulma Modu	3.228	4.561	3.371	4.549

## 6.4 Tartışmalar

Bir dökme yük gemisi serisinin Abaqus sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak hidro-elastik titreşim analizleri yapılmıştır. Gemilerin teknik özellikleri Çizelge 6.20’de görülebilmektedir. Yapılan analizlerde gemilerin ilk yirmi titreşim frekans ve mod şekilleri hesaplanmıştır. Analizlerin sonucunda gemilerin, 4 adet düşey eğilme modu, 3 adet yatay eğilme modu, 2 adet burulma modu ve 1 adet aksel modu incelenmiştir.

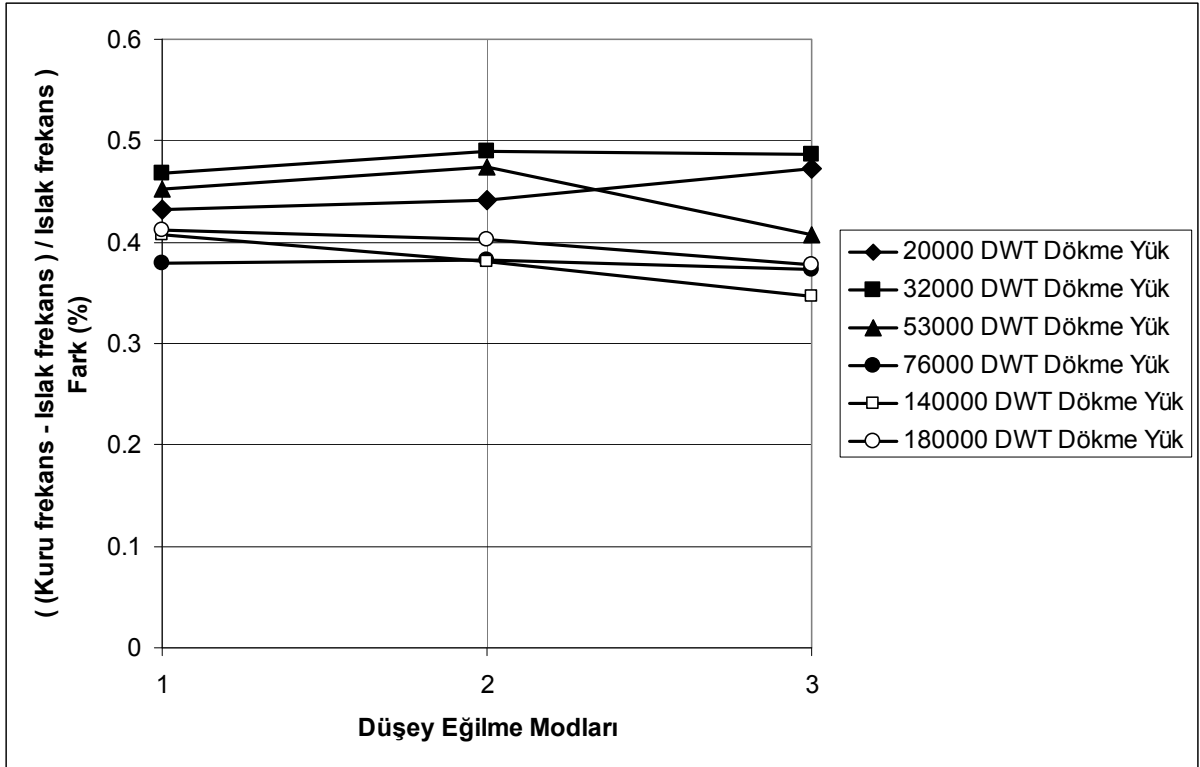
Çizelge 6.20 Dökme yük gemilerinin teknik özellikleri

Taşıma Kapasitesi	20000 DWT	32000 DWT	53000 DWT	76000 DWT	140000 DWT	180000 DWT
Tam Boy	157.90 m	180.00 m	190.00 m	248.80 m	237.40 m	289.00 m
Boy P.P.( Dikmeler Arası)	151.50 m	175.00 m	183.25 m	235.00 m	228.90 m	280.50 m
Genişlik	23.20 m	28.00 m	32.26 m	32.25 m	45.00 m	45.00 m
Derinlik	12.50 m	14.16 m	17.50 m	19.30 m	23.00 m	24.80 m
Su Çekimi (Dizayn)	8.60 m	9.30 m	11.10 m	14.00 m	15.00 m	16.10 m
Su Çekimi (Scanting)	9.00 m	9.80 m	12.60 m	14.50 m	16.90 m	18.25 m
Deadweight (Dizayn)	20000 t	30000 t	44500 t	76000 t	122000 t	154700 t
Deadweight (Scantling)	21000 t	32000 t	53000 t	80000 t	140000 t	181000 t
Servis Hızı	14.0 kn	14.3 kn	14.0 kn	14.1 kn	13 kn	14.5 kn
Boy / Genişlik (L/B) Oranı	6.53	6.25	5.68	7.28	5.08	6.23
Genişlik / Derinlik (B/D) Oranı	1.85	1.97	1.84	1.67	1.95	1.81

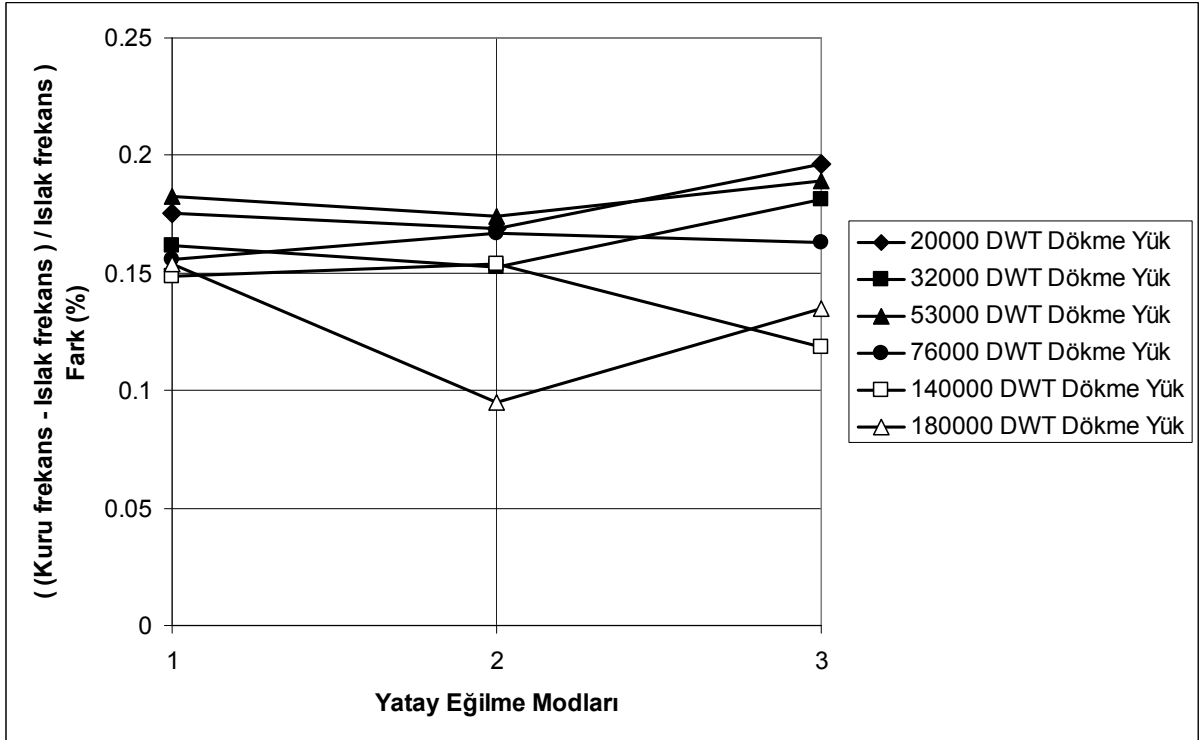
Gemilerin *kuru* ve *ıslak* frekansları arasındaki farkların vurgulanması amacı ile düşey eğilme, yatay eğilme ve burulma modları için gemilerin tam homojen yüklemdeki frekans farkları Çizelge 6.21, 6.22 ve 6.23’de görülmektedir.

Bu çizelgelerden görüldüğü gibi, tam homojen yüklemde gemilerin düşey eğilme *kuru* ve *ıslak* frekansları arasındaki farklar % 35 ile % 49 arasında değişirken, yatay eğilme frekansları arasındaki farklar % 9 ve % 20 arasında ve burulma frekansları arasındaki farklar % 15 ile % 46 arasında değişmiştir. Ayrıca balast yüklemesi için ise düşey eğilme frekansları arasındaki farklar % 30 ile % 60 arasında değişirken, yatay eğilme frekansları arasındaki farkların % 13’e kadar ve burulma frekansları arasındaki farklar % 15 ile % 52 arasında değiştiği görülmüştür.

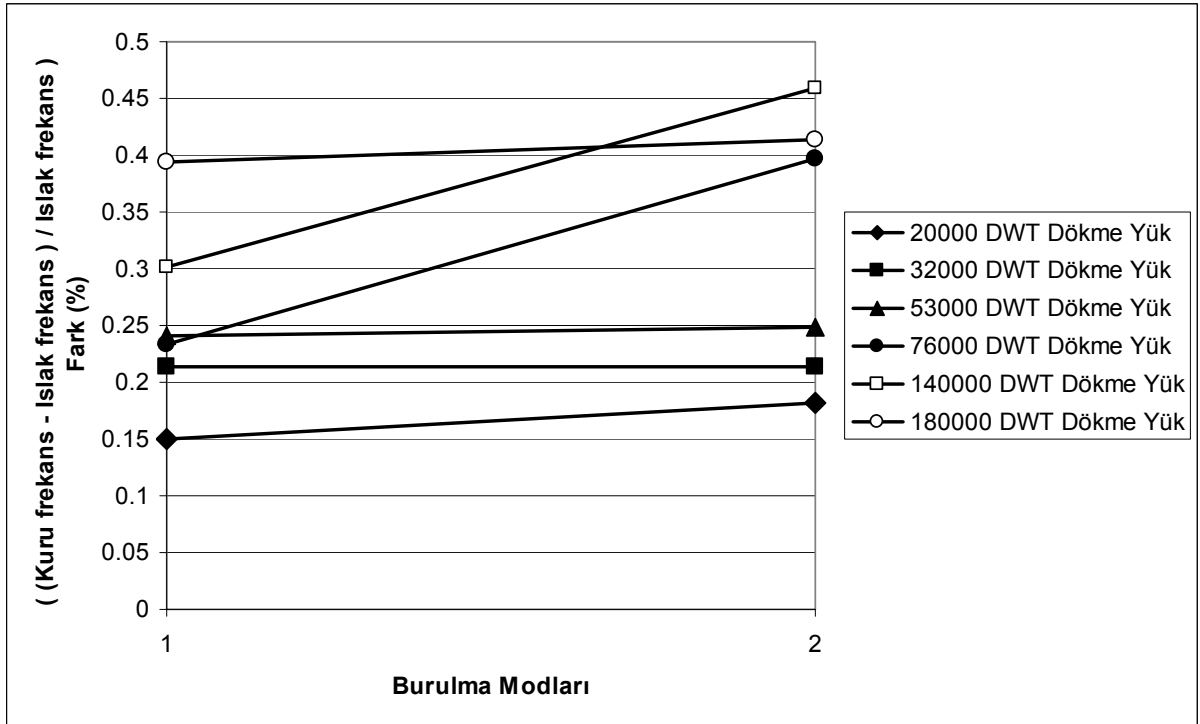
Çizelge 6.21 Gemilerin düşey eğilme modlarındaki ıslak ve kuru titreşim farkları



Çizelge 6.22 Gemilerin yatay eğilme modlarındaki ıslak ve kuru titreşim farkları

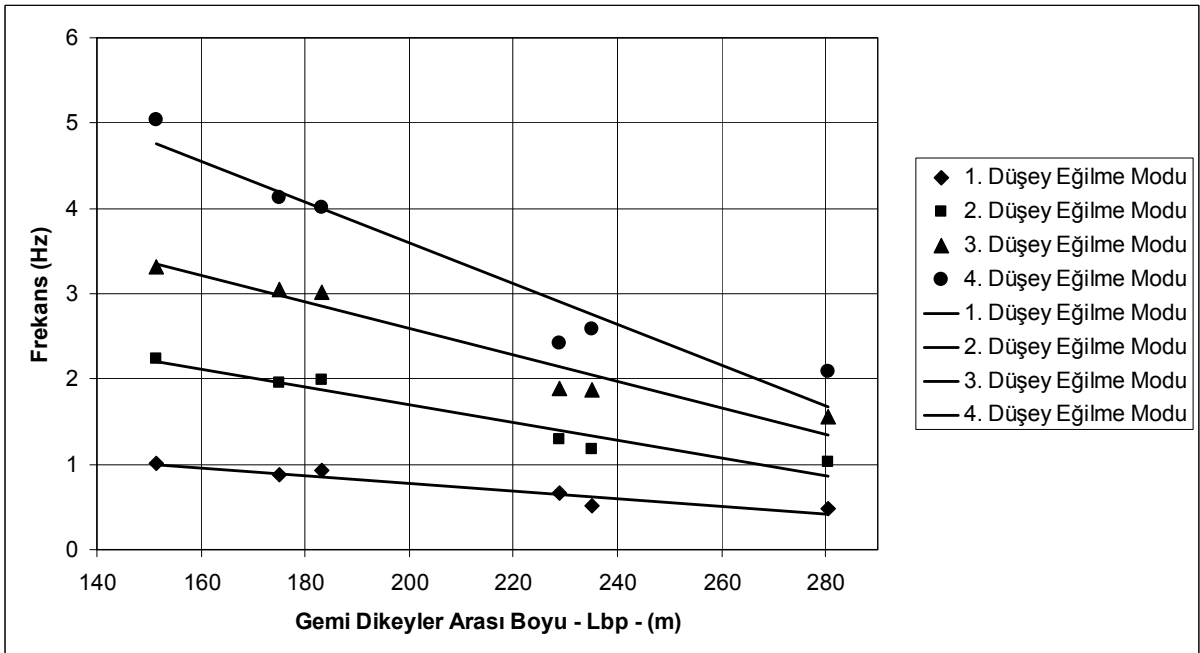


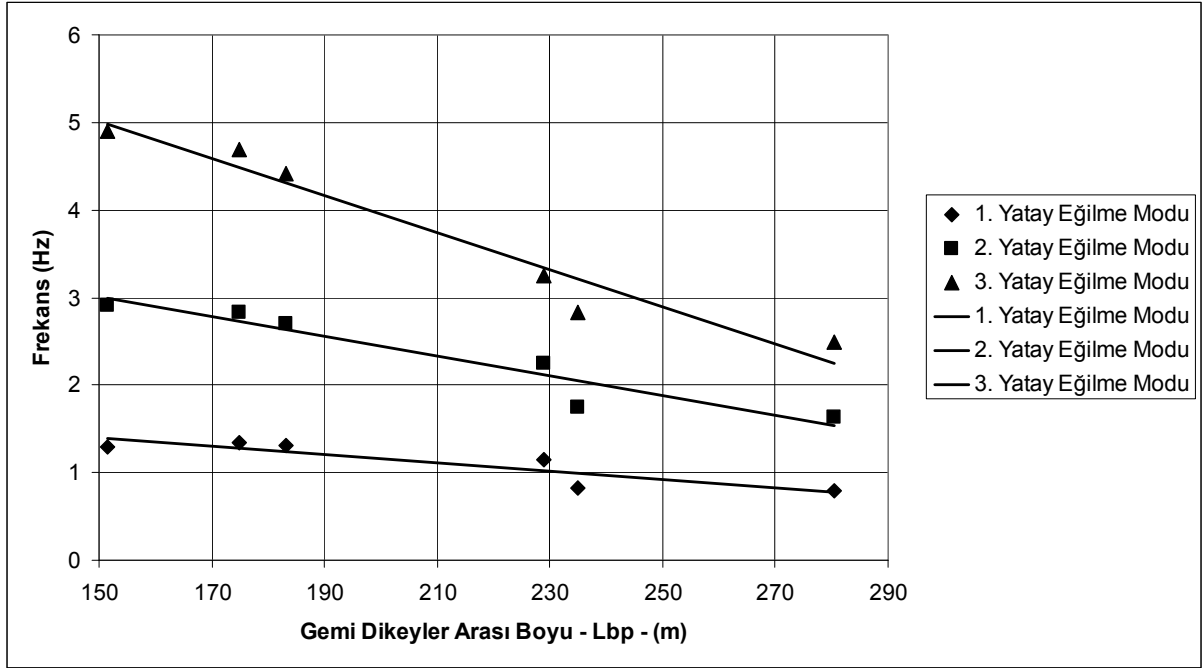
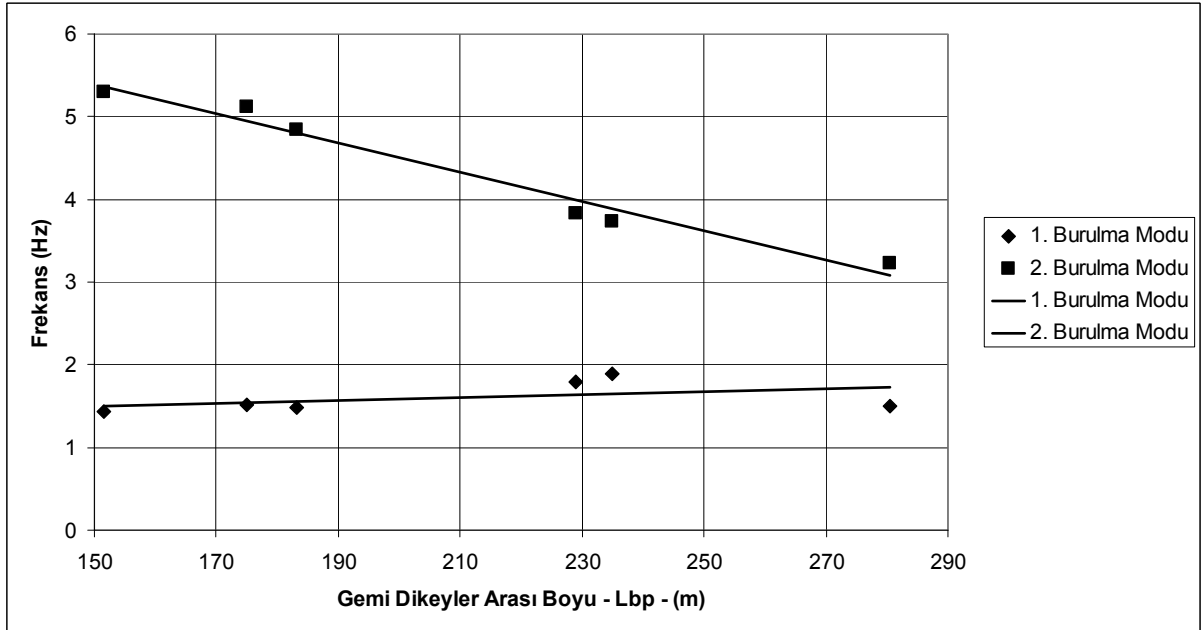
Çizelge 6.23 Gemilerin burulma modlarındaki ıslak ve kuru titreşim farkları

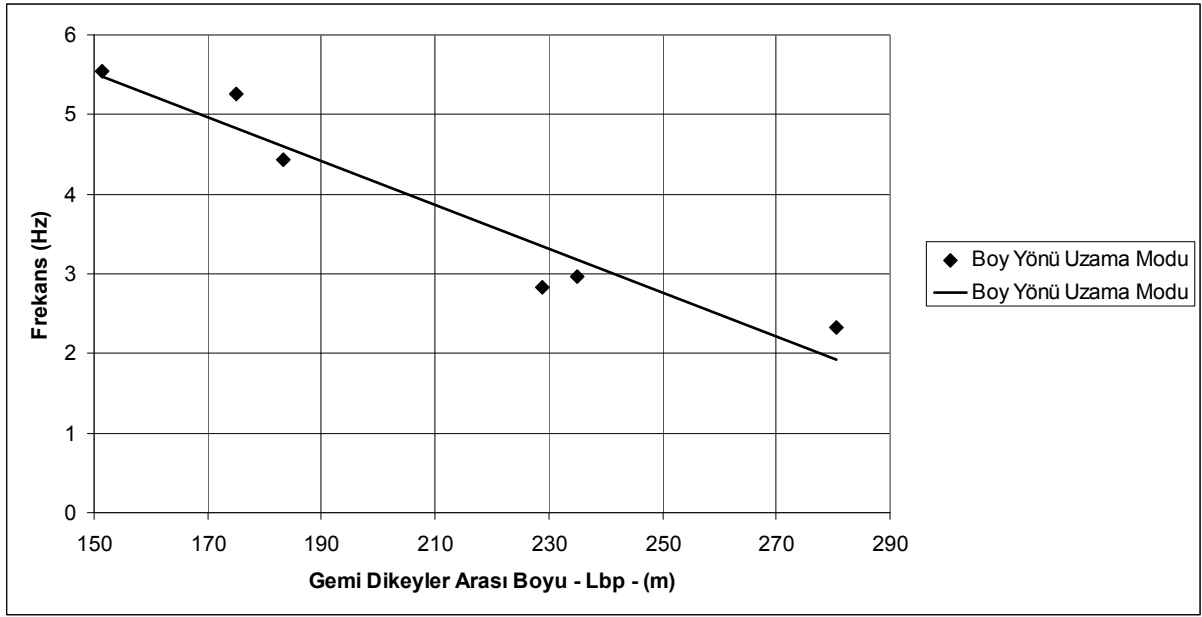


Gemilerin boylarına göre tam homojen yüklemdeki düşey eğilme, yatay eğilme, burulma ve aksenal ıslak frekanslarının karşılaştırması Çizelge 6.24, 6.25, 6.26 ve 6.27’de görülmektedir.

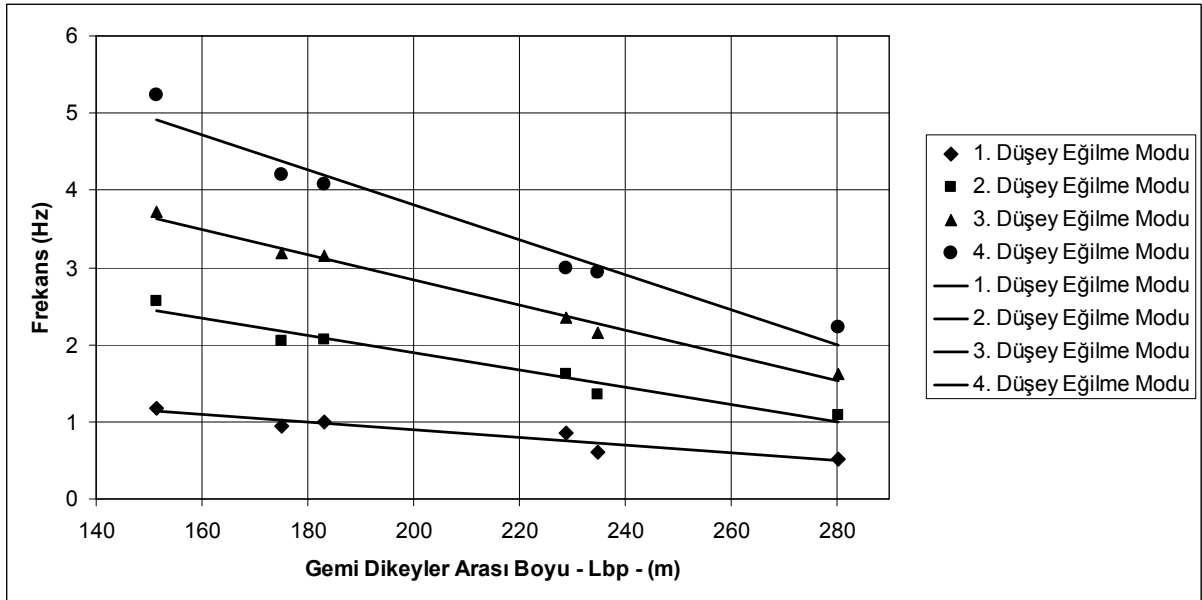
Çizelge 6.24 Gemilerin boylarına göre ıslak düşey eğilme frekansları



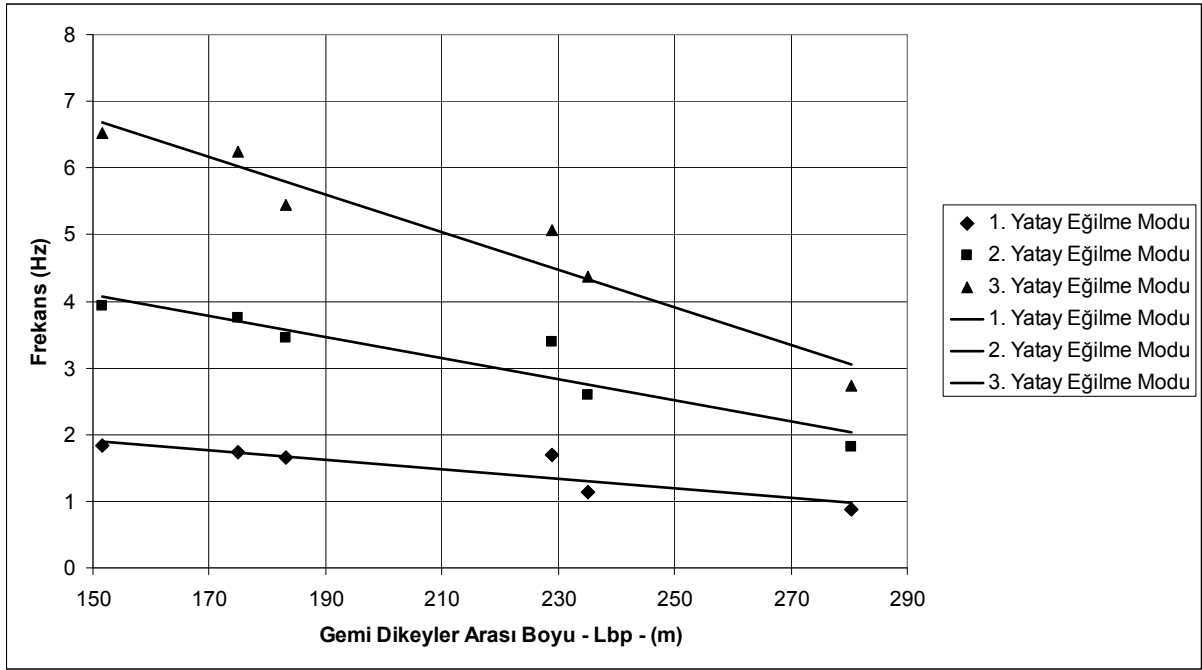
Çizelge 6.25 Gemilerin boylarına göre *ıslak* yatay eğilme frekanslarıÇizelge 6.26 Gemilerin boylarına göre *ıslak* burulma frekansları

Çizelge 6.27 Gemilerin boylarına göre *ıslak* aksenal uzama frekansları

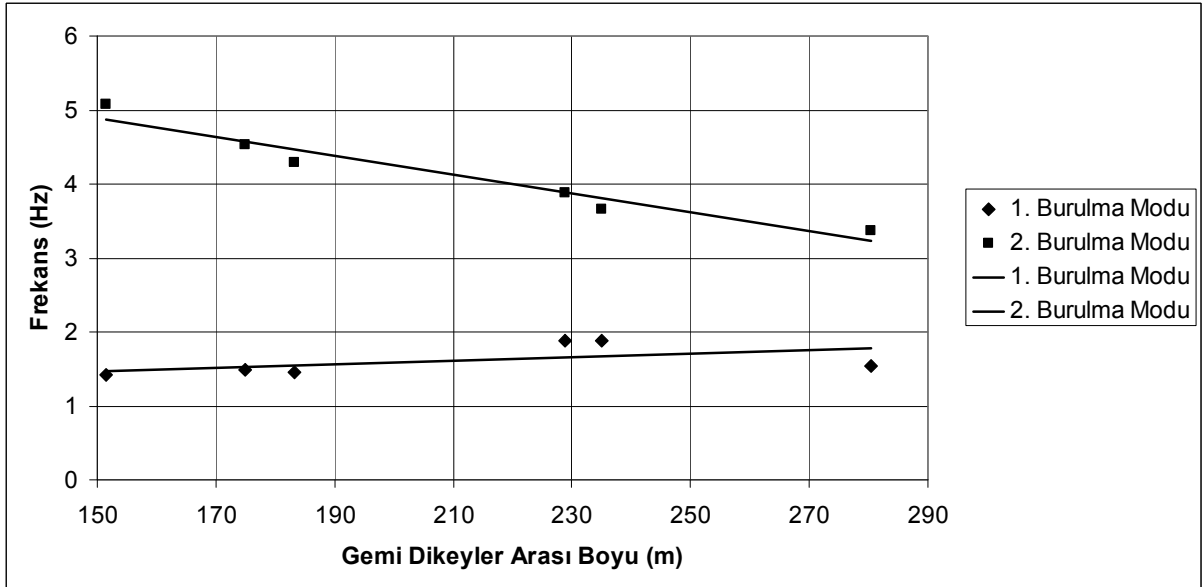
Gemilerin boylarına göre balast yüklemesindeki düşey eğilme, yatay eğilme, burulma ve aksenal uzama *ıslak* frekanslarının karşılaştırması Çizelge 6.28, 6.29, 6.30 ve 6.31'de görülmektedir.

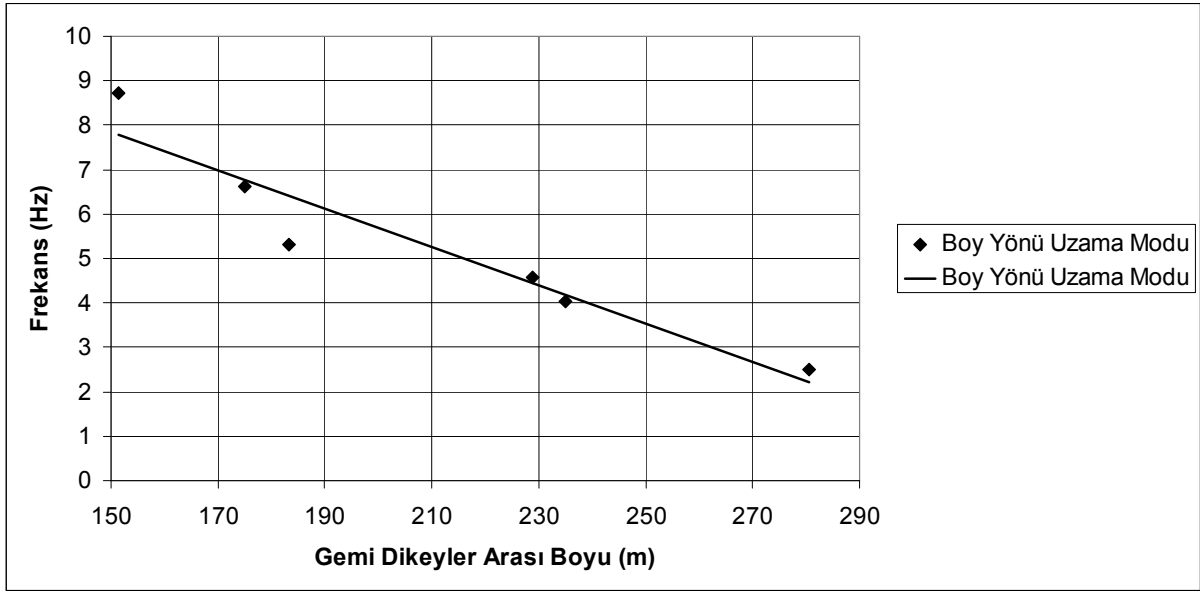
Çizelge 6.28 Gemilerin boylarına göre *ıslak* düşey eğilme frekansları

Çizelge 6.29 Gemilerin boylarına göre ıslak yatay eğilme frekansları



Çizelge 6.30 Gemilerin boylarına göre ıslak burulma frekansları



Çizelge 6.31 Gemilerin boylarına göre *ıslak* aksenal uzama frekansları

Çizelge 6.24 ve 6.31 arasındaki çizelgelerden görüleceği gibi gemi boyunun artması durumunda düşey ve yatay eğilme frekanslarında azalma olmaktadır. Bu karakter hem homojen yükleme hem de balast yüklemesinde görülebilmektedir.

Gemilerin titreşim frekanslarını üzerinde etkili olan ana karakteristik büyüklükler gemilerin, boy, genişlik, derinlik ve deplasman değerleridir. Analizlere dahil edilen gemilerin boy/genişlik, genişlik/derinlik ve boy/deplasman oranları birbirlerinden farklı oldukları için titreşim karakteristikleri de farklı özellikler göstermektedir. Örnek olarak; 1. ve 2. düşey eğilme frekansları için 53000 DWT dökme yük gemisi sonuçları 32000 DWT dökme yük gemisi sonuçlarından çok az bir farkla büyük çıkmıştır. Bunun nedeni 53000 DWT dökme yük gemisinin ve 32000 DWT dökme yük gemisinin genişliklerinin aynı olmasına rağmen 53000 DWT dökme yük gemisinin derinliğinin 32000 DWT dökme yük gemisinden yaklaşık % 25 daha fazla olmasıdır. Ayrıca 53000 DWT dökme yük gemisinin boyu 32000 DWT dökme yük gemisinden sadece yaklaşık % 4 kadar daha fazladır.

Benzer bir şekilde, dikeyler arası boyu 228.9 metre olan geminin taşıma kapasitesi 140000 DWT iken boyu 235 metre olan geminin kapasitesi 76000 DWT dir. Buna karşılık 140000 DWT'lik geminin genişliği 45 metre iken 76000 DWT'lik geminin genişliği 32.25 metredir. Aynı şekilde 140000 DWT'lik geminin yüksekliği 23 metre ve 76000 DWT'lik geminin genişliği 19.3 metredir. Dolayısı ile boy/genişlik ve genişlik/derinlik oranlarındaki farklar nedeni ile gemilerin titreşim karakteristikleri farklı çıkabilmektedir.

Burulma frekansları açısından, gemilerin boylarının artması durumunda 1. burulma



frekanslarında hafif bir artış ama 2. burulma frekanslarında azalma eğilimi olduğu her iki yükleme durumu için de gözlemlenmiştir.

Eksenel uzama frekansları açısından, gemilerin boylarının artması durumunda frekanslarda azalma eğilimi olduğu her iki yükleme durumu için de gözlemlenmiştir.

Gemilerin global titreşim karakteristiklerinin kiriş-tipi titreşim özellikleri gösterdiği belirtilmiştir. Dolayısı ile gemilerin titreşim karakteristiğini formülize edebilmek için sabit en kesite ve birim ağırlığa sahip, basit serbest-serbest prizmatik bir kiriş için geçerli olan formülü (denklem 6.1) gemi yapıları için uyarlayabiliriz.

$$f = \frac{(m_{fr}l)^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EIg}{Wl^3}} \quad (6.1)$$

Basit kirişler için verilen bu denklemde  $m_{fr}$ , frekans mertebesi,  $l$ , kiriş boyunu,  $E$ , elastisite modülünü,  $I$ , atalet modülünü ve  $W$ , kirişin toplam ağırlığını belirtmektedir.

Bu formülü gemi yapıları için ampirik formda aşağıdaki gibi yazabiliriz (Todd, 1960);

$$\text{Frekans} = \phi \sqrt{\frac{I}{\Delta L^3}} \quad (6.2)$$

Burada  $\phi$ , bir katsayı,  $I$ , istenilen moda bağlı atalet momenti,  $\Delta$ , geminin deplasmanı ve  $L$ , geminin karakteristik boyudur.

Denklem 6.2'de görüldüğü üzere gemi gibi kiriş tipi yapıların titreşim karakteristikleri üzerindeki önemli değişkenler, orta kesit atalet momenti, geminin deplasmanı ve geminin karakteristik boyudur. Geminin orta kesit atalet momenti, geminin genişlik ve derinlik değerleri ile karakterize edilebilir ve denklem 6.2 aşağıdaki şekillerde verilebilir.

Düşey eğilme titreşim frekansları için;

$$\text{Frekans} = \phi \sqrt{\frac{BD^3}{\Delta L^3}} \quad (6.3)$$

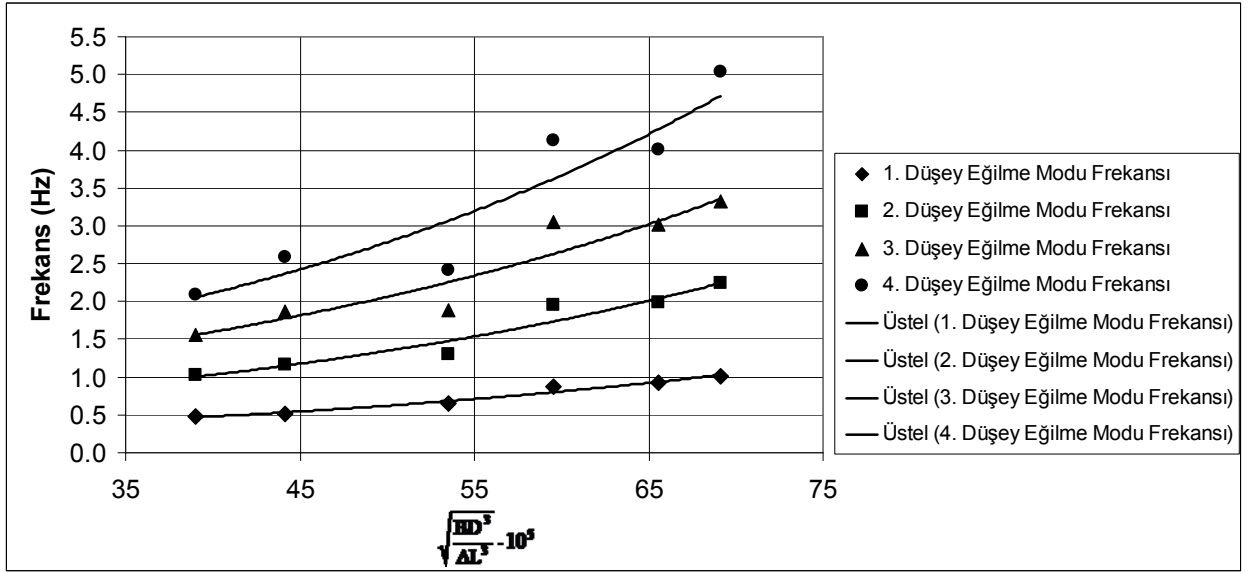
Yatay eğilme titreşim frekansları için;

$$\text{Frekans} = \phi \sqrt{\frac{DB^3}{\Delta L^3}} \quad (6.4)$$

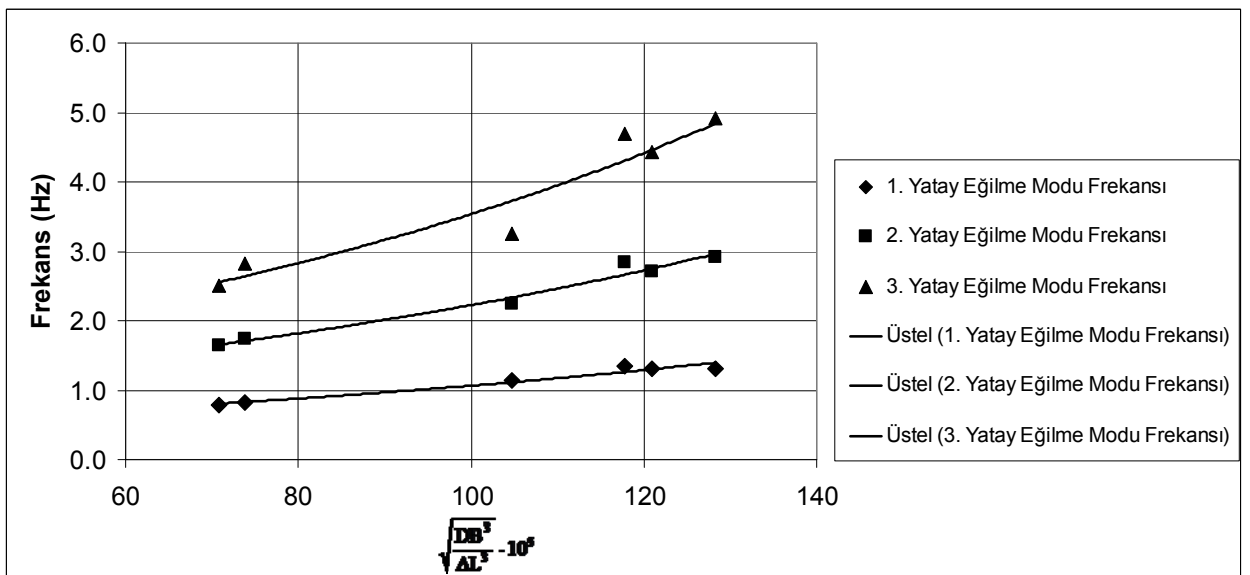
Burada  $B$ , geminin genişliği ve  $D$ , geminin derinliğidir.

Analizlerde incelenen gemilerin  $\sqrt{\frac{BD^3}{\Delta L^3}}$  ve  $\sqrt{\frac{DB^3}{\Delta L^3}}$  değerlerine göre elde edilen frekanslar yeniden düzenlenerek üstel ampirik formüller elde edilmiştir. Çizelge 6.32 ve 6.33 de homojen yükleme durumuna için düşey ve yatay eğilme frekanslarının üstel eğrileri ve Çizelge 6.34 ve 6.35 de ise balast yükleme durumu için düşey ve yatay eğilme frekanslarının üstel eğrileri görülebilmektedir.

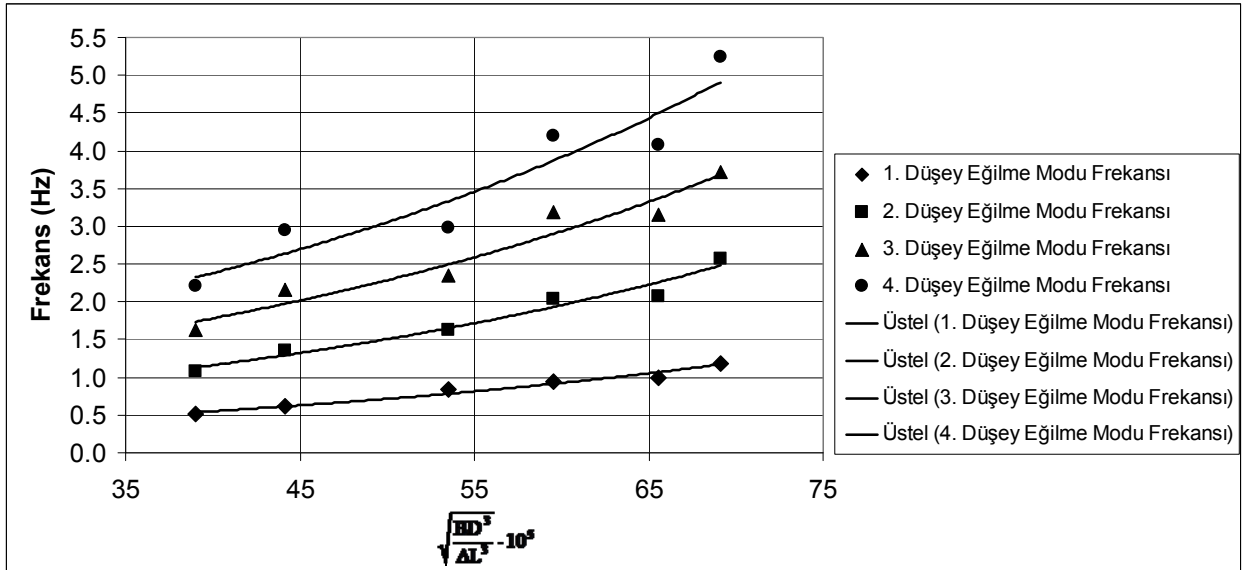
Çizelge 6.32 Gemileri düşey eğilme frekanslar için üstel eğriler (Tam homojen yükleme)



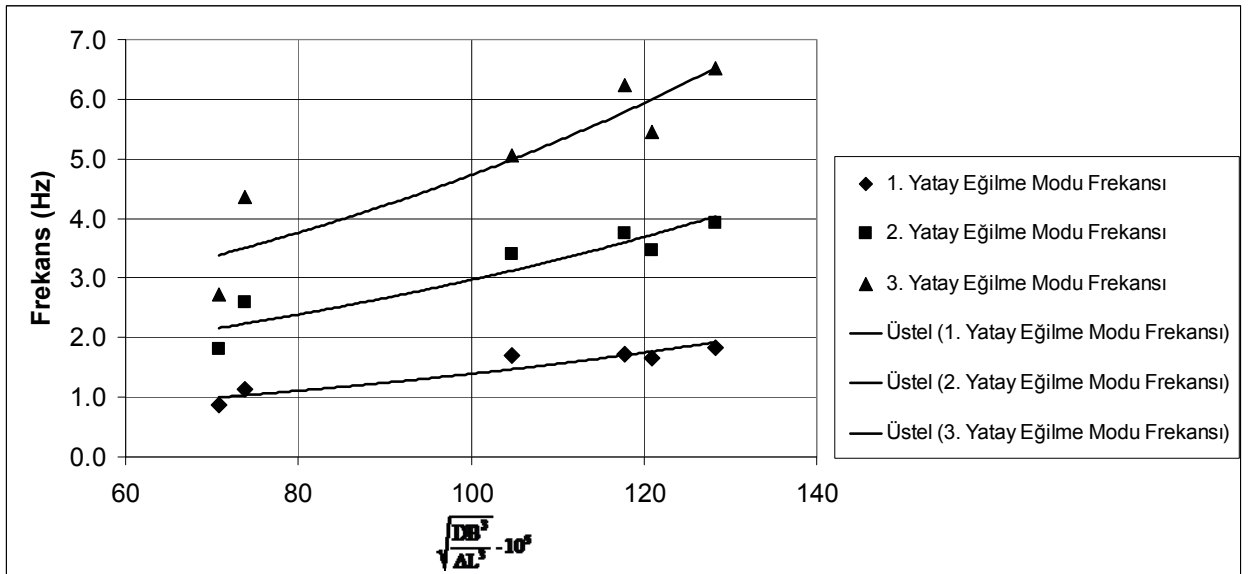
Çizelge 6.33 Gemileri yatay eğilme frekanslar için üstel eğriler (Tam homojen yükleme)



Çizelge 6.34 Gemileri düşey eğilme frekanslar için üstel eğriler (Balast yüklemesi)



Çizelge 6.35 Gemileri yatay eğilme frekanslar için üstel eğriler (Balast yüklemesi)



Analizlerde incelenen dökme yük gemisi serisinin düşey ve yatay eğilme frekansları için elde edilmiş bu üstel ampirik denklemler aşağıda görülebilmektedir.

Tam homojen yükleme 1. düşey eğilme modu;

$$N_{1D} = 0.1673 \cdot e^{0.0263 \cdot \sqrt{\frac{BD^3}{\Delta L^3}} \cdot 10^5} \quad (6.5)$$

Tam homojen yükleme 2. düşey eğilme modu;

$$N_{2D} = 0.3540 \cdot e^{0.0267 \cdot \sqrt{\frac{BD^3}{\Delta L^3}} \cdot 10^5} \quad (6.6)$$

Tam homojen yükleme 3. düşey eğilme modu;

$$N_{3D} = 0.5772 \cdot e^{0.0255 \cdot \sqrt{\frac{BD^3}{\Delta L^3}} \cdot 10^5} \quad (6.7)$$

Tam homojen yükleme 4. düşey eğilme modu;

$$N_{4D} = 0.6997 \cdot e^{0.0276 \cdot \sqrt{\frac{BD^3}{\Delta L^3}} \cdot 10^5} \quad (6.8)$$

Tam homojen yükleme 1. yatay eğilme modu;

$$N_{1Y} = 0.4090 \cdot e^{0.0096 \cdot \sqrt{\frac{DB^3}{\Delta L^3}} \cdot 10^5} \quad (6.9)$$

Tam homojen yükleme 2. yatay eğilme modu;

$$N_{2Y} = 0.8101 \cdot e^{0.0101 \cdot \sqrt{\frac{DB^3}{\Delta L^3}} \cdot 10^5} \quad (6.10)$$

Tam homojen yükleme 3. yatay eğilme modu;

$$N_{3Y} = 1.1638 \cdot e^{0.0111 \cdot \sqrt{\frac{DB^3}{\Delta L^3}} \cdot 10^5} \quad (6.11)$$

Balast yüklemesi 1. düşey eğilme modu;

$$N_{1D} = 0.1966 \cdot e^{0.0258 \cdot \sqrt{\frac{BD^3}{\Delta L^3}} \cdot 10^5} \quad (6.12)$$

Balast yüklemesi 2. düşey eğilme modu;

$$N_{2D} = 0.4089 \cdot e^{0.0261 \cdot \sqrt{\frac{BD^3}{\Delta L^3}} \cdot 10^5} \quad (6.13)$$

Balast yüklemesi 3. düşey eğilme modü;

$$N_{3D} = 0.6569 \cdot e^{0.0249 \cdot \sqrt{\frac{BD^3}{\Delta L^3}} \cdot 10^5} \quad (6.14)$$

Balast yüklemesi 4. düşey eğilme modü;

$$N_{4D} = 0.8810 \cdot e^{0.0249 \cdot \sqrt{\frac{BD^3}{\Delta L^3}} \cdot 10^5} \quad (6.15)$$

Balast yüklemesi 1. yatay eğilme modü;

$$N_{1Y} = 0.4467 \cdot e^{0.0114 \cdot \sqrt{\frac{DB^3}{\Delta L^3}} \cdot 10^5} \quad (6.16)$$

Balast yüklemesi 2. yatay eğilme modü;

$$N_{2Y} = 1.0042 \cdot e^{0.0108 \cdot \sqrt{\frac{DB^3}{\Delta L^3}} \cdot 10^5} \quad (6.17)$$

Balast yüklemesi 3. yatay eğilme modü;

$$N_{3Y} = 1.5126 \cdot e^{0.0114 \cdot \sqrt{\frac{DB^3}{\Delta L^3}} \cdot 10^5} \quad (6.18)$$

## 7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Gemi yapıları gibi yüzen elastik yapıların dinamik karakteristiklerinin incelenmesi için hidro-elastisite teorisi kullanımı zorunludur. Akışkan ve yapının dinamik etkileşimi hem yapısal dinamiğin hem de akışkanlar dinamiğinin bütün yönlerini bir araya getirmektedir. Yapılar kendi yoğunlukları ile mukayese edilebilir yoğunluktaki akışkanlar (su gibi) ile temas halinde oldukları zaman, yapının ıslak yüzey hareketlerine bağlı olan akışkan yükleri, o yapının dinamik karakteristiklerini önemli şekilde değiştirecektir. Buradaki akışkan-yapı etkileşimi, yapı ve akışkan hareket denklemlerinin eş zamanlı olarak birlikte veya belirli bazı kabuller altında birbirlerinden ayrılması ile çözülmektedir.

Bu tez çalışmasında, hidro-elastisite teorileri hakkında genel bilgiler verildikten sonra, akışkan-yapı etkileşimini belirli bazı kabuller altında ayrı inceleyen *hibrit* bir hidro-elastisite analiz yöntemi ve akışkan-yapı etkileşimini eşzamanlı olarak birlikte ele alan bir sonlu elemanlar analiz yöntemi incelenmiştir.

*Hibrit* yöntem olarak adlandırılan üç boyutlu hidro-elastisite teorisinde, lineer bir sonlu elemanlar yaklaşımı ile üç boyutlu yapının vakumdaki dinamik davranışları hesaplandıktan sonra akışkan-yapı etkileşimi, akışkanın ideal, viskoz olmayan, sıkıştırılmaz ve hareketinin çevrimsiz olduğu kabul edilen bir sınır elemanlar yöntemi ile hesaplanır.

Akışkan-yapı etkileşimini eşzamanlı olarak birlikte ele alan sonlu elemanlar analiz yönteminde ise dinamik basınç serbestlik dereceli bir akışkan elemanını esas alınmıştır. Bu elemanı kütüphanesinde bulunduran Abaqus sonlu elemanlar yazılımı analizlerde kullanılmıştır. Bu yazılımın içersindeki akışkan elemanının sonlu elemanlar formülasyonunda akustik-yapı etkileşimi, akışkan ve yapının yer değiştirmelerinin eşitlenmesi ile elde edilir. Dolayısı ile titreşim hareketi nedeni ile yapısal elemanlar üzerinde oluşan atalet etkileri, akışkan elemanı üzerine aktarılır. Böylece yapının ve akışkanın sonlu elemanlar ağı birbiri ile etkileşimli olarak çözülür.

(L/R) ve (t/R) oranları ile özel bir sınıf denizaltı gövdesini temsil etmekte olan bir silindirik kabuk modelinin deneysel titreşim ölçüm çalışmaları yapılmıştır. Modelin boyutları, L = 1284 mm, iç yarıçap, R = 180 mm ve plaka kalınlığı t = 3 mm. Modelin imalatında kullanılan malzeme, paslanmaz çelik AISI 316L'dir. Modelin kuru ve iki farklı su çekiminde yüzme durumları için titreşim ölçüm deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde Bruel & Kjaer ölçme ve analiz sistemleri kullanılmıştır

Silindirik kabuğun titreşim ölçüm deney sonuçlarını karşılaştırmak ve yöntemlerin

kullanılabilirliğini göstermek amacı ile aynı silindirik kabuk Abaqus yazılımı içerisinde modellenerek, hem vakumdaki titreşim analizleri hem de iki farklı su çekiminde yüzme durumları için hidro-elastik titreşim analizleri yapılmıştır. Silindirik kabuk aynı zamanda *hibrit* hidro-elastisite analiz yöntemi ile de incelenerek iki farklı su çekimindeki hidro-elastik titreşim karakteristikleri elde edilmiştir.

Silindirik kabuğun Abaqus yazılımı kullanılarak yapılan analizleri sonucunda,  $m=2$ ,  $n=4$  titreşim mod şekline kadar olan *kuru* titreşim frekans ve mod şekilleri hesaplanmıştır. Burada,  $n$  silindirin etrafındaki çevresel tam dalga sayısını,  $m$  ise silindir boyunca olan yarım dalga sayısını belirtmektedir. Abaqus yazılımı sonuçlarının literatürdeki analitik sonuçlar ile gayet güzel bir uyum içinde olduğu ve deney sonuçları ile de yeterli yakınlıkta olduğu gözlenmiştir. Deney ve analiz sonuçları arasında çıkan farkların deney silindirik kabuğu ile model arasında olabilecek yapısal veya uç koşulları farkından dolayı olabileceği sonucuna varılmıştır.

Silindirik kabuğun 121 mm su çekiminde silindirin serbest yüzmesi durumunda ve 180 mm su çekiminde yarı batırılmış olarak yüzmesi durumunda Abaqus yazılımı içerisinde yapılan ıslak analiz sonuçları, deney sonuçları ve *hibrit* hidro-elastisite yöntemi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizlerde  $m=2$ ,  $n=4$  titreşim mod şekline kadar olan frekanslar hesaplanmıştır. Deney sonucunda elde edilen frekanslar ile hesap sonucunda çıkan mod şekilleri karşılaştırılarak eşleştirme yapılmıştır. Yapılan eşleştirme sonucunda, ivmeölçerin deney esnasındaki konumu nedeni ile bazı titreşim frekanslarının ölçülemediği sonucuna varılmıştır. Ölçülebilen frekanslar ile hem sonlu elemanlar yöntemi ile hem de *hibrit* hidro-elastisite yöntemi hesaplanan frekanslar arasındaki karşılaştırma sonucunda ise değerlerin iyi bir uyum içerisinde oldukları görülmüştür.

Tam batmış halde yapılan analiz sonuçları ise literatürde yapılmış deney sonuçları, analitik çözümler ve yine literatürdeki hidro-elastisite teorilerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.  $m=2$ ,  $n=4$  titreşim mod şekline kadar yapılan hesaplar ile karşılaştırmalar neticesinde elde edilen sonuçların gayet iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Silindirik kabuk için yapılan yakınsaklık analizleri sonucunda ise bu tür yapılar için, hem yapısal elemanların hem de ilk sıra akışkan elemanlarının boyutunun yapının karakteristik boyunun yaklaşık 1/40'ı kadar kabul edilmesinin yeterli doğrulukta sonuç verdiği görülmüştür.

Üç boyutlu *hibrit* hidro-elastisite analizi yöntemini ve sonlu elemanlar ile yapılan hidro-elastisite analizi yöntemini karşılaştırmak amacı ile 1900 TEU kapasiteli bir konteyner

gemisinin hidro-elastik titreşim analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda, yöntemler arasında gayet iyi bir uyum bulunduğu görülmüştür. En büyük farklar tam homojen yükleme için % 2.5 ve balast yüklemesi için % 6.2 olarak elde edilmiştir.

Konteyner gemisi için yapılan yakınsaklık analizleri sonucunda ise sonraki gemi analizlerinde akışkan hacim silindirinin boyutları için, uzunluğu gemi boyunun 2 – 2.5 katı ve çapı yaklaşık gemi uzunluğu boyutunda olan yarım silindirik bir hacmin kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Ayrıca analizlerde, gemi ile temasta olan akışkan elemanlarının boyutu olarak gemi boyunun yaklaşık 1/150'si alınabileceği sonucuna varılmıştır.

Böylece her iki yöntemin de gemi yapıları gibi etrafındaki akışkan ortamı ile etkileşimli bir şekilde yüzen elastik yapıların dinamik karakteristiklerinin incelenebilmesi için kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Bu yöntemlerin uygunluğu gösterildikten sonra, bir dökme yük gemisi serisine ait bir grup geminin hidro-elastik titreşim karakteristikleri sonlu elemanlar analizleri yöntemi ile incelenmiştir. Hidro-elastik analizleri yapılmış gemiler aşağıda verilmiştir;

- 20000 DWT kapasiteli *Handysize* dökme yük gemisi,
- 32000 DWT kapasiteli *Handysize* dökme yük gemisi,
- 53000 DWT kapasiteli *Handymax* dökme yük gemisi,
- 76000 DWT kapasiteli *Panamax* dökme yük gemisi,
- 140000 DWT kapasiteli *Capesize* dökme yük gemisi.
- 180000 DWT kapasiteli *Capesize* dökme yük gemisi.

Yapılan analizlerde gemilerin ilk yirmi titreşim frekans ve mod şekilleri hesaplanmıştır. Analizlerin sonucunda, 4 adet düşey eğilme modu, 3 adet yatay eğilme modu, 2 adet burulma modu ve 1 adet eksenel uzama modu incelenmiştir.

Gemilerin *ıslak* frekanslarının, *kuru* frekanslarından oldukça farklı olduğu görülmüş ve gemi gibi yüzen elastik yapıların dinamik karakteristiklerinin, etrafındaki akışkan alanın atalet etkisi nedeni ile önemli bir şekilde değiştiği gösterilmiştir. Gemilerin *ıslak* ve *kuru* titreşim frekansları arasındaki yüzde farklarının kendi aralarında uyumlu oldukları görülmüş ve önceki konteyner gemisi çalışması sonuçları ile de aralarında bir paralellik olduğu görülmüştür.



Gemi boyunun artması ile paralel olarak düşey ve yatay eğilme frekanslarında azalma olduğu görülmüştür. Bu karakter hem homojen yükleme hem de balast yüklemesinde görülebilmektedir.

Burulma frekansları açısından, gemilerin boylarının artması durumunda 1. burulma frekanslarında hafif bir artış ama 2. burulma frekanslarında azalma eğilimi olduğu her iki yükleme durumu için de gözlemlenmiştir.

Boy yönü eksenal titreşim frekansları açısından, gemilerin boylarının artması durumunda frekanslarda azalma eğilimi olduğu her iki yükleme durumu için de gözlemlenmiştir.

Gemilerin titreşim frekanslarını üzerinde etkili olan ana karakteristik büyüklükler gemilerin, boy, genişlik, derinlik ve deplasman değerleridir. Analizlere dahil edilen gemilerin boy/genişlik, genişlik/derinlik ve boy/deplasman oranları birbirlerinden farklı oldukları için titreşim karakteristiklerinin de farklı özellikler gösterebildiği belirlenmiştir.

Gemilerin titreşim karakteristiklerinin kiriş-tipi titreşim özellikleri gösterdiği bilindiği için sabit en kesite ve birim ağırlığa sahip, basit serbest-serbest prizmatik bir kirişin titreşim frekanslarının bulunması için geçerli olan formül ile gemi yapılarının titreşim frekanslarını verebilen ampirik formüller arasında benzeşim kurulmuştur. Bu benzeşim sonucunda düşey

eğilme frekansları için  $\sqrt{\frac{BD^3}{\Delta L^3}}$  ve yatay eğilme frekansları için de  $\sqrt{\frac{DB^3}{\Delta L^3}}$  değişkenlerinin

kullanılarak gemilerin genel mukavemet özelliklerinin ampirik formüllere dahil edilmesi sağlanmıştır. Analizler sonucunda elde edilen frekans değerleri bu değişkenlere göre tekrardan incelenerek ilk dört düşey eğilme ve ilk üç yatay eğilme frekans değerleri için üstel formda ampirik formüller çıkarılmıştır.

Bu formüller ile analizlerde kullanılan gemilerin boyutları ve taşıma kapasiteleri içerisinde kalan dökme yük gemileri için ön dizayn aşamasında düşey ve yatay eğilme titreşim frekans değerlerine bir yaklaşım yapılması amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, sonlu elemanlar ile analiz yöntemi ile yapılan hidro-elastik analizlerde akış alanının hızı sıfır ve serbest yüzey sınır şartı sıfır basınç olarak alınmıştır. Dolayısı ile serbest yüzey etkisi ihmal edilmiştir. Yine sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ve serbest yüzey sınır şartı ile bir analogi kurularak özellikleri belirlenecek kabuk yapısal elemanlar serbest yüzey üzerinde modele eklenebilir. Gelecek çalışmalar içerisinde, gemi titreşimleri esnasında oluşabilecek serbest yüzey değişimlerinin ve akışkan sönümünün hesabı ve ayrıca sıfırdan farklı akış alanı hızlarında yapının titreşim karakteristiklerinin hesaplanabilmesi sayılabilir.

**KAYNAKLAR**

Abaqus, (2008), Theory Manual, Version 6.8, Dassault Systemes.

ABS, (2006), Guidance Notes on Ship Vibration, American Bureau of Shipping, USA.

Aksu, S., Bishop, R.E.D., Price, W.G., Temarel, P., (1991a), "On the Behavior of a Product Carrier in Ballast Traveling in a Seaway", Transactions of the Royal Institution of Naval Architects 133, 45–59.

Aksu, S., Price, W.G., Temarel, P., (1991b), "A Comparison of Two-Dimensional and Three-Dimensional Hydroelasticity Theories Including the Effect of Slamming", Proceedings of the Institute of Mechanical Engineering Part C-Journal of Mechanical Engineering Science 205 (1), 3–15.

Aksu, S., (1993), "Steady state and transient responses of flexible ship structures traveling in irregular seaway", PhD Thesis, University of Southampton.

Amabili, M., Dalpiaz, G., (1995), "Breathing Vibrations of a Horizontal Circular Cylindrical Tank Shell Partially Filled with Liquid", Transactions of the American Society of Mechanical Engineers Journal of Vibration and Acoustics, 117, 187-191.

Amabili, M., (1996), "Free Vibration of Partially Filled Horizontal Cylindrical Shells", Journal of Sound and Vibration, 191, 757-780.

Amabili, M., (1997), "Flexural Vibration of Cylindrical Shells Partially Coupled with External and Internal Fluids", Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Vibration and Acoustics, 119, 476-484.

Amabili, M., Paidoussis, M.P., Lakis, A.A., (1998), "Vibrations of Partially Filled Cylindrical Tanks with Ring-Stiffeners and Flexible Bottom", Journal of Sound and Vibration, 213, 259–299.

Amabili, M., (2000), "Vibrations of Fluid Filled Hermetic Cans", Journal of Fluids and Structures 14, 235–255.

Amabili, M., Garziera, R., "Vibrations of Circular Cylindrical Shells with Nonuniform constraints, Elastic Bed and Added Mass Part II: Shells Containing or Immersed in Axial Flow", Journal of Fluids and Structures, 16, 31–51.

Armaid, J. L., Orsero, P., Robert, O., (1978), "Dynamic Analysis of the Afterbody of a Ship Towards a Successful Correlation Between Analytical and Experimental Results", SNAME, Ship Vibration Symposium, Arlington.

Arnold R. N., Warburton, G. B., (1953), "The Flexural Vibrations of Thin Cylinders", Proceedings, Instn. Mech. Engrs., 167A, 62-80.

Bai, K. J., (1972), "A Variational Method in Potential Flows with a Free Surface", Report no. NA 72-2, University of California, Berkeley, Collage of Engineering.

Bal, Ş., Güner, M., (2009), "Performance Analysis of Podded Propulsors", Ocean Engineering, Vol. 36, No. 8, 06/2009, s. 556-563.

Belik, O., Bishop, R.E.D., Price, W.D., (1980), "On the Slamming Response of Ships To Regular Head Waves", Transactions of the Royal Institution of Naval Architects 122, 325–337.

- Bereznitski, A., (2001), "Slamming: the Role of Hydroelasticity", *International Shipbuilding Progress*, 48 (454), 333–351.
- Betts, C.V., Bishop, R.E.D., Price, W.G., (1977), "The Symmetric Generalised Fluid Forces Applied to a Ship in a Seaway", *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, 199, 265–278.
- Bishop, R.E.D., Price, W.G., (1977), "The Generalised Antisymmetric Fluid Forces Applied to a Ship in a Seaway" *International Shipbuilding Progress* 24, 3–14.
- Bishop, R.E.D., Price, W.G., (1979), *Hydroelasticity of Ships*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Bishop, R.E.D., Price, W.G., Wu, Y., (1986), "A General Linear Hydroelasticity Theory of Floating Structures Moving in a Seaway", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A 316, 375–426.
- Bishop, R.E.D., Price, W.G., Tam, P.K.Y., (1978), "On the Dynamics of Slamming", *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, 120, 259–280.
- Bishop, R.E.D., Price, W.G., Temarel, P., (1980), "Antisymmetric Vibration of Ship Hulls", *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, 122, 197–208.
- Bishop, R.E.D., Price, W.G., Temarel, P., (1991), "A Theory on the Loss of the MV Derbyshire", *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, 133, 389–453.
- Bishop, R.E.D., Price, W.G., (1991), "Some Comments on Present Day Ship Dynamics", *The Dynamics of Ships*, Ed. Price, W.G., *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A334, pp.187-197.
- Che, X.L., Riggs, H.R., Ertekin, R.C., Wu, Y.S., Wang, M.L., (1992), "Two-Dimensional Analysis of Prying Response of Twin-Hull", *Floating Structures Proceedings of 2nd International Offshore and Polar Engineering Conference -ISOPE 1992*.
- Che, X.L., Riggs, H.R., Ertekin, R.C., (1994), "Composite 2D/3D Hydroelastic Analysis Method for Floating Structures", *Journal of Engineering Mechanics* 120 (7), 1499–1518.
- Chen, X.J., Wu, Y.S., Cui, W.C., Juncher Jensen, J., (2006), "Review of Hydroelasticity Theories for Global Response of Marine Structures", *Ocean Engineering*, 33, 439-457.
- Chenault, D. W., (1970), "Motion of a Ship in a Free Surface", M .S. Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California.
- Clarke, J.D., (1986), "Wave Loading in Warships", In: Smith, C.S., Clarke, J.D. (Eds.), *Advances in Marine Structures*, Elsevier Applied Science Publishers, pp. 1–25.
- Dong, Y.Q., Lin, W.X., Zhu, J.G., (1989), "A Study on Wave-Excited Vibration of Shallow Draft Full Form Ship", *Shipbuilding of China*1, 76–83.
- Dong, Y.Q., Lin, W.X., (1992), "Hydroelasticity and Wave Loads for Full Form Ship with Shallow Draft", *Journal of Ship Research*.
- Du, S.X., (1996), "A complete frequency domain analysis method of linear three-dimensional hydroelastic responses of floating structure travelling in waves", Ph.D. Thesis, China Ship Scientific Research Center, Wuxi, China.
- Ergin, A., (1992), "A Hydroelastic Study of Submerged Cylinders in Finite and Infinite Depths of Water", Ph.D. Thesis, Southampton University, U.K.

- Ergin, A., Price, W.G., Randall, R., Temarel, P., (1992) “Dynamic Characteristics of a Submerged, Flexible Cylinder Vibrating in Finite Water Depths”, *Journal of Ship Research*, 36, 154-167.
- Ergin, A., (1997a), “The Response Behavior of a Submerged Cylindrical Shell Using the Doubly Asymptotic Approximation Method (DAA)”, *Computers and Structures*, 62, 1024-1034.
- Ergin, A., (1997b), “An Approximate Method for the Free Vibration Analysis of Partially Filled and Submerged, Horizontal Cylindrical Shells”, *Journal of Sound and Vibration*, 207, 761–767.
- Ergin, A., (1997c), “Dynamic Characteristics of Partially Filled and Submerged Cylindrical Tanks”, *Proceedings of the Eighth International Congress on Marine Technology, IMAM, Vol.2, Istanbul*, pp 21–30.
- Ergin, A., (1999), “Kısmen Dolu Silindirik Tankların Dinamik Analizi”, *Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojisi Teknik Kongresi 99, Bildiri Kitabı*
- Ergin, A., Temarel, P., (2002), “Free Vibration of a Partially Liquid Filled and Submerged, Horizontal Cylindrical Shell”, *Journal of Sound and Vibration*, 254, 951-965.
- Ergin, A., Uğurlu, B., (2003), “Linear Vibration Analysis of Cantilever Plates Partially Submerged in Fluid”, *Journal of Fluids and Structures*, 17, 927-939.
- Ergin, A., Uğurlu, B., (2004), “Hydroelastic Analysis of Fluid Storage Tanks by Using a Boundary Integral Equation Method”, *Journal of Sound and Vibration*, 275, 489-513.
- Ergin, A., Kaydıhan, L., Uğurlu, B., (2007a), “Hydroelastic Analysis of 1900 Teu Container Ship Using Finite Element and Boundary Element Methods”, *Proceedings of the 21st Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, Yokohoma Japan*, pp:61-68.
- Ergin, A., Kaydıhan, L., Uğurlu, B., (2007b), “A Hydroelastic Vibration Analysis of a Container Ship Using Finite Element and Boundary Element Methods”, *The 36<sup>th</sup> International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, Istanbul Turkey*, Paper No:in07\_276.
- Faltinsen, O.M., Zhao, R., (1991), “Numerical Predictions of Ship Motions at High Forward Speed”, *Philosophical transactions of the Royal Society of London, Series A 334*, 241–252.
- Fu, Y., Price, W.G., (1987), “Interactions between a Partially or Totally Immersed Vibrating Cantilever Plate and the Surrounding Fluid”, *Journal of Sound and Vibration*, 118, 495–513.
- Fu, Y.N., Price, W.G., Temarel, P., (1987), “The Dry and Wet Towing of A Jack-Up in Regular and Irregular Waves”, *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects* 129, 149–159.
- Fu, S.X., Fan, J., Chen, X.J., Cui, W.C., (2003), “Analysis Method for the Mooring System for a Flexible Floating Body”, *Proc. of Deep Water Mooring System-Concepts, Design, Analysis, and Materials Proceedings of Deep Water Mooring System-Concepts, Design, Analysis, and Materials, Offshore Technology Research Center (OTRC) and Coasts,Oceans,Ports and Rivers Institute (COPRI) of ASCE, October 2–3, Houston, Texas, USA*, pp.142–151.
- Gerritsma, J., Beukelman, W., (1964), “The Distribution of the Hydrodynamic Forces on a Heaving and Pitching Ship Model in Still Water”, *Proceedings: 5<sup>th</sup> Symposium on Naval*

Hydrodynamics, pp.219-251.

Giuliano C., Daniele D., Riccardo M., Marcello R., (2008), "Output-Only Analysis for Modal Parameters Estimation of an Elastically Scaled Ship", *Journal of Ship Research*, Vol. 52, No. 1, pp. 45–56.

Güner, M., Kükner, A., Baykal, M. A., (1999), *Marine Propellers and Propulsion Systems*, Istanbul Technical University Publications.

Güner, M., Çelik, F., (2006), "An Improved Lifting Line Model for the Design of Marine Propellers" *Marine Technology and SNAME News*, 43(2):100-113.

Hirdaris, S.E., Miao, S.H., Price, W.G. and Temarel, P. (2006). "The influence of structural modeling on the dynamic behaviour of a bulker in waves" *Proc. 4th Int. Conf. Hydroelasticity in Marine Technology*, Wuxi, China, 25-33.

Hermundstad, O.A., Aarsns, J.V., Moan, T., (1999), "Linear Hydroelastic Analysis of High-Speed Catamarans and Monohulls", *Journal of Ship Research* 43 (1), 48–63.

Hess, J.L., Smith, A.M.O., (1967), "Calculation of Potential Flow About Arbitrary Bodies", Kuchemann, D., et al.,(Eds.), *Progress in Aeronautical Sciences*, Vol. 8, pp.1–138.

Holden, H.O., Fagerjord, O., Frostad, R., (1980), "Early Design Stage Approach to Reducing Hull Surface Force due to Propeller Cavitation", *SNAME Trans.*

Jensen, J.J., Mansour, A.E., (2002), "Estimation of the Long-Term Wave-Induced Bending Moment in Ships using Closed-Form Expressions", *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects* 144, 41–45.

Jensen, J.J., Mansour, A.E., (2003), "Estimation of the Effect of Green Water and Bow Flare Slamming on the Wave-Induced Vertical Bending Moment using Closed-Form Expressions", In: Eatock, T. (Ed.), *Proceedings of 3rd International Conference on Hydroelasticity in Marine Technology*. The Oxford University, Oxford, pp. 155–161.

Kean, A.J., Temarel, P., Wu, X.J., Wu, Y.S., (1991), "Hydroelasticity of Non-Beamlike Ships in Waves", *The Dynamics Of Ships*, The Royal Soc., London p. 153.

Kim, Y., Kim, Y. (2008), "Analysis of springing effects on floating barges in time domain by a fully coupled hybrid BEM-FEM", *Proc. 23rd Int. Workshop on Water Waves and Floating Bodies IWWFEB*, Korea.

Kito, F., (1970), *Principles of Hydro-Elasticity*, Keio University Publication, Tokyo.

Korvin-Kroukovsky, V.B., Jacobs, W.R., (1957), "Pitching and Heaving Motions of a Ship in Regular Waves", *Transactions of The Society of Naval Architects and Marine Engineers*, (SNAME) 65, 590–632.

Kumai, T., (1958), "Damping Factors in the Higher Modes of Ship Vibrations", *European Shipbuilding*, 1, 29-34,

Kumai, T., (1968), "On the Estimation of Natural Frequencies of Vertical Vibration of Ships", *Report of Research Institute for Applied Mechanics*, Vol. 16, No. 54.

Landweber, L., Marcagno, M. C., (1957), "Added Mass of Two-Dimensional Forms of Oscillating in a Free Surface", *JSR* 1.3

Louarn, F., Price, W.G., Temarel, P., (1997) "Dynamic behavior of a fast sailing monohull in

- waves”, Proceedings of 7th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, 712–720.
- Lewis, F. M., (1929), “The Inertia of the Water Surrounding a Vibrating Ship”, TSNAME, Vol. 37,
- Li, R.P., Shu, Z., Wang, Z.J., (2002), “A Study on the Hydroelastic Behavior of Box-Typed Very Large Floating Structure in Waves”, Proceedings of the Third Conference for New Ship and Marine Technology, May 21–23, 2002, Kobe, Japan 2002 pp. 41–48.
- Lin, J.R., (1995), “Wave Excited Vibration of Large Ships”, Ship Engineering2, 4–9.
- Lindholm, U.S, Kana, D.D., Chu, W. H., Abramson, H.N, (1965), “Elastic vibration characteristics of cantilever plates in water”, Journal of Ship Research 9, 11–22.
- Liu, X.D., Sakai, S., (2000), “Nonlinear analysis on the interaction of waves and flexible floating structure”, Proceedings of 10th International Offshore and Polar Engineering Conference-ISOPE, 101–108.
- Liu, X.D., Sakai, S., (2002), “Time domain analysis on the dynamic response of a flexible floating structure to waves”, Journal of Engineering Mechanics 128 (1), 48–56.
- Liu, X.D., Sakai, S., Makino, S., Hanai, K., Sasamoto, M., (2001), “Tsunami-Induced Mooring Force on a Flexible Floating Structure”, Proceedings of 11th ISOPE 1, 241–247 (Jun 17–22).
- Lundgren, J., Price, W.G., Wu, Y.S., (1988), “A Hydroelastic Investigation into the Behavior of a Floating ‘dry’ Dock in Waves”, Spring Meeting of Royal Institution of Naval Architects, London 1988.
- MAN & BW MC Programme, (1993), “Engine Selection Guide, Diesel A/S Two-stroke Engines”
- MAN Diesel A/S, (2007), “Propulsion Trends in Bulk Carriers” MAN Diesel A/S, Copenhagen, Denmark.
- McGoldrick, R.T., (1960), Ship Vibration, David Tylor Model Basin Report 1451.
- Malenica, S., Senjanovic, I., Tomasevic, S., (2006), “An efficient hydroelastic model for wave induced coupled torsional and horizontal ship vibrations”, Proc. 21st Int. Workshop on Water Waves and Floating Bodies IWWWFB, UK.
- Malenica, S., Senjanovic, I., Tomasevic, S., Stumpf, E., (2008), “Some aspects of hydroelastic issues in the design of ultra large container ships”, Proc.23rd Int. Workshop on Water Waves and Floating Bodies IWWWFB, Korea.
- Mikami, T., Kashiwagi, M., (2008), “Time-domain strip method with memory-effect function considering the body nonlinearity of ships in large waves (second report)”, Journal of Marine Science and Technology, 10.1007/s00773-008-0029-y.
- Newman, J.N., (1978), “The Theory of Ship Motions”, Advances in Applied Mechanics, 18, 221–285.
- Newman, J.N., (1986), Marine Hydrodynamics, The Massachusetts Institute of Technology (MIT) Press, Cambridge, MA.
- Pedersen, P.T., (1983), “A Beam Model of Torsional-Bending Response of Ship Hulls”,

Transactions of the Royal Institution of Naval Architects 125, 171–182.

Paidoussis, M. P., (1998), *Fluid–Structure Interactions: Slender Structures and Axial Flow*, Vol. I, Academic Press, London.

Paidoussis, M. P., (2004), *Fluid–Structure Interactions: Slender Structures and Axial Flow*, Vol. II, Elsevier, The Netherlands.

Park, J.H., Temarel, P., (2007), “The influence of nonlinearities on wave-induced motions and loads predicted by two-dimensional hydroelasticity analysis”, *Proc. 10th Int. Symp. on Practical Design of Ships and Other Floating Structures PRADS*, Houston, USA, 1, 27-34

Phan, T.S., Temarel, P., (2002), “Hydroelastic responses of pontoon and semi-submersible types of very large floating structure in regular head waves”, *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 2*, 753–763.

Price, W.G., Wu, Y.S., (1985), “Structural Responses of a SWATH of Multi-Hulled Vessel Traveling in Waves”, *International Conference on SWATH Ships and Advanced Multi-hulled Vessels*. Royal Institution of Naval Architects, London.

Price, W.G., Temarel, P., (1982), “The Influence of Hull Flexibility in the Anti-Symmetric Dynamic Behaviour of Ships in Waves”, *International Shipbuilding Progress* 29.

Remy, F., Molin, B., Ledoux, A. (2006), “Experimental and numerical study of the wave response of a flexible barge”, *Proc. 4th Int. Conf. Hydroelasticity in Marine Technology*, Wuxi, China, 255-264.

Riggs, H.R., Suzuki, H., Ertekin, R.C., Kim, J.W., Iijima, K. (2008), “Comparison of Hydroelastic Computer Codes Based on the ISSC VLFS Benchmark”, *Ocean Engineering* 35:7, 589-597.

Salvesen, N., Tuck, E.O., Faltinsen, O., (1970), “Ship Motions and Sea Loads”, *Transactions of SNAME* 78, 250–287.

Senjanovic, I., Malenica, S., Tomasevic, S., (2008), “Investigation of ship hydroelasticity”, *Ocean Engineering* 35, 523-535.

Suo, Z.Q., Guo, R.X., (1996), “Hydroelasticity of rotating bodies—theory and application”, *Marine Structures* 9 (6), 631–646.

Temarel, P., (2008), “Hydroelasticity of ships: Taking stock and moving forward”, *Proc. 22nd Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures TEAM*, Istanbul, Turkey, 12-21.

Tian, C., Wu, Y.S., (2006a), “The second-order hydroelastic analysis of a SWATH ship moving in large-amplitude waves”, *Journal of Hydrodynamics* 18, 631-639.

Tian, C., Wu, Y.S., (2006b), “The non-linear hydroelastic responses of a ship travelling in waves”, *Proc. 4th Int. Conf. Hydroelasticity in Marine Technology*, Wuxi, China, 13-24.

Taghipour, R., Perez, T., Moan, T. (2008), “Hybrid frequency-time domain models for dynamic response analysis of marine structures”, *Ocean Engineering* 35, 685-705.

Timman, R., Newman, J.N., (1962), “The Coupled Damping Coefficients of a Symmetric Ship”, *Journal of Ship Research*, 5, 1-7.

Todd, F. H., (1961), *Ship Hull Vibration*, Edward Arnold Publishers Ltd., London.

- Uğurlu, B., Ergin, A., (2006), “ A Hydroelasticity Method for Vibrating Structures Containing and/or Submerged in Flowing Fluid”, *Journal of Sound and Vibration*, 290, 572-596.
- Uğurlu, B., Ergin, A., (2007), “ Ünitorm Eksenel Akım Etkisindeki Elastik Yapıların Dinamik Analizi için bir Sınır Eleman Metodu”, *İTÜ dergisi, Mühendislik*, Cilt:6, Sayı:1, 25-36
- Uğurlu, B., Ergin, A., (2008), “A Hydroelastic Investigation of Circular Cylindrical Shells Sontaining Flowing Fluid with Different End Conditions”, *Journal of Sound and Vibration*, 318, 1291-1312.
- Uğurlu, B., Kutlu, A., Ergin, A., Omurtag, M.H., (2008), “Dynamics of a Rectangular Plate Resting on an Elastic Foundation and Partially in Contact with a Quiescent Fluid”, *Journal of Sound and Vibration*, 317, 308-328.
- Vorus, W. S., (1988), *Principals of Naval Architecture, Vibration*, Ch VII, vol. II. Jersey City, NJ:SNAME
- Wang, M.L., Du, S.X., Ertekin, R.C., (1991), “Hydroelastic Response and Fatigue Analysis of a Multi-Module Very Large Floating Structure”, *International Symposium on Fatigue and Fracture in Steel and Concrete Structures*, Madras, India 1991 pp. 1277–1291.
- Wang, D.Y., (1996), “Three Dimensions Hydroelastic Analysis of Ships in Time Domain” PhD. Thesis, China Ship Scientific Research Center, Wuxi, China.
- Wang, D.Y., Wu, Y.S., (1998), “Three dimensional hydroelastic analysis in time domain with application to an elastic ship model”, *Journal of Hydrodynamics* 10 (4), 54–61.
- Wang, Z.H., Wu, W.W., Xu, M., Xi, Y.N., (1999), “Hydroelasticity Analysis of Horizontal Bend-Torsion Coupled Responses of Ships in Waves”, *Shipbuilding of China* 40 (2), 42–47.
- Wang, Z.J., Li, R.P., Shu, Z., (2001) “A study on hydroelastic response of box-type very large floating structures”, *China Ocean Engineering*, 15 (3), 345–354.
- Warburton, G. B., (1961), “Fibration of a Cylindrical Shell in an Acoustic Medium”, *J. Mech. Engr. Sci.*, 3,1, 69-79.
- Wu, Y.S., (1984), “Hydroelasticity of Floating Bodies”, PhD. Thesis, Brunel University, UK.
- Wu, Y.S., Du, S.X., (1990), “Directly Analysis Method of Marine Structures—Random Analysis Theory and its Application of Three-Dimensional Hydroelasticity”, *Ship Behavior Research*4
- Wu, Y.S., Xia, J.Z., Du, S.X., (1991b), “Two Engineering Approaches to Hydroelastic Analysis of Slender Ships Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves”, Elsevier Science Publishers, Amsterdam pp.157–165.
- Wu, Y.S., Maeda, H., Kinoshita, T. (1997), “The Second Order Hydrodynamic Actions on a Flexible Body”, *Journal of Institute of Industrial Science, University of Tokyo* 49, 8-19.
- Xia, J.Z., Wu, Y.S., (1993), “A General Form of the Interface Boundary Condition of the Fluid-Structure Interactions”, *Ship Behavior Research*4.
- Yooil K., Kyong-Hwan K., Yonghwan K. (2009), “Analysis of Hydroelasticity of Floating Shiplike Structure in Time Domain Using a Fully Coupled Hybrid BEM-FEM”, *Journal of Ship Research*, Vol. 53, No. 1, pp. 31–47.



Zhang, S.X., Yang, Y.Q., Wu, X.H., (1996), "The theoretical analysis and experimental study on ship's hydroelasticity", *Journal of Hydrodynamics* 11 (1), 65–72.

Zhong, T.Y., Zhao, D.Y., (1998), "Study of Calculation of Natural Frequency and Response of Ship Hull Vibration in Waves", *Journal of Dalian University of Technology* 38 (4), 445–449

Zhong, T.Y., Lin, Z., Zhao, D.Y., (1995), "Calculation Method of Resonant Frequency on Wave-Induced Shiphull Vibration", *Journal of Dalian University of Technology* 35 (2), 212–215.

Zienkiewicz, O. C., Irons, B. M., Nath, B., (1965), "Natural Frequencies of Complex Free or Submerged Structures by the Finite Element Method", *Proceedings of Conference on Vibrations in Civil Engineering*, Institution of Civil Engineering, London

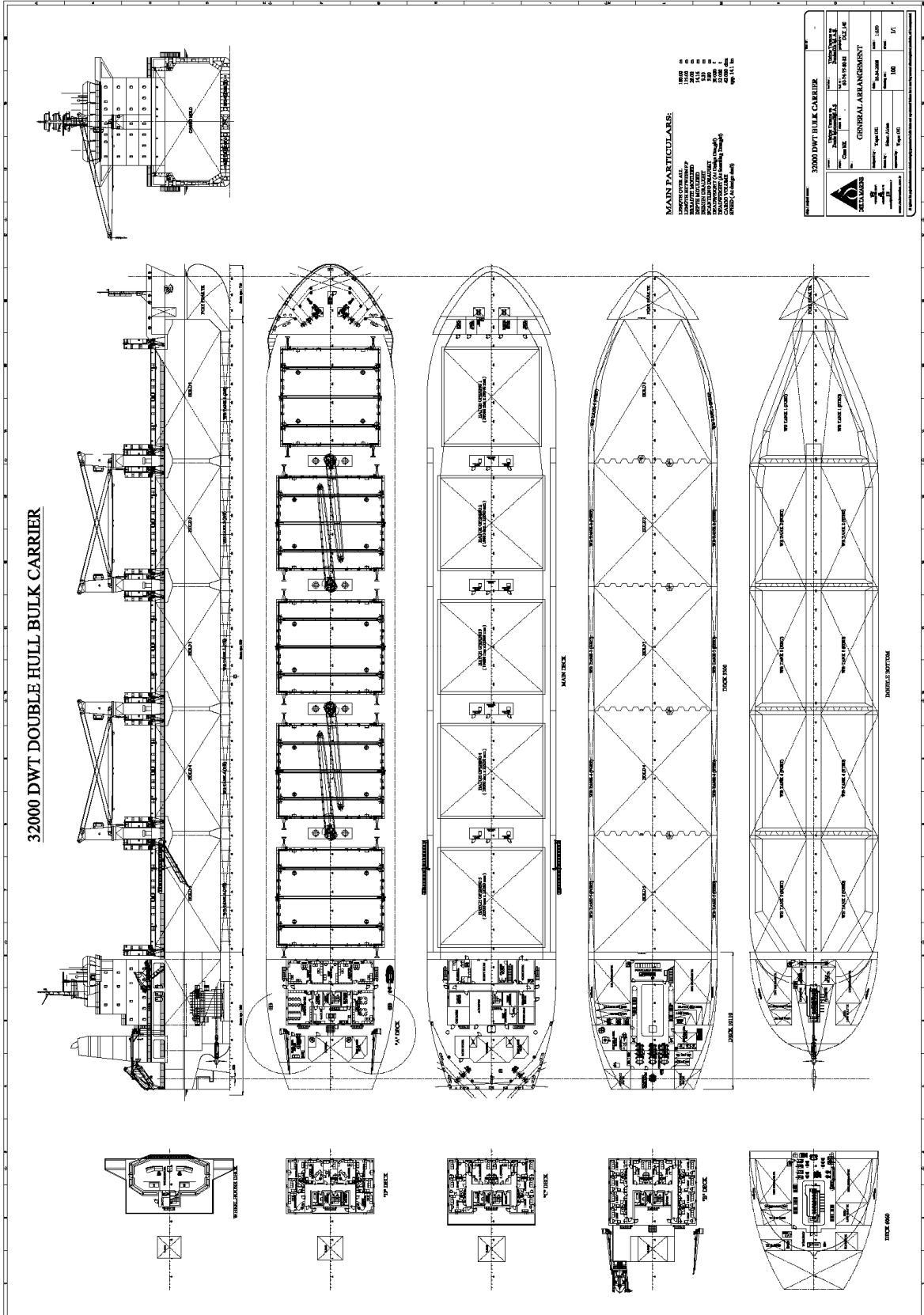
Zienkiewicz, O. C., Newton, R. E., (1969), "Coupled Vibrations of a Structure Submerged in a Compressible Fluid", *Proceedings of the Finite Element Techniques*, Stuttgart, 359-379.

**EKLER**

- Ek 1 Gemilerin genel planları  
Ek 2 Gemilerin yükleme durumları

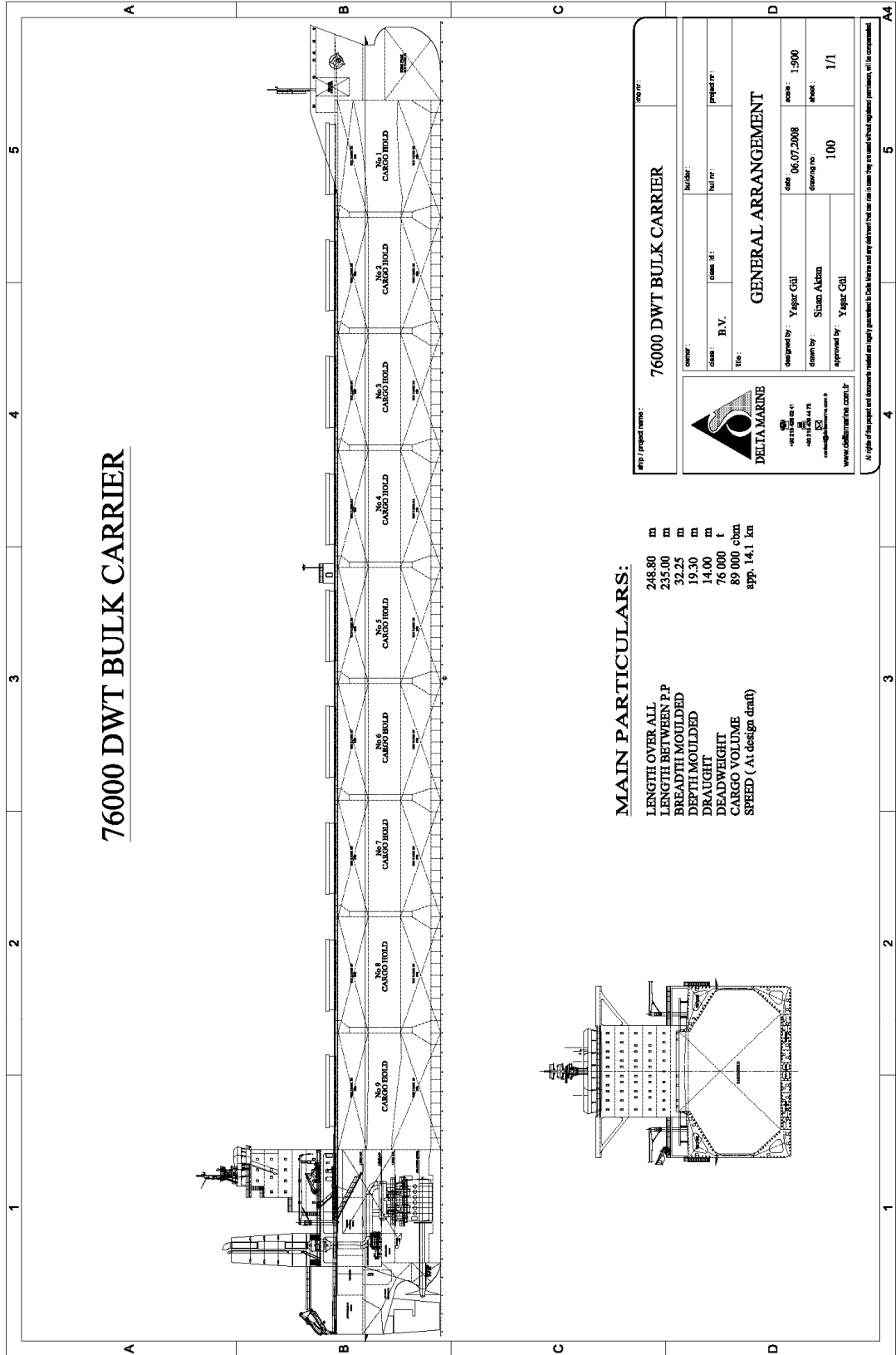




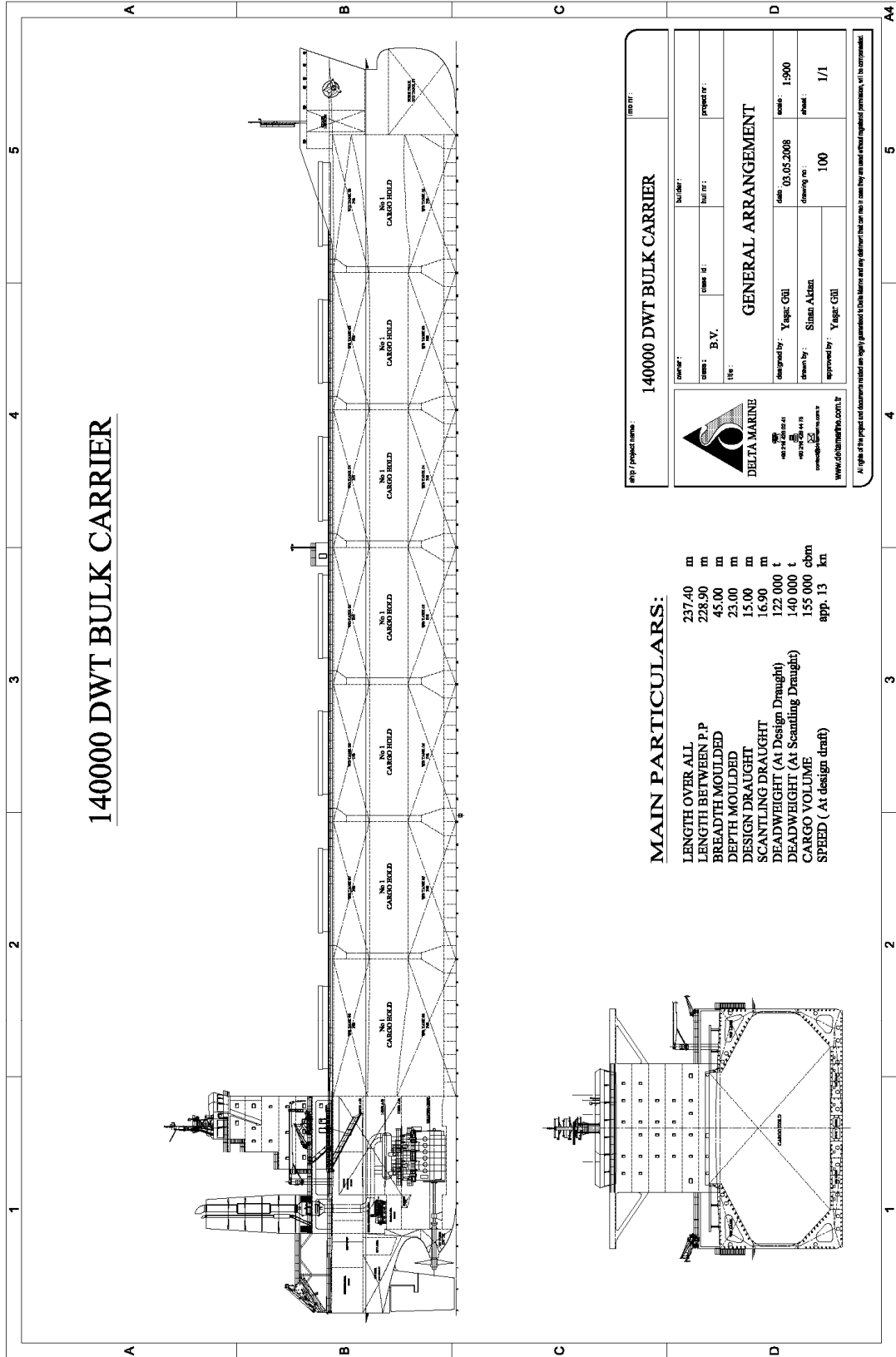


Şekil Ek 1.3 32000 DWT dökme yük gemisi genel planı





Şekil Ek 1.5 76000 DWT dökme yük gemisi genel planı



Şekil Ek 1.6 140000 DWT dökme yük gemisi genel planı





## Ek 2 Gemilerin Yükleme Durumları

Çizelge Ek 2.1 1900 TEU kapasiteli konteyner gemisi tam homojen yükleme detayları

Title	Frames	Cargo	% full	SG (t/m <sup>3</sup> )	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)
DB WB TK 12 P	51-89	WB	100	1.025	394.9	55.94	-4.9	0.91
DB WB TK 12 S	51-89	WB	100	1.025	394.9	55.94	4.9	0.91
DB WB TK 2 C	181-199	WB	100	1.025	240.4	149.81	0	2.8
DB WB TK 7 P	127-145	WB	100	1.025	181	107.34	-4.82	0.95
DB WB TK 7 S	127-145	WB	100	1.025	181	107.34	4.82	0.95
DB WB TK 9 P	89-127	WB	100	1.025	428	85.33	-5.12	0.9
DB WB TK 9 S	89-127	WB	100	1.025	428	85.33	5.12	0.9
SD WB TK 10 P	107-127	WB	50	1.025	287.7	92.21	-11.13	2.66
SD WB TK 10 S	107-127	WB	50	1.025	287.7	92.21	11.13	2.66
SD WB TK 11 P	89-107	WB	13	1.025	71.5	77.3	-10.67	0.82
SD WB TK 11 S	89-107	WB	23	1.025	126.4	77.31	10.89	1.3
<b>Total WB TKS</b>					<b>3021.5</b>	<b>86.2</b>	<b>0.2</b>	<b>1.41</b>
<b>Total FW TKS</b>					<b>206.6</b>	<b>41.81</b>	<b>-0.57</b>	<b>9.56</b>
<b>Total MDO TKS</b>					<b>164.9</b>	<b>32.97</b>	<b>6.68</b>	<b>9.76</b>
<b>Total HFO TKS</b>					<b>1886.8</b>	<b>77.64</b>	<b>-0.91</b>	<b>9.4</b>
<b>Total LO TKS</b>					<b>107.2</b>	<b>14.53</b>	<b>0.7</b>	<b>9.5</b>
<b>Total OTHER TKS</b>					<b>58.3</b>	<b>26.48</b>	<b>0.82</b>	<b>4.65</b>
Bay01					154	154.82	0	13.1
Bay01-deck					252	154.88	0	21.6
Bay03					238	148.69	0	12.26
Bay03-deck					252	148.75	0	21.6
Bay05					392	140.42	0	11.95
Bay05-deck					308	140.35	0	21.6
Bay07					448	134.28	0	11.64
Bay07-deck					308	134.22	0	21.6
Bay09					588	124.42	0	10.8
Bay09-deck					308	124.48	0	21.6
Bay11					672	118.28	0	10.13
Bay11-deck					308	118.35	0	21.6
Bay13					728	110.02	0	9.68
Bay13-deck					308	109.95	0	21.6
Bay15					728	103.88	0	9.68
Bay15-deck					308	103.82	0	21.6
Bay17					728	94.02	0	9.68
Bay17-deck					308	94.08	0	21.6
Bay19					728	87.88	0	9.68
Bay19-deck					308	87.95	0	21.6
Bay21					728	79.62	0	9.68
Bay21-deck					420	79.55	0	22.65
Bay23					728	73.48	0	9.68
Bay23-deck					462	73.42	0	22.91
Bay25					728	63.62	0	9.68
Bay25-deck					462	63.68	0	22.91
Bay27					728	57.48	0	9.68
Bay27-deck					462	57.55	0	22.91
Bay29					728	49.22	0	9.68
Bay29-deck					462	49.15	0	22.91
Bay31					672	43.08	0	10.13
Bay31-deck					462	43.02	0	22.91
Bay33					252	19.62	0	14.58
Bay33-deck					308	19.62	0	21.6
Bay35					252	13.48	0	14.58
Bay35-deck					308	13.48	0	21.6
Bay37-deck					308	6.42	0	20.9
Bay39-deck					308	0.28	0	20.9
<b>Total 14DEP-design draft</b>					<b>17150</b>	<b>83.03</b>	<b>0</b>	<b>15.06</b>
<b>Lightweight</b>					<b>9000</b>	<b>75</b>	<b>0</b>	<b>12.5</b>
<b>Deadweight</b>					<b>22595.7</b>	<b>81.79</b>	<b>0</b>	<b>12.62</b>
<b>Total Displacement</b>					<b>31595.7</b>	<b>79.85</b>	<b>0</b>	<b>12.59</b>

Çizelge Ek 2.2 1900 TEU kapasiteli konteyner gemisi balast yükleme detayları

Title	Frames	Cargo	% full	SG (t/m3)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)
<i>WB TKS</i>								
AP LW WB TK 15 C	Aug-14	WB	100	1.025	35.1	8.49	0.02	3.17
AP WB TK 16 P	-20	WB	100	1.025	411.7	3.91	-5.2	10.57
AP WB TK 16 S	-20	WB	100	1.025	414.1	3.94	5.17	10.55
CEN WB TK 5 P	161-165	WB	100	1.025	362.4	129.31	-4.7	10.15
CEN WB TK 5 S	161-165	WB	100	1.025	361	129.4	4.57	10.17
DB WB TK 12 P	51-89	WB	100	1.025	394.9	55.94	-4.9	0.91
DB WB TK 12 S	51-89	WB	100	1.025	394.9	55.94	4.9	0.91
DB WB TK 2 C	181-199	WB	100	1.025	240.4	149.81	0	2.8
DB WB TK 7 P	127-145	WB	100	1.025	181	107.34	-4.82	0.95
DB WB TK 7 S	127-145	WB	100	1.025	181	107.34	4.82	0.95
DB WB TK 9 P	89-127	WB	100	1.025	428	85.33	-5.12	0.9
DB WB TK 9 S	89-127	WB	100	1.025	428	85.33	5.12	0.9
SD WB TK 10 P	107-127	WB	100	1.025	575.3	92.38	-11.97	5.59
SD WB TK 10 S	107-127	WB	100	1.025	575.3	92.38	11.97	5.59
SD WB TK 11 P	89-107	WB	100	1.025	549.7	77.34	-11.99	5.35
SD WB TK 11 S	89-107	WB	100	1.025	549.7	77.34	11.99	5.35
SD WB TK 13 P	69-89	WB	100	1.025	592.2	62.3	-11.97	5.47
SD WB TK 13 S	69-89	WB	100	1.025	592.2	62.3	11.97	5.47
SD WB TK 14 P	51-69	WB	100	1.025	395	46.99	-10.91	5.09
SD WB TK 14 S	51-69	WB	100	1.025	395	46.99	10.91	5.09
SD WB TK 4 P	165-181	WB	100	1.025	530	136.84	-6	6.55
SD WB TK 4 S	165-181	WB	100	1.025	530	136.84	6	6.55
SD WB TK 6 P	145-165	WB	100	1.025	657.6	122.88	-8.35	5.4
SD WB TK 6 S	145-165	WB	100	1.025	657.6	122.88	8.35	5.4
SD WB TK 8 P	127-145	WB	100	1.025	409.2	107.43	-11.77	6.32
SD WB TK 8 S	127-145	WB	100	1.025	409.2	107.43	11.77	6.32
<b>Total WB TKS</b>					<b>11250.5</b>	<b>87.64</b>	<b>0</b>	<b>5.4</b>
<i>FW TKS</i>								
FW TK 1 P	53-63	FW	95	1	93.4	45.36	-12.8	9.48
FW TK 1 S	53-63	FW	95	1	93.4	45.36	12.8	9.48
FW DRAIN TK 3 P	29-35	FW	50	1	5.6	24.87	-2.54	0.78
FW DRINKING TK 2 P	0-3	FW	95	1	14.2	1.64	-7.36	14.05
<b>Total FW TKS</b>					<b>206.6</b>	<b>41.81</b>	<b>-0.57</b>	<b>9.56</b>
<i>MDO TKS</i>								
MDO SER TK 3 P	32-34	DO	95	0.85	21.7	25.35	-9	13.74
MDO SET TK 2 S	39-42	DO	95	0.85	43.6	31.37	8.89	9.2
MDO STR TK 1 S	42-49	DO	95	0.85	99.6	35.33	9.13	9.14
<b>Total MDO TKS</b>					<b>164.9</b>	<b>32.97</b>	<b>6.68</b>	<b>9.76</b>
<b>Total HFO TKS</b>					<b>1886.8</b>	<b>77.64</b>	<b>-0.91</b>	<b>9.4</b>
<b>Total LO TKS</b>					<b>107.2</b>	<b>14.53</b>	<b>0.7</b>	<b>9.5</b>
<i>OTHER TKS</i>								
BILGE TK 4 C	22-29	OTH	50	1	22.9	19.54	0	0.6
BLACK WT TK 2 S	35-39	OTH	50	1	11	28.58	8.46	7.26
GRAY WT TK 3 S	30-35	OTH	50	1	10.2	25.31	8.06	7.28
SLUDGE TK 1 P	44-51	OTH	50	1	14.2	36.89	-9.02	7.25
<b>Total OTHER TKS</b>					<b>58.3</b>	<b>26.48</b>	<b>0.82</b>	<b>4.65</b>
<i>Fixed Subset - DEP</i>								
STORES					40	85.5	0	16.1
CREW & EFF.					5	30.55	0	28
<b>Total Fixed Subset - DEP</b>					<b>45</b>	<b>79.39</b>	<b>0</b>	<b>17.42</b>
<b>Lightweight</b>					<b>9000</b>	<b>75</b>	<b>0</b>	<b>12.5</b>
<b>Deadweight</b>					<b>13719.9</b>	<b>84.06</b>	<b>-0.05</b>	<b>6.13</b>
<b>Total Displacement</b>					<b>22719.9</b>	<b>80.47</b>	<b>-0.03</b>	<b>8.65</b>

Çizelge Ek 2.3 20000 DWT dökme yük gemisi tam homojen yükleme detayları

Title	Frames	Cargo	%full	SG	Weight	LCG	TCG	VCG
				(t/m3)	(t)	(m)	(m)	(m)
HOLD								
HOLD1C	162-202	HOMDEP	100.0	0.742	4429.1	125.35	0.00	8.11
HOLD2C	119-160	HOMDEP	100.0	0.742	5141.4	96.45	0.00	7.73
HOLD3C	76-117	HOMDEP	100.0	0.742	5141.4	66.35	0.00	7.73
HOLD4C	34-74	HOMDEP	100.0	0.742	5048.3	36.49	0.00	7.78
<b>Total HOLD</b>					<b>19760.2</b>	<b>79.78</b>	<b>0.00</b>	<b>7.83</b>
HFO TK								
HFODRAINTKP	20-25	HFO	50.0	0.980	2.2	14.85	-1.87	0.73
HFOTKP	22-32	HFO	95.0	0.980	269.1	18.06	-6.96	7.69
HFOTKS	22-32	HFO	95.0	0.980	291.4	17.97	7.09	8.13
HFOSSERTK1P	22-26	HFO	95.0	0.980	11.3	15.60	-7.70	11.07
HFOSSERTK2P	22-26	HFO	95.0	0.980	10.1	15.60	-9.09	10.83
HFOSETTKP	22-26	HFO	95.0	0.980	22.5	15.60	-5.60	11.07
HFO(lowsulphur)TKP	18-32	HFO	95.0	0.980	50.8	16.30	-7.70	13.65
HFO(lowsulphur)TKS	24-32	HFO	95.0	0.980	29.1	18.40	7.70	13.65
OVERFLOWTKP	25-32	HFO	50.0	0.980	6.4	19.11	-2.25	0.56
<b>Total HFOTK</b>					<b>692.9</b>	<b>17.75</b>	<b>-0.43</b>	<b>8.68</b>
MDO TK								
MDOTKS	4-12	MDO	95.0	0.850	45.2	4.72	7.33	11.13
MDOSSERTK1P	10-12	MDO	95.0	0.850	10.5	6.59	-7.84	11.14
MDOSSERTK2P	8-10	MDO	95.0	0.850	11.0	5.40	-7.51	11.13
MDOSETTKP	4-8	MDO	95.0	0.850	23.6	3.58	-7.01	11.13
<b>Total MDOTK</b>					<b>90.3</b>	<b>4.72</b>	<b>-0.00</b>	<b>11.13</b>
LO TK								
CYLOILTKP	0-7	LO	50.0	0.900	11.1	2.10	-7.35	13.40
DGLOTKP	-1-0	LO	50.0	0.900	1.6	-0.30	-7.35	13.40
HYDOILTKP	-1-0	LO	50.0	0.900	1.1	-0.30	-9.10	13.40
LODRAINTKS	20-25	LO	50.0	0.900	2.1	14.85	1.87	0.73
DIRTYOILTKC	12-16	LO	50.0	0.900	4.6	8.76	-0.00	0.60
MELOTKP	0-7	LO	50.0	0.900	7.4	2.10	-9.10	13.40
STUF.BOXDRAINTK1P	14-15	LO	50.0	0.900	0.4	8.94	-1.23	2.24
STUF.BOXDRAINTK1P	13-14	LO	50.0	0.900	0.5	8.25	-1.04	2.27
SUMPTKC	18-28	LO	50.0	0.900	4.3	14.93	0.00	0.20
<b>Total LOTK</b>					<b>33.1</b>	<b>5.48</b>	<b>-5.07</b>	<b>8.81</b>
FW TK								
FEEDWTTKS	12-15	FW	95.0	1.000	6.6	8.27	8.36	9.19
FWTKP	-5-2	FW	95.0	1.000	55.6	-0.95	-6.90	10.99
FWTKS	-5-2	FW	95.0	1.000	67.2	-0.83	6.98	11.21
<b>Total FWTK</b>					<b>129.4</b>	<b>-0.42</b>	<b>1.08</b>	<b>11.01</b>
OTHER TK								
AIRCOOL.CLNTK1S	14-15	OTH	50.0	1.000	0.5	8.94	1.23	2.24
AIRCOOL.CLNTK2S	13-14	OTH	50.0	1.000	0.5	8.25	1.04	2.27
BILGEHOLDINGTKS	22-26	OTH	50.0	1.000	9.7	15.87	6.25	2.71
BLACKWTTKS	12-16	OTH	50.0	1.000	6.0	8.89	7.26	5.36
GREYWTTKS	16-22	OTH	50.0	1.000	19.8	12.51	7.66	4.54
<b>Title</b>	<b>Frames</b>	<b>Cargo</b>	<b>%full</b>	<b>SG</b>	<b>Weight</b>	<b>LCG</b>	<b>TCG</b>	<b>VCG</b>
				(t/m3)	(t)	(m)	(m)	(m)
OILYBILGETKS	25-32	OTH	50.0	1.000	6.6	19.11	2.25	0.56
SLUDGEHOLDINGTKP	22-26	OTH	50.0	1.000	9.7	15.87	-6.25	2.71
SLUDGETKP	12-18	OTH	50.0	1.000	4.7	9.30	-7.70	9.00
<b>Total OTHERTK</b>					<b>57.5</b>	<b>13.70</b>	<b>3.05</b>	<b>3.88</b>
STORES DEP								
STORES					20.0	7.80	0.00	16.85
<b>Total STORES DEP</b>					<b>20.0</b>	<b>7.80</b>	<b>0.00</b>	<b>16.85</b>
CREW & EFF.								
CREW&EFF.					2.5	16.30	0.00	20.90
<b>Total CREW&amp;EFF.</b>					<b>2.5</b>	<b>16.30</b>	<b>0.00</b>	<b>20.90</b>
<b>Lightweight</b>					<b>6506.5</b>	<b>64.73</b>	<b>-0.06</b>	<b>9.81</b>
<b>Deadweight</b>					<b>20785.8</b>	<b>76.51</b>	<b>-0.01-</b>	<b>7.89</b>
<b>Total Discement</b>					<b>27292.3</b>	<b>73.70</b>	<b>-0.02</b>	<b>8.35</b>

Çizelge Ek 2.4 20000 DWT dökme yük gemisi balast yükleme detayları

Title	Frames	Cargo	%full	SG (t/m3)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)
DBWBTK1P	159-202	WB	100.0	1.025	330.0	122.72	-3.76	0.82
DBWBTK1S	159-202	WB	100.0	1.025	330.0	122.72	3.76	0.82
DBWBTK2P	116-159	WB	100.0	1.025	384.1	95.05	-5.25	0.81
DBWBTK2S	116-159	WB	100.0	1.025	384.1	95.05	5.25	0.81
DBWBTK3P	73-116	WB	100.0	1.025	384.1	64.95	-5.25	0.81
DBWBTK3S	73-116	WB	100.0	1.025	384.1	64.95	5.25	0.81
DBWBTK4P	34-73	WB	100.0	1.025	312.5	37.48	-5.02	0.83
DBWBTK4S	34-73	WB	100.0	1.025	312.5	37.48	5.02	0.83
FPTKC	209-226	WB	100.0	1.025	563.3	147.83	-0.00	7.54
SDWBTK1P	159-202	WB	100.0	1.025	662.4	122.93	-8.16	4.65
SDWBTK1S	159-202	WB	100.0	1.025	673.2	122.72	8.04	4.67
SDWBTK2P	116-160	WB	100.0	1.025	572.0	91.46	-9.14	4.49
SDWBTK2S	116-160	WB	100.0	1.025	572.0	91.45	9.14	4.49
SDWBTK3P	73-117	WB	100.0	1.025	571.9	61.36	-9.14	4.49
SDWBTK3S	73-117	WB	100.0	1.025	572.0	61.35	9.14	4.49
SDWBTK4P	34-74	WB	100.0	1.025	401.3	35.72	-10.44	4.04
SDWBTK4S	34-74	WB	100.0	1.025	401.3	35.72	10.44	4.04
<b>Total WBTK</b>					<b>7810.8</b>	<b>86.82</b>	<b>0.00</b>	<b>3.37</b>
HFO TK								
HFODRAINTKP	20-25	HFO	50.0	0.980	2.2	14.85	-1.87	0.73
HFOTKP	22-32	HFO	95.0	0.980	269.1	18.06	-6.96	7.69
HFOTKS	22-32	HFO	95.0	0.980	291.4	17.97	7.09	8.13
HFOSSERTK1P	22-26	HFO	95.0	0.980	11.3	15.60	-7.70	11.07
HFOSSERTK2P	22-26	HFO	95.0	0.980	10.1	15.60	-9.09	10.83
HFOSETTKP	22-26	HFO	95.0	0.980	22.5	15.60	-5.60	11.07
HFO(lowsulphur)TKP	18-32	HFO	95.0	0.980	50.8	16.30	-7.70	13.65
HFO(lowsulphur)TKS	24-32	HFO	95.0	0.980	29.1	18.40	7.70	13.65
OVERFLOWTKP	25-32	HFO	50.0	0.980	6.4	19.11	-2.25	0.56
<b>Total HFOTK</b>					<b>692.9</b>	<b>17.75</b>	<b>-0.43</b>	<b>8.68</b>
MDO TK								
MDOTKS	4-12	MDO	95.0	0.850	45.2	4.72	7.33	11.13
MDOSSERTK1P	10-12	MDO	95.0	0.850	10.5	6.59	-7.84	11.14
MDOSSERTK2P	8-10	MDO	95.0	0.850	11.0	5.40	-7.51	11.13
MDOSETTKP	4-8	MDO	95.0	0.850	23.6	3.58	-7.01	11.13
<b>Total MDOTK</b>					<b>90.3</b>	<b>4.72</b>	<b>-0.00</b>	<b>11.13</b>
LO TK								
CYLOILTKP	0-7	LO	50.0	0.900	11.1	2.10	-7.35	13.40
DGLOTKP	-1-0	LO	50.0	0.900	1.6	-0.30	-7.35	13.40
HYDOILTKP	-1-0	LO	50.0	0.900	1.1	-0.30	-9.10	13.40
LODRAINTKS	20-25	LO	50.0	0.900	2.1	14.85	1.87	0.73
DIRTYOILTKC	12-16	LO	50.0	0.900	4.6	8.76	-0.00	0.60
MELOTKP	0-7	LO	50.0	0.900	7.4	2.10	-9.10	13.40
STUF.BOXDRAINTK1P	14-15	LO	50.0	0.900	0.4	8.94	-1.23	2.24
STUF.BOXDRAINTK1P	13-14	LO	50.0	0.900	0.5	8.25	-1.04	2.27
SUMPTKC	18-28	LO	50.0	0.900	4.3	14.93	0.00	0.20
Total LOTK					33.1	5.48	-5.07	8.81
FW TK								
FEEDWTTKS	12-15	FW	95.0	1.000	6.6	8.27	8.36	9.19
FWTKP	-5-2	FW	95.0	1.000	55.6	-0.95	-6.90	10.99
FWTKS	-5-2	FW	95.0	1.000	67.2	-0.83	6.98	11.21
<b>Total FWTK</b>					<b>129.4</b>	<b>-0.42</b>	<b>1.08</b>	<b>11.01</b>
OTHER TK								
<b>Total OTHERTK</b>					<b>57.5</b>	<b>13.70</b>	<b>3.05</b>	<b>3.88</b>
STORES DEP								
STORES					20.0	7.80	0.00	16.85
Total STORES DEP					20.0	7.80	0.00	16.85
CREW & EFF.								
CREW&EFF.					2.5	16.30	0.00	20.90
Total CREW&EFF.					2.5	16.30	0.00	20.90
<b>Lightweight</b>					<b>6506.5</b>	<b>64.73</b>	<b>-0.06</b>	<b>9.81</b>
<b>Deadweight</b>					<b>8836.4</b>	<b>78.31</b>	<b>-0.02</b>	<b>4.03</b>
<b>Total Displacement</b>					<b>15342.9</b>	<b>72.55</b>	<b>-0.03</b>	<b>6.48</b>

Çizelge Ek 2.5 32000 DWT dökme yük gemisi tam homojen yükleme detayları

Title	Frames	Cargo	% full	SG (t/m3)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)
<b>CARGO HOLDS</b>								
HOLD 1 C	164-202	HOM	100.0	0.707	5397.4	147.95	-0.00	8.79
HOLD 2 C	131-165	HOM	100.0	0.707	6185.5	120.72	0.00	8.76
HOLD 3 C	98-132	HOM	100.0	0.707	6188.6	93.67	0.00	8.76
HOLD 4 C	65-99	HOM	100.0	0.707	6188.6	66.61	0.00	8.76
HOLD 5 C	31-66	HOM	100.0	0.707	6509.7	38.87	-0.00	8.77
<b>Total CARGO HOLDS</b>					<b>30469.8</b>	<b>91.57</b>	<b>-0.00</b>	<b>8.76</b>
<b>HFO TANKS</b>								
HFO TK P	14-31	HFO	95.0	0.980	724.2	18.29	-7.93	9.71
HFO TK S	14-31	HFO	95.0	0.980	724.2	18.29	7.93	9.71
<b>Total HFO TANKS</b>					<b>1448.4</b>	<b>18.29</b>	<b>0.00</b>	<b>9.71</b>
<i>Added HFO &amp; DO &amp; FW</i>								
<i>Dep</i>								
<i>Added HFO &amp; DO &amp; FW</i>								
<i>Dep</i>								
<b>Total Added HFO &amp; DO &amp; FW</b>					<b>600.0</b>	<b>7.00</b>	<b>0.00</b>	<b>11.00</b>
<i>Dep</i>								
<b>Total Added HFO &amp; DO &amp; FW</b>					<b>600.0</b>	<b>7.00</b>	<b>0.00</b>	<b>11.00</b>
<b>Lightweight</b>					<b>9300.0</b>	<b>77.20</b>	<b>0.00</b>	<b>10.30</b>
<b>Deadweight</b>					<b>32518.1</b>	<b>86.75</b>	<b>-0.00</b>	<b>8.85</b>
<b>Total Displacement</b>					<b>41818.1</b>	<b>84.62</b>	<b>0.00</b>	<b>9.17</b>

Çizelge Ek 2.6 32000 DWT dökme yük gemisi balast yükleme detayları

Title	Frames	Cargo	% full	SG (t/m3)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)
<b>WB TANKS</b>								
AP TK C	-3-10	WB	100.0	1.025	562.4	4.17	0.00	8.14
FP TK C	202-220	WB	100.0	1.025	1158.7	169.22	-0.00	8.28
WB TK 1 P	163-202	WB	100.0	1.025	1056.1	147.38	-7.67	3.58
WB TK 1 S	163-202	WB	100.0	1.025	1056.1	147.38	7.67	3.58
WB TK 2 P	130-163	WB	100.0	1.025	1159.9	119.50	-10.02	3.71
WB TK 2 S	130-163	WB	100.0	1.025	1159.9	119.50	10.02	3.71
WB TK 3 P	97-130	WB	100.0	1.025	1161.3	92.45	-10.02	3.70
WB TK 3 S	97-130	WB	100.0	1.025	1161.3	92.45	10.02	3.70
WB TK 4 P	64-97	WB	100.0	1.025	1161.3	65.39	-10.02	3.70
WB TK 4 S	64-97	WB	100.0	1.025	1161.3	65.39	10.02	3.70
<b>Total WB TANKS</b>					<b>10798.3</b>	<b>106.82</b>	<b>-0.00</b>	<b>4.40</b>
<b>HFO TANKS</b>								
HFO TK P	14-31	HFO	95.0	0.980	724.2	18.29	-7.93	9.71
HFO TK S	14-31	HFO	95.0	0.980	724.2	18.29	7.93	9.71
<b>Total HFO TANKS</b>					<b>1448.4</b>	<b>18.29</b>	<b>0.00</b>	<b>9.71</b>
<i>Dep</i>								
<i>Added HFO &amp; DO &amp; FW</i>								
<i>Dep</i>								
<b>Total Added HFO &amp; DO &amp; FW</b>					<b>600.0</b>	<b>7.00</b>	<b>0.00</b>	<b>11.00</b>
<i>Dep</i>								
<b>Total Added HFO &amp; DO &amp; FW</b>					<b>600.0</b>	<b>7.00</b>	<b>0.00</b>	<b>11.00</b>
<b>Lightweight</b>					<b>9300.0</b>	<b>77.20</b>	<b>0.00</b>	<b>10.30</b>
<b>Deadweight</b>					<b>12846.5</b>	<b>92.18</b>	<b>-0.00</b>	<b>5.31</b>
<b>Total Displacement</b>					<b>22146.5</b>	<b>85.89</b>	<b>-0.00</b>	<b>7.41</b>

Çizelge Ek 2.7 53000 DWT dökme yük gemisi tam homojen yükleme detayları

Title	Cargo	% full	SG (t/m3)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)
<b>CARGO HOLDS</b>							
HOLD 1 C	HOM	100.0	0.707	8938.1	152.9	-0.00	10.86
HOLD 2 C	HOM	100.0	0.707	10242.4	124.39	0.00	10.82
HOLD 3 C	HOM	100.0	0.707	10248.3	96.07	0.00	10.82
HOLD 4 C	HOM	100.0	0.707	10248.3	67.75	0.00	10.82
HOLD 5 C	HOM	100.0	0.707	10780.1	38.69	-0.00	10.86
<b>Total CARGO HOLDS</b>				50457.2	93.85	-0.00	10.86
<b>HFO TANKS</b>							
HFO TK P	HFO	95.0	0.980	934.7	19.15	-9.13	12.01
HFO TK S	HFO	95.0	0.980	934.7	19.15	9.13	12.01
<b>Total HFO TANKS</b>				1869.4	19.15	0.00	12.01
<i>Added HFO &amp; DO &amp; FW</i>							
<i>Dep</i>							
<i>Added HFO &amp; DO &amp; FW</i>							
<i>Dep</i>							
<b>Total Added HFO &amp; DO</b>				600.0	7.5	0.00	13.59
<b>&amp; FW Dep</b>							
<b>Lightweight</b>				12405	80.28	0.00	12.72
<b>Deadweight</b>				52926.6	90.21	-0.00	10.93
<b>Total Displacement</b>				65331.6	88.32	0.00	11.27

Çizelge Ek 2.8 53000 DWT dökme yük gemisi balast yükleme detayları

Title	Cargo	% full	SG (t/m3)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)
<b>WB TANKS</b>							
AP TK C	WB	100.0	1.025	1854.3	4.5	0.00	10.05
FP TK C	WB	100.0	1.025	1919.3	177.1	-0.00	10.23
WB TK 1 P	WB	100.0	1.025	1748.9	154.1	-8.8	4.424
WB TK 1 S	WB	100.0	1.025	1748.9	154.1	8.8	4.424
WB TK 2 P	WB	100.0	1.025	1920.9	125.1	-12.4	4.58
WB TK 2 S	WB	100.0	1.025	1920.9	125.1	12.4	4.58
WB TK 3 P	WB	100.0	1.025	1923.4	96.8	-12.4	4.57
WB TK 3 S	WB	100.0	1.025	1923.4	96.8	12.4	4.57
WB TK 4 P	WB	100.0	1.025	1923.4	68.4	-12.4	4.57
WB TK 4 S	WB	100.0	1.025	1923.4	68.4	12.4	4.57
<b>Total WB TANKS</b>				18806.8	106.31	-0.00	5.62
<b>HFO TANKS</b>							
HFO TK P	HFO	95.0	0.980	934.7	19.15	-9.13	12.01
HFO TK S	HFO	95.0	0.980	934.7	19.15	9.13	12.01
<b>Total HFO TANKS</b>				1869.4	19.15	0.00	12.01
<i>Dep</i>							
<i>Added HFO &amp; DO &amp; FW</i>							
<i>Dep</i>							
<b>Total Added HFO &amp; DO</b>				600.0	7.5	0.00	13.59
<b>Lightweight</b>				12405	80.28	0.00	12.72
<b>Deadweight</b>				21276.2	95.85	-0.00	6.406
<b>Total Displacement</b>				33681.2	90.11	-0.00	8.828

Çizelge Ek 2.9 76000 DWT dökme yük gemisi tam homojen yükleme detayları

COMPARTMENTS			SG(T/M3)	FILL%	WEIGHT(T)	VCG(M)	LCG(M)	TCG(M)	FS/HM(TM)
NO:1	HOLD	C	1.253	100	7394.9	11.135	209.441	0	0
NO:2	HOLD	C	1.253	100	7764.3	11.052	189.948	0	0
NO:3	HOLD	C	1.253	100	7846.3	11.01	170.25	0	0
NO:4	HOLD	C	1.253	100	8558.2	10.975	149.55	0	0
NO:5	HOLD	C	1.253	100	7846.2	11.01	128.85	0	0
NO:6	HOLD	C	1.253	100	8558.2	10.975	108.15	0	0
NO:7	HOLD	C	1.253	100	7846.2	11.01	87.45	0	0
NO:8	HOLD	C	1.253	100	7849.5	11.012	67.654	0	0
NO:9	HOLD	C	1.253	100	7314.5	11.225	48.221	0	0
TOTAL CARGO :									
			70978.1	11.042	128.853	0	0		
FORE	PEAK	C	1.025	0	0	0	228.468	0	0
NO:2	DB	WB	1.025	0	0	0	208.063	-5.167	208.063
NO:2	DB	WB	1.025	0	0	0	208.477	5.113	208.477
NO:3	DB	WB	1.025	0	0	0	180.17	-7.375	180.17
NO:3	DB	WB	1.025	0	0	0	180.17	7.375	180.17
NO:4	DB	WB	1.025	0	0	0	140.189	-7.587	140.189
NO:4	DB	WB	1.025	0	0	0	140.219	7.578	140.219
NO:5	DB	WB	1.025	0	0	0	99.093	-7.558	99.093
NO:5	DB	WB	1.025	0	0	0	99.09	7.548	99.09
NO:6	DB	WB	1.025	0	0	0	72.292	-11.729	72.292
NO:6	DB	WB	1.025	0	0	0	72.292	11.729	72.292
NO:8	TS	WB	1.025	0	0	14.4	202.043	-16.037	202.043
NO:8	TS	WB	1.025	0	0	14.4	202.043	16.037	202.043
NO:9	TS	WB	1.025	0	0	14.4	179.882	-16.063	179.882
NO:9	TS	WB	1.025	0	0	14.4	179.882	16.063	179.882
NO:10	TS	WB	1.025	0	0	14.4	139.2	-16.063	139.2
NO:10	TS	WB	1.025	0	0	14.4	139.2	16.063	139.2
NO:11	TS	WB	1.025	0	0	14.4	97.8	-16.063	97.8
NO:11	TS	WB	1.025	0	0	14.4	97.8	16.063	97.8
NO:12	TS	WB	1.025	0	0	14.4	60.963	-16.059	60.963
NO:12	TS	WB	1.025	0	0	14.4	60.963	16.059	60.963
AFT	PEAK	C	1.025	0	0	8.3	7.443	0	0
NO:3	HOLD	C	1.025	0	0	1.96	170.25	0	0
NO:7	HOLD	C	1.025	0	0	1.96	87.45	0	0
TOTAL BALLAST :									
				0	0	0	0	0	
NO:13	DO	TK	0.86	96	300.3	1.469	30.676	0.146	2815.4
NO:34	DO	SET	0.86	96	30.8	14.629	8.717	-7.481	47.7
NO:38	DO	SER	0.86	96	29.2	17.645	8.708	-8.673	91.6
TOTAL DIESEL OIL :									
				360.3	3.907	27.016	-1.222	2954.6	
NO:1	HFO	TK	0.99	96	978.4	11.216	222.432	-5.725	1105.5
NO:1	HFO	TK	0.99	96	980	11.216	222.432	5.725	1105.5
NO:7	HFO	TK	0.99	96	639.8	0.945	59.92	-5.612	2491.9
NO:7	HFO	TK	0.99	96	641.3	0.945	59.913	5.602	2509.8
NO:27	HFO	TK	0.99	96	449.2	15.719	29.691	13.087	188.2
NO:28	HFO	SER	0.99	96	67.3	15.648	19.5	-7.75	37.1
NO:29	HFO	SET	0.99	96	67.4	15.648	16.8	-6.16	9
NO:30	HFO	SET	0.99	96	66.3	15.648	16.8	-9.31	9.6
NO:35	HFO	TK	0.99	96	202.8	17.243	24.7	-13.077	152.7
TOTAL FUEL OIL :									
					4092.4	9.011	130.547	0.412	7609.5
TOTAL LUB OIL :									
					61.6	13.197	12.438	7.508	94.5
TOTAL FRESH WATER :									
					350	14.169	8.848	5.28	846.2
TOTAL OTHER :									
					169	9.671	25.645	0.646	250.3
DEADWEIGHT									
					76011.4	10.912	127.585	0.048	11755
LIGHT	SHIP				15583	13.14	105.4	-0.053	
DISPLACEMENT									
					91594.4	11.291	123.811	0.031	11755



Çizelge Ek 2.10 76000 DWT dökme yük gemisi balast yükleme detayları

COMPARTMENTS			SG(T/M3)	FILL%	WEIGHT(T)	VCG(M)	LCG(M)	TCG(M)	FS/HM(TM)
NO:1	HOLD	C	1.00	0	0	11.135	209.441	0	0
NO:2	HOLD	C	1.00	0	0	11.052	189.948	0	0
NO:3	HOLD	C	1.00	0	0	11.01	170.25	0	0
NO:4	HOLD	C	1.00	0	0	10.975	149.55	0	0
NO:5	HOLD	C	1.00	0	0	11.01	128.85	0	0
NO:6	HOLD	C	1.00	0	0	10.975	108.15	0	0
NO:7	HOLD	C	1.00	0	0	11.01	87.45	0	0
NO:8	HOLD	C	1.00	0	0	11.012	67.654	0	0
NO:9	HOLD	C	1.00	0	0	11.225	48.221	0	0
TOTAL	CARGO	:		0	0	0	0		
FORE	PEAK	C	1.025	100	2373	10.485	230.049	0	0
NO:2	DB	WB	1.025	100	522.3	1.779	208.683	-8.201	0
NO:2	DB	WB	1.025	100	532.5	1.768	208.895	8.129	0
NO:3	DB	WB	1.025	100	1615.1	1.89	180.302	-10.189	0
NO:3	DB	WB	1.025	100	1615.1	1.89	180.302	10.189	0
NO:4	DB	WB	1.025	100	1743.2	1.882	140.154	-10.28	0
NO:4	DB	WB	1.025	100	1744.8	1.881	140.173	10.272	0
NO:5	DB	WB	1.025	100	1731.3	1.887	98.893	-10.295	0
NO:5	DB	WB	1.025	100	1732.9	1.886	98.892	10.287	0
NO:6	DB	WB	1.025	100	545.7	2.928	61.98	-12.896	0
NO:6	DB	WB	1.025	100	545.7	2.928	61.98	12.896	0
NO:8	TS	WB	1.025	100	376.1	18.01	208.938	-12.631	0
NO:8	TS	WB	1.025	100	376.1	18.01	208.938	12.631	0
NO:9	TS	WB	1.025	100	922.6	17.862	180.009	-13.054	0
NO:9	TS	WB	1.025	100	922.6	17.862	180.009	13.054	0
NO:10	TS	WB	1.025	100	947.4	17.86	139.2	-13.065	0
NO:10	TS	WB	1.025	100	947.4	17.86	139.2	13.065	0
NO:11	TS	WB	1.025	100	947.4	17.86	97.8	-13.065	0
NO:11	TS	WB	1.025	100	947.4	17.86	97.8	13.065	0
NO:12	TS	WB	1.025	100	883.8	17.865	57.784	-13.058	0
NO:12	TS	WB	1.025	100	883.8	17.865	57.784	13.058	0
AFT	PEAK	C	1.025	100	366.2	12.587	3.204	0	0
NO:3	HOLD	C	1.025	0	0	1.96	170.25	0	0
NO:7	HOLD	C	1.025	0	0	1.96	87.45	0	0
TOTAL	BALLAST	:			23222.3	8.592	141.646	0.002	0
NO:13	DO	TK	0.86	96	300.3	1.469	30.676	0.146	2815.4
NO:34	DO	SET	0.86	96	30.8	14.629	8.717	-7.481	47.7
NO:38	DO	SER	0.86	96	29.2	17.645	8.708	-8.673	91.6
TOTAL	DIESEL	OIL	:	360.3	3.907	27.016	-1.222	2954.6	
NO:1	HFO	TK	0.99	96	978.4	11.216	222.432	-5.725	1105.5
NO:1	HFO	TK	0.99	96	980	11.216	222.432	5.725	1105.5
NO:7	HFO	TK	0.99	96	639.8	0.945	59.92	-5.612	2491.9
NO:7	HFO	TK	0.99	96	641.3	0.945	59.913	5.602	2509.8
NO:27	HFO	TK	0.99	96	449.2	15.719	29.691	13.087	188.2
NO:28	HFO	SER	0.99	96	67.3	15.648	19.5	-7.75	37.1
NO:29	HFO	SET	0.99	96	67.4	15.648	16.8	-6.16	9
NO:30	HFO	SET	0.99	96	66.3	15.648	16.8	-9.31	9.6
NO:35	HFO	TK	0.99	96	202.8	17.243	24.7	-13.077	152.7
TOTAL	FUEL	OIL	:		4092.4	9.011	130.547	0.412	7609.5
TOTAL	LUB	OIL	:		61.6	13.197	12.438	7.508	94.5
TOTAL	FRESH	WATER	:		350	14.169	8.848	5.28	846.2
TOTAL	OTHER	:			169	9.671	25.645	0.646	250.3
DEADWEIGHT					28255.6	8.679	135.956	0.131	11755
LIGHT	SHIP				15583	13.14	105.4	-0.053	
DISPLACEMENT					43838.6	10.264	125.095	0.066	11755

Çizelge Ek 2.11 140000 DWT dökme yük gemisi tam homojen yükleme detayları

Title	Cargo	% full	SG (t/m3)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)
HOLD 1 C	HOM	100.0	0.886	16950	203.10	0.00	13.50
HOLD 2 C	HOM	100.0	0.886	19810	179.10	0.00	12.90
HOLD 3 C	HOM	100.0	0.886	19810	152.60	0.00	12.90
HOLD 4 C	HOM	100.0	0.886	19810	126.50	0.00	12.90
HOLD 5 C	HOM	100.0	0.886	19810	100.50	0.00	12.90
HOLD 6 C	HOM	100.0	0.886	19790	75.50	0.00	12.90
HOLD 7 C	HOM	100.0	0.886	18720	49.10	0.00	13.60
<b>Total HOLDS</b>				134700	125.17	0.00	13.07
<b>Total HFO TANKS</b>				3927	25.40	-0.50	16.90
<b>Total MDO TANKS</b>				255	24.80	-8.50	13.25
<b>Total LO TANKS</b>				90	13.50	0.00	12.50
<b>Total FW TANKS</b>				610	0.00	0.00	21.10
<b>Total OTHER TANKS</b>				220	15.40	4.50	8.70
<b>Total DEPARTURE ST</b>				80	120.50	0.00	23.10
<b>Total CREW &amp; EFFECT</b>				10	17.00	0.00	32.25
<b>Lightweight</b>				19500	107.50	0.00	13.10
<b>Deadweight</b>				139892	121.38	0.00	13.21
<b>Total Displacement</b>				159392	119.68	0.00	13.19

Çizelge Ek 2.12 140000 DWT dökme yük gemisi balast yükleme detayları

Title	Cargo	% full	SG (t/m3)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)
FP WB TK 1 C	WB	100.0	1.025	2850	222.50	0.00	7.50
WB TK 8 P	WB	100.0	1.025	2800	49.00	-15.00	11.70
WB TK 8 S	WB	100.0	1.025	2800	49.00	15.00	11.70
WB TK 2 P	WB	100.0	1.025	2780	203.10	-13.50	9.90
WB TK 2 S	WB	100.0	1.025	2780	203.10	13.50	9.90
WB TK 3 P	WB	100.0	1.025	3250	177.50	-16.20	9.60
WB TK 3 S	WB	100.0	1.025	3250	177.50	16.20	9.60
WB TK 4 P	WB	100.0	1.025	3290	151.50	-16.20	9.50
WB TK 4 S	WB	100.0	1.025	3290	151.50	16.20	9.50
WB TK 5 P	WB	100.0	1.025	3290	126.50	-16.20	9.50
WB TK 5 S	WB	100.0	1.025	3290	126.50	16.20	9.50
WB TK 6 P	WB	100.0	1.025	3280	100.00	-16.20	9.50
WB TK 6 S	WB	100.0	1.025	3280	100.00	16.20	9.50
WB TK 7 P	WB	100.0	1.025	3050	74.50	-15.50	10.50
WB TK 7 S	WB	100.0	1.025	3050	74.50	15.50	10.50
<b>Total WB TANKS</b>				46360	132.25	0.00	9.83
<b>Total HFO TANKS</b>				3927	25.40	-0.50	16.90
<b>Total MDO TANKS</b>				255	24.80	-8.50	13.25
<b>Total LO TANKS</b>				90	13.50	0.00	12.50
<b>Total FW TANKS</b>				610	0.00	0.00	21.10
<b>Total OTHER TANKS</b>				220	15.40	4.50	8.70
<b>Total DEPARTURE ST</b>				80	120.50	0.00	23.10
<b>Total CREW &amp; EFFECT</b>				10	17.00	0.00	32.25
<b>Lightweight</b>				19500	107.50	0.00	13.10
<b>Deadweight</b>				51552	121.26	0.00	10.54
<b>Total Displacement</b>				71052	117.48	0.00	11.24

Çizelge Ek 2.13 180000 DWT dökme yük gemisi tam homojen yükleme detayları

Title	Frames	Cargo	% full	SG (t/m3)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)
HOLD 1 C	285-315	HOM	100.0	0.886	16948.2	254.87	-0.00	14.43
HOLD 2 C	255-286	HOM	100.0	0.886	19763.9	230.06	0.00	13.82
HOLD 3 C	225-256	HOM	100.0	0.886	19795.9	204.28	0.00	13.82
HOLD 4 C	195-226	HOM	100.0	0.886	19795.9	178.48	0.00	13.82
HOLD 5 C	165-196	HOM	100.0	0.886	19795.9	152.68	0.00	13.82
HOLD 6 C	135-166	HOM	100.0	0.886	19766.9	126.86	0.00	13.82
HOLD 7 C	105-136	HOM	100.0	0.886	19795.9	101.08	0.00	13.82
HOLD 8 C	75-106	HOM	100.0	0.886	19791.0	75.28	0.00	13.83
HOLD 9 C	45-76	HOM	100.0	0.886	18686.6	49.48	0.00	14.51
<b>Total HOLDS</b>					<b>174140.2</b>	<b>151.54</b>	<b>0.00</b>	<b>13.96</b>
HFO STR TK 1 P	26-45	HFO	95.0	0.980	1274.6	29.09	-14.97	17.90
HFO STR TK 1 S	26-45	HFO	95.0	0.980	1639.4	28.91	14.09	18.48
HFO DRAIN TK 8 P	24-31	HFO	50.0	0.980	7.5	22.71	-3.11	1.40
HFO (LS) STR TK 2 P	17-26	HFO	95.0	0.980	428.2	17.54	-13.40	18.33
HFO (LS) STR TK 2 S	17-26	HFO	95.0	0.980	533.1	17.81	12.63	18.84
HFO SER TK 5 S	23-26	HFO	95.0	0.980	31.9	19.60	7.60	13.86
HFO (LS) SER TK 6 S	20-23	HFO	95.0	0.980	30.1	17.22	7.57	14.03
HFO (LS) SET TK 4 S	30-34	HFO	95.0	0.980	74.5	25.60	10.40	14.73
HFO OVERFLOW TK 7	14-22	HFO	50.0	0.980	26.0	15.07	0.00	1.14
HFO SET TK 3 S	34-40	HFO	95.0	0.980	93.1	29.60	10.56	14.73
<b>Total HFO TANKS</b>					<b>4138.4</b>	<b>26.06</b>	<b>1.74</b>	<b>17.97</b>
MDO STR TK 1 P	32-40	MDO	95.0	0.850	147.1	28.80	-10.80	14.40
MDO SER TK 3 P	23-26	MDO	95.0	0.850	27.7	19.60	-7.60	13.86
MDO SER TK 4 P	20-23	MDO	95.0	0.850	26.1	17.22	-7.57	14.03
MDO SET TK 2 P	30-32	MDO	95.0	0.850	36.7	24.80	-10.80	14.40
<b>Total MDO TANKS</b>					<b>237.6</b>	<b>25.84</b>	<b>-10.07</b>	<b>14.30</b>
DG OIL TK 4 S	10-13	LO	50.0	0.900	4.5	9.20	6.80	20.15
HYD OIL TK 3 S	10-13	LO	50.0	0.900	4.5	9.20	6.00	20.15
LO DRAIN TK 8 S	24-31	LO	50.0	0.900	6.9	22.71	3.11	1.40
LO OVERFLOW TK 7 S	31-35	LO	50.0	0.900	8.1	26.53	3.48	1.16
ME CYL OIL TK 5 P	10-13	LO	50.0	0.900	13.4	9.20	-5.20	20.15
ME CYL OIL TK 6 P	10-13	LO	50.0	0.900	13.4	9.20	-7.60	20.15
ME SYS OIL TK 1 S	10-13	LO	50.0	0.900	8.9	9.20	3.20	20.15
ME SYS OIL TK 2 S	10-13	LO	50.0	0.900	8.9	9.20	4.80	20.15
SUMP TK 9 C	23-34	LO	50.0	0.900	14.8	22.80	0.00	1.06
<b>Total LO TANKS</b>					<b>83.4</b>	<b>14.41</b>	<b>0.08</b>	<b>13.37</b>
FW TK 1 P	-6-5	FW	95.0	1.000	298.2	0.09	-11.77	22.13
FW TK 1 S	-6-5	FW	95.0	1.000	298.2	0.09	11.77	22.13
<b>Total FW TANKS</b>					<b>596.4</b>	<b>0.09</b>	<b>-0.00</b>	<b>22.13</b>
<i>OTHER TANKS</i>								
BLACK WATER TK 6 S	15-17	OTH	50.0	1.000	25.7	12.81	12.03	15.71
BILGE TK 2 P	35-43	OTH	50.0	1.000	22.9	31.51	-3.82	0.96
GRAY WATER TK 7 S	13-15	OTH	50.0	1.000	23.4	11.22	11.70	15.76
ME JW DRAIN TK 3 P	31-35	OTH	50.0	1.000	9.0	26.53	-3.48	1.16
BILGE TK 2 S	35-43	OTH	50.0	1.000	22.9	31.51	3.82	0.96
SLUDGE HOLDING TK 5	17-19	OTH	50.0	1.000	36.7	14.42	12.62	20.36
SLUDGE TK 4 C	19-22	OTH	50.0	1.000	13.0	16.65	0.00	9.82
ST TUBE CW TK 8 C	7-14	OTH	100.0	1.000	37.6	9.52	0.00	4.08
<b>Total OTHER TANKS</b>					<b>191.2</b>	<b>17.66</b>	<b>5.31</b>	<b>9.70</b>
<i>DEPARTURE STORE</i>								
DEPARTURE STORE					70.0	140.25	0.00	24.80
<b>Total DEPARTURE STORE</b>					<b>70.0</b>	<b>140.25</b>	<b>0.00</b>	<b>24.80</b>
<i>CREW &amp; EFFECT</i>								
CREW & EFFECT					10.0	18.00	0.00	34.65
<b>Total CREW &amp; EFFECT</b>					<b>10.0</b>	<b>18.00</b>	<b>0.00</b>	<b>34.65</b>
<b>Lightweight</b>					<b>25000.0</b>	<b>134.25</b>	<b>0.00</b>	<b>14.00</b>
<b>Deadweight</b>					<b>179466.9</b>	<b>147.76</b>	<b>0.03</b>	<b>14.08</b>
<b>Total Displacement</b>					<b>204466.9</b>	<b>146.10</b>	<b>0.03</b>	<b>14.07</b>

Çizelge Ek 2.14 180000 DWT dökme yük gemisi balast yükleme detayları

Title	Frames	Cargo	% full	SG (t/m3)	Weight (t)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)
FP WB TK 1 C	315-334	WB	100.0	1.025	2856.8	274.09	0.00	8.47
WB TK 10 P	43-76	WB	100.0	1.025	2795.4	49.11	-15.03	12.61
WB TK 10 S	43-76	WB	100.0	1.025	2795.4	49.11	15.03	12.61
WB TK 2 P	285-315	WB	100.0	1.025	2778.4	254.50	-13.68	10.79
WB TK 2 S	285-315	WB	100.0	1.025	2778.3	254.50	13.68	10.79
WB TK 3 P	255-285	WB	100.0	1.025	3274.0	229.41	-16.23	10.55
WB TK 3 S	255-285	WB	100.0	1.025	3274.0	229.41	16.23	10.55
WB TK 4 P	225-256	WB	100.0	1.025	3300.5	203.69	-16.27	10.48
WB TK 4 S	225-256	WB	100.0	1.025	3300.5	203.69	16.27	10.48
WB TK 5 P	195-226	WB	100.0	1.025	3300.5	177.89	-16.27	10.48
WB TK 5 S	195-226	WB	100.0	1.025	3300.5	177.89	16.27	10.48
WB TK 6 P	165-196	WB	100.0	1.025	3300.5	152.09	-16.27	10.48
WB TK 6 S	165-196	WB	100.0	1.025	3300.5	152.09	16.27	10.48
WB TK 7 P	135-166	WB	100.0	1.025	3300.6	126.29	-16.27	10.48
WB TK 7 S	135-166	WB	100.0	1.025	3300.5	126.29	16.27	10.48
WB TK 8 P	105-136	WB	100.0	1.025	3295.6	100.51	-16.26	10.50
WB TK 8 S	105-136	WB	100.0	1.025	3295.5	100.51	16.26	10.50
WB TK 9 P	75-106	WB	100.0	1.025	3100.4	75.00	-15.98	11.06
WB TK 9 S	75-106	WB	100.0	1.025	3100.4	75.00	15.98	11.06
<b>Total WB TANKS</b>					<b>59748.3</b>	<b>158.30</b>	<b>-0.00</b>	<b>10.68</b>
HFO STR TK 1 P	26-45	HFO	95.0	0.980	1274.6	29.09	-14.97	17.90
HFO STR TK 1 S	26-45	HFO	95.0	0.980	1639.4	28.91	14.09	18.48
HFO DRAIN TK 8 P	24-31	HFO	50.0	0.980	7.5	22.71	-3.11	1.40
HFO (LS) STR TK 2 P	17-26	HFO	95.0	0.980	428.2	17.54	-13.40	18.33
HFO (LS) STR TK 2 S	17-26	HFO	95.0	0.980	533.1	17.81	12.63	18.84
HFO SER TK 5 S	23-26	HFO	95.0	0.980	31.9	19.60	7.60	13.86
HFO (LS) SER TK 6 S	20-23	HFO	95.0	0.980	30.1	17.22	7.57	14.03
HFO (LS) SET TK 4 S	30-34	HFO	95.0	0.980	74.5	25.60	10.40	14.73
HFO OVERFLOW TK 7	14-22	HFO	50.0	0.980	26.0	15.07	0.00	1.14
HFO SET TK 3 S	34-40	HFO	95.0	0.980	93.1	29.60	10.56	14.73
<b>Total HFO TANKS</b>					<b>4138.4</b>	<b>26.06</b>	<b>1.74</b>	<b>17.97</b>
<b>Total MDO TANKS</b>					<b>237.6</b>	<b>25.84</b>	<b>-10.07</b>	<b>14.30</b>
DG OIL TK 4 S	10-13	LO	50.0	0.900	4.5	9.20	6.80	20.15
HYD OIL TK 3 S	10-13	LO	50.0	0.900	4.5	9.20	6.00	20.15
LO DRAIN TK 8 S	24-31	LO	50.0	0.900	6.9	22.71	3.11	1.40
LO OVERFLOW TK 7 S	31-35	LO	50.0	0.900	8.1	26.53	3.48	1.16
ME CYL OIL TK 5 P	10-13	LO	50.0	0.900	13.4	9.20	-5.20	20.15
ME CYL OIL TK 6 P	10-13	LO	50.0	0.900	13.4	9.20	-7.60	20.15
ME SYS OIL TK 1 S	10-13	LO	50.0	0.900	8.9	9.20	3.20	20.15
ME SYS OIL TK 2 S	10-13	LO	50.0	0.900	8.9	9.20	4.80	20.15
SUMP TK 9 C	23-34	LO	50.0	0.900	14.8	22.80	0.00	1.06
<b>Total LO TANKS</b>					<b>83.4</b>	<b>14.41</b>	<b>0.08</b>	<b>13.37</b>
<b>Total FW TANKS</b>					<b>596.4</b>	<b>0.09</b>	<b>-0.00</b>	<b>22.13</b>
BLACK WATER TK 6 S	15-17	OTH	50.0	1.000	25.7	12.81	12.03	15.71
BILGE TK 2 P	35-43	OTH	50.0	1.000	22.9	31.51	-3.82	0.96
GRAY WATER TK 7 S	13-15	OTH	50.0	1.000	23.4	11.22	11.70	15.76
ME JW DRAIN TK 3 P	31-35	OTH	50.0	1.000	9.0	26.53	-3.48	1.16
BILGE TK 2 S	35-43	OTH	50.0	1.000	22.9	31.51	3.82	0.96
SLUDGE HOLDING TK 5	17-19	OTH	50.0	1.000	36.7	14.42	12.62	20.36
SLUDGE TK 4 C	19-22	OTH	50.0	1.000	13.0	16.65	0.00	9.82
ST TUBE CW TK 8 C	7-14	OTH	100.0	1.000	37.6	9.52	0.00	4.08
<b>Total OTHER TANKS</b>					<b>191.2</b>	<b>17.66</b>	<b>5.31</b>	<b>9.70</b>
DEPARTURE STORE								
DEPARTURE STORE					70.0	140.25	0.00	24.80
<b>Total DEPARTURE STORE</b>					<b>70.0</b>	<b>140.25</b>	<b>0.00</b>	<b>24.80</b>
CREW & EFFECT								
CREW & EFFECT					10.0	18.00	0.00	34.65
<b>Total CREW &amp; EFFECT</b>					<b>10.0</b>	<b>18.00</b>	<b>0.00</b>	<b>34.65</b>
Lightweight					25000.0	134.25	0.00	14.00
Deadweight					65075.3	147.32	0.09	11.28
<b>Total Displacement</b>					<b>90075.3</b>	<b>143.69</b>	<b>0.06</b>	<b>12.04</b>

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi 26.12.1977

Doğum yeri Bursa

Lise 1988-1994 Bursa Erkek Lisesi

Lisans 1994-1999 Yıldız Üniversitesi Makine Fak.  
Gemi İnşaatı Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1999-2002 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Gemi İnşaatı Mühendisliği

Doktora 2002-2009 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Gemi İnşaatı Mühendisliği

**Aldığı Burslar**

1998-1999 Australian Maritime Collage, Bitirme projesi  
kapsamında bir senelik araştırma bursu.

**Çalıştığı kurum(lar)**

1999-Devam ediyor Delta Denizcilik Mühendislik A.Ş. Bölüm Müdürü  
2002-Devam ediyor MESH Mühendislik A.Ş. Şirket Kurucu Üyesi