T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HIZLI TEKNE FORM SERİLERİ İÇİN OPTİMİZASYONA DAYALI BİR METODOLOJİ GELİŞTİRİLMESİ

SADIK ÖZÜM

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

DANIŞMAN
PROF. DR. HÜSEYİN YILMAZ

İSTANBUL, 2018

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HIZLI TEKNE FORM SERİLERİ İÇİN OPTİMİZASYONA DAYALI BİR METODOLOJİ GELİŞTİRİLMESİ

SADIK ÖZÜM

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

DANIŞMAN
PROF. DR. HÜSEYİN YILMAZ

İSTANBUL, 2018

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HIZLI TEKNE FORM SERİLERİ İÇİN OPTİMİZASYONA DAYALI BİR METODOLOJİ GELİŞTİRİLMESİ

Sadık ÖZÜM tarafından hazırlanan tez çalışması 03.04.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Fahri ÇELİK

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Şakir BAL

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Mesut GÜNER

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Barış BARLAS

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, tasarım verimini arttırmak amacı ile bir dizayn metodolojisi geliştirilerek, otomasyon sağlanabilen, günümüz teknolojisine ayak uydurmuş bir teknik ortaya konulmuştur. Bu metodoloji yardımı ile yüksek süratli kayıcı forma sahip, tek gövdeli geometriler araştırılarak, hidrodinamik özellikleri incelenmiştir.

Üniversite öğrencilik yıllarımın başlangıcından, doktora programımın sonuna kadar tüm bilgi birikimlerinden yararlandığım, mesleki anlamda bana çok şey katan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez izleme süresince değerli fikirlerinden yararlandığım, beni yönlendiren ve çalışmanın sonuçlanmasına büyük katkıda bulunan Prof. Dr. Fahri Çelik ve Prof. Dr. Şakir Bal'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma esnasında kullandığım yazılımların tez boyunca kullanım hakkını veren FRIENDSHIP-Systems, Ship Flow, ve CD Adapco firmalarına teşekkürlerimi sunarım.

Tez süresince hiçbir yardımını esirgemeyen ve daima yanımda olan birlikte çalışma fırsatı bulduğum değerli dostum Dr. Bekir Şener'e gönülden teşekkür ederim.

Okul ve çalışma hayatım boyunca verdikleri emek ve sevgi ile bu günlere gelmemi sağlayan sevgili annem ve babama en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatın tüm zorluklarını ve güzelliklerini birlikte tattığım, her daim yanımda olduğunu bildiğim sevgili eşim Ahenk Özüm'e tez süresince gösterdiği anlayış ve özverili davranışları için sonsuz teşekkür ederim.

Nisan, 2018

Sadık ÖZÜM

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

ÇİZELGE LİSTESİ xiii

ÖZET xiv

ABSTRACT xvi

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 13
1.3 Hipotez 15

BÖLÜM 2

MATEMATİKSEL MODELLER 17

2.1 Akışkanlar Mekaniğinin Temel Diferansiyel Denklemleri 18
2.1.1 Kütlenin Korunumu 18
2.1.2 Momentumun Korunumu 19
2.1.3 Newton Tipi Akışkan ve Navier-Stokes Denklemleri 20
2.1.4 Akışkanlar Mekaniğinin Temel Denklemlerinin Kapalı Formu 21
2.2 Sayısal Analiz 21
2.2.1 Sonlu Hacimler Yöntemi 22
2.2.2 Potansiyel Teori 23
2.2.3 Viskoz Teori 24

BÖLÜM 3

HIZLI TEKNE SERİSİ GELİŞTİRME METODOLOJİSİ VE OPTİMİZASYONU 27

3.1 Parametrik Modelleme ile Varyant Üretme Yöntemleri 28
3.1.1 Yüzey Kontrol Noktası Yer Değiştirmesi 29
3.1.2 Tekne Birleştirme Yöntemi 29
3.1.3 Parametrik Transformasyon Yöntemi 30
3.1.4 Parametrik Model ile Varyasyon Yöntemi 31
3.2 Tekne Geometrisi Oluşturma Yöntemleri 33
3.2.1 Geleneksel Modelleme Yöntemleri 34
3.2.2 Parametrik Modelleme Yöntemleri 34
3.2.3 Tam Parametrik Modelleme 35
3.2.4 Geometrik Modelleme Yöntemlerinin Değerlendirilmesi 37
3.3 Çok Kriterli Optimizasyon 39
3.4 Form Geliştirme Metodolojisinin Oluşturulması 43
3.4.1 Amaç Fonksiyonunun ve Geometrik Sınırların Belirlenmesi 46
3.4.2 Sabit ve Değişken Parametrelerin Belirlenmesi 48
3.4.3 Optimizasyon Sırasında Kullanılan Stabilite Kısıtları 48
3.4.4 Ana Tekne Formunun Parametrik Olarak Modellenmesi 49

BÖLÜM 4

UYGULAMA 55

4.1 Sakin Su Direnç Analizleri 55
4.1.1 Kayıcı Form Direnç Bileşenleri 55
4.1.2 Direnç Tahmin Metotları 57
4.1.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemleri 57
4.1.4 Potansiyel Teoriye Dayalı Modelin Çözüme Hazır Hale Getirilmesi 58
4.1.4.1 Çözüm Ağının Oluşturulması 58
4.1.5 Viskoz Sistemin Çözüme Hazır Hale Getirilmesi 64
4.1.5.1 Çözüm Ağının Oluşturulması 64
4.1.5.2 Serbest Su Yüzeyinin Modellenmesi 68
4.1.5.3 Başlangıç ve Sınır Koşullarının Belirlenmesi 69
4.2 Denizcilik Analizleri 72
4.2.1 Deniz Ortamının Belirlenmesi ve Hesap Yöntemi 72
4.2.2 Genlik Karşılık Fonksiyonlarının (RAO) Hesaplanması 73
4.3 Sistematik Varyasyonun Uygulanması 77
4.4 Sistematik Varyasyon Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi 82
4.4.1 Sakin Su Direnç Analizlerinin Değerlendirilmesi 83
4.4.2 Denizcilik Analizlerinin Değerlendirilmesi 91
4.5 Direnç Açısından Regresyon Analizi 96
4.6 Çok Kriterli Form Optimizasyonu 98

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER 104

KAYNAKLAR 109

EK-A

MEVCUT TEKNELERİN GEOMETRİK ÖZELLİKLERİ 115

EK-B

SİSTEMATİK VARYASYON İLE OLUŞTURULAN FORMLARIN GEOMETRİK ÖZELLİKLERİ (L_{OA}=45 m) 117

EK-C

SİSTEMATİK VARYASYON İLE OLUŞTURULAN FORMLARIN DİRENÇ ANALİZİ SONUÇLARI (Fn-0.95-0.75-0.5) 121

EK-D

SİSTEMATİK VARYASYON İLE OLUŞTURULAN FORMLARIN DİRENÇ VE DENİZCİLİK ANALİZİ SONUÇLARI (Fn-1.50) 125

EK-E

ÇOK RİTERLİ OPTİMİZASYON SONUCU OLUŞAN SU ALTI GEOMETRİLERİ 129

ÖZGEÇMİŞ 131

SİMGE LİSTESİ

B	Genişlik
B_{tr}	Kıç ayna genişliği
B_{WL}	Su hattı genişliği
C_B	Blok katsayısı
c_n	Karışım katsayısı
C_P	Prizmatik katsayı
C_T	Toplam direnç katsayısı
D	Derinlik
Fn	Froude sayısı
g	Yerçekimi ivmesi
GM	Metasantr yüksekliği
KB	Sephiye merkezinin düşey konumu
KG	Ağırlık merkezinin düşey konumu
L_{OA}	Tam boy
L_{WL}	Su hattı boyu
$L/\nabla^{1/3}$	Narinlik oranı
LCB	Sephiye merkezinin boyuna konumu
LCF	Yüzme merkezinin boyuna konumu
LCG	Ağırlık merkezinin boyuna konumu
R_F	Sürtünme direnci
R_{PV}	Viskoz basınç direnci
R_R	Artık direnç
R_T	Toplam direnç
R_W	Dalga direnci
Re	Reynolds Sayısı
RAO[a_z]	İvme açısından genlik karşılık fonksiyonu
S	Islak yüzey alanı
T	Su çekimi
T_m	Modal dalga periyodu
V	Gemi hızı
V_{acc}	Düşey ivme
Δ	Deplasman
δCGz	Ağırlık merkezinin düşeydeki yer değiştirmesi
∇	Statik durumdaki deplasman hacmi
∇_d	Dinamik durumdaki deplasman hacmi

ϕ	Hız potansiyeli
ρ	Yoğunluk
β	Kalkıntı açısı
ω	Dalga frekansı
ω_e	Karşılaşma frekansı
λ	Dalga boyu
ζ	Dalga genliği

KISALTMA LİSTESİ

BDT	Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD-Computer Aided Design)
BDM	Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE-Computer Aided Engineering)
DWL	Design Waterline (Dizayn Su Hattı)
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
IMO	International Maritime Organization (Uluslararası Denizcilik Örgütü)
ITTC	International Towing Tank Conference (Uluslararası Çekme Tankı Konferansı)
RAO	Response Amplitude Operator (Genlik Karşılık Fonksiyonu)
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes (Reynold Ortalamalı Navier-Stokes)
URANS	Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes (Reynold Ortalamalı Navier-Stokes)

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. 1 Kayıcı forma sahip tekne geometrisi 3
Şekil 1. 2 Sayısal yöntemler [16] 7
Şekil 1. 3 Optimizasyon metodolojisi akış şeması 16
Şekil 2. 1 Matematiksel modellemedeki temel unsurlar 18
Şekil 2. 2 Akışkan içindeki sonsuz küçük partikül 19
Şekil 3. 1 Tekne Birleştirme Yöntemi [41] 30
Şekil 3. 2 Geometrik modelleme yöntemleri [47] 33
Şekil 3. 3 F-Spline eğrisi 37
Şekil 3. 4 Geometrik modelleme yöntemlerinin karşılaştırılması [52] 39
Şekil 3. 5 Çok amaçlı optimizasyon problemi örneği [57] 42
Şekil 3. 6 İki amaçlı optimizasyon problemi için Pareto eğrisi örnekleri [57] 43
Şekil 3. 7 Tekne form geliştirme ve optimizasyon akış şeması 45
Şekil 3. 8 Mevcut teknelerin Loa ve Loa/B dağılımı 46
Şekil 3. 9 Mevcut teknelerin Loa/B-L/∇^(1/3) dağılımı 47
Şekil 3. 10 Mevcut teknelerin Loa/B ve Fn dağılımı 47
Şekil 3. 11 Parametrik modelleme akış şeması 50
Şekil 3. 12 Parametrik ana formun temel eğriler ile temsili 50
Şekil 3. 13 Ana formun parametrik yapısı 52
Şekil 3. 14 Baş bodoslamanın fonksiyonel yapısı 53
Şekil 3. 15 Parametrik yüzeyin oluşturulması 53
Şekil 3. 16 Ana formun su altı geometrisinin temsili 54
Şekil 4. 1 Kayıcı tekne formuna etki eden kuvvetler [1] 56
Şekil 4. 2 Panel metot çözüm ağının tanımı [63] 59
Şekil 4. 3 Hızın bağlısı olarak XDOW parametresinin değeri [63] 61
Şekil 4. 4 Hızın bağlısı olarak STAU parametresinin değeri [63] 61
Şekil 4. 5 Hızın bağlısı olarak STAM parametresinin değeri [63] 62
Şekil 4. 6 Hızın bağlısı olarak STAD parametresinin değeri [63] 62
Şekil 4. 7 Hızın bağlısı olarak STAD parametresinin değeri [63] 62
Şekil 4. 8 Ana programda çözüm ağını tanımlayan paramerelerinin girilmesi 63
Şekil 4. 9 Kontrol hacmi içerisinde alıcı – donör yerleşimi 66
Şekil 4. 10 Kontrol hacmi içinde oluşturulmuş çözüm ağı 66
Şekil 4. 11 Çözüm ağı sıklığı 67
Şekil 4. 12 Farklı çözüm ağ yapısına sahip sistemlerin direnç açısından karşılaştırılması. 68
Şekil 4. 13 Kontrol hacminin sınırları profil görüntüsü 70

Şekil 4. 14 Kontrol hacminin sınırları üst görünüş..... 70
Şekil 4. 15 Serbest su yüzeyinin simetri ekseninden görünüşü 71
Şekil 4. 16 Tekneye başlangıç koşullarında etki eden hidrostatik basınç dağılımı..... 72
Şekil 4. 17 İleri doğru analiz yöntemi akış şeması [71] 73
Şekil 4. 18 Dalga boyu 45 m, dalga genliği 0.45 m, ağırlık merkezi civarındaki ivmelenmeler 75
Şekil 4. 19 Dalga boyu 45 m, dalga genliği 0.45 m, ağırlık merkezi civarındaki zaman alanında çözülmüş ivmelenmeler ve Fourier dönüşümü ile ifade edilmesi 76
Şekil 4. 20 Boyutsuz RAO[a_z] grafiği 77
Şekil 4. 21 Tekne ailesi oluşturulma ve analiz aşamaları 79
Şekil 4. 22 Sistematik varyasyon sonucu oluşan tekne grubu 81
Şekil 4. 23 Sistematik varyasyon sonucu farklı deplasman gruplarının Loa/B-B/T dağılımları 82
Şekil 4. 24 Fn=0.5 için Loa/B oranın sakin suda dirence etkisi..... 83
Şekil 4. 25 Fn=0.5 için kalkıntı açısının dirence etkisi..... 84
Şekil 4. 26 Fn=0.75 için kalkıntı açısının dirence etkisi..... 85
Şekil 4. 27 Fn=0.95 için kalkıntı açısının dirence etkisi..... 85
Şekil 4. 28 Fn=1.5 için kalkıntı açısının dirence etkisi..... 85
Şekil 4. 29 Des0091 için viskoz çözüm ile Direnç-Hız Eğrisi..... 86
Şekil 4. 30 Viskoz çözüm ile farklı hızlarda kalkıntı açısının dirence olan etkisi..... 86
Şekil 4. 31 RANS ile elde edilen farklı hızlardaki hidrodinamik kaldırma kuvveti 87
Şekil 4. 32 RANS ile elde edilen farklı hızlardaki ağırlık merkezi yer değiştirmeleri 87
Şekil 4. 33 Loa/B=5.4 - $L/\nabla^{(1/3)}$=5,9 - $\beta=10^0$ - Fn=1.5 hidrodinamik basınç dağılımı ve dalga deformasyonu 88
Şekil 4. 34 Loa/B=5.4 - $L/\nabla^{(1/3)}$=5,9 - $\beta=12.5^0$ - Fn=1.5 hidrodinamik basınç dağılımı ve dalga deformasyonu 89
Şekil 4. 35 Loa/B=5.4 - $L/\nabla^{(1/3)}$=5,9 - $\beta=15^0$ - Fn=1.5 hidrodinamik basınç dağılımı ve dalga deformasyonu 89
Şekil 4. 36 Loa/B=5.4 - $L/\nabla^{(1/3)}$=5,9 - $\beta=17.5^0$ - Fn=1.5 hidrodinamik basınç dağılımı ve dalga deformasyonu 90
Şekil 4. 37 Loa/B=5.4 - $L/\nabla^{(1/3)}$=5,9 - $\beta=20^0$ - Fn=1.5 hidrodinamik basınç dağılımı ve dalga deformasyonu 90
Şekil 4. 38 Fn=0.95 için Bwl/T nin sakin suda dirence etkisi 91
Şekil 4. 39 λ=0.5L ζ=0.225 m Fn=1.5..... 92
Şekil 4. 40 λ=1.0L ζ=0.45 m Fn=1.5..... 92
Şekil 4. 41 λ=1.5L ζ=0.675 m Fn=1.5..... 92
Şekil 4. 42 λ=2.0L ζ=0.90 m Fn=1.5..... 93
Şekil 4. 43 λ=3.0L ζ=0.1.35 m Fn=1.5 93
Şekil 4. 44 RAO[a_z] altında kalan alan ve genliklerin maksimum değerleri..... 94
Şekil 4. 45 Kalkıntı açısının Bwl/T değerleri ile değişimi 94
Şekil 4. 46 Kalkıntı açısnın RAO[a_z] değerleri ile değişimi 95
Şekil 4. 47 Kalkıntı açısnın dinamik trim açısı ile olan ilişkisi..... 96
Şekil 4. 48 Sistematik varyasyon sonucu oluşan dizayn uzayı..... 98
Şekil 4. 49 Fn=1.5 $L/\nabla^{(1/3)}$=5.7 olan tekneler için direnç ve ivme değerleri 99
Şekil 4. 50 Fn=1.5 $L/\nabla^{(1/3)}$=5.9 olan tekneler için direnç ve ivme değerleri 99
Şekil 4. 51 Fn=1.5 $L/\nabla^{(1/3)}$=6.1 olan tekneler için direnç ve ivme değerleri 100

Şekil 4. 52 Fn=1.5 $L/\nabla^{(1/3)}$=6.3 olan tekneler için direnç ve ivme değerleri 100
Şekil 4. 53 Fn=1.5 $L/\nabla^{(1/3)}$=6.5 olan tekneler için direnç ve ivme değerleri 101
Şekil 4. 54 Fn=1.5 $L/\nabla^{(1/3)}$=6.8 olan tekneler için direnç ve ivme değerleri 101
Şekil 4. 55 Des0067 ve Des0031'in su altı geometrileirnin birlikte gösterimi..... 102
Şekil E. 1 Des0007 Su altı geometrisi 129
Şekil E. 2 Des0030-0031-0033-0034 Su altı geometrileri..... 129
Şekil E. 3 Des0061-0062 Su altı geometrileri 130
Şekil E. 4 Des0066-0067-0068-0069-0071 Su altı geometrileri 130
Şekil E. 5 Des0094 Su altı geometrisi 130

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3. 1 Parametrik ana formun boyutları 46
Çizelge 3. 2 Parametrik model için belirlenen global parametreler 48
Çizelge 3. 3 Parametrik modelde kullanılan temel form eğrileri 51
Çizelge 4. 1 Çözüm ağının hızın fonksiyonu olarak boyutlandırılması [63] 61
Çizelge 4. 2 Baştan gelen düzgün dalgalarda dalga boyları ve genlikleri 74
Çizelge 4. 3 Sistematik varyasyon için belirlenen dizayn değişkenleri 77
Çizelge 4. 4 Sistematik varyasyon sırasında sabit kalan parametreler 78
Çizelge 4. 5 Baştan gelen düzgün dalgalarda dalga boyları ve genlikleri 91
Çizelge 4. 6 Regresyon istatistiki bilgileri 97
Çizelge 4. 7 Direnç açısından kıyas formülü sınırları 97
Çizelge 4. 8 Örneklendirmek amacı ile direnç açısından kıyaslanacak iki varyant 97
Çizelge 4. 9 Optimum Tekne Ailesi 103
Çizelge A. 1 Mevcut formların geometrik özellikleri 115
Çizelge B. 1 Sistematik varyosyon ile oluşturulan formların geometrik özellikleri 117
Çizelge C. 1 Varyantların direnç analizi sonuçları ve dinamik trim açıları 121
Çizelge D. 1 Varyantların direnç ve denizcilik analizi sonuçları 125

ÖZET

HIZLI TEKNE FORM SERİLERİ İÇİN OPTİMİZASYONA DAYALI BİR METODOLOJİ GELİŞTİRİLMESİ

Sadık ÖZÜM

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ

Bir deniz taşıtının kendisinden beklenen görevleri iyi bir biçimde yerine getirebilmesinin yolu, amaç fonksiyonu ile uyumlu bir su altı formuna sahip olmasından geçer. Bunu sağlayabilmek titiz ve karmaşık analizler gerektirmektedir. Bir geminin stabilite, direnç, denizcilik gibi özelliklerinin istenilen düzeyde olması ancak iyi bir gemi dizaynı sürecinden sonra mümkün hale gelir.

Gemi dizaynında günümüze kadar gelen ve hala çoğunlukla kullanılmakta olan geleneksel yöntemlerin yanında, gelişen dijital sistemler ile birlikte yeni alternatifler ortaya çıkmaya başlamıştır. Günümüzün teknolojisine ayak uydurarak bu dijital sistemlerden yararlanmak, gemi tasarımını çok daha verimli hale getirebilmektedir.

Geleneksel yöntemler temelde bir gemi formu oluşturarak bunu analiz ve/veya deneyler ile değerlendirip, istenilen özellikleri sağlar hale getirmeyi amaçlamaktadır. En iyiye ulaşma esas amaç değildir. Bunun sebebi deneysel yöntemlerin maliyet ve zaman açısından çok fazla iterasyona izin vermemesidir. Ampirik formülasyonlar ile yapılan analizlerin, her form için doğruluğunun kesinliği yoktur.

Bu çalışmanın amacı günümüz teknolojik gelişmelerine ayak uydurarak daha verimli bir tasarım metodolojisi geliştirmeyi kapsamaktadır. Bilgisayar tabanlı simülasyonlar ile analiz metotları uygulanarak otomatikleştirilmiş bir algoritma ile en iyi çözüme ulaşmanın yolları ortaya konulmuştur. Metodolojinin uygulama kısmında yüksek süratli form karakteristikleri incelenmeye çalışılmıştır.

Bu kapsamda ilk olarak metodolojinin akış şeması ortaya konmuş ve sistemin otomatik bir şekilde işleyebilmesi için, ön dizayn aşaması sonucunda ortaya çıkan sınırlar içerisinde bir parametrik model oluşturulmuştur. Belirlenen dizayn değişkenleri yardımı ile sistematik varyasyon sağlanarak 120 adet tekne türetilmiş ve bunların her biri stabilite, denizcilik ve direnç açısından incelenmiştir. Denizcilik ve direnç için hesaplamalı akışkanlar dinamiği tabanlı yazılımlar kullanılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda yüksek süratli form karakteristiğine sahip geometrilerin etkin parametrelerinin performansa olan etkisi değerlendirilmiştir.

Hidrodinamik analizler sonucunda ortaya çıkan 120 adet form içerisinden bir optimizasyon yöntemi kullanarak farklı deplasman gruplarında optimum bir tekne ailesi ortaya konulmuştur.

Bunun haricinde farklı hızlarda yapılan analizler neticesinde direnç açısından bu tarz formları karşılaştırabilmek için regresyon analizi ile bir bağıntı elde edilmiştir.

Sunulan bu tez çalışmasında otomatik olarak işleyebilen bir metodoloji ortaya konulmuştur. Bu metottan yararlanarak optimizasyon uygulaması yapılmış ve sonucunda kayıcı forma sahip yüksek hızlarda seyredebilen belli bir boyda farklı deplasman gruplarına sahip optimum bir tekne ailesi meydana getirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, çok kriterli optimizasyon, parametrik modelleme, sistematik varyasyon, form serileri.

ABSTRACT

DEVELOPMENT A OPTIMIZATION BASED METHODOLOGY FOR HIGH SPEED CRAFT SERIES

Sadık ÖZÜM

Naval Architecture and Marine Engineering

PhD. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ

The way in which a marine vehicle can fulfill its expected functions is in case it has an underwater hull form compatible with its objective function. Providing this requires meticulous and complex analysis. Stability, resistance and maritime characteristics of a ship can only be achieved at a desired level as a result of a good ship design process.

New alternatives have emerged in the design of ships, with the ever-present and often used conventional methods, along with developing digital systems. Keeping up with today's digital technology and benefit from this system can make the ship design much more efficient.

Traditional methods are basically aimed at creating a ship form and evaluating it by analysis or experiments and providing the desired characteristics. Achieving the best is not the main objective. This is why experimental methods do not allow too much iteration in terms of cost and time. Also, there is no certainty of accuracy of analysis by empirical formulations for each hull type.

The aim of this study is to develop a more efficient design methodology by keeping up with today's technological developments. By means of computer based simulations and analysis methods, an automated algorithm has been introduced to reach the best solution. In the application part of the methodology, high speed craft form characteristics have been studied.

In this context, firstly the flow chart of the methodology is presented and a parametric model is created within the boundaries resulting from the preliminary design phase so

that the system can operate automatically. With the help of determined design variables, 120 hull forms were derived by systematic variation and each of alternative hull forms was examined in terms of stability, seakeeping and resistance. Computational fluid dynamics software are used for seakeeping and resistance analysis.

As a result of the analyses, the effect of the active parameters of the geometries with high speed form characteristics on performance was evaluated.

Using an optimization method, an optimum form series has been demonstrated from 120 alternative hull forms for different displacement groups.

Additionally, a formula was created by regression analysis of the results of hydrodynamic analyses made at different speeds in order to compare similar type hull forms in terms of resistance.

In this study, an automatically operated methodology is presented. Optimization has been applied by using this methodology and as a result, an optimal series for planing hulls with a certain length and different displacement groups has been introduced.

Keywords: Computational fluid Dynamics, multi-objective optimization, parametric modeling, systematic variation, hull series.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Gemi mühendisliğinde yapılan araştırmalar; deniz taşıtlarının güvenli ve konforlu yolculuk yapmalarını amaçlamaktadır. Bunun sağlanabilmesi için teknenin su altı formunun, amaç fonksiyonuna uygun olarak tasarlanması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle gemi mühendisliği alanında tekne gövde tasarımı, yüzlerce yıldır gelişmekte olan bir alan olmakla birlikte, günümüzde temel amaç, minimum yakıt tüketimiyle maksimum hız gereksinimlerini karşılamaktır. Bunun için gövde direncinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi önem arz etmektedir. Ayrıca, bir teknenin direnç açısından iyi olması tek başına yeterli değildir. Deniz taşıtının istenilen hızda giderken yapacağı altı serbestlik dereceli hareketlerin de minimize edilerek konfor kriterlerinin sağlanması önemlidir.

Denizcilik konforu ve performans önemli bir kıstastır. Özellikle son yıllarda teknolojinin de gelişmesi ile birlikte, hızlı gemilere olan ihtiyaç doğru orantılı olarak artmıştır. Bu da teknenin direnç açısından iyi performans göstermesinin yanında, denizci özelliklere sahip olması durumunu ortaya çıkarmıştır. Bir deniz taşıtının denizci özelliklere sahip olması, dalgalı bir denizde teknenin ondan beklenen konforu sağlayacak şekilde görevini gerçekleştirebilmesi olarak açıklanabilir. Dolayısı ile bu noktada gemi inşaatı mühendisliği alanında yapılan araştırmalar ve gelişmeler, hızlı teknelerin su altı geometrilerinin, yüksek hızlarda da denizcilik açısından iyi performanslar göstermesine odaklanmıştır.

Çeşitli çalışmalar yıllar içerisinde yapılmaya devam etmiş ve önemli gelişmeler elde edilmiştir. Araştırmaların çoğu, özellikle direnç ve denizcilik üzerinde yoğunlaşmıştır. Dolayısı ile form geliştirmek için, ön dizayn safhasında direnç, stabilite veya denizcilik gibi hidrodinamik özellikler açısından en iyiye ulaşmanın yolu aranmalıdır.

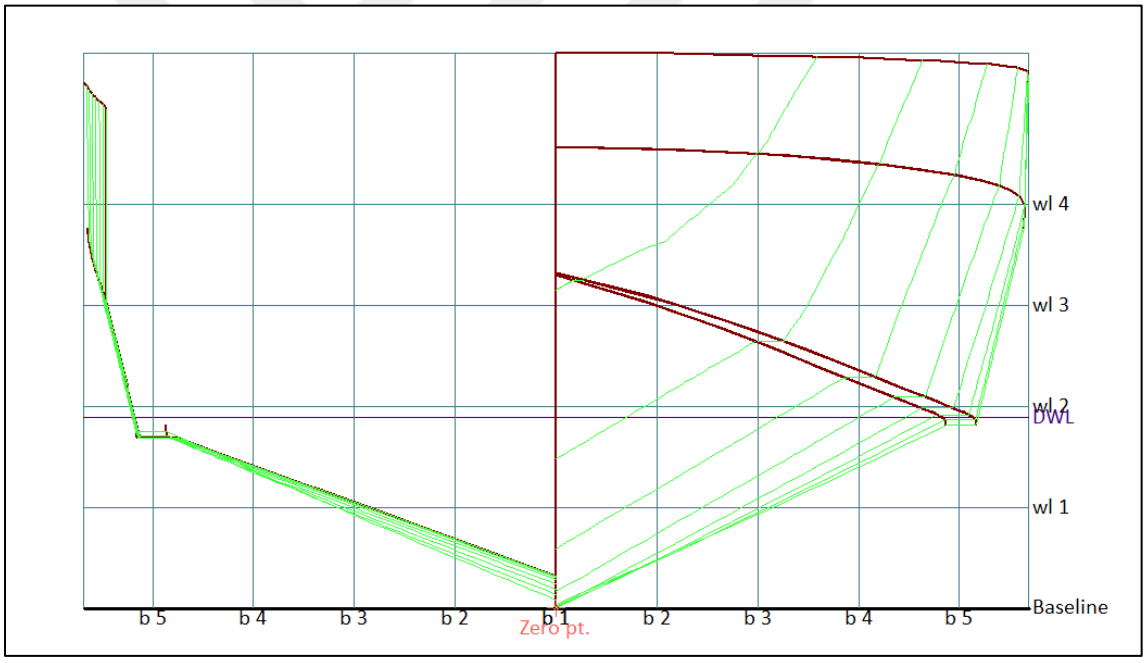
Yüksek Hızlı Kayıcı Formdaki Tekneler

90 yıllık bir araştırma geçmişine sahip olan yüksek hızlı teknelerin ilk çıkış noktası, suda gidebilen hava araçları üzerinde yapılan araştırmalara dayanır. Sonraki yıllarda bu kayıcı formlar deniz taşıtları için kullanılmaya başlanmıştır. Baker 1910 yılında prizmatik yüzeyler üzerindeki ilk deneysel çalışmaları başlatmıştır. Daha sonra bu çalışmaları genişleten Sottorf olmuştur. Yapılan tüm bu çalışmalar, prizmatik yüzeylerin yüksek hızlarda bir akışkan içerisinde, hidrodinamik açıdan incelenebilmesini olanaklı kılmıştır [1].

Yüksek hızlı teknelerin çeşitli tanımları bulunmaktadır. Baird'in 1998 yılında yaptığı tanımda; yüksek hızlı tekneleri, maksimum hızları 30 knot tan fazla olan deniz taşıtları olarak değerlendirmiştir. Diğer bir genel tanım ise, akışın bir karakteristiği olan Froude sayısı üzerinden yapılmıştır. Froude sayısı 0.4 ten büyük tüm tek gövdeli ve katamaran tekneler hızlı tekneler olarak tanımlanmıştır [2].

Yüzme prensibi açısından, bir deniz taşıtı üzerine etki eden basınçları, hidrostatik ve hidrodinamik basınç olarak ikiye ayırabiliriz. Hidrostatik basınç, bize sepiye kuvvetini verir. Bu da teknenin su içindeki hacmi yani deplasmanı ile orantılıdır. Hidrodinamik basınç ise, gövdenin etrafındaki akışa bağlıdır ve yaklaşık olarak tekne hızının karesi ile orantılıdır. En genel şekilde ifade edersek, sepiye kuvveti, Froude sayısı 0.4 ten küçük olduğunda, hidrodinamik etkilere göre daha önemlidir. Hız limitleri bu bölge içerisinde bulunan deniz taşıtlarına deplasman tekneleri denir. Froude sayısının 0.4-0.5 < Fn < 1.0-1.2 karşılık geldiği hızlardaki deniz taşıtlarına da yarı deplasman tekneleri adı verilir. Froude sayısının 1.0-1.2 den büyük olduğu durumlarda ise hidrodinamik kuvvetler, hidrostatik kuvvetlere nazaran daha baskındırlar ve seyir halinde iken teknenin ağırlığının bir bölümünü taşıyarak su üzerinde yükselmesine sebep olurlar, bu tarz teknelere de kayıcı tekneler adı verilir [2].

Arşimet prensibi düşünüldüğünde, sıvı içerisinde yüzen bir cismin dengede kalabilmesi için, cismin suyun altında kalan hacmi ile sıvı yoğunluğunun çarpımının, cismin ağırlığına eşit olması beklenir ve bunu sağlayan kuvvet hidrostatik basınç olarak bilinir. Bu prensibin geçerli olabilmesi için, cismin sıvı içerisinde sıfır hızda yani hareketsiz olduğu varsayılmalıdır. Bu cismin bir tekne olduğu düşünülürse, su içerisinde hareket etmeye başladığında, su altı gövdesi etrafında oluşan akıştan kaynaklı olarak hidrostatik basınca ek olarak hidrodinamik basınçlar da meydana gelecektir. Bu hidrodinamik basıncın düşey bileşeni, düşük hızlarda vakum etkisi yaparak teknenin bir miktar batmasına sebep olur. Yüksek hızlarda ise, bu düşey bileşen yön değiştirerek ters yönde etki eder ve teknenin ağırlığının bir kısmını taşıyarak su üzerinde yükselmesini sağlar. Şekil 1.1 incelendiğinde bu tip su altı geometrisine sahip bir tekne, yüksek hızlarda daha çok hidrodinamik kuvvetler etkisinde olacağından kayıcı tip tekne adını alır [3].



Şekil 1. 1 Kayıcı forma sahip tekne geometrisi

Zamanla teknelerin hızının yükseltilmesi talebi ile karşılaşan araştırmacılar, form tasarımı ile ilgili olarak, dinamikleri anlama ve geometriyi, verimli bir tasarım geliştirmek için optimize etme üzerine odaklanmıştır. Ayrıca, bu talebin gerçekleştirilebilmesi için daha hafif ve daha yüksek güç üreten makinelerin de geliştirilmesi, hızlı tekne konusunu gündemde tutmaya devam etmiştir.

Bir teknenin inşası bittikten sonra beklenen hızlara ulaşabilmesi ancak dizayn aşamasında titiz ve doğru çalışma ile mümkündür. Tasarım aşamasında belirlenen makine gücü, inşa bittikten sonra istenen hızdaki direnci yenmelidir. Basitçe direnç tanımlanacak olursa, tekne gidiş yönünün tersine olacak şekilde etki eden kuvvet olarak düşünülebilir. En genel hali ile bir teknenin direnç tahminini yapabilmek için aşağıdaki yöntemlerden yararlanılabilir [4].

- Sistematik olarak oluşturulmuş direnç analizlerinin sonuçlarından yararlanarak,
- Model deneyleri ile direnç hesaplayarak,
- Sonuçları bilinen benzer geometrilerden yararlanarak,
- HAD yöntemleri ile analizler yaparak,
- Ampirik formüller kullanarak.

Akers [5] 1999 yılındaki çalışmasında, kayıcı teknelere etki eden kuvvetleri ve teknenin hareketlerinin tahmin edilebilmesi problemlerini incelemiştir. Problemi çözmek için, iki boyutlu dilim teorisine dayanan bir yöntemi izlemiştir. Daha sonra metodunu deney sonuçları ile karşılaştırarak doğrulamıştır. Kayıcı teknenin, çalışma sırasında baş-kıç vurma, dalıp-çıkma, yalpa pozisyonu ve küçük açılardaki ivmelenmeleri incelenmiştir.

Yüksek süratlerde kayma rejiminde ilerleyen bir teknenin stabil olarak rotasında kalması, daha düşük hızdaki teknelere nazaran önemle araştırılması gereken bir konudur. Katayama [6] kayıcı bir teknenin, stabil olmayan durumlarda oluşabilecek tehlikeli durumların olma olasılıklarını incelemeye çalışmıştır. Metot, hidrodinamik kuvvetlerin, yüksek süratlerde çeşitli durumlar sırasında (örneğin baş-kıç vurma, dalıp-çıkma, yalpa veya ön öteleme hareketi), deneysel verilerin de katkıları ile analiz edilmesine dayandırılmıştır. Son olarak, gerekli veriler toplandıktan sonra, aynı durumlar bir simülasyon programı ile de ölçülerek deneyler ile doğrulanmıştır.

Savitsky ve Brown [7] 1976 yılında yayınlanan çalışmalarında, kıç aynası bulunan teknelerde, kayma öncesindeki direnci, trim kontrolü sağlayan flapların etkisini, omurga eğikliğinin kayma verimine olan etkisini ve kayıcı teknelerin denizcilik performanslarını incelemişlerdir.

Savitsky vd. [8] 2007 yılındaki çalışmasında, 1964'te yayınlanan ve gemi inşaatı mühendisleri tarafından sıkça kullanılan direnç hesaplama metodunu geliştirmeye çalışmıştır. Geleneksel Savitsky metodunda, prizmatik kayıcı yüzeylerin, karakteristik hidrodinamik özellikleri incelenmiştir. Tekne ana boyutlarının, çene kalkıntı açısının, yükleme durumlarının, ağırlık merkezinin boyuna yerinin ve hızın tekne formuna hidrodinamik açıdan etkileri araştırılmıştır. Fakat ön bölümdeki serpinti kısmı ihmal edilmiştir. 1963 yılında bir dizi model testi yaptıran Clement, yüksek süratlerde serpinti trizlerinin, direnci yaklaşık %15 azalttığını saptamıştır [9]. Bu nedenle bu çalışmada ek olarak serpinti trizleri, çene kalkıntı açısı, trim açısı da hidrodinamik özelliklere etki eden parametreler olarak incelenmiştir.

Grigoropoulos ve Loukakis [10] 1995 yılında yaptıkları çalışmada kayıcı forma sahip tekne serisi geliştirmeyi amaçlamıştır. Öncelikle aynı ana özelliklere sahip 5 farklı form geliştirilmiş ve bu geometriler denizcilik ve direnç açısından incelenmiştir.

Kowalyshyn ve Metcalf [11] 2006 yılındaki çalışmalarında, Amerikan Sahil Güvenlik Kurumuna ait kayıcı formdaki 47 ft can kurtarma botunun (47 ft MLB) su altı formundan yararlanarak, o formdan daha hızlı ve daha büyük tekneler geliştirebilmeyi amaçlamışlardır. Geliştirilmesi düşünülen seride 4 model, 47 ft MLB ile birlikte 3 modelin boy-genişlik oranları değiştirilerek (3.24, 4.0, 4.47) ve bir modelde de kalkıntı açısı (β) 16.6 dereceden 20 dereceye çıkarılarak elde edilmiştir. Daha sonra da, sakin suda test edilen tipik küçük karakol botlarının sonuçları, hız-deplasman matrisi şeklinde sunulmuştur.

1982 yılında Keuning ve Gerritsma [12], 1963 yılında geliştirilen ve TBM 62 olarak bilinen seriyi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Eski seri 12.5 derecelik sabit kalkıntı açısına sahipti. Son yıllarda yapılan çalışmalar göstermiştir ki, denizcilik performansı, kayıcı forma sahip tekneler için önemli olmaya başlamıştır. Bu nedenle 12.5 derecelik kalkıntı açısına sahip seriyi, 25 derecelik sabit kalkıntı açısına çıkararak tekrar model testlerini yapmışlardır. Çalışma sırasında Froude sayısı 0.75 ile 3 arasında değiştirilerek araştırma yapılmıştır. Son olarak ana boyutların, ağırlık merkezinin boyuna yerinin ve deplasmanın, hidrodinamik özelliklere etkisi incelenmiştir.

Taunton vd. [13] yeni bir çeneli form serisi yaklaşımı yapılan çalışmada, sakin suda ve dalgalı denizde hidrodinamik performanslar incelenmiştir. Direnç, dinamik trim ve dalıp çıkma hareketleri deneysel çalışmalarla ölçülmüştür. Tasarım parametrelerinin performansa olan etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde su altı formunda enine yapılan kademelerin direnci düşürdüğü gözlenmiştir. Boy deplasman oranının azalmasının dinamik trim açısının artmasına dolayısı ile ıslak yüzeyin azalmasına sebebiyet verdiği gözlenmiştir. İkinci bölümde ise su altında yapılan kademelerin ivmelenmelere etki etmediği gözlenmiştir.

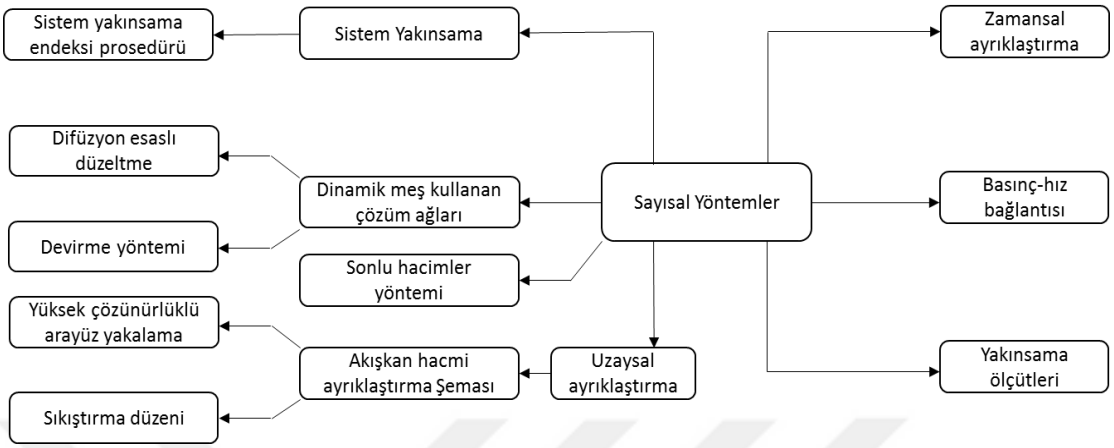
Sayısal Yöntemler

Teknolojik gelişmeler, ihtiyaçların karşılanması ve yenilenme amacıyla birbirini takip etmiştir. Son zamanlarda ortaya çıkan dijital sistemler, elbette tasarım yapabilme ve diğer gereksinimleri karşılayabilme noktasında son derece etkili olmaktadır.

Söz konusu dijital sistemler öncesinde gelişim sürecine bakıldığında karşımıza belli dönüm noktaları çıkmaktadır. 18. yüzyılın sonlarına doğru Euler, Euler-Lagrange denklemlerini entegre eden analitik akışkan dinamiğini matematiksel bir bilim olarak öngörmüştür. Buna ek olarak 20. yüzyıl başlarında gerçek sıvıların davranışını açıklamak için en az yedi farklı analitik model kullanılmıştır. 1945 yılından itibaren, Von Neumann, "büyük ölçekli, yüksek hızlı bilgisayarların yardımı ile" bu modellerle ilişkili denklemlerin yaklaşık çözümünü aritmetik hale getirmeye çalışmıştır. Böylece, sayısal akışkanlar dinamiği, matematiksel bir bilim olarak öngörülmüştür. Söz konusu öngörüler ve çalışmalar, akışkanların niceliksel yönden incelenmesi ve teorilere dayandırılması açısından etkili olmuştur [14].

1950’ li yılların başında bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeler, hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin de kullanılabilirliğinin artmasına neden olmuştur. Sonlu farklar ve sonlu elemanlar gibi farklı yöntemler bu metodun temelini oluşturmakla beraber, kısmi diferansiyel denklemlerin çözümlerinde kullanılmışlardır. Duvarın gerilme analizlerini, sonlu farklar yöntemi kullanarak 1910 yılında yapan Richardson, öncülerden biri olarak kabul edilir. 1956 da Turner ise, sonlu elemanlar metodu kullanarak bir uçak kanadındaki gerilmeleri incelemiştir [15].

Akışkanlar mekaniği hareket denklemlerinin çözümü için kullanılan sayısal yöntemler, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) olarak adlandırılır. Sayısal akışkanlar dinamiği hakkında önem arz eden ve yöntemleri içeren başlıklar Şekil 1.2'de gösterilmiştir [16].



Şekil 1. 2 Sayısal yöntemler [16]

HAD'nin 20. yüzyılın başlarından itibaren genellikle otomobil veya hava taşıtlarındaki hava akışını analiz etmek için kullanıldığı bilinmektedir. HAD ile sağlanan bilgi sayesinde, farklı açılarda döndürülebilen ve görüntülenebilen fiziki bir problemin, üç boyutlu görsel bir biçimde algılanması sağlanabilmiştir.

Bu günlerde akış analizleri, ısı transferi ve benzer fiziksel olaylar, HAD uygulamalarının kullanıldığı konular halini almıştır. Dolayısı ile bu yöntem, endüstriyel veya bilimsel araştırmalarda geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bunlardan bazılarını aşağıdaki gibi özetleyebiliriz;

- Çevre mühendisliğinde çevre kirliliğinin araştırılması,
- Biyomedikal mühendisliğinde kan akışının incelenmesi,
- Uçak ve uçakların aerodinamiği,
- Elektrik ve elektronik mühendisliğinde kullanılan devrelerin ve ekipmanların soğutma sistemlerinin incelenmesi,
- Gemilerin ve su taşıtlarının hidrodinamiği,
- Güç üreten sistemler ve yanma olayları,
- Doğa olaylarının simülasyonları,

- Otomotiv sanayisinde aerodinamik incelemeler için HAD kullanımını sıkça görmekteyiz.

Gemi Dizaynında HAD Uygulamaları

Son yıllarda verimi en yüksek seviyelere çıkarabilmek amacıyla, teknolojik gelişmelerin takip edilmesi ve istifade edilmesi gerektiğinden tasarımlarda hem sayısal yöntemlerin hem de deneysel verilerin bir arada kullanılması kaçınılmaz hale gelmiştir. Gemi inşaatı sanayinde de, otomotiv gibi diğer sanayi dallarında olduğu gibi HAD uygulamalarının örnekleri görülmektedir.

Hidrodinamik değerlendirme gemi dizaynı açısından önemli bir adımdır. Tasarımcının bir tasarımın verilen gereksinimleri karşılayıp karşılamayacağını belirlemesine olanak tanır. Geçmişte tasarlanan benzer gemilerden edinilen tecrübelere dayanmak, ampirik veriler kullanmak veya ölçeklendirilmiş prototip testleri yapmak gibi çeşitli yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, model testlerinde, maliyetli bir test tesisi ve uygun elektronik ekipmanın kullanılması gerekmektedir. Fiziksel deneylere alternatif olarak, hidrodinamik performans, bilgisayar destekli simülasyonlarla da değerlendirilebilmektedir. Hala geliştirilmekle birlikte, HAD teknikleri kullanan sayısal simülasyonlar, genellikle fiziksel deneylerin sayısını azaltmak ve zaman zaman yerini almak için sıklıkla kullanılmaktadır. HAD, potansiyelinden dolayı, kısa zamanda ayrıntılı öngörüleri, daha düşük bir maliyetle elde etmeye olanak sağlamaktadır.

HAD alanındaki araştırmalar, son on yılda büyük ilerlemeler kaydetmiştir. Bunun en önemli sebebi bilgi işlem gücü artışının, sıvı davranışını düzenleyen denklemlerin çözülmesini mümkün kılmasıdır. Analitik olarak çözülemeyen bu denklemler, bir bilgisayar tarafından işlenen sayısal yöntemleri kullanarak hesaplanabilir.

HAD aynı zamanda bir cisim etrafındaki akışın, bir dizi denklemin çözümü ile simule edildiği bir yöntem olarak da adlandırılabilir. Sonuç olarak günümüzde HAD, iç ve dış akışların modellenmesi ve akış özelliklerinin tahmin edilmesinde kullanımı hızla artan bir yöntemdir.

HAD yöntemleri gemi inşaatı alanında oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. HAD yöntemlerinin gemi inşaatı alanında başlıca uygulama alanları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Gemi formu ve takıntıların hidrodinamik optimizasyonu
- Gemi etrafındaki dalga formunun ve deformasyonlarının tespiti
- Tekne ve takıntı direnç analizleri
- Gemi hareketleri analizleri
- Pervane etrafındaki akış; pervane, dümen ve tekne etkileşimleri
- Kavitasyon, iz dağılımı
- Akış kaynaklı akustik analiz
- Yelken etrafındaki akışın analizi
- Kayıcı tekneler üzerindeki dinamik kuvvetlerin hesabı
- Baca gazı akışları
- Yatlarda ısı konforunun analizi

Bu konu ile ilgili geçmişten bugüne yapılan araştırmalar incelendiğinde Harlow ve Welch [17], kapalı kaplardaki çalkantı probleminin modellenmesinde, Navier-Stokes denklemlerini çözerken, ilk kez serbest su yüzeyi sınır koşulunu kullanmışlardır. Serbest yüzey takibi için MAC (işaretleyici ve hücre) yaklaşımını geliştirmişlerdir. Bu yaklaşım, serbest yüzeyde bulunan parçaların, yüzeyden ayrılmadığı kabulü yapılarak, parçacık takibi temeline dayanmaktadır. Hirt ve Nichols [18] başka bir serbest yüzey modelleme tekniği olan VOF şemasını 1981 yılında geliştirmişlerdir.

Serbest yüzeyin modellenmesi ile ilgili çalışmaların artmasından sonra, bir gemi etrafındaki akışın modellenebilmesi, gemi dizaynı konusundaki araştırmacıların odak noktası olmuştur. Bu konu ile ilgili olarak ilk çalışma, Miyata ve Inui tarafından geliştirilen ve bir geminin baş tarafındaki akışı modelleyebilen TUMMAC yazılımı gösterilebilir. Bu yazılım temel olarak sonlu farklar yöntemi kullanarak, laminer Navier-Stokes denklemlerinin çözümüne dayanmaktadır [19].

Miyata, Sato ve Baba, gemi formunu temsil eden çözüm ağının ve serbest yüzey modellemesinin birlikte yapılabildiği WISDMAN adlı kodu geliştirdiler. Daha sonra bu kod daha da geliştirilerek, sonlu hacimler yöntemini kullanabilir hale getirilmiştir [19].

2000 li yıllarda, araştırmacılar tarafından üretilen ticari veya bedelsiz yazılımların artması ile denizcilik alanında HAD uygulamaları ciddi bir artış göstermiştir. Günümüzde, sadece gemi etrafındaki akış değil, spesifik bir çok problem de HAD yöntemleri ile çözülebilmektedir. Örneğin pervane üzerindeki basınç dağılımı, dümene gelen kuvvetler, tüm takıntıların gemi ile birlikte analizleri gibi birçok problem çözüme kavuşturulabilmektedir.

Bertram [20] HAD yöntemlerinin, gemi dizaynında karşılaşılan problemlerin çözümü için uygun teknikler olduğuna değinmiştir. Dejhalla ve Prpic-Orsic [21] 2006 yılında yaptıkları çalışmada HAD uygulamalarını, deneysel, sayısal ve teorik gelişmeleri göz önüne alarak, gemi hidrodinamiğindeki gelişmeleri ortaya koymaya çalışmıştır.

1998 yılında Ohmori, sonlu hacimler yöntemini temel alan yazılımı ile gemi manevra hareketlerini incelemiştir. Zaman alanında, Navier-Stokes denklemlerinin, gemi geometrisine uygun eğrisel sınır tabakada ayrıklaştırılması ile sayısal çözüm gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçların deneysel veriler ile benzerlik göstermesi yazılımın başarısını ortaya koymuştur [22].

Tahara ve Stern [23] ise 1996 yılında yaptıkları çalışmada, gemi sınır tabakasını, izi ve dalga deformasyonlarını hesaplamışlardır. RANS ve süreklilik denklemleri, Baldwin-Lomax türbülans modeli ile birlikte serbest yüzey sınır koşulunu ekleyerek, tekne ve serbest yüzey çözüm ağını birlikte çözmüştür. Sonuçlar, düşük ve yüksek seyir hızlarında blok katsayısı 0.6 olan seri 60 gemilerinin sonuçları ile karşılaştırılarak yakınsamalar gösterilmiştir.

Yang vd. [24], trim ve dalıp-çıkma hareketlerinin de etkisini hesaba katarak, homojenlik göstermeyen bir ağ yapısı ile, serbest yüzey civarındaki gemi etrafında oluşan dalgaları modellemişlerdir. Bunu yaparken paralel çözücülerden yararlanmışlardır. Bu paralel çözücülerin kapsamında; 3 boyutlu sıkışamaz akımın yansıtılması, serbest yüzey için iki boyutlu yayınım denklemlerinin çözümü ve denklemlerin sıralanması yer almaktadır. Sonuçların deneysel verilerle karşılaştırması yapılmış ve tutarlılık gösterdiği görülmüştür.

Gemi dizaynında, HAD yöntemlerinin sadece direnç tahmini için kullanıldığını düşünmek yanlış olur. Bu metot ile birlikte gemi hareketlerinin, manevra kabiliyetlerinin de incelenebildiği bilinmektedir. Bu kapsamda Azcueta, sahil güvenlik botları için daimi ve daimi olmayan serbest yüzey RANS simülasyonlarını gerçekleştirmiştir. Dalıp-çıkma hareketleri ve dinamik trim hesaba katılarak, en düşük hızdan maksimum hıza kadar çözümleri gerçekleştirmiştir. Sayısal yöntemlerle incelenen gemi hareketleri deneylerle doğrulanmıştır [25].

Tekne tasarımcıları tarafından çoğunlukla kullanılan geleneksel formlara alternatif formlar, son yıllardaki gelişmelerle birlikte artmıştır. Seif ve Amini yüksek süratli tekne formları için alternatif daha yüksek verime sahip formlar üzerine çalışmalar yürütmüşlerdir. 2004 yılındaki çalışmalarında, yüksek süratler için popüler olan katamaran ve kayıcı tipteki formların, yüksek süratlerdeki davranışlarını inceleyerek daha verimli formlar elde etmek adına fikir vermeye çalışmışlardır [26].

Ghassemi vd. [27] bu çalışmalarında Savitsky metodunu kullanarak su altı kademeli ve kademesiz olarak tasarlanmış kayıcı formların hidrodinamik performanslarını araştırmışlardır. Efektif olan form parametrelerini inceleyerek formların hidrodinamik karakteristikleri açısından değerlendirmeler yapmışlarıdır. Son olarak sonuçları HAD analizleri ile doğrulamışlardır. Yapılan çalışma sonucunda kademesiz formda kalkıntı açısının artmasının direncin ve trim açısının artmasına neden olduğunu gözlemişlerdir. Ayrıca ağırlık merkezinin kıça kaymasının yüksek hızlara direnci azaltırken Fn=1.4 ten daha düşük hızlarda direnç artışına sebep olduğunu belirlemişlerdir. Kademeli olan formda ise kademe yüksekliğinin artışının tirim açısının ve direncin artışına sebebiyet verdiği görülmüştür. Ayrıca kademenin boyuna yerinin kıç aynadan uzaklaştıkça trim açısının azalmasına fakat direnç artışına neden olduğunu saptamışlardır.

2010 yılında Fu vd. tarafından yapılan çalışmada derin V forma sahip kayıcı tekneler araştırılmıştır. Direnç, dalıp-çıkma, trim, hidrodinamik basınçlar, baş ve kıç taraftaki dalga deformasyonları deneysel olarak incelenmiştir. Model tekne, deney tankında Fn=0.31-Fn=2.5 hız aralıklarında çekilmiştir. Form 7 ve 13 derecelik iki trim ayarlayıcı ile birlikte testlere tabi tutulmuştur. Sonuçlar HAD ile gerçekleştirilen çözümler ile karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır [28].

Çakıcı vd. [29] çalışmalarında yüksek süratli kayıcı formların hidrodinamik performansları HAD tabanlı yazılım kullanılarak araştırmışlardır. Direnç ve dinamik trim açıları, Savitsky metodu ile karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışmada çözüm ağı sıkılığı çalışması yapılarak üç farklı çözüm ağı denenmiştir. Fn=0.4 'te direnç açısından yakınsayan değerler görülerek çözüm ağı yapısına karar verilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda Savitsky ile HAD analiz sonuçlarının uyum gösterdiği saptanmıştır.

HAD ile yapılan çözümlerin kayıcı formlara olan uygunluğunun araştırıldığı çalışmada Birzzolara ve Serra, sabit 20 derece kalkıntı açısına sahip prizmatik bir formu, farklı trim açıları ve ıslak boylarda çözerek değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Elde edilen direnç, hidrodinamik kaldırma kuvveti ve boyuna trim momenti sonuçları model deneyleri ve Savitsky metodu ile karşılaştırılarak uyumluluk test edilmiştir. Çalışma sonucunda hesaplanan hidrodinamik kaldırma kuvveti ve direnç değerleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında %5 ile %10 arasında bir hata payı görülmüştür. Fakat bu hata oranları ampirik formüllere göre daha düşük olduğundan kullanışlı bir yöntem olduğu konusunda görüş bildirilmiştir [30].

Fu vd. [31] tarafından yapılan çalışmada HAD yöntemleri kullanılarak yüksek süratli kayıcı bir forma etki eden sakin suda ve dalgalı durumlardaki hidrodinamik kuvvetler, momentler, basınçlar ve ivmeler araştırılmıştır. Çalışma sırasında kullanılan HAD yazılımı olan CFDShip-Iowa ve NFA ile yapılan çözümler neticesinde deneysel sonuçlar ile yakınlık kurulabilmiştir. Bununla birlikte sakin su için yapılan çalışmada FN>0.6 iken trim açılarında ve Fn>0.9 iken direnç değerlerinde deneysel sonuçlar ile ortaya çıkan farklılıklar göze çarpmıştır.

Düzgün dalgalar ile yapılan çalışmada ise dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri deneysel sonuçlarla yakınlık göstermiştir.

Thornhill vd. [32] bir dizi model deneyi yaparak sonuçlarını yayınlamışlardır. HAD tabanı çözümlerin doğrulama çalışmalarında kullanılmak üzere yapılan çalışmada, sakin suda yapılan farklı yükleme kondisyonlarındaki ve hızlarda dinamik trim, direnç ve yer değiştirmeler incelenmiştir. Yüksek süratli kayıcı formlar için yapılan çalışmada ıslak alan

ve boy deneysel çalışmada video ile tespit edilerek diğer araştırmacılara veri olarak sunulmuştur.

1.2 Tezin Amacı

Günümüzde hala büyük bir kullanım kitlesi bulunan geleneksel gemi dizaynı, gelişen bilgisayar teknolojisi, yazılım ve hesaplama teknikleri sayesinde verim açısından sorgulanır duruma gelmiştir. Geleneksel yöntemlerde, tecrübeye dayalı veya benzer gemilerden elde edilen form, dizayn spiralindeki aşamalar takip edilerek, istenilen özellikleri sağlayıp sağlamadığı kontrolü yapılarak çözüme ulaşmaya çalışılır. Fakat oluşturulan formun fiziki deneylerle veya prototip ile kontrolü oldukça zahmetli ve maliyetlidir. Bu sebeplerden dolayı geleneksel yöntemlerde amaç en iyiyi bulmak değil, istenilen özellikleri sağlayabilen formu elde etmektir.

Yeni nesil tasarım yöntemlerinde ise, verimi arttırabilmek için su altı geometrilerinin gerçekteki davranışlarını tahmin etmek amacı ile, bilgisayar ortamında benzetim yapılması yolu kullanılmaktadır. Özellikle yüksek süratlerde tekne formu için artan belirsizlikler, bu yöntemlerin kullanılmasını iyi bir sonuç için mutlak hale getirmektir. En iyi formu yakalama noktasında simülasyon teknikleri tek başına yeterli değildir. Çünkü simülasyon programları, bize sadece tekne formunun hidrodinamik açıdan özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Formu iyileştirme sürecinde kullanıcı tarafından, geometrinin nasıl manipüle edildiği de verim açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışmanın esas amacı, yüksek süratli bir form tasarımı gerçekleştirmek isteyen tasarımcılara, seçtikleri amaç fonksiyonuna en uygun teknenin nasıl geliştirileceği ile ilgili bir metodoloji sunmaktır. Bu metot sayesinde kullanıcılara, otomatikleştirilmiş bir optimizasyon algoritmasını işleterek, verimli bir tasarım gerçekleştirme imkanı sunmaktır.

Diğer bir amaç da, metodolojinin işlerliğini test edebilmek amacı ile bir uygulama yapmaktır. Uygulama sırasında, öncelikli olarak belirlenen tekne tipinin parametrik modellemesi gerçekleştirilecektir. Parametrik modelleme sayesinde, sistematik varyasyon kullanılarak birçok tekne üretilebilecektir. Bu aday formlar, HAD yöntemleri kullanılarak bütünleşik ve otomatikleşmiş bir sistem ile, hidrodinamik analizleri yapılarak

kıyaslanabilecektir. Kıyaslama, bir optimizasyon yöntemi kullanılarak en iyiye ulaşma amacını taşıyacaktır. Her form öncelikle hasarsız stabilite kısıtlarına göre incelenecek ve eğer kriterleri sağlıyorsa, belirli hızlarda direnç ve denizcilik açısından analiz edilerek, sonuçları kayıt altına alınacaktır. Bu sonuçlar neticesinde, dizayn kısıtlarını göz önüne alarak, belli deplasman gruplarında optimum tekne ailesi elde edilmeye çalışılacaktır.

Yukarıda aktarılan amaçlar doğrultusunda;

- Bölüm 1'de daha önce bu konularda yapılmış araştırmalar ve çalışmalar incelenerek bir yol haritası oluşturulmaya çalışılmıştır.
- Bölüm 2'de tezde kullanılacak olan yöntemlerin temelini oluşturan denklemlerden ve matematik modelden bahsedilecektir.
- Bölüm 3'te araştırılması düşünülen tekne tipi için, ön dizayn çalışması yapılarak geometrik sınırlar belirlenecek ve bu çerçevede parametrik ana form oluşturulacaktır.
- Bölüm 4'te yüksek süratli form geliştirebilmek için bir metodoloji ortaya konulmaya çalışılacaktır. Geliştirilen algoritmaya uygun, otomatik olarak direnç, denizcilik ve stabilite analizlerinin yapılabilmesi için tüm yazılımlar ortak bir çatı altında birleştirilecektir. Bu aşamada teknelerin sistematik varyasyona hazır hale gelebilmesi için, sabit, değişken parametreler ve kısıtlar belirlenecektir.
- Bölüm 5'te tüm varyantların 3 farklı hız için sakin su direnç analizleri gerçekleştirilirken, kayıcı rejime karşılık gelen bir hız için, hem direnç hem denizcilik analizleri gerçekleştirilecektir. Varyasyon tekniği ile incelenen parametrelerin, hidrodinamik özelliklere olan etkisi araştırılacaktır. 3 farklı hız için yapılan direnç analizinin sonuçları, regresyon analizi ile çözüm uzayının sınırlarında, bir direnç kıyas formülasyonu oluşturulacaktır. Kayıcı rejime denk gelen hız için yapılan hidrodinamik analiz sonuçları ise, bir optimizasyon yöntemi kullanılarak değerlendirilecek ve belli deplasman gruplarında optimum tekne ailesi oluşturulacaktır.
- Bölüm 6' da ise çıkan sonuçlar genel olarak değerlendirilecek ve ileride bu konuda yapılacak çalışmalara fikir vermesi açısından yorumlar yapılacaktır.

1.3 Hipotez

Günümüzde denizcilik alanında verimli bir tasarım süreci geçirerek iyi bir ürüne ulaşma hedefi hala önemini koruyan bir konudur. İyi bir ürün elde etme şansının, ancak iyi bir tasarım süreci geçirmekle mümkün olabileceği, bu konu ile ilgilenen herkes tarafından kabul görmektedir.

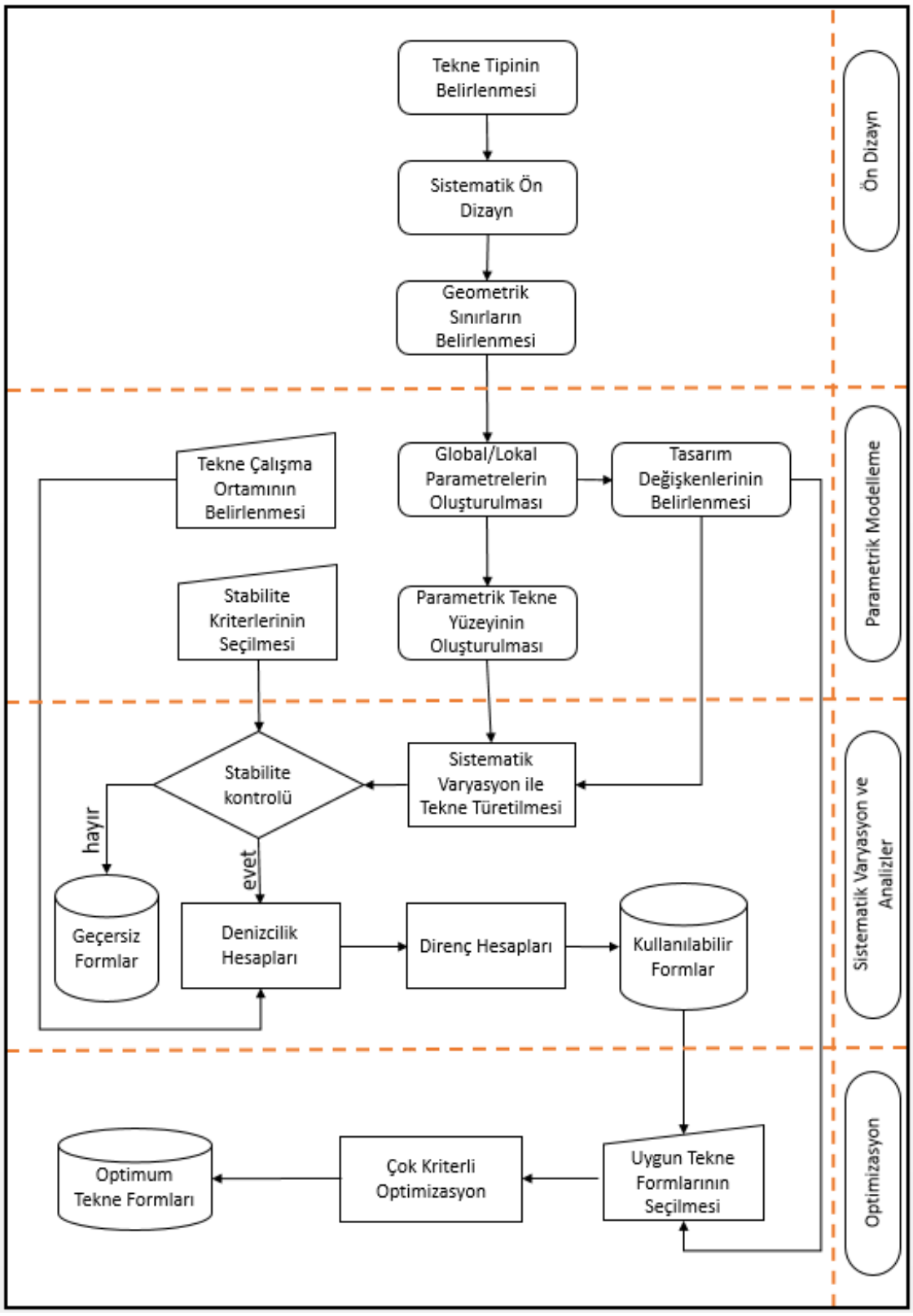
Verimli bir tasarım sürecini etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Zaman, maliyet ve etki derecesi bu parametrelerden en önemlileridir. Dolayısı ile, optimum tekne formlarını en az zamanda, en düşük maliyet ile elde edebilmek ana konudur. Bunun için günümüzde çeşitli yöntemler geliştirilmeye ve uygulamaya çalışılmaktadır.

Yapılan bu çalışmada, bu temel konu göz önünde bulundurularak güncel ve hızlı yazılımlar sayesinde, tasarım problemleri için yeni bir yaklaşım ortaya konularak, tasarım sürecindeki verimin arttırılması hedeflenecektir. Bu yaklaşımın temeli parametrik model üzerine kurularak, çeşitli analiz metotları ile sonuçlar elde edilecektir. Parametrik model otomatikleştirilmiş bir optimizasyon algoritmasına uyumluluğu sebebi ile önemlidir. Parametrik model kullanılarak sayısal girdiler ile tekne formları sistematik olarak deforme edilip, analiz sonuçları karşılaştırılarak en iyiyi arama prosedürü gerçekleştirilebilecektir. Sistemin otomatik olarak işleyebilmesi tasarım veriminin artmasını sağlayan en önemli özelliktir. Sistemin kıyas veya karşılaştırma üzerine kurulu olması da, çok fazla teknik bilgiye ihtiyaç duymadan sonuç alınabilmesini olanaklı kılacaktır.

Kurulan sistem esnek bir yapıya sahiptir. Örneğin bu çalışma için uygulama kısmında yüksek süratli tekneler ele alınacak iken, parametrik model değiştirilerek farklı tipteki tekneler içinde sistem işler olacaktır.

Bu metodoloji sayesinde ele alınan form tipleri açısından oldukça geniş bir veri tabanı oluşturulabilecek ve bu veri tabanı üzerinden de ampirik bağıntılar üretilerek kullanıcıya çok kısa sürede çözümler sunulabilecektir.

Bu bağlamda dört ana başlık altında toplayabileceğimiz metodun akış şeması şekil 1.3'te görülmektedir.



Şekil 1. 3 Optimizasyon metodolojisi akış şeması

BÖLÜM 2

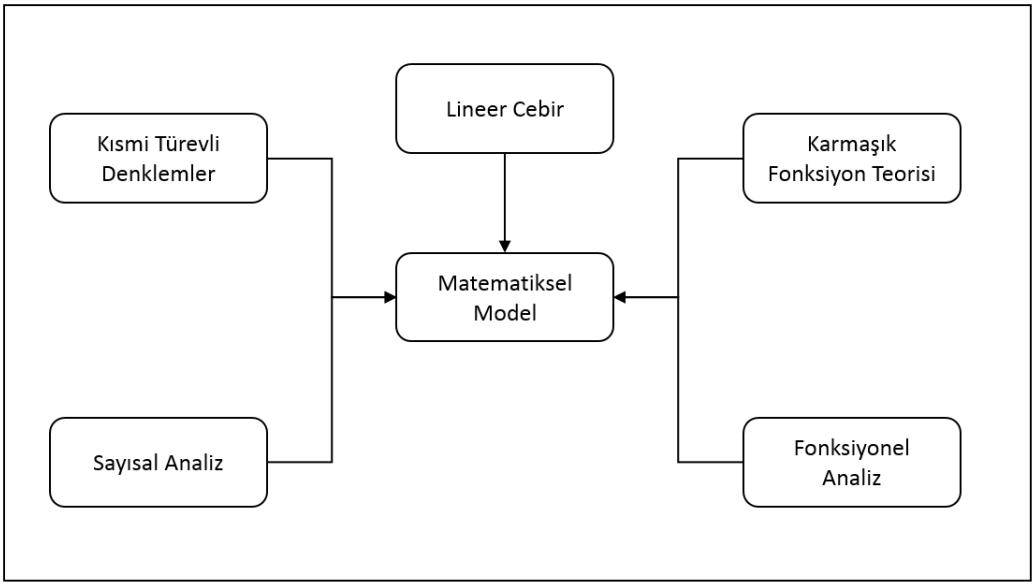
MATEMATİKSEL MODELLER

Matematiksel modelleme, matematik problemlerini, matematiksel yöntemler kullanarak değiştirme sürecidir. Modellemenin, teorik ve/veya sayısal prosedürler neticesinde, matematiksel olarak ele alınması, bazı problemlerin çözümü için gereklidir.

Genellikle sayısal prosedürler, problemi çözmenin ve en azından yaklaşık olarak göz önüne alınmış belirli soruları cevaplamanın tek yoludur. Sayısal araçların yeterli doğrulukta olması halinde, yaklaşık çözüm ile gerçek çözüm arasındaki hata payı, problemin cevabını etkilemez.

Bir problem için oluşturulan matematiksel modelde, sonuçların ilgi düzeyi ve doğruluğu, deneysel ölçümlerle kontrol edilmelidir. Bu çalışma, problemin uzmanları tarafından yapılmalıdır. Matematiksel sonuçlar, teorik tahminlerle, deneylerin sonuçlarına yeterince uyuyorsa, modelin doğruluğu test edilmiş olur [33].

Matematiksel modelleme ile ilgili bazı temel unsurlar şekil 2.1'de gösterilmiştir. Bu çalışmada, daha çok tezin altyapısını oluşturan sayısal analiz kısmından bahsedilecektir.



Şekil 2. 1 Matematiksel modellemedeki temel unsurlar

2.1 Akışkanlar Mekaniğinin Temel Diferansiyel Denklemleri

Hareketin diferansiyel denklemlerinin çözümü oldukça zordur. Bu nedenle problem düzgün bir şekilde analiz edildikten sonra, sonucu, kabul edilebilir düzeyde hatalarla bulabilecek sadeleştirmeler yapılabilir. Bu sadeleştirmeler konuyu daha basit hale getirebilir.

Bir kontrol hacmi için temel denklemler integral formunda yazılır. İntegral denklemler, bir akış alanının davranışıyla ve çeşitli nesneler üzerindeki etkisiyle ilgilendiğimizde son derece yararlıdır. Bununla birlikte, integral yaklaşım, akış alanı hakkında ayrıntılı bilgi birikimi elde etmemizi sağlamaz.

Ayrıntılı bilgi elde etmek için, akışkan hareket denklemleri diferansiyel formda uygulanmalıdır. Bu bölümde, kütlenin korunumu, momentumun korunumu gibi diferansiyel denklemler incelenecektir.

2.1.1 Kütlenin Korunumu

Kütlenin korunumu denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \qquad (2.1)$$

Diferansiyel boyutta inceleme yapıldığından sonsuz küçük bir kontrol hacminde kütlenin korunumu, yoğunluk ve hızın bağımlısı olması dışında farklı bir kabul gerektirmediğinden süreklilik denklemi olarak da bilinir. Bu bağıntı daha kısa yazılmak istenirse;

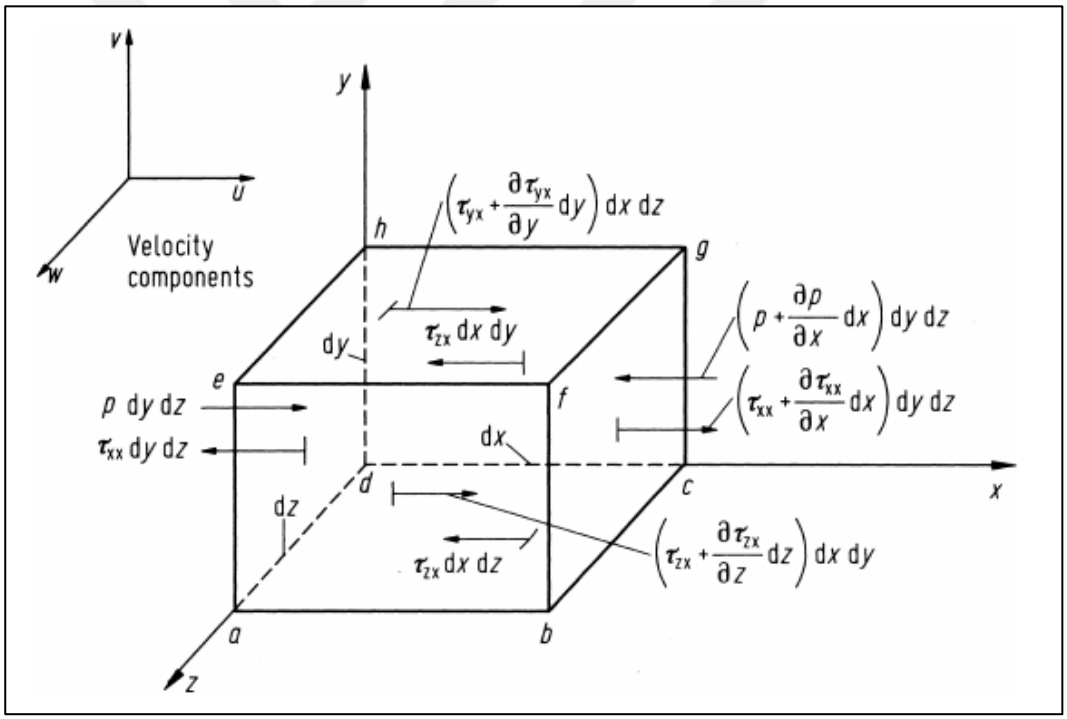
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \vec{V}\right) = 0 \qquad (2.2)$$

şeklinde de ifade edilebilir.

2.1.2 Momentumun Korunumu

Aşağıda ifade edilen Newton'un 2. Kanunu, Şekil 2.2'deki hareketli akışkan elemana uygulandığında, akışkan eleman üzerindeki net kuvvetin, kütlenin elemanın hızlanma oranına eşit olduğunu açıklar.

$$F = ma \qquad (2.3)$$



Şekil 2. 2 Akışkan içindeki sonsuz küçük partikül

Bu bir vektör ilişkisidir ve bu nedenle x, y ve z eksenleri boyunca üç skaler ilişkiye bölünebilir. Sadece Newton'un 2. Kanununun x-bileşenini düşünelim, burada F_x ve a_x, kuvvet ve ivmenin skaler x-bileşenleri olsun. Hareketli akışkan elemanı için şunu yazabiliriz [34]:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho u \vec{V}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2.4)$$

Benzer şekilde yukarıdaki denklem şöyle yazılabilir:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho v \vec{V}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho w \vec{V}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (2.6)$$

2.1.3 Newton Tipi Akışkan ve Navier-Stokes Denklemleri

Momentum dengesine ve yeniden düzenlemeye dahil edilen stres terimleri eklenerek Navier-Stokes denklemleri elde edilir. Bir Newton akışkanı için, viskoz gerilimler, eleman gerinim oranları ve viskozite katsayısı ile orantılıdır.

$$\partial\tau_{xx} = 2\mu\frac{\partial u}{\partial x} \qquad \partial\tau_{yy} = 2\mu\frac{\partial v}{\partial y} \qquad \partial\tau_{zz} = 2\mu\frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.7)$$

$$\partial\tau_{xy} = \partial\tau_{yx} = \mu\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \quad (2.8)$$

$$\partial\tau_{xz} = \partial\tau_{zx} = \mu\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right) \quad (2.9)$$

$$\partial\tau_{yz} = \partial\tau_{zy} = \mu\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) \quad (2.10)$$

Burada μ viskozite katsayısıdır. Yoğunluk ve viskoziteye sahip bir Newton akışkanı için, momentum denkleminde kayma gerilmelerini yer değiştirerek aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) = \rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) \quad (2.11)$$

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) = \rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) \quad (2.12)$$

$$\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) = \rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) \quad (2.13)$$

Navier-Stokes denklemlerinde analitik çözümler yalnızca düz plakalar arasındaki laminer akış gibi sınırlı sayıda durum için geçerlidir. Mühendislik uygulamalarındaki türbülanslı akışlar için analitik çözümler yoktur ve Navier-Stokes denklemleri sayısal olarak ele alınmalıdır. Doğrudan sayısal simülasyon ile çözülürlerse, akışın hız alanı elde edilir. Bununla birlikte, geniş bir zaman ve uzunluk ölçeklerinde türbülans meydana

geldiğinden, doğrudan sayısal simülasyon, akışın tüm detaylarını yakalamak için çok yüksek zamansal ve mekânsal çözünürlüklere ihtiyaç duyar. Dolayısıyla, doğrudan sayısal simülasyon, akademik araştırma veya basit akış simülasyonu gibi özel uygulamaların sınırlanmasına neden olacak şekilde pahalıdır ve zaman alıcıdır [35].

2.1.4 Akışkanlar Mekaniğinin Temel Denklemlerinin Kapalı Formu

Kütlenin korunumu ve momentumun korunumu ile alakalı olarak belirtilmiş olan denklemler aşağıdaki şekilde kapalı formda gösterilebilirler:

Kütlenin korunumu;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div\left(\rho \vec{V}\right) = 0 \tag{2.14}$$

Momentumun korunumu;

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + div\left(\rho u \vec{V}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + div(\mu grad u) + S_{Mx} \tag{2.15}$$

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + div\left(\rho v \vec{V}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + div(\mu grad v) + S_{My} \tag{2.16}$$

$$\frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + div\left(\rho w \vec{V}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + div(\mu grad w) + S_{Mz} \tag{2.17}$$

Genel olarak ise;

$$\frac{\partial (\rho \phi)}{\partial t} + div\left(\rho \phi \vec{V}\right) = div(\Gamma grad \phi) + S_{\phi} \tag{2.18}$$

2.2 Sayısal Analiz

Kompleks geometriler etrafındaki akışın analizi yapılmak istendiğinde, çözüm için sayısal yöntemlerin kullanılması günümüzde çokça rastlanır bir durumdur. Çünkü bu karmaşık problemleri sayısal yöntemler ile aritmetik işlemlere dönüştürerek daha basit bir hal almaları sağlanır. Mühendislik açısından kabul edilebilir hata oranları ile çözümler gerçekleştirilebilir.

Sayısal yöntemlerin bir örneği olan sonlu farklar metodu, fiziksel bir denklemdeki kısmi türevleri, birbirinden sonlu uzaklıklarda konumlandırılmış noktasal değerler arasındaki farklarla ifade etmeye dayanır.

Farklı sınır koşulları, karmaşık geometriler ve homojen olmayan sistemlerde, sonlu farklar yöntemi kullanışlılığı zorlaşmaktadır. Bu gibi durumlar için sonlu elemanlar yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem doğrusal veya doğrusal olmayan tüm kısmi diferansiyel denklemlere uygulanabilir.

2.2.1 Sonlu Hacimler Yöntemi

Sonlu hacimler yöntemi, sürekli bir kısmi diferansiyel denklemi, bir dizi cebirsel denklem içine ayıran sayısal bir yöntemdir. İlk adım, hesaplama alanını, sonlu sayıda hacimlere bölmektir. Daha sonra, her bir hacimde, sapma teoremi kullanılarak bütünleştirilir ve her hücre için bir cebirsel denklem oluşturulur. Sonlu hacimler yöntemi ölçülüdür, yani bir hücrenin sınırlarından çıkan akışın, aynı sınır boyunca bitişik hücrenin içine girdiği akışa eşit olduğu görülür .

Genel olarak, sonlu hacimler yönteminin adımları şunlardır [33]:

- Sorunlu alanın kontrol hacimlerine ayrılması.
- Her bir kontrol hacmi için integral denge denklemlerinin formüle edilmesi.
- İntegrallerin sayısal integrasyonla yaklaştırılması.
- Düğüm değerleriyle enterpolasyon sonucu fonksiyon değerlerinin ve türevlerinin yaklaştırılması.
- Ayrık cebirsel sistemin bir araya getirilmesi ve çözümü.

Sonlu hacimler yöntemi kullanılarak aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho dV + \int_S \rho(v - v_b)\cdot ndS = 0 \tag{2.19}$$

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho u_i dV + \int_S \rho u_i(v - v_b)\cdot ndS = \int_S(\tau_{ij} i_j - p i_j)\cdot ndS + \int_V \rho b_i dV \tag{2.20}$$

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho\phi dV + \int_S \rho\phi(v - v_b)\cdot ndS = \int_S \Gamma\nabla\phi\cdot ndS + \int_V \rho b_\phi dV \tag{2.21}$$

2.2.2 Potansiyel Teori

Potansiyel teori bir gemi etrafındaki akış olarak düşünüldüğünde, koordinat sisteminde, akış yönünün x, sancak tarafın y ve üst tarafın da z olduğu kabul edilir. Koordinat sisteminin orijin noktasının ise gemi su hattında ve ortasında yer aldığı düşünülür. Eğer tekne yüzeyine yakın bir bölgede hız U olarak kabul edilirse, sonsuz hızla ilerleyen bir tekne için hız, tekne hızına eşit olarak U_∞ kabulü yapılır. Bunun yanında potansiyel teoride yapılan kabuller de aşağıdaki gibidir;

- viskozite ihmal edilir,
- akım sıkıştırılamaz,
- akım daimidir,
- Akış karakteristiği laminer olarak kabul edilir.

Bu kabullerden yararlanılarak, gradyeni yerel hıza eşit bir ϕ hız potansiyeli tanımlanabilir:

$$\nabla\phi = \vec{U} \tag{2.22}$$

Hız potansiyeli Laplace denklemi tarafından kontrol edilir:

$$\nabla^2\phi = 0 \tag{2.23}$$

<u>Tekne Sınır Şartları:</u>

Hızın tekne yüzey normalinde olan bileşeni 0 olmalıdır:

$\phi_n = 0$, tekne yüzeyinde (2.24)

<u>Serbest Yüzey Sınır Şartları:</u>

Kinematik: Akım serbest yüzeye teğet olmalıdır:

$\phi_{nFS} = 0$, Z=h konumunda (2.25)

Serbest yüzey başlangıçtan itibaren belirsiz olduğundan ikinci bir sınır şartı gerekmektedir.

Dinamik: Serbest yüzey üzerinde statik basınç sabit olmalıdır.

$p = sabit$, Z=h konumunda (2.26)

Serbest yüzey normali ve hız vektörü çarpıldığında Eşitlik 2.41 aşağıdaki gibi yazılabilir:

$\phi_x \cdot h_x + \phi_y \cdot h_y - \phi_z = 0$, Z=h konumunda (2.27)

Eşitlik 2.27 ise Bernoulli denklemi kullanılarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$gh + \frac{1}{2}(\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2 - U_\infty^2) = 0$, Z=h konumunda (2.28)

Serbest yüzeyde gemi formundan kaynaklanan bozulma sonsuzda ortadan kaybolmalıdır, bu yüzden,

$\nabla\phi = U_\infty$ (2.29)

2.22 ve 2.29 eşitliklerinde verilen denklemlerin kesin bir çözümü yoktur, bu nedenle birkaç yaklaşık çözüm önerilmiştir. Tüm yöntemler serbest yüzey sınır şartının lineerleştirilmesini önermektedir. Lineerleştirme için bilinen bir çözüm gereklidir, eğer bilinen çözüm Φ olarak ifade edilirse gerçek çözüm;

$\phi = \Phi + \delta\phi$ (2.30)

olacaktır. $\delta\phi$ gerçek ve yaklaşık çözüm arasındaki farktır. Hess ve Smith [36], Dawson [37] gibi araştırmacılar duble-model lineerleştirilmesinden faydalanarak bu duruma metot geliştirmeye çalışmışlardır. Tezde kullanılacak yazılımın potansiyel akım modülünde ise farklı olarak iteratif bir yöntem uygulanmıştır. Bu yaklaşım, lineer bir çözüm bulunduğunda hesaplamaları bitirmek yerine, sürekli lineerleştirme yaparak sınır koşullarını serbest yüzeye hesaplandığı gibi uygulamaktadır [38].

2.2.3 Viskoz Teori

Yüksek süratlerde seyreden bir tekne etrafındaki akış incelendiğinde türbülanslı bir akım gözlenir. Türbülansın fiziksel bir tanımı olmasa da türbülans, kinetik enerjinin büyük ölçeklerden küçük ölçeklere düşürülmesi ile 3-boyutlu düzensiz bir akım olarak karakterize edilebilir.

Günümüzde bilinen farklı türbülans metotları olmasına rağmen, sıklık ile kullanılan K-ε ve K-ω olmak üzere iki model öne çıkmaktadır. Gemi dizaynında, form faktörü hesabı içinde kullanılan bu modeller çözümlendiğinde, tekne etrafında oluşan girdap yapıları, bunların sebep olduğu kayıplar ve akış karakteristiği ile ilgili tahminlerde bulunmak mümkün hale gelir. Bu çalışmada K- ε türbülans modeli kullanıldığından bu konu ile ilgili bilgiler verilecektir.

K - ε Türbülans Modeli

Yirminci yüzyılın sonlarına kadar, k-ϵ modeli oldukça fazla kullanılmıştır. Bu modele dayalı öncüler Chou, Davidov, Harlow ve Nakayama modelleridir. Modelin yaygın kullanımı Jones ve Launder tarafından geliştirilen versiyonla başlamıştır. Launder ve Sharma daha sonra modelin kapanış katsayılarını tekrar test etmiş ve k-ϵ modelini modernize etmişlerdir. k-ϵ modelini formüle ederken, fikir, ϵ için tam denklemi türetmek ve davranışını düzenleyen tam denklem için uygun kapatma yaklaşımlarını bulmaktır. ϵ için tam denklem aşağıdaki Navier Stokes denkleminin momentini alarak türetilir [39].

$$2v\overline{\frac{\partial u_\iota'}{\partial x_J}\frac{\partial}{\partial x_J}[\mathcal{N}(u_\iota)]} = 0 \tag{2.31}$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = -2v\left[\overline{u'_{\iota,k}u'_{J,k}} + \overline{u'_{k,\iota}u'_{k,J}}\right]\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - 2v\overline{u'_k u'_{\iota,J}}\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_k \partial x_j} - 2v\overline{u'_{\iota,k}u'_{\iota,m}u'_{\iota,m}} -$$

$$2v^2\overline{u'_{\iota,km}u'_{\iota,km}} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[v\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} - v\overline{u'_j u'_{\iota,m}u'_{\iota,m}} - 2\frac{v}{\rho}\overline{p'_m u'_{j,m}}\right] \tag{2.32}$$

Bu denklem, türbülans kinetik enerji denkleminden çok daha karmaşıktır ve dalgalanan hız, basınç ve hız gradyanlarında birkaç yeni bilinmeyen çift ve üçlü korelasyon içermektedir. Bu korelasyonların doğruluğunun herhangi bir derecede ölçülmesi imkânsızdır, bu nedenle deneycilere uygun kapatma yaklaşımları hakkında güvenilir rehber bulunma ihtimali azdır. Bununla birlikte, k denklemi için kullanılana benzer kapalı yaklaşımların oluşturulması için, veri tabanı çok seyrek kalmaktadır. Akılda tutulması gereken önemli nokta, türbülans fiziği yerine diferansiyel denklemlerin modellenmesinden kaçınmaktır. Navier Stokes denkleminin, temel bir fiziksel özelliğini ihlal eden bir model oluşturabileceğinden, diferansiyel denklemlere atıfta bulunmamamız gerektiğini söyleyebiliriz. Normalde kullanılan kapatma yaklaşımları, modellenmiş ϵ denklemindeki çeşitli terimleri, büyük girdap ölçeklerinin fonksiyonları olarak parametreleştirdiğinden, cevap açıkça görülmektedir. Standart k-ϵ modeli aşağıdaki gibidir [39].

Kinematik girdap viskozitesi:

$$v_T = C_\mu k^2/\epsilon \tag{2.33}$$

türbülans kinetik enerjisi:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(v + v_T/\sigma_k)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{2.34}$$

Dağılım Oranı:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(v + v_T/\sigma_\epsilon)\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}\right] \tag{2.35}$$

BÖLÜM 3

HIZLI TEKNE SERİSİ GELİŞTİRME METODOLOJİSİ VE OPTİMİZASYONU

Tekne tasarımlarının teorik ve ön dizayn aşamalarında, öncelikle boyutlar ve diğer tanımlayıcı parametreler belirlenir. Aday tasarımın da, belirlenen bu parametreler arasında geliştirilmesi gerekmektedir. Bu ilk adım, geliştirilecek tasarımın temel tanımını oluşturmak için, bazı ölçütlere göre değerlendirilmesini gerektirmektedir. Detayda daha kuvvetli bir tasarımın geliştirilmesi ise, önemli bir zaman ve çaba gerektirir. Bu nedenle, entegre simülasyon tabanlı tasarım ortamı kullanılır durumda olsa bile, tasarımın bu safhasında güvenilir bir şekilde tanımlanması ve boyutlandırılması önemlidir. Bu bölüm, ön dizayn aşamasında, bir teknenin tasarım parametrelerinin belirlenmesine odaklanacaktır. Ayrıca, parametrik model geliştirilirken, tasarım için uygulanacak optimizasyon sürecinin altyapısını ortaya koyacaktır. Yeni bir teknenin tasarımı, mevcut teknelerin trendinin dikkatli bir analiziyle, ilgili tekne tipi hakkında genel bilgi edinmeyle başlar. Temel parametrelerde ortak sayılabilecek örnekleri var ise, tasarımcı bu tekneyi temel tasarım unsuru olarak kullanmaya devam edebilir. Tasarım, bu süreçten sonra amaç fonksiyonuna uygun olarak, örnek teknenin özelliklerini ölçeklendirmeyi içermektedir. Eğer bir tasarım mevcut bir gemi sınıfına benzer yeni bir tekne olacaksa, son zamanlarda tasarlanan benzer teknelerin dünya filosu, tekne boyutları ve özelliklerini inceleyerek faydalı başlangıç tahminlerini oluşturmak, sonuçlar açısından oldukça önemlidir. Bu aşamadan sonra amaç fonksiyonuna yakın bir aday tasarım meydana getirilir. Bu aday tasarımın modelleniş biçimi, sonrasında yapılacak analizler açısından önemlidir. Geleneksel yöntemlerle modellenmiş aday formun, analizler sonucunda istenen özellikleri sağlaması için, tekrar manipüle edilmesi ve yeniden analiz

edilmesi süreci devam edecektir. Ve özellikler istenen seviyeye gelene kadar bu döngü sürecektir.

Bu bölümde, tasarım sürecini daha verimli bir hale getirmek adına, geliştirilmesi düşünülen metodoloji algoritması ve buna uygun olarak, aday formun parametrik olarak modellenme süreci ve detayları aktarılacaktır.

3.1 Parametrik Modelleme ile Varyant Üretme Yöntemleri

Bir optimizasyon metodunun düzgün bir biçimde çalışabilmesi için, ana teknenin geometrisinin değiştirilerek kıyaslama yapılması temel bir gerekliliktir. Bu aşama mevcut formu daha iyileştirmek için oldukça önemlidir. Ayrıca bu adım sadece ana boyutların varyasyonundan ibaret olmayıp, düzgün yüzey (fair) ve istenmesi durumunda deplasman, prizmatik katsayı vs. gibi bazı form özelliklerinin de sabit kalmasını kapsayabilir.

Bir su altı form geometrisinin iyileştirilmesi sürecinde, amaç fonksiyonuna uygun form parametreleri belirlenerek, bu parametrelerin değiştirilmesi ile bir çözüm kümesi meydana getirilir. Bu çözüm kümesi içerisindeki alternatifler birbiri ile kıyaslanarak sıralanırlar ve bu şekilde istenen amaca hizmet edebilecek en iyi varyantların seçilebilmesi sağlanır.

Ana tekne formundan, çözüm kümesine dâhil olacak varyantları oluşturma metotlarından bazıları aşağıdaki gibidir;

- NURBS veya B-SURFACE yüzey kontrol noktalarının yer değiştirilmesi (geleneksel modelleme)
- Amaç fonksiyonu doğrultusunda beğenilen iki veya daha fazla formun karıştırılması (kısmi parametrik modelleme)
- Ana tekne geometrisinin lineer ve lineer olmayan yöntemler ile değişime uğratılması (kısmi parametrik modelleme)
- Ana tekne formunun belirlenen parametrelerinin sayısal değerlere bağlı olarak modellenmesi (tam parametrik modelleme)

3.1.1 Yüzey Kontrol Noktası Yer Değiştirmesi

Bilgisayar destekli tasarım programlarının yardımı ile kullanılan bu metot, günümüzde yaygın bir biçimde kullanılıyor olsa bile, yöntemin uygulanması sırasında oluşan değişkenlerin fazlalığı, kıyaslama kısmında sorunlara neden olmaktadır. Bu nedenle bir optimizasyon akışı içerisinde kullanılmasının çok uygun olmadığı söylenebilir.

Hendrix vd. [40] 5x9 kontrol noktasından oluşan bir matrisle ifade ettiği Wigley formunu direnç açısından iyileştirmeye çalışmıştır. Her bir kontrol noktasının x, y ve z den oluşan 3 koordinatı olduğu düşünülürse, 135 adet değişkeni olan bir ağ yapısı ortaya çıkmıştır. Problemin kolaylaştırılması adına, bazı kontrol noktalarının hareketleri sınırlandığında dahi, 61 serbestlik derecesine sahip bir sistem ortaya çıkmaktadır. Bu şekilde noktalar üzerinde manipülasyon gerçekleştirildiğinde, geometri üzerinde istenmeyen eğrilikler meydana gelebilir. Daha karmaşık formlarda bu yöntemin uygulanabilirliği bu sebeplerden dolayı oldukça kısıtlı bir hal almaktadır. Bu sebeplerden dolayı, bir optimizasyon algoritması içerisinde bu yöntemin kullanılmasının uygun olmadığı söylenebilir.

3.1.2 Tekne Birleştirme Yöntemi

İstenilen formun elde edilmesi amacı ile, Neu [41] tarafından form geliştirmekte uygulanan bir metottur. Farklı formlar, belirli bir ağırlıklı ortalama ile karıştırılarak, istenilen özelliklere sahip bir geometri yakalanmaya çalışılmıştır. Bu metot şöyle ifade edilebilir:

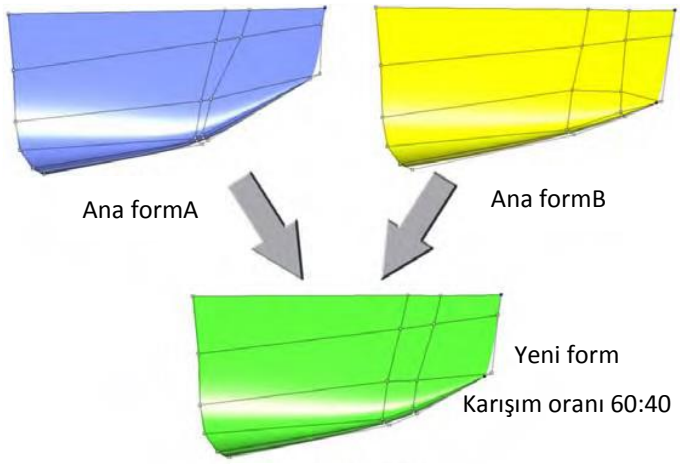
$$Sonuç\ tekne\ formu = \sum c_n Temel\ tekne\ formu_n \qquad (3.1)$$

$c_n = birleştirme\ katsayısı;$

$$ve \quad 0 \leq c_n \leq 1;\ \ n = 1,2,3,\dots,N; \qquad \sum c_n = 1$$

İki NURBS yüzey tabanlı formun düzgün bir biçimde birleştirilmesi ile, yeni bir geometrinin elde edilebilmesi için, iki yüzeye ait kontrol noktası matrislerinin eş olması

gerekmektedir. Şekil 3.1'de [41] oluşan yeni tekneye ait baş formun, A ve B form geometrilerinin belirli bir karışım oranında birleşmesi ile oluştuğu görülmektedir.



Şekil 3. 1 Tekne Birleştirme Yöntemi [41]

A ve B formları 60:40 oranında karıştırılarak yeni bir geometri meydana getirilmiştir. Yeni formun geometrisi oluşturulurken aşağıdaki eşitlikten yararlanılmıştır:

$$Yeni\ Form\ KN_{i,j} = 0.6\ Ana\ Form\ A\ KN_{i,j} + 0.4\ Ana\ Form\ B\ KN_{i,j} \quad (3.2)$$

Bu yöntem, amaç fonksiyonunuza uygun geometrilerden oluşan bir kümeniz var ise oldukça elverişli bir hal alabilir. Bunun için birleşime katılacak formların yüzey düzgünlükleri ve bu yüzeyleri oluşturan kontrol noktası matrislerinin uyumu önemli bir kriter olarak gözetilmelidir. Diğer yandan, her zaman istenilen forma benzer bir küme bulmanın zor olduğu düşünüldüğünde, bu da bir dezavantaj olmaktadır.

3.1.3 Parametrik Transformasyon Yöntemi

Optimizasyon amaçlı yeni varyantlar üretebilmek için, bir tekne formunun ana boyutları olan boy, genişlik, derinlik gibi değerleri, basit lineer transformasyonlar yardımı ile değiştirilebilir. Fakat bu durum optimizasyon açısından oldukça sınırlı bir hal alacağından LCB, C_P, C_B gibi, tekne formunu hidrostatik değerler açısından ifade eden katsayılara da lineer olmayan transformasyonlar uygulanabilir.

Lackenby [42] yukarıda bahsedilen lineer olmayan LCB ve C_P katsayılarını ikinci dereceden bir denklem yardımı ile form kesitlerini ileri veya geri kaydırarak varyantlar

türetmiştir. Tekne formlarının yüzey düzgünlüğü ve form karakteristiğini koruma açısından başarılı olan bu metot, oluşan varyantların çeşitliliği bakımından yetersiz kalmıştır.

Daha sonra Söding ve Rabien [43] tarafından yapılan çalışmalarda benzer yöntemler ile tekne geometrisi deforme edilmeye çalışılmışsa da, bu gelişimler sistematik bir optimizasyon sürecine entegre edilememiştir.

3.1.4 Parametrik Model ile Varyasyon Yöntemi

Nowacki, Taylor Kwik ve Thieme gibi araştırmacıların önderliğinde, birçok araştırmacı tekne form geometrisinin parametrik bir biçimde temsili için araştırmalarda bulunmuştur. Bir geminin su altı formunun parametrik olarak temsil edilmesinin yanında, bu modeli HAD ile birleştirerek BDT ile birlikte kullanım sağlayan bir metot, 1998 yılında Harries [44] tarafından geliştirilmiştir.

Bu metot, ana formun oluşumunu sağlayan nokta, eğri ve yüzeylerin, tekne ana boyutlarına, hidrostatik değerlerine veya belirli bir eğrinin fonksiyonuna bağımlı olabilecek şekilde ifade edilmesini sağlamıştır. Bu parametrelerin sayısal olarak sistemli bir şekilde değiştirilebilmesi nedeni ile de, ana formdan yeni varyantların hızlı bir biçimde oluşumunun sağlanması olanaklı kılınmıştır.

Calkins vd. [45] 2001 yılında çeneli tip su altı formlarını bilgisayar temelli olarak geliştirmeyi amaçlamıştır. Metot, tasarımcının oluşturmak istediği tekne formuna göre kritik parametreler ile ufak oynamalar yaparak istediği formu elde etmesine dayanmaktadır. Böylece klasik ve zaman alan kontrol noktalarının oynanması ile, geliştirilen formlara alternatif olacak bir yöntem ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bu ayarlanabilir parametreleri detaylandırarak ve düzgün eğriler oluşturarak ofset tablosunu ortaya koymaya çalışmışlardır. Son olarak da yöntemin sınırlarını belirlemişlerdir.

Çalışmada ilk olarak tekneleri sınıflandırmışlardır;

- Küçük botlar (Runabout) : Sadece ön bölümde kokpit ve arkada ufak oturma yerine sahip küçük süratli botlar.
- Spor botlar (Sportboats) : Küçük botlardan biraz daha büyük oturma alanına sahip botlar.
- Tek kamaralı tekneler (Cruiser) : Gece de konaklanabilecek bir kamaraya sahip süratli tekneler.
- Çift kamaralı tekneler (Motor Cruiser) : 2 kamaralı, üst güverteden de kontrol edilebilen büyük güverte evlerine sahip 10.5 m den büyük tekneler.
- Motor yat (Motor Yacht) : 12.5 m den büyük tekneler.

Yapılan çalışma ile öncelikle ana kontrol eğrileri oluşturulmuştur. Bu eğriler, omurga, çene ve şiyer eğrisi olarak tanımlanmıştır. Bu tarz teknelerin ana karakteristik özelliklerini de aşağıdaki gibi tanımlamışlardır.

- Tam Boy (Loa)
- Genişlik (B)
- Derinlik (D)
- Draft (T)
- Omurga yüksekliği
- Baş formun eğikliği
- Omurganın eğikliği
- Çene sayısı
- Flare açısı veya çene genişliği
- Paralel gövde uzunluğu
- Çene açısı

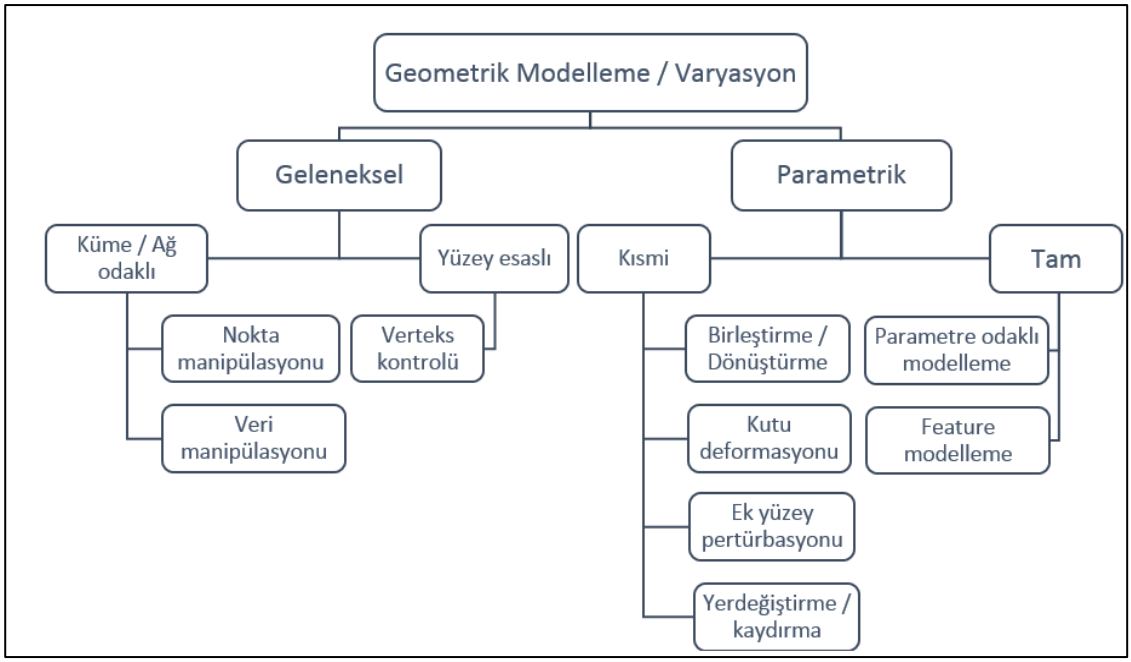
Daha sonra teknelerin ana karakteristik özelliklerini göz önüne alarak bir veri tabanı yaratmışlar ve her tarz tekne için geometrik limitleri belirlemeye çalışmışlardır.

Harries ve Abt [46] çalışmalarını daha da ileri taşıyarak Friendship-Framework isimli ticari yazılımı geliştirmişlerdir. Bu yazılım parametrik tekne formu oluşturmayı olanaklı kıldığı gibi, yazılan küçük alt programlar yardımı ile farklı amaca uygun yazılımlarla da bağlantı kurarak, eş zamanlı çalışabilmektedir. Yazılımın içine gömülmüş olan optimizasyon yöntemleri ile birlikte de, parametrik modelin sistematik varyasyonu sonucunda optimizasyon akışı kolay bir biçimde sağlanabilmektedir. Bu yönü ile son yıllarda birçok araştırmada tercih sebebi olmuştur.

Yazılım içerisindeki diğer bir avantaj ise, yüzeyleri oluştururken, kontrol noktaları kümesinden oluşan bir B-Spline eğrisi yerine, bu yazılım ile beraber ortaya konan ve eğri uçlarındaki tanjant açılarına göre, eğrinin düzgün bir hal almasını sağlayan F-Spline eğrisinin kullanılabilir olmasıdır.

3.2 Tekne Geometrisi Oluşturma Yöntemleri

İstenilen özelliklere uygun bir tekne formu geliştirmek, ön dizayn aşamasında oldukça önemli bir basamaktır. Tekne geometrisi gibi karmaşık bir yapıya sahip yüzeylerin, düzgünlüğü ve esnekliği tasarımın geliştirilme süresi açısından ve sonucunda çıkacak ürünün kalitesi bakımından oldukça önemlidir. Bu anlamda, form modelleme yöntemleri, geleneksel ve parametrik olarak iki alt başlıkta incelenebilir. (Şekil 3.2) [47].



Şekil 3. 2 Geometrik modelleme yöntemleri [47]

3.2.1 Geleneksel Modelleme Yöntemleri

Geleneksel modelleme yönteminin, geometrinin tanımlanması açısından daha düşük seviyede bir modelleme olduğu söylenebilir. Yaygın olarak kullanılan bu yöntemde, ilk olarak noktalar ifade edilir, sonrasında bu noktaların tanımlı olduğu eğriler oluşturulur ve bu eğrilere bağlı olarak da yüzeyler meydana getirilir. Lofting (iki eğri arasını yüzey ile örmek), geleneksel modelleme yöntemine örnek olarak kabul edilebilir.

Bir başka yöntem de Bézier ya da B-spline kontrol noktaları matrisine bağımlı bir yüzeyin ifadesi olarak düşünülebilir. Bu noktalar sayısal veya serbest olarak değiştirilerek yüzey istenilen biçimde deforme edilmeye çalışılır. İşlem tamamlandıktan sonra tekne geometrisini ifade eden posta, su hattı, batok vb. eğriler oluşturulur.

Oldukça esnek olan bu yöntemlerin dezavantajı ise, karmaşık geometriler için yüzeyi ifade eden kontrol noktalarının artması sonucunda, kontrolün ve yüzey düzgünlüğünü korumanın zorlaşmasıdır.

3.2.2 Parametrik Modelleme Yöntemleri

Geleneksel modellemeden farklı olarak parametrik modelleme, ürünün sayısal veriler ile ifade edilmesi olarak düşünülebilir. Bir tekne formunun parametrik olarak ifadesi, form yüzeyinin karakteristiğini oluşturan eğrilerin ve/veya noktaların, daha önceden belirlenmiş olan sayısal veriler ile ilişkilendirilmesi olarak yorumlanabilir. Bu sayısal verilerin her biri form parametresi olarak adlandırılır. Bu parametreler aynı zamanda bir formülün değişkenleri olabilirler veya kısıt ya da kıyas operatörü olarak kullanılabilirler. Geometrinin bu şekilde modellenmesi bir optimizasyon akışı içinde sistematik varyasyonu olanaklı kılar. Bu şekilde tüm formun parametrelerce ifade edilebilmiş hali, tam parametrik model ismini alır.

Mevcut formların belirli bölümlerinde oynamalar yapılmak istediğinde ise kısmi parametrik yöntemlerden de yararlanılabilir.

Kısmi parametrik yöntemlere örnek olarak Farin'in [48] kutu deformasyonu temelli çalışması örnek gösterilebilir. Geometri prizmatik bir kutu içerisine alınır. Daha sonra kutu deforme edilerek, onun etkisinde, içinde bulunan yüzeyin deformasyonu gözlenir.

Buradaki önemli nokta ise, geometriyi oluşturan kontrol noktalarının, kutu deformasyonu etkisinde birbirleri ile uyumlu olarak hareket etmeleridir.

Diğer bir metot olan Birleştirme / Dönüştürme (merging / morphing) kapsamında ise, son ürün olarak meydana getirilen form, belirlenmiş çözüm uzayında bulunan iki veya daha fazla formun karıştırılmasıyla elde edilir. Karışımda kullanılan geometriler, elde edilmek istenen formun özellikleri ölçüsünde ağırlık faktörleri ile derecelendirilirler. Daha sonra bu formların lineer süper pozisyonu ile sonuca ulaşılır. Yönteme örnek olarak tekne birleştirme yöntemi gösterilebilir. Bu yöntem ile özellikleri kayıtlı olan geometrilerden ana formlar seçilir. Seçilen form yüzeylerinin ilişkili olduğu kontrol noktalarının tutarlı olması koşulu ile karışım verilen ağırlık faktörleri ile çarpılarak son formun oluşması sağlanır. Dolayısı ile kayıtlı olan formlar çerçevesinde işlem yapılabildiğinden kısıtlı bir sonuç grubu ortaya çıkar.

Daha önceki bölümlerde bahsedilmiş olan Lackenby [42] metodu ise Kartezyen kaydırma yöntemleri (Cartesian shifting) içerisinde yer almaktadır. Bu yöntemde, tekne formunun en kesit alan eğrileri sistematik olarak değiştirilerek yeni varyantlar üretilebilir.

Tekne geometrisi üzerinde, ana formu bozmadan ve onunla uyumlu olacak şekilde ek yüzeyler yapılmak istenebilir. Bu gibi durumlarda ek yüzey pertürbasyonu (added patch perturbation) kullanılabilir. Peri ve vd. [49] bir tanker formuna ana yüzeyi bozmadan balb ekleyerek yeni formun direnç açısından özelliklerini incelemişlerdir.

3.2.3 Tam Parametrik Modelleme

Harries ve Abt [46] tarafından geliştirilen ve güncel ismi CAESES olarak bilinen ticari yazılım, kullanım açısından sistematik varyasyon ve optimizasyon süreçlerinde oldukça başarılı olmuştur. Tam parametrik bir model meydana getirmek için, amaç fonksiyonu dikkatle irdelenmeli ve yapılan araştırmalarla hangi parametrelerin form üzerinde etkili olabileceği tartışılmalıdır. Bu parametreler geometri ana boyutları (L, B, T, vs.) olabileceği gibi çeşitli form özellikleri de (∇, C_B, vs.) olabilir. Ayrıca spesifik formlar için özel parametreler de geliştirilebilir. Örneğin kayıcı bir form için çene kalkıntı açısı gibi.

Parametrelerin bir kısmı değişken olarak kullanılırken bir kısmı da kısıt olarak kullanılabilirler.

Çeşitli optimizasyon algoritmalarından yararlanarak belirlenen parametrelerin sistematik olarak değişimi ile yeni formlar meydana getirilebilir. Bunlar kısıt parametrelerince elenebilir veya kıyaslanabilirler.

Bir tekne formunu düşünecek olursak, formun temel (Profil, güverte vb.) ve kesit (posta, su hattı, batok vb.) eğrilerinden meydana geldiğini söyleyebiliriz. Parametrik bir model elde etmek için bu eğrilerin de parametrik olması gereklidir.

Tezde kullanılacak olan yazılım, bir eğrinin dolayısı ile yüzeylerin temsili için matematiksel olarak B-Spline eğrilerini temel almıştır. Koordinat sistemi dönüşümlerinde, B-spline eğrilerinin değişikliğe uğramadan karakteristiğini koruması gibi avantajlardan yararlanılmıştır. Ayrıca bu şekilde oluşturulan yüzeyler, çeşitli analiz programları ile iletişim kurabilmek açısından da oldukça yaygın olarak desteklenmektedir [50].

Bir B-Spline eğrisi, m olarak adlandırılan kontrol noktalarının lineer süperpozisyonu ile parçalardan meydana gelen devamlı eğri,

$$\vec{V_i} = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} \tag{3.3}$$

Bu poligon noktaları ve bu noktalara karşılık gelen karışım fonksiyonları $N_{ik}(t)$ değerlerinin çarpımı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

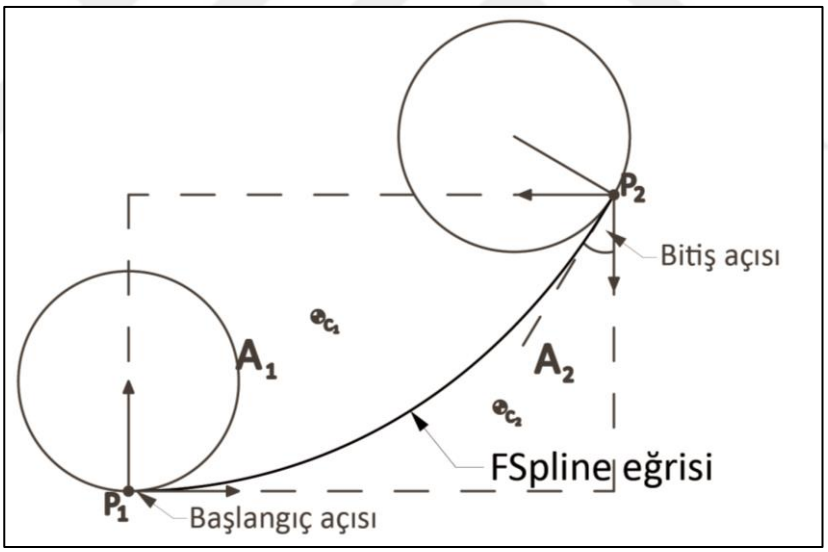
$$\vec{Q}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = \sum_{i=0}^{m-1} \vec{V_i} \cdot N_{ik}(t), m\geq \tag{3.4}$$

Harries'in alternatif olarak geliştirdiği yöntemde bir B-Spline eğrisi,

$$E_n = \int_{t_B}^{t_E} \left\{ \left(\frac{d^n x}{dt^n} \right)^2 + \left(\frac{d^n y}{dt^n} \right)^2 \right\} dt \tag{3.5}$$

olarak ifade edilen düzgünlük kriterini (fairness criteria) minimize edecek şekilde optimize edilmektedir. *m* adet bilinmeyen poligon noktası, bağımsız değişken olarak düşünülmekte ve bu sınırlı optimizasyon işlemi Newton-Raphson sayısal yönteminden faydalanarak iteratif olarak çözülmektedir [51]. Bu metot B-Spline alternatif olarak F-Spline olarak isimlendirilen yeni eğri çeşidini ortaya çıkarmıştır.

Şekil 3.3'te de görüldüğü gibi F-Spline eğrisinin başlangıç ve bitiş noktalarının bir açının teğeti olarak ifade edilebilmesi, aynı zamanda da düzgünlük kriterini sağlamasından dolayı avantajları fazladır. Tasarımcı, birden fazla F-Spline eğrisini birleştirerek ve ek yerlerindeki başlangıç ve bitiş noktalarının tanjant açılarını eşitleyerek, karmaşık ve düzgün eğriler elde edebilir. Ayrıca bu noktalar parametrelere bağımlı hale getirilip, herhangi bir değişimden sonra yine düzgün eğrilerin elde edilmesi sağlanır. Aynı teğet açılara sahip başlangıç ve bitiş noktalarından oluşan eğrinin farklı karakteristiklerde olması da, eğri altında kalan alanının ve alan merkezinin değiştirilmesi ile sağlanabilir.



Şekil 3. 3 F-Spline eğrisi

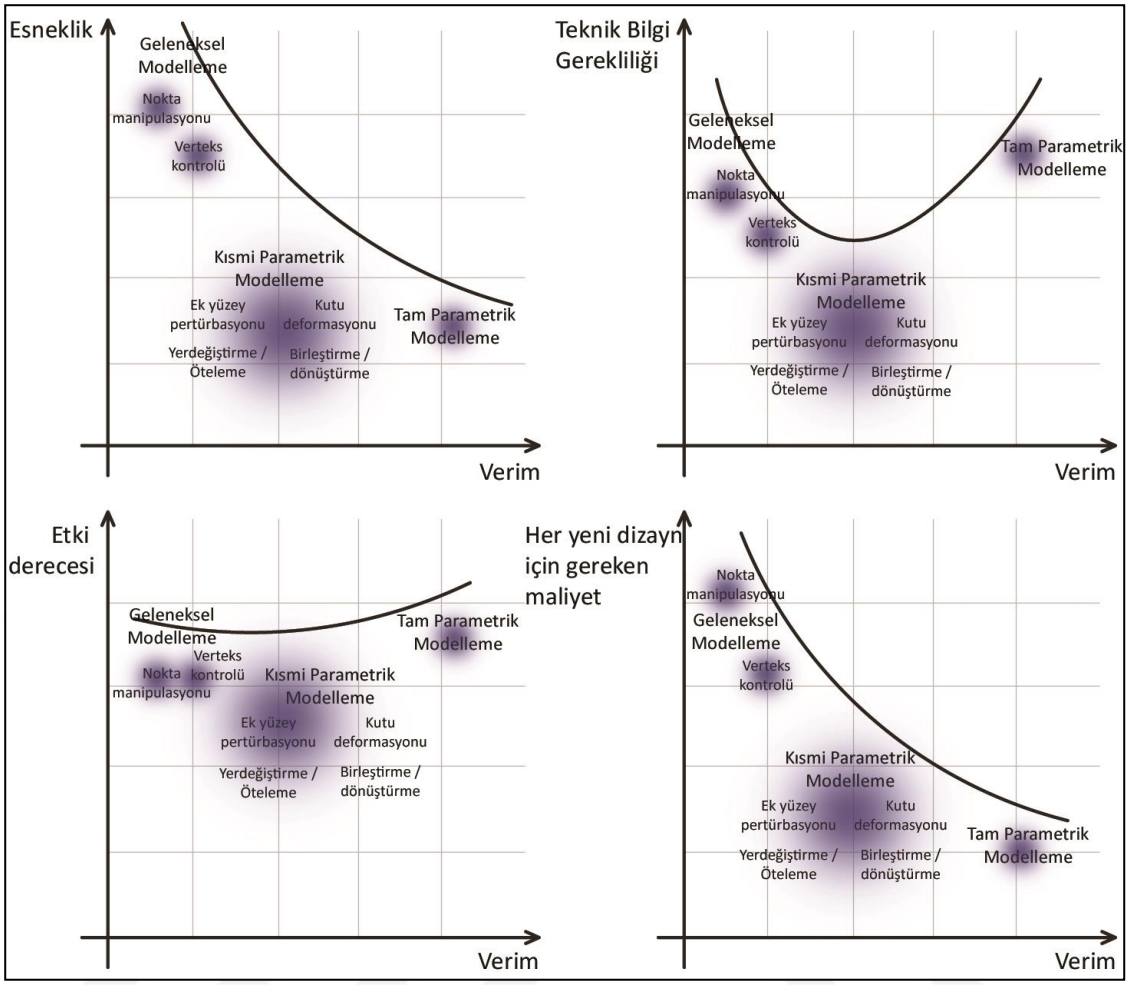
3.2.4 Geometrik Modelleme Yöntemlerinin Değerlendirilmesi

Daha önceki bölümlerde bahsedilen modelleme tekniklerini değerlendirmek, tezde kullanılacak olan yönteme ışık tutması açısından önemlidir. Abt ve Harries [52] yaptıkları çalışmada, bu yöntemleri birlikte değerlendirerek kıyaslama yapmışlardır. Bu değerlendirmeyi anlamlı kılmak için bazı tanımlamalara başvurmuşlardır;

- Esneklik: Değişik durumlara adapte olabilme yeteneği, amaca uygun herhangi bir formun oluşturulabilmesi
- Teknik Bilgi: Form tasarlanırken istenilen ürünün ortaya çıkabilmesi için ihtiyaç duyulan bilgi birikimi, örneğin geometride yapılacak değişikliklerin etkisi
- Etki derecesi: Sonuçta çıkan ürünün istenen özellikleri karşılayabilme derecesi, tasarımın kalitesi
- Maliyet: Ürünü meydana getirmek için sarf edilen kaynakların miktarı
- Verim: Formun tasarlanarak son halini alması sırasında geçen süre

Şekil 3.4'te Abt ve Harries [52] yukarıdaki tanımlar açısından geometrik modelleme yöntemlerinin değerlendirmesini yapmışlardır. Tam parametrik modelleme yöntemlerinin, esneklik açısından zayıf olduğu görülmektedir. Fakat etki derecesi açısından bakıldığında ise, diğer yöntemlerden önde olduğu görülmektedir. Başlangıç noktasında maliyet açısından azımsanmayacak bir yatırım olsa da, birim maliyet açısından oldukça avantajlıdır. Geleneksel modelleme yöntemleri ise, esneklik açısından yüksek performansa sahiptirler, örneğin modelin bir savaş gemisi ya da uçak olması önemli değildir, fakat verim ve birim maliyet açsından zayıf kalmaktadırlar. Ayrıca tasarım sırasında yüksek teknik bilgi ihtiyacı da göz ardı edilmemelidir. Kısmi parametrik yöntemler diğer yöntemler ile kıyaslandığında genellikle ara değerlerde kalırlar. Bu yöntemlerin en büyük avantajı ise, yeni ürünün zaten bir çözüm uzayından oluşturulması sebebi ile fazla teknik bilgiye ihtiyaç duyulmamasıdır.

Kısımı parametrik yöntemler, mevcut formlar üzerinden yeni form elde etmekte kullanılırken, tam parametrik ve geleneksel modellemeler, başlangıçta yeni form oluşturmak için kullanılırlar. Bunun yanında bir optimizasyon sürecinde kullanıma en uygun yöntemin tam parametrik modelleme olduğu görülmektedir. Sayısal olarak parametrelerin değiştirilmesi ile birçok varyantın oluşumu ve kıyaslanabilme durumu neticesinde tezde de bu teknikten yararlanılacaktır.



Şekil 3. 4 Geometrik modelleme yöntemlerinin karşılaştırılması [52]

3.3 Çok Kriterli Optimizasyon

Optimum tekne formu terimi, kendi sınıfında, ondan beklenen tüm görevleri, en iyi biçimde yerine getiren form olarak düşünülebilir. Bu formu oluşturmak için ise bir optimizasyon sürecinden geçilmelidir. İstenilen özellikleri sağlayabilmesi için, birçok alternatif dizayn karşılaştırılarak daha iyi form elde edilmeye çalışılır. Bu süreci kısaltabilmek ve ön dizayn aşamasında verimli bir biçimde kullanabilmek için bilgisayar programları ve simülasyonlar sürece dahil edilir.

Optimizasyon, bu tez açısından bakıldığında, amaca yönelik iyi (muhtemelen en iyi) tekne formunu elde etmek olarak düşünülebilir.

Eğer tekne formunun sadece direnç açısından optimize edildiği düşünülürse, bunun tek kriterli bir optimizasyon problemi olduğu söylenebilir ve bu aşağıdaki gibi ifade edilebilir [53]:

$$minimize\ F(x), \qquad x \in R^n \tag{3.6}$$

Başarı ölçütü ya da amaç fonksiyonu: çözümün değerlendirileceği ölçüt; $F(x)$

Serbest değişkenler, karar değişkenleri, dizayn değişkenleri: Değiştirilebilen ve optimizasyon problemini tanımlayan bağımsız değişkenler; $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$

Kısıtlar: tasarım uzayındaki amaç fonksiyonunun sınır koşullarını tanımlamak için kullanılırlar. Kısıtlar aşağıdaki gibi gruplandırılabilir:

- Sınırlar: $x_{imin} \leq x_i \leq x_{imax}$, $i = 1,2, \dots, n$
- Eşitlik kısıtları: $h_j(x) = 0$, $j = 1,2, \dots, m$
- Eşitsizlik kısıtları: $g_k(x) \geq 0$, $k = 1,2, \dots, p$

Bağımlı değişkenler: Bağımsız değişkenler ile ilişkili olan doğrudan kontrol edilemeyen değişken tipleridir.

Parametreler: optimizasyon işleminin kontrolü altında olmayan ek değerler

Sabitler: optimizasyon sürecinde sabit olan değerlerdir.

Optimizasyon probleminin çözümü için günümüze kadar araştırmacılar tarafından çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Matematiksel modeller ilk dönemde doğrusal ve az sayıda değişken içerirken, daha sonra lineer olmayan daha karmaşık modeller geliştirilmeye çalışılmıştır. Evrimsel algoritmalar bu sebep ile ortaya çıkmış ve en iyinin korunması stratejisi ile optimizasyon problemlerinin çözümü için kullanılmışlardır.

Gemi dizaynı alanında ise ardışık kısıtsız azaltma tekniği (SUMP-Sequential Unconstrained Minimization Technique), ardışık karesel programlama (SQP-Sequential Ouadratic Programming), Nelder-MeadSimplex, Hooke-Jeeves dolaysız arama gibi

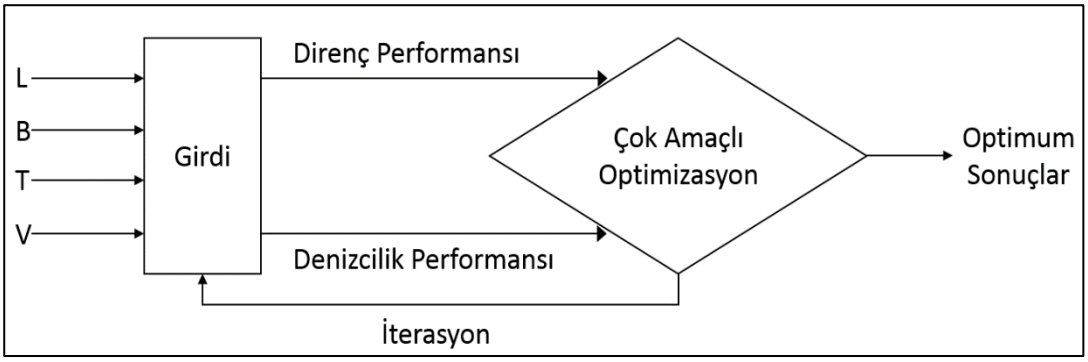
optimizasyon yöntemleri doksanlı yılların öncesinde kullanılmıştır. Bu algoritmalar daha çok belli bir bölgenin iyileştirilmesi amacı ile tek bir amaç fonksiyonu kontrolünde yapılmış optimizasyonlardır. Fakat bu yöntemler ile geliştirilen gemilerin sonuçları incelendiğinde, ortalama değerler olduğu belirlenmiştir. Bu noktadan sonra lokal optimizasyonlardan daha etkili ve daha iyi sonuçların elde edileceği düşünülen global optimizasyon yöntemleri araştırılmaya başlanmıştır. Genetik ve evrimsel algoritmalar bu noktada optimizasyon yöntemi olarak kullanılmaya başlamışlardır [54].

Hearn ve Wright [55] genetik algoritmalar yardımı ile bir katamaranın formunu optimize etmişlerdir. 1997 yılında yapılan çalışma, genetik algoritmaların gemi hidrodinamiğine uygulanmasında öncülük yapmıştır. Bu çalışma ile bir ana katamaran formu, sistematik bir biçimde Lackenby yöntemi ile çoğaltılarak yeni varyantlar meydana getirilmiştir. Ve bu alternatif formlar, düşey ivme, dalga direnci, sürtünme direnci ve ek direnç bileşenlerinin kombinasyonları ile 15 amaç fonksiyonu doğrultusunda incelenerek formun optimizasyonu sağlanmıştır. Salvesen, Tuck ve Faltinsen'in geliştirdikleri dilim (strip) teori yardımı ile denizcilik hesaplamalarını yaparlarken, direnç için de Michell'in ince gemi terosine dayalı bir dalga direnci algoritmasını kullanmışlardır.

Bu çalışmaya benzer bir çalışma da Day ve Doctors [56] tarafından yine doksanlı yıllarda yapılmıştır. Yine bir katamaran formunu temsilen, değişken parametrelerce kontrol edilebilen kontrol noktalarına sahip bir kafes oluşturulmuştur. Ve varyasyonlarla optimum form aranmıştır.

Tek bir amaç fonksiyonun kontrol ettiği bir optimizasyon sürecinde, amaca uygun en iyi tek bir çözüm aranır. Fakat çok kriterli bir optimizasyon probleminde birden çok amaç fonksiyonu olduğundan, çözüm uzayında tek bir çözüm olmayabilir. Bu sebeple, her amaca uygun sonlu bir çözüm kümesi oluşturulmaya çalışılır (Şekil 3.5).

Çok kriterli optimizasyonu tanımlayabilmek amacı ile birçok yöntem ortaya atılmıştır. Fakat bunu en iyi anlamlandıranlardan biri ekonomi alanında ortaya çıkan ve Vilfredo Pareto tarafından geliştirilen Pareto Optimizasyonu metodolojisidir [57].



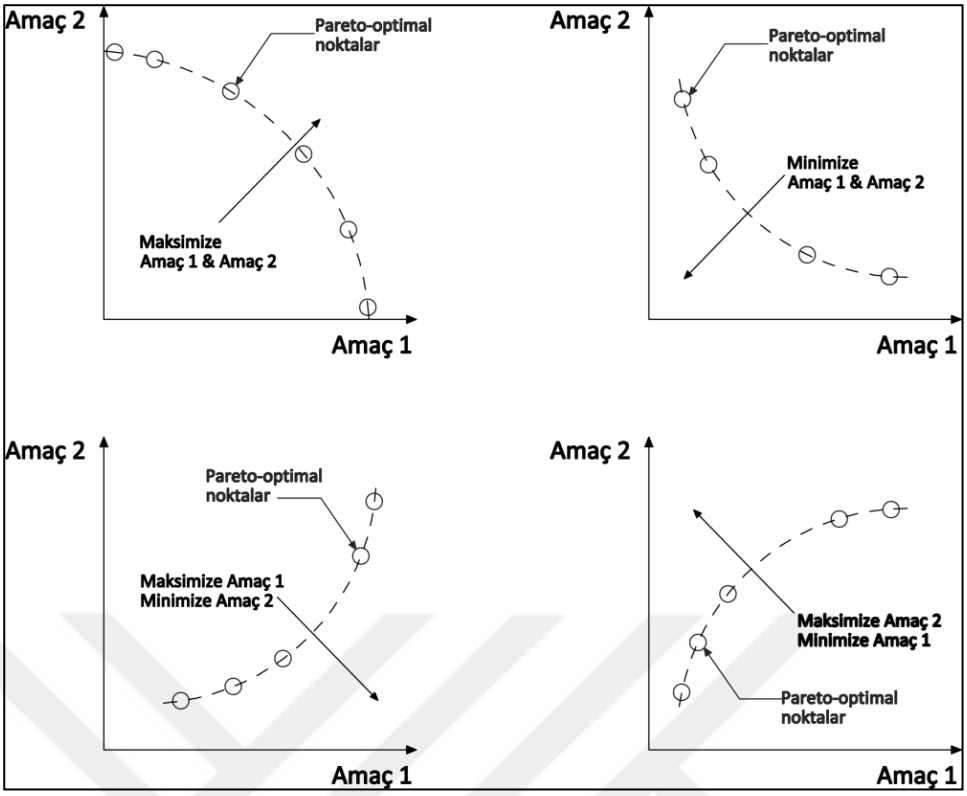
Şekil 3. 5 Çok amaçlı optimizasyon problemi örneği [57]

Evrimsel algoritmaların Pareto-optimal yöntemini kullanması ile çok amaçlı optimizasyon problemlerine de çözüm geliştirilmiş oldu. Bu durumda varyantlar amaç fonksiyonuna göre en kötü, en iyi veya benzer olabilirler. Bu varyantlardan oluşturulacak çözüm kümesi ise, belirlenen amaçlara göre en kötü olmayan, minimum bir amaç için diğerlerinden daha iyi olan varyantlardan oluşturulur. Optimal olanların seçimi ise, herhangi bir çözüm tarafından bastırılamayan çözümlerin toplanması ile olur. Bu bastırılamayan tüm çözümlerin oluşturduğu eğriye Pareto-optimal eğrisi adı verilir [58]. İki amacın olduğu durumlarda ve bu iki amaca göre optimizasyon yapılmak istendiğinde;

* İki amaç minimize edilmek isteniyor ise, pareto-eğrisi sıfıra yaklaşmalıdır,

* İki amaç maksimize edilmek isteniyor ise, pareto-eğrisi sıfırdan uzaklaşmalıdır,

*Amaçların biri maksimize edilmek istenirken diğeri minimize edilmek isteniyorsa maksimize edilmek istenen amacın olduğu eksende sıfırdan uzaklaşırken diğer amacın bulunduğu eksende aksi yönde olmalıdır (Şekil 3.6).



Şekil 3. 6 İki amaçlı optimizasyon problemi için Pareto eğrisi örnekleri [57]

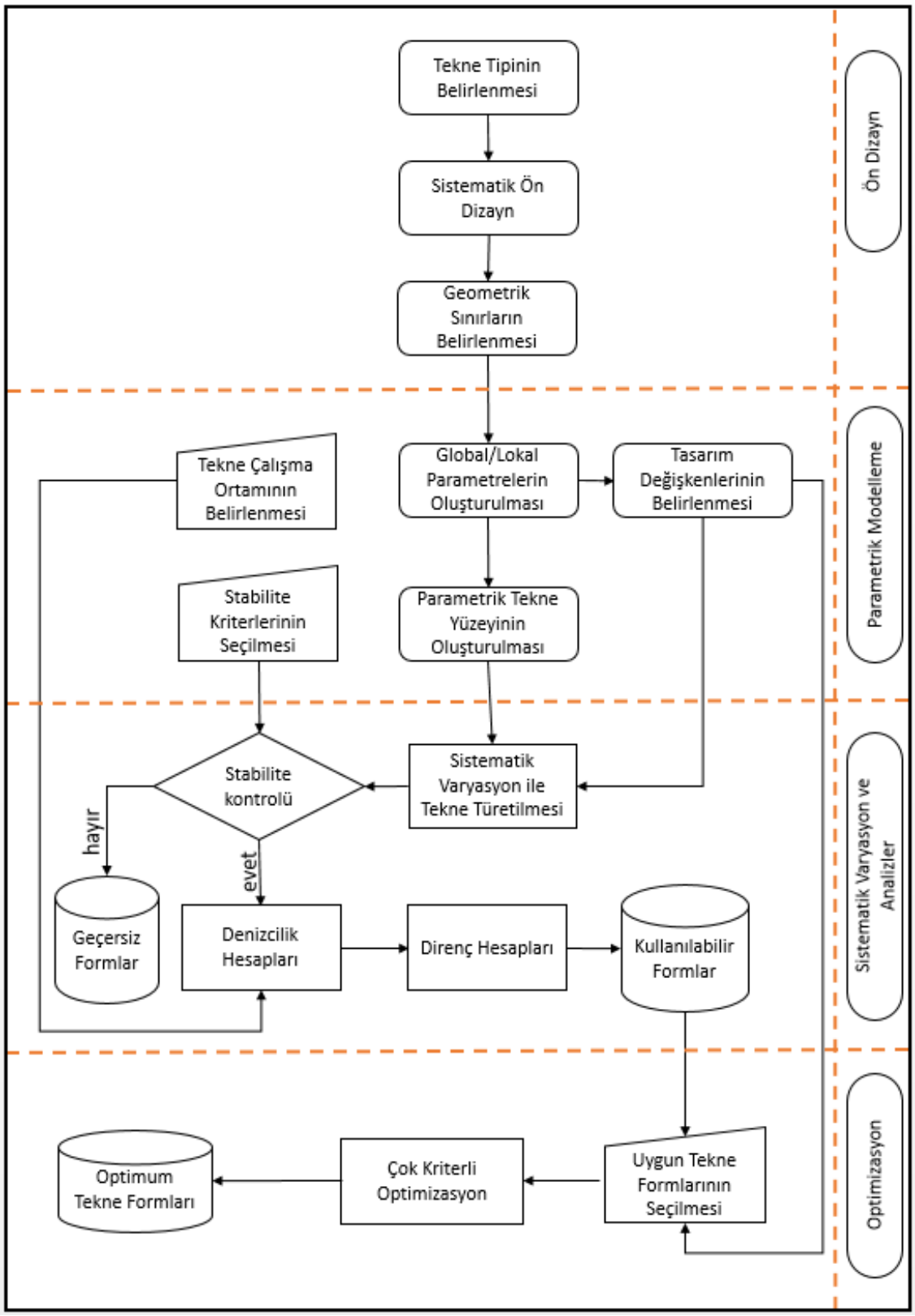
Bu çalışmada Pareto- eğrisi yöntemi ile bastırılmamış çözümler bulunmaya çalışılacaktır. Oluşturulan tüm alternatif formlar denizcilik ve direnç açısından kıyaslanarak, iki amaç için de minimize edilmiş çözüm kümesinin oluşturduğu eğri bulunmaya çalışılacaktır. Eğri oluşturulduktan sonra kullanıcı kendisi için en iyi olan formu seçecektir. Burada kullanıcı açısından problemin iyi algılanması oldukça önemlidir. Kullanıcı denizcilik ve direnç açısından incelenmiş ve pareto-eğrisi üzerindeki çözümleri değerlendirmelidir. Bu değerlendirmeye göre, denizciliğin daha iyi olduğu bir form mu yoksa direnç açısından denizciliğe göre biraz daha iyi bir form mu istediğine ya da her iki parametre açısından da hemen hemen aynı performansı gösteren formu mu seçeceğine karar verebilmelidir.

3.4 Form Geliştirme Metodolojisinin Oluşturulması

Form geliştirme işleminde ilk adım amaç fonksiyonunun belirlenmesidir. Bu tezde uygulama kısmında yüksek süratli tekne formu geliştirilmeye çalışılacaktır. Amaç fonksiyonu, yüksek süratlerde iyi denizcilik performansı gösteren formları oluşturmak olacaktır. Bunun için ilk olarak sınır koşulları belirlenmelidir.

Bu bölümde metodolojinin algoritmasına uygun olarak, parametrik ana formun oluşturulması için ön dizayn araştırması ile geometrik sınırlar belirlenecektir. Daha sonra da sistematik varyasyon için kısıtlar, değişkenler ve sabit parametreler belirlenerek geometrik sınır koşulları altında parametrik bir ana form meydana getirilerek akış şemasının ilk iki adımı tamamlanacaktır.

Daha sonraki bölümlerde belirlenen dizayn değişkenlerinin sistematik bir biçimde değiştirilmesi ile yeni varyantlar türetilecektir. Bu türetilen her varyant öncelikle stabilite kısıtları açısından değerlendirilecektir. Eğer kısıtları sağlıyorsa varyant bir sonraki değerlendirme aşamasına geçebilir, kriterleri sağlamıyorsa o varyant çözüm kümesi dışında bırakılacaktır. Stabilite değerlendirmesinden sonra varyant denizcilik ve direnç analizleri yapılarak çözüm uzayına dahil edilecektir. Oluşan her bir varyantın bu aşamalardan geçmesi ile, stabilite kısıtlarını sağlamış, denizcilik ve direnç sonuçları olan bir form kümesi meydana getirilecektir. Son olarak tüm bu formlar pareto-eğrisi optimizasyon yöntemi kullanılarak iki kriter açısından değerlendirilecek ve optimum tekne ailesi oluşturulmaya çalışılacaktır (Şekil 3.7).



Şekil 3. 7 Tekne form geliştirme ve optimizasyon akış şeması

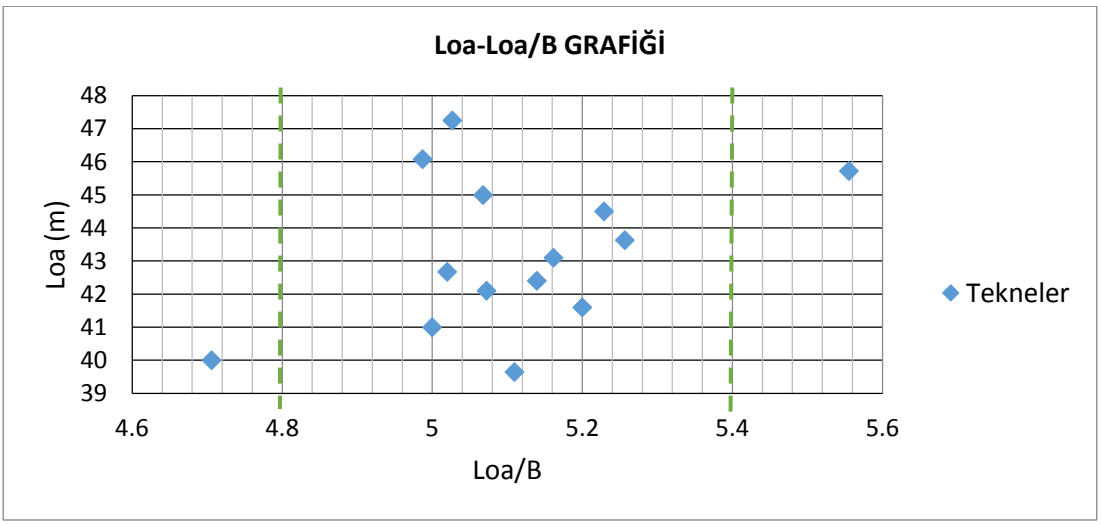
3.4.1 Amaç Fonksiyonunun ve Geometrik Sınırların Belirlenmesi

Son yıllarda yapılan çalışmalar, büyük boyutlarda da yüksek hızlara ulaşma isteğini ortaya koymuştur. Özellikle savunma sanayinde bu konu ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Bu sebeple tezin uygulama kısmında 45 m boya sahip yüksek süratli teknelerin optimizasyonu üzerine inceleme yapılmasına karar verilmiştir. Parametrik ana formun modellenmesinden önce, geometrik sınırların belirlenmesi için, ön dizayn prosedürlerinin uygulanması gereklidir dolayısı ile bu boya sahip mevcut teknelerin verileri incelenmiştir (EK-A).

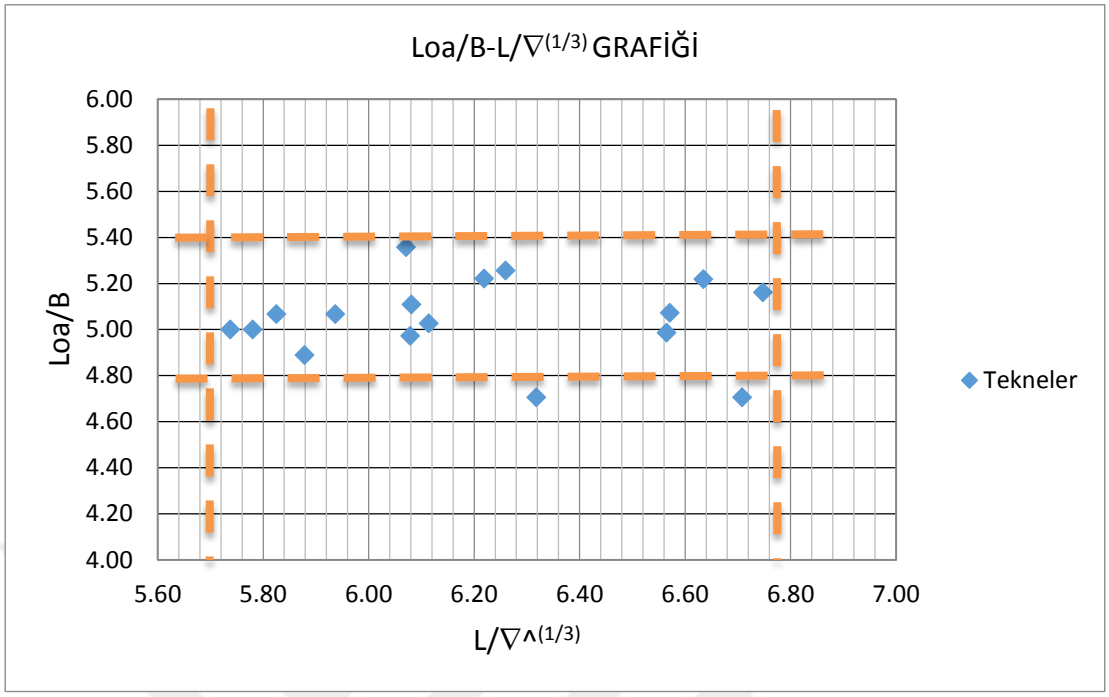
Şekil 3.8'te görüldüğü gibi, 45 m civarındaki boya sahip teknelerin Loa/B oranları 4.8 ile 5.4 arasında yoğunluk göstermektedir. Bunun yanında şekil 3.9 ve şekil 3.10 incelendiğinde de, L/∇^(1/3) oranı 5.7-6.8 aralığında ve tüm bu teknelerin hız bakımından Fn 0.95 ile Fn 0.4 aralığında olduğu görülmektedir. Bu veriler ışığında oluşturulacak parametrik formun ana boyutları çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3. 1 Parametrik ana formun boyutları

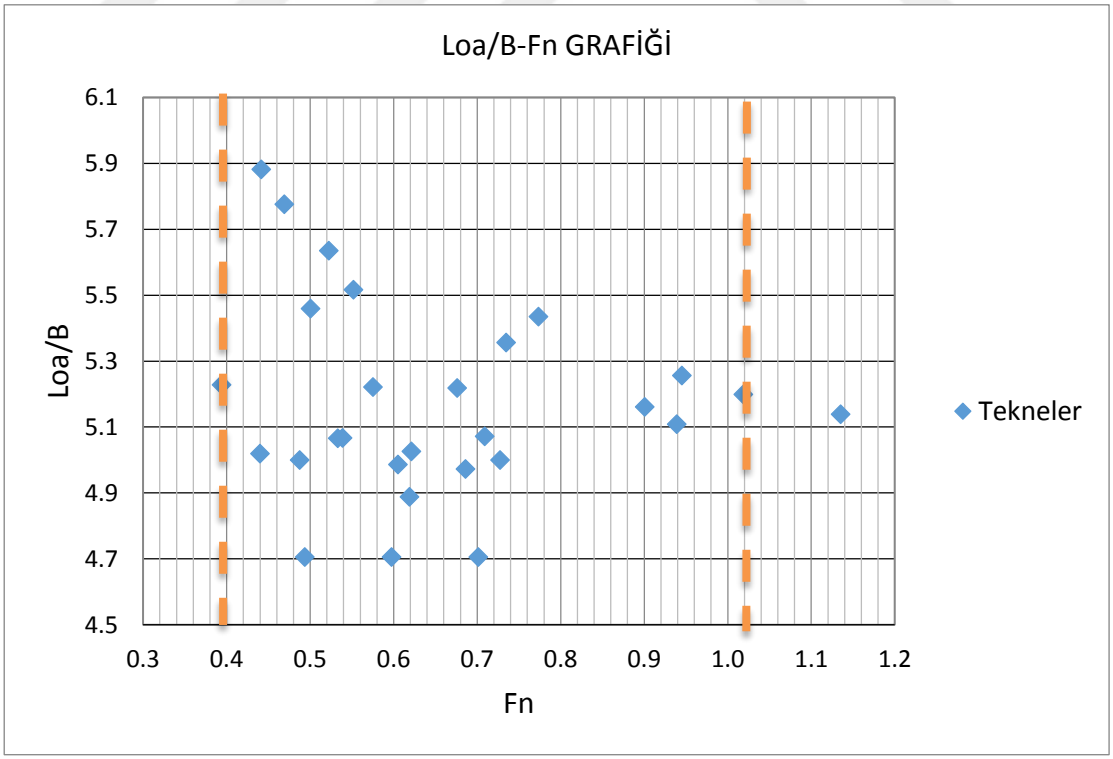
Tam boy, L_{OA}	45.00 m	**Draft, T**	1.89 m
Su hattı boyu, L_{WL}	39.56 m	**Prizmatik Katsayı, C_P**	0.82
Maksimum genişlik, B_{maks}	9.375 m	**Loa / B**	4.80
Su hattı genişliği, B_{WL}	8.50 m	**$L / \nabla^{1/3}$**	6.30
Derinlik, D	5.50 m	**Kalkıntı açısı, β**	20^0



Şekil 3. 8 Mevcut teknelerin Loa ve Loa/B dağılımı



Şekil 3. 9 Mevcut teknelerin Loa/B-L/∇^(1/3) dağılımı



Şekil 3. 10 Mevcut teknelerin Loa/B ve Fn dağılımı

3.4.2 Sabit ve Değişken Parametrelerin Belirlenmesi

Literatürde yapılan araştırmalar neticesinde Fn=1'in üzerindeki hızlarda seyreden örneğin karakol gemileri, yatlar, transfer tekneleri vb. formların boyları 45 m civarında maksimize olmaktadır. Yani bu boylardan sonra Fn=1' in üzerine genellikle çıkılmadığı görülmüştür. Dolayısı ile parametrik model oluşturulurken kullanılan 45 m boy sabit olarak kabul edilecektir. Bunun haricinde form karakteristiği değişmeyecek şekilde çizelge 3.2 de de ifade edildiği gibi global dizayn değişkenleri belirlenmiştir.

Çizelge 3. 2 Parametrik model için belirlenen global parametreler

L_{oa} / B	Boy-genişlik oranı
$L / \nabla^{1/3}$	Boy-deplasman hacmi oranı
β	Kalkıntı Açısı
Fn	Hız

Burada kayıcı teknelerin doğası gereği kayma rejimine geçiş ve kayma hali sırasında, hidrodinamik açıdan çene kalkıntı açısının önemi bilinmektedir. Bu nedenle bu parametrenin etkisi tezin uygulama kısmında araştırılacaktır. Bunun yanında 45 m boya sahip farklı deplasman gruplarında formlar oluşturulmaya çalışılacaktır. Çünkü aynı boya sahip formların farklı deplasmanlarda, fakat hız açısından aynı amaç fonksiyonunun belirlediği görevleri yerine getirmesi istenebilir. Bu sebeple farklı deplasman gruplarında optimum formlar elde edilmeye çalışılacaktır. Buradaki önemli nokta ise, bir dizayn parametresinin değişimi incelenirken diğer değişken parametrelerin sabit kalmasıdır. Böylece değişen parametrenin etkisi görülebilecektir.

3.4.3 Optimizasyon Sırasında Kullanılan Stabilite Kısıtları

Tezde stabilite kriterleri basit bir ön koşul olarak kullanılmıştır. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi bir formun çözüm kümesine katılabilmesi için bu kısıtlar karar operatörü olarak kullanılmıştır. Kriterleri sağlayan varyantlar kullanılabilir tekne formları arasına katılırken, kriterleri sağlamayanlar elenmiştir. Stabilite kriterlerinin hesaplanması sırasında formların düşeydeki ağırlık merkezlerinin yerinin, form derinliğinin % 70'inde olduğu kabulü yapılmıştır. Bu kabul farklı amaç fonksiyonları için değiştirilebilir. Tasarımcının bilgi ve tecrübesi ile belirleyeceği bir kısıt olarak düşünülmelidir.

Sistematik varyasyon sırasında temel IMO hasarsız stabilite kriterleri kullanılmıştır [59].

- GZ-Ø eğrisi altında 0-30 derece arasında kalan alan 0.055 m.radyan dan büyük olmalı,
- GZ-Ø eğrisi altında 0-40 derece arasında kalan alan 0.09 m.radyan dan büyük olmalı,
- GZ-Ø eğrisi altında 30-40 derece arasında kalan alan 0.03 m.radyan dan büyük olmalı,
- GM 0,15 m den büyük olmalı,
- GZ minimum 30 derece veya 30 dereceden daha büyük bir açıda 0.2 m den büyük olmalı,

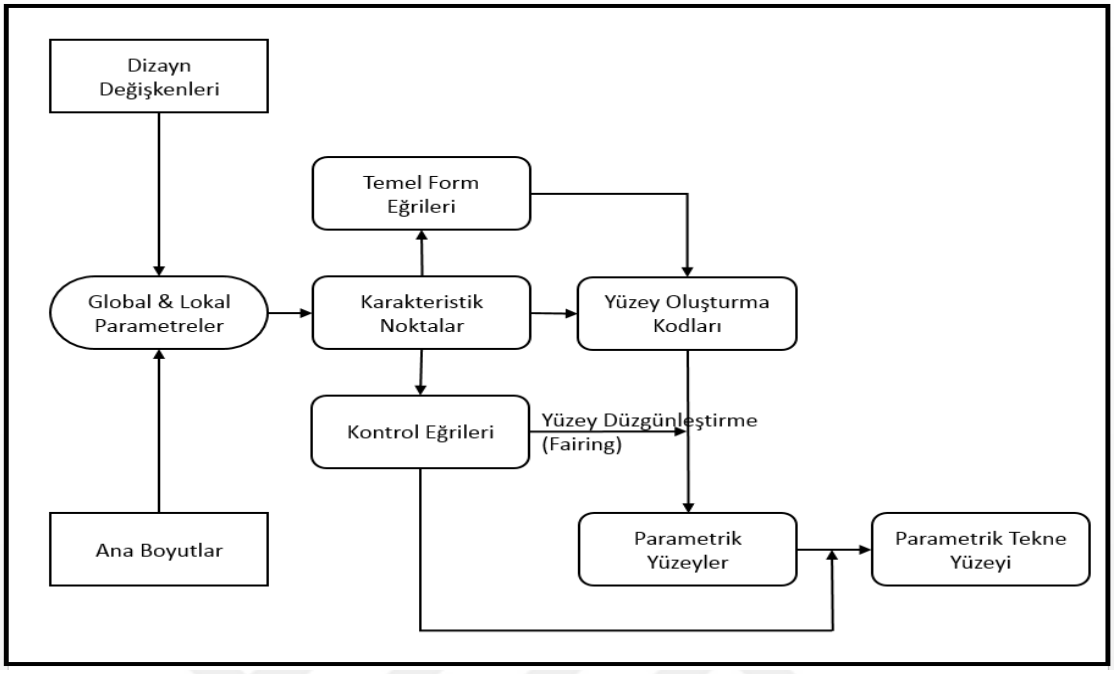
3.4.4 Ana Tekne Formunun Parametrik Olarak Modellenmesi

Bu kısımda optimizasyon için gerekli varyasyonları meydana getirmek amacı ile, ana form parametrik olarak modellenecektir.

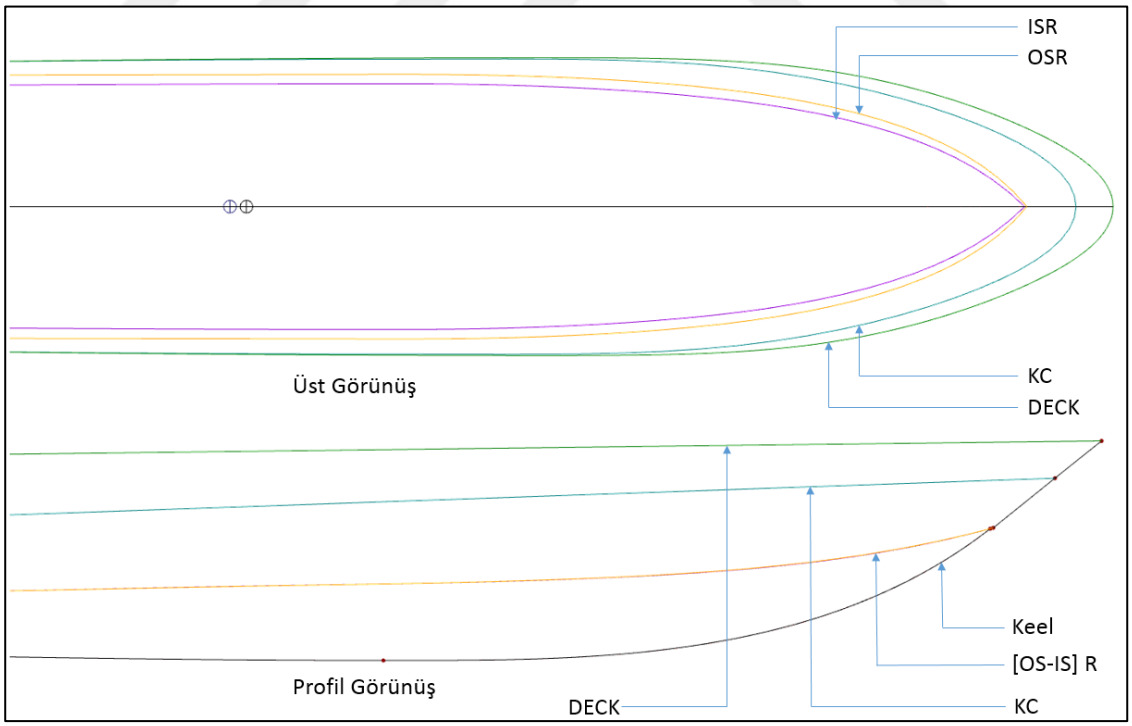
Parametrik form oluşturulurken tüme varım yöntemi izlenir. Noktaların koordinatları, parametrelerin bağımlı değişkeni olarak yüzeyin meydana gelmesini sağlayan eğrileri oluştururlar. Şekil 3.11'de parametrik modellemenin akış şeması gösterilmiştir. İlk adım olarak, amaç fonksiyonuna uygun dizayn değişkenleri ve ana boyutlar belirlenmelidir. Daha sonra karakteristik noktalar bu değişkenlerle ilişkilendirilerek parametrik eğrilerin oluşması sağlanır. Sonrasında, çeşitli kodlar yardımı ile bu eğriler arasından posta kesitleri geçirilerek parametrik yüzeyler meydana getirilir. Yüzey parametreleri haricinde kısıtlamalar ve kontroller içinde parametreler oluşturulabilir. Örneğin stabilite kriteri veya yüzey düzgünlüğünü kontrol eden eğriler. Sistematik olarak varyasyonu düşünülen parametreler, dizayn değişkenleri ile ayrıca ilişkilendirilirler. Böylece istenilen aralıkta varyasyon sağlanır.

Oluşturulan parametreler global ve lokal olarak 2 grup altında toplanabilirler. Global parametrelerin varyasyonu ile tüm geometrinin değişimi sağlanırken, lokal parametreler ile belli bir bölgenin optimizasyonu üzerinde çalışılabilir. Örneğin, tekne genişliği global

bir parametre iken, pervane tünelinin yüksekliği ve formu, lokal bir parametre olarak düşünülebilir.



Şekil 3. 11 Parametrik modelleme akış şeması



Şekil 3. 12 Parametrik ana formun temel eğriler ile temsili

Çizelge 3. 3 Parametrik modelde kullanılan temel form eğrileri

Eğri adı	**Kısaltma**
Merkez Omurga Eğrisi (Keel Curve)	Keel
Güverte Eğrisi (Deck Curve)	DECK
İç çene Eğrisi (Inner Spray Rail)	ISR
Dış Çene Eğrisi (Out Spray Rail)	OSR
Yalancı Çene Eğrisi (Knuckle Curve)	KC

Şekil 3.12 ve Çizelge 3.3 de ise parametrik formu oluşturan temel eğrileri görmekteyiz. Burada form yüzeyi beş temel parametrik eğriden oluşturulmuştur. Eğrilerin parametreler tarafından kontrol ediliş şekli incelendiğinde ise, her parametrik eğrinin aslında iki fonksiyonel eğrinin birleşmesi ile oluştuğu görülmektedir. Her bir fonksiyon eğrisinin "z" eksenindeki koordinatını **[F]** Z ve "y" eksenindeki koordinatı da **[F]** Y ile ifade edilirse, eğrilerin aşağıdaki gibi oluştuğu söylenebilir (Şekil 3.13).

[F] Y-DECK + **[F]** Z-DECK = DECK (3.7)

[F] Y-KC + **[F]** Z-KC = KC (3.8)

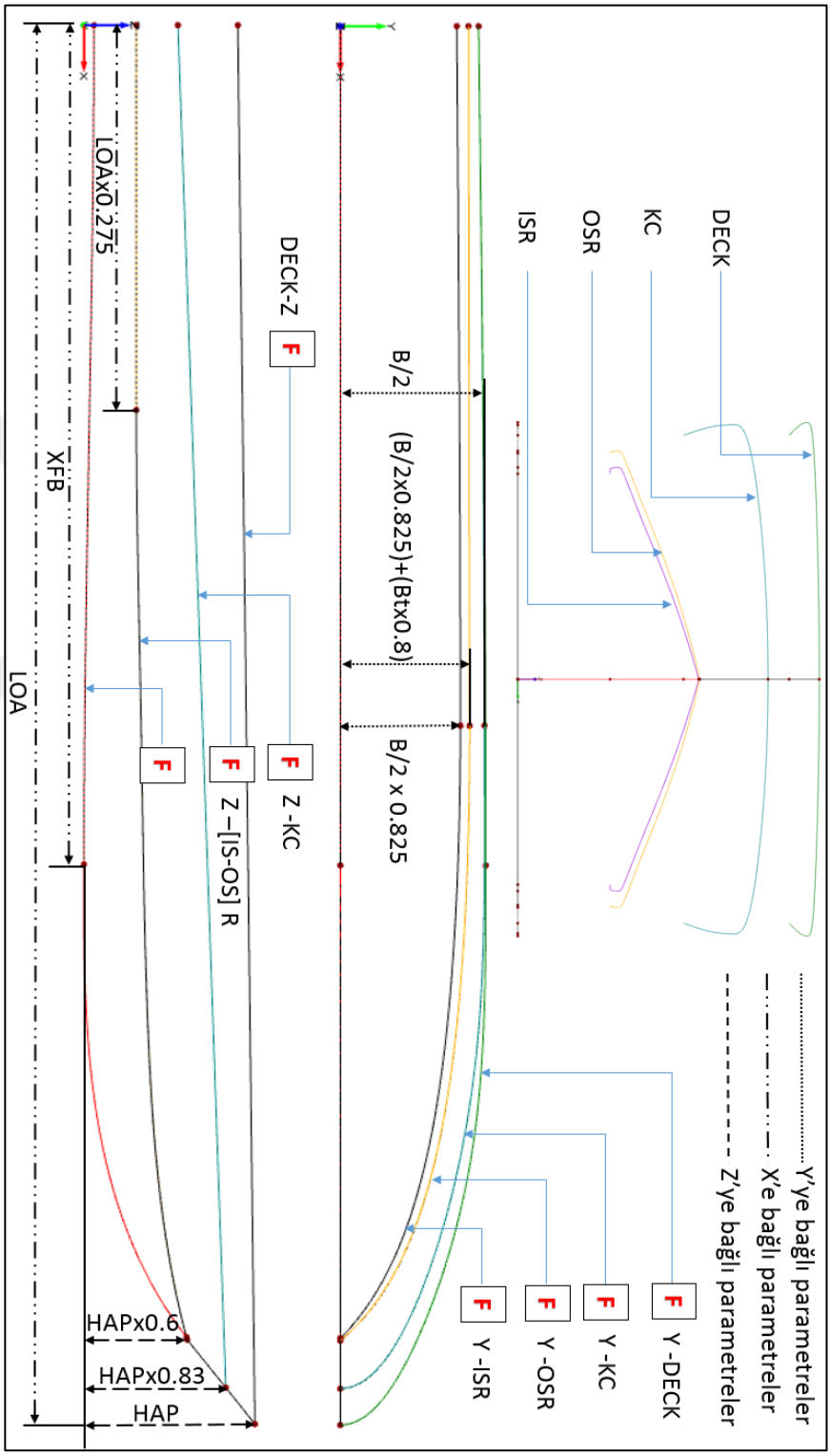
[F] Y-OSR + **[F]** Z-OSR = OSR (3.9)

[F] Y-ISR + **[F]** Z-ISR = ISR (3.10)

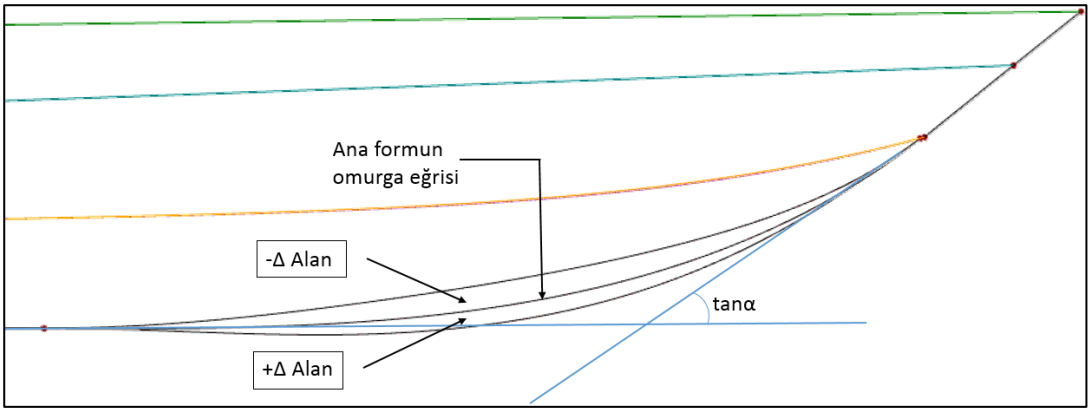
Burada örneklemek gerekirse; DECK parametrik temel eğrisi, geometrinin x ekseni boyunca, "y" koordinatlarını **[F]** Y-DECK fonksiyonel eğrisinden, "z" koordinatlarını ise **[F]** Z-DECK fonksiyonel eğrisinden almaktadır. Bu fonksiyonel eğriler ise, amaç fonksiyonuna uygun oluşturulmuş parametreler ile ilişkilendirilen karakteristik kontrol noktalarından meydana gelmiştir.

Eğrileri oluşturan karakteristik noktalar incelendiğinde, "y" koordinat noktalarının genişlik parametresinin, "x" koordinatlarının boy parametresinin, "z" koordinat noktalarının ise derinlik parametresinin bir ölçüsü olduğu görülmektedir. Örneğin, geometrinin baş bodoslama ile çene hattının birleşim noktasının "z" koordinatı, HAP (Height at Peak) parametresinin % 60'ı olacak şekilde ilişkilendirilmiştir. Şekil 3.14

incelendiğinde ise baş formun aynı tanjant açısına sahip farklı eğri karakteristiklerini görmekteyiz. Burada eğri altında kalan alan "Baş Taraf Dolgunluk" parametresine bağlanarak arttırılabilir veya azaltılabilir. Bu parametre belli bir bölgede değişikliğe sebep olduğundan, lokal bir parametre olarak düşünülebilir.



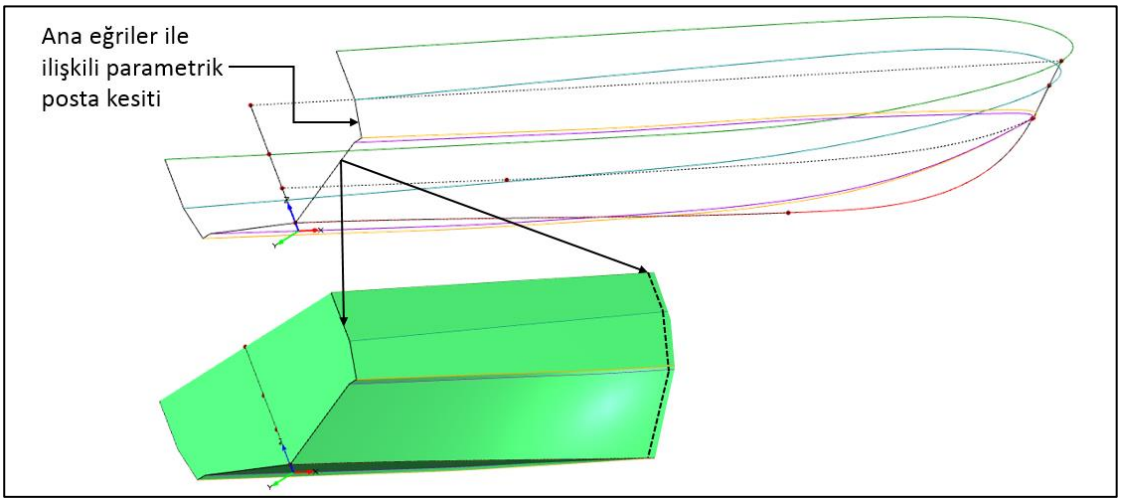
Şekil 3. 13 Ana formun parametrik yapısı



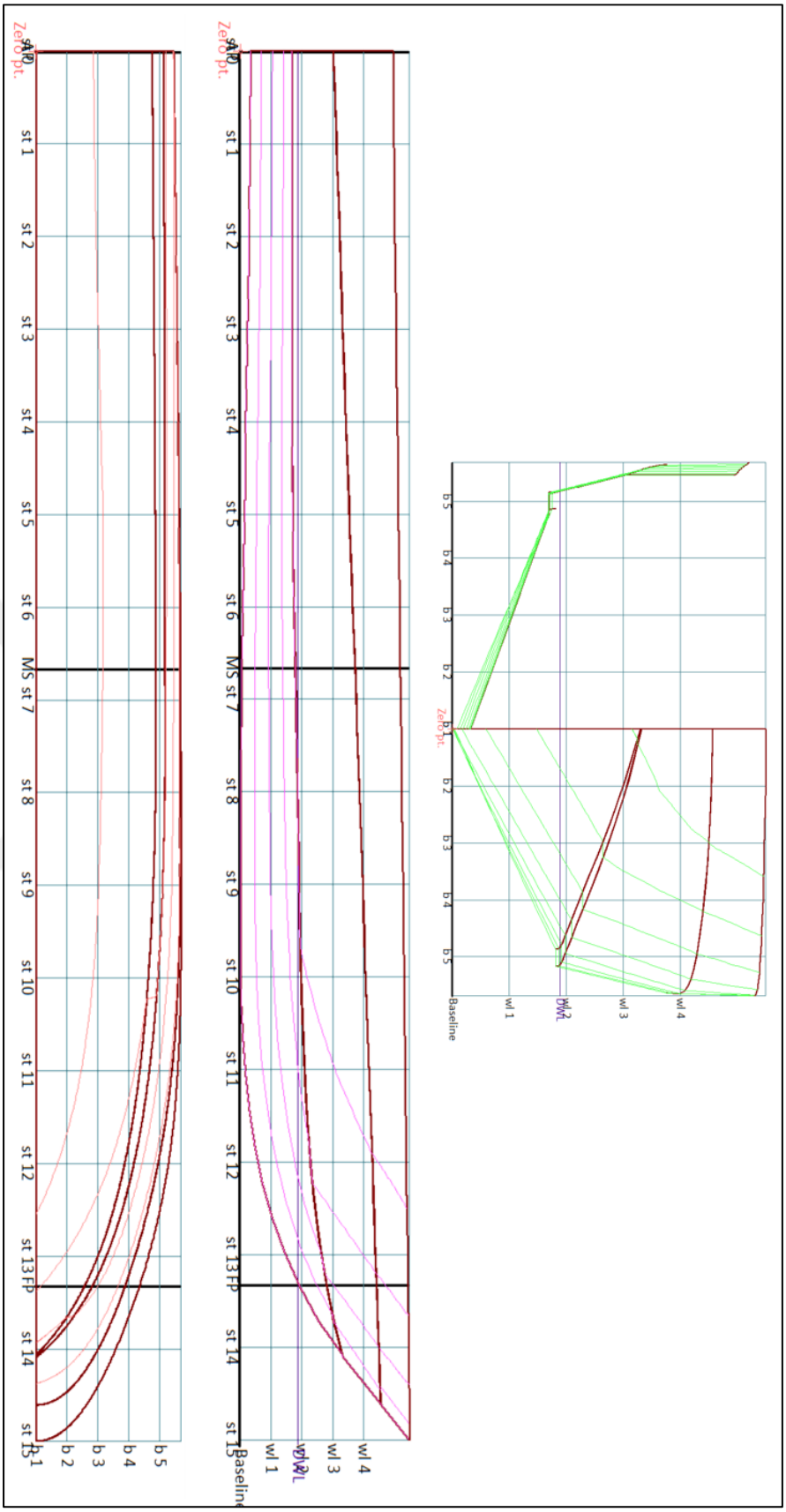
Şekil 3. 14 Baş bodoslamanın fonksiyonel yapısı

Temel parametrik eğriler tanımlandıktan sonra, bu eğriler arasında gemi boyunca ilerleyerek, geometriye şekil verecek olan postalar tanımlanmıştır. Bu postalar, geometrinin koordinat eksenindeki 0 noktasından başlayarak, boy parametresince sınırlanana kadar sürüklenerek, parametrik yüzey oluşturulmuştur. Her temel eğri ile olan ilişkileri de kontrol edilerek düzgün (fair) bir yüzey elde edilmiştir (Şekil 3.15).

Oluşturulan ana formun temsili şekil 3.16'da görülmektedir. Sonraki bölümlerde, oluşturulan ana form için belirlenen kısıtlar, sabit ve değişken parametreler ile sistematik varyasyon yapılacak ve her bir form denizcilik ve direnç açısından incelenecektir.



Şekil 3. 15 Parametrik yüzeyin oluşturulması



Şekil 3. 16 Ana formun su altı geometrisinin temsili

BÖLÜM 4

UYGULAMA

Çalışmanın bu bölümünde daha önceki bölümlerde anlatıldığı şekli ile alt yapısı hazırlanan tekne serisi geliştirme metodolojisinin uygulaması yapılacaktır. Hazırlanan parametrik ana formdan sistematik varyasyon yöntemi ile yeni formlar türetilecektir. Her form sırası ile stabilite, direnç ve denizcilik açısından değerlendirilecektir.

Yüksek hızlarda sürtünme ve serpinti etkilerinin de hesaba katılması, kayıcı forma sahip teknelerin kıyaslanması açısından önemlidir. Bu nedenle düşük hızlarda direnç hesap yöntemi olarak potansiyel teoriye dayalı yazılım kullanılırken, yüksek hızlarda viskoz çözümler gerçekleştirilecektir. Denizcilik açısından inceleme yapılırken formların yüksek hızlarda baştan gelen düzgün dalgalar karşısındaki performansları kıyaslanacaktır. Kıyas parametresi olarak ağırlık merkezi civarındaki ivmelenmeler araştırılacaktır.

Tüm analiz sonuçları kayıt altına alındıktan sonra pareto eğrisi optimizasyon yöntemi kullanılarak farklı deplasman gruplarında optimum tekne aileleri ortaya konulmaya çalışılacaktır.

4.1 Sakin Su Direnç Analizleri

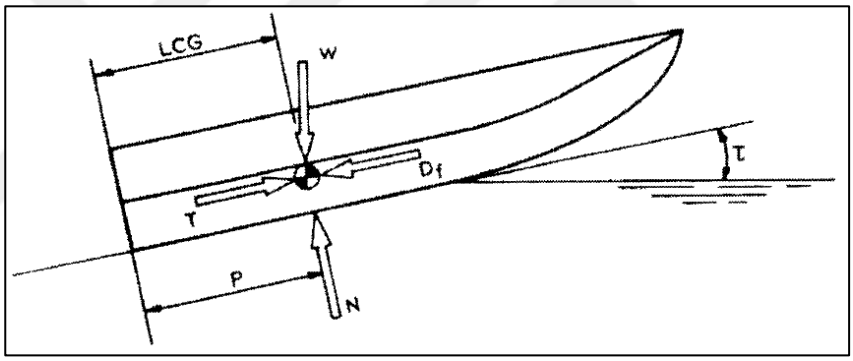
4.1.1 Kayıcı Form Direnç Bileşenleri

Deplasman tipi sualtı geometrilerde hız, toplam direncin (R_T) bir fonksiyonu olarak, toplam direnç katsayısı, su yoğunluğu, ıslak yüzey alanı ve hızın karesi ile orantılıdır [60].

$$R_T = \frac{1}{2} C_T \rho S V^2 \qquad (4.1)$$

Denklemden de anlaşıldığı gibi, deplasman tipi formlar yüksek hızlara ulaştırılmak istendiğinde yüksek makine güçlerine ihtiyaç duymaktadırlar. Fakat karşılaştırılabilir boyutlarda deplasman tipi yerine, kayıcı bir form düşünüldüğünde, ıslak yüzey alanın, hız arttıkça belli bir miktar azalmasından dolayı direnç açısından önemli avantajların ortaya çıktığı görülmüştür. 1930'lu yıllardan sonra daha hafif ve daha yüksek güçler üretebilen makinaların ortaya çıkması kayıcı formların geliştirilmesini kolaylaştırmıştır [61].

Deplasman tipi teknelerin enine ve boyuna kesitleri eğrilikler gösterirken, kayıcı formlar akım ayrışmalarını daha hızlı sağlayabilmek amacı ile daha düz posta ve batok hatlarına sahiptirler. Klasik deplasman tipi tekneler yüksek hızlarda seyrettiğinde negatif dinamik basınç etkisi ile büyük trim açıları ve ıslak yüzey alanın artması ile de yüksek direnç değerlerine sahip olurlar. Kayıcı formlar ise hız arttıkça pozitif dinamik basınç etkisinde su çekimlerini azaltarak daha az direnç değerlerine sahip olurlar [61].



Şekil 4. 1 Kayıcı tekne formuna etki eden kuvvetler [1]

Savitsky [1] Şekil 4.1'de ifade edilen kayıcı tekne üzerindeki kuvvetleri tanımlamıştır. Burada Δ terimi deplasmanı, T itme kuvvetini, D_f direnç kuvvetini, N hidrodinamik kaldırma kuvvetini ve τ'da trim açısını ifade etmektedir.

Kayıcı forma ait toplam direnç ise 4.2'deki eşitlikle ifade edilmiştir.

$$R_T = \Delta \tan \tau + \frac{\frac{1}{2}\rho V^2 \lambda b^2 C_{F0}}{\cos\tau \ \cos\beta} \qquad (4.2)$$

Burada;

ρ : su yoğunluğu

V : maksimum hızı

λ : Islak boy-genişlik oranı

b : kayma sırasındaki ıslak genişlik

C_{F0} : ITTC sürtünme katsayısı

β : kalkıntı açısı

τ : trim açısı

Δ : deplasmanı ifade etmektedir.

4.1.2 Direnç Tahmin Metotları

Kayıcı forma sahip geometrilerin direnç tahminleri için günümüze kadar çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Sistematik olarak oluşturulmuş serilerin verilerinden yararlanılarak, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri kullanılarak, tam ölçekli veya model test verileri kullanılarak ya da istatistiki analizler yapılarak direnç tahminleri yapılmaya çalışılmıştır [62].

Bu yöntemler düşünüldüğünde gerçeğe en yakın metot model testleri olarak görülebilir. Fakat çekme tankının yüksek süratlere uygunluğu, pahalı ve uzun zaman gerektiren bir metot olması dezavantajlarını da beraberinde getirmektedir. Veri tabanlı yöntemler ise, istatistiki tabanlı olduklarından, kullanım alanları veri tabanlarına kayıtlı olan formlar ile sınırlıdır. Dolayısı ile ön dizayn aşamasında, alternatif formların kolaylıkla kıyaslanarak optimizasyon sürecine sokulabilmesi sebebi ile HAD yöntemleri oldukça kullanışlı görünmektedir.

4.1.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemleri

Yüksek hızlı teknelerde dalga direncinin tahmini oldukça önemli yer tutmaktadır. Hidrodinamik kuvvetlerin etkisinde ıslak yüzey alanın azalması sebebi ile sürtünme direnci düşen formun, seyir esnasında etrafında oluşturduğu dalgalara harcanan enerji kaybının minimize olması istenir. HAD yöntemlerinde de bu sebeple dalga direncinin doğru tahmin edilmesi oldukça önemlidir. Özellikle kayıcı formların etrafında oluşan serbest yüzey kaynaklı dalga kırımları, serpintiler gibi lineer olmayan etkilerin hesaba katılması, gerçeğe yakın bir sonuç için oldukça önemlidir. Günümüzde belli hızlara kadar potansiyel akım teorisi temelli metotlar ile dalga direnci tahminleri, gerçeğe yakın bir şekilde yapılabilmektedir. Dawson [37] tarafından geliştirilen panel metot yöntemi

sayısal olarak çözülerek serbest yüzey etkilerini inceleyebilirken, narin gemi teorisine dayalı ampirik formüller de bu konu hakkında fikir vermektedir.

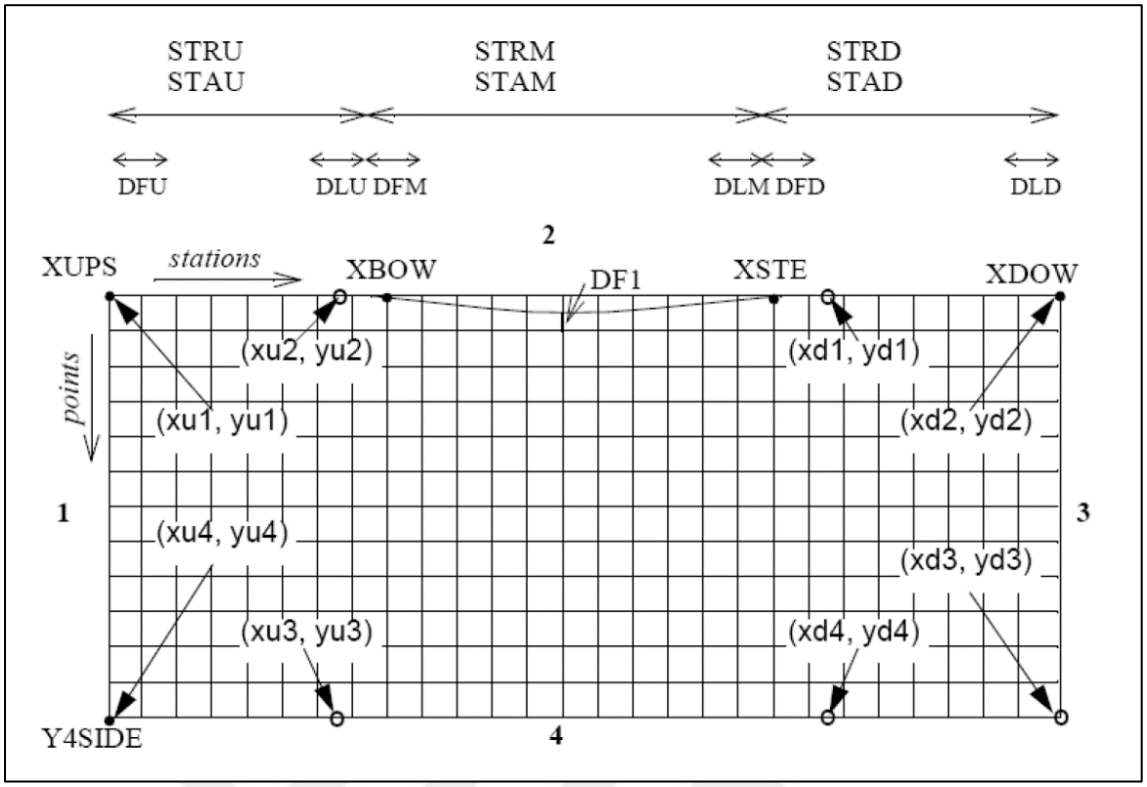
ITTC'57 gibi model deneylerinin sonuçları kullanılarak oluşturulmuş ampirik formüller ile viskoz direnç hesaplanabilirken, daha karmaşık olan Navier-Stokes denklemlerinin çözümü ile de yaklaşımlar yapılabilmektedir. İlk metot daha basit ve hızlı olmasına karşın belirli bir hızın üzerine çıkıldığında viskoz kuvvetlerinin etkinliğinin artması ile belirsizlikler de beraberinde gelmektedir. Dolayısı ile, daha uzun zaman ve bilgisayar gücü gerektirmesine rağmen yüksek süratlerde RANS çözümleri tercih sebebi olmuştur.

4.1.4 Potansiyel Teoriye Dayalı Modelin Çözüme Hazır Hale Getirilmesi

Oluşturulan varyantların optimizasyon süresince direnç analizlerinin otomatik olarak yapılacağı düşünülürse, her varyantın çözüm için gerekli ağ yapısının otomatik olarak oluşturulması önemlidir. Ağ yapısının sıklığı ya da seyrekliği çözüm açısından farklı sonuçlar doğurmaktadır. Sık ağ yapısına sahip bir çözüm dalga formlarını güzel ifade etmesi ve hassas olması açısından avantajlıdır. Seyrek ağ yapısı ise çözüm zamanının kısaltılması açısından avantajlıdır.

4.1.4.1 Çözüm Ağının Oluşturulması

Bu çalışmada direnç hesabı için kullanılan HAD yazılımının özellikle yüksek Fn sayılarında sağlıklı çalışabilmesi, hızın bir fonksiyonu olarak ağ yapısının belli bir düzende kalması ile mümkün kılınabilmektedir.



Şekil 4. 2 Panel metot çözüm ağının tanımı [63]

Şekil 4.2 incelendiğinde buradaki ifadeler;

Point : Bir kesitteki nokta sayısı

DF1 :1 numaralı kenarında konumlanan su hattı boyunun yüzdesi olarak ifade edilen panel boyutu

Y4SIDE :4 numaralı kenarın y koordinatı

Xu1, Yu1 :2 numaralı kenarın serbest yüzeydeki baş uç noktasının koordinatları

Xu2, Yu2 :2 numaralı kenarın serbest yüzeydeki baş tarafta konumlanan ek noktanın koordinatları

Xu3, Yu3 :4 numaralı kenarın serbest yüzeydeki baş tarafta konumlanan ek noktanın koordinatları

Xu4, Yu4 :4 numaralı kenarın serbest yüzeydeki baş uç noktasının koordinatları

Xd1, Yd1 :2 numaralı kenarın serbest yüzeydeki kıç tarafta konumlanan ek noktanın koordinatları

Xd2, Yd2 :2 numaralı kenarın serbest yüzeydeki kıç uç noktasının koordinatları

Xd3, Yd3 :4 numaralı kenarın serbest yüzeydeki kıç uç noktasının koordinatları

Xd4, Yd4 :4 numaralı kenarın serbest yüzeydeki kıç tarafta konumlanan ek noktanın koordinatları

XUPS :Serbest yüzeyin baş bölümünün uç sınırının x koordinatı

XBOW :Serbest yüzeyin baş bölümünün orta bölümle birleştiği noktanın x koordinatı

XSTE :Serbest yüzeyin kıç bölümünün orta bölüm ile birleştiği noktanın x koordinatı

XDOW :Serbest yüzeyin kıç bölümünün uç sınırının x koordinatı

STAU :XUPS ile XBOW arasındaki kesit sayısı

STAM :XBOW ile XSTE arasındaki kesit sayısı

STAD :XSTE ile XDOW arasındaki kesit sayısı

STRU :XUPS ile XBOW arasındaki panel boyutunun büyüme veya küçülme fonksiyonu

STRM :XBOW ile XSTE arasındaki panel boyutunun büyüme veya küçülme fonksiyonu

STRD :XSTE ile XDOW arasındaki panel boyutunun büyüme veya küçülme fonksiyonu

STRM :XBOW ile XSTE arasındaki panel boyutunun büyüme veya küçülme fonksiyonu

STRD :XSTE ile XDOW arasındaki panel boyutunun büyüme veya küçülme fonksiyonu

DFU :XUPS ile XBOW arasındaki ilk panelin boyutu

DFM :XBOW ile XSTE arasındaki ilk panelin boyutu

DFD :XSTE ile XDOW arasındaki ilk panelin boyutu

DLU :XUPS ile XBOW arasındaki son panelin boyutu

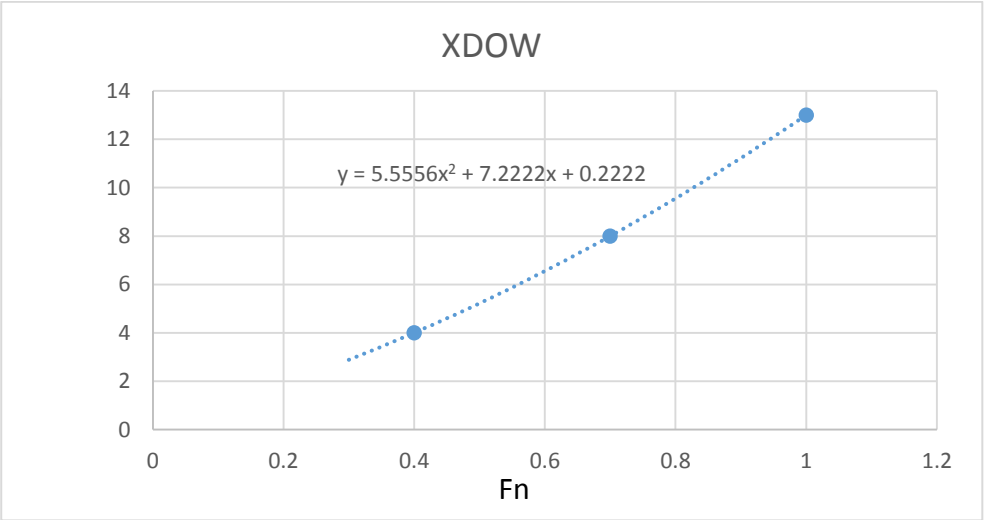
DLM :XBOW ile XSTE arasındaki son panelin boyutu

DLD :XSTE ile XDOW arasındaki son panelin boyutu olarak açıklanabilir [63].

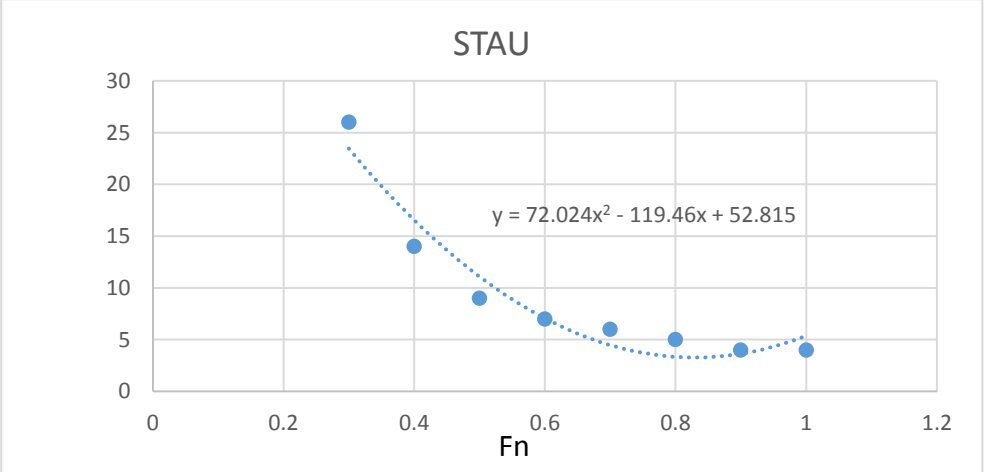
Tezde, her tekne için, Fn 0.5, 0.75 ve 0.95 olmak üzere üç farklı hızda potansiyel çözüm gerçekleştirilmiştir. Bu işlem otomatik bir biçimde gerçekleştirildiğinden çözüm ağı da hızın bir fonksiyonu olmak durumundadır. Çizelge 4.1 ve Şekil 4.3-4.4-4.5-4.6 ve 4.7 incelendiğinde hızın fonksiyonu olarak çözüm ağının boyutları ve sıklığının ifade edildiği görülmektedir.

Çizelge 4. 1 Çözüm ağının hızın fonksiyonu olarak boyutlandırılması [63]

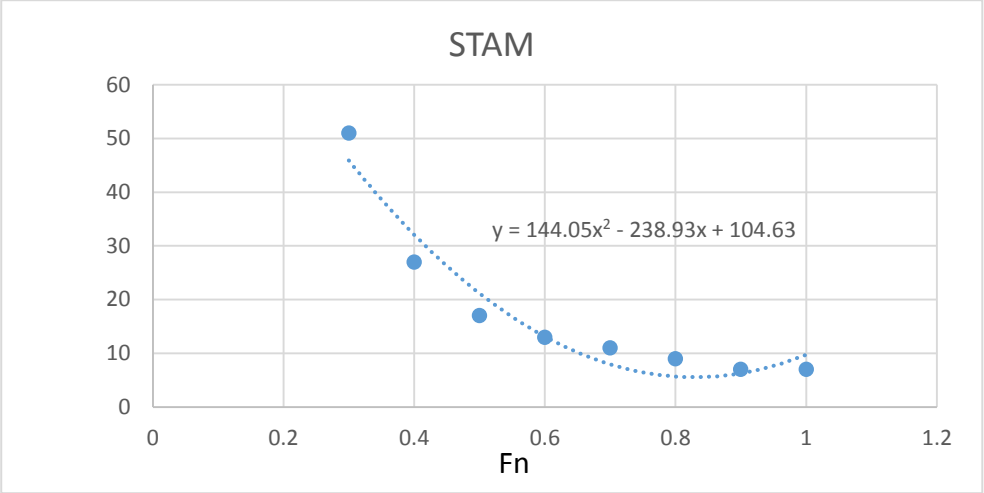
Fn	XUPS	XDOW	STAU	STAM	STAD	Y4SIDE	POINT
0.3	0.5		26	51	101	-0.8	20
0.4	0.5	4	14	27	80	-1.2	20
0.5	0.5		9	17	65	-2	20
0.6	0.5		7	13	61	-3	20
0.7	0.5	8	6	11	71	-3	20
0.8	0.5		5	9	73	-5	20
0.9	0.5		4	7	67	-5	20
1	0.5	13	4	7	67	-5	20



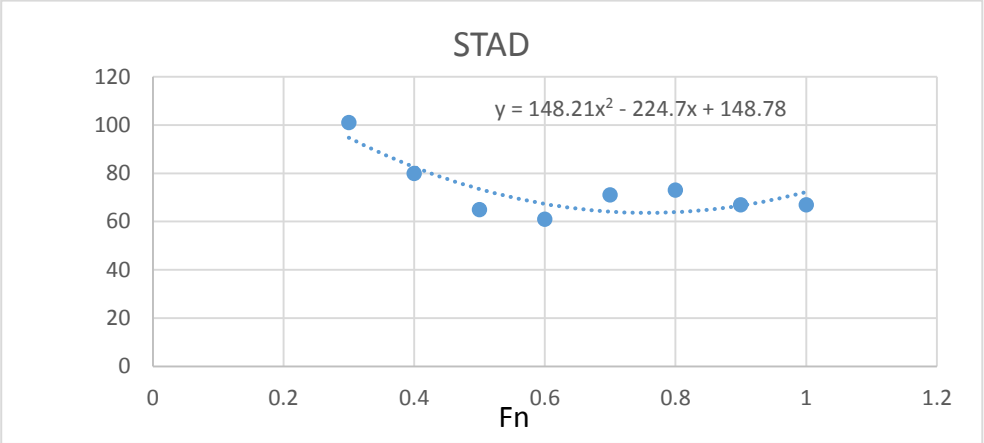
Şekil 4. 3 Hızın bağlısı olarak XDOW parametresinin değeri [63]



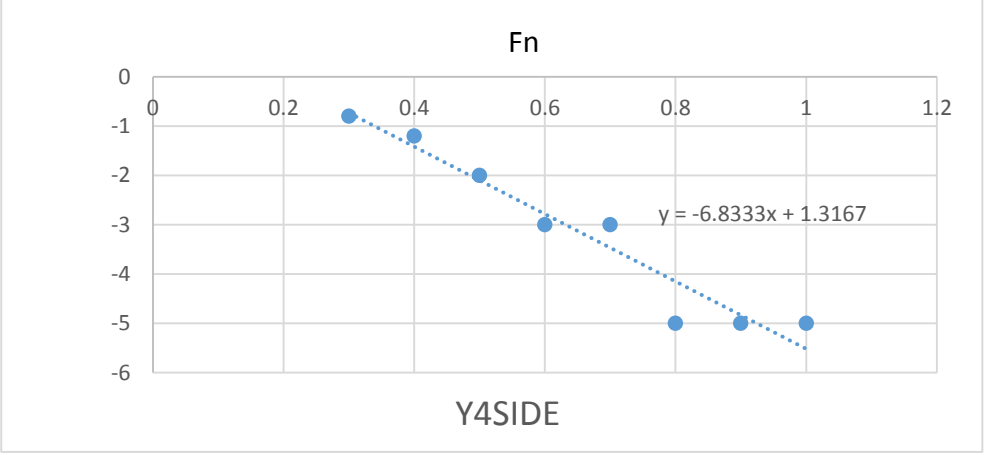
Şekil 4. 4 Hızın bağlısı olarak STAU parametresinin değeri [63]



Şekil 4. 5 Hızın bağlısı olarak STAM parametresinin değeri [63]

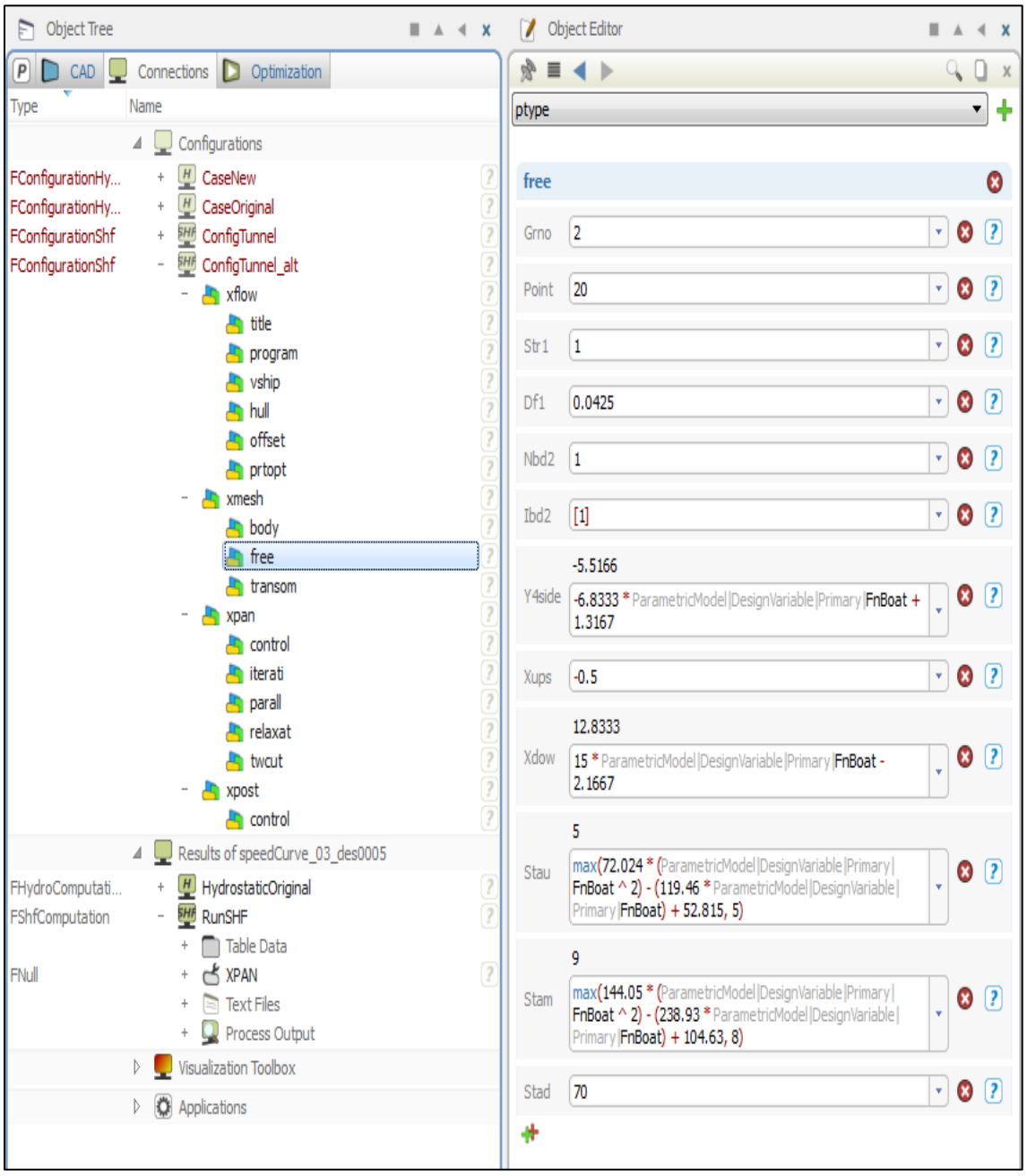


Şekil 4. 6 Hızın bağlısı olarak STAD parametresinin değeri [63]



Şekil 4. 7 Hızın bağlısı olarak STAD parametresinin değeri [63]

Sürecin otomatik bir şekilde işlemesini sağlayabilmek için ana program içerisinde çözüm ağının boyutlarını belirleyen tüm parametreler, parametrik formun su hattı boyunun ve hızın fonksiyonu olarak girilmiştir (Şekil 4.8). Böylece ana program ile, direnç analizlerini gerçekleştiren HAD tabanlı program arasındaki bağlantı sayesinde değişen her tekne su hattı boyu ve hız için çözüm ağı yeniden şekillendirilerek sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4. 8 Ana programda çözüm ağını tanımlayan paramerelerinin girilmesi

4.1.5 Viskoz Sistemin Çözüme Hazır Hale Getirilmesi

Uygulama aşamasında viskoz çözümü gerçekleştirmek için ticari bir yazılım kullanılacaktır. Bu yazılım sonlu hacimler metodu kullanarak probleme çözüm sağlayabilmektedir. Sonlu hacimler metodu daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi problemi tanımlayan kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için kullanılan bir sayısal yöntem çeşididir. Problemin bir kontrol hacmi içerisinde tanımlanmasından sonra, bu hacmin sonlu sayıda elemana (hacime) bölünmesi ile çözüm ağı meydana getirilir. Her bir elemanın merkezinde değişkenler hesaplanarak integrasyon tamamlanır. Bu elemanlar üçgen dörtyüzlü, piramit, prizmatik, düzgün altı yüzlü ve gelişigüzel çok yüzlü gibi farklı geometrik yapılarda olabilirler. Problemin tipine göre eleman tipi de belirlenmelidir.

Kontrol hacmi elemanlara bölündükten sonra serbest yüzeyin temsili yapılmalıdır. İki fazlı olan problemde, iki fazın birleşme noktalarında oluşan serbest yüzey, problemin yaklaşımı açısından önemlidir. Son olarak sınır şartları belirlenir ve çözüm gerçekleştirilir.

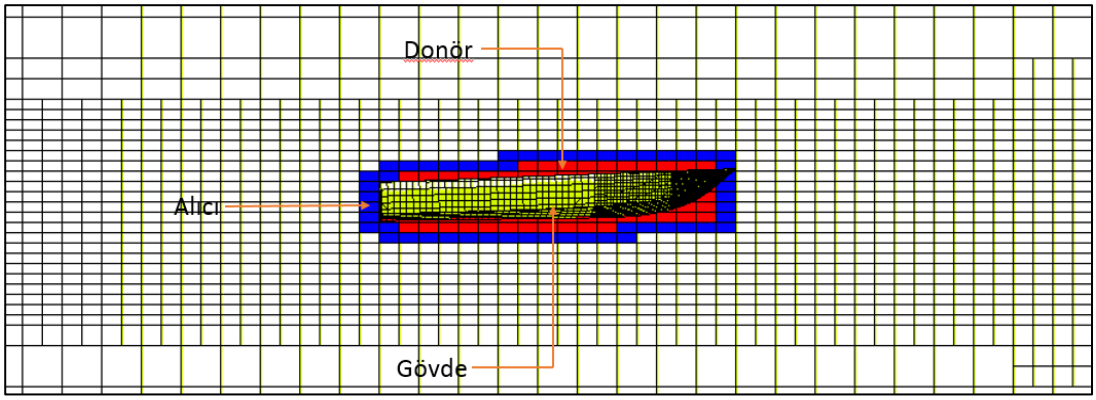
4.1.5.1 Çözüm Ağının Oluşturulması

Yüksek süratli bir teknenin akış analizi incelendiğinden, doğası gereği tekne su içerisinde oluşacak hidrodinamik kaldırma kuvvetleri ve dinamik trim açıları sebebi ile hareketli bir hal alacaktır. Dolayısı ile, kontrol hacmi içerisinde çözüm ağı oluştururken bu durumu göz önüne almak gereklidir. Konu ile ilgili olarak, Duman vd. [64] çalışmalarında kayıcı form yapısında olan bir tekneyi yüksek froude sayılarında, iki farklı grid tekniği ile viskoz çözümler gerçekleştirmişlerdir. Çözümler direnç, serbest yüzey deformasyonları, dinamik trim ve hidrodinamik kaldırma kuvvetleri açısından irdelenerek ağ yapıları karşılaştırılmıştır. Dinamik (Over-set) ve statik çözüm ağı kullanan araştırmacılar Fn=0.28 ve Fn=1.0 aralığında URANS yaklaşımı ile çözümlerini gerçekleştirmişlerdir. Fn=0.65'te yapılan çözümlerde tekne üzerindeki dalga deformasyonları iki ağ yapısında da deneysel sonuçlar ile tutarlılık göstermiştir. Direnç açısından Fn=0.8 e kadar iki ağ yapısının da tatmin edici sonuçlar verdiği görülmüştür. Fn=1.0 dan sonra hata oranın arttığı fakat daha düşük hızlarda dinamik ağ yapısının daha başarılı olduğu görülmüştür.

De Luca vd. [65] tarafından yapılan çalışmada ise, yüksek süratli teknelerin performans tahminleri amacı ile kullanılan simülasyon programlarının sağlıklı sonuç vermesi açısından doğrulama metotlarının önemine dikkat çekilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında performans tahmini için kullanılan farklı simülasyon teknikleri değerlendirilmiştir. İkinci aşamada ise üç farklı teknenin doğrulama çalışmaları dört farklı hız için yapılmıştır. Yapılan çalışma sırasında dinamik çözüm ağının (over-set metot) daha verimli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca bir sayısal simülasyon yakınsama metodu olan LSR-GCI'nin en verimli teknik olduğunu deneysel çalışmalarla ortaya koymuşladır.

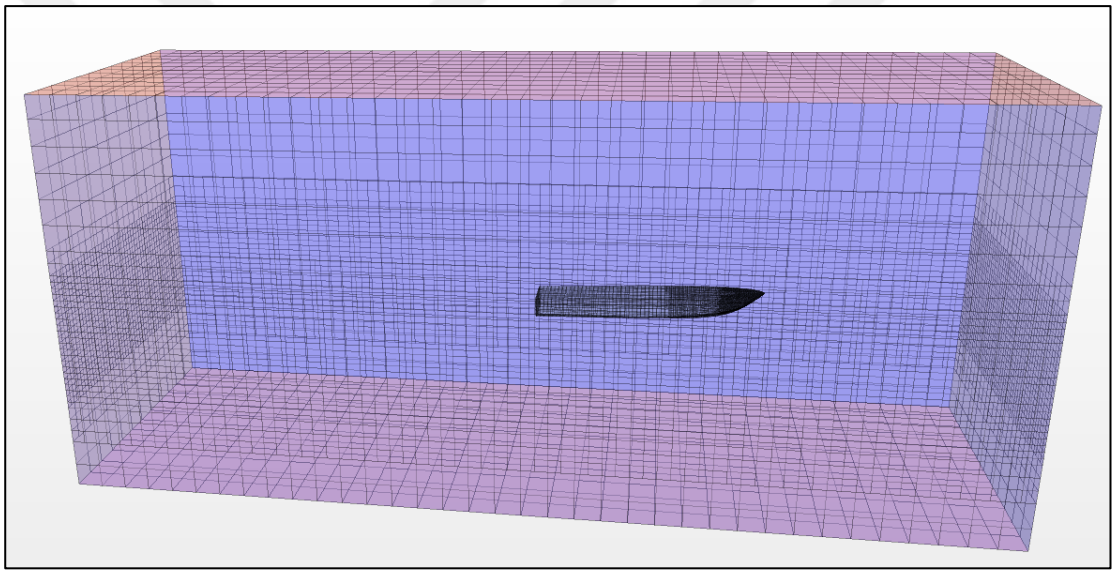
Tezde kullanılacak HAD yazılımında uygun ağ yapısı olarak dinamik (over-set) grid yapısı tercih edilmiştir. Bu metot temel olarak, iki üst üste binmiş elemandan birinin hareket kabiliyeti olmasına, diğerinin ise kontrol hacmi içinde sabit kalmasına dayanır. Hareketli olan eleman (overset mesh) dönme ve yer değiştirme metotlarını kullanarak, akışkanı temsil eden elemanın yerini alarak katı modelin hareketini sağlar. Tüm elemanların şekilleri ve hareketleri, yer değiştirme vektörleri ve dönme açıları ile ifade edilir. Katı model akış içinde harekete başladığında, etkileşim halinde olan elemanların pozisyonları, gövdenin hareket ve dönme denklemlerinin çözümlenmesi ile elde edilir.

Kontrol hacmi içerisindeki sabit olan elemanların, hareketli olan elemanlar ile olan bilgi etkileşimi şu şekilde açıklanabilir; Öncelikle hareketli olan elemanlar etrafında bulunan sabit elemanlar belirlenir ve bunlar donör (donor) olarak ayrılırlar. Daha sonra donör elemanlara yakın olan kontrol hacmi içerisindeki sabit elemanlar tanımlanır ve alıcı (acceptor) olarak adlandırılırlar (Şekil 4.9). Bu elemanlar hareketli elemanları çevreleyen devamlı bir hat oluşturmalıdırlar. Hareketli elemanları çevreleyen sabit elemanlar öncelikle etkisiz haldedirler. Donör ve alıcılar, elemanlar arasındaki bilgi transferini gerçekleştirirler. Her alıcı eleman bir veya daha fazla donörden bilgi transferi sağlayabilir [66].



Şekil 4. 9 Kontrol hacmi içerisinde alıcı – donör yerleşimi

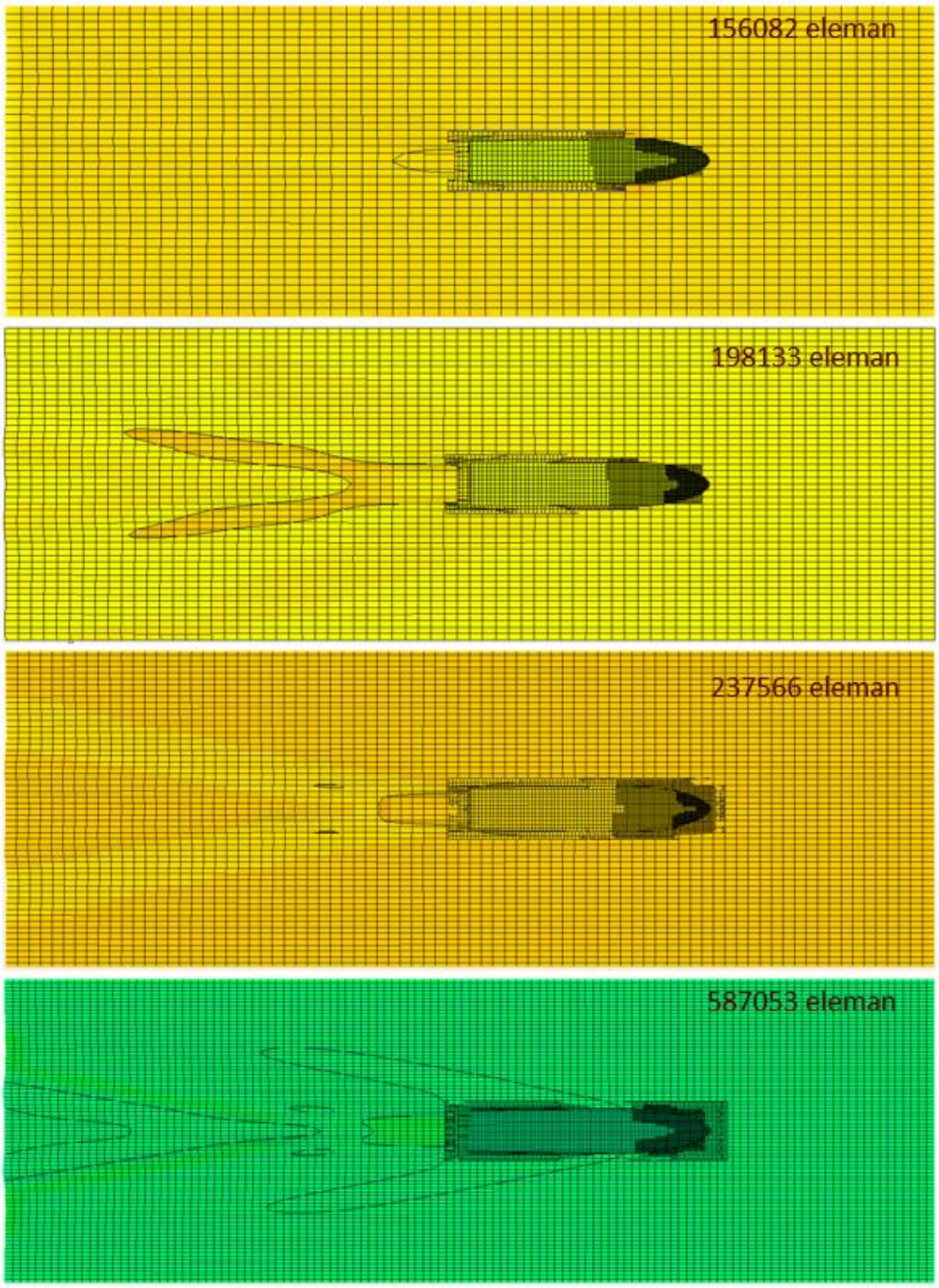
Tezde kontrol hacmi içerisinde her alternatif tekne için yaklaşık 200000 eleman yer almaktadır (Şekil 4.10).



Şekil 4. 10 Kontrol hacmi içinde oluşturulmuş çözüm ağı

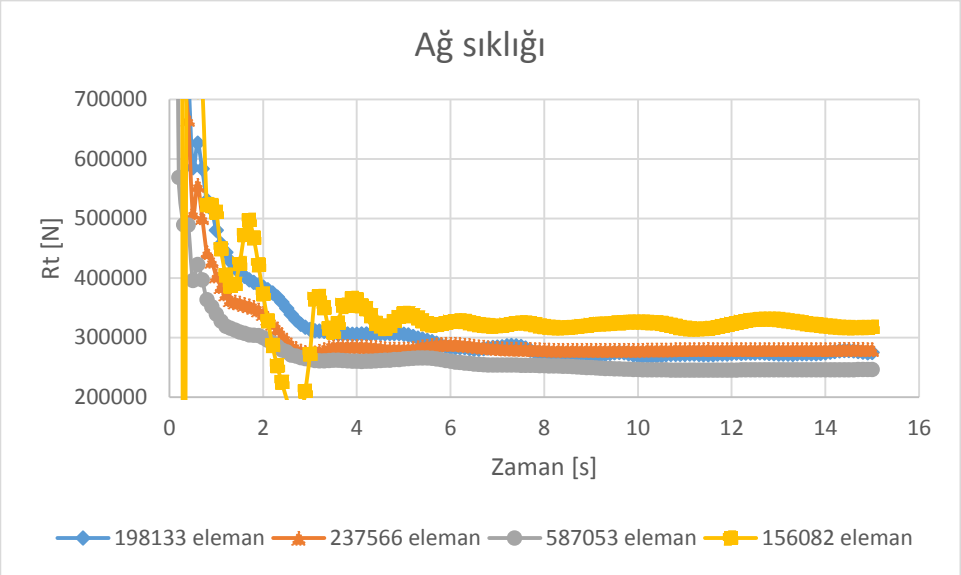
Eleman sayısının sıklığı belirlenirken, DES0107 numaralı varyant için yaklaşık 150000 elemandan başlayarak 580000 elemana kadar çözüm ağı sıklaştırılarak çözümler yapılmıştır. Şekil 4.11 incelendiğinde 156082 eleman ile gerçekleştirilen çözümde tekne arkasında meydana gelen dalga deformasyonlarının çok belirgin olmadığı görülmektedir. 198133 eleman ile yapılan çözümde ise dalga deformasyonları daha net olarak görülmektedir. Sıklığın daha da arttırılması ile, kıç bölümdeki dalga formlarının daha detaylı bir biçimde ifade edilebildiği görülmektedir.

Tezde tüm varyantlar için araştırılacak olan ana parametrelerden biri direnç olduğundan, farklı eleman sayılarına sahip çözüm ağlarının direnç açısından verdiği sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 4. 11 Çözüm ağı sıklığı

Şekil 4.12 incelendiğinde 587053 elemana sahip çözüm ağının bulunduğu sisteme 198133 ve 237566 elemana sahip çözüm sisteminin daha yakın sonuç verdiği görülmektedir. 156082 elemanlı çözümde ise diğer üç çözümün gidişatından farklı sapmalar görülmektedir. Bu çalışmadan yola çıkarak tezde her varyant için 200000 civarında eleman ile çözümler yapılacaktır.



Şekil 4. 12 Farklı çözüm ağ yapısına sahip sistemlerin direnç açısından karşılaştırılması

4.1.5.2 Serbest Su Yüzeyinin Modellenmesi

Bir kontrol hacmi içerisinde iki farklı fazda akış modellenmek istendiğinde bu iki faz arasındaki sınır tabaka, serbest yüzey olarak adlandırılır. Serbest yüzey üç farklı biçimde incelenebilir;

- Sınırları keskin biçimde tanımlanmış akışlar,
- Sınırları belli olan fakat birbiri içine geçebilen akışlar,
- Sınırları belli olmayan tarzdaki akışlar.

Burada birinci grubu örneklendirmek gerekirse, açık kanallarda dalga oluşmadığı varsayılan bir model olabilir, ikinci tip akışa ise yine açık bir kanalda dalga oluşumunun serbest olduğu bir akış modeli düşünülebilir, son gruba ise kapalı bir kap içerisinde çalkantının olduğu bir akış modeli düşünülebilir.

Tezde kullanılacak olan model ikinci grup akışkan modeli ile uyum göstermektedir. Bu tarz dalga deformasyonlarına izin veren akışın sağlandığı sayısal modelleme için serbest yüzeyi tanımlamada iki yöntem kullanılabilir.

- Ara yüzey takip metodu
- Ara yüzeyi yakalama metodu

Ara yüzeyi takip metodu, sonlu farklar yöntemine uygun şekilde ayrıklaştırılmış bölgelere uygulanabildiği gibi, sonlu hacimler yöntemine uygun ayrıklaştırılmış bölgelere de uygulanabilmektedir. Bu yöntemde çözüm ağı noktalarının düşey olarak hareketine izin verilmektedir. Daha çok yumuşak serbest yüzeye sahip akışlar ve basit geometriler için kullanılan yöntemde, ara yüzey çözüm ağı sınırlarını takip eder [19].

Harlow ve Welch [67] tarafından oluşturulan MAC şeması ara yüzey yakalama metotları arasında öncü olarak kabul edilir. Bu yöntemin dezavantajı özellikle üç boyutlu problemlerde hesaplama hacminin çok büyümesidir. Metot, serbest yüzeye yakın yerlere, kütlesel yapısı ihmal edilebilecek düzeyde parçacıkların bırakılarak, hareketlerinin izlenmesine ve dalga oluşumlarının da MAC şeması ile ifade edilmesine dayanır.

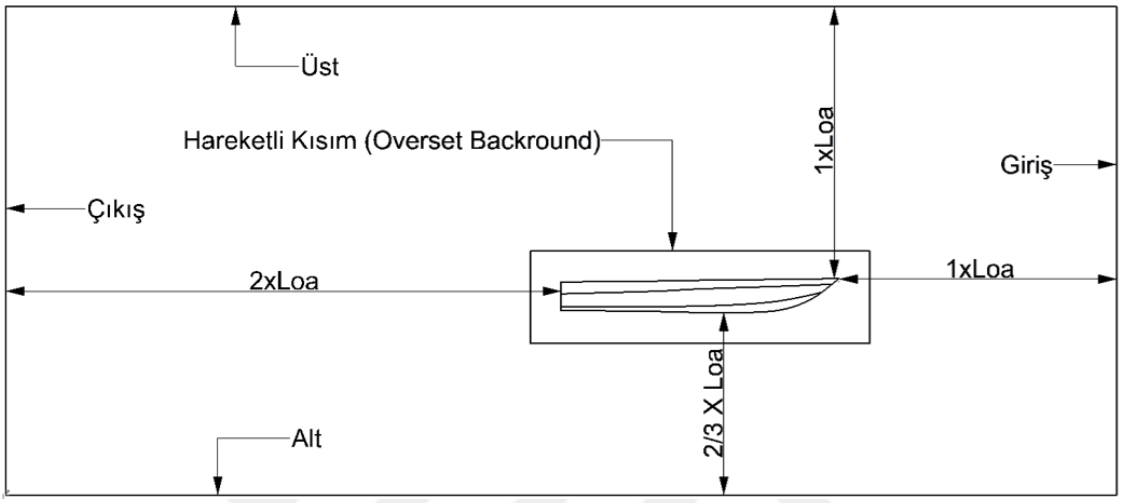
Hirt ve Nichols [68] diğer bir ara yüzey yakalama metodu olan VOF (Volume of Fluid) yaklaşımını geliştirmişlerdir. Bu yaklaşım ile korunum denklemlerine ek olarak, kontrol hacmi içerisindeki her bir eleman içerisinde faz oranları hesaplanabilmiştir.

Tezde kullanılacak olan yazılım da VOF yöntemini desteklemektedir. Kontrol hacmi içerisinde bulunan elemanların, iki fazlı akıştan kaynaklı olan faz oranlarının toplamı 1 olacak şekilde ayrıklaştırılması sağlanabilmektedir. Böylece her bir akışkan fazı için basınç, sıcaklık ve hız alanları hesaplanabilmektedir.

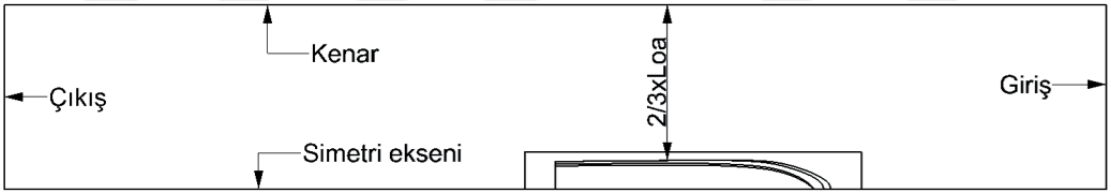
4.1.5.3 Başlangıç ve Sınır Koşullarının Belirlenmesi

Bir tekne etrafındaki akışın modelleneceği kontrol hacmi oluşturulurken, geometrinin sınırları ve şekli de önem teşkil etmektedir. Örneğin gereğinden büyük bir hacim, eleman

sayısının artmasına ve çözüm zamanının uzamasına sebep olurken, fazla küçük hacim de çözümün sağlıksız olmasına neden olabilir. Şekil 4.13 ve 4.14'te görüldüğü gibi tekne geometrisi, kendi boyunun belli oranları çerçevesinde kontrol hacmine yerleştirilmiştir. Burada görüldüğü gibi sınır şartları olarak alt, üst, kenar, simetri ekseni, akış içerisindeki tekne gövdesi, giriş ve çıkış bölümleri yer almaktadır.



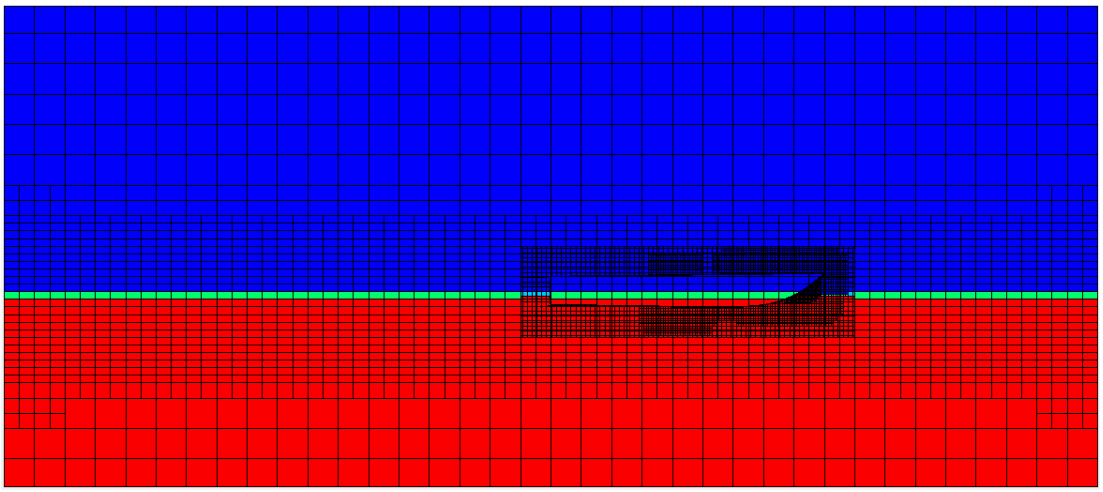
Şekil 4. 13 Kontrol hacminin sınırları profil görüntüsü



Şekil 4. 14 Kontrol hacminin sınırları üst görünüş

Bu tarz bir akış probleminin çözümü için başlangıç ve sınır şartlarının doğru ayarlanması oldukça önemlidir. Sayısal yöntemin doğası gereği, problemin iteratif çözümü için başlangıç değerlerinin biliniyor olması gereklidir. Zamana bağlı olarak çözülecek olan bu problemde, hareket denklemlerinin çözümü için t=0 anında hız, basınç ve sıcaklık değişkenleri belirli olmalıdır.

Çözüm için model hazırlanırken önceki bölümde değinilen VOF modelinin kullanılması ile, her eleman için hacim payları ayarlanmıştır. Buna göre teknenin yüzeceği su hattından ayrılan ve tamamı su altında kalan elemanların hacim payları 1 iken, tamamen su üstünde kalan elemanların da hacim payları 1 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.15).



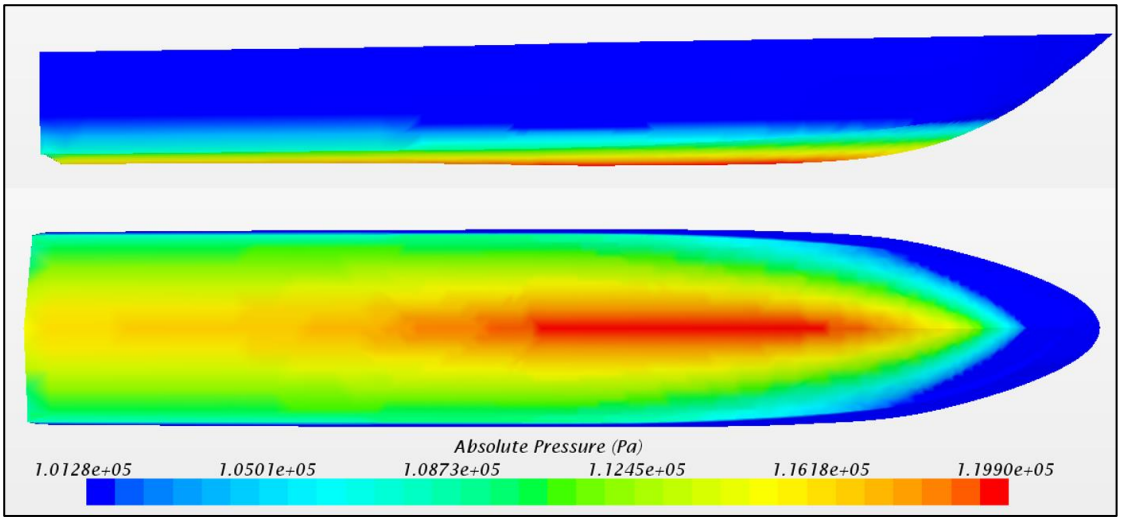
Şekil 4. 15 Serbest su yüzeyinin simetri ekseninden görünüşü

Hacim payları belirlendikten sonra, zamana bağlı olarak akışın giriş ve çıkış bölümlerinde hız ve basınç dağılımları bilinmelidir. Burada problemi karmaşık hale getiren bölge ise, serbest yüzeyin olduğu yerlerdir. Serbest yüzey bölgesinde düşey hızların eşit olduğu kabulü yapılırsa, sıvı ve gaz arasında boşluk olmadığı varsayımı yapılabilir ve bu kinematik sınır koşulu olarak adlandırılır.

Serbest yüzey boyunca olması gereken bir başka sınır koşulu da, viskoz kayma gerilmelerinin dengesi sağlanmış olmalıdır.

Tekne etrafındaki akış probleminin çözümü için oluşturulan, Şekil 4.13 ve 4.14'te görülen kontrol hacminin giriş kısmı, serbest yüzey ile ayrılmış biçimde, sabit hız ile akışkan giriş kesiti olarak tanımlanmıştır. Bir teknenin açık denizde yüzdüğü düşünülürse, kontrol hacminin kenar kısımlarına da, hız vektörleri yüzeye teğet olacak şekilde bir sınır koşulu belirlenmiştir. Zamandan tasarruf amacı ile de tekne merkez hattına simetri sınır şartı uygulanarak, yarım model çözümü sağlanmıştır. Simetri eksenindeki diğer bir sınır koşulu da, buradan hiçbir şekilde akışkanın geçmesine izin verilmemesidir. Çıkış kısmında, dışarı çıkacak elemanlara ise hidrostatik basınç sınır koşulu uygulanmıştır. Tekne düzlemi içinde duvar kabulü yapılarak sınır koşulları tanımlanmıştır.

Şekil 4.16'da başlangıç şartlarında tekne su altında oluşan hidrostatik basınç dağılımı görülmektedir. Optimizasyon süresince viskoz teori uygulanacak, tüm alternatif teknelerin başlangıç ve sınır koşulları aynı olacak şekilde çözümler tamamlanacaktır.



Şekil 4. 16 Tekneye başlangıç koşullarında etki eden hidrostatik basınç dağılımı

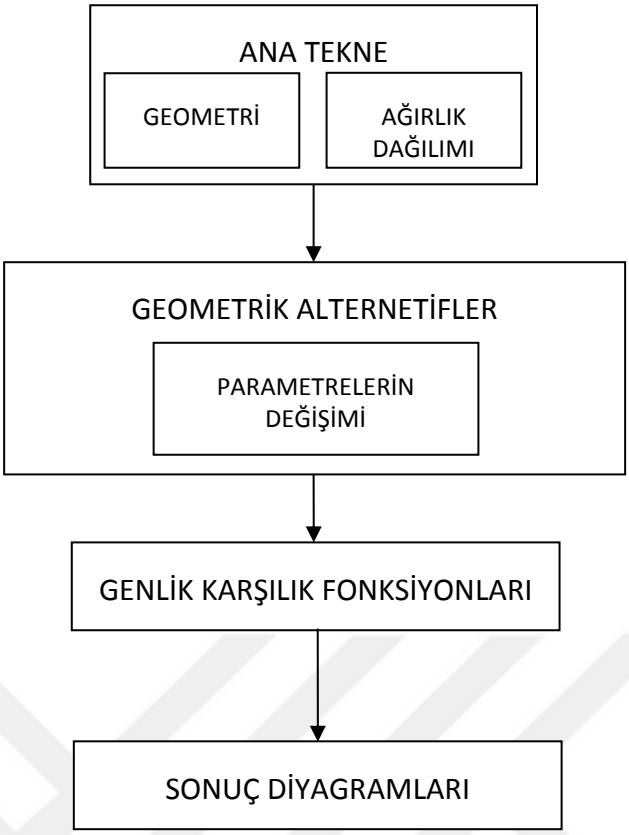
4.2 Denizcilik Analizleri

4.2.1 Deniz Ortamının Belirlenmesi ve Hesap Yöntemi

Yüksek süratli bir teknenin denizcilik açısından iyi performans göstermesi için, ön dizayn aşamasında formu etkileyen parametrelerin amaç fonksiyonunu karşılayacak biçimde optimize edilmesi gereklidir. Bu parametreleri incelemek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

Saylı vd. [69] balıkçı tipi formlar üzerinde regresyon analizi yaparak parametrelerin etkisini araştırmış ve ön dizayn için fikir vermiştir. Bir ana tekneden yeni bir tekne grubu oluşturularak, her tekne için denizcilik analizleri yapılmış ve sonuçlar grafikler yardımı ile yorumlanmıştır. Denizcilik için araştırılacak parametreler iki gruba ayrılarak ayrı ayrı incelenmiştir.

Kükner ve Sarıöz ise yüksek süratli formların blok katsayısının, denizciliğe olan etkisini araştırmışlardır [70]. Tezde alternatif tekneler optimizasyon süresince denizcilik açısından analiz edilirlerken Sarıöz'ün "ileri doğru analiz" yöntemi kullanılacaktır [71]. Oluşturulan alternatif tekneler için belirlenen form parametreleri Şekil 4.17'de ifade edilen akış şeması izlenerek denizcilik açısından araştırılacaktır.



Şekil 4. 17 İleri doğru analiz yöntemi akış şeması [71]

Sarıöz [72] 1997 yılında yaptığı çalışmasında, düşey düzlemdeki hareketler için en fazla salınımın, baştan gelen dalgalar sonucunda ortaya çıktığını tespit etmiştir. Dolayısı ile bu durum en kötü senaryo olarak kabul edilebilir.

Bu çalışmada analizi yapılacak teknelerin spesifik bir çalışma ortamı olmadığından, bir dalga enerji spektrumu ve deniz şiddeti belirlemek yerine, baştan gelen dalgalarda ağırlık merkezi civarındaki ivmelenmelerin transfer fonksiyonlarını hesaplama yöntemi kullanılacaktır. Bu hesap yapılırken, her alternatif form için baştan gelen düzgün sinüsoidal dalgalar arasında, harmonik karakterde bir hareket yapacağı düşünülerek, farklı frekanslara sahip dalgalardan kaynaklanacak genlikler, süperpozisyon yasasına göre toplanmış ve genlik karşılık fonksiyonu (transfer fonksiyonu) elde edilmiştir.

4.2.2 Genlik Karşılık Fonksiyonlarının (RAO) Hesaplanması

Belirli bir amaç fonksiyonu ve özel bir çalışma ortamı belirli olmadığında alternatif teknelerin kıyaslanabilmesi için RAO'nın (genlik karşılık fonksiyonu) hesaplanarak kıyaslanması gerekir. Tezde denizcilik analizleri Fn.= 1.5 hızda yapılacağından kayma

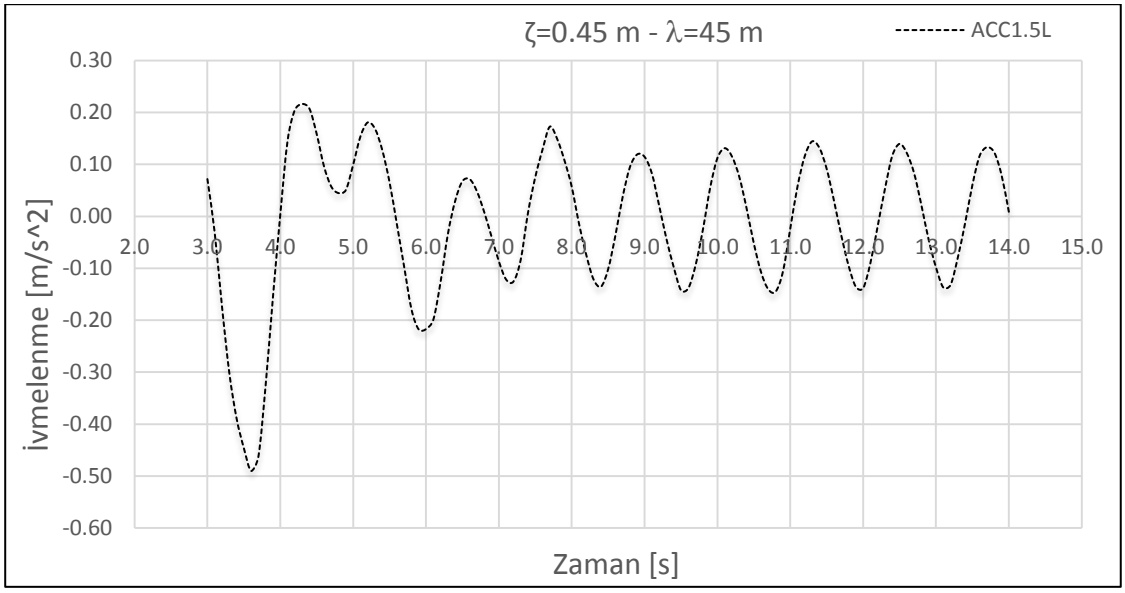
rejimi oluşacaktır. Bu durumda oluşacak sprey etkileri ve hidrodinamik kaldırma kuvvetlerinin etkinliğinin fazla olmasından dolayı, viskoz çözümün daha uygun olduğu düşünülmüştür.

Viskoz çözüm sırasında, genlik karşılık fonksiyonlarını hesaplayabilmek amacıyla, alternatif tekneler baştan gelen düzgün dalgalara maruz bırakılarak, zaman alanında yapılan hesaplar, frekans alanına çevrilmiştir. ITTC'nin bu konudaki önerisi, dalga yüksekliğinin dalga boyuna oranı sabit 1/50 kabul ederek, dalga boyunun tekne boyuna oranını da tekne boyunun yarısından başlayarak 2 katı olana kadar analizi sürdürmektir [73]. Çizelge 4.2'de genlik karşılık fonksiyonlarının hesaplanması için dalgaların boyları ve genlikleri belirtilmiştir. Tezde tüm alternatif tekneler, baştan gelen bu dalga boyları ve genliklerindeki dalgalara maruz bırakılarak viskoz çözümler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4. 2 Baştan gelen düzgün dalgalarda dalga boyları ve genlikleri

V	λ	ζ (m)
Fn 1.5	0.5 L	0,225
Fn 1.5	1.0 L	0.450
Fn 1.5	1.5 L	0.675
Fn 1.5	2.0 L	0.900
Fn 1.5	3.0 L	1.350

Zaman alanında yapılmış bir çözümde genlik karşılık fonksiyonlarını hesaplayabilmek için frekans alanına geçilmelidir. Bu yapılırken Fourier dönüşümü kullanılmıştır. Şekil 4.18'de örnek teşkil etmesi amacı ile dalga genliği 0.45 m, dalga boyu da 45 m olacak şekilde, parametrik ana formun, baştan gelen düzgün dalgalarda, 14 saniye süresince ağırlık merkezi civarındaki ivmelenmesi görülmektedir.



Şekil 4. 18 Dalga boyu 45 m, dalga genliği 0.45 m, ağırlık merkezi civarındaki ivmelenmeler

Bu zamana bağlı ivmelenme grafiğini frekans alanına çevirmek için aşağıdaki Fourier serisi dönüşümünden yararlanıldı.

$$\eta(t) = \eta(0) + \sum_{n=1}^{N} \eta_n \cos(\omega_e t + \beta_n) \tag{4.3}$$

n=1,2,3…

$$\eta_0 = \frac{1}{T_e}\int_0^{T_e} \eta(t)\, dt \tag{4.4}$$

Burada, η_0 düzensiz bir sinyal için sıfırıncı harmonik, yani sinyalin ortalama değerini ifade eder. Denklem 4.5 ve 4.6 daki η_n ve β_n ise n'inci dereceden harmonik genliği ve faz açısını ifade eder. Bu değer 4.7 ve 4.8 ifade edilen denklemler yardımı ile hesaplanır.

$$\eta_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \tag{4.5}$$

$$\beta_n = actsn(\frac{b_n}{a_n}) \tag{4.6}$$

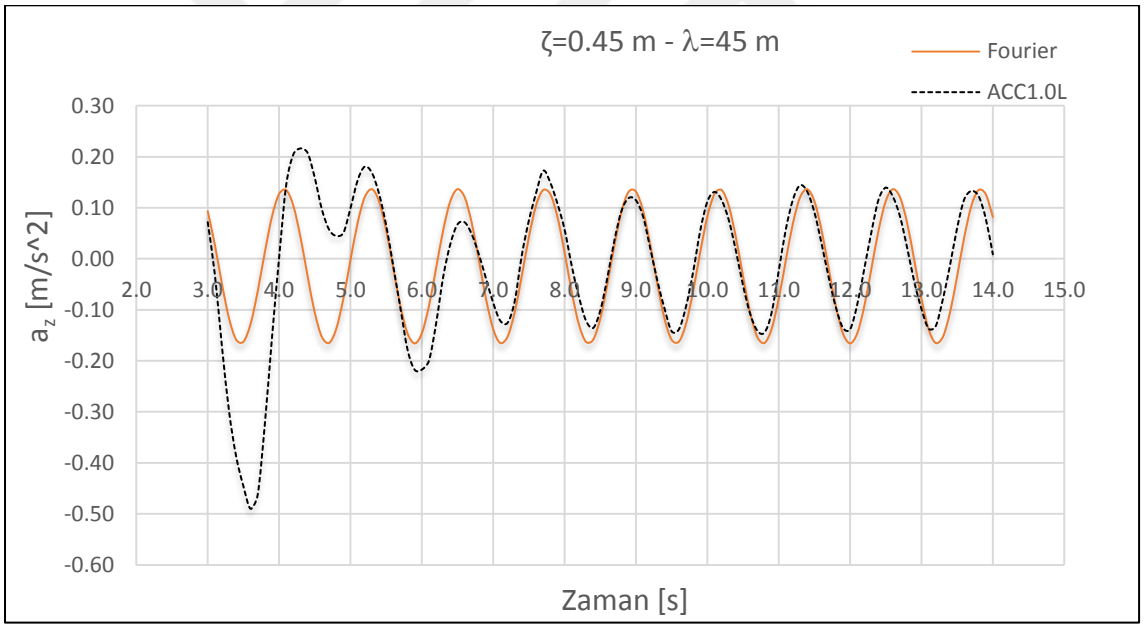
$$a_n = \frac{2}{T_e}\int_0^{T_e} \eta(t) \cos(\omega_e n t) dt \tag{4.7}$$

$$b_n = \frac{2}{T_e}\int_0^{T_e} \eta(t) \sin(\omega_e n t) dt \tag{4.8}$$

Burada, T_e oluşan sinyalin karşılaşma periyodunu gösterir. Düzgün dalgalarda düşey gemi hareketleri düşünüldüğünde, ivmelenme için boyutsuz genlik karşılık fonksiyonları 4.9'da gösterilmiştir.

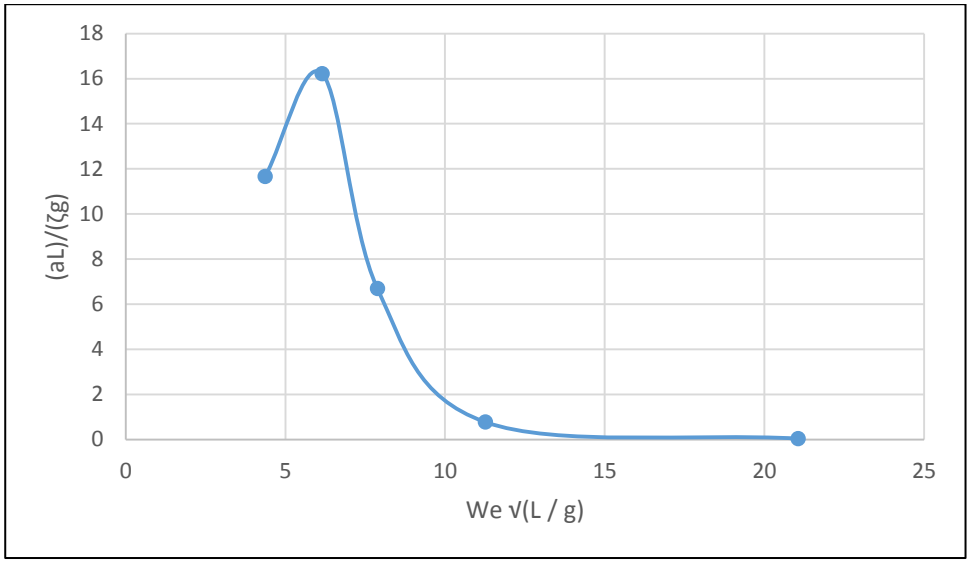
$$RAO_{[a_z]} = \frac{\eta_{1[a_z]}{}^{\mathrm{L}}}{g\zeta} \tag{4.9}$$

Şekil 4.19'da görüldüğü gibi, Fourier dönüşümü kullanılarak zaman alanında ifade edilen sinyaller oldukça yakınsar biçimde frekans alanına dönüştürülmüştür. Grafikten de görüldüğü gibi 5. saniyeye kadar dalgalanmalar meydana gelmektedir çünkü rejim 5. saniyeden sonra düzene oturmaktadır. Dolayısı ile 5. saniyeye kadar olan bölümün uyuşmazlığı ihmal edilebilir. Böylelikle sadece bu frekansa karşılık gelen durumdaki genlik karşılık fonksiyonun değeri hesaplanmış olur. Aynı işlemler her alternatif tekne için çizelge 4.2'deki dalga boyları ve dalga genlikleri için tekrarlanmıştır.



Şekil 4. 19 Dalga boyu 45 m, dalga genliği 0.45 m, ağırlık merkezi civarındaki zaman alanında çözülmüş ivmelenmeler ve Fourier dönüşümü ile ifade edilmesi

Fourier dönüşümü tamamlandıktan sonra her frekans aralığına karşılık gelen ivmelenmeler bulunarak denklem 4.9'da ifade edildiği gibi boyutsuz RAO[a_z] grafiği çizilmiştir (Şekil 4.20).



Şekil 4. 20 Boyutsuz RAO[a_z] grafiği

4.3 Sistematik Varyasyonun Uygulanması

Tekne ailesi oluşturma amacı ile daha önceki bölümlerde, yüksek süratli kayıcı tip parametrik bir form modellenmişti. Form modellenirken, Bölüm 3'te incelenen mevcut teknelerin yardımıyla geometrik sınırlar belirlenmişti.

Tekne ailesi oluşturmak için sistematik varyasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu sebeple çizelge 4.3'te görüldüğü gibi daha önceki bölümlerde belirlenen ön dizayn kısıtları gözetilerek dizayn değişkenleri oluşturulmuştur.

Çizelge 4. 3 Sistematik varyasyon için belirlenen dizayn değişkenleri

Değişken parametreler	
Fn	0.5, 0.75, 0,95, 1.5
L_{oa}/B	4.8, 5.0, 5.2, 5.4
$L / \nabla^{1/3}$	5.7, 5.9, 6.1, 6.3, 6.5, 6.8
β	10.0, 12.5, 15.0, 17.5,20.0

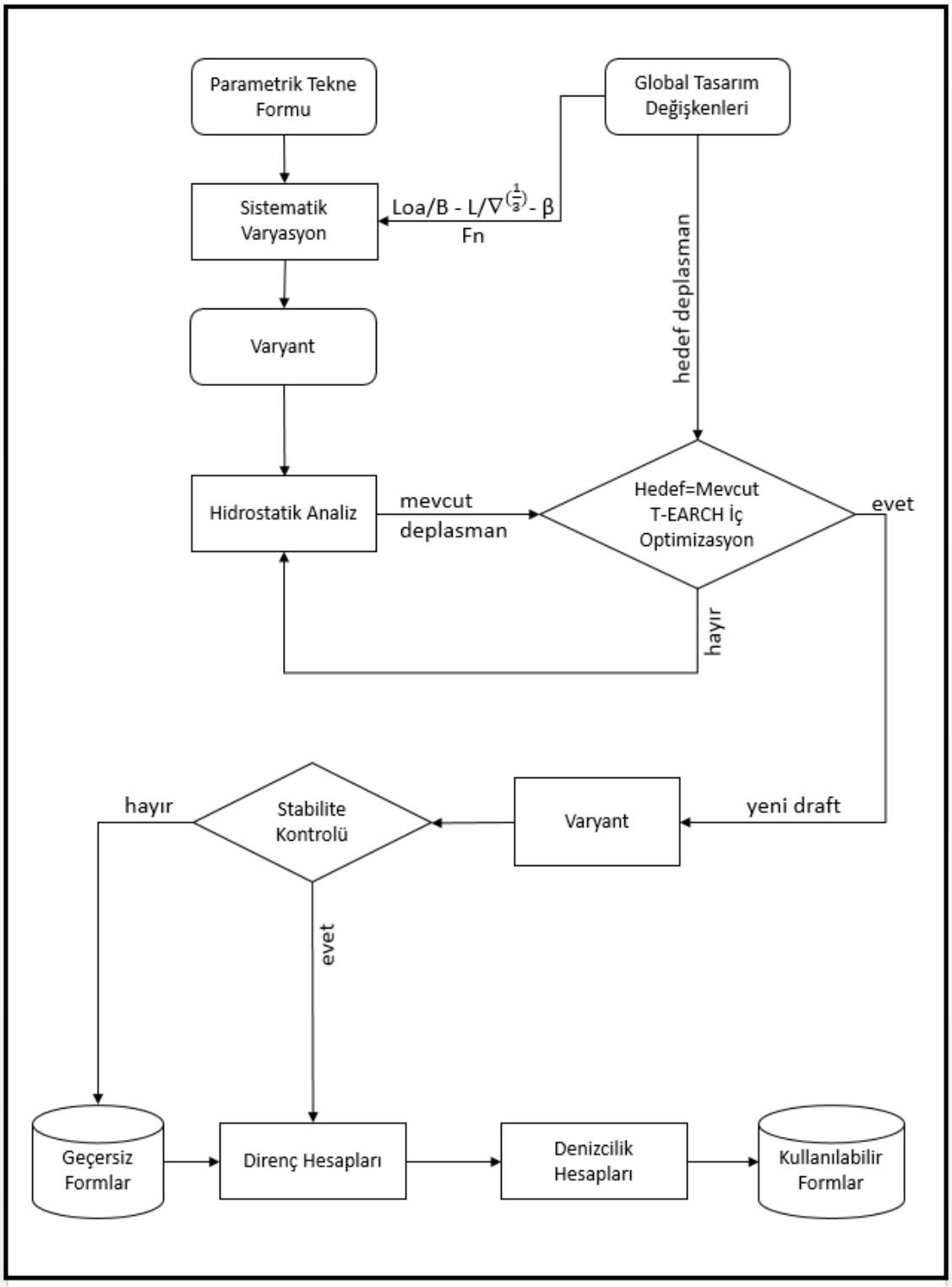
Ana formdan yeni tekneler türetilirken hiçbir zaman değişmeyen parametreler de bulunmaktadır. Bu parametreler de, teknenin form karakteristiğini muhafaza edebilmek amacı ile sabit olarak kalmışlardır (Çizelge 4.4).

Çizelge 4. 4 Sistematik varyasyon sırasında sabit kalan parametreler

Sabit parametreler	
Loa	45 m
Cp	0.80 (aynı deplasman grupları için)
T_{ayna}	0.35 m
Baş taraftaki dolgunluk %	77

Sistematik varyasyon, daha önce Bölüm 4'te optimizasyon akış şeması altında gösterilen algoritmaya uygun olarak otomatik olarak çalışmaktadır. Değişken parametrelerin sistematik olarak değişmesi sonucunda ortaya çıkan her varyantın, stabilite kriterlerini sağladığı görüldükten sonra direnç ve denizcilik analizleri yapılmaktadır. Fn 0.95 dahil ve bu hıza kadar olan tüm varyantlar için, potansiyel teoriye dayalı direnç analizleri gerçekleştirilirken, Fn=1.5 için viskoz çözüm ile direnç ve denizcilik hareketleri birlikte incelenecektir.

Analiz için kullanılan yazılımları tek bir çatı altında toplayan ve parametrik modelin oluşumu sağlanan ana yazılım yardımı ile varyant oluşumu sağlanmıştır. Şekil 4.21'de gösterilen akış şemasını inceleyecek olursak; ana yazılım içerisinde parametrik tekne formu oluşturulmuştur. Parametrik tekne formu yine bu program içerisinde Çizelge 4.3'te gösterilen değişkenlerin etkisinde deforme edilerek yeni varyantlar meydana getirilmiştir. Ortaya çıkan her varyant hidrostatik analize tabi tutulmuştur. Burada deformasyon sonucunda oluşan deplasman hesaplanmaktadır. Aynı zamanda o adımdaki hedeflenen Loa/B oranı, $L/\nabla^{1/3}$ oranı ve kalkıntı açısına (β) sahip varyantın, olması gereken deplasmanı hesaplanır. Oluşan iki deplasman arasındaki fark, tek amaçlı bir optimizasyon kodu olan T-Search yardımı ile draft değerleri değiştirilerek sıfıra yaklaştırılır ve o adımdaki istenen oranlar yakalanır. Varyant sonraki adım olan stabilite kontrolü için hazır hale gelmiştir (Şekil 4.22). Bu aşamadan sonra daha önce *stabilite kısıtlarının belirlenmesi* bölümünde bahsedilen kriterlerin sağlanıp sağlanmadığı kontrolü yapılır. Yazılan alt kodlar sayesinde stabilite analizi yapabilen program çalıştırılır ve analiz gerçekleştirilir. Kriterler sağlanmadığı takdirde o tekneler elenir sağlayanlar ise direnç analizi için hazır hale gelir.

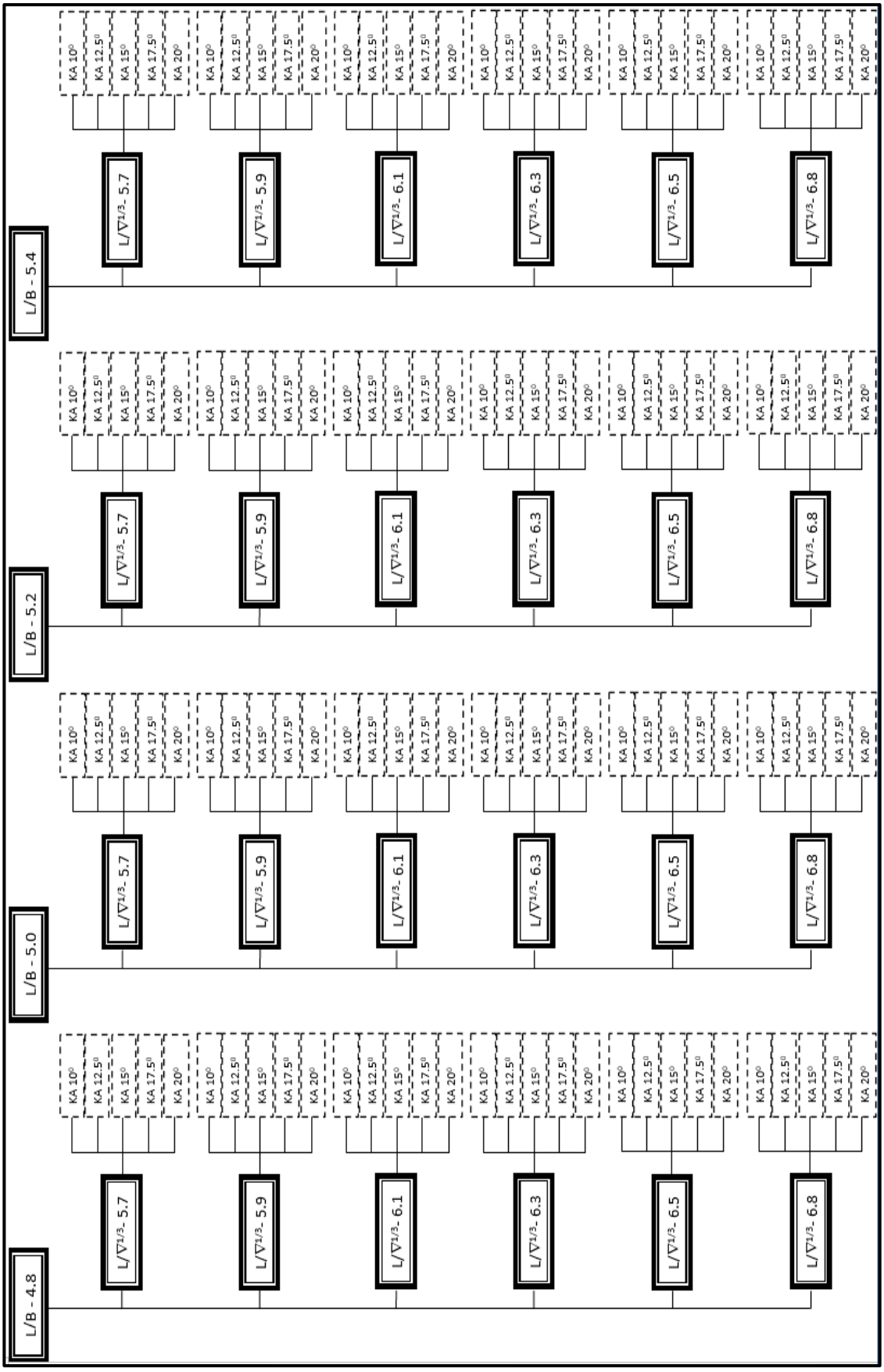


Şekil 4. 21 Tekne ailesi oluşturulma ve analiz aşamaları

Direnç analizi, FN 0.5-0.75-0.95 için, Panel metot kullanan bir HAD yazılımı yardımı ile yapılmaktadır. Ana program içerisindeki üç boyutlu tekne yüzeyinden posta kesitleri alınır ve potansiyel çözüm için gerekli mesh ayarları yapılarak bu konfigürasyon HAD yazılımına gönderilerek çalıştırılır. İterasyon, belirlenen yakınsama sağlandıktan sonra

durur ve direnç değerleri tablo halinde yazdırılır. Fn 1.5 için ise RANS çözüm yapabilen bir programda tüm varyantlar için viskoz çözümler gerçekleştirilir. Direnç açısından inceleme için, tüm alternatif teknelerin sakin su çözüm sonuçları not edilir. Daha sonra baştan gelen düzgün dalgalardaki çözümler yapılarak, kıyas yapabilmek için genlik karşılık fonksiyonları çizilir.

Tüm varyantları denizcilik açısından kıyaslayabilmek amacı ile, oluşturulan genlik karşılık fonksiyonlarının altında kalan alanlar hesaplanmış, ayrıca pik noktaları belirlenmiştir. Bunu yapabilmek için hesaplanan değerleri girdi kabul ederek alan ve pik noktalarını hesaplayabilen bir kod yazılarak, bu durum otomatik hale getirilmiştir.



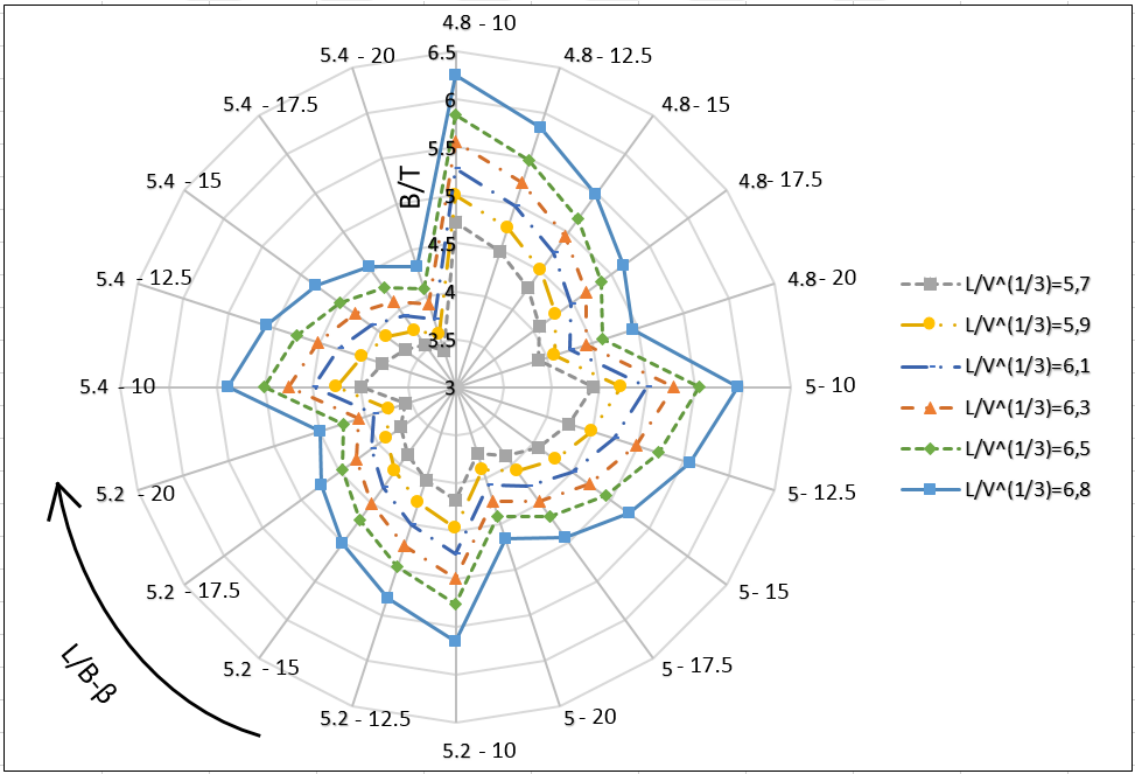
Şekil 4. 22 Sistematik varyasyon sonucu oluşan tekne grubu

4.4 Sistematik Varyasyon Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 4.21'de gösterilen akış şeması takip edilerek 45 m boya sahip 120 adet form elde edilmiştir (Şekil 4.22). Bu formlar Fn=0.5-0.75- 0.9 için sadece direnç analizleri yapılırken, Fn=1.5 için hem direnç hem denizcilik açısından incelenmiştir. Oluşturulan tüm teknelerin form özellikleri EK-B'de, Fn=0.5-0.75-0.95 için yapılan direnç analiz sonuçları Ek C'de, Fn=1.5 için yapılan direnç ve denizcilik analizleri sonuçları ise Ek D'de verilmiştir.

Oluşturulan tekne grubu içerisinde özellikle Fn=1.5 için yapılan analizlerde, amaç olarak her bir deplasman grubu için optimum tekneler bulunmaya çalışılmıştır. Alternatif formların deplasman gruplarına ayrılmasının sebebi, ön dizayn aşamasında deplasmanın bir ana parametre olmasıdır. Örneğin yüksek süratli bir askeri tekne, aynı boya sahip yüksek süratli bir yata göre daha ağır olacaktır. Yine aynı boya sahip kompozit malzemeden yapılmış yüksek süratli bir deniz taşıtı, çeliğe göre daha hafif olacaktır.

Şekil 4.23'te tekne grubunu oluşturan formların deplasman gruplarına göre ayrılmış geometrik ölçütleri görülmektedir.



Şekil 4. 23 Sistematik varyasyon sonucu farklı deplasman gruplarının Loa/B-B/T dağılımları

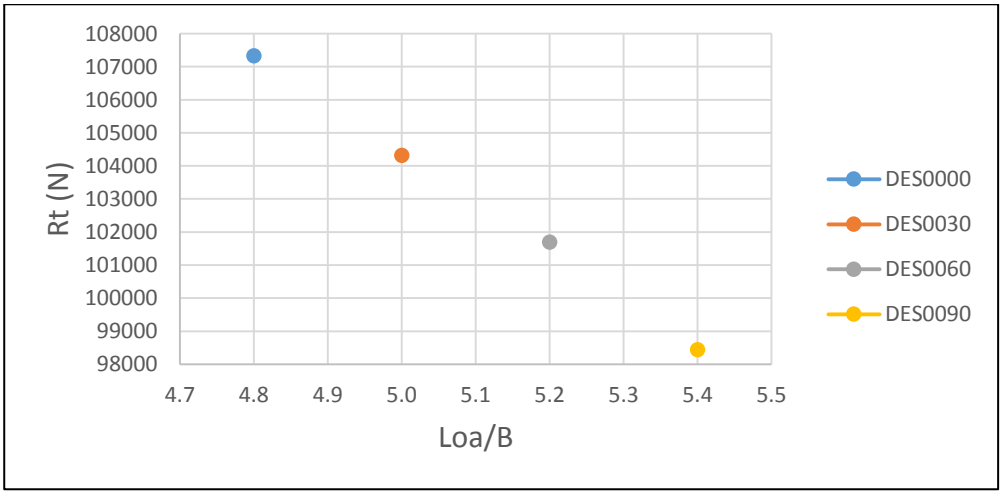
4.4.1 Sakin Su Direnç Analizlerinin Değerlendirilmesi

Oluşturulan tüm alternatif formların daha önce de belirtildiği gibi 4 farklı hız için, sakin su direnç analizleri gerçekleştirilmiştir, bunlar;

- Fn 0.50 → Fn = 19,25 knot (potansiyel çözüm)
- Fn 0.75 → Fn = 28,88 knot (potansiyel çözüm)
- Fn 0.95 → Fn = 36,58 knot (potansiyel çözüm)
- Fn 1.50 → Fn = 57,76 knot (viskoz çözüm)

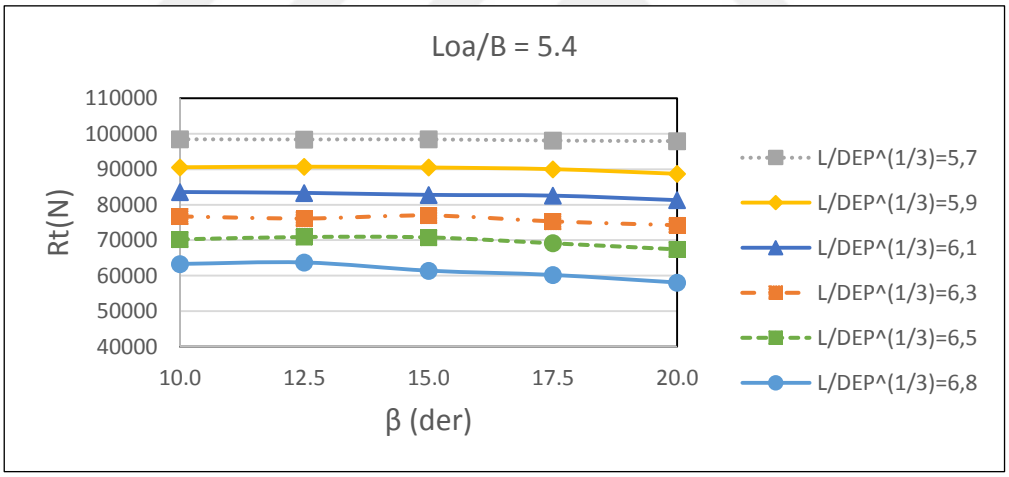
Yukarıda belirtilen 4 hız grubundan ilk üçü için potansiyel çözüm yöntemleri kullanılırken, sonuncusu için ise viskoz çözüm yöntemi kullanılmıştır. Yapılan analizler sırasında teknenin dalıp-çıkma ve trim hareketlerini serbest olarak yapması sağlanmıştır. Sonuçlar diyagramlar yardımı ile incelenerek etkisi merak edilen parametreler hakkında fikir verilmiştir. Tüm tekneler için analiz sonuçlarının tek tek sunulması yerine, parametrelerin alt veya üst sınırlarından örnekler sunularak genel eğilim için yorumlar yapılmıştır.

Direnç açısından düşünüldüğünde Loa/B oranı yüksek olan teknelerin avantajlı olduğu bilinmektedir. Kalkıntı açısı 10^0 olan ve $L/\nabla^{(1/3)}$ oranı 5.7 olan tekneler Fn=0.5 için kıyaslandığında, Şekil 4.24'teki grafikten de bu durum görülmektedir.

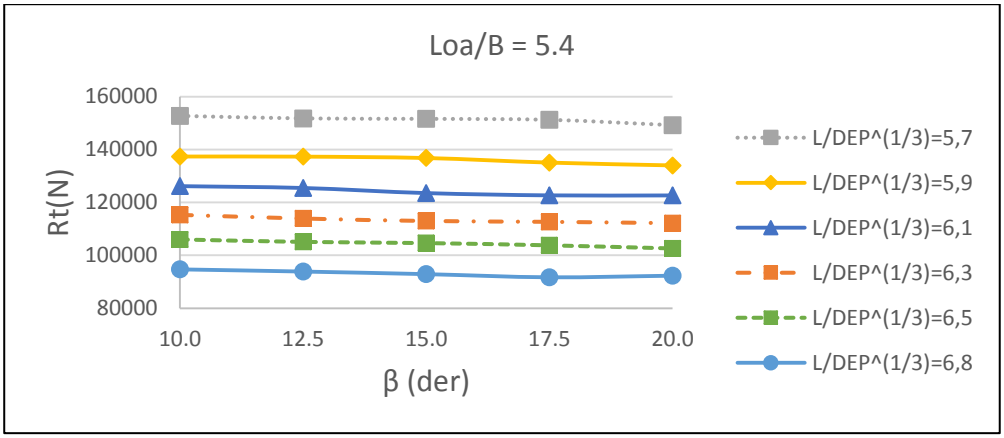


Şekil 4. 24 Fn=0.5 için Loa/B oranın sakin suda dirence etkisi

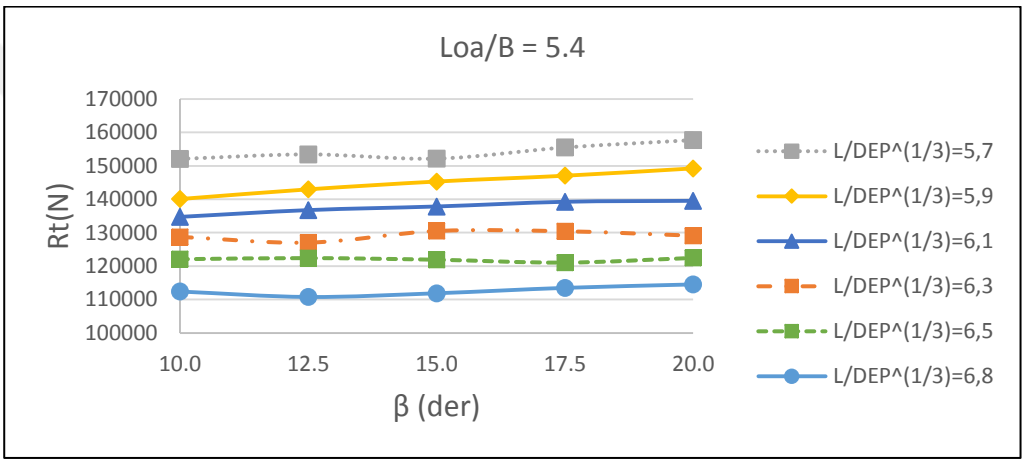
Loa/B oranı yüksek teknelerin narin olmalarından kaynaklı olarak, direnç açısından avantajlı olduğu durumunu genellersek, en yüksek Loa/B oranında olan ve farklı deplasman gruplarına sahip tekneler, Fn=0.5 için birlikte değerlendirildiğinde; aşağıdaki grafikten de görüleceği gibi deplasman azaldıkça kalkıntı açısının artmasının ve teknenin narinleşmesinin pozitif etki yaptığı görülmektedir. Şekil 4.25, 4.26, 4.27 ve 4.28 sırası ile incelendiğinde ise hız arttıkça, özellikle Fn=0.95'ten sonra grafiğin yön değiştirdiği görülmektedir. Özellikle Fn=1.5 civarlarında artık düşük kalkıntı açısının pozitif etki yaptığı söylenebilmektedir. Bu durumda varyantların Fn=0.75 ile Fn=0.95 arasında kayıcı rejime geçmeye başladığı ve Fn=0.95'ten sonrada kayıcı hal aldığı söylenebilir. Hem bu durumu desteklemek amacı ile hem de potansiyel ve viskoz çözümün birbirleri ile olan uyumunu görebilmek amacı ile bir varyant için Fn=0.25 ile Fn=1.5 arasında viskoz çözümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.29 incelendiğinde viskoz çözümlerde de Fn=0.75'ten sonra kayıcı rejimin başladığı görülmektedir.



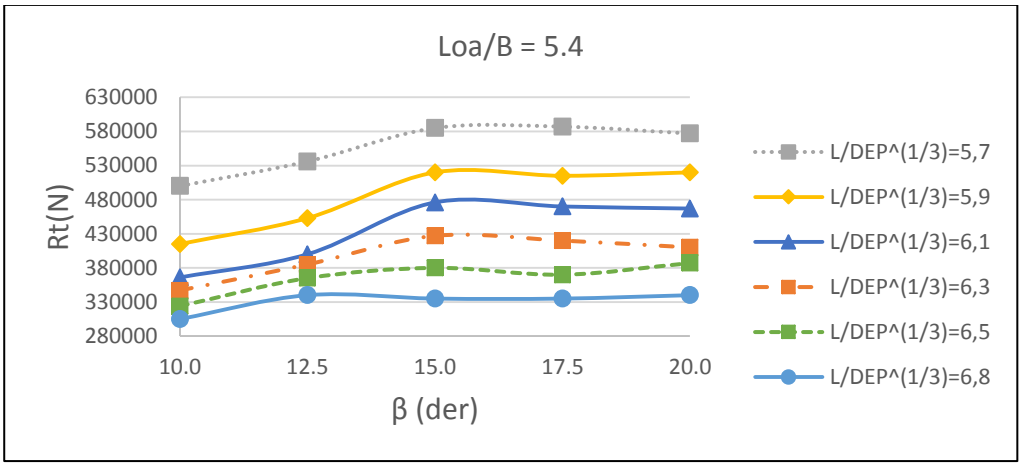
Şekil 4. 25 Fn=0.5 için kalkıntı açısının dirence etkisi



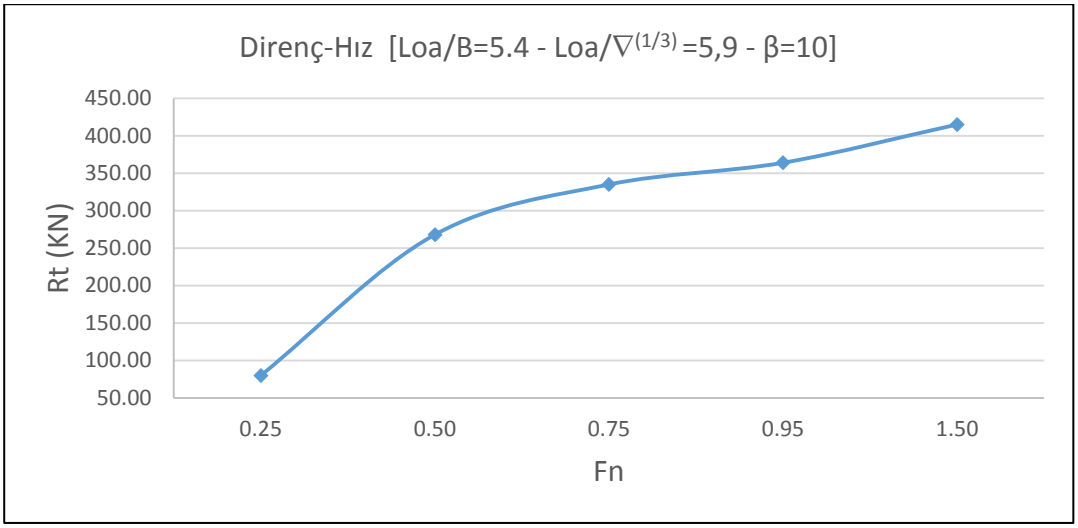
Şekil 4. 26 Fn=0.75 için kalkıntı açısının dirence etkisi



Şekil 4. 27 Fn=0.95 için kalkıntı açısının dirence etkisi

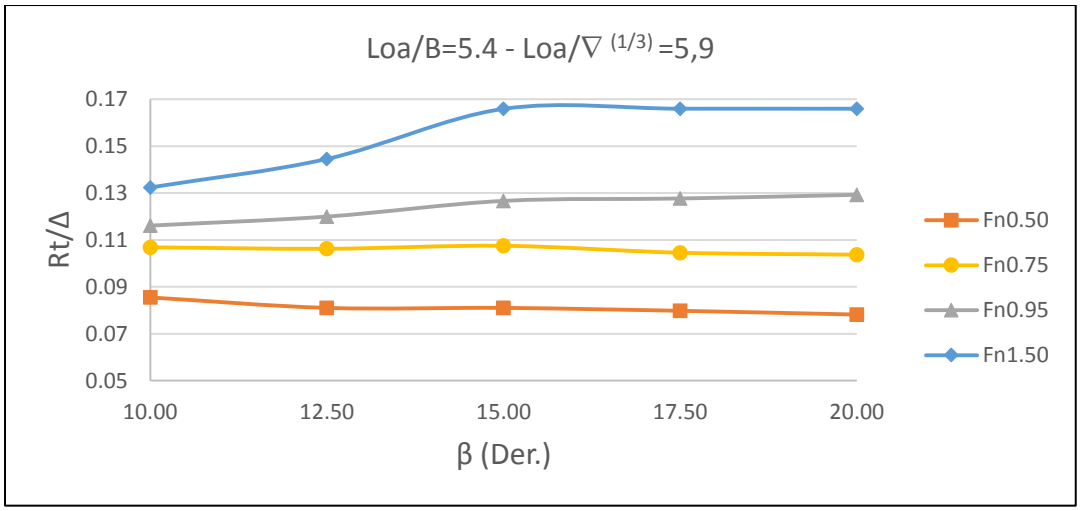


Şekil 4. 28 Fn=1.5 için kalkıntı açısının dirence etkisi



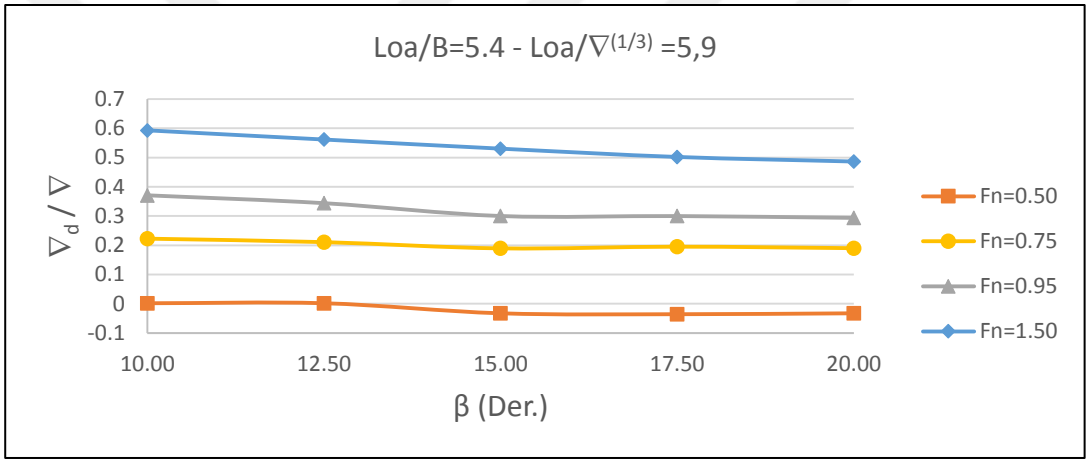
Şekil 4. 29 Des0091 için viskoz çözüm ile Direnç-Hız Eğrisi

Kalkıntı açısının dirence olan etkisi incelenirken, potansiyel ve viskoz çözümlerin birlikte değerlendirilmesinden dolayı, bir durum için potansiyel olarak çözüm yapılan hızlarda viskoz çözümler gerçekleştirilerek, potansiyel ve viskoz çözümler arasındaki uyum araştırılmıştır. Şekil 4.30 incelendiğinde viskoz çözüm neticesinde aynı ana boyutlara ve deplasman grubuna sahip farklı kalkıntı açılarındaki varyantların, boyutsuz Rt/Δ değişimleri görülmektedir. Burada da potansiyel çözüm sonuçlarını destekler biçimde, düşük hızlarda yüksek derecedeki kalkıntı açılarının direnci arttıran etkisi görülmektedir. Fakat hız arttıkça, özellikle kayma rejiminden sonraki hızlarda grafiğin yön değiştirerek, düşük kalkıntı açılarında direncin azaldığı gözlenmiştir.

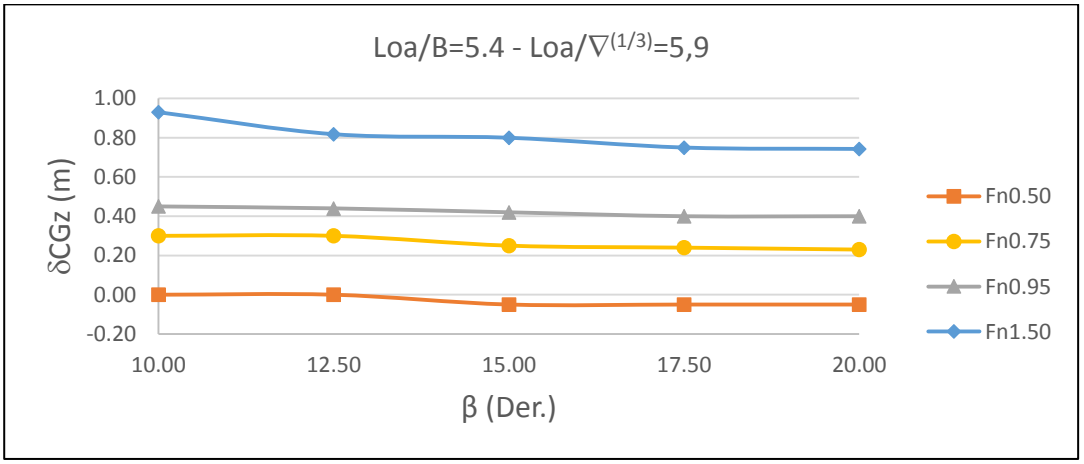


Şekil 4. 30 Viskoz çözüm ile farklı hızlarda kalkıntı açısının dirence olan etkisi

Hidrodinamik kaldırma kuvveti etkisi, teknenin yükselerek ıslak yüzey alanının azalması ve kayıcı rejime geçebilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu durumu inceleyebilmek amacı ile bir durum için viskoz çözümler gerçekleştirilmiştir. Kaldırma kuvvetti ve ağırlık merkezi civarındaki yer değiştirmelerin kalkıntı açısı ile değişimleri araştırılmıştır. Şekil 4.31'de kaldırma kuvvetinin bir ifadesi olan, dinamik durumdaki deplasman hacminin statik durmdaki deplasman hacmine oranının kalkıntı açsı ile değişimi görülmektedir. Şekil 4.32 ve 4.31 birlikte incelendiğinde, en genel hali ile yüksek hızlarda kalkıntı açısının azalmasının, kaldırma kuvvetini arttırdığı dolayısı ile de ağırlık merkezi civarında yükselmelere neden olduğu görülmektedir. Grafiklerden de görüldüğü gibi, dikkate alınacak ölçüde hidrodinamik kaldırma kuvvetinin Fn=0.75'ten sonra etkili olduğu gözlenmiştir. Bu hızın da kayma rejiminin başlangıç değeri olduğu daha önce saptanmıştı.



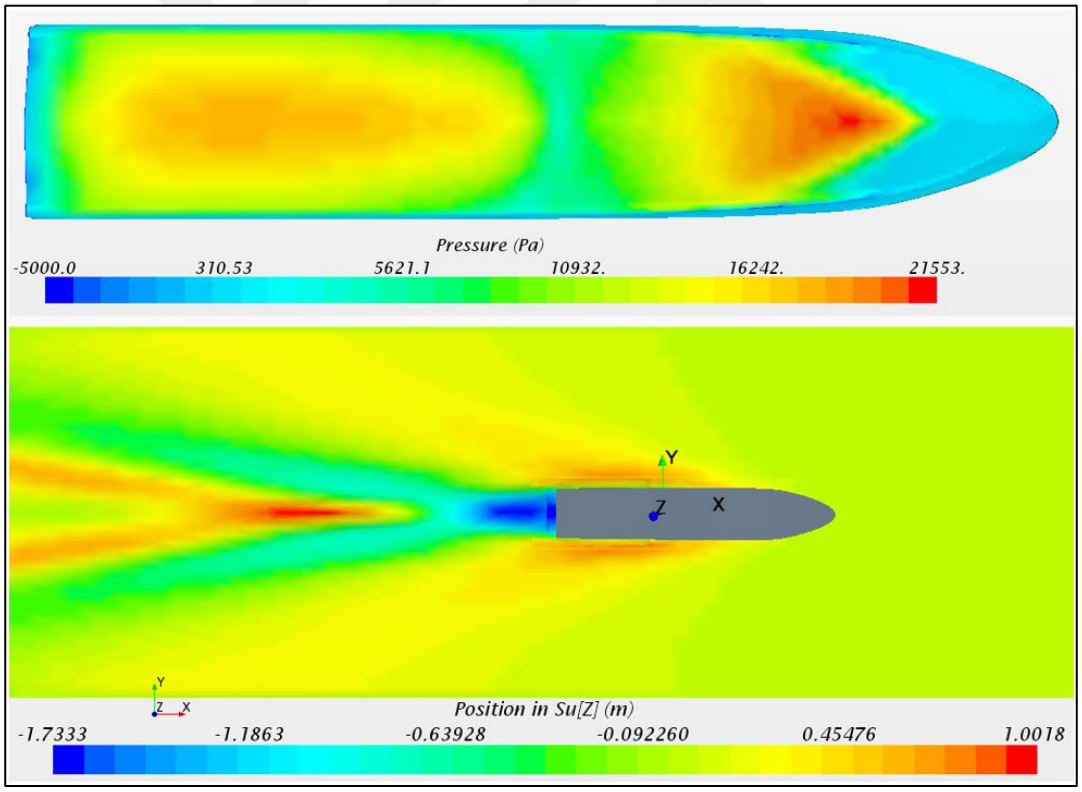
Şekil 4. 31 RANS ile elde edilen farklı hızlardaki hidrodinamik kaldırma kuvveti



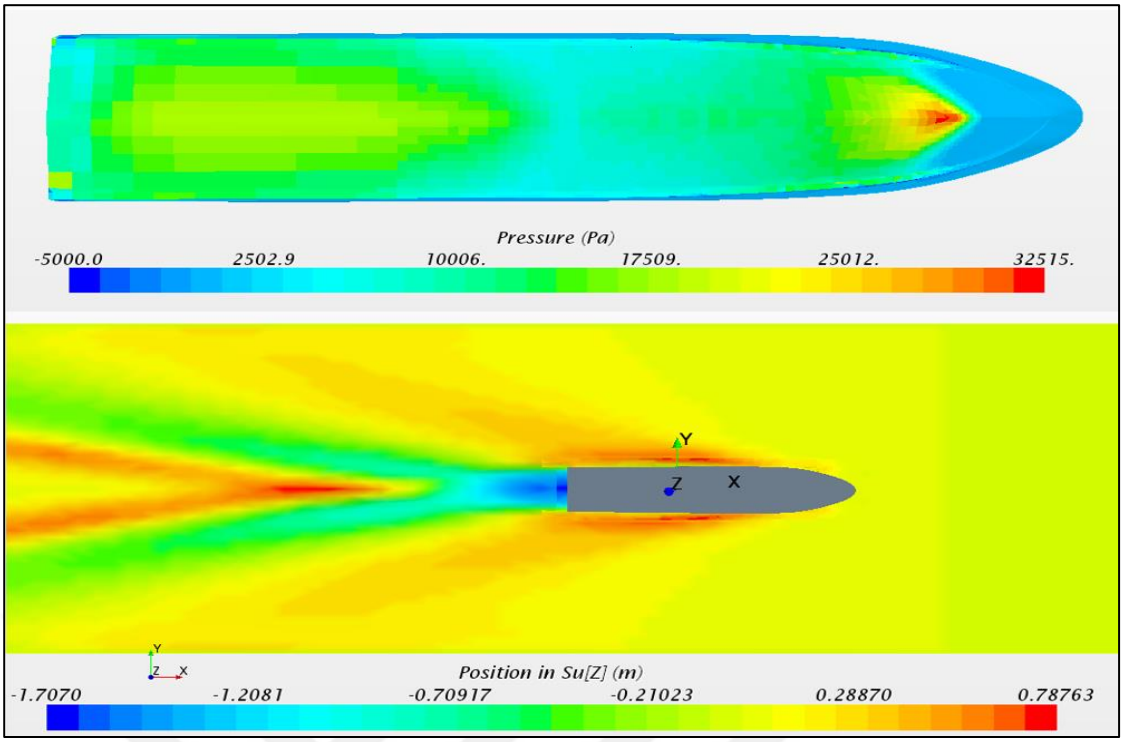
Şekil 4. 32 RANS ile elde edilen farklı hızlardaki ağırlık merkezi yer değiştirmeleri

Kalkntı açısının yüksek hızlarda hidrodinamik basınçlar ve dalga deformasyonları ile ilişkisini daha detaylı inceleyebilmek için Fn=1.5'da aynı boyutlar ve deplasmanda, farklı kalkıntı açılarına sahip beş varyant viskoz çözümler ile değerlendirilmiştir.

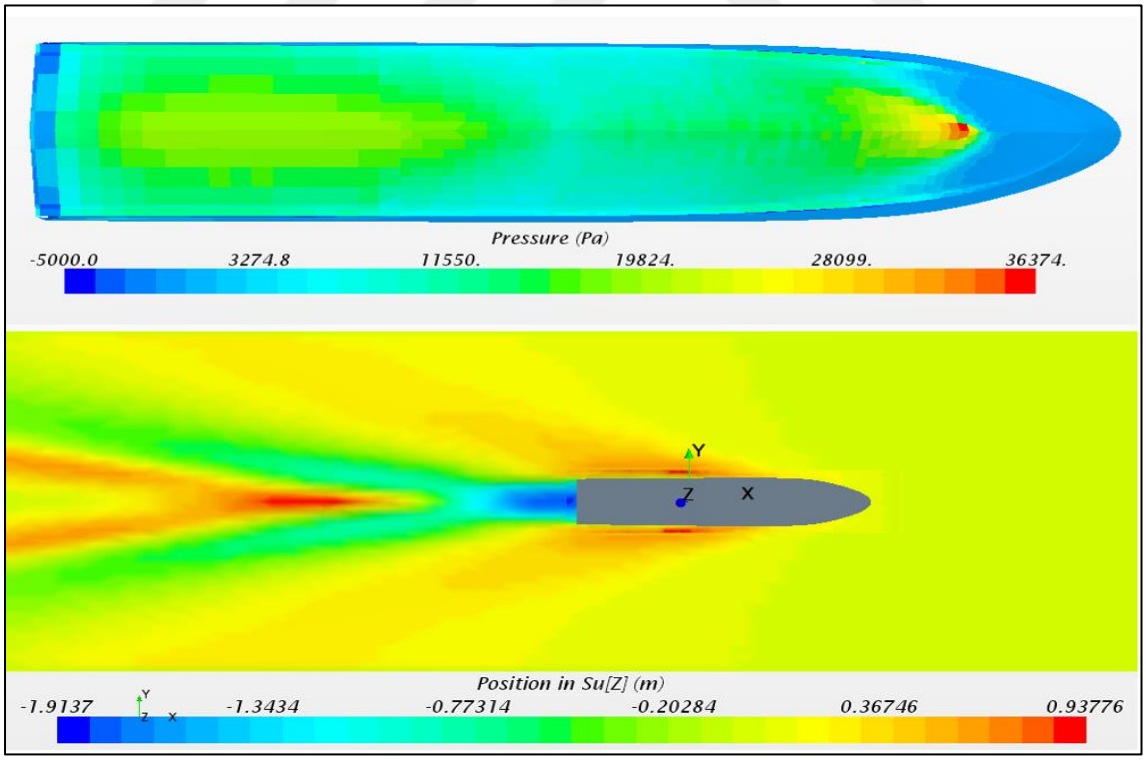
Sırası ile şekil 4.33-4.34-4.35-4.36-4.37 incelendiğinde, su altı formuna etki eden hidrodinamik basınçlar görülmektedir. Basınç dağılımı incelendiğinde, formların baş taraflarındaki durma noktasına (stagnation point) gelen basınç değerlerinin, kalkıntı açsının artması ile arttığı gözlenmiştir. Daha önceki bölümlerden, yüksek hızlarda düşük kalkıntı açısına sahip formların daha az direnç gösterdiği bilinmektedir. Dolayısı ile düşük kalkıntı açılarında olan formların daha kolay kayıcı rejime girdikleri görülmektedir. Dalga deformasyonları incelendiğinde, özellikle kıç bölümde kalkıntı açısının artmasının daha büyük dalda çukurlarına neden olduğu görülmektedir. Bu durumun da direnç artışına sebebiyet verdiği bilinmektedir.



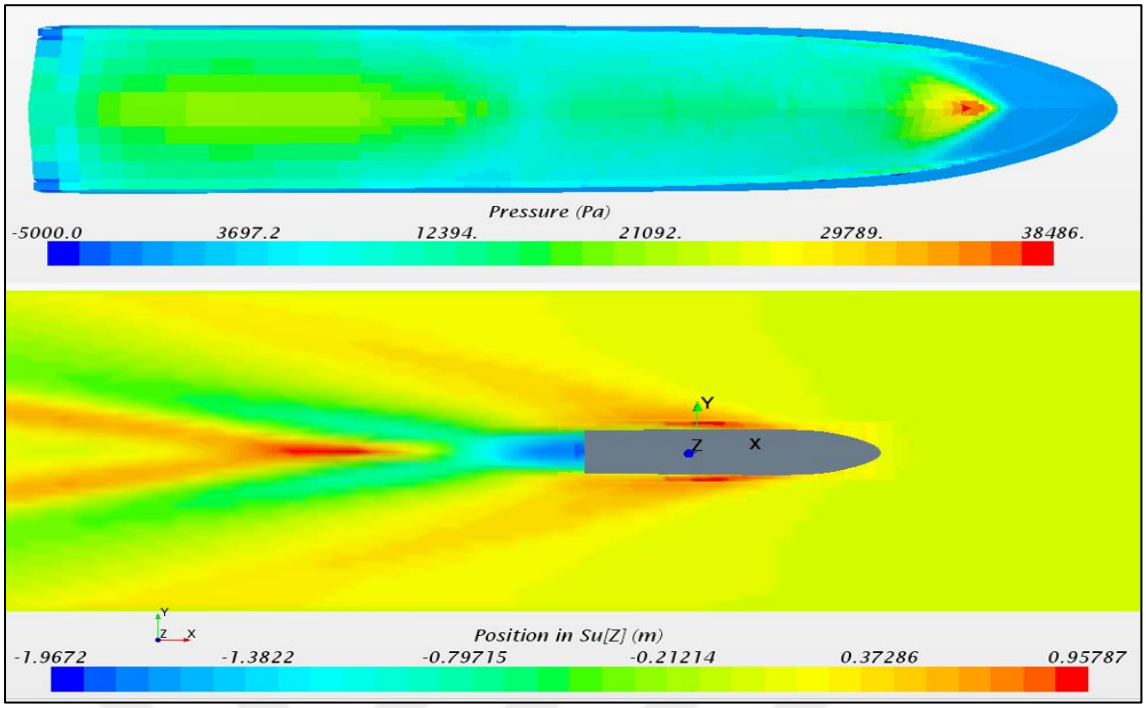
Şekil 4. 33 Loa/B=5.4 - $L/\nabla^{(1/3)}$=5,9 - $\beta=10^0$ - Fn=1.5 hidrodinamik basınç dağılımı ve dalga deformasyonu



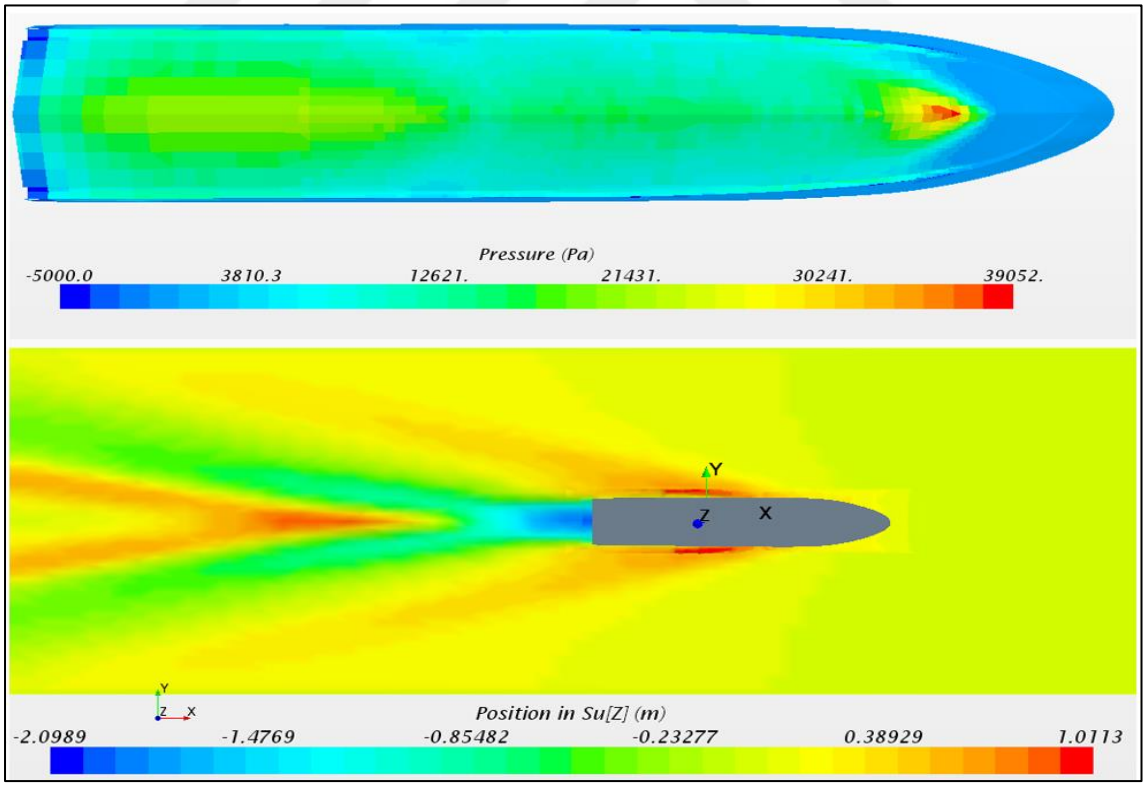
Şekil 4. 34 Loa/B=5.4 - $L/\nabla^{(1/3)}$=5,9 - β=12.5^0 - Fn=1.5 hidrodinamik basınç dağılımı ve dalga deformasyonu



Şekil 4. 35 Loa/B=5.4 - $L/\nabla^{(1/3)}$=5,9 - β=15 ^{0} - Fn=1.5 hidrodinamik basınç dağılımı ve dalga deformasyonu

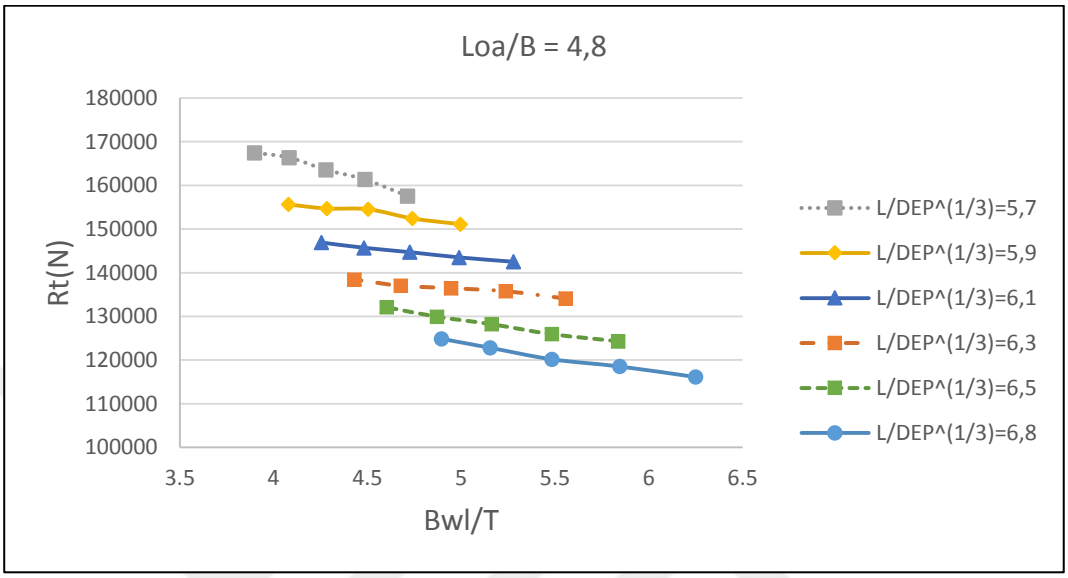


Şekil 4. 36 Loa/B=5.4 - $L/\nabla^{(1/3)}$=5,9 - β=17.5 ^{0} - Fn=1.5 hidrodinamik basınç dağılımı ve dalga deformasyonu



Şekil 4. 37 Loa/B=5.4 - $L/\nabla^{(1/3)}$=5,9 - β=20 ^{0} - Fn=1.5 hidrodinamik basınç dağılımı ve dalga deformasyonu

Şekil 4.38 incelendiğinde ise Fn=0.95 için yapılan analiz sonuçları neticesinde, aynı deplasman gruplarında, aynı boy-genişlik oranına sahip teknelerin, Bwl/T oranlarının dirence etkisi görülmektedir. Bu oran arttıkça beklendiği üzere draftın, dolayısı ile ıslak yüzey alanın da azalması ile direnç aşağı yönlü bir hareket göstermektedir.



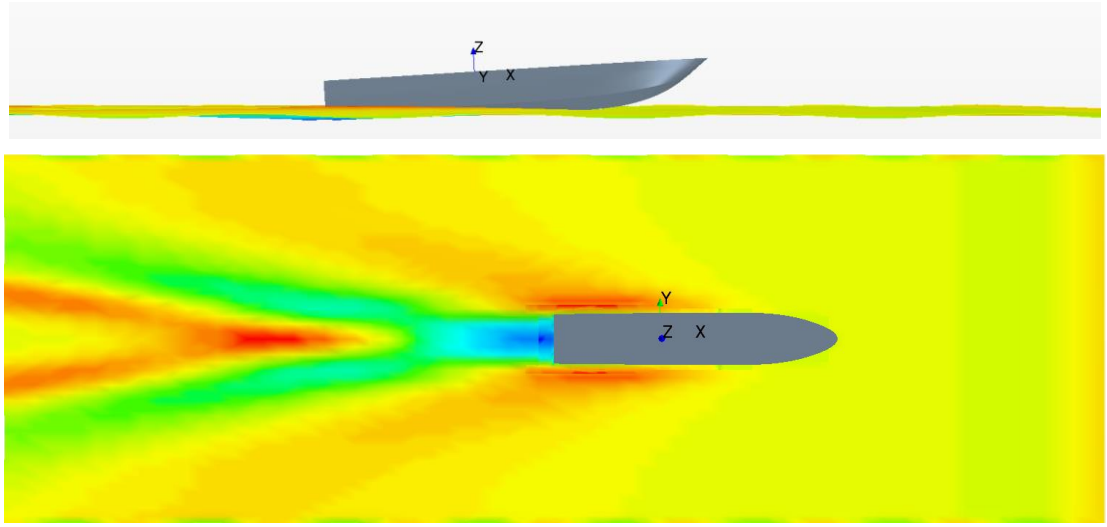
Şekil 4. 38 Fn=0.95 için Bwl/T nin sakin suda dirence etkisi

4.4.2 Denizcilik Analizlerinin Değerlendirilmesi

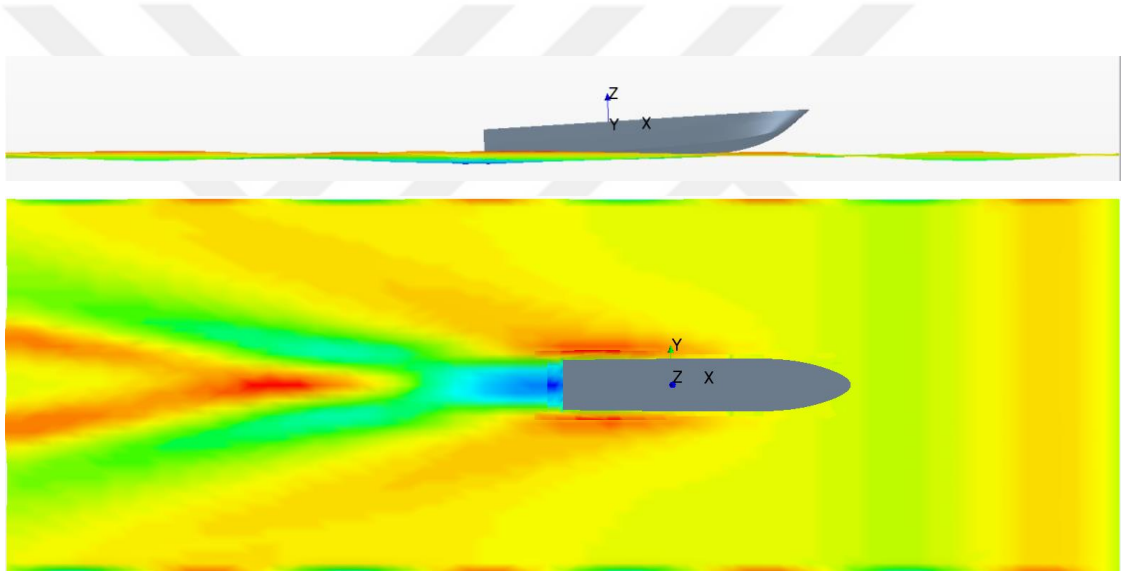
Oluşturulan varyantların denizcilik performansına sadece Fn=1.5 hızda bakılmıştır. Bu hızda her varyant belirli periyotlarda baştan gelen düzgün dalgalara maruz bırakılarak hareketleri incelenmiştir. Örnek teşkil etmesi amacı ile Çizelge 4.5'te özellikleri verilen varyantın, daha önce Çizelge 4.1'de ifade edilen düzgün dalgalardaki çıktıları Şekil 4.39, 5.40, 5.41, 5.42 ve 5.43' de görülmektedir. Form parametrelerinin ağırlık merkezi civarındaki ivmelenmelere olan etkisi araştırılmıştır.

Çizelge 4. 5 Baştan gelen düzgün dalgalarda dalga boyları ve genlikleri

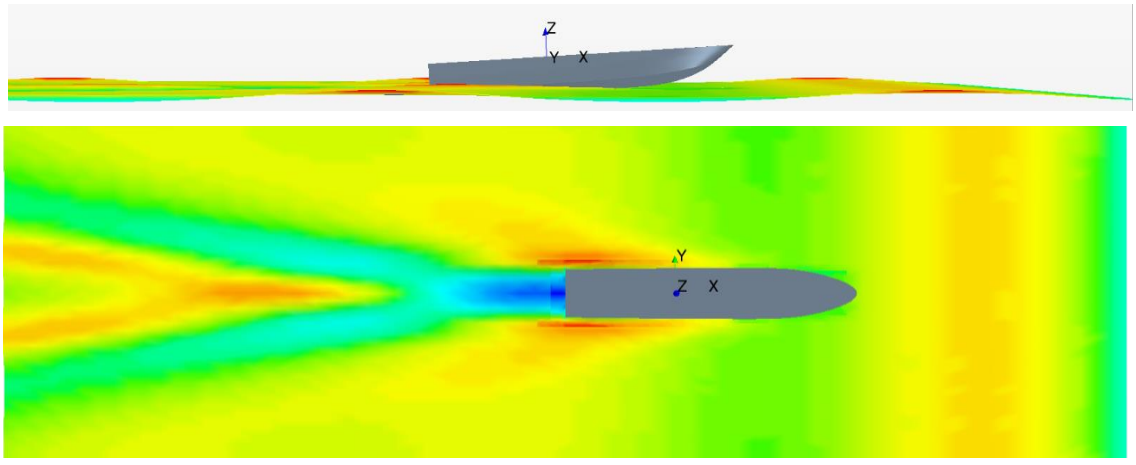
Varyant	Loa/B	β	$L/\nabla^{(1/3)}$
DES0107	5.40	15.00	6.80



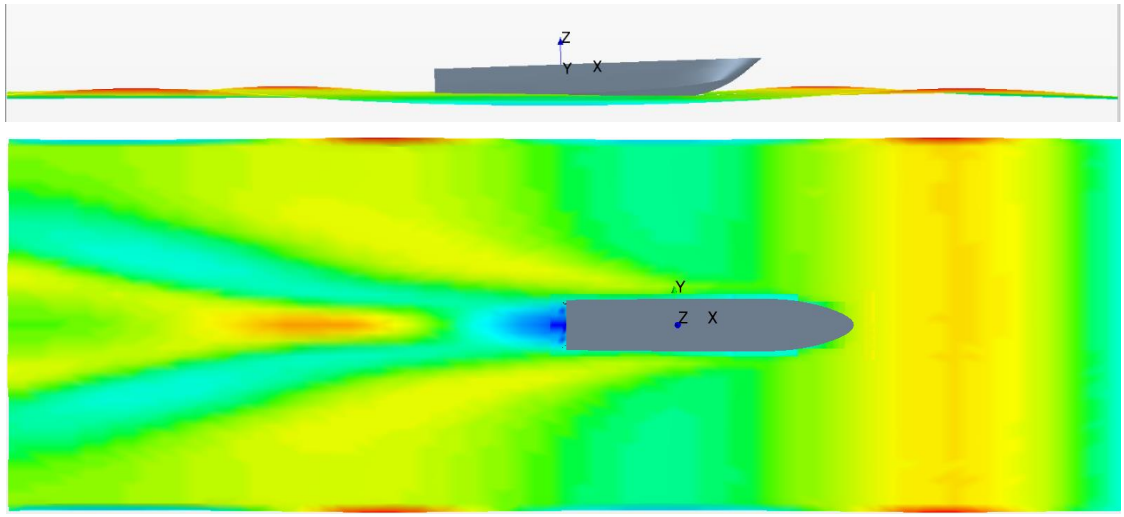
Şekil 4. 39 λ=0.5L ζ=0.225 m Fn=1.5



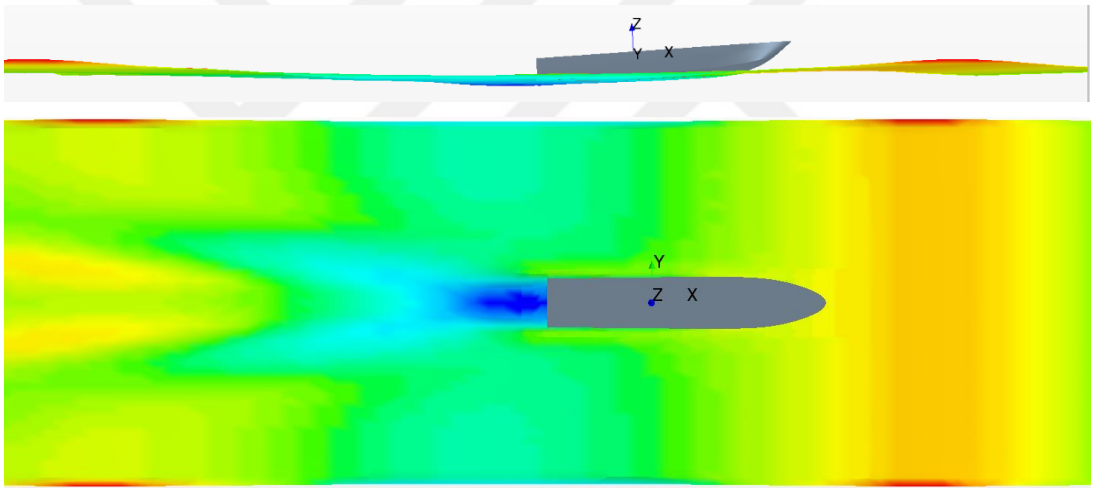
Şekil 4. 40 λ=1.0L ζ=0.45 m Fn=1.5



Şekil 4. 41 λ=1.5L ζ=0.675 m Fn=1.5

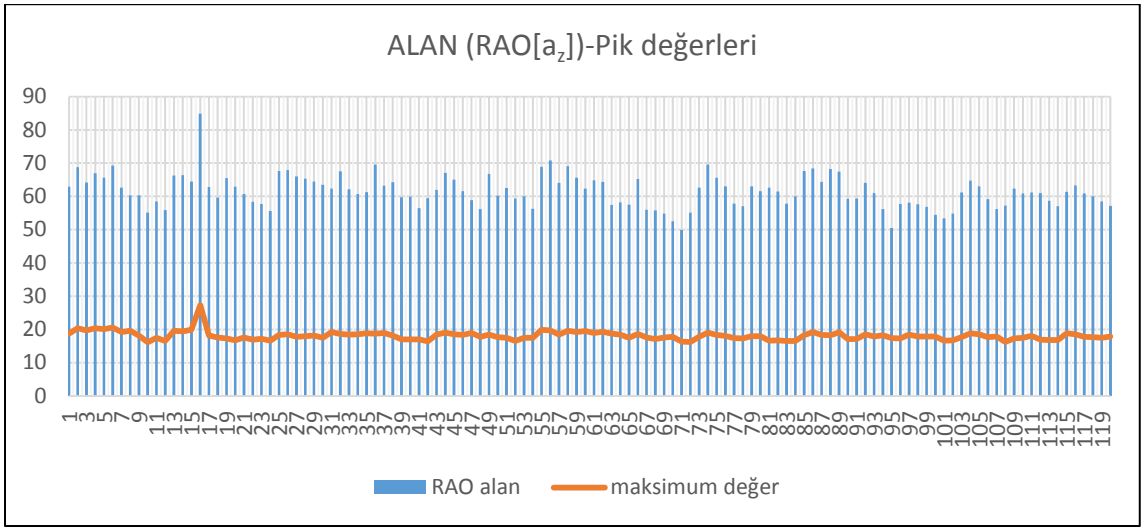


Şekil 4. 42 λ=2.0L ζ=0.90 m Fn=1.5



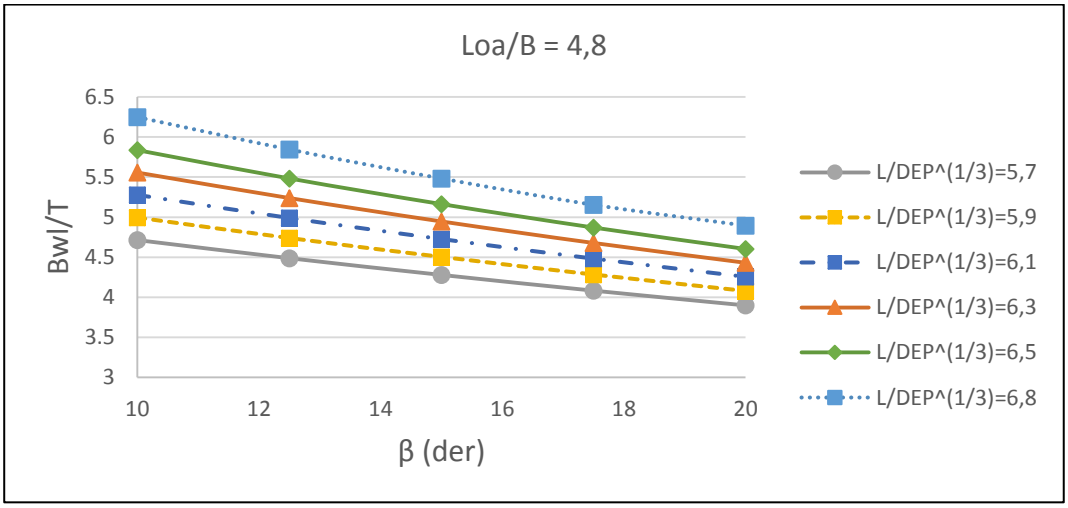
Şekil 4. 43 λ=3.0L ζ=0.1.35 m Fn=1.5

Zaman alanında yapılan bu çözüm, Bölüm 4.2.2 de bahsedilen yöntem ile frekans alanına dönüştürülmüştür. Burada çizilen genlik karşılık fonksiyonlarının grafiksel olarak karşılaştırılmaları mümkün olmadığından, bunlar sayısal veriler haline dönüştürülmüştür. Bu yapılırken, ivme açısından incelenen genlik karşılık fonksiyonlarının pik yaptığı noktalara da bakılmıştır.



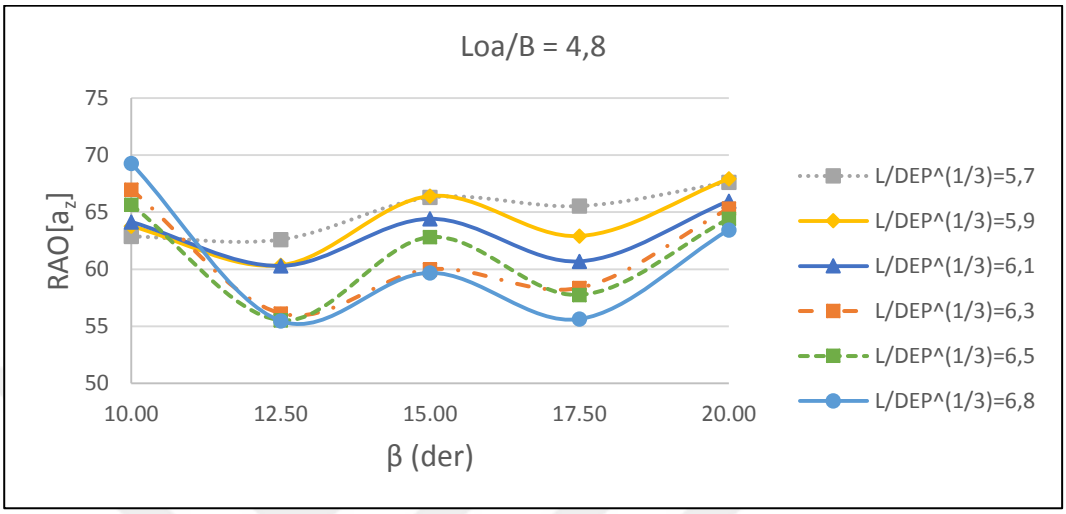
Şekil 4. 44 RAO[a_z] altında kalan alan ve genliklerin maksimum değerleri

Şekil 4.44 incelendiğinde aynı frekans aralığında yapılan çalışmalar sonucunda, varyantların kıyaslaması yapılırken genlik karşılık fonksiyonun altında kalan alanların veya o frekans aralığındaki genliklerin, maksimum değerlerin kıyaslanması arasında fark olmadığı görülmektedir. Eğrinin altında kalan alanı büyük olan varyantın, pik değerinin de büyük olduğu görülmektedir. Bu veriler ışığında tezde, varyantların denizcilik analizleri, genlik karşılık fonksiyonlarının altında kalan alanlara göre değerlendirilecektir. Alan değeri büyüdükçe denizcilik performansının kötüleştiği anlamı çıkarılacaktır.



Şekil 4. 45 Kalkıntı açısının Bwl/T değerleri ile değişimi

Şekil 4.45 incelendiğinde kalkıntı açısı ile su hattı genişlik-daft oranı arasında doğrusal bir bağ olduğu görülmektedir. Kalkıntı açısı arttıkça tekne narinleştiğinden deplasmanın sabit kalabilmesi için draft artar dolayısı ile Bwl/T oranı azalır. Bu nedenle kalkıntı açsının hidrodinamik etkileri bu oranla bağ kurarak değerlendirilebilir.

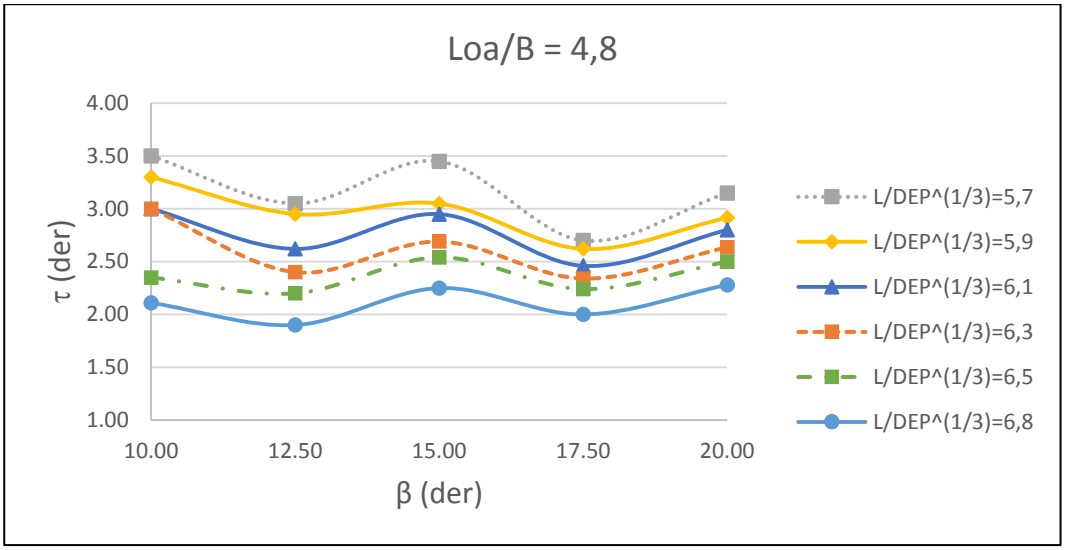


Şekil 4. 46 Kalkıntı açısnın RAO[a_z] değerleri ile değişimi

Şekil 4.46 incelendiğinde kalkıntı açısı ile ivmelenmeler arasında salınımlı bir ilişki olduğu görülmektedir. Ayrıca deplasman azaldıkça salınımların arttığı gözlenmiştir. Bu nedenle boyutsuz RAO[a_z] ile kalkıntı açısı arasında lineer bir ilişki kurulamamıştır. Fakat Şekil 4.47 incelendiğinde ivmelenmenin trim açısı ile ilişkili olduğu görülmektedir.

Seo vd. [74] 2016 yılında yaptıkları çalışmalarında, model deneyleri yaparak, yüksek süratli su altı geometrilerini denizcilik ve direnç açısından incelemişlerdir. Geometrilere ekledikleri serpinti tirizleri ile dinamik trim açısını düşürerek, denizcilik ve direnç açısından fayda sağlamışlardır.

Buna göre yüksek hızlarda trim açısı azaldıkça, varyantların denizcilik açısından daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. Literatürde yapılan çalışmalara dayanarak, kalkıntı açısının artmasının, denizcilik açısından yararlı olduğu bilinse de bu çalışma ile birlikte trim açısının baskın bir parametre olduğu söylenebilir. Dolayısı ile trim açısının azalmasının denizciliğe pozitif etkisi görülmektedir.



Şekil 4. 47 Kalkıntı açısının dinamik trim açısı ile olan ilişkisi

4.5 Direnç Açısından Regresyon Analizi

Regresyon analizi, aralarında sebep-sonuç ilişkisi bulunan iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi belirlemek ve bu ilişkiyi kullanarak o konu ile ilgili tahminler (estimation) ya da kestirimler (prediction) yapabilmek amacıyla yapılır.

Optimizasyon akış şeması sonucunda oluşan varyantların Fn=0.5-0.75-0.95 hız değerlerinde direnç analizleri yapılmıştı. Bu analizler sonucunda parametrelerin etkilerine bakılarak genel bir fikir edinilmişti. Direnç açısından elde edilen bu sonuçların form parametreleri ile aralarında ilişki kurmak için, çok değişkenli regresyon analizi kullanıldı. Varyantlar arasında kıyaslama yapılabilmesi amacı ile direnç değerleri normalleştirildi (EK C). Çizelge 4.6 incelendiğinde, regresyon analizi sonucundaki yaklaşım değerleri görülmektedir. Buna göre direnç açısından kıyas formülü ($\mathbf{D_{k(n)}}$) denklem 4.10'de verilmiştir.

Çizelge 4. 6 Regresyon istatistiki bilgileri

Regresyon İstatistikleri	
Çoklu R	0.976973
R Kare	0.954477
Ayarlı R Kare	0.953964
Standart Hata	0.036439
Gözlem	360

$$\underline{D_{k(n)} = 2.016082 - 0.05x(Loa/B) - 0.00065x\beta - 0.26x(L/\nabla^{(1/3)}) + 0.738166xFn} \quad (4.10)$$

Bu formülün düzgün sonuçlar verebilmesi için çizelge 4.7'de belirtilen geometrik sınırlar dikkate alınmalıdır. İki tekne için veriler formülde yerine konduğunda 0'a yakın olan teknenin direnç açısından daha iyi olduğu düşünülmelidir.

Çizelge 4. 7 Direnç açısından kıyas formülü sınırları

Parametre	Loa/B	β (Der.)	$L/\nabla^{(1/3)}$	τ (Der.)	Fn	CB	CP	B_{WL}/T
Alt sınır	4.8	10	5.7	1.44	0.5	0.32	0.79	3.4
Üst Sınır	5.4	20	6.8	2.54	0.95	0.53	0.83	6.25

Çizelge 4.8'de özellikleri verilen iki varyantın verileri, direnç kıyaslamasında yerine konduğunda, sonuçlar 4.11 ve 4.12'deki gibi olmaktadır. Sağlamasını yapmak amacı ile analiz sonuçları kontrol edildiğinde, DES0056'nın direnç açısında iyi olduğu görülmektedir.

Çizelge 4. 8 Örneklendirmek amacı ile direnç açısından kıyaslanacak iki varyant

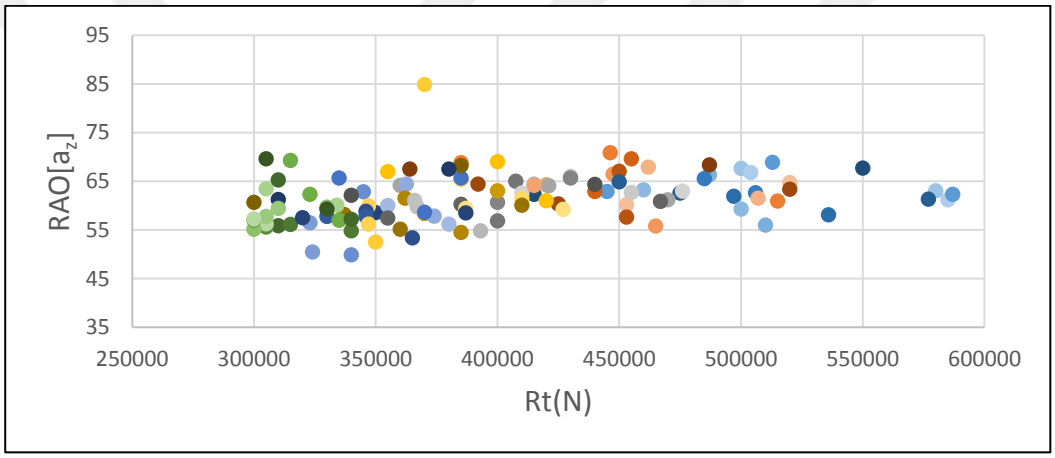
Varyantlar	Loa/B	β (Der.)	$L/\nabla^{(1/3)}$	FN	Rt(N)
DES0032	5.00	10.00	6.10	0.50	86760.35
DES0056	5.00	20.00	6.10	0.50	83246.49

$D_{k(DES0032)}$=2.016082-0.05x5-0.00065x10-0.26x6.1+0.738166x0.5=**0.542** (4.11)

$D_{k\ (DES0056)}$=2.016082-0.05x5-0.00065x20-0.26x6.1+0.738166x0.5=**0.536** (4.12)

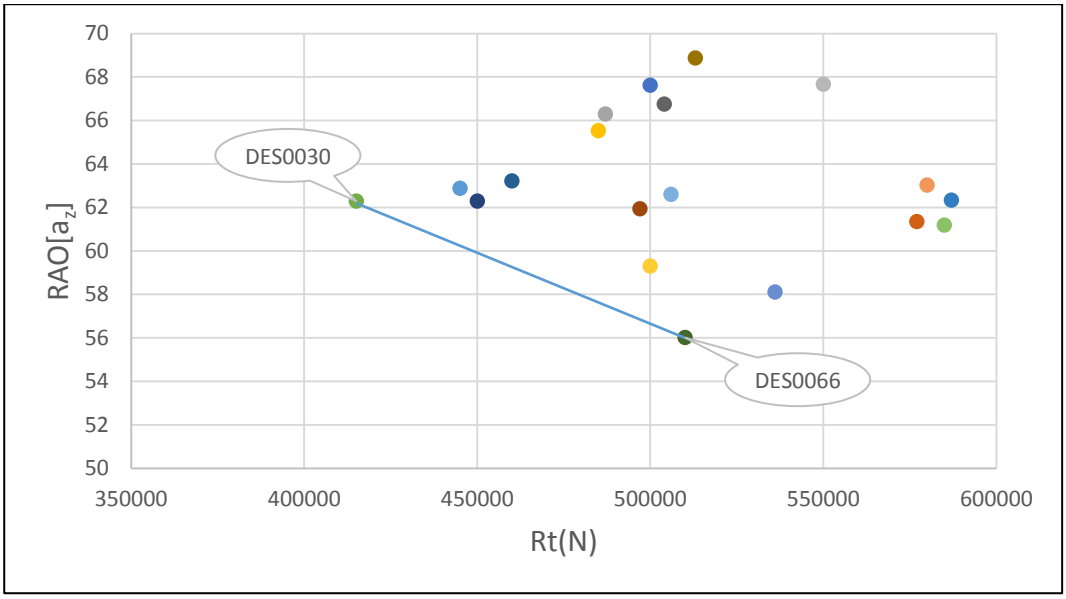
4.6 Çok Kriterli Form Optimizasyonu

Optimizasyon daha öncede tanımlandığı gibi amaca en uygun çözümün bulunmasıdır. Bu çalışmada oluşturulan metodolojiye uygun olarak optimizasyon için en genel haliyle 3 kriter göz önüne alınmıştır. Bunlardan ilki stabilitedir. Bir teknenin kendisinden beklenen görevleri yerine getirebilmesi için olmazsa olmaz şart stabilite olduğundan, tüm varyantlar bu açıdan kontrol edilmiş ve kriterleri sağlamayan formlar elenmiştir. Bu aşamadan sonra direnç ve denizcilik analizleri birlikte yapılmıştır.

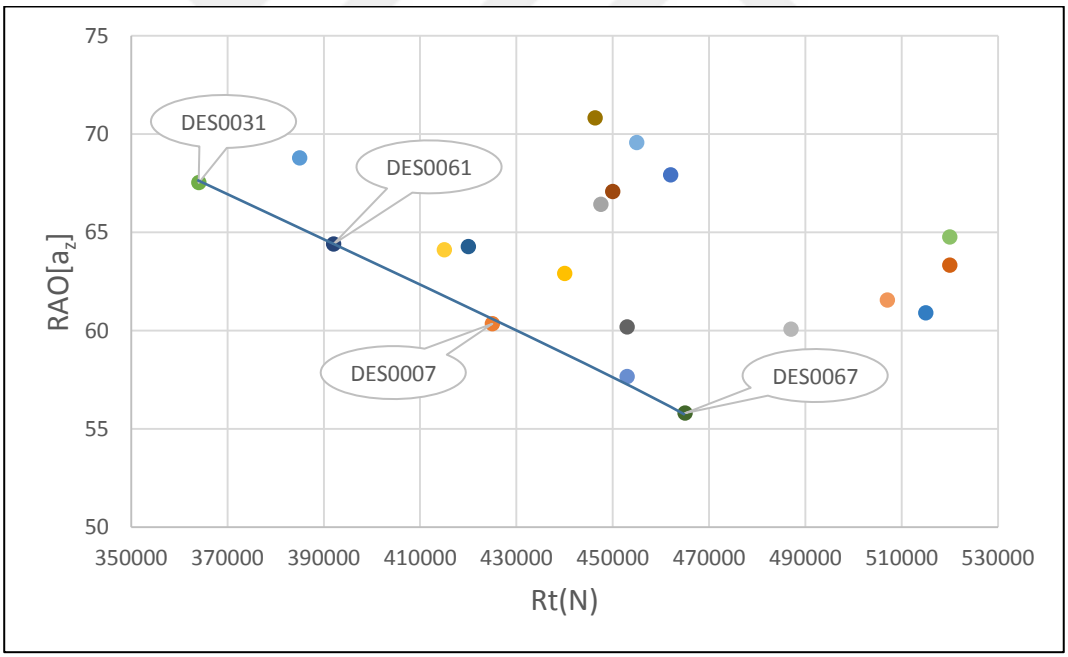


Şekil 4. 48 Sistematik varyasyon sonucu oluşan dizayn uzayı

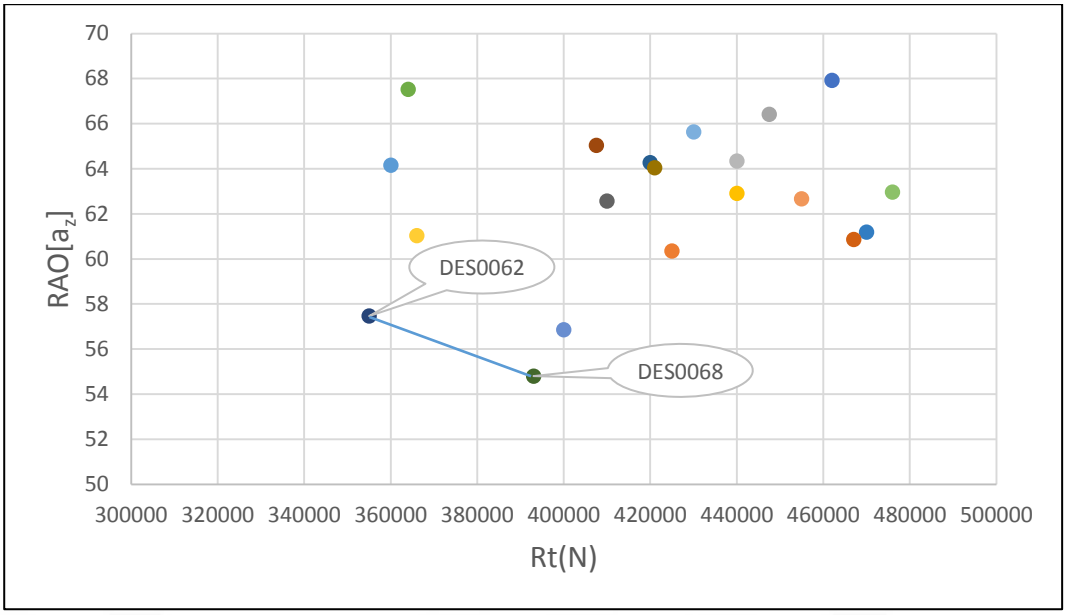
Şekil 4.48'te yapılan sistematik varyasyon sonucunda meydana gelen çözüm uzayı görülmektedir. Çözümleri anlamlandırmak amacı ile dizaynlar arasında kendi içinde aynı deplasmana sahip olanlar birlikte incelenmiştir.



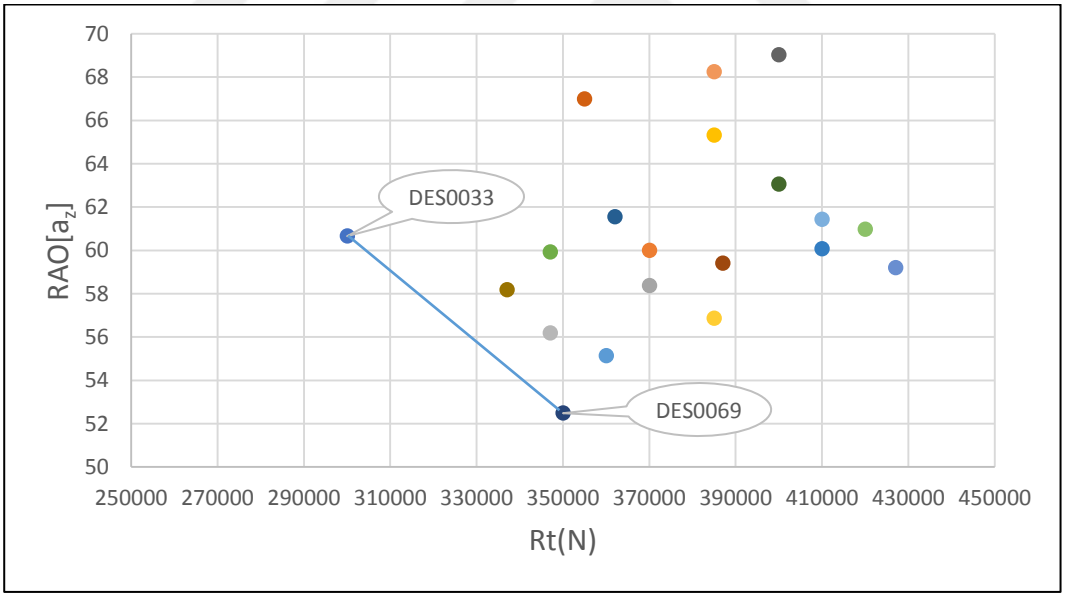
Şekil 4. 49 Fn=1.5 $L/\nabla^{(1/3)}$=5.7 olan tekneler için direnç ve ivme değerleri



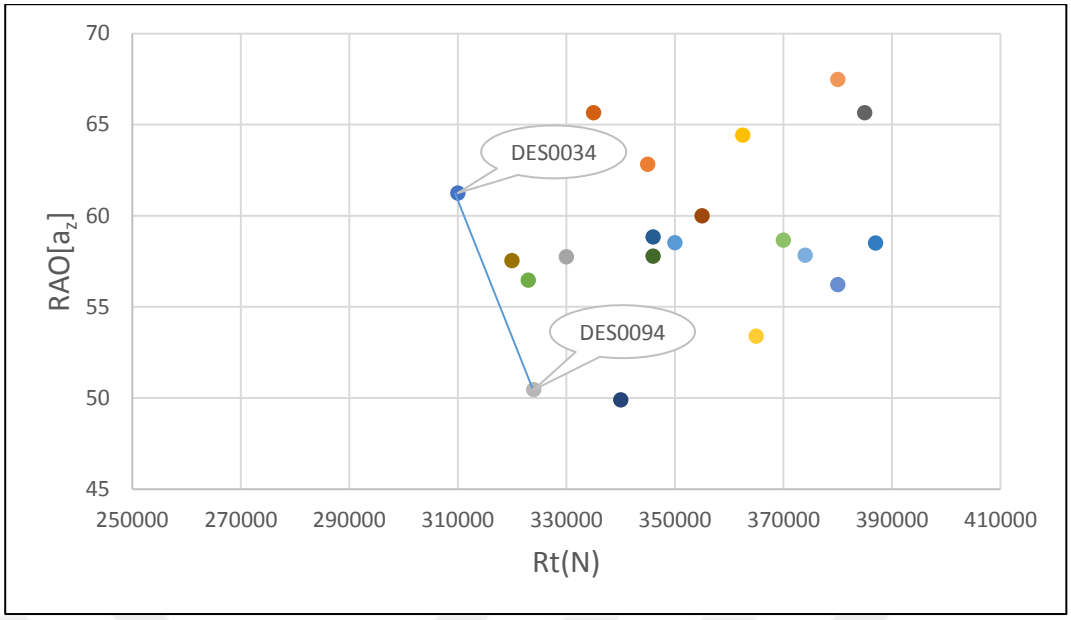
Şekil 4. 50 Fn=1.5 $L/\nabla^{(1/3)}$=5.9 olan tekneler için direnç ve ivme değerleri



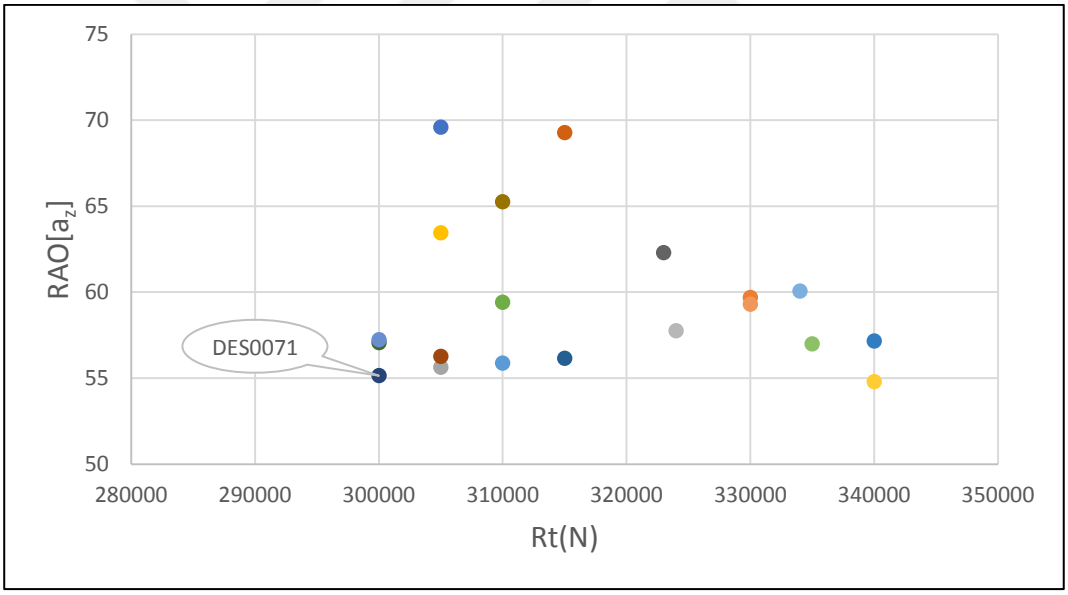
Şekil 4. 51 Fn=1.5 $L/\nabla^{(1/3)}$=6.1 olan tekneler için direnç ve ivme değerleri



Şekil 4. 52 Fn=1.5 $L/\nabla^{(1/3)}$=6.3 olan tekneler için direnç ve ivme değerleri



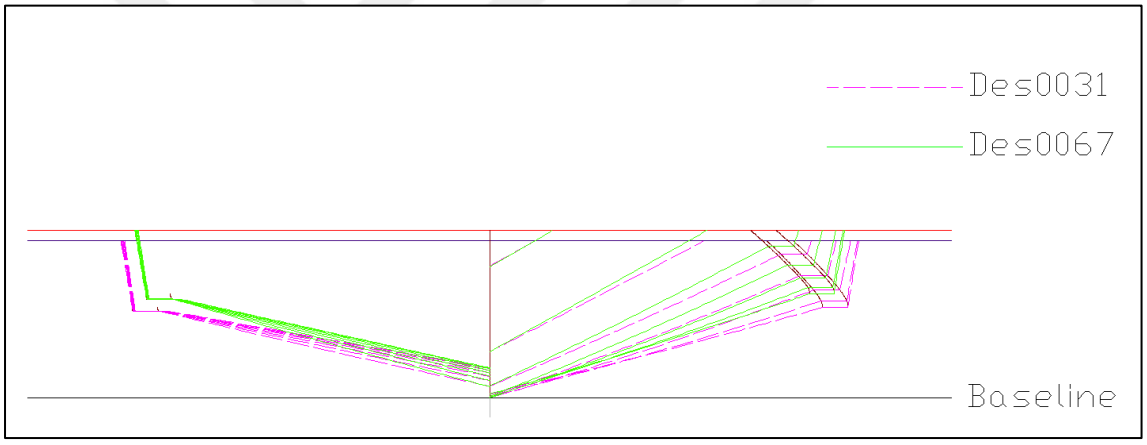
Şekil 4. 53 Fn=1.5 $L/\nabla^{(1/3)}$=6.5 olan tekneler için direnç ve ivme değerleri



Şekil 4. 54 Fn=1.5 $L/\nabla^{(1/3)}$=6.8 olan tekneler için direnç ve ivme değerleri

Sırası ile şekil 4.49, 4.50, 4.51, 4.52, 4.53 ve 4.54 incelendiğinde farklı deplasman grupları için optimum dizaynlar öne çıkmaktadır. Her deplasman gurubu için, pareto eğrisi çizildiğinde, eğri üzerinde kalan optimum dizaynlar içerisinde de, amaç fonksiyonuna uygun seçim yapma gerekliliği vardır. Örneğin Şekil 4.50 incelendiğinde 4 varyant orijine en yakın konumda olanlardır. Bunlar arasında esas kriter denizcilik açısından iyi bir tekne ise DES0067 tercih edilmelidir. Fakat öncelik direnç açısından iyi bir tekne ise, o zaman

tercih edilmesi gereken varyant DES0031 olmalıdır. Şekil 4.55'te DES0031 ve DES0067'nin su altı geometrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Aynı deplasmanda olan formlardan kalkıntı açısı daha az ve tekne genişliği fazla olanı daha az direnç göstermektedir. Kalkıntı açısı az olan formun hidrodinamik kuvvetlerin etkisinde daha fazla su hattı üzerinde yükselerek direnç açısından avantajlı olduğu daha önceki bölümlerde de değerlendirilmişti. Aynı deplasmandaki daha narin olan form ise denizcilik açısından daha iyi performans göstermektedir. Kalkıntı açısının ve su çekiminin artması ile dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketlerinin sönümlenmesi DES0067'de daha fazla olmaktadır. Dolayısı ile bu form baştan gelen düzgün dalgalarda daha yüksek performans göstermiştir. Tüm varyantlar arasında, direnç ve denizcilik açısından en yüksek performansa sahip alternatiflerin form özellikleri Çizelge 4.9'da ve su altı geometrileri EK-E'de verilmiştir.



Şekil 4. 55 Des0067 ve Des0031'in su altı geometrileirnin birlikte gösterimi

Çizelge 4. 9 Optimum Tekne Ailesi

Varyant	Loa/B	β (Der.)	$L/\nabla^{(1/3)}$	Rt(N)	RAO[a_z]	Δ (ton)	T (m)	τ (Der.)
DES0030	5.00	10.00	5.70	415000	62.290	354.38	1.86	3.63
DES0066	5.20	12.50	5.70	510000	56.010	354.38	1.99	3.20
DES0007	4.80	12.50	5.90	425000	60.350	319.51	1.80	2.95
DES0031	5.00	10.00	5.90	364000	67.520	319.58	1.75	3.46
DES0061	5.20	10.00	5.90	392000	64.404	319.58	1.78	3.53
DES0067	5.20	12.50	5.90	465000	55.803	319.55	1.86	3.15
DES0062	5.20	10.00	6.10	355000	57.462	289.13	1.67	3.28
DES0068	5.20	12.50	6.10	393000	54.801	289.06	1.75	2.70
DES0033	5.00	10.00	6.30	300000	60.654	262.42	1.55	2.92
DES0069	5.20	12.50	6.30	350000	52.481	262.48	1.66	2.82
DES0034	5.00	10.00	6.50	310000	61.247	238.84	1.47	2.52
DES0094	5.40	10.00	6.50	324000	50.451	238.95	1.51	2.95
DES0071	5.20	12.50	6.80	300000	55.142	208.69	1.47	2.10

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde gemi inşa sanayisinde daha az yakıtla daha yüksek süratlere ulaşabilme amacı, başta savunma sanayi olmak üzere birçok alanda öne çıkmaktadır. Bu amaca ulaşırken dikkat edilmesi gereken diğer önemli kriter de seyir halindeki konfordur. Deniz taşıtı kendisinden beklenen görevleri yerine getirirken, içinde bulundurduğu personel ve yolcular da sağlıklı bir şekilde yolculuk yapmalıdırlar. Bunu belirleyen ölçüt de, deniz taşıtının denizcilik performansıdır. Dolayısı ile bir deniz taşıtının hidrodinamik performansının yüksek olması doğrudan iyi bir sualtı tasarımına sahip olması ile ilişkilidir. Bu ihtiyaca yönelik olarak yüksek hidrodinamik performansa sahip tasarımlar oluşturmak için bir yöntem geliştirmek, bu tezin ana fikri olarak düşünülebilir.

Günümüzde hala yoğunlukla kullanılmakta olan geleneksel form tasarım yöntemleri, ihtiyaçları karşılamakla beraber en iyiyi arama amacı ile kullanılamamaktadır. En iyiyi aramak bir optimizasyon problemi olarak düşünülmelidir. Geleneksel yöntemler ile form optimizasyonunun zaman ve maliyet açısından uygunsuzluğu bilinmektedir. Gelişen çağın sağladığı imkanlarla yeni metotların araştırılması bu açıdan önemli hale gelmiştir.

Yapılan çalışmada öncelikle yüksek süratli tekneler ile ilgili literatür araştırması yapılarak daha önce bu konuda yapılan çalışmalar sunulmuştur. Bunun yanında yapılan çalışmanın temelinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği tabanlı yöntemler kullanıldığından, bu konu ile ilgili yapılmış araştırmalar da tezin literatür kısmında sunulmuştur.

Gün geçtikçe gelişen teknoloji ile birlikte daha büyük boyutlu teknelerin yüksek hızlara ulaşabilme ihtimali artmaktadır. Bu nedenle tezin uygulama kısmında 45 m boya sahip bir ana formdan tekne ailesi oluşturma yoluna gidilmiştir. Belirlenen metodolojide öncelikli olarak, ön dizayn çalışması sonucunda elde edilen veriler ışığında, sistematik

varyasyon için bir parametrik ana form oluşturulmuştur. Parametrik form oluşturulurken yapılan literatür araştırmaları sonucunda, yüksek süratli bir su altı geometrisi için, ana boyutlar, deplasman ve kalkıntı açısı önemli parametreler olarak dikkate alınmıştır.

Parametrik ana formun oluşturulmasından sonra, optimizasyon işleyişinin otomatik olarak ilerleyebilmesi için, bir ana yazılım içerisinde iletişim kurabilen alt yazılımların olduğu bir sistem kurulmuştur. Bu sistem sayesinde, parametrik formun sistematik varyasyonu sonucu oluşan her aday formun analizleri yapılarak kayıt altına alınabilmiştir. Her aday form, öncelikle bir kısıt faktörü olan stabilite analizlerinden geçirilerek, hasarsız stabilite kriterlerinin sağlandığı kontrolü yapılmıştır. Kriterleri sağlayan formların yine bütünleşik olarak direnç ve denizcilik analizleri yapılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda, araştırılan parametrelerin dirence ve denizciliğe olan etkileri incelenmiştir. Direnç açsından Fn=0.5-0.75-0.95 olmak üzere 3 farklı hızda potansiyel teori temelli bir HAD yazılımı ile analizler tamamlanmıştır. Burada sistematik olarak değişen parametreler; ana boyutları etkileyen Loa/B, $L/\nabla^{(1/3)}$ oranları ve yüksek süratli teknelerde bir form karakteristiği olan kalkıntı açsı olarak ayarlanmıştır. Bu analizlerin sonucu olarak beklendiği gibi Loa/B ve $L/\nabla^{(1/3)}$ oranının artmasının, direnci azaltıcı etkisi görülmüştür. Benzer etkileri De Luca ve Pensa'nın [75] çalışmalarında da görmek mümkündür. Yapılan deneysel çalışmada kayıcı formlardan oluşan serinin sakin su performansları incelenmiştir. Araştırma kapsamında, L_b/B_c oranları 3.45-6.25 arsında ve $L/\nabla^{(1/3)}$ oraları da 4.83 ile 7.49 arasında değişen formların model testleri Fn=0.5 ile Fn=1.6 arasında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda $L/\nabla^{(1/3)}$ sabit iken Loa/B artışının direnci azalttığı saptanmıştır. Düşük hızlarda performans verimi ile orantılı olan parametre . $L/\nabla^{(1/3)}$ iken hız arttıkça eğilimin değişerek verimin Loa/B ile orantılı olduğu görülmüştür. Bu çalışmada interseptör etkisi de araştırılmış ve direnci azaltıcı etkisi görülmüştür.

Kalkıntı açısının direnç ile olan ilişkisi incelendiğinde Fn=0.5-0.75 hız aralıklarında açının artmasının, dirençte azalmalara neden olduğu görülmüştür. Fakat formlar Fn=0.75-0.95 için incelendiğinde, direnç eğrileri yön değiştirerek açının azalmasının direnç düşümüne sebep olduğu görülmüştür. Bu nedenle burada kayma rejiminin Fn=0.75-0.95 civarında başladığı söylenebilir. Potansiyel çözümleri desteklemek amacı ile, belirli durumlar için

aynı koşullarda viskoz çözümler de gerçekleştirilmiştir ve potansiyel çözüm ile uyumlulukları belirlenmiştir. Benzer çalışma deneysel olarak Kim vd. [76] tarafından da yapılmıştır. Çalışmalarında, aynı deplasmana ve ana boyutlara sahip üç adet kayıcı formun deneysel çalışma ile hidrodinamik özelliklerini incelemişlerdir. Tüm formlar derin V olup çene hattına sahiptir. İki ve üç numaralı formların baş yapıları daha denizci olacak şekilde tasarlanıp, Loa/B oranları bir numaralı forma göre daha büyüktür. İki ve üç numaralı formlar arasında ki fark ise, iki numaralı formun baş kısmı daha fazla su çekimine sahip parabolik bir eğri olarak tanımlanmış olmasıdır. Araştırmalar sonucunda küçük kalkıntı açısının hidrodinamik kaldırma kuvvetine olan pozitif etkisi sebebi ile direnç açısından faydalı olduğu saptanmıştır. Özellikle baş tarafta kalkıntı açısının artmasının denizcilik açısından olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Loa/B oranın büyümesinin denizcilik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür.

Ön dizayn aşamasında araştırılması düşünülen boyutlarda Fn=1.5 seviyesinde hızlara ulaşan bir örnek görülmemesine rağmen ileride, gelişen teknoloji ile birlikte bu hızların yakalanabileceği ihtimaline dayanarak bu hız seviyelerinde de analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler diğer üç hızdan farklı olarak viskoz teoriye dayalı bir HAD yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonucunda da diğer üç hızı destekler biçimde kalkıntı açısının azalmasının dirence pozitif etkisi görülmüştür. Bu konu ile ilgili olarak kayma rejimine ulaşacak süratlere çıkıldığında, bu boyutlarda bir formun 10 derece civarında bir kalkıntı açısına sahip olmasının direnç açısından uygun olacağı görülmüştür.

Üç farklı hız için potansiyel teoriye dayalı olarak yapılan analizler sonucunda, direnç açısından parametrelerin dirence etkisinin kıyaslanabileceği bir formül oluşturulmuştur. Bu formül 360 gözlem ile regresyon analizi sonucunda ortaya konmuştur.

Sistematik varyasyon sonucunda meydana gelen 120 varyant, denizcilik açısından incelenirken de viskoz teori temelli bir HAD yazılımı kullanılmıştır. Varyantlar arasında denizcilik açısından iyi olanları seçebilmek için, en kritik olduğu bilinen baştan gelen dalgalardaki durum analiz edilmiştir. Denizcilik performansının araştırılması için özel bir deniz koşulu olmadığından, ivmelenmeler açısından genlik karşılık fonksiyonları kıyaslanmıştır. Genlik karşılık fonksiyonlarının kıyaslanabilmesi için zaman alanında

yapılan çözüm Fourier dönüşümü ile frekans alanına dönüştürülmüştür. Daha sonra tüm varyantlar için RAO[a_z] eğrisi altında kalan alanlar hesaplanarak kıyaslama yapılmıştır.

Denizcilik analizleri sonucuna bakıldığında bazı belirsizlikler olduğu görülmüştür. Kalkıntı açısının denizcilik performansı ile direkt ilişkisi kurulamamıştır. Fakat burada trim açısı ile kalkıntı açısı arasında bir ilişki olduğu görülmüştür. Buradan hareketle de trim açısının azalmasının denizciliğe pozitif etkisi görülmüştür. Bu boyutlarda bir form için denizcilik performansını arttırabilmek adına tirim açısını azaltmaya yönelik önlemler alınmalıdır.

Tüm alternatif tekneler denizcilik ve direnç açısından ayrı ayrı incelenerek, form özelliklerini yansıtan parametrelerinin etkisi ortaya konmuştur. Son aşama olarak, tüm varyantlar denizcilik, direnç ve stabilite açısından birlikte incelenerek içlerinden optimum bir tekne ailesi oluşturulmuştur. Burada varyantlar belli deplasman grupları içerisinde pareto eğrisi yardımı ile direnç ve denizcilik özellikleri minimize edilmiş formlar seçilerek tekne ailesi oluşturulmuştur.

İleride, bu çalışmanın uygulama kısmının daha da geliştirilebilmesi amacı ile bazı yorumlar yapılabilir. Örneğin kalkıntı açısının değişim sıklığı arttırılarak eğilim yeniden incelenebilir. Formlar sabit trim açılarında tutularak, denizcilik açısından tekrar değerlendirilir ve diğer parametrelerin etkisine bakılabilir.

Bu çalışmada regresyon analizinin sınırlarını genişletebilmek amacı ile 25 m ve 35 m boylarında da 200 adet varyant üretilerek direnç açısından incelemeler yapılmıştır. Fakat regresyon analizi anlamlı olmadığından teze konulmamıştır. Bu nedenle ileriki çalışmalarda boy değişim aralığının daha sıklaştırılması ile regresyon anlamlı hale getirilebilir ve çeşitli boylar için değerlendirmeler yapılabilir.

Ayrıca ileriki çalışmalarda sistematik varyasyon sonucunda, farklı deplasman gruplarında elde edilen optimum tekne ailesinin üyesi olan varyantlara lokal değişimler uygulanarak analizler tekrarlanabilir. Lokal değişimleri sağlayacak bu parametreler;

- Çene kalkıntı açısının tekne boy doğrultusundaki değişimi,
- Baş taraftaki dolgunluk,
- Serpinti tirizleri,
- Pervane tüneli,

- İnterseptör uygulaması
- Baş bodoslamanın eğimi,
- Kıç aynanın eğimi ve yüksekliği,
- Boyuna hacim merkezinin yeri olabilir.

Bu parametrelerin değişimi otomatikleştirilmiş genetik algoritmalar kullanılarak sağlanabilir. Genetik algoritmalar, temelde iyinin korunması ilkesine dayanarak çalıştığından, bu tekne grubu yeni bir optimizasyon sürecinden geçirilebilir. Dolayısı ile formlara hidrodinamik açıdan daha iyi özellikler kazandırılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Savitsky, D., (1964). “Hydrodynamic Design of Planing Hulls”, Marine Technology Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1:1-11.

[2] Faltinsen, O.M., (2005). Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles, Cambridge University Press, New York.

[3] Larsson, L. ve Eliasson, R., (2006). Yat Tasarımı Genel İlkeler (Çev.,Yılmaz, T.), Birsen Yayınevi Ltd. Sti., İstanbul.

[4] Baykal, R. ve Dikili, A.C., (2002). Gemilerin Direnci ve Makina Gücü, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

[5] Akers, R.H., (1999). “Dynamic Analysis of Planing Hull in the Vertical Plane”, Society of Naval Architecture and Marine Engineers, England.

[6] Katayama, T., (2002). “Experimental Techniques to Assess Dynamic Instability of High-Speed Planing Craft –Non-zero Heel, Bow diving, Porpoising and Transverse Porpoising”,Sixth International Ship Stability Workshop, New York.

[7] Savitsky, D. ve Brown, P.W., (1976). “Procedures for Hydrodynamic Evaluation of Planing Hulls in Smooth and Rough Water”, Marine Technology, 13:381-400.

[8] Savitsky, D., DeLorme, M.F. ve Dalta, R., (2007). “Inclusion of Whisker Spray Drag in Performance Prediction Method for High-Speed Planing Hulls”, Marine Technology, 44:35-56.

[9] Clement, E.P. ve Blount, D.L., (1963). “Resistance Tests of a Systematic Series of Planning Hull Forms”, SNAME, 71:491-579.

[10] Grigoropoulos, G.J. ve Loukakis, T.A., (1995). “Seakeeping performance assessment of planing hulls”, Marine Technology and Transportation, 11:58-64.

[11] Kowalyshyn, D.H. ve Metcalf, B., (2007). “A USCG Systematic Series of High Speed Planing Hulls”, SNAME, 114:268-309.

[12] Keuning, J.A. ve Gerritsma, J., (1982). “Resistance Tests of a Series of Planing Hull Form With 25 Degrees Deadrise Angle”, International Ship Building Progress, 29:222-249.

[13] Taunton, D.J., Hudson, D.A. ve Shenoi, R.A., (2010) “Characteristics of a series of high speed hard chine planing hulls – Part 1: Performance in calm water – Part 2: Performance in waves”, The International Journal of Small Craft Technology, 152:55-75, 153:1-22.

[14] Birkhoff, G. (1984). Numerical Fluid Dynamics, DTIC.

[15] Kaneda, Y., Kawamura, H. ve Sasai, M., (2005) Frontiers of Computational Science, Springer.

[16] Janson, C.E., (1997). Potential Flow Panel Methods fort he Calculation of Free-Surface Flows with Lift, Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg.

[17] Harlow, F.H., ve Welch, J.E., (1965). “Numerical Calculation of Time-Dependet Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface”, The Physics of Fluids, 8:2182-2189.

[18] Hirt, C.W. ve Nichols, B.D., (1981). “Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries”, Journal of Computational Physics, 39:201-225.

[19] Mehdiyev, N. (2009).Yüksek Süratli Kayıcı Bir Teknenin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi İle Form Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[20] Bertram V., (2000). Practical Ship Hydrodynamics, A division of Reed Educational and Professional Publishing Ltd., Jordan Hill.

[21] Dejhalla, R. ve Prpic-Orsic, J., (2006). “A Review of the State-of-the-Art in Marine Hydrodynamics”, Brodogradnja, 57:13-22.

[22] Ohmori, T., (1998). “Finite-Volume Simulation of Flows About a Ship in Maneuvering Motion”, Journal of Marine Science and Technology, 3:82-93.

[23] Tahara, Y. ve Stern, F., (1996). “A Large-Domain Approach for Calculating Ship Boundary Layers and Wakes and Waves Fields for Nonzero Froude Number”, Journal of Computational Physics, 127:398-411.

[24] Yang, C., Löhner, R., Noblesse, F. ve Huang, T.T., (2000). “Calculatıon of Shıp Sinkage and Trim Usıing Unstructured Grids”, European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Barcelona.

[25] Azcueta, R., (2004). “Steady and Unsteady RANSE Simulations fot Littoral Combat Ships”, 25.th Symposium on Naval Hydrodynamics, Canada.

[26] Seif, M.S. ve Amini, E., (2004). “Performance Comparison Between Planing Monohull and Catamaran at High Froude Numbers”, Iranian Journal of Science & Technology, 28:435-441.

[27] Ghassemi, H., Kamarlouei, M. ve Veysi, S.T.G., (2015). “A Hydrodynamic Methodology and CFD Analysis for Performance Prediction of Stepped Planing Hulls”, Polish maritime Research, 22:23-31.

[28] Fu, T.C., Ratcliffe, T., O'Shea, T.T., Brucker, K.A., Graham, R.S., Wyatt, D.C. ve Dommermuth, D.G., (2010). "A Comparison of Experimental Measurements and Computational Predictions of a Deep-V Planing Hull", 28.th Symposium on Naval Hydrodynamics, California.

[29] Çakıcı, F., Sukas, Ö.F., Usta, O. ve Alkan, A.D., (2015). "A Computational Investigation of a Planing Hull in Calm Water by U-RANSE Approach ", Applied and Computional Mechanics, İzmir.

[30] Brizzolara, S. ve Serra, F., (2007). "Accurancy of CFD Codes in the Prediction of Planing Surfaces Hydrodynamic Characteristics" 2.nd International Conference on Marine Research and Transportation, Naples.

[31] Fu, T.C., Brucker, K.A., Mousaviraad, S.M., Ikeda, C.M., Lee, E.J.T., O'Shea, T.T., Wang, Z., Stern, F. ve Judge, C.Q., (2014). "An Assessment of Computational Fluid Dynamics Predictions of the Hydrodynamics of High-Speed Planing Craft in Calm Water and Waves" 30.th Symposium on Naval Hydrodynamics, Tasmania

[32] Thornhill, E., Oldford, D., Bose, N., Veitch, B. ve Liu, P., (2001). "Planing Hull Model Tests for CFD Validation",Canadian Marine Hydromechanics and Structures Conference, Vancouver BC.

[33] Ansorge, R., (2003).Mathematical Models Of Fluid Dynamics, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

[34] Anderson, J.D., (2009). Governing Equations Of Fluid Dynamics, Springer.

[35] Bakker, A., (2002). Applied Computational Fluid Dynamics, http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/, 18 Şubat 2018.

[36] Hess, J.L. ve Smith, A.M.O., (1962). Calculation of Non-Lifting Potential Flow about Arbitrary Three-Dimensional Bodies, Douglas Aircraft Company, California.

[37] Dawson, C.W., (1977). "A Practical Computer Method for Solving Ship-Wave Problems", 2nd International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, California.

[38] Ilgaz, M., Ak, M.A. ve Tuncer, İ.H. (2004). "Sayısal Akışkanlar Mekaniğinde Yeni Bir Yaklaşım: Gaz-Kinetik Metotlar", Beşinci Kayseri Havacılık Sempozyumu, Kayseri.

[39] Schäfer, M., (2006). Computational Engineering - Introduction To Numerical Methods, Springer.

[40] Hendrix, D., Percival, S. ve Noblesse, F., (2001). "Practical Hydrodynamic Optimization of a Monohull", SNAME, 109:173-183.

[41] Neu, W.L., Hughes, O., Mason, W.H., Ni, S., Chen, Y., Ganesan, V., Lin, Z. ve Tumma, S., (2000) "A prototype tool for multidisciplinary design optimization of ships", Ninth Congress of the international Maritime Association of the Mediterranean, Napels.

[42] Lackenby, H., (1950). “On the Systematic Geometrical Variation of Ship Forms”, Transactions of The Institute of Naval Architects, 92:289-315.

[43] Soding, H. ve Rabien, U., (1977). “Hull Suurface Design by Modifying an Existing Hull”, SNAME, 1362:19-29.

[44] Harries, S., (1998). Parametric Design andHydrodynamic Optimization of Ship Hull Forms, Ph.D. Thesis, Technical University Berlin, Berlin.

[45] Calkins, D.E., Schacter, R.D. ve Oliveria, L.T., (2001). “An aoutomated computational method for planning hull form definition in consept design”, Int. Ocean Engineering, 28:297-327.

[46] Harries, S. ve Abt, C., (1999). “Parametric Design and Optimization of Sailing Yachts”, 14th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Annapolis.

[47] Harries, S., Abt, C. ve Hochkirch, C., (2004). “Modeling Meets Simulation – Process Integration to Improve Design”, Honarary Colloquium for Profs. Hagen, Schlüter and Thiel, Duisburg.

[48] Farin, G., (2003). Curves and Surfaces for CAGD, Morgan Kaufmann, NewYork.

[49] Peri, D., Rossetti, M. ve Campana, E.F., (2001). “Design optimization of ship hulls via CFD techniques”, Journal of Ship Research,45:140–149.

[50] Harries, S., ve Nowacki, H., (1999). “Form Parameter Approach to the Design of Fair Hull Shapes”, 10th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding, Cambridge.

[51] FRIENDSHIP Systems, (2011). FRIENDSHIP-Framework User Guide, Version 2.3.6, Potsdam.

[52] Abt, C. ve Harries, S., (2007). “A New Approach to Integration of CAD and CFD for Naval Architects”, 6th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries, Cortona.

[53] Şener, B. (2012). Fırkateyn Tipi Tekne Serisi Geliştirilmesi ve Hidrodinamik Form Optimizasyonu, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[54] Mason, A.P., (2010). Stochastic Optimisation of America’s Cup Class Yachts, Ph.D. Thesis, University of Tasmania, Tasmania.

[55] Hearn, G.E. ve Wright, P.N.H., (1997). “Seakeeping for Design: Optimisation of Motion Responses and Wave Making Resistance of Catamarans via the Application of a Genetic Algorithm”, 4th International Conference on Fast Sea Transportation, Sydney.

[56] Day, A.H. ve Doctors, L.J., (1997). “Resistance Optimization of Displacement Vessels on the basis of Principal Parameters”, Journal of Ship Research, 41:249-259.

[57] Gammon, M.A., (2004). Evrimsel Algoritmalar ile Gemi Formu Optimizasyonu (ingilizce), Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[58] Sağ,T., (2008). Çok Kriterli Optimizasyon İçin Genetik Algoritma Yaklaşımları, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

[59] IMO Resulation A.749 (18), (1993). Code on Intact Stability for All Types of Ships, Ch.3-Design Criteria Applicable to All Ships.

[60] Gillmer, T.C. ve Johnson, B., (1982). “Introduction to Naval Architecture”, Naval Institute Press.

[61] Lewis, E.V., (1988). Principles of Naval Architecture, Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City,NJ

[62] Almeter, J.M., (1993). “Resistance Prediction of Planing Hulls” Marine Techonology, 30:

[63] Flowtech (2007). Shipflow User Guide Version 4.0

[64] Duman, S., Sener, B. ve Bal, S., (2017). “Performance Prediction of a Planning Vessel Using Dynamic Overset Grid Method”, XI Symposium on High Speed Marine Vehicles, Naples.

[65] De Luca, F., Mancini, S. ve Pensa, C., (2016). “An Extended Verification and Validation Study of CFD Simulations for Planing Hulls”, Journal of Ship Research 60:101-118.

[66] CD-adapco (2014). STAR-CCM+ User’s Guide Version 9.06

[67] Harlow, F.H. ve Welch, J.E., (1965). “Numerical Calculation of Time-Depent Viscous Incompresible Flow of Fluid with Free Surface”, The Physics of Fluids, 8:2182-2189.

[68] Hirt, C.W. ve Nichols, B.D., (1981). “Volume of Fluid (VOF) method for the Dynamics of Free Boundaries”, Journal of Computational Physics, 39:201-225.

[69] Şaylı, A., Alkan, A.D., Nabergoj, R. ve Uysal, A.O., (2007). “Seakeeping Assessment of Fishing Vessels in Conseptual Design Stage”, Int. Journal of Ocean Engineering, 34:724-738.

[70] Kükner, A. ve Sarıöz, K., (1995). “High Speed Hull Form Optimisation For Seakeeping”, Advances in Engineering Software, 22:179-189.

[71] Sarıöz, K., (1993). A Hydrodynamic Hull Form Design Procedure in Conceptual and Preliminary Ship Design, Ph.D. Thesis, The University of Newcastle upon Tyne, Newcastle.

[72] Sarıöz, K., (1997). “Seakeeping Performance Assessment of Planning Hulls”, 8th International Congress on Marine Technology, İstanbul.

[73] ITTC, (2002). Sea keeping experiments ITTC Recommended Procedures and Guidelines, 23rd International Towing Tank Conference, Venice

[74] Seo, J., Choi, H., Jeong, U., Lee, D.K., Rhee, S.H., Jung, C. ve Yoo, J., (2016). “Model tests on resistance and seakeeping performance of wave-piercing high-speed vessel with spray rails”, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 8:442-455.

[75] De Luca, F. ve Pensa, C., (2017). “The Naples warped hard chine hulls systematic series” Ocean Engineering, 139:205-236

[76] Kim, D., Kim, S.Y., You, Y.J., Rhee, K.P., Kim S.H. ve Kim, Y.G., (2013) “Design of high-speed planing hulls for the improvement of resistance and seakeeping performance”, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 5:161-177

EK-A

MEVCUT TEKNELERİN GEOMETRİK ÖZELLİKLERİ

Çizelge A. 1 Mevcut formların geometrik özellikleri

No	Loa(m)	Lwl(m)	B(m)	T(m)	Δ (ton)	V (knot)	Güç (hp)	Loa/B	$L/\nabla^{(1/3)}$	FN	FNv
1	47.25	42.25	9.40	2.25	330	26		5.02	6.11	0.62	1.54
2	41.60	36.60	8.00	1.4		40	7200	5.20		1.02	
3	43.63	38.63	8.30	1.53	235	38	11630	5.25	6.26	0.94	2.36
4	42.67	37.67	8.50			17.5		5.02		0.44	
5	42.4	37.40	8.25	1.88	200	45	10600	5.14			
6	45.72	40.72	8.23	1.8			8000	5.55			
7	42.10	37.10	8.30	1.9	180	28	7400	5.07	6.57	0.71	1.82
8	43.10	38.10	8.35	1.35	180	36	7200	5.16	6.75	0.90	2.34
9	45.00	37.40	8.88	2.1	250	22	4080	5.06	5.94	0.54	1.31
10	44.50	39.50	8.51	2.74		16		5.23		0.39	
11	46.08	41.08	9.24	2.2	245	25	7300	4.99	6.56	0.60	1.55
12	41.00	36.00	8.20	2.78	247	19	3850	5.00	5.74	0.49	1.17
13	40.00	35.00	8.50	1.8	170	27	6280	4.70	6.32	0.70	1.76
14	39.65	34.65	7.76	1.7	185	36	9200	5.11	6.08	0.94	2.31
15	46.29	41.29	8.87	2.22	241	28	7400	5.22	6.63	0.67	1.74
16	38.00	33.72	7.50	1.72	194	20	4800	5.07	5.82	0.53	1.29
17	40.00	38.90	8.50	1.9	195	23	4800	4.70	6.71	0.60	1.55
18	37.30	32.30	7.50	2.2	150	25.5		4.97	6.08	0.68	1.692
19	40.00	35.00	8.00	2.35	222	28		5.00	5.78	0.73	1.75
20	44.00	39.00	9.00	2.5	292	25		4.89	5.88	0.62	1.50
21	45.00	40.00	8.40	2.85	286	30		5.36	6.07	0.73	1.81
22	47.00	42.00	9.00	2.5	308	24		5.22	6.22	0.57	1.43
23	46.20	41.20	8.50	1.5		32	7200	5.43		0.77	
24	50.00	45.00	8.50	2.4		19	4500	5.88		0.44	
25	49.10	44.10	8.50	2.5		20	4500	5.78		0.47	
26	40.00	45.00	8.50	2.4	315	19	4500	4.70		0.49	

Çizelge A. 1 (devam)

No	Loa(m)	Lwl(m)	B(m)	T(m)	Δ (ton)	V (knot)	Power (hp)	Loa/B	$L/\nabla^{(1/3)}$	FN	FNv
27	47.90	42.90	8.50	2.1		22	4500	5.63		0.52	
28	46.90	41.90	8.50	2.2		23	7300	5.52		0.55	
29	47.50	42.30	8.70	2.3	370	21	7300	5.46		0.50	

EK-B

SİSTEMATİK VARYASYON İLE OLUŞTURULAN FORMLARIN GEOMETRİK ÖZELLİKLERİ (L_{OA}=45 m)

Çizelge B. 1 Sistematik varyosyon ile oluşturulan formların geometrik özellikleri

Des. No	Loa/B	β	$L/\nabla^{(1/3)}$	Δ (ton)	T (m)	Lwl (m)	Loa (m)	B (m)	Bwl (m)	Bwl/T	CB	CP
Des000	4.80	10.00	5.70	354.37	1.83	39.81	45.00	9.38	8.61	4.71	0.51	0.81
Des001	4.80	10.00	5.90	319.58	1.72	39.57	45.00	9.38	8.57	4.99	0.49	0.81
Des002	4.80	10.00	6.10	289.01	1.62	39.35	45.00	9.38	8.54	5.28	0.47	0.80
Des003	4.80	10.00	6.30	262.51	1.53	39.14	45.00	9.38	8.51	5.56	0.46	0.80
Des004	4.80	10.00	6.50	238.94	1.45	38.95	45.00	9.38	8.48	5.84	0.44	0.80
Des005	4.80	10.00	6.80	208.78	1.35	38.69	45.00	9.38	8.44	6.25	0.42	0.79
Des006	4.80	12.50	5.70	354.34	1.91	39.99	45.00	9.38	8.59	4.49	0.48	0.82
Des007	4.80	12.50	5.90	319.51	1.80	39.76	45.00	9.38	8.55	4.74	0.46	0.81
Des008	4.80	12.50	6.10	289.16	1.71	39.55	45.00	9.38	8.51	4.99	0.45	0.81
Des009	4.80	12.50	6.30	262.40	1.62	39.35	45.00	9.38	8.48	5.24	0.43	0.81
Des010	4.80	12.50	6.50	238.99	1.54	39.17	45.00	9.38	8.45	5.48	0.41	0.80
Des011	4.80	12.50	6.80	208.74	1.44	38.92	45.00	9.38	8.42	5.84	0.39	0.80
Des012	4.80	15.00	5.70	354.25	2.00	40.17	45.00	9.38	8.58	4.28	0.46	0.82
Des013	4.80	15.00	5.90	319.50	1.89	39.95	45.00	9.38	8.53	4.50	0.44	0.82
Des014	4.80	15.00	6.10	289.11	1.80	39.75	45.00	9.38	8.49	4.73	0.42	0.82
Des015	4.80	15.00	6.30	262.46	1.71	39.56	45.00	9.38	8.46	4.95	0.40	0.81
Des016	4.80	15.00	6.50	238.97	1.63	39.38	45.00	9.38	8.43	5.16	0.39	0.81
Des017	4.80	15.00	6.80	208.65	1.53	39.14	45.00	9.38	8.38	5.48	0.36	0.81
Des018	4.80	17.50	5.70	354.38	2.10	40.35	45.00	9.38	8.56	4.08	0.44	0.83
Des019	4.80	17.50	5.90	319.55	1.99	40.13	45.00	9.38	8.51	4.28	0.42	0.82
Des020	4.80	17.50	6.10	289.11	1.89	39.94	45.00	9.38	8.47	4.48	0.40	0.82
Des021	4.80	17.50	6.30	262.46	1.80	39.76	45.00	9.38	8.43	4.68	0.38	0.82
Des022	4.80	17.50	6.50	238.97	1.72	39.59	45.00	9.38	8.39	4.87	0.36	0.82
Des023	4.80	17.50	6.80	208.68	1.62	39.35	45.00	9.38	8.35	5.15	0.34	0.82
Des024	4.80	20.00	5.70	354.37	2.19	40.52	45.00	9.38	8.54	3.90	0.42	0.83

Çizelge B. 1 (devam)

Des. No	Loa/B	β	$L/\nabla^{(1/3)}$	Δ (ton)	T (m)	Lwl (m)	Loa (m)	B (m)	Bwl (m)	Bwl/T	CB	CP
Des025	4.80	20.00	5.90	319.42	2.08	40.32	45.00	9.38	8.48	4.08	0.40	0.83
Des026	4.80	20.00	6.10	289.11	1.98	40.13	45.00	9.38	8.44	4.26	0.38	0.82
Des027	4.80	20.00	6.30	262.36	1.89	39.95	45.00	9.38	8.39	4.43	0.36	0.82
Des028	4.80	20.00	6.50	238.91	1.82	39.78	45.00	9.38	8.35	4.60	0.34	0.82
Des029	4.80	20.00	6.80	208.74	1.71	39.55	45.00	9.38	7.51	4.39	0.32	0.82
Des030	5.00	10.00	5.70	354.39	1.87	39.89	45.00	9.00	8.28	4.44	0.52	0.81
Des031	5.00	10.00	5.90	319.58	1.75	39.63	45.00	9.00	8.24	4.72	0.50	0.81
Des032	5.00	10.00	6.10	289.08	1.64	39.41	45.00	9.00	8.21	5.00	0.48	0.80
Des033	5.00	10.00	6.30	262.42	1.55	39.20	45.00	9.00	8.18	5.27	0.47	0.80
Des034	5.00	10.00	6.50	239.01	1.47	39.00	45.00	9.00	8.15	5.54	0.45	0.80
Des035	5.00	10.00	6.80	208.74	1.37	38.73	45.00	9.00	8.12	5.94	0.43	0.79
Des036	5.00	12.50	5.70	354.29	1.95	40.06	45.00	9.00	8.27	4.24	0.49	0.82
Des037	5.00	12.50	5.90	319.50	1.83	39.82	45.00	9.00	8.23	4.50	0.48	0.81
Des038	5.00	12.50	6.10	289.05	1.73	39.60	45.00	9.00	8.19	4.74	0.46	0.81
Des039	5.00	12.50	6.30	262.41	1.64	39.40	45.00	9.00	8.16	4.98	0.44	0.81
Des040	5.00	12.50	6.50	238.91	1.56	39.21	45.00	9.00	8.13	5.22	0.42	0.80
Des041	5.00	12.50	6.80	208.73	1.45	38.95	45.00	9.00	8.09	5.57	0.40	0.80
Des042	5.00	15.00	5.70	354.28	2.03	40.22	45.00	9.00	8.25	4.07	0.47	0.82
Des043	5.00	15.00	5.90	319.57	1.92	40.00	45.00	9.00	8.21	4.28	0.45	0.82
Des044	5.00	15.00	6.10	289.14	1.82	39.79	45.00	9.00	8.17	4.50	0.43	0.81
Des045	5.00	15.00	6.30	262.38	1.73	39.59	45.00	9.00	8.14	4.72	0.42	0.81
Des046	5.00	15.00	6.50	238.85	1.64	39.41	45.00	9.00	8.11	4.93	0.40	0.81
Des047	5.00	15.00	6.80	208.61	1.54	39.16	45.00	9.00	8.07	5.24	0.38	0.81
Des048	5.00	17.50	5.70	354.31	2.12	40.39	45.00	9.00	8.24	3.89	0.45	0.83
Des049	5.00	17.50	5.90	319.55	2.01	40.17	45.00	9.00	8.19	4.09	0.43	0.82
Des050	5.00	17.50	6.10	289.04	1.90	39.97	45.00	9.00	8.15	4.28	0.41	0.82
Des051	5.00	17.50	6.30	262.49	1.81	39.78	45.00	9.00	8.11	4.47	0.39	0.82
Des052	5.00	17.50	6.50	238.90	1.73	39.61	45.00	9.00	8.08	4.66	0.38	0.82
Des053	5.00	17.50	6.80	208.75	1.63	39.37	45.00	9.00	8.03	4.94	0.35	0.81
Des054	5.00	20.00	5.70	354.18	2.21	40.55	45.00	9.00	8.23	3.72	0.43	0.83
Des055	5.00	20.00	5.90	319.42	2.09	40.34	45.00	9.00	8.17	3.90	0.41	0.83
Des056	5.00	20.00	6.10	289.15	1.99	40.15	45.00	9.00	8.13	4.08	0.39	0.82
Des057	5.00	20.00	6.30	262.40	1.90	39.97	45.00	9.00	8.09	4.25	0.37	0.82
Des058	5.00	20.00	6.50	238.99	1.82	39.80	45.00	9.00	8.05	4.42	0.36	0.82
Des059	5.00	20.00	6.80	208.72	1.71	39.57	45.00	9.00	8.00	4.67	0.33	0.82
Des060	5.20	10.00	5.70	354.28	1.91	39.98	45.00	8.65	7.98	4.18	0.52	0.81
Des061	5.20	10.00	5.90	319.58	1.78	39.70	45.00	8.65	7.94	4.47	0.51	0.81
Des062	5.20	10.00	6.10	289.13	1.67	39.47	45.00	8.65	7.91	4.74	0.49	0.80
Des063	5.20	10.00	6.30	262.50	1.58	39.25	45.00	8.65	7.88	5.00	0.48	0.80
Des064	5.20	10.00	6.50	238.91	1.49	39.05	45.00	8.65	7.85	5.26	0.46	0.80

Çizelge B. 1 (devam)

Des No	Loa/B	β	$L/\nabla^{(1/3)}$	Δ (ton)	T (m)	Lwl (m)	Loa (m)	B (m)	Bwl (m)	Bwl/T	CB	CP
Des065	5.20	10.00	6.80	208.72	1.38	38.77	45.00	8.65	7.82	5.65	0.44	0.79
Des066	5.20	12.50	5.70	352.32	1.98	40.13	45.00	8.65	7.97	4.02	0.50	0.81
Des067	5.20	12.50	5.90	319.55	1.86	39.87	45.00	8.65	7.93	4.27	0.49	0.81
Des068	5.20	12.50	6.10	289.06	1.75	39.65	45.00	8.65	7.89	4.51	0.47	0.81
Des069	5.20	12.50	6.30	262.48	1.66	39.44	45.00	8.65	7.86	4.74	0.45	0.81
Des070	5.20	12.50	6.50	238.88	1.58	39.25	45.00	8.65	7.83	4.97	0.44	0.80
Des071	5.20	12.50	6.80	208.69	1.47	38.98	45.00	8.65	7.80	5.32	0.41	0.80
Des072	5.20	15.00	5.70	354.37	2.06	40.27	45.00	8.65	7.96	3.87	0.48	0.82
Des073	5.20	15.00	5.90	319.55	1.94	40.04	45.00	8.65	7.92	4.08	0.46	0.82
Des074	5.20	15.00	6.10	289.07	1.84	39.83	45.00	8.65	7.88	4.29	0.45	0.81
Des075	5.20	15.00	6.30	262.47	1.74	39.63	45.00	8.65	7.84	4.50	0.43	0.81
Des076	5.20	15.00	6.50	238.93	1.66	39.44	45.00	8.65	7.81	4.71	0.41	0.81
Des077	5.20	15.00	6.80	208.75	1.55	39.19	45.00	8.65	7.77	5.02	0.39	0.80
Des078	5.20	17.50	5.70	354.33	2.14	40.43	45.00	8.65	7.95	3.71	0.46	0.82
Des079	5.20	17.50	5.90	319.56	2.03	40.21	45.00	8.65	7.90	3.90	0.44	0.82
Des080	5.20	17.50	6.10	289.15	1.92	40.00	45.00	8.65	7.86	4.09	0.42	0.82
Des081	5.20	17.50	6.30	262.38	1.83	39.81	45.00	8.65	7.82	4.28	0.41	0.82
Des082	5.20	17.50	6.50	238.96	1.74	39.63	45.00	8.65	7.79	4.47	0.39	0.81
Des083	5.20	17.50	6.80	208.67	1.63	39.39	45.00	8.65	7.75	4.74	0.37	0.81
Des084	5.20	20.00	5.70	354.29	2.23	40.59	45.00	8.65	7.93	3.56	0.44	0.83
Des085	5.20	20.00	5.90	319.43	2.11	40.38	45.00	8.65	7.88	3.73	0.42	0.83
Des086	5.20	20.00	6.10	289.10	2.01	40.18	45.00	8.65	7.84	3.90	0.40	0.82
Des087	5.20	20.00	6.30	262.46	1.91	39.99	45.00	8.65	7.80	4.07	0.39	0.82
Des088	5.20	20.00	6.50	238.95	1.83	39.82	45.00	8.65	7.76	4.24	0.37	0.82
Des089	5.20	20.00	6.80	208.75	1.72	39.58	45.00	8.65	7.71	4.49	0.35	0.82
Des090	5.40	10.00	5.70	354.34	1.93	40.02	45.00	8.33	7.70	3.99	0.54	0.81
Des091	5.40	10.00	5.90	319.57	1.81	39.77	45.00	8.33	7.66	4.24	0.52	0.81
Des092	5.40	10.00	6.10	289.15	1.70	39.53	45.00	8.33	7.63	4.49	0.50	0.80
Des093	5.40	10.00	6.30	262.42	1.60	39.31	45.00	8.33	7.60	4.75	0.49	0.80
Des094	5.40	10.00	6.50	238.95	1.51	39.10	45.00	8.33	7.57	5.00	0.47	0.80
Des095	5.40	10.00	6.80	208.56	1.40	38.82	45.00	8.33	7.54	5.38	0.45	0.79
Des096	5.40	12.50	5.70	354.35	2.02	40.20	45.00	8.33	7.69	3.81	0.51	0.81
Des097	5.40	12.50	5.90	315.65	1.90	39.93	45.00	8.33	7.65	4.03	0.49	0.81
Des098	5.40	12.50	6.10	289.14	1.78	39.70	45.00	8.33	7.62	4.29	0.48	0.81
Des099	5.40	12.50	6.30	262.38	1.68	39.49	45.00	8.33	7.59	4.52	0.46	0.81

Çizelge B. 1 (devam)

Des No	Loa/B	β	$L/\nabla^{(1/3)}$	Δ (ton)	T (m)	Lwl (m)	Loa (m)	B (m)	Bwl (m)	Bwl/T	CB	CP
Des100	5.40	12.50	6.50	239.00	1.59	39.29	45.00	8.33	7.56	4.74	0.45	0.80
Des101	5.40	12.50	6.80	208.60	1.48	39.02	45.00	8.33	7.52	5.08	0.42	0.80
Des102	5.40	15.00	5.70	354.37	2.10	40.35	45.00	8.33	7.68	3.66	0.49	0.82
Des103	5.40	15.00	5.90	319.54	1.96	40.09	45.00	8.33	7.64	3.89	0.47	0.82
Des104	5.40	15.00	6.10	289.11	1.86	39.87	45.00	8.33	7.60	4.09	0.46	0.81
Des105	5.40	15.00	6.30	262.47	1.76	39.67	45.00	8.33	7.57	4.30	0.44	0.81
Des106	5.40	15.00	6.50	238.98	1.67	39.48	45.00	8.33	7.54	4.50	0.42	0.81
Des107	5.40	15.00	6.80	208.65	1.56	39.22	45.00	8.33	7.50	4.80	0.40	0.80
Des108	5.40	17.50	5.70	354.29	2.17	40.48	45.00	8.33	7.67	3.54	0.47	0.82
Des109	5.40	17.50	5.90	319.41	2.05	40.25	45.00	8.33	7.63	3.73	0.45	0.82
Des110	5.40	17.50	6.10	289.10	1.94	40.04	45.00	8.33	7.59	3.91	0.44	0.82
Des111	5.40	17.50	6.30	262.47	1.84	39.84	45.00	8.33	7.55	4.10	0.42	0.82
Des112	5.40	17.50	6.50	239.00	1.76	39.66	45.00	8.33	7.52	4.28	0.40	0.81
Des113	5.40	17.50	6.80	208.70	1.64	39.41	45.00	8.33	7.48	4.55	0.38	0.81
Des114	5.40	20.00	5.70	354.22	2.25	40.63	45.00	8.33	7.66	3.40	0.45	0.83
Des115	5.40	20.00	5.90	319.42	2.13	40.41	45.00	8.33	7.61	3.57	0.43	0.83
Des116	5.40	20.00	6.10	289.13	2.02	40.20	45.00	8.33	7.57	3.74	0.42	0.82
Des117	5.40	20.00	6.30	262.46	1.93	40.01	45.00	8.33	7.53	3.91	0.40	0.82
Des118	5.40	20.00	6.50	238.92	1.84	39.84	45.00	8.33	7.49	4.07	0.38	0.82
Des119	5.40	20.00	6.80	208.72	1.73	39.59	45.00	8.33	7.45	4.32	0.36	0.82

EK-C

SİSTEMATİK VARYASYON İLE OLUŞTURULAN FORMLARIN DİRENÇ ANALİZİ SONUÇLARI (Fn-0.95-0.75-0.5)

Çizelge C. 1 Varyantların direnç analizi sonuçları ve dinamik trim açıları

Des No	Loa/B	β	$L/\nabla^{(1/3)}$	Δ (ton)	Bwl/T	τ(deg)	Rt (N) Fn 0.95	Rt (N) Fn 0.75	Rt (N) Fn 0.50
Des000	4.80	10.00	5.70	354.37	4.71	2.31	157593.91	149961.43	107332.47
Des001	4.80	10.00	5.90	319.58	4.99	2.24	151118.57	143881.4	97297.634
Des002	4.80	10.00	6.10	289.01	5.28	2.17	142515.35	131054.68	88487.173
Des003	4.80	10.00	6.30	262.51	5.56	2.06	134089.29	120610.35	82055.415
Des004	4.80	10.00	6.50	238.94	5.84	2.05	124291.94	111266.59	76179.932
Des005	4.80	10.00	6.80	208.78	6.25	1.79	116102.78	98128.703	66544.22
Des006	4.80	12.50	5.70	354.34	4.49	2.34	161345.93	157771.59	106943.55
Des007	4.80	12.50	5.90	319.51	4.74	2.24	152435.31	142493.39	97294.78
Des008	4.80	12.50	6.10	289.16	4.99	2.09	143510.17	129944.36	89940.938
Des009	4.80	12.50	6.30	262.40	5.24	2.07	132753.91	119332.51	81898.65
Des010	4.80	12.50	6.50	238.99	5.48	1.90	125927.61	109097.22	74230.574
Des011	4.80	12.50	6.80	208.74	5.84	1.65	118521.09	96978.489	64223.703
Des012	4.80	15.00	5.70	354.25	4.28	2.32	163586.16	155815.5	106842.41
Des013	4.80	15.00	5.90	319.50	4.50	2.13	154548.17	141770.12	97177.551
Des014	4.80	15.00	6.10	289.11	4.73	2.10	142704.75	129619.45	87950.624
Des015	4.80	15.00	6.30	262.46	4.95	1.95	133457.00	117742.89	79780.742
Des016	4.80	15.00	6.50	238.97	5.16	1.74	128195.51	107871.26	72288.424
Des017	4.80	15.00	6.80	208.65	5.48	1.53	120170.32	97663.353	64160.955
Des018	4.80	17.50	5.70	354.38	4.08	2.24	166380.80	155130.63	105479.93
Des019	4.80	17.50	5.90	319.55	4.28	2.07	154707.83	141560.54	95997.52
Des020	4.80	17.50	6.10	289.11	4.48	2.04	142714.16	127720.3	86505.984
Des021	4.80	17.50	6.30	262.46	4.68	1.81	136019.38	116437.64	78301.769
Des022	4.80	17.50	6.50	238.97	4.87	1.64	129931.88	107816.46	71404.707
Des023	4.80	17.50	6.80	208.68	5.15	1.50	119806.27	101092.27	61530.944
Des024	4.80	20.00	5.70	354.37	3.90	2.13	167484.39	154967.24	104510.61

Çizelge C. 1 (devam)

Des No	Loa/B	β	$L/\nabla^{(1/3)}$	Δ (ton)	Bwl/T	τ(deg)	Rt (N) Fn 0.95	Rt (N) Fn 0.75	Rt (N) Fn 0.50
Des025	4.80	20.00	5.90	319.42	4.08	2.13	153625.70	139707.44	94472.965
Des026	4.80	20.00	6.10	289.11	4.26	1.89	144910.35	126321.22	84257.215
Des027	4.80	20.00	6.30	262.36	4.43	1.72	137447.87	116290.05	76594.394
Des028	4.80	20.00	6.50	238.91	4.60	1.51	132093.04	110561	70103.042
Des029	4.80	20.00	6.80	208.74	4.39	1.52	119862.55	97598.694	59409.543
Des030	5.00	10.00	5.70	354.39	4.44	2.42	159311.92	156702.91	104319.86
Des031	5.00	10.00	5.90	319.58	4.72	2.21	148153.42	142525.14	95418.865
Des032	5.00	10.00	6.10	289.08	5.00	2.16	139205.22	129481.6	86760.352
Des033	5.00	10.00	6.30	262.42	5.27	2.02	132885.87	118366.26	79794.639
Des034	5.00	10.00	6.50	239.01	5.54	2.12	121492.13	108963.84	74297.958
Des035	5.00	10.00	6.80	208.74	5.94	1.81	114902.39	97699.807	66374.586
Des036	5.00	12.50	5.70	354.29	4.24	2.24	157172.39	156771.34	104399.96
Des037	5.00	12.50	5.90	319.50	4.50	2.17	149867.79	140150.37	94878.289
Des038	5.00	12.50	6.10	289.05	4.74	2.10	140865.37	127883.37	87200.209
Des039	5.00	12.50	6.30	262.41	4.98	1.96	132999.91	117589.9	80968.691
Des040	5.00	12.50	6.50	238.91	5.22	1.93	123261.96	108636.54	74059.664
Des041	5.00	12.50	6.80	208.73	5.57	1.65	116414.06	95640.919	63555.325
Des042	5.00	15.00	5.70	354.28	4.07	2.26	160173.72	154864.58	104093.33
Des043	5.00	15.00	5.90	319.57	4.28	2.14	150916.44	139111.56	95370.767
Des044	5.00	15.00	6.10	289.14	4.50	1.98	142755.24	127242.15	87046.499
Des045	5.00	15.00	6.30	262.38	4.72	1.99	131545.71	117248.05	79616.302
Des046	5.00	15.00	6.50	238.85	4.93	1.80	124685.41	106400.93	71467.506
Des047	5.00	15.00	6.80	208.61	5.24	1.51	118585.29	95585.782	62760.731
Des048	5.00	17.50	5.70	354.31	3.89	2.23	162824.37	152527.52	103783.69
Des049	5.00	17.50	5.90	319.55	4.09	2.06	153033.50	138104.62	93988.292
Des050	5.00	17.50	6.10	289.04	4.28	1.99	141533.65	126618.95	86110.669
Des051	5.00	17.50	6.30	262.49	4.47	1.89	132477.22	115002.58	77144.067
Des052	5.00	17.50	6.50	238.90	4.66	1.68	126854.50	105586.14	69808.639
Des053	5.00	17.50	6.80	208.75	4.94	1.49	117720.56	96484.823	61874.311
Des054	5.00	20.00	5.70	354.18	3.72	2.16	164934.29	151514.89	101568.83
Des055	5.00	20.00	5.90	319.42	3.90	1.96	153601.32	138441.11	92822.868
Des056	5.00	20.00	6.10	289.15	4.08	1.97	141226.32	124918.15	83246.488
Des057	5.00	20.00	6.30	262.40	4.25	1.75	134527.66	114238.51	75528.045
Des058	5.00	20.00	6.50	238.99	4.42	1.60	127841.21	105934.98	68965.06
Des059	5.00	20.00	6.80	208.72	4.67	1.46	117924.80	98061.63	59406.772
Des060	5.20	10.00	5.70	354.28	4.18	2.54	154268.68	154613.66	101697.83
Des061	5.20	10.00	5.90	319.58	4.47	2.14	143738.41	140053.33	93383.935
Des062	5.20	10.00	6.10	289.13	4.74	2.13	137408.60	128221.11	85512.694
Des063	5.20	10.00	6.30	262.50	5.00	1.96	131274.02	116540.02	77875.95
Des064	5.20	10.00	6.50	238.91	5.26	1.87	124445.84	107667.75	71851.493

Çizelge C. 1 (devam)

Des No	Loa/B	β	$L/\nabla^{(1/3)}$	Δ (ton)	Bwl/T	τ(deg)	Rt (N) Fn 0.95	Rt (N) Fn 0.75	Rt (N) Fn 0.50
Des065	5.20	10.00	6.80	208.72	5.65	1.83	112374.67	96039.963	65323.061
Des066	5.20	12.50	5.70	352.32	4.02	2.42	159159.96	154245.01	101779.53
Des067	5.20	12.50	5.90	319.55	4.27	2.12	146969.92	139587.42	93221.667
Des068	5.20	12.50	6.10	289.06	4.51	2.02	138772.78	126070.29	85007.245
Des069	5.20	12.50	6.30	262.48	4.74	1.94	131047.65	115546.36	78476.385
Des070	5.20	12.50	6.50	238.88	4.97	1.86	122973.98	106279.68	72948.686
Des071	5.20	12.50	6.80	208.69	5.32	1.74	112932.48	95168.499	64055.324
Des072	5.20	15.00	5.70	354.37	3.87	2.20	155880.17	154037.86	101618.53
Des073	5.20	15.00	5.90	319.55	4.08	2.09	148391.63	137570.23	92792.31
Des074	5.20	15.00	6.10	289.07	4.29	1.98	140344.11	125150.8	85415.991
Des075	5.20	15.00	6.30	262.47	4.50	1.85	131674.25	114916.28	78131.728
Des076	5.20	15.00	6.50	238.93	4.71	1.87	121307.10	105879.63	71683.061
Des077	5.20	15.00	6.80	208.75	5.02	1.59	115153.03	93574.327	61769.559
Des078	5.20	17.50	5.70	354.33	3.71	2.20	158942.65	151841.04	100909.54
Des079	5.20	17.50	5.90	319.56	3.90	2.06	150288.27	136349.72	92366.746
Des080	5.20	17.50	6.10	289.15	4.09	1.89	140789.32	124722.03	84247.067
Des081	5.20	17.50	6.30	262.38	4.28	1.91	130019.10	114596.41	76466.655
Des082	5.20	17.50	6.50	238.96	4.47	1.73	123581.38	104608.02	69585.761
Des083	5.20	17.50	6.80	208.67	4.74	1.48	116151.18	93563.688	61263.139
Des084	5.20	20.00	5.70	354.29	3.56	2.15	161511.98	149759.67	99639.191
Des085	5.20	20.00	5.90	319.43	3.73	1.97	151325.37	135851.23	90482.559
Des086	5.20	20.00	6.10	289.10	3.90	1.89	140469.38	124633.63	83165.034
Des087	5.20	20.00	6.30	262.46	4.07	1.80	131257.17	113035.84	74849.094
Des088	5.20	20.00	6.50	238.95	4.24	1.62	125554.15	103888.61	68034.911
Des089	5.20	20.00	6.80	208.75	4.49	1.45	115816.28	95127.465	59601.824
Des090	5.40	10.00	5.70	354.34	3.99	2.45	152069.25	152732.59	98446.111
Des091	5.40	10.00	5.90	319.57	4.24	2.26	150068.54	137352.98	90559.817
Des092	5.40	10.00	6.10	289.15	4.49	2.11	134728.34	126155.07	83581.133
Des093	5.40	10.00	6.30	262.42	4.75	1.91	128743.32	115292.87	76705.662
Des094	5.40	10.00	6.50	238.95	5.00	1.87	122057.34	105989.69	70233.323
Des095	5.40	10.00	6.80	208.56	5.38	1.73	112392.44	94684.356	63317.675
Des096	5.40	12.50	5.70	354.35	3.81	2.40	153418.94	151763.5	98389.689
Des097	5.40	12.50	5.90	315.65	4.03	2.07	142960.71	137311.6	90723.006
Des098	5.40	12.50	6.10	289.14	4.29	1.98	136756.91	125455.01	83345.59
Des099	5.40	12.50	6.30	262.38	4.52	2.02	127029.94	113910.09	76122.784

Çizelge C. 1 (devam)

Des No	Loa/B	β	$L/\nabla^{(1/3)}$	Δ (ton)	Bwl/T	τ(deg)	Rt (N) Fn 0.95	Rt (N) Fn 0.75	Rt (N) Fn 0.50
Des100	5.40	12.50	6.50	239.00	4.74	1.81	122398.38	105066.79	70903.368
Des101	5.40	12.50	6.80	208.60	5.08	1.75	110767.83	93851.376	63727.533
Des102	5.40	15.00	5.70	354.37	3.66	1.95	152160.81	151604.72	98419.466
Des103	5.40	15.00	5.90	319.54	3.89	2.06	145299.87	136787.63	90498.62
Des104	5.40	15.00	6.10	289.11	4.09	1.96	137843.19	123523.27	82781.238
Des105	5.40	15.00	6.30	262.47	4.30	1.85	130496.61	112980.81	76963.005
Des106	5.40	15.00	6.50	238.98	4.50	1.78	121910.92	104620.38	70788.194
Des107	5.40	15.00	6.80	208.65	4.80	1.64	111876.51	92874.299	61422.792
Des108	5.40	17.50	5.70	354.29	3.54	2.12	155490.39	151238.37	98081.062
Des109	5.40	17.50	5.90	319.41	3.73	2.03	147042.70	135054.96	90026.523
Des110	5.40	17.50	6.10	289.10	3.91	1.92	139241.98	122667.17	82565.249
Des111	5.40	17.50	6.30	262.47	4.10	1.78	130427.01	112658.91	75301.521
Des112	5.40	17.50	6.50	239.00	4.28	1.79	121053.34	103773.61	69128.926
Des113	5.40	17.50	6.80	208.70	4.55	1.53	113484.51	91688.757	60212.176
Des114	5.40	20.00	5.70	354.22	3.40	2.12	157704.74	149220.15	97937.554
Des115	5.40	20.00	5.90	319.42	3.57	1.98	149238.68	133993	88716.245
Des116	5.40	20.00	6.10	289.13	3.74	1.83	139531.66	122648.45	81294.023
Des117	5.40	20.00	6.30	262.46	3.91	1.84	129097.36	112151.11	74231.48
Des118	5.40	20.00	6.50	238.92	4.07	1.66	122441.52	102585.04	67412.766
Des119	5.40	20.00	6.80	208.72	4.32	1.44	114515.16	92293.637	58073.565

EK-D

SİSTEMATİK VARYASYON İLE OLUŞTURULAN FORMLARIN DİRENÇ VE DENİZCİLİK ANALİZİ SONUÇLARI (Fn-1.50)

Çizelge D. 1 Varyantların direnç ve denizcilik analizi sonuçları

Des No	Loa/B	β	$L/\nabla^{(1/3)}$	Δ (ton)	Bwl/T	τ (deg)	δCGz(m)	Rt (N) Fn 1.50	$RAO_{[aZ]}$
Des000	4.80	10.00	5.70	354.37	4.71	2.31	1.000	445000.00	62.880
Des001	4.80	10.00	5.90	319.58	4.99	2.24	1.000	385000.00	68.780
Des002	4.80	10.00	6.10	289.01	5.28	2.17	1.000	360000.00	64.156
Des003	4.80	10.00	6.30	262.51	5.56	2.06	0.950	355000.00	66.980
Des004	4.80	10.00	6.50	238.94	5.84	2.05	0.850	335000.00	65.650
Des005	4.80	10.00	6.80	208.78	6.25	1.79	0.740	315000.00	69.270
Des006	4.80	12.50	5.70	354.34	4.49	2.34	0.980	475000.00	62.600
Des007	4.80	12.50	5.90	319.51	4.74	2.24	0.970	425000.00	60.350
Des008	4.80	12.50	6.10	289.16	4.99	2.09	0.915	385000.00	60.290
Des009	4.80	12.50	6.30	262.40	5.24	2.07	0.910	360000.00	55.129
Des010	4.80	12.50	6.50	238.99	5.48	1.90	0.800	350000.00	58.527
Des011	4.80	12.50	6.80	208.74	5.84	1.65	0.740	310000.00	55.870
Des012	4.80	15.00	5.70	354.25	4.28	2.32	0.950	487000.00	66.290
Des013	4.80	15.00	5.90	319.50	4.50	2.13	0.915	447500.00	66.420
Des014	4.80	15.00	6.10	289.11	4.73	2.10	0.950	415000.00	64.420
Des015	4.80	15.00	6.30	262.46	4.95	1.95	0.890	370000.00	84.870
Des016	4.80	15.00	6.50	238.97	5.16	1.74	0.850	345000.00	62.817
Des017	4.80	15.00	6.80	208.65	5.48	1.53	0.800	330000.00	59.690
Des018	4.80	17.50	5.70	354.38	4.08	2.24	0.850	485000.00	65.538
Des019	4.80	17.50	5.90	319.55	4.28	2.07	0.860	440000.00	62.910
Des020	4.80	17.50	6.10	289.11	4.48	2.04	0.830	400000.00	60.690
Des021	4.80	17.50	6.30	262.46	4.68	1.81	0.815	370000.00	58.366
Des022	4.80	17.50	6.50	238.97	4.87	1.64	0.810	330000.00	57.750
Des023	4.80	17.50	6.80	208.68	5.15	1.50	0.770	305000.00	55.630
Des024	4.80	20.00	5.70	354.37	3.90	2.13	0.850	500000.00	67.624

Çizelge D. 1 (devam)

Des No	Loa/B	β	$L/\nabla^{(1/3)}$	Δ (ton)	Bwl/T	τ (deg)	ΔCGz(m)	Rt (N) Fn 1.50	$RAO_{[az]}$
Des025	4.80	20.00	5.90	319.42	4.08	2.13	0.835	462000.00	67.924
Des026	4.80	20.00	6.10	289.11	4.26	1.89	0.830	430000.00	65.980
Des027	4.80	20.00	6.30	262.36	4.43	1.72	0.815	385000.00	65.315
Des028	4.80	20.00	6.50	238.91	4.60	1.51	0.790	362500.00	64.420
Des029	4.80	20.00	6.80	208.74	4.39	1.52	0.775	305000.00	63.450
Des030	5.00	10.00	5.70	354.39	4.44	2.42	1.000	415000.00	62.290
Des031	5.00	10.00	5.90	319.58	4.72	2.21	0.99	364000.00	67.520
Des032	5.00	10.00	6.10	289.08	5.00	2.16	0.950	340000.00	62.103
Des033	5.00	10.00	6.30	262.42	5.27	2.02	0.900	300000.00	60.654
Des034	5.00	10.00	6.50	239.01	5.54	2.12	0.780	310000.00	61.247
Des035	5.00	10.00	6.80	208.74	5.94	1.81	0.674	305000.00	69.598
Des036	5.00	12.50	5.70	354.29	4.24	2.24	0.900	460000.00	63.221
Des037	5.00	12.50	5.90	319.50	4.50	2.17	0.865	420000.00	64.275
Des038	5.00	12.50	6.10	289.05	4.74	2.10	0.815	367000.00	59.745
Des039	5.00	12.50	6.30	262.41	4.98	1.96	0.780	347000.00	59.923
Des040	5.00	12.50	6.50	238.91	5.22	1.93	0.755	323000.00	56.458
Des041	5.00	12.50	6.80	208.73	5.57	1.65	0.700	310000.00	59.407
Des042	5.00	15.00	5.70	354.28	4.07	2.26	0.890	497000.00	61.937
Des043	5.00	15.00	5.90	319.57	4.28	2.14	0.880	450000.00	67.070
Des044	5.00	15.00	6.10	289.14	4.50	1.98	0.870	407500.00	65.031
Des045	5.00	15.00	6.30	262.38	4.72	1.99	0.865	362000.00	61.547
Des046	5.00	15.00	6.50	238.85	4.93	1.80	0.800	346000.00	58.835
Des047	5.00	15.00	6.80	208.61	5.24	1.51	0.760	315000.00	56.154
Des048	5.00	17.50	5.70	354.31	3.89	2.23	0.819	504000.00	66.755
Des049	5.00	17.50	5.90	319.55	4.09	2.06	0.810	453000.00	60.188
Des050	5.00	17.50	6.10	289.04	4.28	1.99	0.795	410000.00	62.565
Des051	5.00	17.50	6.30	262.49	4.47	1.89	0.770	387000.00	59.400
Des052	5.00	17.50	6.50	238.90	4.66	1.68	0.730	355000.00	59.990
Des053	5.00	17.50	6.80	208.75	4.94	1.49	0.740	305000.00	56.256
Des054	5.00	20.00	5.70	354.18	3.72	2.16	0.850	513000.00	68.877
Des055	5.00	20.00	5.90	319.42	3.90	1.96	0.830	446300.00	70.819
Des056	5.00	20.00	6.10	289.15	4.08	1.97	0.845	421000.00	64.049
Des057	5.00	20.00	6.30	262.40	4.25	1.75	0.795	400000.00	69.029
Des058	5.00	20.00	6.50	238.99	4.42	1.60	0.700	385000.00	65.659
Des059	5.00	20.00	6.80	208.72	4.67	1.46	0.800	323000.00	62.295
Des060	5.20	10.00	5.70	354.28	4.18	2.54	0.970	450000.00	64.853
Des061	5.20	10.00	5.90	319.58	4.47	2.14	0.965	392000.00	64.404
Des062	5.20	10.00	6.10	289.13	4.74	2.13	0.917	355000.00	57.462
Des063	5.20	10.00	6.30	262.50	5.00	1.96	0.858	337000.00	58.179
Des064	5.20	10.00	6.50	238.91	5.26	1.87	0.805	320000.00	57.531

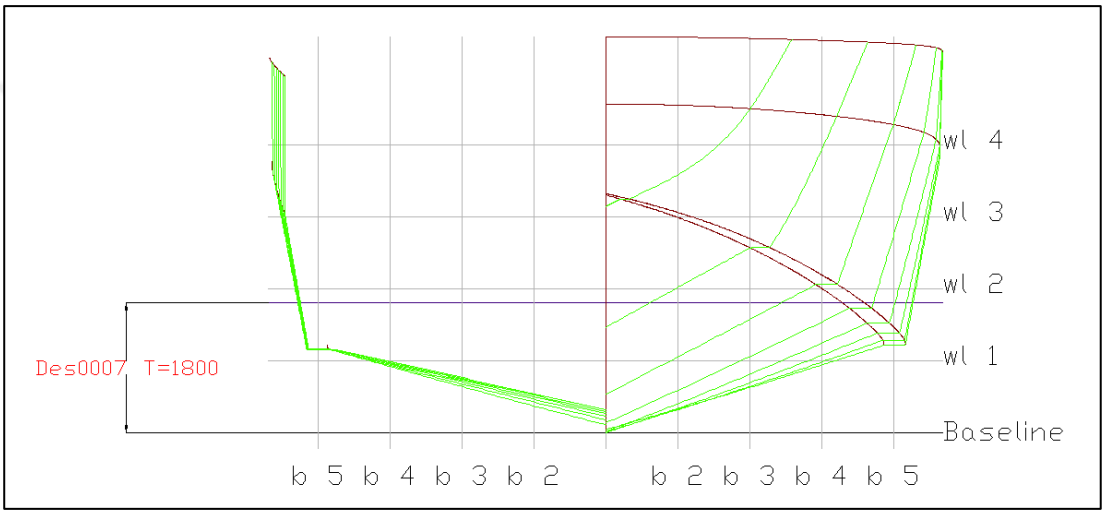
Çizelge D. 1 (devam)

Des No	Loa/B	β	$L/\nabla^{(1/3)}$	Δ (ton)	Bwl/T	τ (deg)	ΔCGz(m)	Rt (N) Fn 1.50	$RAO_{[az]}$
Des065	5.20	10.00	6.80	208.72	5.65	1.83	0.650	310000.00	65.251
Des066	5.20	12.50	5.70	352.32	4.02	2.42	0.870	510000.00	56.010
Des067	5.20	12.50	5.90	319.55	4.27	2.12	0.853	465000.00	55.803
Des068	5.20	12.50	6.10	289.06	4.51	2.02	0.826	393000.00	54.801
Des069	5.20	12.50	6.30	262.48	4.74	1.94	0.835	350000.00	52.481
Des070	5.20	12.50	6.50	238.88	4.97	1.86	0.755	340000.00	49.901
Des071	5.20	12.50	6.80	208.69	5.32	1.74	0.685	300000.00	55.142
Des072	5.20	15.00	5.70	354.37	3.87	2.20	0.865	506000.00	62.606
Des073	5.20	15.00	5.90	319.55	4.08	2.09	0.860	455000.00	69.569
Des074	5.20	15.00	6.10	289.07	4.29	1.98	0.853	430000.00	65.631
Des075	5.20	15.00	6.30	262.47	4.50	1.85	0.840	400000.00	63.051
Des076	5.20	15.00	6.50	238.93	4.71	1.87	0.830	346000.00	57.786
Des077	5.20	15.00	6.80	208.75	5.02	1.59	0.805	300000.00	57.066
Des078	5.20	17.50	5.70	354.33	3.71	2.20	0.760	580000.00	63.031
Des079	5.20	17.50	5.90	319.56	3.90	2.06	0.750	507000.00	61.545
Des080	5.20	17.50	6.10	289.15	4.09	1.89	0.770	455000.00	62.667
Des081	5.20	17.50	6.30	262.38	4.28	1.91	0.780	410000.00	61.427
Des082	5.20	17.50	6.50	238.96	4.47	1.73	0.774	374000.00	57.839
Des083	5.20	17.50	6.80	208.67	4.74	1.48	0.730	334000.00	60.068
Des084	5.20	20.00	5.70	354.29	3.56	2.15	0.820	550000.00	67.662
Des085	5.20	20.00	5.90	319.43	3.73	1.97	0.768	487000.00	68.382
Des086	5.20	20.00	6.10	289.10	3.90	1.89	0.767	440000.00	64.343
Des087	5.20	20.00	6.30	262.46	4.07	1.80	0.750	385000.00	68.243
Des088	5.20	20.00	6.50	238.95	4.24	1.62	0.790	380000.00	67.484
Des089	5.20	20.00	6.80	208.75	4.49	1.45	0.810	330000.00	59.305
Des090	5.40	10.00	5.70	354.34	3.99	2.45	0.900	500000.00	59.306
Des091	5.40	10.00	5.90	319.57	4.24	2.26	0.930	415000.00	64.115
Des092	5.40	10.00	6.10	289.15	4.49	2.11	0.900	366000.00	61.036
Des093	5.40	10.00	6.30	262.42	4.75	1.91	0.890	347000.00	56.177
Des094	5.40	10.00	6.50	238.95	5.00	1.87	0.800	324000.00	50.451
Des095	5.40	10.00	6.80	208.56	5.38	1.73	0.675	305000.00	57.763
Des096	5.40	12.50	5.70	354.35	3.81	2.40	0.890	536000.00	58.102
Des097	5.40	12.50	5.90	315.65	4.03	2.07	0.818	453000.00	57.666
Des098	5.40	12.50	6.10	289.14	4.29	1.98	0.800	400000.00	56.856
Des099	5.40	12.50	6.30	262.38	4.52	2.02	1.000	385000.00	54.490

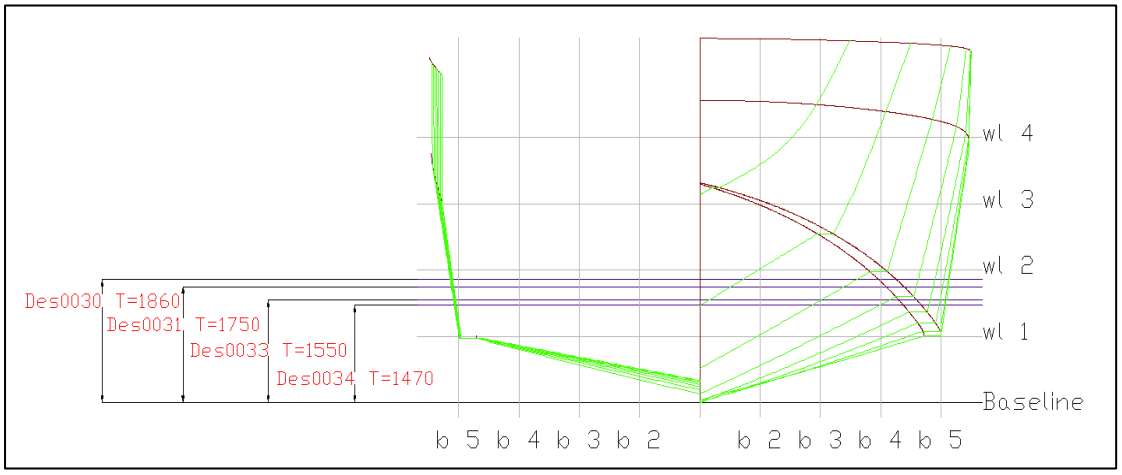
Çizelge D. 1 (devam)

Des No	Loa/B	β	$L/\nabla^{(1/3)}$	Δ (ton)	Bwl/T	τ (deg)	ΔCGz(m)	Rt (N) Fn 1.50	$RAO_{[az]}$
Des100	5.40	12.50	6.50	239.00	4.74	1.81	0.730	365000.00	53.398
Des101	5.40	12.50	6.80	208.60	5.08	1.75	0.675	340000.00	54.794
Des102	5.40	15.00	5.70	354.37	3.66	1.95	0.830	585000.00	61.190
Des103	5.40	15.00	5.90	319.54	3.89	2.06	0.810	520000.00	64.752
Des104	5.40	15.00	6.10	289.11	4.09	1.96	0.783	476000.00	62.967
Des105	5.40	15.00	6.30	262.47	4.30	1.85	0.786	427000.00	59.200
Des106	5.40	15.00	6.50	238.98	4.50	1.78	0.790	380000.00	56.214
Des107	5.40	15.00	6.80	208.65	4.80	1.64	0.840	300000.00	57.240
Des108	5.40	17.50	5.70	354.29	3.54	2.12	0.790	587000.00	62.330
Des109	5.40	17.50	5.90	319.41	3.73	2.03	0.750	515000.00	60.900
Des110	5.40	17.50	6.10	289.10	3.91	1.92	0.760	470000.00	61.185
Des111	5.40	17.50	6.30	262.47	4.10	1.78	0.780	420000.00	60.976
Des112	5.40	17.50	6.50	239.00	4.28	1.79	0.780	370000.00	58.655
Des113	5.40	17.50	6.80	208.70	4.55	1.53	0.785	335000.00	56.997
Des114	5.40	20.00	5.70	354.22	3.40	2.12	0.800	577000.00	61.349
Des115	5.40	20.00	5.90	319.42	3.57	1.98	0.743	520000.00	63.326
Des116	5.40	20.00	6.10	289.13	3.74	1.83	0.750	467000.00	60.867
Des117	5.40	20.00	6.30	262.46	3.91	1.84	0.760	410000.00	60.065
Des118	5.40	20.00	6.50	238.92	4.07	1.66	0.750	387000.00	58.511
Des119	5.40	20.00	6.80	208.72	4.32	1.44	0.740	340000.00	57.153

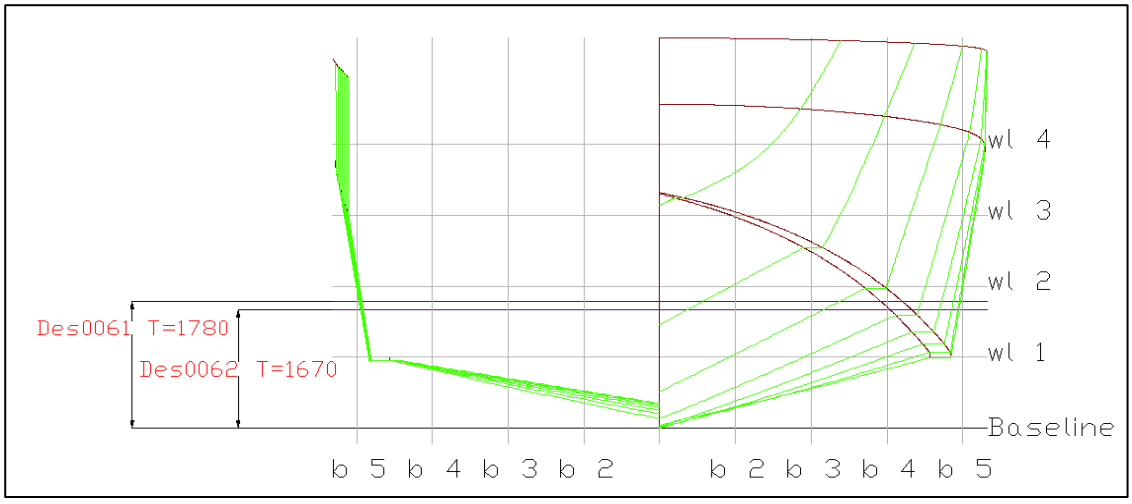
ÇOK RİTERLİ OPTİMİZASYON SONUCU OLUŞAN SU ALTI GEOMETRİLERİ



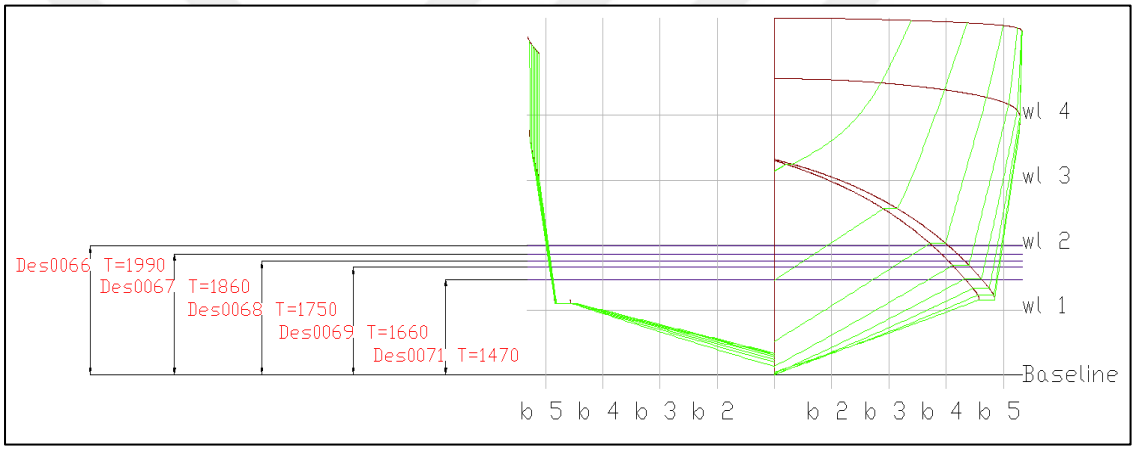
Şekil E. 1 Des0007 Su altı geometrisi



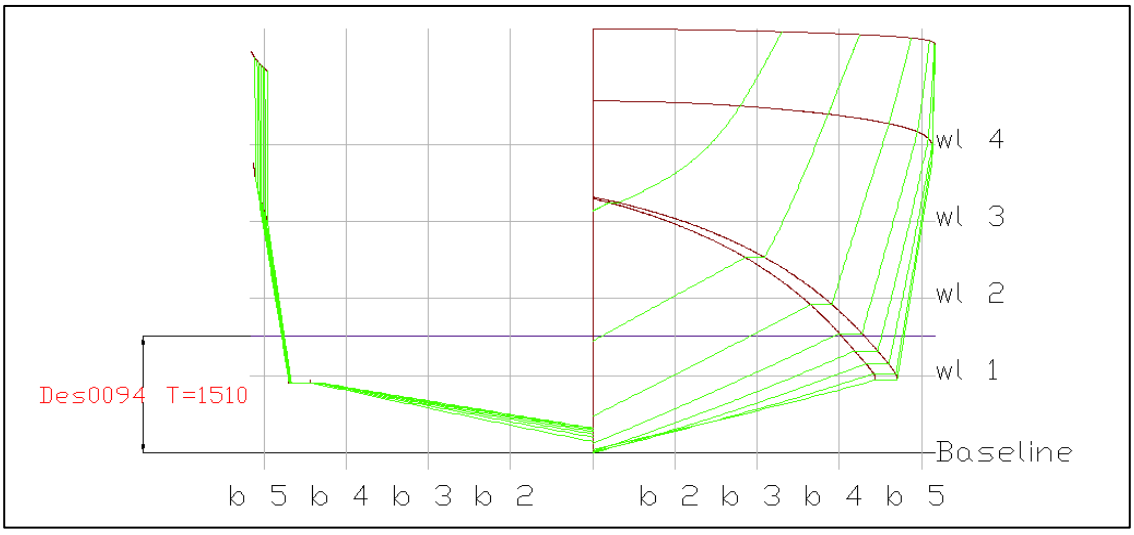
Şekil E. 2 Des0030-0031-0033-0034 Su altı geometrileri



Şekil E. 3 Des0061-0062 Su altı geometrileri



Şekil E. 4 Des0066-0067-0068-0069-0071 Su altı geometrileri



Şekil E. 5 Des0094 Su altı geometrisi

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Sadık ÖZÜM

Doğum Tarihi ve Yeri : 20-07-1983, Aydın

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : sadikozum@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Y. Lisans	Gemi İnş. ve Gemi Mak.	YTÜ	2009
Lisans	Gemi İnş. ve Gemi Mak.	YTÜ	2007
Lise	Fen-Matematik	Karşıyaka Gazi Lisesi	2001

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2007-2007	Çizgi Dizayn	Dizayn Mühendisi
2007-2010	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2010-2017	Ark Yat	Dizayn Müdürü
2017-	Artı Mühendislik	Ar-ge Mühendislik

YAYINLARI

Makale

1. Özüm, S., Şener, B. ve Yılmaz, H., (2011). “A Parametric Study On Seakeeping Assessment Of Fast Ships In Conceptual Design Stage“, Ocean Engineering, 38:1439-1447

Bildiri

1. Özüm, S., Şener, B. ve Yılmaz, H., (2016). “Fully Parametric Hull Form Modelling For Further Systematic Investigations”, The Second Global Conference on Innovation in Marine Technology and the Future of Maritime Transportation, Bodrum

2. Ünlügençoğlu, K., Özüm, S. ve Göksoy, H., (2010). “Quality Management In The Shipbuilding Sector”, Tehnonav, Romanya

3. Özüm, S., Şener, B. ve Ünlügençoğlu, K., (2010). “Resistance Prediction Of A High Speed Craft By Using Cfd”, Tehnonav, Romanya

4. . Özüm, S., Şener, B. ve Yılmaz, H., (2008). “Mevcut Bir Teknenin Stabilite Problemlerinin Analizi Ve Uygun Çözüm Yöntemlerinin Belirlenmesi”, Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojisi Teknik Kongresi, İstanbul

5. Bayer, N., Özüm, S. ve Yılmaz, H., (2008).“ Analysis Of Accidents In Istanbul Strait“, IMLA, İzmir