

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PARAŞÜT DESTEKLİ GEMİ SEVK
SİSTEMLERİNİN GEMİLERİN SEVK
VERİMLİLİĞİNE KATKISININ ANALİZİ

Burak GÖKSU

Haziran, 2022
İZMİR

**PARAŞÜT DESTEKLİ GEMİ SEVK
SİSTEMLERİNİN GEMİLERİN SEVK
VERİMLİLİĞİNE KATKISININ ANALİZİ**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

**Gemi Makinaları İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı, Deniz Ulaştırma
Sistemleri Mühendisliği Programı**

Burak GÖKSU

Haziran, 2022

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

BURAK GÖKSU, tarafından **DR. ÖĞRETİM ÜYESİ KADİR EMRAH ERGİNER** yönetiminde hazırlanan “**PARAŞÜT DESTEKLİ GEMİ SEVK SİSTEMLERİNİN GEMİLERİN SEVK VERİMLİLİĞİNE KATKISININ ANALİZİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Dr. Öğretim Üyesi K. Emrah ERGİNER

Yönetici

.....
Prof. Dr. K. Turgut GÜRSEL

Tez İzleme Komitesi Üyesi

.....
Dr. Öğretim Üyesi Mustafa NURAN

Tez İzleme Komitesi Üyesi

.....
Prof. Dr. Ali Can TAKİNACI

Jüri Üyesi

.....
Doç. Dr. Hakan DEMİREL

Jüri Üyesi

.....
Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Üzerinde yıllar boyunca emek ve özveri harcadığım doktora tezimi tamamlamış olmanın gurur ve heyecanını yaşamaktayım. Öncelikle, çalışma konumun seçiminde beni sınırlandırmayıp aynı zamanda da desteklerini esirgemeyen tez danışmanın Dr. Öğretim Üyesi Kadir Emrah ERGİNER'e ve tez izleme komitemde görev alarak çalışmanın kapsam ve içeriğini belirlemede görüş ve önerilerini sunan Prof. Dr. Kadri Turgut GÜRSEL ve Dr. Öğretim Üyesi Mustafa NURAN'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tezin araştırma konusu kapsamında bilgi ve tecrübelerini samimi duygularla aktaran Tufan AVŞAR'a ve Nailcan KARA'ya teşekkürü borç bilirim.

Son olarak, bugünlere gelmemde çok büyük emek ve fedakârlık gösteren aileme ve her zaman yanımda olduğunu belirten sevgili eşime şükranlarımı sunarım.

Burak GÖKSU

PARAŞÜT DESTEKLİ GEMİ SEVK SİSTEMLERİNİN GEMİLERİN SEVK VERİMLİLİĞİNE KATKISININ ANALİZİ

ÖZ

Dünya ticaretinin büyüyen dünya nüfus ile birlikte artması sonucunda, ticari ürünlerin göreceli olarak daha az maliyetle taşınmasına imkân sağlayan deniz taşımacılığının kapasitesinde artış yaşanmaktadır. Mevcut kapasitenin yetersiz kalmaya başlamasıyla da, deniz taşımacılığında kullanılan gemilerin boyut ve sayılarında artış meydana gelmektedir. Birbirini tetikleyen bu büyüme sürecinde, gemilerden kaynaklı sera gazı ve partikül madde salımında da artış görülmektedir. Uluslararası Denizcilik Örgütü’nün edindiği amaç; emniyet, güvenlik ve çevre koruma politikalarıyla insana, mala ve çevreye gelebilecek zararı en aza indirgeyebilmek ve hatta günümüzde gemilerin verimliliğinin arttırılmasını sağlamaktır. Bu bağlamda düzenlenen ve yürürlüğe koyulan kurallar çerçevesinde alınan önlemlerden biri de; gemilerin karbon içerikli yakıt tüketimine kısıtlamalar getirerek, gemilerden kaynaklanan sera gazı salımını kısıtlayan yakıt türleri ve yenilikçi makine sistemlerinin kullanımı teşvik etmektir.

Bu çalışma kapsamında, alternatif enerji kaynaklarından biri olan rüzgâr enerjisinin, gemi sevk sistemine yardımcı bir sistem tarafından ek çekme kuvveti olarak aktarılması incelenmektedir. Bu enerji dönüşümünü gerçekleştiren sistemler incelendiğinde; “Paraşüt Destekli Gemi Sevk Sistemlerinin” gerek hafif yapıda olmaları ve güverte üzerinde yer işgal etmemeleri, gerekse de günümüz teknolojik altyapısı sayesinde otomatik kontrol mekanizmalarına sahip olmaları sebebiyle, yenilikçi yapısı sayesinde gelecekte yoğun bir şekilde kullanım potansiyeline sahip olacağı düşünülmekte ve gemi enerji verimliliğine katkısı farklı çevre koşulları da göz önünde bulundurularak analiz edilmektedir.

Anahtar kelimeler: Enerji verimliliği, Gemi direnci ve sevki, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Paraşüt sistemler, Rüzgâr enerjisi

ANALYSIS OF THE CONTRIBUTION OF THE KITE ASSISTED SHIP PROPULSION SYSTEMS TO SHIPS' PROPULSION EFFICIENCY

ABSTRACT

As a result of the increase in world trade with the growing world population, there is an increase in the capacity of maritime transport, which allows the transportation of commercial products at a relatively lower cost. As the current capacity starts to become insufficient, there is an increase in the size and number of ships used in maritime transport. In this growth process that triggers each other, there is an increase in greenhouse gas and particulate matter emissions from ships. The purpose of the International Maritime Organization; is to minimize the damage to people, property, and the environment with safety, security, and environmental protection policies, and even to increase the efficiency of ships today. One of the measures taken within the framework of the rules regulated and put into effect in this context; is to encourage the use of fuel types and innovative machinery systems that limit greenhouse gas emissions from ships by imposing restrictions on the carbon-containing fuel consumption of ships.

In this study, the transfer of wind energy, which is one of the alternative energy sources, to the ship propulsion system by an auxiliary system as an additional towing force is examined. When the systems that perform this energy conversion are examined; It is thought that the “Kite Assisted Ship Propulsion Systems” will have the potential to be used intensively in the future, thanks to their innovative structure, both because they are light in structure and do not occupy space on the deck, and because they have automatic control mechanisms thanks to today's technology infrastructure and its contribution to shipping energy efficiency is analyzed by considering different environmental conditions.

Keywords: Energy efficiency, Ship resistance and propulsion, Computational fluid dynamics, Kite systems, Wind energy

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xiii
KISALTMALAR	xv
SEMBOLLER LİSTESİ	xvii

BÖLÜM BİR - GİRİŞ..... 1

1.1	Problemin Tanımı.....	3
1.2	Literatür Taraması	8
1.3	Amaç ve Hedefler.....	15
1.4	Araştırmanın Önemi	16
1.5	Kısıtlar ve Araştırma Modeli.....	17

BÖLÜM İKİ - GEMİLERDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ UYGULAMALARI... 20

2.1	Tasarım Uygulamaları	21
2.1.1	Gövde Tasarımı.....	22
2.1.2	Sevk Sistemi Tasarımı	24
2.1.3	Enerji Tasarruflu Donanım Seçimi	28
2.2	Operasyonel Uygulamalar	29
2.2.1	Yakıt Türü Seçimi	29
2.2.2	Servis Hızı Optimizasyonu	30
2.2.3	Trim ve Su Çekimi Optimizasyonu.....	31
2.2.4	Rota Yönetimi	32
2.2.5	Liman Operasyonları.....	33

BÖLÜM ÜÇ - GEMİ DİRENCİ VE SEVKİ 35

3.1	Gemilerde Direnç Bileşenleri	36
3.2	Direnç Tahmin Yöntemleri.....	39
3.2.1	Geometrik Benzer Gemilerden Yararlanılarak Direnç Tahmini	40
3.2.2	Deneyisel Formüller ile Direnç Tahmini	40
3.2.3	Model Deneyi ile Direnç Tahmini	41
3.2.4	Model Deneylerinden Elde Edilen Sistematik Seriler	42
3.2.5	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi ile Direnç Tahmini.....	43
3.3	Gemi Sevki	44

BÖLÜM DÖRT - RÜZGÂR ENERJİSİ SİSTEMLERİ 47

4.1	Yelkenler	47
4.2	Rüzgâr Türbinleri	48
4.3	Flettner Rotorlar	50
4.4	Paraşüt Sistemler	51
4.4.1	Paraşüt Türleri.....	58
4.4.2	Koordinat Sistemleri	59
4.4.3	Paraşüte Etkiyen Kuvvetler.....	63
4.4.4	Sistem Parametrelerinin Belirlenme Esasları ve Kabuller	70
4.4.4.1	Kontrol Modelleri	70
4.4.4.2	Paraşüt Geometrisi	71
4.4.4.3	Kontrol Açıları	72
4.4.4.4	Çevre Koşulları	73
4.4.4.5	Rüzgâr Hızı Dağılımı	73

BÖLÜM BEŞ - HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YÖNTEMİ 77

5.1	Temel Sayısal Denklemler	78
5.1.1	Kütlenin Korunumu	78

5.1.2	Lineer Momentumun Korunumu	79
5.1.3	Açısal Momentumun Korunumu.....	79
5.1.4	Enerjinin Korunumu.....	79
5.1.5	Akışkan Akışı Denklemleri.....	79
5.2	Sayısal Ayırıklaştırma Yöntemleri	80
5.3	Sayısal Yöntemler	81
5.4	Sınır ve Başlangıç Koşulları.....	82
5.5	Ağ Yapıları	82
5.6	Türbülans Modelleri	83
5.7	HAD Simülasyonları	84
BÖLÜM ALTI - YAPAY SİNİR AĞLARI YÖNTEMİ.....		86
6.1	YSA Yapısı.....	87
6.2	YSA Türleri	89
6.3	Öğrenme Yöntemleri	91
6.3.1	Öğretmenli Öğrenme.....	91
6.3.2	Öğretmensiz Öğrenme	92
6.3.3	Takviyeli Öğrenme.....	92
6.3.4	Karma Öğrenme	92
6.4	Aktivasyon ve Toplama Fonksiyonları	92
6.5	Performans Kriterleri.....	93
6.6	YSA Tasarımı.....	94
BÖLÜM YEDİ - UYGULAMA		96
7.1	Araştırma Gemisinin Özellikleri	97
7.2	Rotanın Belirlenmesi	99
7.2.1	Pasifik Okyanusu'nda Ticaret	105
7.2.2	Çevresel Faktörlerin Deniz Ortamına Etkileri	106
7.2.3	Seçilen Çalışma Bölgesine Ait Çevre Koşulları	115
7.3	Direnç ve Güç Hesabı.....	121

7.3.1	Gemi Direnci Doğrulama Çalışmaları	123
7.3.2	HAD Yöntemine Ait Parametrelerin Belirlenmesi	124
7.3.3	Dalga ve Rüzgâr Kaynaklı Ek Direncin Hesaplanması	128
7.3.4	Gerekli Sevk Gücünün Hesaplanması.....	131
7.4	Paraşüt Sistemi Tasarımı	132
7.4.1	Tasarlanan Paraşüt Modelleri.....	132
7.4.2	Sayısal Doğrulama Çalışmaları.....	133
7.4.3	Paraşüt Modelleri ve Yörünge Geometrilerinin Karşılaştırılması	137
7.4.4	Sisteme Ait Parametrelerin Belirlenmesi	141
7.5	Uygulama: Kuzey Pasifik Okyanusu'nda Seyir Yapan Bir Konteyner Gemisinde Paraşüt Yardımlı Sevk Sisteminin Kullanımı	148
7.5.1	Sakin Suda Paraşüt Kullanımı.....	149
7.5.2	Çevre Koşullarının Sistem Verimliliğine Etkisi	151
7.6	Bulgular	153
BÖLÜM SEKİZ - SONUÇ ve ÖNERİLER.....		162
8.1	Sonuçlar.....	164
8.2	Öneriler.....	166
KAYNAKLAR		173
EKLER.....		202
EK 1: Yörünge 1, 2 ve 3 için hesap adımı açısal konum değerleri.....		202
EK 2: Yörünge 4, 5 ve 6 için hesap adımı açısal konum değerleri.....		203
EK 3: Yörünge 7, 8 ve 9 için hesap adımı açısal konum değerleri.....		204
EK 4: Paraşütün Yörünge-2 üzerinde tam bir turu için örnek hesaplama-1		205
EK 5: Paraşütün Yörünge-2 üzerinde tam bir turu için örnek hesaplama-2		206
EK 6: Paraşütün Yörünge-2 üzerinde tam bir turu için örnek hesaplama-3		207
EK 7: Paraşütün Yörünge-2 üzerinde tam bir turu için örnek hesaplama-4		208

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 EEDI fazları ve gemi alt limitleri	6
Şekil 1.2 Araştırma modeli şablonu	18
Şekil 2.1 Büyük daire seyrinin geometrik görünümü	33
Şekil 3.1 Toplam direnç bileşenleri	37
Şekil 3.2 Bir gemi modeline ait direnç deneyi	41
Şekil 3.3 Geleneksel gemi sevk sistemi genel görünümü	45
Şekil 4.1 UT Wind Challenger gemisi	48
Şekil 4.2 Yatay eksenli rüzgâr türbini (sol) ve dikey eksenli rüzgâr türbini (sağ)	49
Şekil 4.3 Enercon şirketine ait E-Ship 1 adlı gemi	50
Şekil 4.4 Paraşütten elektrik enerjisi üretimi	52
Şekil 4.5 Beyond the Sea firmasına ait “LibertyKite:40 m ² ” paraşüt modeli	55
Şekil 4.6 SkyTug firmasına ait paraşüt sevk sistemine sahip römorkör tasarımı	56
Şekil 4.7 Seawing paraşüt sistemi ile donatılmış bir kuru yük gemisi tasarımı	56
Şekil 4.8 Skysails paraşüt sistemi ile donatılmış Bbc Skysails adlı gemi	57
Şekil 4.9 Bir yatın Skysails paraşüt sevk sistemi ile donatılması	58
Şekil 4.10 Sık kullanılan paraşüt modelleri	58
Şekil 4.11 Gemi sabit koordinat sistemi	60
Şekil 4.12 Küresel koordinat sistemi	60
Şekil 4.13 Paraşütün gemi sabit koordinat sistemine göre konumu	61
Şekil 4.14 Paraşüt sabit koordinat sistemi	62
Şekil 4.15 Paraşüt üzerinde oluşan kuvvetler ve atak açısı	69
Şekil 4.16 Tavsiye edilen paraşüt kontrol açıları	72
Şekil 4.17 Örnek bir rüzgâr verisi “Yer: Kudat, Yıl: 2008”	74
Şekil 4.18 Örnek Rayleigh rüzgâr dağılımları	75
Şekil 5.1 Örnek 3-boyutlu HAD elemanları	83
Şekil 6.1 Biyolojik sinir ağı	88
Şekil 6.2 Basit yapay sinir ağı modeli	88
Şekil 6.3 Örnek Yapay Sinir Ağı Topolojileri	90
Şekil 7.1 KCS modeli gövde planı	98

Şekil 7.2 Dünya üzerinde en çok kullanılan konteyner rotaları	102
Şekil 7.3 Kuzey Pasifik Okyanusu taşımacılık rotaları yoğunluk haritası	103
Şekil 7.4 San Diego-Yokohama seferi için tavsiye edilen rotalar	103
Şekil 7.5 Yokohama-San Diego seferi için tavsiye edilen rotalar	104
Şekil 7.6 Beaufort ölçeği:0 durumunda deniz yüzeyi	107
Şekil 7.7 Beaufort ölçeği:1 durumunda deniz yüzeyi	107
Şekil 7.8 Beaufort ölçeği:2 durumunda deniz yüzeyi	108
Şekil 7.9 Beaufort ölçeği:3 durumunda deniz yüzeyi	108
Şekil 7.10 Beaufort ölçeği:4 durumunda deniz yüzeyi	109
Şekil 7.11 Beaufort ölçeği:5 durumunda deniz yüzeyi	109
Şekil 7.12 Beaufort ölçeği:6 durumunda deniz yüzeyi	110
Şekil 7.13 Beaufort ölçeği:7 durumunda deniz yüzeyi	110
Şekil 7.14 Beaufort ölçeği:8 durumunda deniz yüzeyi	111
Şekil 7.15 Beaufort ölçeği:9 durumunda deniz yüzeyi	111
Şekil 7.16 Beaufort ölçeği:10 durumunda deniz yüzeyi	112
Şekil 7.17 Beaufort ölçeği:11 durumunda deniz yüzeyi	112
Şekil 7.18 Beaufort ölçeği:12 durumunda deniz yüzeyi-1	113
Şekil 7.19 Beaufort ölçeği:12 durumunda deniz yüzeyi-2	113
Şekil 7.20 Kuzey Pasifik Okyanusu 2012-2021 arası rüzgâr hızı istatistiği	117
Şekil 7.21 Kuzey Pasifik Okyanusu rüzgâr istatistiği (2012-2021)	117
Şekil 7.22 Kuzey Pasifik Okyanusu rüzgâr verisi örneği (14 Şubat 2022)	119
Şekil 7.23 Kuzey Pasifik Okyanusu rüzgâr dalgası verisi örneği (14 Şubat 2022) ...	119
Şekil 7.24 0,26 Froude sayısında meydana gelen serbest su yüzeyi dalga sistemi ...	124
Şekil 7.25 Kontrol hacmi boyutları ve sınır koşulları	126
Şekil 7.26 Sayısal hesaplama için oluşturulan ağ yapısına ait orta kesit görünüşü ...	127
Şekil 7.27 Üst yapıya sahip KCS modeli	128
Şekil 7.28 Modellenen paraşüt geometrileri	133
Şekil 7.29 HAD analizleri ağ yapısı genel boyutları	136
Şekil 7.30 HAD analizleri için genel sınır koşulları	137
Şekil 7.31 Modellenen paraşüt formlarına ait kuvvet katsayıları	138
Şekil 7.32 Paraşüt modellerine ait merkez hattı basınç katsayısı dağılımları	139
Şekil 7.33 Tasarlanan 8-şekli yörünge modelleri	140

Şekil 7.34 Dokuz farklı 8-şekilli yörüngeye ait analiz sonuçları	141
Şekil 7.35 Yörünge 2 için hesap adımı konumları	143
Şekil 7.36 Farklı seyir koşullarında gereken enerji miktarları.....	157
Şekil 7.37 Yokohama-San Diego hattı gerekli ana makine sevk gücü değerleri	160
Şekil 7.38 San Diego-Yokohama hattı gerekli ana makine sevk gücü değerleri	161
Şekil 8.1 Çalışmanın işlem basamakları	163



TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1 EEDI referans hattı azaltım faktörleri	7
Tablo 2.1 Gemilerde enerji verimliliği önlemleri	20
Tablo 6.1 Sık kullanılan aktivasyon fonksiyonları	93
Tablo 7.1 KCS'nin genel özellikleri	98
Tablo 7.2 31,599 ölçekli model gemiye ait genel özellikler	99
Tablo 7.3 Uluslararası ticarete denizyolu ile taşınan yük miktarı	100
Tablo 7.4 Gemi türlerinin dünya ticaretinde kullanım oranları	100
Tablo 7.5 Taşınan konteyner adetleri (milyon TEU)	102
Tablo 7.6 Beaufort (Bofor) rüzgâr ölçeği	114
Tablo 7.7 Kuzey Pasifik Okyanusu deniz durumu karakteristiği	118
Tablo 7.8 Kuzey Pasifik Okyanusu için 2012-2020 yılları arasındaki aylık ortalama rüzgâr haritaları	120
Tablo 7.9 KCS modeline ait gemi çekme tankı deneyi ve HAD analizi sonuçları ...	123
Tablo 7.10 Direnç analizlerine ait matematiksel modelin ağ yapısı özellikleri	127
Tablo 7.11 KCS modeline ait üst yapı rüzgâr direncinin dâhil edildiği HAD analiz sonuçları	129
Tablo 7.12 Model geminin farklı deniz durumlarındaki direnç tahmin sonuçları ...	129
Tablo 7.13 Model geminin farklı hızlardaki ek direnç oranları	130
Tablo 7.14 Tam boyutlu gemiye ait toplam direnç katsayısı değerleri	130
Tablo 7.15 Tam boyutlu gemiye ait toplam direnç kuvveti değerleri	131
Tablo 7.16 Tam boyutlu gemiye ait gerekli ana makine güç değerleri	131
Tablo 7.17 Doğrulama çalışmalarında kullanılan ağ parametreleri	134
Tablo 7.18 2-boyutlu doğrulama çalışmalarına ait kaldırma kuvveti katsayıları	135
Tablo 7.19 3-boyutlu doğrulama çalışmalarına ait kaldırma kuvveti katsayıları	136
Tablo 7.20 Paraşüt modellerine ait kaldırma ve sürüklenme kuvveti katsayıları	138
Tablo 7.21 Yörünge seçiminde kullanılan parametre değerleri	140
Tablo 7.22 Yörünge 2'nin bölümlerinin sahip olduğu açısall konumlar	144
Tablo 7.23 Yardımcı paraşüt sevk sistemi özellikleri	144
Tablo 7.24 Seçilen paraşüt modeli için hesaplanan kuvvet katsayıları	145

Tablo 7.25 Uygun YSA öğrenme algoritmasının belirlenmesi	146
Tablo 7.26 Levenberg-Marquardt algoritması ile öğrenen farklı YSA modellerinin performans göstergeleri	147
Tablo 7.27 Yokohama-San Diego seferine ait analiz sonuçları	150
Tablo 7.28 San Diego-Yokohama seferine ait analiz sonuçları	151
Tablo 7.29 Yokohama-San Diego seferi için ek dirençli duruma ait sonuçlar	152
Tablo 7.30 San Diego-Yokohama seferi için ek dirençli duruma ait sonuçlar	152



KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
AC/DC	: Alternatif Akım/Doğrusal Akım
ASA	: Uyarlamalı Benzetilmiş Tavlama Algoritması
CODAG	: Kombine Dizel ve Gaz Türbini
CODOG	: Kombine Dizel veya Gaz Türbini
CPP	: Kontrol Edilebilir Hatveli Pervane
CRP	: Ters Dönüşlü Pervane
DES	: Ayrılmış Girdap Simlasyonu
DWT	: Dedveyt ton
EEDI	: Enerji Verimliliği Tasarım İndeksi
EEOI	: Enerji Verimliliği Operasyonel İndeksi
EEXI	: Enerji Verimliliği Mevcut Gemi İndeksi
FPP	: Sabit Hatveli Pervane
GOE	: Gottingen (GEW. PLATTE) Aerofoil
GT	: Groston
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HFO	: Ağır Dizel Yakıt
IEEC	: Uluslararası Enerji Verimliliği Belgesi
IMO	: Uluslararası Denizcilik rgt
ITTC	: Uluslararası Model Deneyi Konferansı
IWSA	: Uluslararası Rüzgâr Gemisi Birliği
KCS	: KRISO Konteyner Gemisi
KRISO	: Kore Gemi ve Okyanus Mühendisliği Araştırma Enstitüsü
KVLCC2	: KRISO Very Large Crude Carrier (ok büyük ham petrol taşıyıcısı)
LES	: Büyük Girdap Simlasyonu
LNG	: Sıvılaştırılmış Doğalgaz
LPG	: Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
MARPOL	: Denizlerin Gemiler Tarafından Kirletilmesinin nlenmesine Ait Uluslararası Sözleşme
MEPC	: Deniz evresini Koruma Komitesi

MIGA	: Çok Adalı Genetik Algoritma
MOERI	: Deniz ve Okyanus Mühendisliği Araştırma Enstitüsü
NACA	: Havacılık Alanında Ulusal Danışma Komitesi
NASA	: Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
PEMFC	: Hidrojen Geçişli Membranlı Yakıt Pili
PSO	: Parçacık Sürüşü Optimizasyonu
RANS	: Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes
SEEMP	: Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planlaması
SOLAS	: Denizde Can Emniyeti Uluslararası Sözleşmesi
SST	: Kesme Gerilmesi Taşınması
TEU	: Yirmi Ayak Eşdeğer Birimi
YSA	: Yapay Sinir Ağları

SEMBOLLER

A	: Paraşüt Yüzey Alanı
a	: Alan Vektörü
A_M	: Orta Kesit Alanı
A_W	: Islak Alan
A_{WP}	: Su Hattı Alanı
B	: Genişlik
C	: Weibull Ölçeği Parametresi
c	: Açık Deniz Rüzgâr Gradyanı Katsayısı
C_A	: Model ve Gemi Arasındaki Uyum Katsayısı
C_B	: Blok Katsayısı
C_D	: Paraşüt Modelinin Sürüklenme Kuvveti Katsayısı
C_F	: Sürtünme Direnci Katsayısı
C_{F0}	: Düz Levha Sürtünme Direnci Katsayısı
C_{F0m}	: Düz Levha Sürtünme Direnci Katsayısı (Modelin ıslak alanına eşit)
C_{F0s}	: Düz Levha Sürtünme Direnci Katsayısı (Geminin ıslak alanına eşit)
C_l	: Paraşüt Modelinin Kaldırma Kuvveti Katsayısı
C_M	: Orta Kesit Alan Katsayısı
CO	: Karbon Monoksit
CO_2	: Karbon Dioksit
$\cos$	: Kosinüs
C_p	: Prizmatik Katsayı
C_T	: Toplam Direnç Katsayısı
C_{Tm}	: Model Gemi Toplam Direnç Katsayısı
C_{Ts}	: Gemi Toplam Direnç Katsayısı
C_W	: Gemi/Model Dalga Direnci Katsayısı
C_{WP}	: Su Hattı Alan Katsayısı
D	: Derinlik
E	: Birim Kütle Başına Toplam Enerji
e_t	: Öngörü Hatası
f_b	: Birim Hacim Başına Cismin Bileşke Kuvvetleri

F_D	: Paraşüt Üzerinde Oluşan Sürüklenme Kuvveti
F_L	: Paraşüt Üzerinde Oluşan Kaldırma Kuvveti
F_n	: Froude Sayısı
F_T	: Çekme Halatı Üzerindeki Gerilme Kuvveti
F_x	: Geminin x-ekseninde Oluşan Çekme Kuvveti
F_y	: Geminin y-ekseninde Oluşan Çekme Kuvveti
F_z	: Geminin z-ekseninde Oluşan Çekme Kuvveti
H	: Toplam Entalpi
I	: Özdeğer Tensörü
k	: Boyutsuz Weibull Şekil Parametresi
kg/m^3	: Kilogram/Metreküp
km/h	: Kilometre/Saat
kN	: KiloNewton Kuvveti
knot	: deniz mili/saat
kW	: KiloWatt
kWh	: KiloWatt.Saat
L_{BP}	: Dikmeler Arası Boy
LCB	: Sephiye Merkezinin Boyuna Yeri
LCF	: Yüzme Merkezinin Boyuna Yeri
L_m	: Model Gemi Boyu
L_s	: Gemi Boyu
L_{WL}	: Su Hattı Boyu
l_x	: Paraşütün Kendi x-eksenindeki Birim Vektör Uzunluğu
l_z	: Paraşütün Kendi z-eksenindeki Birim Vektör Uzunluğu
m	: Metre
m/s	: metre/saniye
m/s^2	: Metre/Saniyekare
m^2	: Metrekare
m^3	: Metreküp
N	: Newton Kuvveti
N	: Örneklem Sayısı
NO_x	: Azot Oksitler

O_p	: Paraşütün Konumu
P	: Basınç
$Pa.s$	: Pascal.saniye
q	: Isı Akısı
R	: Paraşüt Eğrilik Yarıçapı
r	: Çekme Halatı Boyu
R_F	: Sürtünme Direnci
R_n	: Reynolds Sayısı
R_P	: Basınç Direnci
R_{PV}	: Viskoz Basınç Direnci
R_R	: Artık Direnç
R_T	: Toplam Direnç
R_{Tm}	: Model Gemi Toplam Direnci
R_{Ts}	: Gemi Toplam Direnci
R_V	: Viskoz Direnç
R_W	: Dalga Direnci
S_E	: Birim Hacim Başına Enerji Kaynağı
$\sin$	: Sinüs
S_m	: Model Gemi Islak Yüzey Alanı
SO_x	: Sülfür Oksitler
S_u	: Kaynak Terim
T	: Su Çekimi
T	: Viskoz Gerilme Tensörü
t	: Zaman
t	: Ton
t/m^3	: Ton/Metreküp
$\tan$	: Tanjant
u_{gemi}	: Geminin Kendi x-ekseninde Sahip Olduğu Hız
V	: Hacim
v	: Sürekli Ortam Hızı
V_e	: Efektif Rüzgâr Hızı
v_{gemi}	: Geminin Kendi y-ekseninde Sahip Olduğu Hız

V_m	: Model Gemi Hızı
$v_{paraşüt}$	: Paraşütün Uçuş Hızı
$V_{rüzgar}$	: Paraşütün Uçuş İrtifasındaki Rüzgâr Hızı
$V_{rüzgar_{10m}}$	: 10 metre İrtifadaki Rüzgâr Hızı
V_s	: Gemi Hızı
$V_{x,p,rüz.ger.}$	: Rüzgârın Paraşüt x-eksenindeki Bağlı Hızı
$V_{x,rüz.gerçek}$	: Rüzgârın Geminin x-ekseninde Sahip Olduğu Bağlı Hız
$V_{x,rüzgar}$	: Rüzgârın Geminin x-ekseninde Sahip Olduğu Hız
$V_{x,p,rüz.}$	: Rüzgârın Paraşüt x-eksenindeki Hızı
$V_{y,rüz.gerçek}$	: Rüzgârın Geminin y-ekseninde Sahip Olduğu Bağlı Hız
$V_{y,rüzgar}$	: Rüzgârın Geminin y-ekseninde Sahip Olduğu Hız
$V_{z,p,rüz.ger.}$	: Rüzgârın Paraşüt z-eksenindeki Bağlı Hızı
$V_{z,p,rüz.}$	: Rüzgârın Paraşüt z-eksenindeki Hızı
W	: Watt
x	: Rüzgâr Hızının Meydan Gelme Olasılığı
$\hat{x}$	: Paraşütün Kendi x-eksenindeki Birim Vektörü
x_1	: Paraşütün Geminin x-eksenindeki Birim Vektör Bileşeni
x_2	: Paraşütün Geminin y-eksenindeki Birim Vektör Bileşeni
x_3	: Paraşütün Geminin z-eksenindeki Birim Vektör Bileşeni
y_t	: Gerçek Değer
$\hat{z}$	: Paraşütün Kendi z-eksenindeki Birim Vektörü
z_1	: Paraşütün Geminin z-eksenindeki Birim Vektör Bileşeni
z_2	: Paraşütün Geminin z-eksenindeki Birim Vektör Bileşeni
z_3	: Paraşütün Geminin z-eksenindeki Birim Vektör Bileşeni
ρ_{hava}	: Havanın Yoğunluğu
ρ_m	: Model Deneyinin Yapıldığı Suyun Yoğunluğu
ρ_s	: Geminin Yüzdüğü Suyun Yoğunluğu
∇	: Sapma
$\otimes$	: Dış Çarpım
σ	: Gerilme Tensörü
α	: Paraşüt Atak Açısı

γ	: Rüzgârın Esme Açısı
θ	: Kalkıntı Açısı
μ	: Ortalama Rüzgâr Hızı
ρ	: Akışkan Yoğunluğu
φ	: Azimut Açısı
ψ	: Gemi İlerleme Açısı



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Gelişen teknolojik faaliyetler neticesinde üretilen ürünlerin hem çeşitliliğinin hem de miktarının artışı, dünya ticaret hacminin genişlemesine neden olmaktadır. Ticari ürünlerin nakliyesinin gerçekleştiği taşımacılık türleri düşünüldüğünde, büyük miktarların göreceli olarak daha az maliyetler ile taşınmasına olanak sağlayan deniz taşımacılığı; karayolu, demiryolu ve havayolu taşımacılığından daha fazla kullanım oranına sahiptir (Hoffmann, 2010). Ticari ürün miktarının sürekli artması, mevcut taşıma kapasitesinin yetersiz kalmaya başlamasıyla birlikte yeni gemilere olan talebi artırmaktadır. Birbirini tetikleyen bu büyüme sürecinin doğal bir sonucu olarak, gemi sayısındaki artış ile devam eden süreçte, gemilerden kaynaklı sera gazı ve partikül madde salımında da artış yaşanmaktadır (Johnson, 2013).

Uluslararası Denizcilik Örgütü (International Maritime Organization [IMO]) Birleşmiş Milletler altında üye devletler tarafından 17 Mart 1948 tarihinde kurulmuş olan denizcilik sektörüyle ilgili kural koyucu, denetleyici ve yaptırım uygulayıcı en etkili ve yetkili kurumdur. Örgütün amacı; edindiği emniyet, güvenlik ve çevre koruma politikalarıyla insana, mala ve çevreye gelebilecek zararı en aza indiremeyecek ve hatta günümüzde gemilerin verimliliğinin artırılmasını sağlamaktır. Örgütün yürürlüğe koyduğu kurallar, ilk başta gemilerin suda yüzerken daha emniyetli bir yapıya sahip olmasını amaçlarken (Titanik gemisinin batışı ile SOLAS'ın doğuşu [International Convention for the Safety of Life at Sea - Denizde Can Emniyeti Uluslararası Sözleşmesi]); zamanla güvenli seyir, adil işletmecilik ve çevre koruma bilincini de kazandıracak şekilde genişletilmiştir. Günümüzde IMO'nun 2030 yılı hedefi, sürdürülebilir deniz taşımacılığı üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu kapsamda, IMO'nun bileşenlerinden biri olan Deniz Çevresini Koruma Komitesi (Marine Environment Protection Committee [MEPC]) denetiminde “Denizlerin Gemiler Tarafından Kirlenmesinin Önlenmesine Ait Uluslararası Sözleşme” (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships [MARPOL]) ile gemilerden kaynaklı kirlenici etkilerin minimum seviyelere indirilmesi konusunda kurallar ele alınmaktadır (IMO, 2020). Bu kurallar çerçevesinde alınan önlemlerden biri de, gemilerin karbon içerikli yakıt tüketimine kısıtlamalar getirilerek, gemilerden

kaynaklanan sera gazı salımını azaltacak yakıt türleri ve yenilikçi makine sistemlerinin kullanımını teşvik etmektir. Bu bağlamda, ele alınan alternatif enerji kaynaklarından biri de rüzgâr enerjisidir. Havada esen rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjiyi, kullanılabilir enerjiye dönüştüren sistemler incelendiğinde; dikey ve yatay eksenli rüzgâr türbinlerine, Flettner rotorlara ve paraşüt sistemlerine ait uygulama örneklerine sıklıkla rastlanılmaktadır ve bu sistemler hakkında dördüncü bölüm altında bilgi verilmektedir. Bu sistemlerin ana tasarım amacı, mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. Paraşüt sistemleri diğer sistemlerden ayıran özelliği ise, yüksek irtifalarda çalışması ve daha az malzeme kullanan hafif yapıda olmalarıdır. Rüzgâr hızının dünya yüzeyinden uzaklaştıkça artması ve üniform bir yapıya ulaşması paraşüt sistemlerinin enerji dönüşüm kapasitesini artırmaktadır. Bu çalışmada, diğer rüzgâr enerji sistemlerinde olanın aksine, paraşüitten elektrik enerjisi elde etmek amaçlanmamakta olup, bunun yerine paraşütü zemine bağlayan çekme halatı üzerine etkiyen gerilme kuvvetinin gemi sevk sistemine katkısı irdelenmektedir.

Paraşüt yardımcı gemi sevk sistemleri, paraşütün havayla etkileşimi sırasında oluşan aerodinamik kuvvetleri, geminin ilerleme yönü doğrultusunda yönlendirerek ek çekme kuvvetine dönüştürmede kullanılmaktadır. Bunun sonucunda, fosil yakıtların tüketiminde azalma beklenmekte; gemi bacasından salınan kirlетici maddelerin kısıtlanmasıyla birlikte olumlu çevresel katkılar ve daha az yakıtın tüketilmesiyle de gemilerin işletme giderlerinde tasarruf hedeflenmektedir. Bu sistemlerden daha verimli bir şekilde faydalanabilmek için paraşüte ait uçuş dinamiklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu sayede hem tasarım sürecindeki hem de kullanım esnasındaki parametre değerlerinin optimizasyonu mümkün olabilmektedir.

Bu çalışmada, akademik araştırmalarda sıklıkla kullanılan ve farklı araştırmacılar tarafından gemi model havuzu ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemleriyle gemiye ait hidrostatik ve hidrodinamik hesapların birçok kez karşılaştırmalı olarak yapıldığı KRISO (Kore Gemi ve Okyanus Mühendisliği Araştırma Enstitüsü) Konteyner Gemisi “KCS” için paraşüt yardımcı sevk sistemi tasarlanmaktadır. Çalışmanın ileriki bölümlerinde sebepleriyle birlikte verildiği gibi, gemi tipinin konteyner gemisi olması dolayısıyla; uluslararası konteyner gemisi

rotalarının incelenmesi sonucunda, yıllık toplam taşınan konteyner adedi de göz önünde bulundurulduğunda, Kuzey Pasifik Okyanusu bu çalışmada ele alınacak seyir bölgesi olarak belirlenmektedir.

Örnek KRISO gemisinin sakin su için HAD yöntemi ile elde edilen, farklı hızlardaki, direnç değerleri literatürde yer alan çekme tankı deneyleri ile karşılaştırılarak doğrulanmaktadır. Ayrıca, bu çalışmada kullanılmak üzere hesaplanan ek direnç değerlerine, HAD yöntemi ile yapılan gemi hareketlerine ait simülasyon sonuçlarından ulaşılmaktadır. Dalga ve rüzgârdan kaynaklı ek direnç bileşenleri, Kuzey Pasifik Okyanusu'nun yıllık ortalama dalga ve rüzgâr verisi kullanılarak, HAD yöntemiyle hesaplanmakta ve deneysel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmaktadır. Paraşüt üzerine etkiyen aerodinamik kuvvet katsayıları, rüzgâr tüneli deneyleriyle karşılaştırma ve seçilmiş olan ve seçilme sebebi ileriki bölümlerde detaylı olarak verilecek olan NACA4415 kesitine ait 2-boyutlu ve 3-boyutlu HAD analiz sonuçları deney sonuçlarıyla doğrulanmakta ve bu sayede HAD analizlerinde kullanılacak optimum parametre değerleri belirlenmektedir. Son aşamada ise, çalışmanın en uygun rota olarak belirlediği iki liman arasında tam dolu halde (IMO Hasarsız Stabilité Kurallarına göre; Kısım B Madde 3.4.1 (MSC, 2008)) gidiş-dönüş seferi için, benzer çalışmalarda da sıklıkla kullanılan aerofoil bir form olan NACA4415 kesitine sahip ve birçok ticari ve akademik çalışmada denenmiş 320 m² yüzey alanı bulunan paraşüt sisteminin; farklı çalışma koşulları altında, ana makine yakıt tasarrufuna katkısı tahmin edilmektedir. Bu çalışmadaki hesaplar; geminin belirlenen rotadan sapmadığı, tasarım su çekiminde dinamik gemi hareketlerinin oluşmadığı, paraşütün ve geminin “sanki dengede” (quasi-static) olduğu kısıtlar altında yapılmaktadır.

1.1 Problemin Tanımı

IMO'nun yaptığı sera gazı çalışmalarında, uluslararası gemi taşımacılığından kaynaklı sera gazı emisyonları açıkça belirtilmektedir. Deniz taşımacılığı faaliyetleri sonucunda 2012 yılında toplam 796 milyon ton CO₂ (karbondioksit) salımı olduğu ve bu yıl içindeki toplam CO₂ salımının %2,2'sinin gemilerden kaynaklı olduğu tahmin edilmektedir. 2050 yılına kadar da bu artış hızı ile deniz taşımacılığı kaynaklı CO₂ emisyonlarının %50 ile %250 arasında artış göstereceği öngörülmektedir (IMO, 2014). 2018 yılında yapılan MEPC'nin 72. Toplantısında, 2030'da CO₂ emisyonunu 2008'e

kıyasla %40 azaltma ve 2050’de ise 2008’e kıyasla %70 azaltma hedeflenmektedir (IMO, 2018). Bunun yanında, 2050 yılında toplam sera gazı emisyonlarını 2008’e göre %50 düzeyine indirmek de amaçlanmaktadır. Ayrıca, içinde bulunduğumuz yüzyılda sera gazlarını mümkün olan en kısa sürede sona erdirebilmek için, 2023 yılında mevcut düzenlemeleri yeniden gözden geçirme kararı alınmıştır. Bunun sebebi ise dünya ticaretinin büyümesinden kaynaklanacak etkileri ortadan kaldırabilmektir (Boviatsis ve Tselentis, 2019). Bu bağlamda; IMO, gemilerin enerji verimliliğini daha da artırmak ve gemilerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltmak için önlemler geliştirmek ve ayrıca teknik işbirliği ve kapasite geliştirme faaliyetleri sağlayabilmek için küresel bir bakış oluşturma konusunda aktif görev almaktadır.

Karşılaşmakta olduğumuz bu durumu önleyebilmek için, IMO birtakım çalışmaları 1973 yılında MARPOL bildirisini yayınlarak yapmaya başlamıştır. 1997 yılında, MARPOL’e yeni bir ek olan Ek VI’nın (Gemilerden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Önlenmesine Yönelik Yönetmelikler) ilave edilmesiyle birlikte, gemilerden kaynaklanan gaz emisyonlarını (SO_x, NO_x, partikül madde, vb.) ve bunların yerel ve küresel hava kirliliği ve çevre sorunlarına etkilerini en aza indirmek amaçlanmaktadır. Ek VI, 19 Mayıs 2005 tarihinde yürürlüğe girmiş ve 1 Temmuz 2010 tarihinde revize edilerek önemli ölçüde sıkılaştırılmış emisyon limitlerine sahip bir Ek VI haline dönüştürülmüştür (Herdzik, 2011). Süregelen kirlenme artışının hızını azaltabilmek için 2009 yılında Enerji Verimliliği Operasyonel İndeksi (Energy Efficiency Operational Indicator [EEOI]), MARPOL Ek VI’ya ilave edilmiştir. 2011 yılında ise, Enerji Verimliliği Tasarım İndeksi (Energy Efficiency Design Index [EEDI]) ve Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planlaması (Ship Energy Efficiency Plan [SEEMP]) MARPOL Ek VI’ya eklenen düzenlemeler olmuştur. MEPC’nin 75. toplantısında taslak olarak kabul edilen Enerji Verimliliği Mevcut Gemi İndeksi (Energy Efficiency Existing Ship Index [EEXI]) 2021 yılındaki 76. toplantıda tartışılan konular arasındadır. Mevcut gemilerin yanı sıra, yeni inşa edilecek gemiler için de enerji verimliliğini hesaplamanın gerekliliği kabul edilmiştir (IMO, 2021). Tüm bu düzenlemeler ile bir gemi her ne kadar çevreci olarak tasarlansa da, hizmet ömrü boyunca enerji verimliliği önlemlerini uygulamanın zorunluluğu bulunmaktadır (Kaya ve Erginer, 2021).

MEPC, gemilerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının kontrolünü kapsamlı bir şekilde ele almakta ve 2011’de yeni gemiler için teknik önlemler paketi ve tüm gemiler için operasyonel prosedürlerle sera gazlarını azaltma önlemlerini kabul ederek 1 Ocak 2013’te yürürlüğe koymuştur. MARPOL Ek VI’nın içinde yer alan “Gemiler için enerji verimliliğine ilişkin yönetmelikler” başlığıyla oluşturulan Bölüm 4, iki ana önlemi içermektedir (Joung, Kang, Lee, ve Ahn, 2020). Bunlar:

- Yeni gemilerin minimum seviyede zorunlu enerji verimliliği performans kriterini sağlaması ve zamanla sıkılaştan aşamalara sahip olan Enerji Verimliliği Tasarım İndeksi’ne uygun inşa edilmesi,
- Hava durumu esaslı yönlendirme, trim ve draft optimizasyonu, hız optimizasyonu, limanlara tam zamanında varış gibi operasyonel önlemleri kullanarak gemi sahiplerinin hem yeni hem de mevcut gemilerinde enerji verimliliğini artırmaları için bir mekanizma oluşturan Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planlaması’na sahip olması olarak sıralanmaktadır.

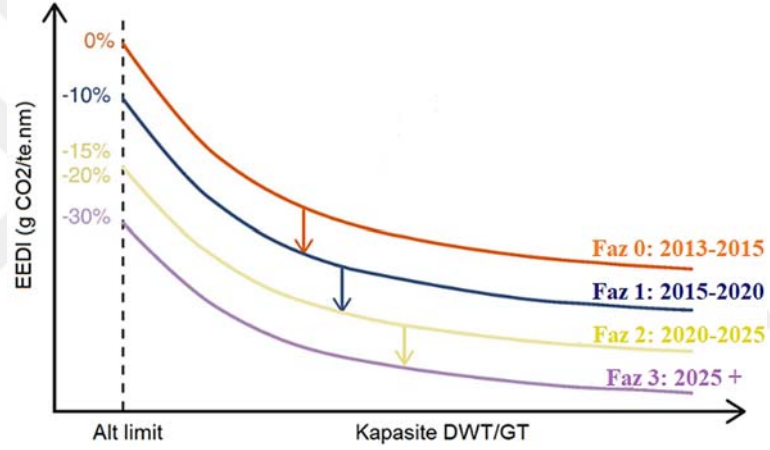
Böylelikle, 400 GT (groston) üzeri gemiler ile sabit ve yüzer sondaj platformlarına olumsuz çevresel etkileri olan ozon delici maddeleri ihtiva eden yeni sistemlerin kurulması belirli kısıtlamalara tabi tutulmaktadır. Gemilerin SEEMP ve EEDI ile ilgili kurallara uygunluğu tespit edildikten sonra, 400 GT ve üzeri uluslararası yolculuk yapacak gemiler için zorunlu olan, Uluslararası Enerji Verimliliği Belgesi (International Energy Efficiency Certificate [IEEC]) verilmektedir. Bu sayede, MARPOL 73/78 Ek VI’da geçen şartların yerine getirildiği doğrulanmaktadır. Sertifika bir kez alındıktan sonra süresiz olarak geçerliliğe sahiptir. Fakat sertifikanın geçerliliğini kaybedeceği durumlar ise şu şekildedir (Perera ve Mo, 2016):

- Geminin servisten çekilmesi,
- Büyük çaplı bir yapısal dönüşümün gerçekleştirilmesi,
- Bayrak devletinin değiştirilmesi (Gemilerin Bayrak değiştirmesi).

Yukarıda sıralanmış olan stratejilerle uluslararası deniz taşımacılığına vizyon kazandırılmaya çalışılmaktadır. Sera gazı indirgeme seviyeleri belirlenerek yol gösterici ilke ve yöntemler doğrultusunda devletlerin de kısa, orta ve uzun vadeli ek

önlemler alması, araştırma ve geliştirme çalışmalarını destekleyici adımlar atması gerekliliği vurgulanmaktadır (Shi, 2016).

Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde detaylı olarak anlatılacak olan gemi enerji verimliliği uygulamalarına değinmeden önce, IMO tarafından gemi sera gazı emisyonlarının hangi ölçüde sınırlandırıldığı, hangi hususların göz önünde bulundurulması gerektiği ve bu çalışmanın yapılmasını gerekli kılan problemi tanımlayabilmek için Şekil 1.1’de EEDI’nin fazları gösterilmektedir. Bu değişiklikler, uluslararası deniz taşımacılığında kaynaklı CO₂ emisyonlarının yaklaşık %85’inden sorumlu gemi türlerinin uluslararası düzenleyici rejime dâhil edildiği anlamına gelmektedir.



Şekil 1.1 EEDI fazları ve gemi alt limitleri (Tokuşlu, 2020)

Her gemi için EEDI azaltım faktörü hesap edilirken yük taşıma kapasitesi olan dedveyt ton (DWT) veya kapalı hacimleri belirten grostonajın (GT) öneminin yanı sıra gemi türünün de önemi bulunmaktadır. Gemi türlerine göre (Tokuşlu, 2020):

- Dökme yük gemilerinde 10.000 DWT,
- Konteyner gemilerinde 10.000 DWT,
- Petrol tankerlerinde 4.000 DWT,
- Genel kargo gemilerinde 3.000 DWT,
- Gaz taşıyıcı gemilerde 2.000 DWT gibi “alt limit” değerleri bulunmaktadır.

EEDI, gemilerin seyri süresince kat ettikleri her bir deniz mili mesafesinde kaç gram karbondioksit salımına neden olacağını gösteren bir değerdir. Karbondioksit,

fosil yakıtların yakılmasıyla ortaya çıkan iki oksijen ve bir karbon atomunun bağlanmasıyla oluşan bir molekül olup renksiz ve kokusuzdur (Ančić ve Šestan, 2015). CO₂ zehirli bir gaz değildir ve yanıcı özelliği bulunmaz, ancak güneşten gelen ışınları absorbe etme yeteneği sayesinde dünya atmosferinin belirli bir sıcaklıkta kalmasını sağlarken, havadaki konsantrasyonunun artmasıyla toplam tutulan güneş enerjisini artırarak, küresel ısınmaya sebep olacak etkenlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Tablo 1.1’de bazı örnek gemi tiplerine ait EEDI azaltım faktörleri gösterilmektedir. Ayrıca, EEDI azaltım faktörünün hesaplanmasıyla elde edilen *Gerekli EEDI* değeri de Denklem 1.1’de belirtilmektedir.

Tablo 1.1 EEDI referans hattı azaltım faktörleri (MEPC, 2011)

Gemi tipi	Kapasite	Faz 0 1 Oca 2013 31 Ara 2014	Faz 1 1 Oca 2015 31 Ara 2019	Faz 2 1 Oca 2020 31 Ara 2024	Faz 3 1 Oca 2025 ve sonrası
Dökme yük gemisi	20.000 DWT ve üstü	0	10	20	30
	10.000 – 20.000 DWT	--	0-10*	0-20*	0-30*
Gaz taşıyıcı gemi	10.000 DWT ve üstü	0	10	20	30
	2.000 – 10.000 DWT	--	0-10*	0-20*	0-30*
Petrol tankeri	20.000 DWT ve üstü	0	10	20	30
	4.000 – 20.000 DWT	--	0-10*	0-20*	0-30*
Konteyner gemisi	15.000 DWT ve üstü	0	10	20	30
	10.000 – 15.000 DWT	--	0-10*	0-20*	0-30*
Genel kargo gemisi	15.000 DWT ve üstü	0	10	15	30
	3.000 – 15.000 DWT	--	0-10*	0-15*	0-30*
Soğutulmuş kargo gemisi	5.000 DWT ve üstü	0	10	15	30
	3.000 – 5.000 DWT	--	0-10*	0-15*	0-30*
Kombine yük gemisi	20.000 DWT ve üstü	0	10	20	30
	4.000 – 20.000 DWT	--	0-10*	0-20*	0-30*

* Gemi boyutuna bağlı olarak iki değer arasında doğrusal olarak interpolasyon yapılacak indirgeme faktörü. Azaltma faktörünün daha düşük değeri, daha küçük olan gemi boyutuna uygulanacaktır.

$$Gerekli EEDI = (1 - (x/100)) \times Referans EEDI \quad (1.1)$$

Petrol kaynaklarının gelecekteki kullanılabilirliği konusundaki endişeler, enerji verimliliği uygulamalarına yönelimi tetiklemektedir. Ülkelerin nüfuslarındaki artışla beraber ticari malların sayısı da artış göstermektedir. Bu, hammadde, mamul ve emtiaların deniz yoluyla taşınma talebini artırmaktadır. Bu talebi karşılamak için, dünya denizcilik filosunda artan sayıda gemi, daha fazla miktarda fosil yakıt tüketimi gerçekleştirmektedir. Gemilerden kaynaklı atmosfere yayılan egzoz emisyonu miktarının bu artış hızına paralel olarak artmaması için uluslararası çevreler tarafından oldukça sıkı sınırlandırmalar getirilmektedir. Bu da, deniz taşımacılığında enerji verimliliğinin artırılma ihtiyacını, tasarım ve operasyonel alanda tartışmalara,

gelişmelere ve birçok yeniliğe yönelimi teşvik etmektedir. İlgili paydaşlar arasında, bunlarla sınırlı olmamak üzere; uluslararası düzenleyici kurumlar, ulusal hükümetler, klas kuruluşları, limanlar, gemi işletmecileri ve sahipleri, makine ve teknoloji tedarikçileri, akademik ve araştırma enstitüleri yer almaktadır (Oliveira ve Botter, 2018). Yeni tasarımların, teknolojilerin ve operasyonların planlanması ve uygulanması ile ilgili konularda farklı konum ve uzmanlık alanlarındaki insan müdahalesinin gerekliliği karar verme sürecinde öne çıkmaktadır. Benzer şekilde, gemi işletme prosedürlerindeki değişiklikler ve iyileştirmeler için de birçok paydaş arasında etkili iletişim ve işbirliği gerekmektedir (Lai, Lun, Wong, ve Cheng, 2011). Böylece daha az yakıt tüketen, daha verimli ve çevreye daha duyarlı gemi sevk sistemlerinin tasarlanması ve gemilere kurulumu gerçekleştirilebilmektedir.

1.2 Literatür Taraması

Bu çalışmanın araştırma konusu kapsamında bulunan, gemilerde rüzgâr enerjisinin kullanımını hedefleyen, özellikle de paraşüt yardımcı sevk sistemlerinin etkilerini inceleyen araştırmalara; “ship propulsion (gemi sevk sistemi)”, “ship energy efficiency (gemi enerji verimliliği)”, “skysails”, “kite systems (paraşüt sistemler)” ve “airborne wind energy (havadan rüzgâr enerjisi)” anahtar kelimelerinin kombinasyonları kullanılarak literatürden erişilmektedir.

“Determination of kite forces using three-dimensional flight trajectories for ship propulsion - Gemi tahriki için üç boyutlu uçuş yörüngeleri kullanılarak uçurtma kuvvetlerinin belirlenmesi” başlığıyla yayınlanan makalede; paraşütlerin gemilerde yardımcı güç veya sevk sistemi olarak kullanılabilmesi için zaman ortalamalı paraşüt kuvvetlerini tahmin etmenin gerekliliği vurgulanmaktadır. 300 metrelik çekme halatı uzunluğuna ve 300 metrekare alana sahip paraşüt sistem kullanılarak, 6,18 m/s rüzgâr hızında ortalama 16,7 tonluk bir çekme kuvveti elde edilebileceği hesaplanmaktadır. 8-şekilli yörüngede hareket eden paraşütün performans özelliklerini parametrik hale getirmek için paraşüt hızı, aerodinamik kuvvetler ve katsayıların tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu tahminler, tipik bir paraşüt hareketinde değişkenlerin önemini belirlemek için gerekmektedir. İncelenen bu çalışmada; geminin seyir yönünde yönlendirilmiş, 8-şekilli yörüngeye olabildiğince küçültüldüğü ve yatayla 15 derecelik açı yapan bir paraşütün tercih edilmesinin sevk verimi konusunda daha

faydalı olabileceği ifade edilmektedir. Ayrıca paraşütün en/boy oranını 4'ten 5'e çıkarmanın %15 daha fazla sevk gücü sağlayacağı tahmin edilmektedir (Dadd, Hudson, ve Shenoi, 2011).

Elektrik motorlu tahrik, rüzgâr destekli gemi sevk sistemleri, hibrit tahrik sistemleri ve güneş enerji sistemlerinin gemilerde, neredeyse servis hızını düşürmeden, kullanımı sonucunda ana makine ile bağlantılı çevreye zarar veren emisyonların azaltılabileceği, *“Kite towed ships and kite generated power-intuitive methods for reducing marine pollution - Deniz kirliliğini azaltmak için uçurtmayla çekilen gemiler ve uçurtma tarafından üretilen sezgisel güç yöntemleri”* başlıklı çalışmada ifade edilmektedir. Paraşütler gemide hem elektrik enerjisi üretiminde hem de çekme sevk gücü sağlanmasında kullanılabilmektedir. Fakat tek bir sistemden ikisini aynı anda beklemek, çalışma prensiplerindeki farklılıktan dolayı pek mümkün görülmemektedir. Teoride; NO_x, SO_x, CO ve CO₂ gibi zararlı bileşenlerin salımının rüzgâr destekli sistemler kullanılarak azaltılabileceği tahmin edilse de, uygulamada elde edilecek verilerle bu konu hakkında daha kesin sonuçlara varılmaktadır (Barsan ve Grosan, 2011).

Gemi ana makinesi kaynaklı hava kirliliğine neden olacak etkenlerin azaltılması gerektiği, *“Maneuverability and course stability of the kite towed ship under influence of the external factors - Uçurtmayla çekilen geminin dış etkenlerin etkisi altında manevra kabiliyeti ve rota stabilitesi”* isimli çalışmada vurgulanmaktadır. Geleneksel olmayan paraşüt sistemlerin gemi sevkine yardımcı olmak için kullanılabileceği, gün geçtikçe artan oranda kabul görmektedir. Fakat paraşüt üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetlerin gemi rotasını ve manevrasını nasıl etkileyeceğini analiz etmenin gereği belirtilmektedir. Bunun için gemi seyir simülatörü programlarının kullanımı tavsiye edilmektedir. Aerofoil bir kesit olan ve GOE-417A olarak adlandırılan kesit profiline sahip paraşüt formu kullanılarak, farklı rüzgâr koşullarında ve hız rejiminde paraşüt yardımcı sevk sisteminin davranışı hakkında sonuçlar elde edilmektedir. Manevra sırasında paraşütün geminin döneceği yöne doğru yönlendirilmesi gemi hareketine katkı sağlayacağı gibi, paraşüt üzerine etkiyen kuvvetin gemiyi meylettirecek yanal kuvvete dönüşmesiyle gemi stabilitesi konusunda incelenmesi gereken bir durum

ortaya çıkmaktadır. Ayrıca dümenin de gemi rotasını korumak için paraşütle senkronize halde çalışma zorunluluğu bulunmaktadır (Grosan ve Barsan, 2013).

“SkySails” firmasına ait paraşüt yardımcı gemi sevk sistemleri ve avantajları, *“Application of an automated kite system for ship propulsion and power generation - Gemi tahrik ve güç üretimi için otomatik uçurtma sisteminin uygulanması”* adı verilen çalışmada tanıtılmaktadır. 2008 yılında başlayan proje, gemileri paraşüt sistemi ile donatarak ana makinede tüketilecek yakıttan tasarruf sağlama hedeflenmektedir. Paraşüt sevk teknolojisi, buna ait fırlatma/toplama ve kontrol mekanizması ve temel sistem bileşenlerinin çalışma ilkeleri özetlenmektedir. Rüzgârdan elektrik enerjisi eldesi için paraşütü gemiye bağlayan halatın tambura sarılma-açılma prensibi gözetilerek jeneratör motoru üzerinde oluşan dönme kuvveti kullanılmaktadır. Diğer bir uygulamada ise paraşüt üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetlerin gemi çekme kuvvetine katkısının sağlanmasıyla paraşüt sistemlerden yararlanılmaktadır. Özellikle açık denizlerde gemi ana makine yakıt tüketimine büyük derecede katkı sağlayacak bir sistemin enerji verimliliği konusunda değerlendirmesi gerekmektedir (Fritz, 2013).

Denizcilik endüstrisinde daha çevreci uygulamalar maliyetlerin yüksek olmasından dolayı yeni gemilerden ziyade mevcut gemilerin dönüşümü sağlanarak yapılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan sistemlerin tasarımı ve uygulamaları gemi sevk sistemlerinin verimliliğinde artış sağlamayı hedeflemektedir. Baş üstü bölümüne paraşütün salma-toplama mekanizmasının monte edildiği KVLCC2 tanker gemisi etrafındaki akış HAD yöntemiyle, *“Prediction of the towing force generated by a kite attached to a KVLCC2 tanker model - KVLCC2 tanker modeline bağlı bir uçurtma tarafından oluşturulan çekme kuvvetinin tahmini”* adlı çalışmada simüle edilmektedir. Ana makine yakıt tüketiminin %35’e kadar azaltılabileceği, böylelikle işletme maliyetlerinde tasarruf sağlanacağı düşünülmektedir (Zaidi, Ristea, ve Bocanete, 2014).

Deniz taşımacılığında sevk sistemi olarak kullanılmak istenen paraşüt sistemi, *“Large eddy simulation of flows around a kite used as an auxiliary propulsion system - Yardımcı tahrik sistemi olarak kullanılan bir uçurtma etrafındaki akışların büyük girdap simülasyonu”* başlıklı çalışmada deneysel ve nümerik hesaplama araçları kullanılarak incelenmektedir. Düz kanat formundaki yapılara etkiyen aerodinamik

kuvvetler deneysel hesaplama yöntemleriyle gerçeğe yakın olarak hesaplanabilse de, eğrisel formdaki paraşüte etkiyen aerodinamik kuvvetleri hesaplayabilmek için ya rüzgâr tüneli ya da iyi ayarlanmış bir HAD modeli gerekmektedir. Aynı paraşütün rüzgâr tüneline küçültme ölçeği kullanılarak yapılan modeliyle, tam ölçekli modelin HAD yönteminde simüle edilmesi sonrasında benzer kaldırma ve sürüklenme kuvvet katsayılarının oluştuğu gözlemlenmektedir (Scupi, Avital, Dinu, Williams, ve Munjiza, 2015).

Denizcilik alanında, son yıllarda çevre koruma konusunda, yasal değişikliklerin ve yeni kuralların yürürlüğe girmesiyle başlayan, gemi teçhizatının iyileştirilmesiyle devam eden bir süreç takip edilmektedir. Alternatif sistemlerin tasarlanması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını içeren bu süreç zararlı emisyonları düşürmeyi amaçlamaktadır. Alternatif sevk sistemlerinin avantajlarını ve varsa dezavantajlarını, deniz ortamının korunmasına nasıl katkıda bulunduklarını ve bunları deniz taşımacılığı tahrik sistemlerinin geleceği olarak düşünmenin mümkün olup olmadığı; “*New perspectives for marine environment protection through innovative marine propulsion systems* - Yenilikçi deniz tahrik sistemleri aracılığıyla deniz ortamının korunması için yeni perspektifler” adlı çalışmada sunulmaktadır (Hanzu, Duse, Grosan, ve Varsami, 2015).

Küresel CO₂ emisyonunun %2 ile %3 arasında bir değerde gemilerden kaynaklı fosil yakıt türlerinin kullanımına bağlı olduğu araştırmacılar tarafından ifade edilmektedir. Deniz taşımacılığını fosil yakıt çağının ötesine götürecek ve sürdürülebilir hale dönüştürecek enerji kaynaklarından bir olan rüzgâr enerjisi, “*Ship propulsion strategies by using wind energy* - Rüzgâr enerjisi kullanarak gemi sevk stratejileri” başlığı altında incelenmektedir. Bu bağlamda; yelkenli gemiler, Flettner rotorlar, paraşüt sistemler ve konvansiyonel rüzgâr türbinleri gemi sevki kapsamında gözden geçirilmektedir (Lele ve Rao, 2016).

Geleneksel tahrik sistemi bulunan gemilerin hava durumu esaslı rota optimizasyonu sıklıkla uygulanmaktadır. Paraşüt destekli gemi sevk sistemlerinin performansını artıracak, geminin seyir rotası üzerindeki rüzgâr ve dalga etkisini tahmin ederek en uygun rotayı önerecek sisteme ait araştırmalar, “*A new routing optimization tool-influence of wind and waves on fuel consumption of ships with and*

without wind assisted ship propulsion systems - Yeni bir rota optimizasyon aracı- rüzgâr ve dalgaların rüzgar destekli gemi tahrik sistemleri olan ve olmayan gemilerin yakıt tüketimi üzerindeki etkisi” adlı yayında sunulmaktadır (Bentin vd., 2016).

IMO’nun yakın zamanda daha katı düzenlemelere sahip olan kuralları yürürlüğe koyacak oluşu gemi sevk sistemleri konusunda yenilikçi araştırmaları teşvik etmektedir. Dikey eksenli rüzgâr türbiniyle kombine hale getirilen bir gemi sevk sisteminin, fosil yakıt ihtiyacının yaklaşık %15 azalacağı; böylelikle çevresel ve ekonomik katkıların elde edileceği, “*Techno economic and environmental assessment of wind assisted marine propulsion systems* - Rüzgâr destekli deniz sevk sistemlerinin tekno ekonomik ve çevresel değerlendirmesi” başlıklı çalışmada ifade edilmektedir (Talluri, Nalianda, Kyprianidis, Nikolaidis, ve Pilidis, 2016).

Denizyolu taşımacılığı faaliyetleri kaynaklı salınan sera gazları iklim değişikliğine neden olmakta ve insan sağlığı için tehdit oluşturmaktadır. Bu konuda yapılan bir dizi enerji verimliliği çalışmasının içinde rüzgârın yardımcı sevk sistemi olarak düşünülmesi hem çevre ve insan sağlığı, hem de ekonomik açıdan ön plana çıkmaktadır. Bahsi geçen konuyla ilgili araştırmalar, “*Health costs and economic impact of wind assisted ship propulsion* - Rüzgâr destekli gemi sevkinin sağlık maliyetleri ve ekonomik etkisi” çalışması altında yer almaktadır (Ballini, Ölçer, Brandt, ve Neumann, 2017).

Havadan rüzgâr enerjisi elde eden sistemler alternatif enerji kaynakları içinde en umut verici sistemler olarak görülmektedir. Bunlar içinde, rüzgâr türbini sistemlerinde bulunan ağır ve maliyetli kuleleri hafif halatlarla yer değiştiren paraşüt sistemler, en yenilikçi çözümü sunmaktadır. İstenen en ideal yörüngede, gemiyi paraşüt üzerine etkileyen kuvvetlerin yardımıyla çekmede otomatik yönlendirme sisteminin kullanımı zorunluluk teşkil etmektedir. Bu sistemi kararlı hale getirecek parametrelerin neler olduğu ve nasıl yönetildiği, “*Robust control of a tethered kite for ship propulsion* - Gemi tahriki için bağlı bir uçurtmanın kararlı kontrolü” başlığı altında anlatılmaktadır (Cadalen, Lanusse, Sabatier, Griffon, ve Parlier, 2018).

Paraşüt çekme kuvvetini gerçek koşullar altında doğru bir şekilde hesaplayabilmek için birkaç farklı rota ve gemi kullanılarak değişik meteorolojik şartlar altında test

etmenin yararlı olacağı, “*Fuel economy assessment tool for auxiliary kite propulsion of merchant ship* - Ticari geminin yardımcı uçurtma tahriki için yakıt ekonomisi değerlendirme aracı” adlı çalışmada vurgulanmaktadır. 800 metrekare alana sahip bir paraşütle donatılmış 2.200 TEU kapasiteli bir konteyner gemisinin, 5 yıllık Halifax-Le Havre limanları arasındaki gidiş-dönüş seferlerinin simüle edilmesiyle; ortalama 16 knot seyir hızında %12; 19 knot seyir hızında ise %6,5 yakıt tasarrufu sağlayacağı tahmin edilmektedir (Podeur vd., 2018).

6 metrelik bir tekneye bağlanan farklı türden paraşütlerin, değişen irtifalarda ve hava koşullarında sağladığı itme gücü, “*Benchmark sea trials on a 6-meter boat powered by kite* - Uçurtmayla çalışan 6 metrelik bir teknede deniz denemelerinin test edilmesi” çalışmasında karşılaştırılmaktadır. Paraşütün otomatik ve manuel kontrolü; statik ve dinamik uçuş karakteristiği de deneyler sayesinde test edilebilmektedir. Rüzgâr koşullarına ve teknenin seyir rotasına bağlı olarak bazı durumlarda paraşütü kontrol etmek için dışarıdan verilen enerji paraşütten sağlanan enerjiden daha fazla olmaktadır. Tekne rotası boyunca hava tahmin yöntemlerinin kullanılmasıyla, paraşütün etkin çalışacağı bölgeler önceden seçilebilmekte ve seyir ortalama sevk veriminde artış meydana gelebilmektedir (Roncin, Behrel, Iachkine, ve Leroux, 2020).

Son 15 yılda rüzgâr tahrikli gemi sevk sistemlerindeki gelişmeleri derleyen, “*Wind assisted ship propulsion technologies - Can they help in emissions reduction? - Rüzgâr destekli gemi sevk teknolojileri - Emisyonların azaltılmasına yardımcı olabilirler mi?*” adlı çalışma; geleneksel, kanat ve rijit yelkenler, Flettner rotorlar ve paraşüt sistemlerin avantaj ve dezavantajları özetlemektedir. Gemilerin tasarım parametreleri ve kullanım amaçları, yenilikçi rüzgâr sevk sistemlerinden hangisinin kullanılabileceği hakkında ön bilgi edinmeyi sağlamaktadır. Yakıt tasarrufu yüzdelerine bakıldığında ise, en az %10 ve üzerinde bir yakıt tasarrufu sağlama potansiyeli bulunan sevk sisteminin tasarlanması, gemi sahipleri/işletmecileri açısından sürdürülebilir kabul edilmektedir (Petkovic, Zubcic, Krcum, ve Pavic, 2021)

Gemi güvertesine dikey yönde monte dilmiş ve aktif olarak kontrol edilebilen bir kanat yelkenin aerodinamik parametrelerini iyileştirmeyi amaçlayan, “*Numerical optimisation of a ship wind-assisted propulsion system using blowing and suction over a range of wind conditions* - Bir dizi rüzgâr koşulunda üfleme ve emme kullanan bir

gemi rüzgâr destekli sevk sisteminin sayısal optimizasyonu” adlı çalışmada; 8-12 m/s rüzgâr hızı aralığında ortalama %13,17 verim artışı sağlanabileceği sonucuna varılmaktadır. Deneysel verilerle doğrulanan HAD yöntemi kullanan çalışma, rüzgâr tarafından kanat üzerinde meydana gelen aerodinamik kuvvetleri gemi itme yönünde maksimize ederek enerji tasarrufunu artırmayı hedeflemektedir (Cairns, Vezza, Green, ve MacVicar, 2021).

Yük taşıma kapasitesi 60.000 DWT olan bir kuru yük gemisi için Flettner rotor ve paraşüt sisteminin tasarlandığı, “*Using Flettner rotors and parafoil as alternative propulsion systems for bulk carriers* - Dökme yük gemileri için alternatif tahrik sistemleri olarak Flettner rotorları ve parafoil’i kullanma” adlı çalışmada; rüzgâr destekli sevk sistemi bulunan gemilerin daha fazla üretilmesi için bu teknolojilerin daha anlaşılır kılınması gerektiği belirtilmektedir. Elde edilen bulgular incelendiğinde, Flettner rotorun maksimum yakıt tasarrufu %25,39 iken, paraşüt sistemde bu oran %17,34 olmaktadır. Bu da, her iki sistemin de gemilere kurulumunu teşvik edecek unsurlardan biri olarak ifade edilmektedir (Zhang, Lozano, ve Wang, 2021).

Literatürde yer alan referans çalışmalar incelendiğinde; küresel ısınmayı önleme ve iklim değişikliğini kontrol altına alabilme adına benimsenen çevre koruma politikalarının, işler hale gelebilmesi için önce yasal zeminin oluşturulması gerekmektedir. Bu konuda denizcilik sektöründe en yetkili kuruluş IMO’dur ve zamanla katılan düzenlemelere sahip kuralları yürürlüğe koymaktadır. Kuralların zaman içinde kademeli olarak daha katı hale gelmesinin sebebi ise denizcilikte maliyetlerin yüksek olmasına bağlanmaktadır.

Yapılan araştırmalar incelendiğinde havadan rüzgâr enerjisi elde eden sistemler diğer alternatif enerji kaynaklarını kullanan sistemlere göre daha fazla umut verici görülmektedir. Geleneksel yelkenli gemilerin insanlık tarihinde deniz taşımacılığında yüzlerce yıl kullanılmış olması ve halen hobi amaçlı teknelerde kendine yer bulması, araştırmaların rüzgâr üzerine odaklanmasını teşvik etmektedir. Dikey ve yatay eksenli rüzgâr türbinleri, Flettner rotorlar ve paraşüt sistemler bu kapsamda uygulanmış çalışmalar olarak karşımıza çıkmaktadır. Diğer rüzgâr enerji sistemleri arasında paraşüt sistemler; ağır ve maliyetli yapılar yerine, hafif halatlar ve paraşütleri içermesinden dolayı en yenilikçi çözümü sunmaktadır.

Alternatif enerji kaynaklarının gemilerde kullanımı, kaynak sürekliliği ve depolama koşullarının yarattığı zorluklar sebebiyle genellikle yardımcı sevk sistemi olarak kullanılmalarını günümüz koşullarında zorunlu tutmaktadır. Bu da, alternatif sevk sistemlerinin avantajlarını ve varsa dezavantajlarını ortaya çıkarmanın önemini vurgulamaktadır.

Paraşütler, gemilerde hem elektrik enerjisi üretmede hem de çekme sevk gücü sağlamada kullanılabilmektedir. Özellikle açık denizlerde ana makine yakıt tüketiminin %10 ile %35 arasında azaltılabileceği düşünülen paraşüt sistemlerin verimliliğinin artırılabilmesi için, paraşütün etkin çalışacağı seyir bölgeleri hava tahmin yöntemleri sayesinde önceden belirlenebilmektedir. Böylelikle, paraşüt destekli gemi sevk sistemlerinin performansını artıracak seyir rotası da oluşturulabilmektedir. Ayrıca, dümenin de geminin rotasını korumak için paraşütle senkronize halde çalışma zorunluluğu bulunmaktadır.

Paraşütün rüzgâr ile etkileşimiyle oluşan aerodinamik kuvvetleri hesaplayabilmek için ya rüzgâr tüneli ya da iyi ayarlanmış bir HAD modeli kullanımı gerekmektedir. Ancak bu sayede paraşüt üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetlerin gemi rotasını ve manevrasını nasıl etkileyeceğinin tahmini yapılabilmektedir. Aerodinamik kuvvetin şiddetine etki eden değişkenlerin neler olduğu belirlenmeli ve bunların paraşüt sistemi verimliliği üzerindeki etkilerinin analizi de gerekmektedir. Rüzgârın etkisiyle havada serbestçe veya bir kontrolcü yardımıyla belirlenen bir yörünge üzerinde hareket edebilen paraşütten sağlanan çekme gücünün, paraşütün yörünge üzerindeki tam bir turunda geçirdiği sürenin zaman ortalaması olarak ifade edilmesi, hesaplamalardaki karmaşıklığın azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Rüzgâr enerjisinin gemi yardımcı sevk gücü olarak kullanımı hem çevre ve insan sağlığı hem de ekonomik açıdan ön plana çıkmaktadır.

1.3 Amaç ve Hedefler

Dünya atmosferinin ve yeryüzünün sürdürülebilir koşullara sahip olabilmesi için gerek ulusal gerekse uluslararası tedbirler bulunmaktadır. Bu hususlar kapsamında, fosil yakıt türlerinin kullanımına kısıtlama getirilmekte ve alternatif enerji kaynaklarının artan oranda kullanımı teşvik edilmektedir. Bu bağlamda

gerçekleştirilecek olan bu çalışma, günümüzde gemilerin sevkinde en geniş yelpazede kendine kullanım alanı bulan içten yanmalı makinelerle olan ihtiyacı azaltmayı amaçlamaktadır. Karbon içeren yakıtların kullanımında sağlanacak kısıtlama sayesinde çevreye zararlı bileşiklerin oluşumunda azalma beklenmektedir.

Yukarıda belirtilen amaç doğrultusunda; akademik çalışmalarda sıklıkla rastlanılan ve model gemi havuz deneyleri çeşitli laboratuvarlarda yapılan KRISO konteyner gemisi (KCS) ile uyumlu boyut ve özelliklere sahip yardımcı paraşüt sevk sisteminin tasarımı hedeflenmektedir. Belirli bir rotada gidiş-dönüş seferi yapacak olan bu konteyner gemisine ait yardımcı sevk sisteminin katkıları ve gerekli ana makine gücündeki azalmayla birlikte yaşanacak yakıt sarfiyatındaki tasarruf oranı mevsimsel etkiler göz önünde bulundurularak hesaplanmaktadır.

1.4 Araştırmanın Önemi

Gemilerden kaynaklı CO₂ emisyonlarını azaltmanın tek yolu karbon içeren yakıt bileşenlerini daha az kullanmaktır. Bu çalışma, yenilikçi bir sevk sistemi olma yolunda çeşitli araştırmalarla etkinliği test edilen paraşüt sistemlerin, gemilerde özellikle açık deniz seyri sırasında kullanımını teşvik etmektedir. Yapılan araştırma, bu sistemlerin gemi enerji verimliliğine olan katkılarını hem çevresel hem de ekonomik boyutta değerlendirebilmek için gerekli detayları sunmayı hedeflemektedir. Her geminin gerek tür ve boyut, gerekse çalışma bölgesinin birbirinden farklı oluşu, bu konuda yapılmasına ihtiyaç duyulan çalışma sayısını artırmaktadır. Üzerinde çeşitli gemi direnç hesapları yapılan KCS'nin, bir konteyner gemisi olması ve dünya konteyner gemi trafiği verisinin incelenmesiyle; Kuzey Pasifik Okyanusu'nun en yoğun konteyner taşımacılığı yapılan bölge olması sebebiyle, araştırma gemisinin bu seyir bölgesinde çalıştığı üzerine analizler yapılmaktadır. Gemi türünü ve çalışma koşullarını bilmek, her geminin kendine uygun paraşüt sistemini tasarlayabilmek için gerekli bir koşul olsa da, rüzgâr ile etkileşim halinde olan paraşütün üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler hakkında da bilgi sahibi olmak gerekmektedir.

Bu çalışma, ayrıca geminin seyir süresinde paraşüt sisteminden daha fazla fayda sağlayabilmesi için de tavsiyelerde bulunmaktadır. Paraşüt sevk sisteminden sağlanacak ek çekme kuvvetinin tahmini, HAD yöntemi kullanılarak yapılmaktadır.

Bu sayede, gelecekte yapılacak ve paraşüt yardımcı gemi sevk sistemlerini konu edinen çalışmalara yol gösterici bir kaynak olma niteliği de bulunmaktadır.

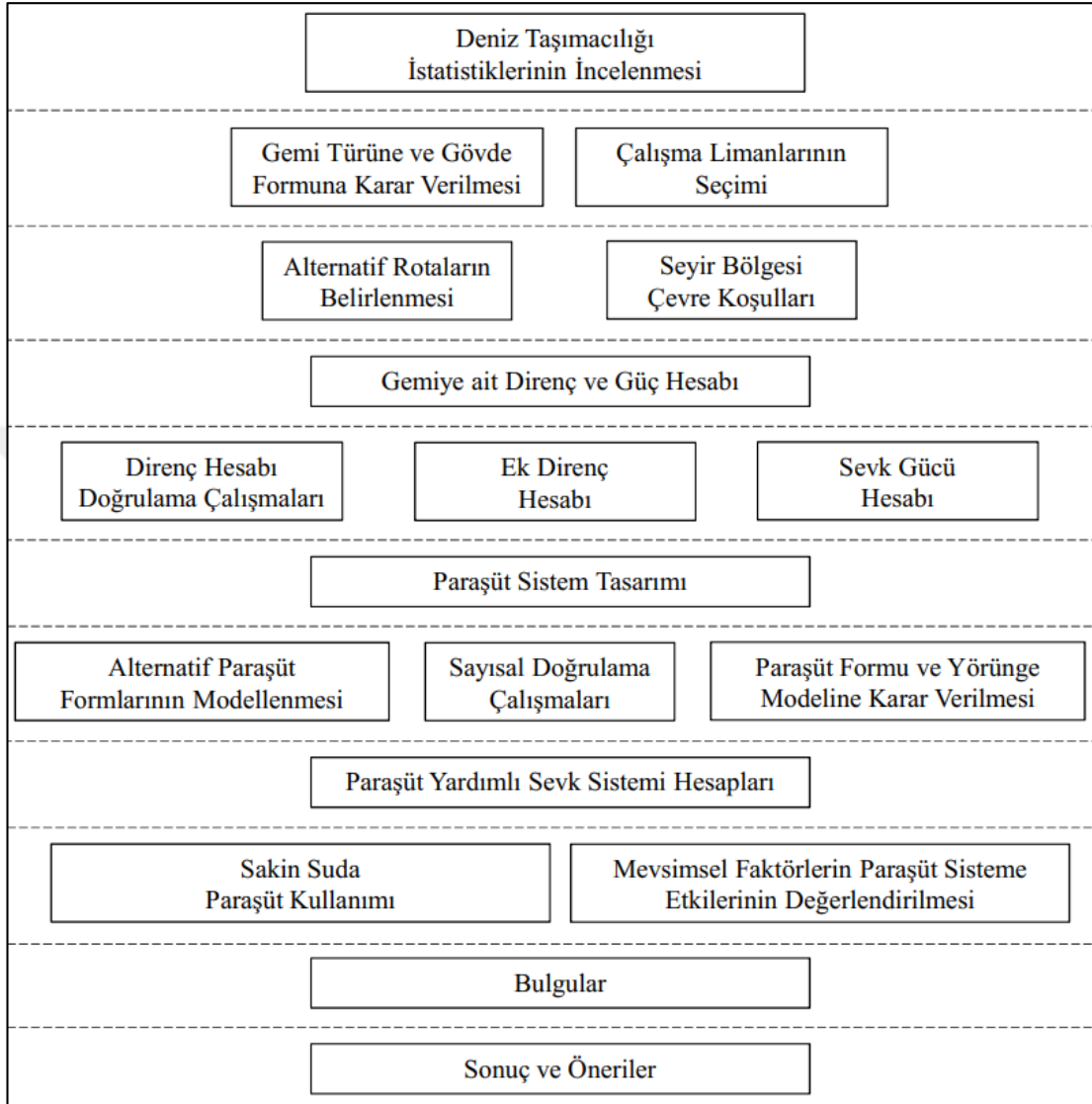
1.5 Kısıtlar ve Araştırma Modeli

Bilimsel çoğu araştırmada olduğu gibi, bu çalışmada da bulunan bir takım kısıt ve kabuller; problemin çözümündeki karmaşıklığın azaltılması ve anlaşılabilirliğin artırılmasında kritik rol oynamaktadır. Fakat bu kısıt ve kabullerin varlığı, elde edilecek sonuçların gerçek değerlerden uzaklaşılması anlamına gelmemektedir. Bu çalışmada, konvansiyonel sevk sistemine sahip bir geminin yalnızca okyanus aşırı seyrine ait enerji ihtiyacı irdelenmeyip; bu geminin paraşüt destekli bir sevk sistemine sahip olması durumundaki enerji verimliliği, farklı çevresel koşullar altında değerlendirilmektedir. Çevre koşulları kaynaklı tam boyutlu gemi ek direncinin hesabı söz konusu olduğunda, geminin dalgaları baştan aldığı ve sabit yoğunluklu deniz suyunda ($\rho=1,025 \text{ t/m}^3$) yüzdüğü, rüzgârın dalga ilerleme yönünde hareket ettiği ve akıntı direncinin göz ardı edildiği kabul edilmektedir. Gerçek koşullar altında geminin ve paraşütün altı serbestlik derecesinde hareket ediyor oluşu, çözüm için belirli kısıtların bulunması gerekliliğini desteklemektedir. Bunlardan:

- Geminin eksenel ve açısal harmonik ve/veya harmonik olmayan hareketlerinin paraşüt kontrolcü sistemi tarafından tolere edilebildiği,
- Paraşüt uçuşunun Bölüm 7.4.4'te belirlenen parametreler altında kontrol edilebildiği,
- Rüzgârın paraşüte gelişi esnasında laminar hava giriş koşulu, paraşütten sağlanacak ek çekme kuvvetini hesaplarken kullanılan en önemli kısıtlar olarak ifade edilmektedir.

Rüzgârın, yeryüzünün farklı konumlarında; kıyı bölgesinde, şehir merkezinde, dağlık alanda, açık denizde, farklı hız ve davranış göstermesi, rüzgâr enerji potansiyelini etkilemektedir. Bu çalışmada, Kuzey Pasifik Okyanusu'na ait rüzgâr durumu, okyanus aşırı sefer yapan paraşüt yardımcı sevk sistemine sahip bir gemi için değerlendirilmektedir. Paraşüt yardımcı sevk sistemi birçok mekanik ve elektronik ekipmandan meydana gelmektedir. Bunların hangi malzemeden üretildiği, dayanıklılığı ve kullanım ömrü bu araştırmanın kapsamı dışında tutulmaktadır. Bu

parçaların beklenen işlevleri konum ve zamandan bağımsız olarak yerine getirebildiği kabul edilmektedir.



Şekil 1.2 Araştırma modeli şablonu

Paraşüt sistemler konusunda araştırma ve değerlendirme yapmayı amaçlayan bu çalışma için oluşturulmuş araştırma modeli Şekil 1.2’de yer almaktadır. Bu modeldeki işlem basamakları kendi içlerinde soldan sağa doğru ilerlerken, çalışmanın geneli yukarıdan aşağıya doğru ilerleyen bir yapıya sahiptir.

Paraşüt sisteminden gemi ek çekme kuvveti olarak fayda sağlanırken, bu sisteme ait uçuş parametreleri, irtifa ve 8-şekilli yörünge formu önem kazanmaktadır. Eğer bir paraşütün havadaki uçuşu kontrol altına alınamıyorsa beklenen çekme kuvveti

üretimi de gerçekleşmeyecektir. Bu sebeple, incelemeler yapılırken, paraşütün karar verilen yörünge üzerinde belirlenen uçuş açılarına sahip olduğu kabulü göz önünde bulundurulmaktadır.

Rüzgâr enerjisinin alternatif enerji kaynağı olarak gemilerde kullanımı konusunda paraşütlerden yararlanan çalışmalar günümüzde yeterli sayıda değildir. Rüzgâr enerjisi konusunda kara ve denizde gelenekselleşmiş diyebileceğimiz uygulama ise yatay eksenli rüzgâr türbinleridir (Jannis, 2012). Rüzgâr türbinleri konusunda gerek mühendislik gerekse de ekonomik veriye ulaşma imkânı daha fazladır. Bu imkânın henüz paraşüt sistemlerde olmayışı, bu konudaki fayda/maliyet oranı hakkında gerçeğe yakın tahminler yapabilmenin önünde engel teşkil etmektedir. Gelecekte yapılacak yeni paraşüt sistem uygulamalarının bu konudaki bilgi birikimine katkısı sayesinde, birçok teknik ve ekonomik sorunun cevabı bulunabilecektir.

BÖLÜM İKİ

GEMİLERDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ UYGULAMALARI

Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO), 2012 yılında gemilerden kaynaklı toplam egzoz gazı salımını 949 milyon ton olarak tahmin etmekte ve küresel emisyonun %2,7'si olarak nitelemektedir (Dewan, Yaakob, ve Suzana, 2018). 2050 yılına gelindiğinde ise 2012 yılına göre %50-250 aralığında bir artış öngörülmektedir. Mevcut ve gelecekteki küresel emisyon azaltma hedeflerini karşılamak için enerji verimliliği tasarım ve operasyonel önlemlerinin uygulanmasıyla tüm sektörde önemli değişikliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Her projede olduğu gibi gemi tasarım projelerinde de enerji verimliliği konusu tasarım aşamasında başlayıp, inşa ve operasyon alanındaki uygulamalarla desteklenmektedir. Gemilerde enerji verimliliği konusunda alınabilecek önlemler Tablo 2.1’de özetlenmektedir.

Tablo 2.1 Gemilerde enerji verimliliği önlemleri (Sunneland ve Dufourq, 2018)

Uygulama alanı	Amaç	Önlemler
Makine sistemleri	Ana makine ve Yardımcı makinelerin verimlilik artışı	Yardımcı sistemlerin optimizasyonu
		Otomatik makine performans optimizasyonu
		Ana makine devir düşümü
		Manuel makine performans kontrolü
		Egzoz gazının yardımcı makinelerde kullanımı
		Hibrit tasarım
		Yardımcı makinelerde güç ayarlaması
		Şaft jeneratörü kullanımı
		Kara elektriği kullanımı
		Atık ısı geri kazanımı
Sevk ve tekne veriminde iyileştirmeler	Hidrodinamik performansın iyileştirilmesi	Tekne yüzeyine hava kabarcığı enjekte etmek
		Tekne temizliği
		Tekne kaplaması
		Tekne formu optimizasyonu
		Tekne modifikasyonu
		Sevk verimini artıran donanımlar
Enerji tüketicileri	Donanımların operasyon süresince enerji ihtiyacını optimize etmek	Pervanelerde verim artışı
		Verimli aydınlatma sistemi kullanımı
Operasyonel optimizasyonlar	Operasyon verimliliğini artırma	Değişken frekanslı donanım kullanımı
		Otopilot uygulamaları
		Trim/Su çekimi optimizasyonu
		Hava tahmini ile rota optimizasyonu

Tasarım aşamasında, tekne gövdesi ve sevk sistemi kapsamında yapılan uygulamalar olmak üzere iki ana başlık bulunmaktadır. Operasyonel alandaki uygulamalar ise, en genel ifadeyle bakım-tutum, gemi yönetimi ve planlama konularında olmaktadır. Gemi tasarımını EEDI’da vurgulanan indeks seviyesine uygun hale getirebilmek için; gerekli sevk gücü, gemi hızı ve deplasmanı, ana/yardımcı makine özgül yakıt tüketimi ve boş gemi ağırlığının, “*boy × genişlik × derinlik*”e oranını gösteren Admiralty katsayısının değerlendirilmesi gerekmektedir (Garbatov ve Georgiev, 2021). Bölümün devamında enerji verimliliği uygulamaları detayları ile anlatılmaktadır.

2.1 Tasarım Uygulamaları

Son yıllarda çevre örgütleri ve dünyadaki endüstriyel yönelimin enerji tüketimini azaltmaya yönelik olması ve IMO’nun da bu yenilikler ile yakından ilgilenmesi sebebiyle, ana makine tahrik sistemlerinin geliştirildiği ve gövde tasarımlarının iyileştirildiği bilinmektedir (Faitar ve Novac, 2016). Gemi tasarım süreçleri ardışık ve birbirini etkileyen iteratif işlemlerden oluşmaktadır. Teknik ve ekonomik performansın değerlendirildiği, alınan karar ve seçimlerin bütün sisteme etkilerinin göz önünde bulundurulduğu bir döngünün varlığından söz edilmektedir. Gemi sahibinin istekleri ve ulusal/uluslararası teknik kriterlerin değerlendirilmesiyle (Gonca, 2009):

- Gemi tipi seçimi,
- Nihai boyutların belirlenmesi,
- Gövde formuna karar verilmesi,
- Gemi direnç ve güç hesaplarının yapılması,
- Ana ve yardımcı makinelerin seçilmesi,
- Ağırlıkların ve ağırlık merkezinin hesaplanması,
- Deplasman ve taşıma kapasitesinin hesaplanması,
- Stabilitate ve denizcilik hesaplarının yapılması,
- Maliyet ve kârlılığın analiz edilmesi zorunluluğu bulunmaktadır.

Böylece, kapsamlı ve detayları belirlenmiş unsurlara karar verilerek, daha çevre ve kullanıcı dostu gemi tasarımları yapılabilmektedir. Yeni gemiler için EEDI en önemli

teknik önlemdir ve enerji verimliliği daha fazla olan (daha az kirletici ve daha az enerji ihtiyacı olan) donanım ve makinelerin kullanımını teşvik etmeyi amaçlamaktadır (Vakili, Ölçer, ve Ballini, 2021). EEDI, farklı gemi türleri ve boyut segmentleri için “*kapasite x deniz mili*” başına minimum enerji tüketim seviyesini (örneğin ton.mil) talep etmektedir ve 1 Ocak 2013’ten bu yana, ilk iki yıllık sıfır aşamasını takiben, yeni gemi tasarımının gemi tipi için referans seviyesini karşılaması gerekmektedir (IMO, 2022). Seviye, her beş yılda bir kademeli olarak sıkılaştırılmaktadır ve bu nedenle EEDI’dan, tasarım aşamasından itibaren bir geminin yakıt verimliliğini etkileyen tüm bileşenlerde sürekli inovasyonu ve teknik gelişimi teşvik etmesi beklenmektedir (MEPC, 2011). EEDI, belirli bir gemi tasarımında kullanılacak teknoloji seçimlerini endüstriye bırakan, kural koyucu olmayan, performansa dayalı bir mekanizmadır. Gerekli enerji verimliliği seviyesine ulaşıldığı sürece, gemi tasarımcıları ve inşacıları, geminin düzenlemelere uyması için en uygun maliyetli çözümleri kullanmakta özgürdür (MEPC, 2009). EEDI, geminin kapasite mili başına gram karbondioksit (CO₂) cinsinden ifade edilen, her bir gemi tasarımı için belirli bir sayısal değer sağlamakta (EEDI ne kadar küçükse, enerji açısından daha verimli gemi tasarımı anlamı çıkmaktadır) ve teknik tasarıma dayalı bir formülle hesaplanmaktadır.

2.1.1 Gövde Tasarımı

Gemi tasarımında en temel ve en önemli husus, geminin su ile doğrudan temas halinde olduğu ve gerekli sevk gücünü doğrudan etkileyen gövde formunun belirlenmesidir (Takinaci, 2006). Dökme yük, konteyner ve tanker gibi konvansiyonel gemi tiplerinde; geminin boyu, genişliği, boy/genişlik oranı, su çekimi, genişlik/su çekimi oranı gibi değerlerin enerji verimliliğine en üst derecede katkısı bulunmaktadır (Hasan, 2011). Ayrıca, gemi gövdesinin kış bölümüne ait bünyesel ve ek donanım tasarımları, gemi ardıl dalgalarını azaltacak ve pervane-dümen etkileşimini artıracak etkiye sahiptirler (Gürsel, Taner, Ünsalan, Neşer, ve Altunsaray, 2020). Bunun yanında, gemi gövdesinin deniz suyu ile buluştuğu ıslak yüzeye hava kabarcıkları (air lubrication) göndermenin toplam gemi direncini azalttığı, böylece mevcut kurulu güç ile daha hızlı gidilebildiği ya da aynı hız için daha az güç gereksinimine ihtiyaç duyulacağı da söylenebilmektedir (Kawabuchi vd., 2011).

Bir geminin tam ve kesin toplam direncini rüzgâr ve dalgada indüklenen hız kaybı esasına dayanarak hesaplama ve ana makine-pervane eşleşmesi göz önüne alınarak elde edilecek gerekli güç hesabına karar verme sürecinde gövdenin iyileştirilmesi, akışkanlar dinamiğinin sunduğu teorilerle desteklenerek yapılmaktadır (Luo, Ma, ve Hirakawa, 2016). Bu süreç gerek istatistiki gerekse de matematiksel modellerle desteklenerek uygun form tasarımları yapılabilmektedir. IMO'nun EEDI ve EEOI düzenlemeleri göz önüne alındığında, dalgalarla birlikte ilerleyen gemilerin ilave direncinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi; ek direnç bileşenlerinin, dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketine ait değerlerin tahminini gerektirmektedir (Seo, Park, ve Koo, 2017). Dalga boyunun gemi boyuna eşit veya çok yakın olduğu durumlar için yapılacak hesaplamalarda belirsizliklerin artacağı da bilinmektedir.

Tekne gövdesi konvansiyonel olarak; su ile doğrudan karşılaşan ön bölüm, paralel orta bölüm ve suyun gemiyi terk ettiği ve aynı zamanda pervaneye yönlendirildiği kıç bölümden oluşmaktadır. Bu bölümlerin yüzme merkezleri, ağırlık merkezlerinin boyuna yeri, boyutları ve birbirlerine geometrik benzerliği geminin hidrodinamik performansını etkilemenin yanında, gemi direncini de doğrudan etkilemektedir (Papanikolaou, Harries, Wilken, ve Zaraphonitis, 2011). Ayrıca, gemi gövde elemanlarının (omurga, postalar, en ve boy perdeleri, vb.) geometrik ve boyutsal özellikleri de geminin yapısını etkileyeceği için hidrodinamik performansın etkilenmesi sebebiyle gemi direncinde olumlu/olumsuz sonuçlar meydana gelmektedir. Diğer mühendislik dallarında olduğu gibi gemi inşa mühendisliğinde de optimizasyon probleminin karmaşık oluşu doğrusal olmayan, süreksiz ve çok modlu fonksiyonların kullanımını gerektirmektedir (Galvez ve Iglesias, 2013). Geleneksel sayısal optimizasyon yöntemleri yerine Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization [PSO]), Çok Adalı Genetik Algoritma (Multi-Island Genetic Algorithm [MIGA]) ve Uyarlamalı Benzetilmiş Tavlama Algoritması (Adaptive Simulated Annealing Algorithm [ASA]) gibi optimizasyon algoritmaları geliştirilmektedir (Nikbakht, Kamarian, ve Shakeri, 2019). Bu sayede, EEDI konusunda deterministik bir yaklaşıma erişilmektedir.

2.1.2 Sevk Sistemi Tasarımı

Her ne kadar ideal boyut ve formda gemi gövde tasarımı yapılırsa yapılsın, uygun makine ve sevk sistemi seçilmediği takdirde enerji verimliliği açısından artışın beklendiği kadar olmayacağı öngörülmektedir (Zhao, Yang, Tan, Chou, ve Yu, 2015). Toplam kurulu makine gücü, ana makine tipi ve adedi, pervane-dümen adedi ve tipi gibi birçok değişkenin etkisi bu kapsamda irdelenecek konu başlıkları arasında yer almaktadır.

Gemi sevk makinelerine entegre edilebilecek enerji verimliliği uygulamalarından, atık ısıdan geri kazanım teknolojisi, öne çıkan diğer bir uygulama yöntemidir (Nielsen, Haglind, ve Larsen, 2014). Egzoz gazlarından elektrik enerjisi üretimi ile sistemin elektrik enerjisi ihtiyacının bir bölümü karşılanmaktadır. Böylelikle ana makine ve yardımcı sistemlerin enerji ihtiyacı egzoz gazından karşılanmakta ve ilave yakıt tüketimini gerektirecek durumlar kısmen de olsa azalmaktadır.

Konvansiyonel gemi sevk sistemi tasarlamının yanı sıra, hibrit tahrik sistemlerinin uygun makine ve ekipmanlarla kombinasyonu ilgi çeken araştırma türlerindendir. Alternatif olarak, sınırlı sayıda çalışma moduna sahip gemiler, bir dişli kutusu aracılığıyla, birden fazla şaft ve/veya bir şaft üzerinde birden fazla ana makineye sahip tahrik sistemini kullanabilmektedir. Bu motorlar aynı türden veya farklı türlerden olabilmektedir. Birden fazla motora ve şafta sahip bu tür konfigürasyonlar sevk verimliliğini artırmaktadır (Altosole, Figari, Viviani, Michetti, ve Trapani, 2010). Kombine Dizel veya Gaz Türbini (Combined Diesel or Gas [CODOG]) ve Kombine Dizel ve Gaz Türbini (Combined Diesel and Gas [CODAG]) sistemleri bu konuda verilecek örneklerden birkaçıdır. CODOG sisteminin optimum uyumu için bir kontrol mekanizması tasarlanarak, kontrol edilebilir hatveli pervane (Controllable Pitch Propeller [CPP])'ye sahip bir gemide sistem verimliliği kontrol edilebilmektedir (Ogar, Nitonye, ve John-Hope, 2018). Bu sayede, hem ana makinelerin hem de gövde tasarımının performansı analiz edilebilmektedir. Pervane-makine-gövde formu eşleşmesinde karar verme sürecine katkı sağlayacak Yapay Sinir Ağları, Genetik Algoritma gibi yöntemlerin kullanımı günümüzün ilgi alanlarından (Koenhardono, Djatmiko, Soeprijanto, ve Irawan, 2014). Günümüzde birçok firkateyn CODOG ve CODAG sevk sistemini kullanmaktadır. Buna ilave, Avrupa ülkeleri ve Amerika

Birleşik Devletleri Donanması yeni tasarımlarında hibrit veya tamamen elektrikli tahrik sistemlerine gemilerinde yer vermektedir. Ayrıca, donanmalardaki küçük gemilerde içten yanmalı ana makinelerden güç alan tahrik sistemlerinin kullanımı devam etmektedir (Nguyen vd., 2020).

Gemilerde yaşam mahalli ve yardımcı makinelerin güç ihtiyacı elektrik enerjisinden sağlanmaktadır. Eğer, gemi tahrikini de elektrik enerjisinden sağlarsak elektrik motorlarını farklı işlemler için bir arada kullanma imkânı elde edilebilmektedir (Hansen ve Wendt, 2015). Yapılacak kombine sistem tasarımına eklenecek olan güç yönetim sistemi sayesinde jeneratörlerin kısmi yükte çalışma durumu ortadan kaldırılarak verimsiz çalışma durumunun önüne geçilebilmektedir. Bir gemiyi sevk ederken kullanılacak bir veya iki adet ana makine yerine, gerekli toplam sevk gücünü sağlayacak daha çok sayıdaki jeneratör kullanılmasıyla, optimum makine işletim kriterleri farklı gemi hızları için temin edilebilmektedir (Prousalidis, Tsekouras, ve Kanellos, 2011). Bu sayede özgül yakıt tüketiminin azalmasıyla kirletici maddelerin salımı da beraberinde azalmaktadır (MEPC, 2011). Kullanılmayan jeneratörün devreden çıkarılması, gerek bakım maliyetinin gerekse de konforun bir unsuru olan gürültünün azalması anlamına gelmektedir (Nuchturee, Li, ve Xia, 2020). Sevk sistemi için gerekli olan elektrik enerjisini, gemi üzerinde bulunan bir jeneratör sisteminde üretmenin yanı sıra; kara bağlantısı veya üzerinde taşıdığı güneş panelleri vasıtasıyla batarya grubunda depolayabilen hibrit sistemler de kurulabilmektedir. Bu konuda verilecek örneklerden bir tanesi de, İzmir Kalkınma Ajansı ve Dokuz Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi'nin desteklediği TR31/12/YE02/0015 numaralı proje kapsamında inşa edilen “Yeşil Eylül” teknesidir (Konur ve Erginer, 2016). Elektrikli tahrik sistemlerinde, geleneksel makine dairesi düzeninin bulunmaması nedeniyle, makine mahallerinin konumlandırılmasında da esneklik sağlanabilmektedir.

Gemilerde en çok kullanılan pervane çeşidi sabit hatveli pervanedir (Fixed Pitch Propeller [FPP]) ve bu tür bir pervaneyi tersine çevirmek için ya makineyi durdurmak ya da dişli kutusu kullanmak gerekmektedir. Alternatif olarak kullanılan CPP'leri durdurmadan pozitif ve negatif itme elde edilmektedir (Pergande, Wang, Neitzel-Petersen, ve Abdel-Maksoud, 2017). Pervane konusunda hem kötü hava koşullarından

etkilenmemek hem de sevk verimliliğini iyileştirebilmek için ters dönüşlü pervanelerin (Contra Rotating Propellers [CRP]) tahrik sistemine katkı sağladığı da bilinmektedir (Sasaki, Kuroda, Fujisawa, Imoto, ve Sato, 2009). İtiş sağlayan diğer yapıların; su jetleri, yüzey yarıcı pervaneler, sikloid pervaneler ve çarklar olduğu söylenebilmektedir (Zhao vd., 2015). Yıllar boyunca pervane ve dümen üzerinde yapılan değişiklikler/eklentiler (nozüllü pervane, Kappel pervane, pervane göbeği kanatçıkları, dümen balbı, vb.) ile enerji verimliliği artışının %10'a kadar başarıldığı uygulamalar bulunmaktadır (De Kat ve Mouawad, 2019).

Gemi yakıtı olarak günümüz öncesinde sıklıkla maliyet unsuru göz önünde bulundurularak kullanılan ağır dizel yakıt (Heavy Fuel-Oil [HFO]) yerine daha çevreci yakıtların kullanımı tavsiye edilmektedir (MEPC, 2016). Bu yakıtları kullanan gemilerin inşası/dönüşümü mevcut teknoloji altyapısıyla yapılabilmektedir. Fakat bu konuda en büyük sorun alternatif yakıtın gemiye temini ve depolanması konusundaki zorluklardır (Svanberg, Ellis, Lundgren, ve Landalv, 2018). Günümüzde; sıvılaştırılmış doğalgaz (liquified natural gas [LNG]), elektrik, biyodizel ve metanol'ün gemi sevk sisteminde enerji kaynağı olarak kullanımına ait yaygın uygulamalar bulunmaktadır. Gelecekte ise, sıvılaştırılmış petrol gazı (liquified petroleum gas [LPG]), etanol, dimetil eter, biyogaz, sentetik yakıtlar, hidrojen ve nükleer enerji kullanımı daha da önem kazanacaktır (Xing, Stuart, Spence, ve Chen, 2021). Tüm bu yakıtların neredeyse hiç kükürt içermemesi, geleneksel yakıtların yerini alabileceğini göstermektedir. Örneğin; LNG ve HFO arasında yapılan bir karşılaştırma sonucunda, LNG kullanan bir geminin EEDI değeri daha düşük elde edilmektedir (Kocal, 2020). Hidrojen Geçişli Membranlı Yakıt Pillerinin (Proton Exchange Membrane Fuel Cells [PEMFC]) üretim maliyetinin düşürülmesiyle son yıllarda denizcilik uygulamalarına artan bir ilgi bulunmaktadır. PEMFC daha iyi güç yoğunluğu ve hidrojen geçiş performansı sunarken, düşük verimlilikte ve daha az yakıt seçeneğine sahiptir (Wu ve Bucknall, 2020). Böyle bir yakıt pili sisteminin uygulandığı gemi, kısa rotalarda ve gerektiğinde karadan elektrik enerjisine ulaşabilen hibrit tahrikli tasarıma sahip olursa; yeterli ve güvenilir sevk gücüne, alternatif sistemlerin sunduğu rekabetçi ve çevre dostu teknolojilere erişme yeteneğine kavuşmaktadır. AC/DC güç dönüştürücüler yardımıyla elektrikli tahrik sistemlerini besleyen hibrit enerji depolama sistemlerine eklenen süper kapasitörler ile pil

paketlerinin entegrasyonu güç yönetim sistem stratejilerinin uygulanmasını gerektirmektedir (Balsamo, Capasso, Lauria, ve Veneri, 2020).

2000 yılında dünyanın ilk güneş/rüzgâr hibrit gemisi Avustralya’da tasarlanan “Solar Sailor” adlı çift gövdeli yolcu gemisidir ve daha geniş güneş paneli alanına ve daha geniş kapasiteli şarj edilebilir bataryaları olan versiyonu ise “Euphony Ace” adıyla 2005 yılında Japonya’da tasarlanmıştır (Yuan, Zhang, Shen, Yan, ve Long, 2018). Dünyanın ilk güneş hibrit kargo gemisi ise 2008 yılında tasarlanan; 200 metre uzunluğa ve yaklaşık 60.000 ton deplasmana sahip “Auriga Leader” dir (Wang, 2021). Örnekleri verilen güneş enerjisiyle çalışan gemilerin en büyük dezavantajı elektrik enerjisinin kesintili üretilmesinden dolayı diğer güç kaynaklarıyla birleştirilme ihtiyacının olmasıdır (Kurniawan, 2016). Ayrıca güneş paneli kurulum alanının sınırlı olması da hibrit sistem tasarımını zorunlu hale getirmektedir. Örneğin; güneş enerjisi ve dizel ana makinenin birlikte kullanıldığı hibrit bir gemide çevresel ve ekonomik analiz sonucunda önemli miktarda tasarruf oranlarına ulaşılmaktadır (Lee, Shin, Yoo, Choi, ve Kim, 2013).

Modern denizcilik sevk sistemleri düşünüldüğünde; konu rüzgâr gücünü kullanmak olduğunda, ister esnek ister rijit (katı) yelken kullanılıyor olsun, aerodinamik verimliliğin rüzgâr hızına bağlı olduğu unutulmamalıdır (Rutkowski, 2017). Tüm bunları göz önünde bulundurarak hidrofoil ayakların takıldığı yelkenli katamaranlar inşa edilerek daha yüksek bir sevk verimine ulaşılmaktadır. Ne yazık ki bu tasarım sadece yarış teknelerine uygulanabilmektedir (Bencatel, Keerthivarman, Kolmanovsky, ve Girard, 2021). Ticari görev yapan bir tekne için veya denizde konfor arayan bir yolcu gemisi için bu senaryo geçerli olmamaktadır. Alternatif olarak, gemilerde rüzgârın kullanımı konusunda ise dikey ve yatay eksenli rüzgâr türbinlerine, Flettner rotorlara ve paraşüt sistemlere ait uygulamalar bulunmaktadır (Dadd vd., 2011). Alışılmışın dışında ve yenilikçi bir deneysel çalışma olan “Revelation II” teknesi günümüz gemi ve deniz teknolojisine farklı bir boyut kazandırmaktadır (Yiğit, 2018).

2.1.3 Enerji Tasarruflu Donanım Seçimi

Gemilerin elektrikle çalışan donanımları, gemi elektrik şebekesi üzerinde önemli bir enerji tüketim unsurudur. Gemi boyutlarının büyümesiyle gemi enerji tüketimi üst seviyelere çıkmaktadır. Elektrik gücünü zamanında ve yeterli seviyede tedarik etmeye çalışmaksa gemi elektrik altyapısında baskı oluşturmaktadır (Jafarzadeh, Pedersen, Notti, Sala, ve Ellingsen, 2014). Bu da, uzun bir sefer için geminin sınırlı enerji kaynağına sahip olduğunda, elektrikli ekipmanın yavaş çalıştırılması nedeniyle gemi seyrini olumsuz yönde etkileyebilecek durumların ortaya çıkma ihtimalini artırmaktadır (Koumentakos, 2019). Enerji tasarrufu ve çevre koruma çağında bulunmamız dolayısıyla, gemi elektrik ekipmanı için enerji tasarrufu sağlayan teknolojilerin geliştirilmesi üzerine araştırmalar odak noktası haline gelmektedir.

Gelecekte; güverte üstü yaşam mahalli olmayan, balastsız ve dışarıdan yardım almadan demirleyebilen gemilerin tasarlanması beklenmektedir. Mürettebatın yaşam mahallinin ortadan kaldırılması, ilgili donanım ve tesislerin de kaldırılması anlamına gelmektedir. Bu da, gerekli yardımcı ekipman gücünün azaltılarak, minimize edilen elektrik yükü sayesinde, bu sistemler için daha az yer ayrılmasını ve enerji kaynağının daha küçük bir hacimde depolanmasını desteklemektedir (Allal, Mansouri, Youssfi, ve Qbadou, 2018).

Gemilerdeki deniz suyu soğutma sistemi, makinelerin ve ekipmanların güvenli çalışma koşullarından biri olan sıcaklığın kontrolünü sağlamaktadır. Özellikle büyük tonajlı gemilerde en çok enerji tüketen ikinci sistem olan soğutma sisteminde, elektrikle çalışan deniz suyu pompaları sebebiyle sürekli olarak büyük miktarda enerji tüketimi gerçekleşmektedir (Qi, Jiao, Tang, Chu, ve Shi, 2017). Sonuç olarak, optimize edilmiş bir soğutma sistemi gemi enerji tasarrufu konusunda mühendislik araştırması yapılmasını gerektirmektedir. Başka bir örnek verilecek olursa; gemilerde kullanılan iklimlendirme elemanlarının çalışma koşullarını belirlerken kapalı ortam içindeki personel ve donanımın dağılımı da önem arz etmektedir (Zhu, 2020). Ayrıca, ideal sıcaklık ve nem koşulunu sağlayabilmek için de hızı ayarlanabilir fan ve kompresörlerin seçimi çevresel gerekliliklerin sağlanmasında etkilidir. Bu sebeplerle, yaşam ve yük mahallindeki iklimlendirmeyi otomatik olarak ayarlayabilen ekipmanın kullanımı sayesinde enerji tasarrufu hedeflerine ulaşabilmektedir.

Gemilerdeki elektrikli ekipmanların mürettebat tarafından kullanım verimliliği, enerji tasarrufuyla doğrudan ilişkilendirilmektedir. Geminin seyri sırasında aktif olarak kullanılmayan bir donanımın seyir boyunca tam kapasiteyle çalışmaya devam etmesi sürekli bir güç ihtiyacını meydana getirmektedir (Nguyen vd., 2020). Bu tür donanımlarda kademeli çalışma koşullarının ayarlanması verimliliğin artışına neden olmaktadır. Gemilerdeki farklı ekipmanlar için çeşitli enerji tasarrufu teknolojilerini seçebilmek için çevre değişkenlerin tespiti ve gemi elektrik tüketiminin analizi yüksek önem arz etmektedir (Kavvadias, Tosios, ve Maroulis, 2010).

2.2 Operasyonel Uygulamalar

Gemilerin seyrüsefer ve operasyon gereksinimlerine göre uygun makine-sevk sistemi konfigürasyonları, gemi tasarım aşamasında belirlenmektedir. Bununla birlikte, çeşitli çevresel faktörler altındaki gemilerin, ek seyrüsefer ve işletme gereksinimleri nedeniyle konfigürasyon zorunlulukları ortaya çıkmaktadır. Bir geminin enerji verimliliğini uygun maliyetli bir şekilde iyileştirmek için zemin hazırlayan operasyonel önlemler, SEEMP ve EEOI altında yer almaktadır. EEOI kullanılarak zaman içindeki gemi ve filo verimlilik performansı yönetilebilmektedir. Yeni ve mevcut gemiler için SEEMP'nin geliştirilmesine ilişkin öneriler, yakıt açısından verimli gemi işletimi sağlama adına en iyi uygulamaları ve ayrıca EEOI'nin gönüllü kullanımını içeren kılavuzları, MEPC.1/Circ.684'te yer aldığı şekliyle kapsamaktadır. EEOI, operatörlerin çalışan bir geminin yakıt verimliliğini ölçmesini ve operasyondaki herhangi bir değişikliğin etkisini değerlendirmeyi sağlamaktadır. Örneğin; gelişmiş seyir planlaması, daha sık pervane temizliği, atık ısı geri kazanım sistemlerinin kullanımının teşvik edilmesi ve mevcut pervanenin yenisiyle değiştirilmesi gibi teknik önlemler EEOI sayesinde alınabilmektedir. SEEMP ise, gemi sahibini, işletmecisini veya operatörünü planın her aşamasında, bir geminin performansını optimize etmeye çalışırken yeni teknolojileri ve uygulamaları kullanmayı teşvik etmektedir.

2.2.1 Yakıt Türü Seçimi

Tasarım aşamasında, gemilerde kullanılacak yakıt türünün seçiminde karar verilen sevk sistemi, gemi tipi ve çalışma bölgesi etkili olmaktadır. Fakat mevcut bir sistemde

enerji verimliliği ve çevreyi koruma söz konusu olduğunda akla ilk gelen, kullanılan yakıtta iyileştirmeye gidilmesi veya ana makinenin çalışma koşullarının optimize edilmesi olmaktadır (Adnanes, 2012). Sistemde değişikliğe gitmeden yapılacak düzenlemeler, gemi işletmecileri tarafından maliyet açısından uygun görülmektedir. Dimetil eter'in dizel ana makinelerde doğrudan kullanılabilmesi, metanol ve etanolün ise belli karışımlar halinde kullanılabilmesi ağır dizel yakıtın kullanımını kısıtlayan unsurlardır (Agarwal, 2007). Bunun yanında sentetik dizel yakıtının verimlilik ve çevre koruma özelliği tam olarak kanıtlanamamıştır (Labeckas ve Slavinskas, 2013). Gemilerde kullanılan dizel yakıtlar, gazlar, alkoller ve katı yakıtların birbirleriyle karşılaştırmasını yaparken sadece yakıt tüketimini azaltma değil, enerji dönüşüm sürecini de kapsayan teknik, çevresel ve ekonomik kriterler göz önünde bulundurulmaktadır (Brynnolf, Baldi, ve Johnson, 2016).

2.2.2 Servis Hızı Optimizasyonu

Enerji verimliliğini gemi işletmeci şirketin mevcut gemi filosunun tümünde uygulayabilmenin asıl başarı göstergesi olduğu söylenmektedir (Ballou, 2013). Alınacak önlemlerin gemi yönetiminin önceliklerini, hedeflerini ve kısıtlamalarını yerine getirme zorunluluğu bulunmaktadır. Yakıt tasarrufu ve karbon ayak izi hedeflerine ulaşmak için ilk denemelerden birinin de gemi hızını azaltmak olduğu ifade edilmektedir. Hız azaltmanın EEDI üzerindeki etkisi yüksektir, ancak kurulu gücün ve hızın önemli ölçüde azalması, olumsuz koşullarda geminin manevra kabiliyetini korumak için minimum sevk gücü ilkesi ile çelişebilmektedir. Egzoz emisyonundaki hedefleri yerine getirirken azaltılan gemi hızının; yük ve yolcu emniyeti, gemi yaşam döngüsü kazanç/maliyet oranı, limanda bekleme süreleri gibi konuları da kapsayacak şekilde analiz edilmesi gerekliliği bulunmaktadır. Bir AB projesi olan “Ulysses”, yavaş gemi konseptini benimsemektedir. Bu projede 2020 yılına kadar (EEDI Faz 1) ortalama gemi hızı 10 knot, Faz 2 için 7,5 knot ve Faz 3 için ise 5 knot olarak öngörülmektedir. Ayrıca büyük bir konteyner gemisi için 0,5 knot hız düşürmenin ortalama 2,0 gram/ton.mil değerinde kirlenici emisyon azalması anlamına geldiğinden bahsedilmektedir (Cepeda, Assis, Marujo, ve Caprace, 2017).

2.2.3 Trim ve Su Çekimi Optimizasyonu

Gemilerin operasyonu sırasında aktif olan değişkenlerin yönetimi ile EEDI’ya ilave olarak %18-20 oranında enerji verimliliği sağlanabilmektedir (Acomi ve Acomi, 2014). Bunun sonucunda daha az yakıt tüketilmekte ve çevreye zarar verecek etkiler buna bağlı olarak azalmaktadır (Takinaci ve Önen, 2013). EEOI ve SEEMP yönetmeliği bu konuda yol gösterici birer örnektir. Bir geminin yakıt tüketimini en aza indirebilmek için optimum trim konfigürasyonu gerekmektedir (Sherbaz ve Duan, 2014). Gemiler için farklı su çekimi koşullarına uygun trim değerleri, hem model ölçekli testler hem de deniz seferi denemeleriyle tahmin edilmektedir. Bahsi geçen operasyonel süreçlerin çevresel düzenlemelere uyum sağlaması için bir izleme sistemine ihtiyaç vardır. Bunlar (Hansen ve Fradelos, 2018):

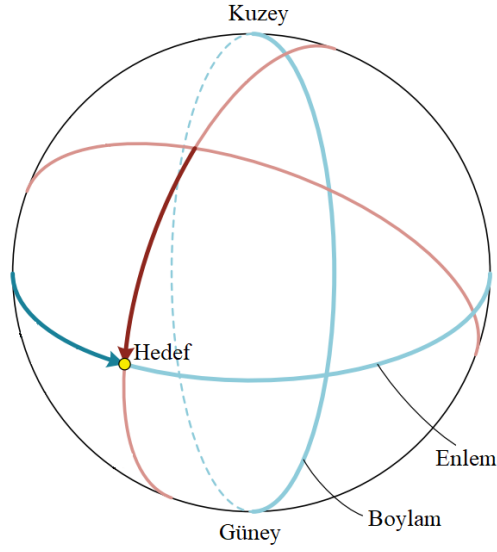
- Sefere ait konum, hız, rota, dümen açısı, gemi hareketi ve ivme gibi değerler,
- Rüzgâr yönü ve hızı, hâkim ve mevcut dalga yönü ve dalga yüksekliği, deniz suyu sıcaklığı ve yoğunluğu gibi çevresel koşullar,
- Gemi operasyonları ve kargo yükleme/boşaltma durumlarına ait trim ve meyil değerleri,
- Ana makine bileşenlerine ait basınç ve sıcaklık değerleri,
- Ana makine, yardımcı makine ve kazanlara ait yakıt tüketim değerleri,
- Ana ve yardımcı makinelere ait devir ve şaft gücü çıktılarıdır.

Gemilerin yakıt tüketimini azaltmanın hem çevresel hem de ekonomik yönden dolayı ilgi görmesi, %25-75 arasında bir oranda yakıt ekonomisi sağlama potansiyelinden kaynaklanmaktadır. Fakat alınacak operasyonel önlemlerin gemi personeli üzerinde herkeste aynı etkiyi yaratmayacağı, önceliklerin görev dağılımına göre değişeceği de bir gerçektir (Beşikçi, Kececi, Arslan, ve Turan, 2016). *TrimOpt*[®], *CargoMax*[®], *TROP*[®], *SeaTrim*[®], *Eniram*[®], *ECO Assistant*[®] ve *Siri Marine Trim Optimization*[®] gibi ticari yazılımlar gemiler için güç ve yakıt ihtiyacını azaltan optimize edilmiş ve uygulanabilir çözümler sunmaktadır.

2.2.4 Rota Yönetimi

Gemilere ait enerji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalardan bir diğeri de ana makine-pervane arasında yaşanan güç kaybının azaltılmasıdır (Perera ve Mo, 2016). Bunu başarmanın yollarından biri, gemi performans verilerinin sefer bilgisiyle birlikte analiz edilerek makine işletme kriterlerinde yapılacak ayarlamalar olarak da tanımlanabilmektedir. Farklı çalışma koşullarındaki optimum seyir hızının belirlenmesi, gemi enerji verimliliğinin gerçek zamanlı iyileştirilmesi için temel ve öncül olarak önerilmektedir (Wang, Yan, Yuan, ve Li, 2016). Seyir çevresi faktörlerine bağlı olarak gemiye ait çalışma koşullarının öngörülmesiyle ve farklı çalışma koşullarında en iyi makine/pervane devrinin tespit edilmesiyle enerji verimliliğinde artış sağlanmaktadır. Bununla birlikte, gemi manevra kabiliyeti, denizcilik gereksinimleri ve olumsuz hava koşullarında seyrüsefer için gereken kurulu minimum sevk gücünün de gemide mevcut olması gerekmektedir (Perera ve Mo, 2016). Böyle bir gemi enerji verimliliği modeli gerçek zamanlı optimizasyonu amaçlamaktadır. Denizcilik endüstrisinin gelişmesiyle birlikte artan sera gazı salımlarını azaltabilmek için optimize edilmiş rotaların tasarlanması gerekliliği, özellikle sakin olmayan denizlerde daha ön plana çıkmaktadır (Wen vd., 2017). Rota optimizasyonu yaparken belli bir seferi bölümlere ayırarak, değişken seyir koşullarında inceleme yapılması tavsiye edilmektedir.

Her ne kadar tasarımcılar ve tersaneler enerji verimliliği talebine, tasarımlarını yeşil teknolojilerle daha da optimize ederek cevap verse de, köprüüstü ekiplerine rota optimizasyonu konusunda destek vermek için karar destek sistemlerini geliştirme gerekliliği bulunmaktadır (Insel, Gokcay, ve Saydam, 2018). Bu sistemler ya basitleştirilmiş gemi performansı modellerine ya da karar önerilerini oluşturmak için makine öğrenmesi gibi rota ve sistem tanımlama yöntemlerine doğrudan etki eden operasyonel verilerin değerlendirilmesi esasına dayanmaktadır.



Şekil 2.1. Büyük daire seyrinin geometrik görünümü (Hsu, Chen ve Hsieh, 2017)

Küreye benzer bir yapıya sahip olan yeryüzü geometrisi sebebiyle, gemilerin su üzerindeki seyri, temelde iki farklı rotada gerçekleşmektedir. Bunlardan ilki olan *kerte seyri* (*rhumb-line*) olarak adlandırılan rotalar, uzaydan bakıldığında düz bir çizgi gibi görülmektedir (Weinrit ve Kopacz, 2011). Her meridyen ile aynı açıyı yapacak şekilde tek bir doğrultuyu takip eden bu rota çeşidi daha çok kısa mesafe seyirlerinde kullanılmaktadır (Nguyen, Im, ve Dao, 2017).

Diğer rota çeşidi ise *büyük daire seyri* olarak ifade edilen ve uzaydan bakıldığında eğrisel yapıda olan rotalardır (Zaccone, Ottaviani, Figari, ve Altosole, 2018). Bu rota türü, kartezyen koordinat sisteminde vektörel hesaplama gerektirmektedir (Hsu vd., 2017). Şekil 2.1’den de görüleceği üzere, büyük daire seyri yeryüzü üzerinde oluşturulan hayali enlem ve boylam çizgileri üzerinde seyir yapılmasına olanak sağladığı için, doğal olarak kalkış ve varış noktaları arasındaki en kısa mesafe ölçüsünü ifade etmektedir (Weinrit ve Kopacz, 2011).

2.2.5 Liman Operasyonları

Gemilerin enerji verimliliği kapsamında, yapılan liman operasyonlarının planlanması sayesinde limanlarda daha az zaman harcanacak ve bu sayede operasyonel giderler azalırken, geminin ömrü boyunca verdiği aktif taşımacılık hizmetinin artması sonucunda elde edeceği gelirler artacaktır (Yu vd., 2018). Limanlarda veya denizde demirde/alargada beklerken geçen sürenin verimsiz oluşu, sürekli bir kaynak ihtiyacı

olması sebebiyle istenen bir durum değildir. Liman başına 1-4 saat arası daha az beklemenin yaklaşık %2-8 enerji verimliliğini artırma potansiyeli bulunmaktadır (Johnson ve Styhre, 2015).

Toplam yakıt tüketimi söz konusu olduğunda, bir geminin limanda geçirdiği süre genellikle önemsiz kabul edilmektedir (Goldsworthy ve Goldsworthy, 2015). Ancak, gürültünün yanı sıra kirletici emisyonlar da limanın bulunduğu şehir için probleme neden olabilmektedir. Bu da, kıyı bölgesindeki kirletici emisyonların denizdeki emisyonlara kıyasla potansiyel olarak daha fazla sayıda insanı etkilemesi anlamına gelmektedir. Gemilerin liman bölgelerinde tükettikleri yakıt; çoğunlukla elektrik üretiminde kullanılmakta, yolcu ve mürettebat için gereken iklimlendirme, beslenme ve aydınlatma, ayrıca tanker gemilerindeki yükleme/boşaltma pompalarının enerji ihtiyacı jeneratörler tarafından karşılanmaktadır (Hansen ve Fradelos, 2018). Bu konuda alınan önlemlerden biri de, “*cold-ironing*” olarak tarif edilen, geminin herhangi bir kara tesisinin limanında bağlı olduğu sırada ihtiyacı olan elektrik enerjisinin karasal şebekeden karşılanmasıdır (Zis, North, Angeloudis, Ochieng, ve Bell, 2014). Yapılan araştırmalar sonucunda, Kopenhag limanı için gerekli olan *cold-ironing* sisteminin kurulum maliyetinin 12-13 yılda karşılanabileceği, üstelik toplumsal açıdan potansiyel sosyoekonomik faydaların ön plana çıkacağı vurgulanmaktadır (Ballini ve Bozzo, 2015). Karasal şebeke hattındaki elektriğin gemilerde kullanımının en büyük avantajı, nüfusun yoğun olduğu bölgelerde partikül maddelerin ve NO_x gibi kirleticilerin emisyonunun yaşam alanından uzaklaştırılmasıdır (Tzannatos, 2010). Ancak, kıyı elektriğinin CO₂ emisyonlarını azaltmak için iyi bir seçenek olup olmadığı, kara hattındaki elektriğin nasıl üretildiğine bağlı olarak değişmektedir.

BÖLÜM ÜÇ

GEMİ DİRENCİ VE SEVKİ

Bir deniz aracını; yüzme şartı, stabilite, denizcilik, sevk verimi, manevra kabiliyeti ve direnci konusunda genel tasarım isteklerini de karşılayacak şekilde tasarlamak gemi mühendisinin temel görevidir (Sabuncu, 1992). Bu sürecin bir parçası olan gemi sevk gücünün tahmini, bir geminin tasarlanması ve işletilmesi sürecinde kullanılacak temel analizler içerisinde yer almaktadır. Bu bağlamda; ekonomik, toplumsal ve teknik faktörlere bağlı olarak gemilere ait tasarım ve uygulamalarda gelişmeler meydana gelmektedir (Geertsma, Negenborn, Visser, ve Hopman, 2017). Genel anlamda, çevresel ve ekonomik kaygılardan kaynaklı; gerekli sevk gücünü, yakıt tüketimini ve işletme maliyetlerini azaltan çalışmalar artarak devam etmektedir. Bu isteği karşılarken gemi sevk sisteminin güvenilir olması da hedeflenmektedir. Mevcut araştırmalara, IMO'nun NO_x, SO_x ve CO₂ gibi kirletici emisyonları kısıtlayan düzenlemeleri öncülük etmektedir (Seddiek ve Elgohary, 2014). Sevk gücünün gerçeğe en yakın seviyede tahmin edilmesi, tasarım ve işletme sürecindeki maliyetler hakkında gemi inşa sürecine başlamadan önce öngörülebilir bulunabilmeyi sağlamaktadır (Baykal, 1991). Bu tahminlerin en başında; sevk sisteminde kullanılacak ana makine tipinin, boyutunun ve enerji tüketim değerinin hesaplanması gelmektedir. Ancak, gemi direnç ve sevkine ait tahmin yöntemleri asla kesin bilgi vermemektedir. Ayrıca, bu hesaplamalarda teorik ve deneysel bilginin doğru kombinasyonunun kullanımı zorunluluk arz etmektedir (Rahman, 2017). Bu gereklilik, tasarım sürecinde hesaplanan kurulu ana makine gücü ve öngörülen tekne formunun doğru eşleşmesinin belirlenme ihtiyacından kaynaklanmaktadır.

Günümüzde sıklıkla kullanılan gemi direnç tahmin yazılımları çok yol kat etmesine rağmen, gemi tasarım süreci temel mühendislik ilkelerinin doğru ve titiz yorumlanmasını gerektirmektedir. Gemiye ait gövde formunun tasarımında yer alan karmaşıklık, akışkan olan suyun doğasından kaynaklanmaktadır (Kafalı, 1994). Gemi baş bölgesinin suyla ilk temasından başlayarak gövde boyunca pervaneye ulaşan ve geminin kıç bölgesinden ayrılan suyun akışına ait problemin tanımlanması ve çözümü için bir analiz yönteminin gerekliliği 1860'lı yıllarda anlaşılmıştır (Mogan, Chen, Hartwig, Sahin, ve Tafuni, 2018). O zamana kadar yapılan çalışmaların gerçeklikten

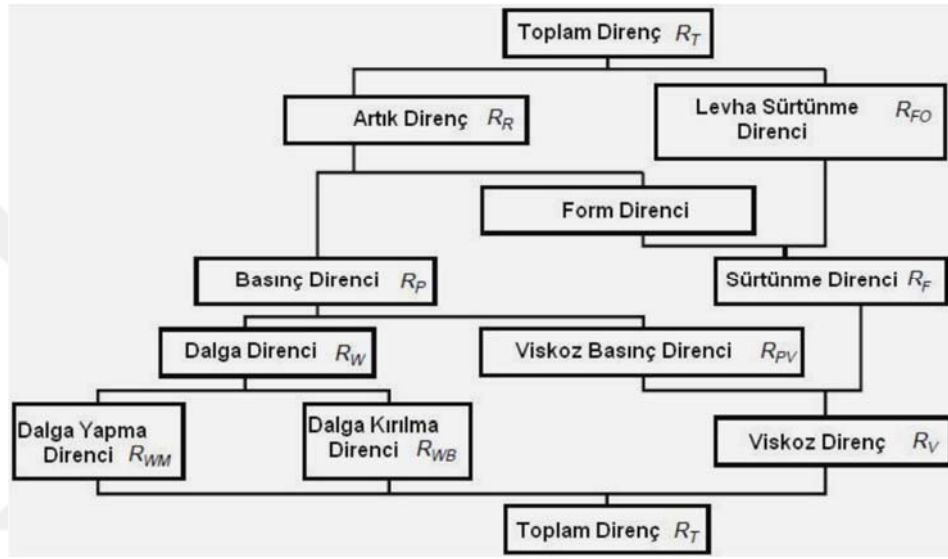
çok uzak fikir üretmesi ve sürecin çoğunlukla deneme yanılmadan geçmesi bu ihtiyacın doğuşunu tetiklemiştir. 1870 yılında, W. Froude farklı boyutlardaki kalasları kullanarak tekne sürtünme direncini ölçmeye çalışmıştır. Toplam direnci, *sürtünme* ve *artık direnç* olarak ikiye ayıran Froude; artık direncin, gemi hızı ve boyunun karesinden elde ettiği benzerlikten yola çıkarak, gemi ve model için aynı olacağını savunmaktadır (Molland, Turnock, ve Hudson, 2017). Başta bu yaklaşım çok iyi karşılanmasa da yapılan tam ölçekli testler sonrası beğeni kazanmıştır.

Gemi mühendisleri 1860'ların başında pervanenin gemi sevk sistemi tasarımındaki etkisini çok iyi tahmin edemese de 1865'te Rankin'in momentum teorisi, 1878'de Froude'un kanat elemanı teorisi ve 1889'da yine Froude'un geliştirdiği aktüatör disk teorisi pervane tasarım sürecinin gelişmesine olanak sağlayan temel çalışmalar olarak kabul edilmektedir (Wang vd., 2019). Gemiye istenen servis hızında sevk edebilmek için pervane tarafından yeteri düzeyde itme kuvveti sağlanması gerekmektedir (Takinaci ve Atlar, 2002). Bu itme kuvveti, gemi ana makinelerinden sağlanmakta olup, temel enerji kaynağının (yakıtın) çeşitli kimyasal ve fiziksel dönüşümlere uğrarak faydalı güce dönüştürülmesiyle elde edilmektedir. Konvansiyonel bir sevk sistemi, içten yanmalı ana tahrik makinelerinden oluşmaktayken; günümüzde çeşitli sistemlerle desteklenen hibrit sistem tasarımları da bulunmaktadır (Inal, Carpentier, ve Deniz, 2022). Hatta alternatif enerji kaynağının birincil kaynak olarak kullanıldığı sevk sistemlerinin varlığı da gün geçtikçe artmaktadır. Yenilikçi bir sevk sistemi tasarımı yapabilmek için gemiye ait direnç bileşenleri ve sevk sistemi temel bileşenlerinin neler olacağına karar verilmelidir (Grimmelius, de Vos, Krijgsman, ve van Deursen, 2011). Bu bölümün devamında, bahsi geçen konular detaylarıyla birlikte verilmektedir.

3.1 Gemilerde Direnç Bileşenleri

Newton'un 3. Yasa prensiplerine göre hesaplanan gemi direnç kuvveti, en temel anlamıyla, bir geminin suda istenen hızda ilerlemesine engel olmaya çalışan kuvvettir. Geminin hareketine ters yönde oluşan bu kuvveti tanımlayabilmek için; oluşumu, bileşenleri ve dirence etkiyen faktörlerin neler olduğu belirlenmelidir. Günümüzde teknolojik altyapının ilerlemesine rağmen deneysel ve nümerik yöntemlerde yer alan; gerçek gemi ve model gemi arasındaki ölçek etkisi hala tam

anlamıyla aydınlatılamamaktadır (Sun vd., 2020). Yukarıda bahsedildiği gibi, ölçek etkisi ilk olarak Froude tarafından ortaya konulmuştur. Bugün hala bu hipotez pek çok model gemi çekme tankı deneylerinde kullanılmaktadır. Gemi direncinin bileşenlerine ayrılarak hesaplanması ve bu hesaplama sürecinde uyulması gereken prosedürler, Uluslararası Model Deneyi Konferansı (International Towing Tank Conference [ITTC]) tarafından belirlenmektedir (ITTC, 2017). Bu prosedürlerden yola çıkılarak elde edilen gemi direnç bileşenleri hipotezi Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Toplam direnç bileşenleri (Bertram, 2016)

Yukarıda görüldüğü üzere toplam dirence iki farklı yoldan ulaşılmaktadır. Bu iki yöntem de kabul edilmekte olup, en çok kullanılan yöntem olan Froude hipotezi; levha sürtünme direnci ve artık direncin toplamından oluşmaktadır ve Denklem 3.1’de gösterilmektedir. Bu yöntemin sıklıkla kullanılmasındaki etken, gemi model deneyleri ve nümerik çalışmalarda toplam direncin (R_T) doğrudan hesaplanabilmesidir (Terziev, Tezdogan, ve Incecik, 2019).

$$R_T = R_{F0} + R_R \quad (3.1)$$

- *Sürtünme direnci (R_F):* gemi ıslak yüzeyi üzerinde geminin hareketine ters yönde oluşan teğetsel gerilmelerin toplamını ifade etmektedir.
- *Artık direnç (R_R):* geminin hesaplanan toplam direncinden herhangi bir formül veya yöntem yardımıyla hesaplanan sürtünme direncinin çıkarılmasıyla elde edilen kuvvet değeridir.

$$R_T = R_V + R_W = (1 + k)R_{F0} + R_W \quad (3.2)$$

- *Viskoz direnç (R_V)*: suyun viskozitesi sebebiyle oluşmaktadır ve gemi formundan dolayı girdap, çapraz akım ve akım ayrılmalarından kaynaklı meydana gelen enerji kayıplarının toplamıdır.
- *Dalga direnci (R_W)*: gemi etrafında oluşan dalga sisteminin meydana gelmesi için gerekli olan enerji kaybını ifade eder.
- *Basınç direnci (R_P)*: gemi ıslak yüzeyinde meydana gelen ve gemi hareketine dik yönde oluşan direnç bileşenidir.
- *Viskoz basınç direnci (R_{PV})*: viskozite ve girdaplardan kaynaklı normal gerilme kuvvetlerinin toplamıdır.

Denklem 3.2'deki yöntemin daha az kullanılmasındaki neden, geminin gövde formundan dolayı oluşan viskoz ve dalga dirençlerinin henüz tam anlamıyla hesaplanamamasıdır (Takinaci, 2006). İkinci yöntemde yer alan form faktörü $(1 + k)$; levha sürtünme direncinden viskoz direnci hesap etmede kullanılmaktadır (Baykal, 1991). Form faktörü çoğunlukla deneysel yöntemlerden elde edilmekte olup, hesaplanmak istenirse; çift gövde analizi denilen, tekne su hattı simetri eksenine olacak şekilde, yeteri kadar derinlikte çekilerek toplam direncin serbest yüzey etkileşimi olmaksızın hesap edilmesi suretiyle belirlenmektedir (Sun vd., 2020). Bu yöntemin daha az kullanılmasına neden olan bir diğer sebep de belirtildiği gibi, çekme deneyleri için gerekli olan yoğun emek ve artan zaman ve maliyet unsurlarıdır. Froude yaklaşımındaki levha sürtünme direncini hesap etmede kullanılan sürtünme direnci katsayısı (C_F) ise Denklem 3.3'ten elde edilmektedir ve ITTC 1957 sürtünme direnç katsayısı olarak da adlandırılmaktadır.

$$C_F = \frac{0,075}{(\log Rn - 2)^2} \quad (3.3)$$

Yukarıda bahsedilen direnç bileşenlerine ek olarak, gemi gövdesine etki eden ek direnç bileşenleri de mevcuttur. Bunlar (Molland vd., 2017):

- *Dalga kırılma direnci*: gemi gövdesinin suya ilk temasının gerçekleştiği baş bölgesinde oluşan dalgalar için harcanan enerjiyi temsil etmektedir.

- *Dalga formu direnci*: deniz yüzeyinde meydana gelen karışık dalga sisteminin gemiyi etkilemesinden dolayı oluşan enerji kaybıdır.
- *Serpinti direnci*: gemi hareketi esnasında su yüzeyinde oluşan serpintiden kaynaklanan enerji kaybını temsil eder.
- *Takıntı direnci*: gemi gövdesine takılan şaft, şaft braketleri, şaft bosası, dümen, skegler, yalpa omurgası, vb. gemi sevk ve stabilize donanımına ait eklentilerden kaynaklı enerji kaybıdır.
- *Pürüzlülük direnci*: geminin suyla temas halinde olan bölümündeki korozyon ve kirlilikten dolayı harcanan enerjidir.
- *Hava direnci*: geminin suyun dışında bulunan hava ile doğrudan temas halindeki bölümünde meydana gelen enerji kaybıdır.
- *Rota tutma direnci*: iç ve dış etkilere kaynaklı geminin rotasını bozan etkenlerden kaynaklanan enerji kaybıdır.

3.2 Direnç Tahmin Yöntemleri

Gemi direncini hesap ederken sayısal, deneysel ve istatistiksel yöntemlerden faydalanılmaktadır. Direnç hesapları yapılırken geminin farklı operasyonel şartları (servis hızı, trim ve su çekimi gibi) da göz önünde bulundurulmaktadır (Baykal, 1991). Özellikle servis hızının seçimi konusunda direnç tahmini yüksek önem arz etmektedir (Prpić-Oršić, Vettor, Faltinsen, ve Soares, 2016). Gerek deneysel gerekse de sayısal hesaplama yaparken geminin gerçek ölçüsünün kullanılması yüksek hesaplama gücü ve süresi gerektirmektedir. Bunu aşabilmenin bir yolu, gemiyi model ölçeğine küçülterek hesapları yapmaktır (Terziev vd., 2019). Fakat model ölçekli bir gemi için elde edilen direnç değerleri gerçek boyuta göre çok küçüktür. Modelden gerçek ölçeğe geçerken arada ekstrapolasyon işleminin uygulanması zorunluluğu bulunmaktadır. Ancak bu sayede bir geminin direnci hesap edilebilmektedir (Molland vd., 2017).

Direnç tahmin yöntemlerini kategorilendirecek olursak beş ana başlık altında toplayabiliriz. Bunlardan ilki, direnci hesaplanacak gemiye geometrik olarak birebir benzer bir gemi söz konusu olduğunda, inşa edilmiş gemiye ait direnç değerlerinin gemi-model ilişkisinde olduğu gibi ölçek etkisi göz önünde bulundurularak direncin elde edilmesidir. İkincisi, yapılmış benzer boyut ve tipteki gemilerden alınan gerçek

direnç değerlerinden türetilmiş deneysel formüllerdir. Üçüncüsü, model gemi çekme tankı laboratuvarındaki testler sonucunda elde edilmiş ve doğrudan geminin toplam direncinin hesap edildiği deneylerdir. Dördüncü olarak, gemi model deneylerinden türetilmiş sistematik serilerin direnç tahmininde kullanımı söz konusudur. Beşinci ise, ilerleyen bilgisayar teknolojisi sayesinde günümüzde sıklıkla kullanılan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemidir. Bu beş yöntemin de birbirine göre üstün ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Mevcut yöntemlerin mümkünse aynı anda en az ikisinin kullanılarak hesaplama doğruluğunu yukarılara çıkarmanın, gemi enerji verimliliğini artırmada ve uygun sevk sistemini seçmede fayda sağlayacağı bilinmektedir (Vaz vd., 2009).

3.2.1 Geometrik Benzer Gemilerden Yararlanılarak Direnç Tahmini

Yeni tasarlanacak bir gemi söz konusu olduğunda o gemiye ait direnç tahmini, geometrik benzer bir geminin direnç değerlerinden elde edilen ve gerçek kullanım koşullarını da içeren bilgiler kullanılarak en hızlı şekilde yapılabilmektedir (Baykal, 1991). Aynı tip iki farklı geminin ana boyutları, narinlik katsayıları, hızları ve gövde formunu tanımlayan sephiye merkezinin boyuna konumu gibi geometrik tanımlarının çok yakın olması beklenmektedir (Aydın ve Salci, 2008). Ancak bu benzerlik söz konusu olduğunda tasarlanacak gemiye ait direnç tahmini yüksek doğrulukta yapılabilmektedir.

3.2.2 Deneysel Formüller ile Direnç Tahmini

Ön tasarım aşamasında, tasarlanacak herhangi bir gemiye ait kısıtlı veriye sahip olunması sebebiyle, belli tipteki gemiler için ayrı ayrı geliştirilmiş deneysel formüller bulunmaktadır. Bu formülleri kullanırken dikkat edilecek husus, gemi tipi seçiminin tamamlanmış ve ana boyutların belirlenmiş olması gerekliliğidir. Admiralty sabiti ile güç hesabı (Tu vd., 2018), Watson'un ticari gemiler için güç hesabı (Watson, 2002), savaş gemileri için Brown formülü (Brown, 1994) ve tankerler için Kupras formülü (Kupras ve van Keimpema, 1985) gibi yöntemler deneylerden türetilen formülleri sunmaktadır.

3.2.3 Model Deneyi ile Direnç Tahmini

Model deneyleri, direnci tahmin edilmek istenen geminin belirli bir ölçekte küçültülmesiyle elde edilen ve genelde ahşap malzemeden üretilen modelinin çekme tankı veya sirkülasyon tankında sabit hızda yüzdürülmesi olarak tanımlanmaktadır (Sabuncu, 1992). Model geminin sabit hızda ilerlemesi esnasında paralel dalıp-çıkma yapabilmesinin ve serbest trimle yüzebilmesinin bir sonucu olarak değişken su altı geometrisi oluşumu gözlemlenmektedir. Bu da, model geminin sudaki hareketini sağlayan araba (taşıyıcı) üzerinde bulunan dinamometrelerin hassasiyetinin sağlanması zorunluluğunu meydana getirmektedir (Odabaşı, 1981). Bir gemi modeline ait direnç deneyi Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Böylelikle geminin sevki için gereken ana makine gücü ve gemi formunun hidrodinamik özellikleri tanımlanmaktadır.



Şekil 3.2 Bir gemi modeline ait direnç deneyi (VardMarine, 2021)

Model ölçeğindeki bir gemiden yola çıkarak tam ölçekli bir gemiye ait direnç tahminini yapabilmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Telfer Geosim yöntemi, Hughes yöntemi, Prohaska yöntemi, Froude yöntemi, ITTC 1957 ve ITTC 1978 yöntemleri önemli olanlarındandır. Direnç deneylerinde çoğunlukla uygulanan Froude metodu; Reynolds sayısından hesaplanan sürtünme direnç katsayısı ve gemi ve model için sabit kabul edilen artık direnç katsayısını hesaplama imkânı sunarak ölçek etkisinin telafi edilmesini sağlamaktadır (Arribas, 2007). Bu etkiyi en aza indirebilmek için daha büyük gemi modellerinin daha uzun havuzlarda çekilmesi gerekmektedir.

Ayrıca, deney havuzlarının boyutları sebebiyle oluşan yan ve dip dalgalarının gemi dalga sistemine girişimini engelleyebilmenin bir yolu da modele ait genişlik ve derinliğin sınırlandırılmasıdır. Buna *blokaj etkisi* denilmektedir ve bu etkiden kaçınmak için model boyu, havuz genişliği ve derinliğinin yarısından küçük seçilmektedir (Kafalı, 1994).

Deney sırasında dikkat edilmesi gereken bir diğer konu ise, gemi ve modelin farklı Reynolds sayılarında türbülanslı akışa geçmesidir. Bu değer, gemi için 10^9 , model için 10^7 mertebesinde-dir. Bu durumu ortadan kaldırabilmek için modelin üzerine türbülans yapıcıların eklenmesi gerekmektedir (Odabasi, Wallsend, ve Wear, 1983). Dolayısıyla, türbülanslı akım koşulu sayesinde gerçeğe daha yakın direnç tahminleri yapılabilmektedir. Pervane deney sırasında gemi modeli üzerinde bulunmaz; çoğunlukla dümen, şaft, şaft bosası, yalpa omurgası gibi donanımların bulunduğu, yani takıntı direncinin dâhil edildiği toplam direnç hesaplanmaktadır. Ancak gemi gövdesine uygulanan türbülans yapıcıların takıntılara uygulanamaması sebebiyle, ölçek etkisini ortadan kaldırabilmek için ilgili deney sonuçlarına düzeltme katsayısı ilave edilmektedir (Li, Zhou, Huang, ve Sun, 2021).

3.2.4 Model Deneylerinden Elde Edilen Sistemik Seriler

Bu yöntem, ana bir gemi modeli üzerinde bazı parametrelerin değiştirilerek yeni tekne formlarının türetilmesi ve bunların da model direnç deneylerinin yapılarak sistematik hale getirilmesiyle elde edilen serilerin kullanımıyla direnç tahmininin yapılması olarak tanımlanmaktadır (Watson, 2002). İlgili parametrenin iki ardışık seri değeri arasındaki bir noktada bulması durumunda ise interpolasyon yöntemi kullanılarak yeni değerler türetilmektedir. Taylor-Gertler, Todd (Seri) 60, Guldhammer, Holtrop-Mennen ve Savitsky serileri bunlara örnektir. Ancak seride yer alan parametre değerlerinin dışındaki bir değere sahip gemi için hesaplamanın yanlış sonuç vereceği de bilinmelidir (Molland vd., 2017). Seri parametrelerinin kısıtları ve sınırları gerek boyutsal gerekse de form açısından karakterize edilmektedir. Mevcut verilerin kullanıldığı ve regresyon analizinin yapıldığı bu tahmin yöntemindeki hesaplamalar sadece ana tekne formuna benzer gemiler için geçerlidir (Terziev vd., 2019). Diğer bir ifadeyle, her yeni gemi için, sistematik serilerden benzer form ve

geometrik değer aralığı için türetilen hesaplama yönteminin kullanılma zorunluluğu bulunmaktadır.

3.2.5 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi ile Direnç Tahmini

Isı transferi, kimyasal tepkimeler ve sıvı akışına ait problemlerin sayısal olarak çözülmesi işlemine Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi denilmektedir (Zawawi vd., 2018). Akışkanlar mekaniğindeki; kütle, momentum ve enerji korunumu ilkelerinin üzerine kurulan Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes [RANS]) denklemlerinin bilgisayar ortamında çözülmesiyle gemi sevki için gerekli güç hesaplanabilmektedir. HAD yönteminde yapılan bu hesaplamalar, o geminin ister belli ölçekte küçültülmüş modelinin isterse de varsa çekme tankı deneyinde kullanılan modelinin yüzme hareketlerini simüle etme imkânı sunmaktadır. Böylelikle, zaman ve maddi açıdan avantaj sağlanmaktadır. Fakat analizi yapılacak geometrinin karmaşıklığı analiz süresinin uzamasına ve güçlü bilgisayarlara olan ihtiyacı artırsa da; günümüz teknolojisi bunu başaracak seviyede bulunmaktadır ve bu analizlerin yürütülmesi sırasındaki iteratif işlem basamaklarının yakınsama hatası binde hatta milyonda bire kadar düşürülebilmektedir.

HAD analiz süreci temel olarak; modellenen geometrinin belirlenmesi, çözüm bölgesinin sınırlarına karar verilmesi, sınır şartlarının saptanması, uygun ağ yapısının oluşturulması, fiziksel modele uygun çözücü denklem takımına karar verilmesi, çözüm hassasiyeti ve yakınsama kriterinin belirlenmesini gerektirmektedir (Patel, Patel, Patel, ve Ahuja, 2014). Günümüz endüstrisinde inşaat, kimya, uzay, otomotiv gibi sektörlerde sıklıkla kullanılan HAD yöntemi, teori ve deneyin karşılıklı olarak test edilmesini, hatta birleştirilmesini sağlamaktadır. Hâlihazırda çeşitli paket programlar RANS denklemlerini analitik olarak çözebilse de, her bir yazılımın birbirine göre üstün gelen tarafları bulunmaktadır. Program geliştiricilerinin ana görevi ise bu yazılımların; hız, çözüm hassasiyeti, doğruluğu ve esnekliğini üst düzeyde tutmaya çalışmaktır.

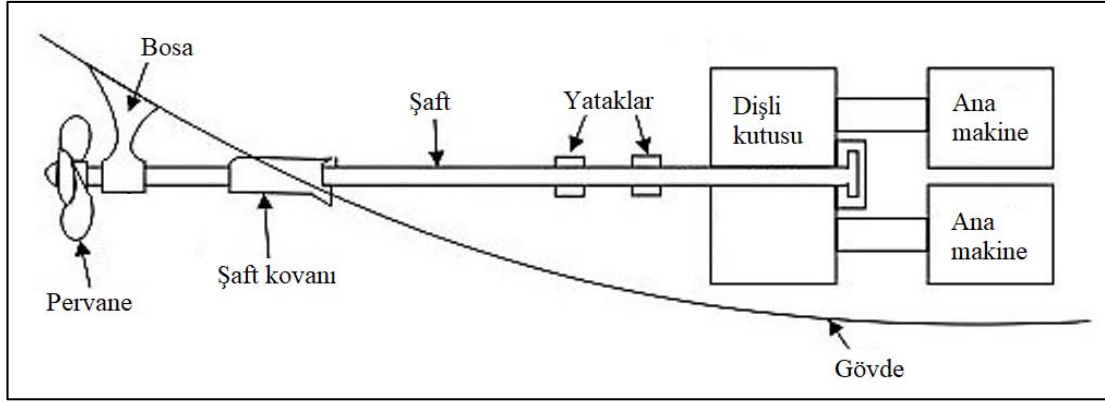
Bir gemi modeline ait direnç deneyini çekme tankında yapmaktansa, maliyet ve zamandan tasarruf sağlayan ve aynı zamanda gemiyi sayısal olarak simüle edebilen HAD yöntemini uygularken; geminin baş ve kıç bölgesindeki hızlı geometri değişimine ve serbest su yüzeyi etkisinin yeterli doğrulukta hesap edilebilmesine

imkân sağlayan ağ yapısının kullanımı yüksek önem arz etmektedir. Sayısal modellemede kullanılan ağ örgüsü, sadece gemi gövde geometrisini tanımlamayıp, belirlenen kontrol hacmindeki hız ve basınç değerlerinin yüksek doğrulukta hesaplanabilmesini sağlamaktadır (Sun vd., 2020). HAD ile direnç hesabı sadece gemi gövdesinin sakin suda ilerlemesini simüle etmeyip, düzenli ve düzensiz dalga koşullarındaki ek direnci de hesaplayabilme imkânı sunmaktadır.

3.3 Gemi Sevki

Geminin akışkan bir ortam olan suyun içinde bulunması sebebiyle, seyir esnasında gemi hareketine zıt yönde oluşan direnç kuvvetini yenebilmek için kurulu sevk gücüne ihtiyaç bulunmaktadır (Odabasi vd., 1983). Buharlı ve içten yanmalı makineler icat edilmeden önce bu güç kürek ve yelkenlerden sağlanmaktayken, zamanla gelişen bilimin sayesinde ilk olarak buhar makinelerinin kullanıldığı çarklı gemilerin inşasıyla başlayan mekanik sevk sistemleri gemilere entegre edilmeye başlanmıştır (Bezdan, Erginer, Erkurt, ve Göksu, 2021). Sonrasında; Stevens (1802), Ressel (1829), Smith (1836) ve Smith (1839) tarafından tasarlanan pervaneler modern pervane tasarımlarının öncüleri olmuşlardır (Yılmaz, 2008). Böylelikle, hatve kontrollü pervane, nozüllü pervane, tandem pervane ve zıt dönüşlü pervane gibi tasarımlarla daha verimli sevk sistemleri elde edilmeye çalışılmaktadır.

Gemi sevk sistemi, bahsedildiği gibi sadece ana makine ve pervaneden oluşmamaktadır. Ana makineden pervaneye gücün iletilmesi esnasında; dişli sistemler, yataklar ve şaftlar da çeşitli kombinasyonlar halinde kullanılmaktadır. Fakat ana makinede yakılan yakıtın pervanede sevk kuvveti haline dönüşümü sırasında en büyük enerji kayıpları ana makine ve pervane üzerinde gerçekleşmektedir (Sabuncu, 1992). Şekil 3.3'te geleneksel gemi sevk sistemine ait şematik gösterim yer almaktadır.



Şekil 3.3 Geleneksel gemi sevk sistemi genel görünümü (RicePropulsion, 2021)

Ana makinede; termal verim en büyük kayba neden olurken, makine parçalarının sürtünmesinden dolayı oluşan güç kaybı çok küçük bir boyutta kalmaktadır (Zhao vd., 2015). Dizel bir gemi ana makinesinde yakılan yakıtın enerjisinin şaft gücüne dönüşümü sırasında yaklaşık %50'si; yağlama yağı soğutucusunda, ceket suyu soğutucusunda, egzoz gazında ve emme havası soğutucusunda termal enerji olarak kaybedilmektedir (Litwin, Lesniewski, ve Kowalski, 2017). Ayrıca, bu sistemlerde bulunan makine parçalarında da sürtünme sonucunda enerji kayıpları meydana gelmektedir. Şafta aktarılan gemi sevk gücünden de, pervaneye aktarım sırasında, yaklaşık %2 şaft sürtünme kaybı, %5 dişli kutusu kaybı yaşanmaktadır (Watson, 2002). Pervane üzerinde ise; kavitasyon, itme kayması ve pervane-gemi etkileşimi nedeniyle yaklaşık %40 güç kaybı meydana gelmektedir (Smogeli, 2006). Pervane üzerinde yaşanan kaybın bu denli yüksek olmasına neden olan ve pervane tasarımını gemi sevk sisteminde ayrı bir konumda tutan unsur ise akışkan ortamda çalışmasıdır. Birbirinden farklı avantaj ve dezavantajları bulunan ve pervaneye doğrudan ilişkilendirilecek sevk sistemi iyileştirmelerinin gemilerde kullanımı gerekli ihtiyaca göre belirlenmektedir. Bunlardan bazıları aşağıda listelenmektedir (Yılmaz, 2008).

- Hatve kontrollü pervaneler: römorkör, savaş ve balıkçı gemileri gibi yüksek hız ve manevra gereksinimi olan ve makine gücünün etkili bir şekilde sabit itmeye dönüştürüldüğü gemi tipleri için uygundur.
- Zıt dönüşlü pervaneler: rota tutma kabiliyetinin yüksek olması istenen torpidolar, ticari gemiler ve yüksek hızlı teknelerde kullanılmaktadır ve karmaşık şaft sistemi tasarımı sebebiyle ek maliyet ihtiyaç duymalarının yanında %15'e kadar güç tasarrufu sağlama potansiyeli içermektedir.

- Nozüllü pervaneler: büyük tonajlı gemilerde kullanıldığında ek direnç oluşturarak verimi düşürmesinin yanında; ağır yük gereksinimi olan römorkör ve ağ çeken balıkçı gemilerinde kullanımı durumunda gerekli makine gücünden %15'e kadar tasarruf sağlanabilmektedir.
- Tandem pervaneler: buz kıranlar, küçük tekneler ve LNG taşıyan gemilerde seyir emniyeti, yüksek manevra kabiliyeti ve yakıt tasarrufu istendiği durumlarda kullanılmaktadır. Ortalama yaklaşık %10 güç tasarrufu sağlayabilmektedir.
- Grim tekerlekli pervaneler: konvansiyonel gemi tiplerinde verim artışı sağlamanın yanında, deniz suyu kirliliğinden etkilenme düzeyleri yüksektir. Bunun yanında, kullanımı durumunda yaklaşık %10-15 düzeyinde güç tasarrufu sağlama potansiyeli bulunmaktadır.
- Süper kavitasyon pervaneleri: yüksek hızlı teknelerde kavitasyondan kaçınılamadığı durumlarda itme kayıplarını yeniden kazanmayı ve kavitasyon riskini azaltmayı amaçlamaktadır. Fakat gerek pervane tasarımı için gerekse de kullanılacak malzeme için yüksek maliyet gereksinimi bulunmaktadır.
- İz düzenleyici nozüller: gemi kıçındaki akım ayrışmalarını azaltırken, pervane veriminde artış ve pervane sebepli titreşimlerde azalma sağlanmaktadır. Blok katsayısı 0,6'nın altında olan gemiler için uygun olmayıp, konvansiyonel gövde tipli ticari gemilerde sıklıkla kullanılmaktadır.
- Asimetrik gemi kıç: blok katsayısı büyük olan tüm konvansiyonel gemi gövdelerinde, pervaneye gelen su akımını düzenlemesi sebebiyle pervane verimi artırmak ve böylece güç tasarrufu sağlamak için kullanılmaktadır.

Pervanenin dönüşü esnasında rotasyonel ve eksenel yönde gerçekleşen enerji kayıpları sadece pervaneden sağlanacak itmenin azalmasına neden olmayıp, geminin kıç bölgesinde ek direncin oluşmasına da neden olmaktadır (Watson, 2002). Bu sebepten dolayı, gemi inşaatı mühendisliğinde pervane konusunda yapılan iyileştirmeler ve yenilikler yüksek önem arz etmektedir (Takinaci ve Atlar, 2002).

BÖLÜM DÖRT

RÜZGÂR ENERJİSİ SİSTEMLERİ

Rüzgâr enerjisi, antik çağlardan bu yana gemiler için gerekli itici gücün sağlandığı ana enerji kaynaklarından biri olarak kullanılmaktadır. Ancak; yenilenebilir, bol ve ücretsiz bir enerji kaynağı olarak denizcilik endüstrisi tarafından günümüzde yeterince değerlendirilememektedir (Talluri vd., 2016). Karada bulunan yerleşim yerlerinde yeryüzü sürtünmesinden dolayı rüzgârın hızında azalma ve enerji potansiyelinde kayıp olduğu bilinmektedir. Açık denizlerde ise, böyle bir etkinin olmaması sebebiyle rüzgâr kullanımı daha uygun görülmektedir. Bu nedenle, denizcilik sektörü için rüzgâr tahrikli sistemler, fosil yakıt kullanımını ve kirletici emisyonu önemli ölçüde azaltacak “eski ama faydalı” bir teknoloji olma potansiyelini içermektedir. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılaştırıldığında, her zaman açık denizde bulunma avantajına sahiptir ve kullanımı konusunda çeşitli başarılı örnekler bulunmaktadır. Rüzgâr tahrik sistemlerinin, hâlihazırda görev yapan bir gemiye basit çözümler sayesinde sonradan monte edilebilmesi, diğer alternatif güç kaynaklarına kıyasla sahip olduğu önemli bir avantaj olarak ortaya çıkmaktadır (Göksu ve Erginer, 2022).

Giderek daha önemli hale gelen çevre sorunları ve fosil yakıt fiyatlarındaki artışlar, gemilerde geleneksel tahrik sistemlerine yardımcı olacak alternatif ek bir güç kaynağı olarak rüzgârın kullanımını teşvik etmektedir. Bu yeni rüzgâr enerjisi teknolojileri “rüzgâr destekli” olarak betimlenmekte olup (Nuchturee vd., 2020), gemiler için gerekli gücün çoğunun dizel makineler veya gaz türbinleri gibi geleneksel sistemler tarafından karşılandığı gemileri ifade etmektedir. Öncelikle yakıt tüketimi ve emisyonları azaltma üzerine kullanılan bu sistemler; yelkenler, yatay ve düşey eksenli türbinler, Flettner rotorlar ve paraşütler olarak bilinmektedir.

4.1 Yelkenler

Gemilerde sevk sistemi söz konusu olduğunda, yelken denilince ilk akla gelen, geleneksel bir kumaş yelken kullanılarak tahrik edilen gemiler gelmektedir (Bezdan vd., 2021). Fakat günümüz şartlarında, rüzgâr enerjisini kullanarak seyir yapan çevreci ve ekonomik gemiler üretebilmek için kanat yelkenler tercih edilmeye başlanmıştır.

Geleneksel modele göre daha yüksek kaldırma ve sürüklenme değerlerine sahip olan bu tasarımlar, büyük kargo gemilerinin okyanus aşırı seferlerinde %20-30 yakıt tasarrufu sağlayabilme potansiyelinin olduğunu göstermektedir (Cairns vd., 2021). Şekil 4.1’de gösterilen “UT Wind Challenger” adlı tasarım gemi, ticari gemiler için rüzgâr enerjisi kullanımını maksimum seviyeye ulaştırmayı hedeflemektedir (Ouchi, Uzawa, Kanai, ve Katori, 2013). Dokuz adet rijit yelkeni bulunan bu geminin toplam yelken alanı 9000 m^2 olup, 12 m/s hızla esen bir rüzgârda ana sevk gücü olarak kullanıldığında 14 knot seyir hızını sağlama kapasitesi bulunmaktadır.



Şekil 4.1 UT Wind Challenger gemisi (Ouchi vd., 2013)

Üzerinde kanat yelkeni olan bir geminin seyri düşünüldüğünde, seyir yönü/hızı ve rüzgâr yönü/hızı elde edilecek ilave sevk kuvvetini doğrudan etkilemektedir. Belli bir gemi hızı için pervaneden talep edilen itmeyi en aza indirebilmek için kanat yelken açıları optimize edilebilmektedir. Bu açıların çevre koşullarına göre genetik algoritma ile kontrol edilmesi sonucunda mevcut sistemden sağlanan ek sevk kuvvetini yaklaşık %10 düzeyinde artırmak hedeflenmektedir (Viola, Sacher, Xu, ve Wang, 2015). Ayrıca, Viola vd. (2015) tarafından yapılan araştırmalar sonucunda az sayıda kısa ve geniş kanat yelkeni kullanmaktansa, daha çok sayıda uzun yelken kullanmanın daha verimli olacağı kanaatine ulaşılmaktadır.

4.2 Rüzgâr Türbinleri

Günümüzde rüzgâr türbinleri iki tipte tasarlanmaktadır. Bunlardan yatay eksenli rüzgâr türbinleri, eşdeğer bir dikey eksenli rüzgâr türbinine kıyasla daha yüksek

verimliliğe ve eşdeğer süpürme alanında daha fazla güç üretimine sahip tasarımlar olarak bilinmektedir (Pope, Dincer, ve Naterer, 2010). Yatay eksenli türbinleri dikey eksenli olanlara göre daha üstün kılan hususlar; yüksek aerodinamik verimlilik, daha stabil şaft torku, daha düşük hızlarda rotorun harekete geçmesidir. Ancak, dikey eksenli rüzgâr türbinleri yapısı itibariyle deniz araçlarına daha uygundur ve üretim kolaylığı ve maliyetler konusunda avantaj sağlamaktadır (Rutkowski, 2017). Bunun yanında, dikey eksenli türbinlerin ağırlık merkezinin gemi güvertesine daha yakın oluşu, gemiye tesir edecek meyil momentinin daha az olmasıyla sonuçlanmaktadır. Dolayısıyla geminin enine stabilitesi daha az etkilenmiş olmaktadır. Bu çıkarıma Şekil 4.2’den de ulaşılabilmektedir.



Şekil 4.2 Yatay eksenli rüzgâr türbini (sol) ve dikey eksenli rüzgâr türbini (sağ) (Peco, 2021)

Dikey eksenli türbinlerin bir diğer avantajı ise, türbin kanatlarının rüzgârın geliş açısına göre konumlandırılma zorunluluğunun bulunmamasıdır. Rüzgâr ve geminin ilerleme yönü arasındaki açının önemini ortadan kaldıran dikey eksenli türbinler, rüzgârın geliş açısı konusunda diğer bütün rüzgâr destekli sevk sistemlerine göre üstünlük gösterirler (Lele ve Rao, 2016). Türbin kanatlarını kontrol eden mekanizmanın tasarımı yatay eksenli rüzgâr türbinleri için kritik bir husus olup, aynı zamanda sistemin karmaşıklığını artırarak; tasarım, ilk kurulum ve işletme maliyetlerini olumsuz etkilemektedir.

4.3 Flettner Rotorlar

Bu sistemler, güverteye monte edilen ve elektrik motoru kullanılarak dönüşü sağlanan dikey silindirlerdir ve 1900lü yılların başında Anton Flettner tarafından klasik yelkene alternatif olarak icat edilmiştir. Bu silindirler üzerinde meydana gelen görünen rüzgâr hızına dik yönde kaldırma kuvveti, *Magnus Etkisi* sonucunda oluşmaktadır. Gemilerin sevk sisteminde rüzgâr enerjisinden yararlanan Flettner rotor sistemi ilk olarak 1924 yılında denenmiştir. 2008’de ise Enercon şirketine teslim edilen “E-Ship 1” (10.000 DWT) isimli geminin üzerinde 25 metre boyunda ve 4 metre çapında 4 adet rotor bulunmaktadır, geminin ihtiyaç duyacağı enerjinin yarısının bu sistemden elde edilebileceği tahmin edilmektedir (Petkovic vd., 2021). Şekil 4.3’te gösterilen E-Ship 1 gemisi haricinde; Fehn Pollux (1996), Estraden (1999), Maersk Pelican (2008), Viking Grace (2013) ve Afros (2018) isimli gemilerde de çeşitli boyut ve adetlerde Flettner rotorlar yer almaktadır. Magnus etkisini kullanan benzer bir çalışma ise, patenti 1986 yılında Kaptan Cousteau tarafından alınan “Turbosail System” olarak adlandırılan tasarımdır ve “Alcyone” adlı gemiye ilk kurulumu gerçekleştirilmiştir (Izaguirre-Alza, Perez-Rojas, Torres-Benayas, ve Perez-Arribas, 2012).



Şekil 4.3 Enercon şirketine ait E-Ship 1 adlı gemi (Bentin vd., 2016)

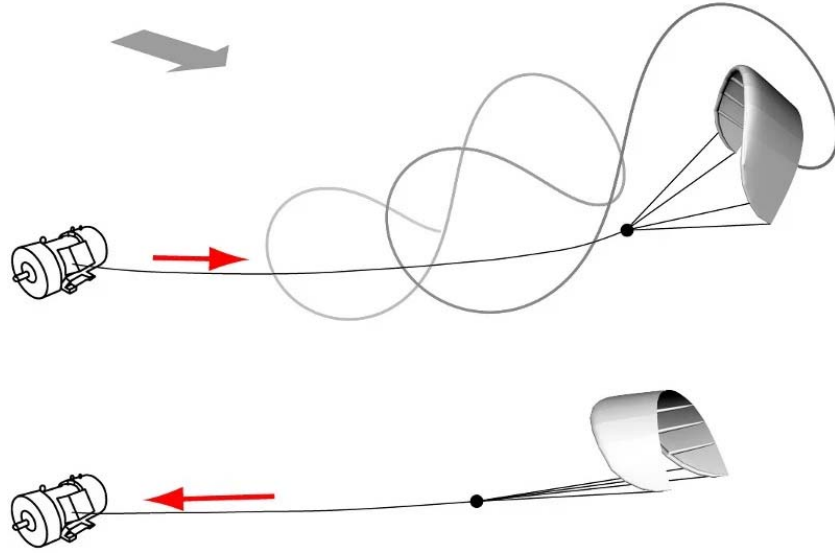
Gemilerin güvertesi üzerine inşa edilen bu yapılar yenilenebilir bir enerji kaynağı olan rüzgârı kullanarak gemileri sevk etmeyi sağlasa da bir takım dezavantajları bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; gemilerin faydalı taşıma kapasitesinin azalması, güverte üzerinde alan kaplaması, gemi gövde yapısı ve elemanlarının gözden

geçirilmesi, gemi ağırlık merkezinin yukarı taşınması, rotorlar üzerinde oluşan rüzgâr kuvvetinin geminin enine stabilitesini etkilemesi ve gemi personeline ilave operasyonel prosedürler getirmesi olarak belirtilmektedir (Traut vd., 2014).

17.500 DWT kapasiteli çok amaçlı kargo gemisinin Flettner rotor sistemi ile donatılması Bentin vd. (2016) tarafından incelenmektedir. Yapılan çalışma ile seyir enerji verimliliğindeki artış; yakıt tüketiminin azaltılması ve rota optimizasyon sürecinin rüzgar destekli gemilerde kullanımı ile sağlanmaktadır. Flettner rotor sisteminden elde edilen gücün, rüzgâr koşullarına göre optimizasyonu yapılarak bütün değişkenlerin göz önünde bulundurulduğu dinamik rota seçimi uygulanmaktadır. Baltimore-Wilhelmshaven rotasında, herhangi bir sevk sistemi iyileştirmesi olmaksızın, rüzgâr ve dalga direnci optimizasyonu ile %4 yakıt tasarrufu sağlanabilmektedir. Sadece büyük daire seyrini yapan Flettner rotorlu gemi %36 yakıt tasarrufu sağlarken, rotası optimize edilmiş Flettner rotorlu sistem %53 yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Dönüş yolunda (Wilhelmshaven-Baltimore) ise sırasıyla %8, %14 ve %28 yakıt tasarrufu elde edilmektedir.

4.4 Paraşüt Sistemler

Paraşüt sevk sistemleri temelde; havada serbestçe uçan paraşüt üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetlerden faydalanmayı hedeflemektedir. Bu sistemler gemilerde sevk sistemi olarak kullanılmadan önce, karada elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktaydı. Paraşüt sistemlerinden elektrik enerjisi üretmenin iki farklı yolu bulunmaktadır (Xsens, 2021). Bunlardan ilki, paraşüt üzerine yerleştirilen rüzgâr türbinlerine gelen havadan elde edilen enerjinin paraşütü zemine bağlayan halatla yeryüzüne aktarılmasıdır. Diğer ise, zemine konumlandırılan bir tambura sarılı halatın sarılma-açılma hareketi sayesinde tamburda meydana gelen dönme hareketinin elektrik enerjisine dönüştürülmesidir ve bu sistemler Şekil 4.4'te şematize edilmektedir. Paraşütten elektrik eldesi başta karmaşık olarak görülse de, günümüz teknolojisi sayesinde ve havadaki paraşütün hareketi kontrol edildiğinde, hedeflenen enerji üretimi gerçekleşmektedir. Böylece, önceden belirlenen uçuş yörüngesinde hareket ettirilen paraşüt sayesinde, sistem verimliliğinde artış sağlanmaktadır.



Şekil 4.4 Paraşütten elektrik enerjisi üretimi (Xsens, 2021)

Paraşütleri gemilerde yardımcı sevk sistemi olarak kullanmanın temelinde, geminin pruvasına konumlandırılan ve paraşütün güverteye bağlandığı yer olan çekme noktasına, paraşüt üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetlerin çekme halatı vasıtasıyla aktarımı yer almaktadır (Naaijen, Koster, ve Dallinga, 2006). Açık denizlerdeki güçlü rüzgârlardan faydalanan bu sistemin üç temel bileşeni bulunmaktadır. Bunlar; halatlı bir çekme uçurtması, kontrolcü mekanizması ve fırlatma-toplatma sistemidir. Verimli, güvenli ve düşük maliyetli olan bu sistem, gemilerin yakıt maliyetini azaltmakla kalmayıp kirletici emisyonların seviyesinin de düşmesini sağlamaktadır (Rutkowski, 2017). Yeşil enerji kaynağı olan rüzgârı kullanan paraşütlerin kurulumu yeni inşa gemilere yapılabileceği gibi mevcut gemilere de uygulanabilmektedir.

Bu sistemleri geleneksel yelkenlerden ayıran en önemli özellik ise havadaki paraşütün hızı sebebiyle oluşacak bağıl rüzgâr hızının daha üst seviyeye çıkartılabilmesidir (Pope vd., 2010). Bu da, faydalı çekme kuvvetindeki artışla sonuçlanmaktadır. Dökme yük ve tanker gemileri gibi diğerlerine kıyasla daha yavaş seyir yapan ticari gemi tiplerinde kullanımı daha uygun görülse de, günümüzde bütün ticari gemilerde seyir hızları çeşitli ekonomik ve çevresel hususlar nedeniyle azaltılmıştır (Ballini vd., 2017). Bunun sonucunda, paraşüt yardımcı gemi sevk sistemleri daha geniş bir kullanım alanına erişmektedir. Fakat paraşütlerin dar bir rüzgâr alanında kullanılabilir oluşu dezavantaj meydana getirmekte ve rotadaki rüzgâr enerjisi potansiyelinin önceden belirlendiği durumlarda kullanımı gerekmektedir.

(Ran, Janson, Allenström, 2013). Paraşüt sistemlerin kullanımı operasyonel olarak karmaşık görölse de, gemi teçhizatıyla koordineli ve paraşütle uyumlu çalışan bir görüntüleme ve kontrol sistemi sayesinde zorlukların üstesinden gelinebilmektedir. Rotadaki çevre koşullarının sistemin emniyetli çalışmasına engel teşkil edip etmediği (sert havalarda paraşütün kullanıma uygun olup olmadığı), mürettebatın verimli kullanımı ve sağlanacak potansiyel enerji tasarrufunun hangi seviyede olacağı konusunda tahmin yapıldığı takdirde; bu sistemler hem hafif ve az yer kaplayan, hem de çevreci ve ekonomik bir yardımcı sevk sistemi olma potansiyelini içermektedir.

Paraşütlerin, statik ve dinamik uçuş olmak üzere iki farklı koşulda kullanımı ile gemi sevk sistemlerine ilave çekme gücü sağlanabilmektedir. 320 m² paraşüt alanına sahip 50.000 DWT kapasiteli bir tanker gemisi, 9,77 m/s (Bofor 5) rüzgâr olan ortamda %10 yakıt tasarrufu sağlayabilmektedir (Leloup vd., 2016). Aynı gemi ile 15,68m/s (Bofor 7) rüzgârda ise %50'ye kadar yakıt tasarrufu elde edilebilmektedir. Enerji tasarrufunu bu derece artıran etken ise, paraşütün azimut, kalkıntı ve yörünge şeklinin sürekli olarak kontrol ve optimize edildiği dinamik uçuş koşullarıdır. Statik uçuş durumunda, sadece kalkıntı açısı kontrol edilmekte ve azimut açısı kalkıntı açısına bağlı olarak değişmektedir. Burada ifade edilen azimut ve kalkıntı açıları Şekil 4.13'te gösterilmektedir. Leloup vd. (2016) tarafından yürütülen araştırmada, paraşüt sistemi kullanan geminin maksimum savrulma açısı 2,85° ve ortalaması ise 1,42° olarak sonuçlanmaktadır. Rotadaki sapmayı ortadan kaldırmak için ise maksimum 3,13 dereceye ulaşan dümen kontrolü etkili olmaktadır. Ayrıca, maksimum savrulma açısındaki yanal kuvvet, toplam direnç kuvvetinin %0,83'üne ulaşmaktadır. Buradan; paraşüt yörüngesi, çekme halat boyu, rüzgâr ve gemiye ait hız ve yön bilgisinin gemi stabilitesi üzerinde etkili olduğu sonucuna varılabilmektedir.

Paraşüt etrafında türbülans olması halinde aerodinamik kuvvetlerin daha yüksek olacağı, bu sayede de daha fazla çekme kuvveti sağlanacağı Cadalen, Lanusse vd. (2018) tarafından savunulmaktadır. Paraşüt üç adet halatla gemiye bağlanmak istenirse, iki adedi paraşütün çıkış kenarında yönlendirme için, bir tanesine de önder kenarda çekme için kullanılmalıdır. Bunun sebebi ise, paraşüt üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetlerin yaklaşık %80'i önder kenara yakın bölgede oluşmaktadır. Kalan %20'lik aerodinamik kuvvetin oluştuğu bölge ise çıkış kenarına yakın olduğu

için çıkış kenarına bağlanan ve yönlendirme görevi yapan halatların güç ihtiyacı daha az olmaktadır. Bu da, paraşüt sistemden sağlanacak net güçte artış ile sonuçlanmaktadır (Cadalen, Lanusse vd., 2018). Ayrıca dikey ve yatay 8-şekilli uçuş yörüngeleri karşılaştırıldığında, elde edilen sonuçlar; dikey yörüngenin kontrolü için daha fazla güç harcandığını göstermektedir. Gerçekçi ve uygulanabilir bir çalışma için yatay 8-şekilli yörünge önerilmektedir (Cadalen, Griffon, Lanusse, Sabatier, ve Parlier, 2018).

Paraşüt sistemlerin avantajları yukarıdaki bilgiler doğrultusunda özetlenirse:

- Yüksek irtifalarda üniform ve daha hızlı rüzgârın olduğu atmosfer katmanında çalışmaları, rüzgâr enerji potansiyelini diğer rüzgâr enerji sistemlerine göre artırmaktadır.
- Hafif ve az yer kaplayan paraşüt sistemi sayesinde, rüzgâr türbinleri ve Flettner rotorlardaki ek yapısal ağırlıklar yer almamakta ve yelkenli gemilerdeki direk ve salma ağırlığı da bu sistemlerde bulunmamaktadır.
- Güverte üzerinde direk vb. yapıların yer almaması sebebiyle gemi ağırlık merkezi yukarılara taşınmamaktadır.
- Yelken, türbin ve Flettner rotor sistemlerinde rüzgâr kuvveti merkezinin güvertenin çok daha yukarısında olması nedeniyle gemi enine stabilitesi negatif etkilenmektedir. Bu durum, paraşüt sistemlerde ek çekme kuvvetinin güverteye çok yakın bir konuma aktarılmasıyla çözülmektedir.
- Paraşüt sistemler diğer rüzgâr enerji sistemlerine göre daha az yapısal eklenti ihtiyacı duyarlar, bu nedenle ilk kurulum maliyetleri diğer sistemlere göre çok daha azdır.
- Güverte üzerinde az yer kapladıkları için güvertelerinde yük taşıyan gemilere de kurulumu gerçekleştirilebilmektedir.
- Paraşütün güverte üzerinde belirli bir irtifada uçuşu sebebiyle, köprüüstü personeline geminin operasyonlarını kesintisiz yürütebilmesi için sağlanan görüş alanı kısıtlanmamaktadır.

Paraşüt üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetlerden elektrik enerjisi üreten veya bu kuvvetleri gemilerde çekme kuvveti olarak kullanan sistemler, dünyanın çeşitli

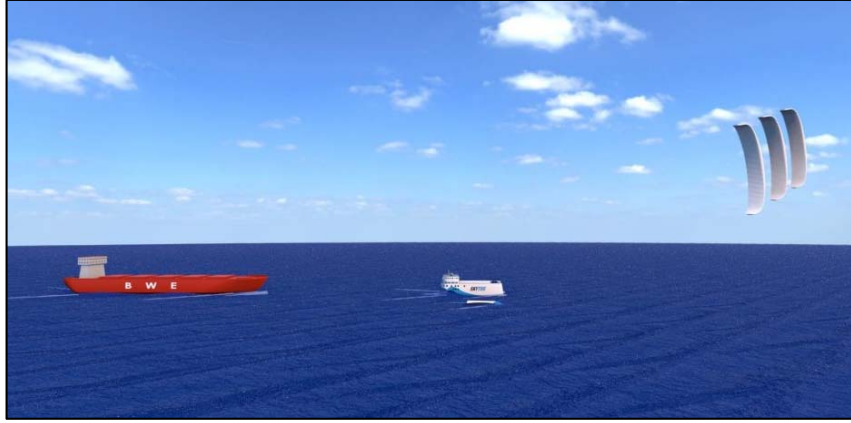
yerlerinde farklı kombinasyonlar halinde faaliyet göstermektedir. Enerkite®, Makani Power®, Kitepower Enevate BV® ve Ampyx Power® gibi şirketler paraşütten elektrik enerjisi elde etme üzerine çalışırken; Skysails®, Skytug®, Beyond the Sea® ve Airseas® gibi firmalar gemilerin çevreci ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olan rüzgâr ile sevk edilebilmesini sağlayan paraşüt yardımlı sevk sistemlerini tasarlamaktadır. Uluslararası Rüzgâr Gemisi Birliği (The International Windship Association [IWSA]), dünya çapında ticari denizcilik için rüzgâr tahriki sistemlerini teşvik etmekte ve endüstri ve devletlerin bu konudaki tutum ve politikalarını şekillendirmek için paydaşları bir araya getirmektedir (IWSA, 2022).

“Beyond the Sea” firmasının geliştirdiği çekme uçurtması sistemleri; 10 m², 20m² ve 40 m² paraşüt alanına sahip olup, 4-18 metre boy aralığındaki teknelerde kullanılabilmektedir (LibertyKite, 2022). Beyond the Sea’ye ait LibertyKite:40 m² modeli ise Şekil 4.5’te gösterilmektedir.



Şekil 4.5 Beyond the Sea firmasına ait “LibertyKite:40 m²” paraşüt modeli (LibertyKite, 2022)

İlk hedefleri Handymax ölçeğindeki dökme yük ve tanker gemilerine hizmet sağlayan ve paraşüt sevk sistemini kullanan römorkör tasarlamak olan “Skytug” firması bu konudaki paydaşlardan, “Bainbridge” (tekstil firması), “Bruce Goldsmith Design” (paraşüt üreticisi) ve “ICE Marine Design” (gemi tasarım firması) firmalarını bir araya getirmektedir (SkyTug, 2022). Paraşüt sevk sistemi sayesinde, karbonsuz yakıtların gemilerde kullanımı ile çevreci, ekonomik ve yenilikçi gemi sevk sistemlerini tasarlama çalışmaları devam etmektedir. Tasarlanan rüzgâr enerjisini kullanan römorkör modeli Şekil 4.6’da gösterilmektedir. Bu römorkör, deniz trafiğinin sıkışık olduğu bölgelerde çalışarak çevre kirliliğine yüksek düzeyde katkı yapmayı hedeflemektedir.



Şekil 4.6 SkyTug firmasına ait paraşüt sevk sistemine sahip römorkör tasarımı (SkyTug, 2022)

“Airseas” firmasının ise Japonya merkezli “K-Line” adlı deniz taşımacılığı firmasıyla yaptığı anlaşma ile 2050 sonuna kadar K-line filosu (günümüzde yaklaşık 520 adet gemi) rüzgâr destekli sevk sistemi ile desteklenecektir. “Seawing” adı verilen yeni nesil rüzgâr enerjili sevk sistemi, otomatik kontrolcüye ve 8-şekilli yörüngeye sahiptir ve Şekil 4.7’de örnek bir tasarım gösterilmektedir. Seawing sevk sistemlerinde yer alan paraşütler, 8-şekilli yörünge üzerinde 100 km/saat (yaklaşık 27,7 m/s) hıza kadar uçabilmektedir ve bu çalışmada kabul edilen paraşüt hızı değeri için referans oluşturmaktadır. Seawing model paraşüt sistemlerin kontrolcü mekanizması “EcoRouting” yazılımı ile entegre edilerek %10-40 yakıt tasarrufu ve buna bağlı sera gazı emisyonlarında azalma hedeflenmektedir (Airseas, 2022).



Şekil 4.7 Seawing paraşüt sistemi ile donatılmış bir kuru yük gemisi tasarımı (Airseas, 2022)

“Skysails” firması bu konudaki çalışmalarına 2001 yılında başlamış olup ilk projeleri olan “Beluga” (2008) ile okyanus aşırı sefer düzenlemişlerdir. 2011 yılına kadar adı *MS Beluga SkySails* olan kargo gemisinin adı değiştirilerek, günümüzde *Bbc Skysails* olarak kullanılmaktadır ve Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Bu gemi, 132 metre

uzunluğa ve maksimum 15,5 knot hız yapabilme kapasitesine sahiptir. 160 m² alana sahip paraşüt sevk sistemi ile %15-20 düzeyinde enerji tasarrufuna erişildikten sonra, 320 m² alana sahip paraşütle donatılmıştır (Nelissen vd., 2016). Böylelikle, seyir sırasında ana makinenin ihtiyacı olan yakıttan %30'a kadar tasarruf sağlayabilme potansiyeline ulaşılmaktadır.



Şekil 4.8 Skysails paraşüt sistemi ile donatılmış Bbc Skysails adlı gemi (SkySails, 2021)

Ayrıca, Skysails firması; 20 m², 40 m², 60 m², 80 m² ve 160 m²'lik paraşüt sevk sistemlerini 25-120 metre boya sahip yatlar için geliştirmektedir ve örnek bir uygulama Şekil 4.9'da gösterilmektedir (Skysails, 2017). Ticari gemiler için ise, 300 metre irtifaya çıkabilen ve 400 m² alana kadar paraşüt sevk sistemleri tasarlanarak üretilmektedir (SkySails, 2021).



Şekil 4.9 Bir yatın Skysails paraşüt sevk sistemi ile donatılması (Skysails, 2017)

4.4.1 Paraşüt Türleri

Denizcilik uygulamalarında operasyonel emniyet ön planda bulunmaktadır. Bu nedenle, rijit bir kanadın aksine esnek (kumaştan yapılmış) bir kanat formunun kullanılması tercih edilmektedir (van der Vlugt, Peschel, ve Schmehl, 2013). Paraşüt kumaşlarının genel özellikleri; yırtılmaya karşı dirençli olmaları, su geçirmemeleri ve ince olmalarına rağmen uzama eğilimi göstermemeleri olarak sıralanabilmektedir (Paulig, Bungart, ve Specht, 2013). Şekil 4.10'dan da görüleceği üzere esnek malzemeden imal edilen paraşütler halatlarla kontrol mekanizmasına bağlanmaktadır. İki adet C-şekilli (biri şişirilmiş) ve bir adet uçak formu benzeri (şişirilmiş uçurtma) paraşüt modelleri en çok kullanılan tasarımlardır.

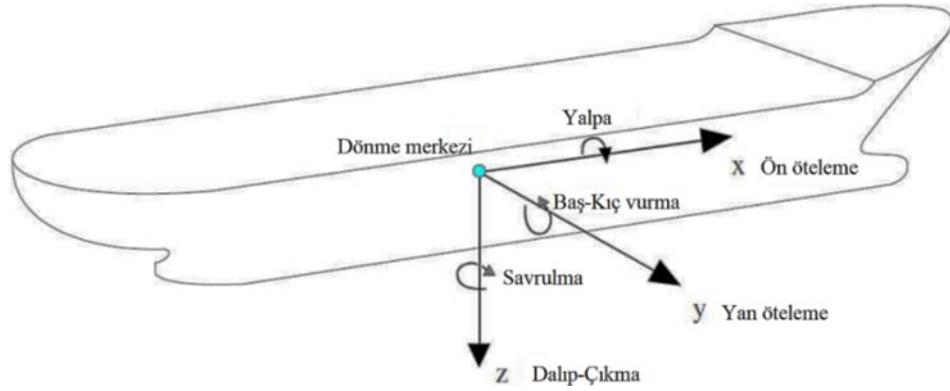


Şekil 4.10 Sık kullanılan paraşüt modelleri (van der Vlugt vd., 2013)

Şekil 4.10’da solda bulunan model kısmen de olsa rijit bir yapıya sahip olması sebebiyle ticari gemilerde kullanımı tavsiye edilmemekte olup, üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetin çoğunun kaldırma kuvveti olması sebebiyle kara tesislerinde elektrik enerji üretmede kullanılmaktadır (Ahmed, Hably, ve Bacha, 2012). Ortadaki model ise, uçuş esnasında lider kenara gelen hava ile şişirildiği için kullanım dışı olduğunda gemi üzerinde yer kaplamazlar ve bu sayede depolanması sorun teşkil etmemektedir (Fagiano, Milanese, Razza, ve Gerlero, 2010). Sağdaki model ise, yine C-şekilli olup önceden şişirilmiştir. Büyük ticari gemilerin sevk sistemine uygun bir paraşütün yüzey alanı güç ihtiyacı sebebiyle çok üst seviyelere çıkmaktadır. Bu sebeple, güverte üzerinde önceden şişirilmiş bir paraşütün depolanması pek de mümkün olmamaktadır. Fakat küçük teknelerde daha az paraşüt alanı ihtiyacı olması sebebiyle önceden şişirilmiş modeller tercihe bağlı olarak kullanılabilir. Bunlara ek olarak, ortadaki paraşüt modelinin kullanımı durumunda, herhangi aksi bir durumla karşılaşılıp paraşütün kaybı söz konusu olduğunda, yedek paraşütün gemi üzerinde herhangi bir bölümde depolanması daha olası gözükmemektedir (Leloup vd., 2016). Bu sebeplerle, bu çalışma için tasarlanacak paraşüt yardımcı sevk sisteminde, C-şekilli, önder kenardan giren havayla şişirilen paraşüt modelinin kullanımı uygun görülmektedir.

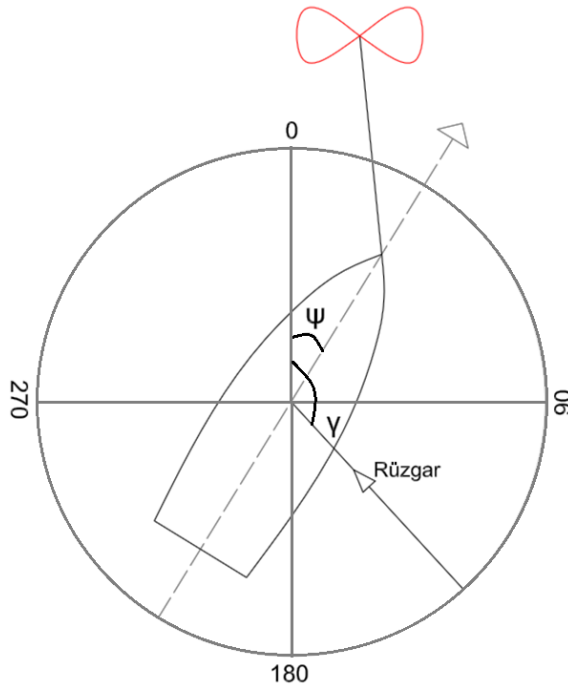
4.4.2 Koordinat Sistemleri

Yüzen bir geminin hareketi altı serbestlik derecesinde gerçekleşmektedir. Bu hareketlerden *Ön öteleme*, *Yan öteleme* ve *Dalıp-Çıkma* hareketi doğrusal olup; *Yalpa*, *Baş-Kıç vurma* ve *Savrulma* açısal hareketlerdir. Bu hareketlerin meydana gelmesinde dalga, rüzgâr, akıntı ve yerçekimi gibi çevresel faktörler etkili olacağı gibi, yükün yer değiştirmesi, geminin balast alması/boşaltması, yükleme ve boşaltma gibi gemiye özgü durumların da etkisinden söz edilebilmektedir. Şekil 4.11’de, bahsedilen gemi hareketlerinin gemiye ait sabit koordinat sistemi üzerindeki gösterimi yer almakta olup, “sağ el kuralına” göre düzenlenmiştir. Geminin ilerleme yönü x-ekseninin pozitif tarafında olup, y-ekseninin pozitif yönü geminin sancak tarafını işaret etmektedir. Yerçekimi ivmesi ise z-ekseninin pozitif yönünde etkimektedir.



Şekil 4.11 Gemi sabit koordinat sistemi

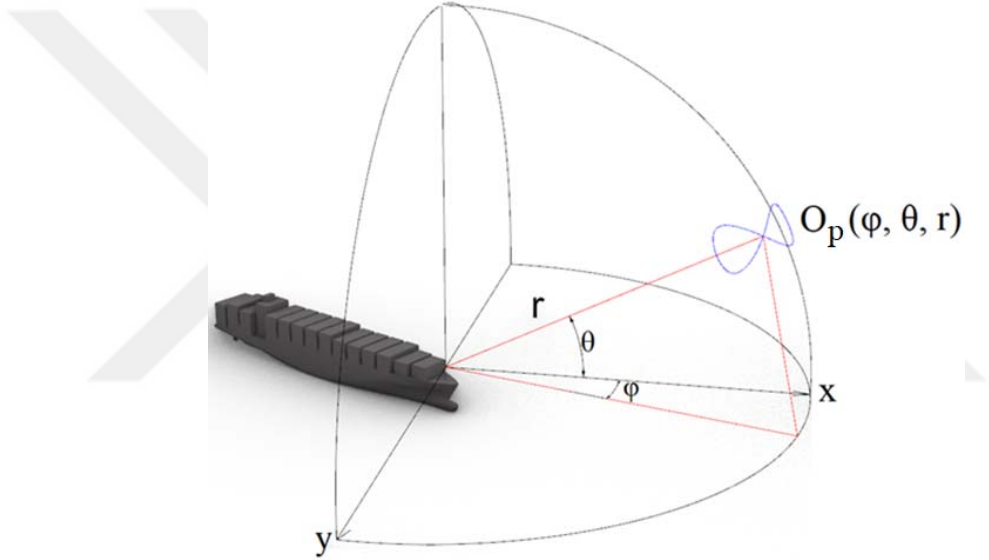
Deniz üzerinde yüzen bir geminin ilerleme doğrultusunu tarif ederken dört adet ana yön (doğu, batı, kuzey, güney), bunlarla ilintili ara yönler (kuzey-batı, kuzey-doğu, güney-batı, güney-doğu) ve geminin bu yönlerle arasındaki açı değerleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada gemiye ait ilerleme yönü 0-360 derece arasında değişen, saat yönünde artış gösteren ve Şekil 4.12’de şematize edildiği haliyle kullanılmaktadır. Örneğin; geminin ilerleme yönünün sıfır derece olması kuzeye, 180 derece olması ise güneye doğru seyir yaptığını göstermektedir. Bu ilerleme açısının sembolü ise “ ψ ” olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.12 Küresel koordinat sistemi

Geminin hareket yönünde olduğu gibi, rüzgârın herhangi bir bölgede, ortalaması alınarak bulunan, estiği yön de 0-360 derece aralığında ifade edilmekte olup, Şekil 4.12’de gösterildiği gibi kullanılmaktadır. Rüzgâr açısının 90 derece olması doğudan estiğini, 270 derece olması ise batıdan estiğini ifade etmekte ve açı değeri “ γ ” sembolü ile gösterilmektedir.

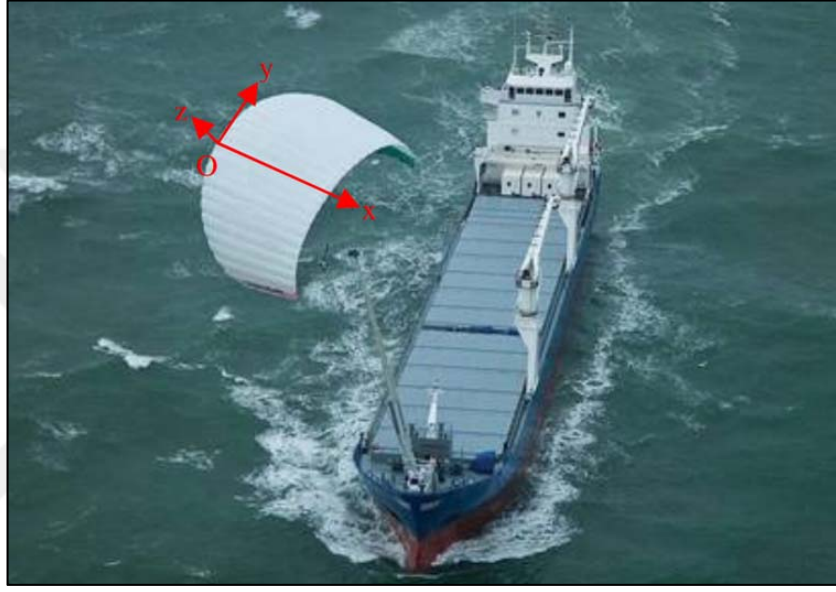
Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de gemi hareket yönleri ve rüzgâr yönleri tanımlanmaktadır. Bu çalışmanın ana bileşenlerinden bir diğeri olan paraşütün hareketi ise iki farklı koordinat sisteminde tanımlanarak hesaplamalar yapılmaktadır (Ran vd., 2013).



Şekil 4.13 Paraşütün gemi sabit koordinat sistemine göre konumu

Şekil 4.13, paraşütün gemiye ait sabit koordinat sistemindeki konumunu göstermekte olup, iki adet açısal değer olan azimut ve kalkıntı açılarıyla ve bir adet uzunluk değeri olan bağlama halatının boyu ile tanımlanmaktadır. Azimut açısı, çekme uçurtmasını gemiye bağlayan halatla geminin ilerleme yönü (veya merkez hattı) arasındaki açıdır, “ φ ” sembolü ile ifade edilir ve paraşüt hareketi geminin iskele ve sancak taraflarında maksimum 90’ar derece olarak kabul edilmektedir. Kalkıntı açısı ise, bağlama halatıyla deniz yüzeyi arasındaki açıyı ifade etmekte, “ θ ” sembolü ile gösterilmekte ve 0-90 derece arasında olduğu kabul edilmektedir. Kalkıntı açısının 90 derece oluşu, paraşütü bağlayan halatın geminin güvertesine dik olduğunu ifade etmektedir. Paraşütün havadaki konumunu belirlerken kullanılan bir diğer değişken

ise bağlama halatının boyudur ve “ r ” ile gösterilmektedir. Paraşütün irtifasını hesaplarken halat boyu ve kalkıntı açısı birlikte kullanılmakta ve irtifanın değişimi efektif rüzgâr hızındaki değişimi beraberinde getirmektedir. $O_p(\varphi, \theta, r)$ olarak Şekil 4.13’te gösterilen ve paraşütün 8-şekilli yörünge üzerindeki hareketini gemiye göre tanımlayan fonksiyon, çekme uçurtması üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetlerin gemiye katkısını hesaplarken kullanılan önemli bir unsur olarak göz önünde bulundurulmaktadır.



Şekil 4.14 Paraşüt sabit koordinat sistemi (Ran vd., 2013)

Paraşütün gemiye göre konumu, çekme uçurtmasından sağlanacak faydalı kuvvetin şiddetini belirlemektedir. Fakat bu faydalı çekme kuvvetini hesaplarken paraşütün 8-şekilli yörünge üzerindeki konumu ve hareketini de hesap etmek gerekmektedir. Bu hesabı yapabilmek için de, paraşüt üzerinde sabit bir koordinat sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple, Şekil 4.14’ten de görüldüğü üzere paraşüt üzerine konumlandırılmış “O” merkezli koordinat sistemi kullanılmaktadır. Paraşüt kendine ait koordinat sisteminde, 8-şekilli yörünge üzerindeki hareketini gerçekleştirirken kendi x-eksenini (küresel yüzeye teğet) takip etmektedir. Ayrıca, paraşütün uçuş yörüngesinin küresel bir yüzeyde bulunması sebebiyle, uçuş esnasında z-ekseninde de bir hız bileşeni mevcuttur ve bu yön küresel yüzeye diktir. Bu kabullere ilave olarak, paraşütün önceden belirlenen uçuş yörüngesinden sapmadığı varsayımı, kendi y-ekseni üzerinde (küresel yüzeye teğet) herhangi bir hareket gerçekleştirmediğini

göstermektedir. Bu da, çoğu mühendislik probleminde olduğu gibi, bu çalışmadaki problemin çözümünde karşılaşılabilecek karmaşıklığın üstesinden gelmeyi sağlamaktadır.

4.4.3 Paraşüte Etkiyen Kuvvetler

Bu çalışma kapsamındaki problemin çözümü için akışkanlar mekaniğinde dış akış olarak adlandırılan hareket ele alınmaktadır. Bir akışkan, katı bir cisim üzerinde hareket ettiğinde, yüzeye dik basınç kuvvetleri ve paralel kesme kuvvetleri meydana gelmektedir. Bu kuvvetler yüzeyin farklı bölgelerinde farklı kuvvet ve basınç dağılımı gösterebilir de, çoğunlukla bu kuvvetlerin büyüklükleri ve bileşkesi konusuna ilgi duyulmaktadır (Scupi vd., 2015). Basınç ve kesme kuvveti toplamının akış yönündeki bileşenine *sürüklenme kuvveti*, akışa dik yönde etki eden bileşenine de *kaldırma kuvveti* denilmektedir. Bu akış türüne günlük hayatımızda sıklıkla rastlamaktayız. Hareket halindeki bir taşıtın (otomobil, uçak, gemi) etrafında, elektrik hatlarında, ağaçlarda, binaların etrafında, rüzgâr türbinlerinde bahsedilen bu akışa ait örnek olaylar meydana gelmektedir (Çengel ve Cimbala, 2013). Bu tür mühendislik sistemlerini anlayabilmek ve tasarlayabilmek için bu akışın iyi anlaşılması gerekmektedir.

Yukarıda bahsedildiği gibi dış akış, bazen sabit bir yüzeyin etrafında oluşabileceği gibi bazen de hareket halindeki bir cismin üzerinde oluşmaktadır. Eğer akışkanın etkileşimde bulunduğu cisim hareketliyse, bağıl hız vektörünün hesap edilmesi gerekmektedir (Naaijen vd., 2006). Havada uçan bir uçağın kanadında veya bu çalışmada olduğu gibi bir paraşütün üzerinde oluşan akışkan kuvvetler, aerodinamik etkilerden kaynaklanmaktadır. Problemi dinamik yapan unsur ise cismin hareketidir. Cismin hareketiyle bağıl hız oluşmakta, bu sayede aerodinamik kuvvetlerin büyüklükleri de cismin ve akışkanın hızına bağlı olarak değişmektedir. Bu tür problemlerde kuvvetin şiddetini hesaplamak için akışkanın bağıl hız değerlerini bilmek tek başına yetersiz kalmaktadır. Buna ilave olarak, bu kuvvetin yönünün hesap edilmesi de gerekmektedir. Diğer bir ifadeyle, hareket halindeki cisim ile akışkanın ilerleme yönü arasındaki açının bilinmesi gerekmektedir. Akışkanın ve cismin birbirine göre konumları, hem aerodinamik kuvvetin büyüklüğünü hem de yönünü hesaplamada yüksek önem arz etmektedir.

Bu çalışmada incelenen ve hareket halindeki bir gemiyi çekmeye çalışan paraşüt, havadaki hareketini geminin güvertesine bağlanan halatın uçunda gerçekleştirmektedir. Bu sebeple, bu problem için iki adet hareket halindeki cisim (paraşüt ve gemi) ve havada serbestçe esen rüzgârın paraşüt ve gemiyle olan ilişkisi göz önünde bulundurulmaktadır. Rüzgârın doğası gereği irtifadaki değişim rüzgâr akış düzenini ve hızını etkilemektedir. İrtifa arttıkça havanın akışı üniform düzene geçmekte (laminer hava girişi) ve hızlanmaktadır (Ahmed vd., 2012). Bu durum, paraşüt sistemlere olan ilginin artmasının temelini oluşturmaktadır. Yükseklerle çıkıldıkça üniform düzene ulaşan hava akımı, rüzgâr enerji potansiyelini artırmakla kalmayıp, daha emniyetli uçuşun gerçekleşmesi için de gerekli bir koşul olarak görülmektedir (Zaidi vd., 2014). Böylelikle, paraşütün 8-şekilli yörüngede hareketini sağlayan kontrol mekanizmasına ilave görev de yüklenmemiş olmaktadır. Denklem 4.1’de irtifaya göre değişen rüzgâr hızının nasıl elde edileceği gösterilmektedir. Aşağıdaki denklemlerde (Denklem 4.1 - 4.27 arası) yer alan rüzgâr hızları “m/s”, açı değerleri “derece”, uzunluklar “metre”, yoğunluklar “kg/m³”, alanlar “m²” ve kuvvetler “Newton” biriminde kullanılmaktadır.

$$V_{rüzgar} = V_{rüzgar_{10m}} \cdot \left(\frac{r \cdot \sin(\theta)}{10} \right)^c \quad (4.1)$$

$V_{rüzgar}$ paraşütün uçuş irtifasındaki rüzgâr hızı, $V_{rüzgar_{10m}}$ deniz yüzeyinin 10 metre üzerindeki rüzgâr hızı ve c (1/7~0,142 açık deniz için) rüzgar gradyanı katsayısıdır (ITTC, 2014).

Rüzgârın hız vektörü paraşüt sabit koordinat sistemine aktarılmadan önce gemi sabit koordinat sistemindeki rüzgâr hızı bileşenleri belirlenmektedir. Bunun sebebi de, paraşütün gemiye bağlı ve geminin hızından etkileniyor oluşu olarak açıklanmaktadır ve bu hız bileşenleri Denklem 4.2 ve 4.3’te gösterilmektedir.

$$V_{x,rüzgar} = -V_{rüzgar} \cdot \cos(\gamma - \psi) \quad (4.2)$$

$$V_{y,rüzgar} = -V_{rüzgar} \cdot \sin(\gamma - \psi) \quad (4.3)$$

$V_{x,rüzgar}$ geminin ilerleme doğrultusundaki ve $V_{y,rüzgar}$ ise geminin bordasına dik yön oluşan rüzgâr hızı bileşenleridir. Böylelikle gemi hızından etkilenen rüzgârın bağlı

hız bileşenleri, gemi sabit koordinat sisteminde hesaplanabilmektedir. Denklem 4.4 ve 4.5'ten, gemi sabit koordinat sistemindeki bağıl rüzgâr hızları hesaplanmaktadır.

$$V_{x,rüz.gerçek} = V_{x,rüzgar} - u_{gemi} \quad (4.4)$$

$$V_{y,rüz.gerçek} = V_{y,rüzgar} - v_{gemi} \quad (4.5)$$

$V_{x,rüz.gerçek}$ rüzgârın gemi ilerleme doğrultusundaki bağıl hız bileşeni, $V_{y,rüz.gerçek}$ rüzgârın gemi bordasına dik bağıl hız bileşeni, u_{gemi} gemi sabit koordinat sisteminde geminin x-eksenindeki (ilerleme) hızı, v_{gemi} gemi sabit koordinat sisteminde geminin y-eksenindeki hızını ifade etmektedir. Burada bahsi geçen v_{gemi} 'nin oluşması için geminin yan ötelemeye maruz kalması, savrulması veya manevra yapıyor olması gerekmektedir. Aksi takdirde, geminin rotasından sapmadığı kabulü ile v_{gemi} hızı yok ($v_{gemi} = 0$) kabul edilmektedir.

Yukarıda verilen denklemler rüzgârın gemi sabit koordinat sistemindeki hız bileşenlerini elde etmek için kullanılmaktadır. Fakat paraşüt üzerine etkiyen aerodinamik kuvvetlerin hesaplanabilmesi için hava akışına ait hız bileşenlerinin paraşüt sabit koordinat sistemindeki değerlerini hesaplamak gerekmektedir. Diğer bir ifadeyle, paraşüt en kesit düzlemindeki hız bileşenlerinin biliniyor oluşu aerodinamik kuvvetlerin hesaplanabilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle paraşütün hareketi sırasında paraşüt sabit koordinat sistemindeki uçuş detaylarına ait birim vektörlerin gemi sabit koordinat sistemindeki karşılığının bilinmesi gerekmektedir. Aerodinamik kuvvetleri hesaplama işlemi üç adımlı bir sürece ihtiyaç duymaktadır (Ran vd., 2013) ve önceden belirlenen uçuş yörüngesindeki hareketler zaman adımı tanımlanmaktadır.

1. Adım; paraşütün konumuna ait birim vektörlerinin hesaplanmasıdır. Paraşüt sabit koordinat sistemindeki y-ekseninin uçuş yörüngesine dik ve küresel yüzeye teğet olması sebebiyle, paraşüt uçuşuna ait konum değerleri kendi koordinat sistemindeki xoz düzleminde gerçekleşmektedir. Buradaki hareketin ilerleme yönünün x-ekseni olması, paraşüt konumunun ilk olarak x-eksenindeki birim vektörünün tanımlanmasını gerektirmektedir ve Denklem 4.6'dan hesaplanmaktadır.

$$\hat{x} = [\frac{x_1}{l_x}, \frac{x_2}{l_x}, \frac{x_3}{l_x}] \quad (4.6)$$

Burada,

$$l_x = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \quad (4.7)$$

$$x_1 = r \cdot \cos(\theta_2) \cdot \cos(\varphi_2) - r \cdot \cos(\theta_1) \cdot \cos(\varphi_1) \quad (4.8)$$

$$x_2 = r \cdot \cos(\theta_2) \cdot \sin(\varphi_2) - r \cdot \cos(\theta_1) \cdot \sin(\varphi_1) \quad (4.9)$$

$$x_3 = -r \cdot \sin(\theta_2) - (-r \cdot \sin(\theta_1)) \quad (4.10)$$

θ_1 ve φ_1 uçuş hareketine ait hesaplanmak istenen zaman adımındaki kalkıntı ve azimut açıları olup, θ_2 ve φ_2 bir sonraki zaman adımındaki açısal değerlerdir.

Paraşüt hareketinin küresel yörünge yüzeyine sürekli olarak dik olan z-eksenindeki birim vektörü Denklem 4.11’de gösterilmektedir.

$$\hat{z} = [\frac{z_1}{l_z}, \frac{z_2}{l_z}, \frac{z_3}{l_z}] \quad (4.11)$$

Burada,

$$l_z = \sqrt{z_1^2 + z_2^2 + z_3^2} \quad (4.12)$$

$$z_1 = r \cdot \cos(\theta_1) \cdot \cos(\varphi_1) \quad (4.13)$$

$$z_2 = r \cdot \cos(\theta_1) \cdot \sin(\varphi_1) \quad (4.14)$$

$$z_3 = -r \cdot \sin(\theta_1) \quad (4.15)$$

2. Adım; paraşütün orta kesitindeki atak açılarının hesaplanmasıdır ve bunu yapabilmek için gemi sabit koordinat sistemindeki bağıl rüzgâr hızı bileşenleri olan $V_{x,rüz.gerçek}$ ve $V_{y,rüz.gerçek}$ ’in paraşüt sabit koordinat sistemine aktarılması gerekmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_{x,p,rüz.} \\ V_{z,p,rüz.} \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} V_{x,rüz.gerçek} \\ V_{y,rüz.gerçek} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Burada,

$$[T] = \begin{bmatrix} \hat{x}_{(1)} & \hat{x}_{(2)} \\ \hat{z}_{(1)} & \hat{z}_{(2)} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$V_{x,p,rüz.}$ rüzgârın paraşüt sabit koordinat sisteminde yer alan x-eksenindeki hızı olup, $V_{z,p,rüz.}$ ise aynı koordinat sisteminin z-eksenindeki rüzgar hızını temsil etmektedir. Ayrıca, $\hat{x}_{(1)}$ değeri $\frac{x_1}{l_x}$ iken, $\hat{x}_{(2)}$ değeri $\frac{x_2}{l_x}$ 'i ifade etmektedir. Benzer durum, $\hat{z}_{(1)}$ 'in $\frac{z_1}{l_z}$ 'ye ve $\hat{z}_{(2)}$ 'nin de $\frac{z_2}{l_z}$ 'ye eşit olduğunu göstermektedir. Böylece rüzgârın hız bileşenleri paraşüt sabit koordinat sistemindeki x ve z-eksenlerine aktarılmaktadır. Fakat 8-şekilli yörüngede paraşütün kendine ait bir hızının olması sebebiyle (bu hız dinamik paraşüt kontrolü sayesinde oluşmaktadır), paraşütün üzerine gelen hava akışı paraşütün kendi x-eksenindeki ilerleme hareketinden etkilenmektedir. Bu sebeple, Denklem 4.18 ve 4.19'a ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, $V_{z,p,rüz.ger.}$ hız bileşeninin, paraşütün uçuş yörüngesinde yaptığı yerçekimine karşı hareketi temsil etmesi sebebiyle, yörünge üzerinde yapılan tam bir tur harekete ait hız ortalamasının yalnızca sıfırdan büyük olması durumunda paraşüt havada kalabilmektedir. Aksi takdirde, paraşütün uçuş yörüngesinde oluşan bağıl rüzgâr hızının, paraşütü uçurmaya yetecek düzeyde oluşmadığı söylenebilmektedir.

$$V_{x,p,rüz.ger.} = V_{x,p,rüz.} + v_{paraşüt} \quad (4.18)$$

$$V_{z,p,rüz.ger.} = V_{z,p,rüz.} \quad (4.19)$$

Denklem 4.18 ve 4.19'dan elde edilen hız değerleri kullanılarak, paraşüte gelen havanın atak açısı ve bileşke hızı hesap edilebilmektedir. Denklem 4.20 ve 4.21 sırasıyla paraşütün atak açısını (α) ve rüzgârın efektif hızını (V_e) göstermektedir.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{V_{z,p,rüz.ger.}}{V_{x,p,rüz.ger.}}\right) \quad (4.20)$$

$$V_e = \sqrt{V_{x,p,rüz.ger.}^2 + V_{z,p,rüz.ger.}^2} \quad (4.21)$$

3. Adımda ise; deneysel formüller ve ilk iki aşamada elde edilen değerler kullanılarak aerodinamik kuvvetler hesap edilmektedir. Paraşüt üzerinde oluşan kaldırma, sürüklenme ve çekme halatına etkiyen kuvvetlerin hesabı, paraşütün 8-şekilli uçuş yörüngesindeki hareketinin zamana bağlı olarak değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu çalışmada bahsi geçen paraşüt sevk sistemi, küresel bir yüzey üzerindeki uçuş yörüngesinde uçan paraşütün küresel koordinat sisteminin farklı konumlarında elde ettiği çekme kuvvetinin ortalamasını kullanmaktadır. Bunun sebebi, paraşütün üzerinde oluşan kuvvetlerin zamana bağlı olarak değişmesinden kaynaklanmaktadır. Paraşüt üzerinde meydana gelen kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri sırasıyla Denklem 4.22 ve 4.23'ten hesaplanmaktadır.

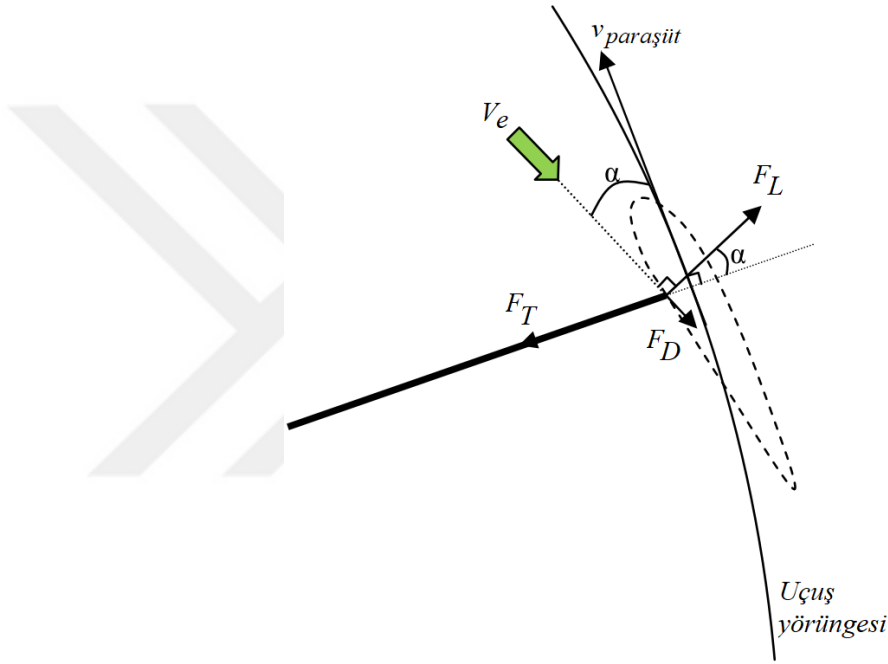
$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho_{hava} \cdot V_e^2 \cdot C_L \cdot A \quad (4.22)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_{hava} \cdot V_e^2 \cdot C_D \cdot A \quad (4.23)$$

Burada, ρ_{hava} havanın yoğunluğu ($1,18415 \text{ kg/m}^3$), C_L paraşüt modelinin kaldırma kuvveti katsayısı, C_D paraşüt modelinin sürüklenme kuvveti katsayısı ve A paraşüt modelinin yüzey alanıdır. Paraşütün yörünge üzerindeki hareketi esnasında α açısına ait değerler her bir zaman adımında farklılık göstermektedir. Bunun sonucunda, C_L ve C_D değerleri her zaman adımı için hesap edilerek, aerodinamik kuvvet katsayılarının yörünge üzerinde tam bir tur paraşüt hareketindeki ortalaması kullanılmaktadır.

Literatürde aerodinamik kuvvet katsayılarının hesabıyla ilgili birçok nitelikli çalışma bulunmaktadır. NACA (Havacılık Ulusal Danışma Komitesi - National Advisory Committee for Aeronautics [NACA]) kısa adıyla tarif edilen seri, aerofoil form tasarımında en çok kullanılan geometrileri içermektedir. Hava ortamının katı yüzey üzerindeki hareketi sırasında oluşan C_L ve C_D katsayıları gerçeğe en yakın olarak rüzgâr tüneli deneylerinden elde edilmektedir. Günümüz teknoloji altyapısının sunduğu imkânlar doğrultusunda, mevcut rüzgâr tüneli deneyleri bilgisayar ortamında, akışkanlar mekaniğinin temel prensipleri kullanılarak, simüle edilmekte ve deney sonuçlarıyla karşılaştırma ve doğrulamalar yapılabilmektedir. Bu sayede, deneyi yapılan bir formun ana özellikleri değiştirilmeden, atak açısı ve rüzgâr hızı gibi değişkenlerin değiştirilmesiyle farklı akış özelliklerine ait nümerik simülasyonlar

türetilmektedir. Böylelikle hem zamandan hem de deney maliyetinden tasarruf sağlanmaktadır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi olarak adlandırılan nümerik simülasyonlara ait detaylı bilgi bu çalışmanın ilerleyen bölümlerinde yer almaktadır. Bu çalışmada kullanılacak paraşüt modelinin 0-90 derece arası atak açılarındaki hareketi beşer derecelik aralıklarla HAD yöntemi ile simüle edilmekte; paraşütün 8-şekilli yörünge üzerinde uçuşu sırasında bulunduğu konumlarda sahip olduğu açı değerlerindeki kuvvet katsayıları ise, örnek HAD analizlerinden yola çıkılarak, Yapay Sinir Ağları yöntemi ile tahmin edilmektedir.



Şekil 4.15 Paraşüt üzerinde oluşan kuvvetler ve atak açısı (Ran vd., 2013)

Şekil 4.15'te görüldüğü gibi, kesit üzerinde oluşan kaldırma kuvveti efektif rüzgâr hızına, bağlama halatı da paraşüt uçuş hızına dik kabul edilmektedir. Efektif rüzgâr hızı ve paraşüt hızı arasındaki açı Denklem 4.20'de hesap edilen açı olup, paraşütün uçuşu sırasında sahip olduğu atak açısına karşılık gelmektedir. Dolayısıyla çekme halatına aktarılan gerilme kuvveti Denklem 4.24'ten hesaplanmaktadır.

$$F_T = (F_L \cdot \cos \alpha) + (F_D \cdot \sin \alpha) \quad (4.24)$$

Paraşüt üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetlerin gemiye iletimi çekme halatıyla yapılmaktadır. Bu kuvvetin ne kadarlık bir bölümünün faydalı çekme kuvveti olarak kullanılabileceği, azimut açısına ve kalkıntı açısına bağlı olarak değişmektedir. Çekme

halatında oluşan kuvvetin gemi sabit koordinat sisteminin x, y ve z-eksenlerindeki bileşenleri sırasıyla Denklem 4.25, 4.26 ve 4.27'den elde edilmektedir.

$$F_x = F_T \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi \quad (4.25)$$

$$F_y = F_T \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi \quad (4.26)$$

$$F_z = -F_T \cdot \sin \theta \quad (4.27)$$

F_x geminin ilerleme yönündeki ek çekme kuvveti, F_y gemi bordasına dik olan yanıl kuvvet olup, F_z yer çekimi doğrultusunda oluşan kuvvet bileşenidir.

4.4.4 Sistem Parametrelerinin Belirlenme Esasları ve Kabuller

Bu alt başlığın içeriğinde paraşüt sistemin havadaki operasyonlarını etkileyen; kontrol modellerinin arasındaki farklar, en/boy oranı değişiminin aerodinamik kuvvetlere etkileri, çekme halatına ait azimut ve kalkıntı açılarının önemi, çevre koşullarının paraşüt sisteme etkileri ve rüzgâr hızı dağılımını modelleyen fonksiyonlardan bahsedilmektedir.

4.4.4.1 Kontrol Modelleri

Paraşütün uçuş esnasındaki kontrolünün simüle edilebilmesi için geliştirilen temel model *Sıfır Kütle* modeli olup, aşağıdaki basitleştirmeleri içermektedir (Wellicome ve Wilkinson, 1984):

- Paraşütün sabit yarıçaplı küresel bir yüzeyde uçuş hareketi gerçekleştirdiği,
- Paraşütün ve halatın ağırlığının olmadığı,
- Halat üzerinde oluşan sürükleme kuvvetinin ihmal edildiği durumları içermektedir.

Böylece yerçekimi ve eylemsizlik kuvvetleri ihmal edilerek, çekme halatının düz olduğu ve uçuş yörüngesinin çekme halatına dik olduğu varsayımı, Şekil 4.15'te gösterildiği haliyle yapılabilmektedir. Bu sayede, havada serbestçe uçma kabiliyeti olan bir paraşüt sisteminin, belirli hata payları göz önünde bulundurularak 8-şekli

yörüngedeki uçuş hareketi simüle edilebilmekte ve gemilerdeki enerji verimliliğine katkısı kabul edilen bu toleranslarda tahmin edilebilmektedir.

Sıfır kütle modelinde ihmal edilen etkinin belirlenmesi için ise *Nokta Ağırlık* modeli geliştirilmiş olup; bu modelde, paraşüt halatın ucunda toplanmış bir ağırlık olarak düşünülmektedir (Cadalen, Lanusse vd., 2018). Burada da düz, ağırlıksız ve boyu değişmeyen çekme halatı kabulü yer almaktadır. Fakat paraşütün ağırlığından kaynaklı, paraşütün dönme hareketi yapmasıyla atak açısında belirli bir oranda sapma gerçekleşmektedir. Atak açısındaki bu değişime bağlı olarak da aerodinamik kuvvetlerde ve çekme halatına aktarılan gerilme kuvvetinde değişim meydana gelmektedir. Bu sayede sıfır kütle modelinde hesap edilmeyen kayıplar bulunabilmektedir. Bu çalışmadaki problemin çözümünde gemi hareketlerinin ve rüzgâr dağılımının da kullanılacak olması sebebiyle, aerodinamik kuvvetlerin hesaplanma sürecini basitleştirebilmek için, Sıfır Kütle paraşüt simülasyon modeline ait formülizasyon benimsenmektedir.

4.4.4.2 Paraşüt Geometrisi

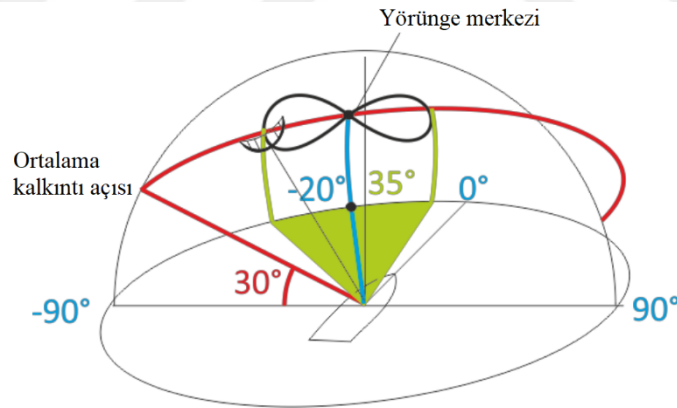
Paraşüt geometrisini uçak kanadından ayıran özellik; esnek yapıda olması, bu esnek yapıyı kontrol edebilme ve üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler sebebiyle geometrinin istenilen şekilde kalabilmesini sağlamak adına eğrisel forma sahip olmasıdır. Bu durum ilk bakışta sadece paraşüt üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetleri etkiliyor olarak gözükse de; paraşütün stabilitesi, tepkileri ve yönlendirme kabiliyetleri de büyük oranda etkilenmektedir (Roncin vd., 2020).

Aynı alana sahip düz ve eğrisel formdaki iki paraşüt arasında, aerodinamik kuvvetlerin farklı oluşundan kaynaklı olarak paraşüte ait dinamik özellikler, sistemin efektif çalışabilmesi adına belirlenmelidir. Örnek bir çalışmaya göre, paraşüt alanı sabit tutularak, en/boy oranının 4'ten 5'e çıkarılması sonucunda çekme kuvvetinde yaklaşık %15 kazanç sağlanmaktadır (Dadd vd., 2011). Bahsi geçen en/boy oranı değişikliğini sadece aerodinamik kuvvetler açısından değerlendirmek daha önce de bahsedildiği gibi, emniyetli seyir ve uçuş operasyonları için yetersiz kalmaktadır. Meydana gelen aerodinamik kuvvetlerin de göz önünde bulundurulduğu, havanın akışı sırasında paraşütü terk eden rüzgarın bulunduğu akışkan bölgede göreceli olarak daha

stabil akış koşullarını sağlayan paraşüt modelinin seçimi tavsiye edilmektedir. Bu çalışmada kullanılacak paraşüt geometrisinin seçimi, uygulama bölümünde yer almakta ve detaylarıyla anlatılmaktadır.

4.4.4.3 Kontrol Açıları

Paraşütün kullanımı esnasında çekme halatının sahip olduğu azimut ve kalkıntı açılarının seçimi, gemiye iletilecek ek çekme kuvvetinin yönü ve şiddeti açısından önem arz etmektedir. Teorik bilgiye dayanarak (Denklemler 4.25, 4.26 ve 4.27) çıkarım yapıldığında, paraşütün geminin merkez hattında ve deniz yüzeyine paralel bir konumda olması durumunda maksimum çekme kuvveti elde edilmektedir. Paraşüt kontrolcü mekanizmaları, 8-şekilli yörüngenin ortalama azimut açısını sıfır derecede (yani gemi merkez hattında ve pruva yönünde) tutmayı başarabilmektedir. Fakat paraşütün kontrolünün 8-şekilli bir yörüngede yapıyor oluşu ve paraşütün emniyetli kullanımı için kalkıntı açısının sıfır derece olamayacağı bilinmektedir. Ayrıca, kalkıntı açısının ortalama 30 derece olduğu koşul, ticari bir paraşüt üreticisi tarafından önerilmektedir (Wingit, 2021) ve bu açılar Şekil 4.16’da gösterilmektedir.



Şekil 4.16 Tavsiye edilen paraşüt kontrol açıları (Wingit, 2021)

Paraşütün emniyetli kullanımı için uygulanan kontrol açıları, paraşüt sevk sisteminden sağlanan ek çekme kuvvetindeki kayıpların kabul edilebilir limitler dâhilinde olmasını gerektirmektedir (Wingit, 2021). Kalkıntı açısının artışı, çekme kuvvetiyle ters orantılı olacağından, paraşüt üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler faydalı kuvvete dönüştürülememektedir.

4.4.4.4 Çevre Koşulları

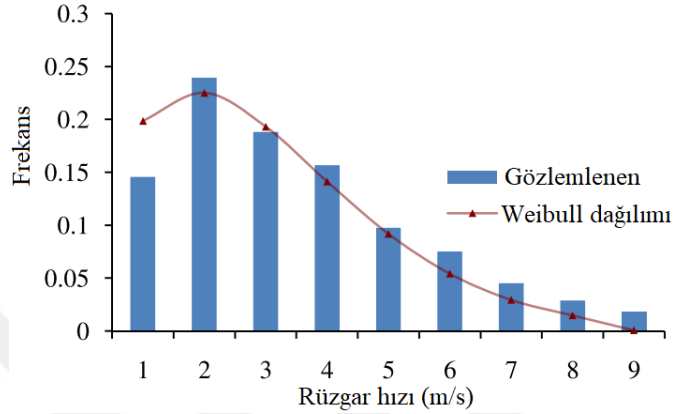
Çevre koşullarının geminin sudaki seyrine ve direncine etkisi çalışmanın üçüncü bölümünde açıklanmaktadır. Geminin dış ortamdaki etkilenmesi sonucunda Şekil 4.11’de belirtilen hareketleri yapmasıyla, gemiye bağlanan ve paraşütün havadaki uçuşunu sağlayan çekme halatı bu hareketlerden etkilenmektedir. Özellikle geminin dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketi sırasında, çekme halatına aktarılan gerilme kuvvetinde dalgalanma olabilmektedir. Böylelikle, harmonik dalıp-çıkma hareketi sırasında, çıkmanın gerçekleştiği anda halat üzerindeki gerilme kuvveti, eğer paraşüt kontrolcü devrede değilse, gemiye aktarılamayacaktır. Ters durumda, dalış hareketi sırasında ise halat üzerindeki gerilme kuvveti tamamıyla gemiye aktarılmaktadır. Benzer durum baş-kıç vurma için de geçerli olup, baş vurma hareketi süresince halat gergin kalırken, kıç vurma durumunda halat gerginliği ortadan kalkmaktadır. Bu hareketlerin paraşüt yardımcı sevk sistemine etkilerini değerlendirebilmek için geminin seyir bölgesinin çevre koşulları göz önünde bulundurulmalıdır.

Paraşüt sisteminin verimliliğini etkileyen ve deniz durumuna göre değişen dalga profilini düzenli dalgalar için modelleyebilme imkânı olsa da; karışık ve düzensiz dalgaların olduğu bir ortamda bunu başarabilmek için bazı kabullerin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada ele alınan örnek geminin çalışacağı seyir bölgesindeki dalga profilinin paraşüt sevk sistemine etkisinin paraşüt kontrol mekanizması tarafından tolere edildiği kabulü yapılmaktadır.

4.4.4.5 Rüzgâr Hızı Dağılımı

Literatürde, *Weibull*, *Rayleigh* ve *Lognormal* gibi farklı rüzgâr hızı dağılım modelleri bulunmaktadır. Bunlar arasında iki değişkenli Weibull dağılım fonksiyonu daha çok tercih edilmektedir (Manwell, McGowan, ve Rogers, 2010). Bunun nedeni de, Weibull dağılım fonksiyonunun, geniş zaman diliminde kayıtlı rüzgâr verisine uygunluğu olarak ifade edilmekte ve Şekil 4.17’de örnek veri sunulmaktadır. Weibull dağılımının basit ve esnek yapıda bir fonksiyon olması bu durumun en etkili sebebi olmaktadır (Islam, Saidur, ve Rahim, 2011). Bu istatistiksel araç, belirli ortalama rüzgâr hızına sahip bir bölgede farklı hızlardaki rüzgârın ne sıklıkla görüleceğini ifade etmekte olduğundan, rüzgâr enerjisi kullanan sistemlerin potansiyelinin

belirlenmesinde kullanılmaktadır. Ancak, sıfıra yakın veya çok düşük rüzgâr hızlarında bu dağılım beklenen sonucu vermemektedir (Ammari ve Al-Maaitah, 2003). Bununla birlikte, düşük rüzgâr hızlarında mevcut rüzgâr enerjisinin kullanımının uygun olmaması sebebiyle bu ihtimal göz ardı edilmektedir (Akpınar ve Akpınar, 2005).



Şekil 4.17 Örnek bir rüzgâr verisi “Yer: Kudat, Yıl: 2008” (Islam vd., 2011)

Weibull fonksiyonunun hem rüzgâr hızı hem de rüzgâr enerjisinde yaygın kullanımı, *olasılık yoğunluk fonksiyonu* ve *kümülatif dağılım fonksiyonunun* aynı anda kullanılmasından kaynaklanmaktadır (Ammari ve Al-Maaitah, 2003). Rüzgâr hızı olasılık yoğunluk fonksiyonu, incelenen alanda rüzgâr hızının muhtemel hâkim olduğu zaman dilimini göstermektedir ve Denklem 4.28’den hesaplanmaktadır.

$$f(x) = \left(\frac{k}{C}\right) \cdot \left(\frac{x}{C}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{C}\right)^k}, \quad k > 0, x \geq 0, C > 1 \quad (4.28)$$

Burada; $f(x)$, x (m/s) rüzgâr hızının meydana gelme olasılığı olup, k boyutsuz Weibull şekil parametresi (yüksek değerler, dağılımın belirli bir değer etrafında toplandığını, düşük değerler ise geniş bir değer dağılımı olduğunu göstermektedir) ve C (m/s) eğrinin konumunu sabitleyen Weibull ölçeği parametresidir (kuvvetli rüzgârlar için daha yüksek değer alırken, durgun rüzgâr durumu için daha düşük değer almaktadır).

$$F(x) = 1 - e^{-(x/C)^k} \quad (4.29)$$

İstatistiksel analiz sırasında rüzgâr enerji sistemlerinin potansiyelini belirleyebilmek için kullanılan *kümülatif dağılım fonksiyonu* ise *olasılık yoğunluk*

fonksiyonunun integralinin alınmasıyla elde edilmekte ve Denklem 4.29'da gösterilmektedir (Akpınar ve Akpınar, 2005).

Bilimsel bir araştırma veya rüzgâr enerji sistemi tasarımı yapılırken mevcut bölgeye ait herhangi bir yıllık rüzgâr dağılımı verisi bulunmuyorsa, Weibull dağılımında k değeri ikiye eşit alınarak tahminleme yapılmaktadır (Wais, 2017). Burada bahsedilen, $k = 2$ olması durumunda elde edilen rüzgâra ait olasılık yoğunluk dağılımı *Rayleigh Dağılımı* olarak adlandırılmaktadır ve Denklem 4.30'da gösterilmektedir (Bidaoui, El Abbassi, El Bouardi, ve Darcherif, 2019).

$$f(x) = \left(\frac{x}{\sigma^2}\right) \cdot e^{-x^2/2\sigma^2}, \quad x \geq 0 \quad (4.30)$$

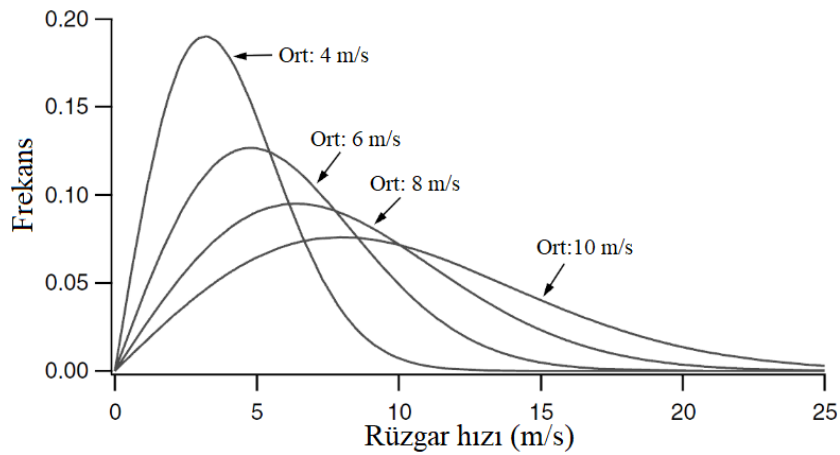
Burada, σ değeri C değerinden türetilmekte ve Denklem 4.31'de gösterilmektedir.

$$C = \sigma \cdot \sqrt{2} \quad (4.31)$$

Rayleigh dağılımının ortalama değeri (μ), yani ortalama rüzgâr hızı ise Denklem 4.32'den hesaplanmaktadır.

$$\mu = \sigma \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \approx 1,253 \cdot \sigma \quad (4.32)$$

Şekil 4.18'de Rayleigh dağılım fonksiyonu ile elde edilmiş, farklı ortalama rüzgâr hızlarının olasılık yoğunluğunu gösteren grafik yer almaktadır.



Şekil 4.18 Örnek Rayleigh rüzgâr dağılımları (Manwell vd., 2010)

Rayleigh dağılımı, genellikle gerçek rüzgâr hızı ölçümlerine iyi uyum sağlamakta ve ön analizleri basitleştirmektedir. Bu nedenle, rüzgâr enerji sistemlerinin uygulama sahasının değerlendirilmesinde yer almaktadır (Jannis, 2012). Bu çalışmada, seçilen seyir bölgesindeki aylık hâkim rüzgâr verisinin, 10 yıllık rüzgâr arşivinden elde edilmesi dolayısıyla, istatistiksel dağılım grafiklerinden faydalanılmamaktadır. Bunun yerine, gerçekleşmiş rüzgâr verisinden yola çıkarak elde edilen aylık hâkim rüzgâr hızı ve yönünün kullanımı söz konusu olmaktadır.



BÖLÜM BEŞ

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YÖNTEMİ

Sıvı ve gazların akışının, ısı transferinin ve kimyasal reaksiyonların modellenmesini sağlamak amacıyla 1980’lerde popüler olmaya başlayan ve günümüze kadar pek çok iyileştirmeyi içerecek şekilde geliştirilen bu yöntem; temelde, akışkan ortamı sonlu küçük parçalara bölerek maddenin hız, sıcaklık, basınç ve yoğunluk gibi fiziksel özelliklerinin analizinde kullanılmaktadır (Patel vd., 2014). Problemin çözümü için tanımlanan bu akışkan alanına kontrol hacmi denilmekte olup açık veya kapalı sistem çevrimi oluşturularak çözüm için gerekli bütün fiziksel özelliklerin tanımlanması gerekmektedir. Bir geminin etrafında oluşan dalga sistemi, pervaneden elde edilecek sevk kuvveti, uçak kanadında meydana gelen kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri gibi akışkan malzemenin katı yüzeyle etkileşimi sonucunda meydana gelen olayların analizinin yanı sıra; içten yanmalı makinelerin silindirlerindeki yanma olayı, kirlenici gazların atmosferde yayılımı ve hatta nehirlerin akış rejimi bu yöntemle simüle edilebilmektedir (Molland vd., 2017).

Endüstrinin birçok alanında kendine yer bulan HAD yöntemi, bilgisayar sistemlerinin gelişimine paralel bir gelişme göstermektedir. Bu sayede, mühendislik tasarımlarının prototipi üretilmeden analizi yapılabilmektedir. Geleneksel deney düzeneği kurulmadan yapılan analizler sayesinde zaman ve maliyetten büyük kazançlar elde edilmektedir (Papanikolaou vd., 2011).

HAD yöntemiyle problem çözümü için en genel ifadeyle üç temel işlem adımı uygulanmaktadır. Bunlardan ilki; ön işlem olarak adlandırılan çözüm ağının (mesh yapısının) oluşturulması ve bölümlendirilmesi olup, ikinci adımda; temel sayısal denklemler, çözüm değişkenlerinin tanımlanması ve sayısal yöntemler belirlenmektedir. Üçüncü adımda ise, hesaplanması istenen değişkenlerden olan basınç, sıcaklık, kuvvet ve moment gibi fiziksel özelliklerin görüntülenmesi yapılmaktadır (Malcevic ve Ghattas, 2002).

5.1 Temel Sayısal Denklemler

Hesaplamaalı akışkan alanını tanımlayan matematiksel modeller, kontrol hacminde tanımlanmış problem koşullarına karşılık gelecek şekilde farklı kapsamlarda sunulan korunum ilkelerini içeren temel fiziksel yasalardan türetilmektedir. Bu yasalar Eulerian veya Lagrange yaklaşımıyla ifade edilmektedir. Eulerian yaklaşımında, belirli bir hacim, malzemenin içinden akabileceği akışkan alanının bir bölümünü temsil eder. Lagrange yaklaşımında ise aksine, bu belirtilen hacim, akışkan alandaki maddenin bir bölümünü temsil eder (Dapelo ve Bridgeman, 2018). Yani, Lagrange yaklaşımında, bir gözlemci akışkan maddenin akışkan alandaki hareketini izleyebilmektedir.

Akışkan alanları için HAD hesaplamaları Navier-Stokes denklemleri kullanılarak yapılmaktadır. Akışkanlar mekaniğinin temel özelliği olan mekanik kuvvetlerin sürekliliği göz önünde bulundurularak; akışkan hareketinden kaynaklanan çekme kuvvetleri, viskoz ve basınç kuvvetlerinin toplamı olarak ifade edilmektedir. Bu kuvvetin büyüklüğü, sıvının hız, basınç, sıcaklık ve yoğunluk gibi fiziksel özellikleriyle ilgilidir. Bu nedenle, süreklilik mekaniğini yöneten temel yasalar, kütle, doğrusal momentumun, açısal momentumun ve enerjinin korunumunu içermektedir (Zawawi vd., 2018). Bu ifadeler, akış koşuluna bağlı olarak değişim göstermekte olup; iç/dış akış, sıkıştırılabilir/sıkıştırılamaz akış, laminar/türbülanslı akış, doğal/zorlamalı akış, daimi/daimi olmayan akış gibi akış çeşitlerinin olması sebebiyle akışkanlar mekaniğine ait tanımlamaların problem çözümünden önce belirlenmesi hayati önem taşımaktadır.

5.1.1 Kütle Korunumu

Akış alanında bulunan kütle, sürekliliği, Denklem 5.1’de gösterilen kütle korunumu dengesi ile ifade edilmektedir (Linke, 2009).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (5.1)$$

Burada, ρ akışkanın yoğunluğu (her bir kontrol hücresindeki) ve $\mathbf{v}$ ise sürekli ortam hızıdır.

5.1.2 Lineer Momentumun Korunumu

Zaman içinde lineer momentumdaki değişim, süreklilik üzerine etki eden bileşke kuvvete eşittir ve Denklem 5.2 ve 5.3'te gösterilmektedir (Zaidi vd., 2014).

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \otimes v) = \nabla \cdot \sigma + f_b \quad (5.2)$$

Burada $\otimes$ dış çarpımı, f_b süreklilik üzerine etki eden birim hacim başına cismin bileşke kuvvetleri (yerçekimi ve merkezkaç kuvvetleri gibi) ve σ gerilme tensörünü belirtmektedir. Bir akışkan için, gerilme tensörü genellikle normal gerilmelerin ve kayma gerilmelerinin toplamı olarak yazılır, $\sigma = -pI + T$, burada p basınç, I özdeğer tensörü ve T viskoz gerilme tensörüdür.

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \otimes v) = -\nabla \cdot (pI) + \nabla \cdot T + f_b \quad (5.3)$$

5.1.3 Açısal Momentumun Korunumu

Açısal momentumun korunumu, gerilme tensörünün simetrik olmasını gerektirmekte ve bu teori Denklem 5.4'te gösterilmektedir (Çengel ve Cimbala, 2013).

$$\sigma = \sigma' \quad (5.4)$$

5.1.4 Enerjinin Korunumu

Son olarak, termodinamiğin birinci yasası kontrol hacmine uygulandığında, enerjinin korunumu Denklem 5.5'te olduğu gibi ifade edilmektedir (An, Fung, ve Yim, 2013).

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E v) = f_b \cdot v + \nabla \cdot (v \cdot \sigma) - \nabla \cdot q + S_E \quad (5.5)$$

Burada E birim kütle başına toplam enerjidir, q ısı akısıdır ve S_E birim hacim başına bir enerji kaynağıdır.

5.1.5 Akışkan Akışı Denklemleri

Akışkan maddeye ait akışı modelleyebilmek için Denklem 5.1, 5.3 ve 5.5 sonlu küçük kontrol hacmi üzerinde integre edildiğinde; Denklem 5.6'daki *Süreklilik*

denklemine, Denklem 5.7'deki *Momentum denklemine* ve Denklem 5.8'deki *Enerji denklemine* ulaşılmaktadır (Zawawi vd., 2018).

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \oint_A \rho v \cdot da = \int_V S_u dV \quad (5.6)$$

Burada, t zaman, V hacim, a alan vektörü, S_u kullanıcı tarafından belirlenen bir kaynak terimidir.

Momentum denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho v dV + \oint_A \rho v \otimes v \cdot da = - \oint_A p I \cdot da + \oint_A T \cdot da + \int_V f_b dV + \int_V S_u dV \quad (5.7)$$

Enerji denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho E dV + \oint_A \rho H v \cdot da = - \oint_A q \cdot da + \oint_A T \cdot v \cdot da + \int_V f_b \cdot v dV + \int_V S_u dV \quad (5.8)$$

Burada, H toplam entalpiyi ifade etmektedir.

HAD yöntemleri genellikle, yukarıdaki denklemlerle ifade edilen özelliklerin belirlenen sistem geometrisi içerisinde yer alan bütün sonlu küçük hacimlere uygulanmasını sağlamaktadır. Böylece geometrik sistem bir sayısal denklem sistemine dönüştürülerek, çözüm uzayında ve zamanda yönetici denklemler ayrıklaştırılmaktadır. Buradan elde edilen ayrık denklemlerin sayısal çözümü sayesinde ise sistem lineer hale dönüşmektedir. Eğer bir problemin çözümünde, kontrol hacimlerinin çözüm için uygun ağ yapısına sahip olmasına rağmen, kararsız durum söz konusu ise; fiziksel çözüme ait, eğer varsa, zaman aralığı sisteme uygun olarak yeniden belirlenmektedir (Terziev vd., 2019).

5.2 Sayısal Ayrıklaştırma Yöntemleri

Bu yöntemlerin amacı, akışkan alanı içinde yer alan sonsuz sayıdaki noktada çözümü gerçekleştirmek yerine, sonlu düğüm noktasındaki akışa ait özellikleri belli zaman dilimlerinde hesaplamaktır. Böylece taşınım denklemleri çözülebilir sayısal ifadeler haline gelmektedir. *Sonlu Farklar Yöntemi*, *Sonlu Hacimler Yöntemi* ve *Sonlu*

Elemanlar Yöntemi gibi ayrıklaştırma yöntemleri sayesinde akış özellikleri çözümlenebilmektedir.

Sonlu hacimler yöntemi; akışkan alanının sonlu küçük hacimlere bölünerek, bu hacimlere ait yüzeylerdeki akıların ve kısmi diferansiyel denklemlerin integrallerinin ayrıklaştırılmasıyla hesaplanmasıdır. Bu yöntemde, komşu iki yüzeyden birine giren akı, diğer yüzeyden çıkan akıya eşit kabul edildiği için kararlı sonuçlar elde edilmektedir (Paluszny, Matthai, ve Hohmeyer, 2007). Bu sayede, büyük hacimlerin sayısal çözümünün yapılabilmesine olanak tanınmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi; genellikle katı cisimlerin yapısal analizinde kullanılmakta olup sıvılara da uygulanabilmektedir. Katı cismin dinamiğinden yola çıkılarak türetilen bu yöntemin akışkan maddeye uygulanması, kısmi diferansiyel denklemlerin integrallerinin ayrıklaştırılmasıyla gerçekleştirilmektedir (Nikbakht vd., 2019). Burada, sonlu hacimler yöntemine göre daha yavaş sayısal çözüm elde edilmektedir. Fakat bu yavaş çözümün sağladığı avantaj sayesinde daha kararlı çözüme ulaşılabilmektedir. Bununla birlikte artan hesaplamalardan dolayı daha fazla bilgisayar gücü gereksinimi de bulunmaktadır.

Sonlu farklar yöntemi; diğer iki yöntemdekinin aksine, kısmi diferansiyel denklemlerin kendisi ayrıklaştırılarak sayısal çözüm elde edilmektedir (Zawawi vd., 2018). Diferansiyel denklemlerin cebirsel ifadelerle dönüşümü ise Taylor serisi ile yapılmaktadır. Yöntemin bu özelliği sayesinde ısı transferi ve akışkan problemleri birlikte çözülebilmektedir.

5.3 Sayısal Yöntemler

Akışkan malzemeye ait akışın yaklaşık olarak modellenebilmesi için akım denklemlerinin zamandan etkilenip etkilenmediği belirlenmelidir (Takabatake ve Sakai, 2020). Yağmurdan sonra akarsulardaki suyun akışında gerçekleşen değişim, yakıtın silindirin içinde yanması sonucu ortaya çıkan sıcaklık dalgalanmaları, hızlanan bir otomobilin gövdesinde oluşan aerodinamik kuvvetler, derinlere doğru dalış yapan bir denizaltının üzerindeki hidrodinamik kuvvetler zaman içerisinde değişim gösterdiği için problemin çözümü *zamana bağlı* kabul edilmektedir (Alauzet, Frey,

George, ve Mohammadi, 2007). Böyle durumlarda belirli bir *zaman adımı* içerisinde ilerlemek gerekmektedir.

Bunun aksine, sabit hızla sakin suda ilerleyen bir geminin etrafındaki dalga sistemi, uçağın kanadına sabit fiziksel koşullarda çarpan havanın meydana getirdiği aerodinamik kuvvetler zamandan etkilenmediği için çözüm adımlarındaki sınır koşulları da değişmemektedir. Böyle durumlara *zamandan bağımsız* problemler denilmektedir ve zamana bağlı çözümlere göre sayısal analizi daha hızlı yapılabilmektedir (Linke, 2009). Bazı durumlarda, zamana bağlı bir problemin zaman içindeki fiziksel koşullarının ortalamaları kullanılarak çözüm algoritmasından daha hızlı ve kararlı sonuç elde edilmesi de sağlanabilmektedir (Hall, Ekici, Thomas, ve Dowell, 2013).

5.4 Sınır ve Başlangıç Koşulları

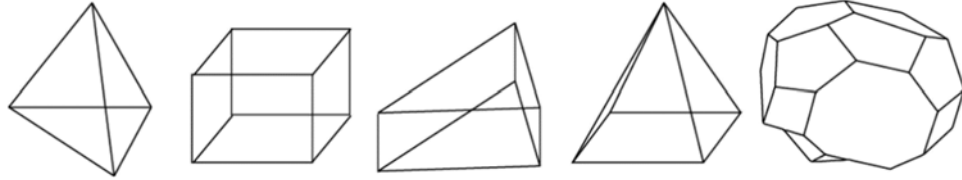
HAD yönteminde problemin çözümünde kullanılacak ve deney ortamının koşullarını da yansıtacak şekilde belirlenen sınır şartları, matematiksel çözüme başlamadan önce belirlenmektedir (An vd., 2013).

Bunlar (Pereira vd., 2013); akışkanın çözüm alanına giriş ve çıkışını gösteren tanımlamalar olacağı gibi akışkan alanının fiziksel koşulları da olmaktadır. Sisteme giren akışkanın hızı biliniyorsa “hız girişi”, hızı bilinmiyıp basıncı biliniyorsa “basınç girişi” koşulu ile çözüm başlatılabilmektedir. Ayrıca girişte belli bir kütle akışı varsa “kütle girişi” de uygulanmaktadır. Akışkanın sistemin dışına çıktığı bölgedeki sınır yüzey “basınç çıkışı” olarak tanımlanmakta ve statik basınç koşulu uygulanmaktadır. Katı cisim/yüzeyi belirten ve akışkan maddenin etkileşimde bulunduğu geometri ise “duvar” sınır koşulu ile belirtilmektedir. Fiziksel ortam veya akışın simetrik olması koşulunda da “simetri” koşulu kullanılmaktadır.

5.5 Ağ Yapıları

Akışkan alanında temel sayısal denklemlerin uygulanabilmesi için uygun sonlu küçüklükte akışkan hacimlere ihtiyaç duyulmaktadır (Malcevic ve Ghattas, 2002). Böylelikle her bir hücreye ait maddesel özelliklerin analizi sayesinde akışkan alanının tümüne ait akış özellikleri tahmin edilebilmektedir. Her sonlu küçük hacimde/hücrede

karar verilen çözüm algoritmasının ayrı ayrı uygulanması, problemin çözümü için yüksek kapasiteli bilgisayar altyapısı gerektirmektedir (Lintermann, 2021). Hücrelerin boyutu, yüzey özellikleri (üçgen, dörtgen, altıgen, vb.) ve dağılımları (yer yer sık veya seyrek olmaları) çözüm algoritmasının hızını etkileyebileceği gibi çözümün hassasiyetini ve doğruluğunu da etkilemektedir.



Şekil 5.1 Örnek 3-boyutlu HAD elemanları (Lintermann, 2021)

Belirtilen sebeplerden dolayı, akışkan alanına atanan ağ (mesh) yapısı özelliklerinin çözüme etkisi analiz edilerek optimum yapıda çözüm ağları oluşturulmalıdır. Şekil 5.1’de HAD yönteminde kullanılan örnek ağ elemanları gösterilmektedir. Ayrıca bazı problemler için hareketli veya birbiri içine geçen çözüm ağlarına ihtiyaç duyulması, ağ yapılarının HAD analizleri için hayati önem taşıdığına bir göstergesidir (Malcevici ve Ghattas, 2002).

5.6 Türbülans Modelleri

Akışkanlar mekaniğinde yer alan problemler üç grupta incelenmektedir. Bunlar; laminar, geçiş ve türbülanslı akış özelliği gösteren akışkan hareketleri olup, yönetici denklemler akış rejiminden etkilenmektedir (Tutar ve Hold, 2001). Laminar akışta, akışkan madde tabakalar halinde birbiri üzerinde kayarak ilerlemekte ve bu tabakalar birbirine karışmamaktadır (Chaware ve Sewatkar, 2018). Doğada bu akış, yer altı sularında gerçekleşmektedir. Akışın türbülanslı olma durumu ise, akışkan parçacıkların karmaşık bir yörüngede belli belirsiz hareketler yapması olarak tanımlanabilmektedir (Cai, Memin, Derian, ve Xu, 2018).

Mühendislikte akışkan akışları çoğunlukla düzensiz dalgalanan akışlarla karakterize edilmektedir. Bu dalgalanmaların çoğu o kadar küçük büyüklüklerde ve yüksek frekanslardadır ki, onları zaman ve uzayda çözmek aşırı hesaplama çabası gerektirmektedir (Çengel ve Cimbala, 2013). Türbülanslı akışların kesin denklemlerini çözmek yerine (doğrudan sayısal simülasyon), ortalama veya filtrelenmiş miktarların

özölmesiyle ve küçük dalgalı yapıların etkisinin yaklaşık olarak hesaplanmasıyla (tahmin edilmesiyle) daha az çaba sarf edilmektedir (Stoll, Gibbs, Salesky, Anderson, ve Calaf, 2020). Bununla ilgili olarak farklı çözüm yaklaşımları sunan türbölans modelleri bulunmaktadır. *Reynolds-Ortalama Navier-Stokes türbölans modelleri* ortalama akış miktarlarını taşıyıcı denklemler ile çözümleme üzerine kurulmuşlardır. Böylelikle büyük miktarlar modellenmekte ve problemin çok küçük bir bölümü özölmemektedir. *Ölçek özücü türbölans modelleri* ise, büyük miktarı çözerek küçük bir bölümünü Büyük Girdap Simölasyonu (Large Eddy Simulation [LES]) ve Ayrılmış Girdap Simölasyonu (Detached Eddy Simulation [DES]) gibi yöntemlerle modellemektedir (Soydan Oksal, Aköz, ve Simsek, 2020). Aşağıda bazı çok kullanılan türbölans modellerinden örnekler verilmektedir.

- Spalart-Allmaras,
- Standart K-Epsilon,
- Gerçeklenebilir K-Epsilon,
- Standart K-Omega,
- Reynolds Stres Modeli,
- SST (Shear-stress transport - Kesme gerilmesi taşıması) K-Omega

Mevcut tüm türbölans modelleri, türbölansa ait fiziksel olguların yaklaşık temsili olarak kabul edilmektedir. Fakat belirli türbölans modelleri belirli akış türlerinde daha iyi sonuç vermektedir (Rezaeiha, Montazeri, ve Blocken, 2019). Bu da, her türbölans modelinin farklı fiziksel olguları çözümleyebilme amacıyla türetilmesinden kaynaklanmaktadır. Türbölans modelinin seçimi konusunda, akış fiziğı, problemin çözümünden beklenen hesaplama doğruluğı, bilgisayar kapasitesi, ağı yapısı gibi unsurlar göz önünde bulundurulmaktadır.

5.7 HAD Simölasyonları

Karmaşık geometrilere çözüm ağıının atanması ve sonuçların işlenmesini sayısal yöntemler kullanarak modelleyen birçok bilgisayar yazılımı ve paket programı bulunmaktadır. Burada temel amaç, sayısal modellemeyi gerçek şartlara en yakın sonucu verecek şekilde oluşturmak ve çözüm algoritmasını mümkün olan en kısa süre içinde tamamlamaktır (Dapelo ve Bridgeman, 2018). Bu nedenle, ticari HAD

yazılımları sürekli olarak deney sonuçlarıyla karşılaştırılmakta ve en doğru yakınsama performansı gerçekleştirecek şekilde uyarlanmaktadır (Mogan vd., 2018). Günümüzde Ansys Fluent, Siemens PLM, Flow 3D, Open Foam, Numeca ve SCRYU gibi HAD yazılımları en çok kullanılanlar arasında yer almaktadır. Düşük maliyetli, hızlı, gerçek koşulları simüle eden ve simülasyon sonrası elde edilen sonuçları kapsamlı olarak inceleyebilme imkânı sunan her HAD yazılımı, mühendislik tasarımlarının geliştirilmesine ve gerekirse amaca uygun biçimde revize edilmesine olanak sağlamaktadır.



BÖLÜM ALTI

YAPAY SİNİR AĞLARI YÖNTEMİ

Yapay Sinir Ağları (YSA), sinir hücrelerindeki nöronların bilgiyi işleme özelliğini taklit eden matematiksel fonksiyonlardır (Mishra ve Srivastava, 2014). İnsan beynindeki milyarlarca nöron, diğer nöronlarla da bağlantı kurarak trilyonlarca bağlantının meydana gelmesini sağlamaktadır. Canlıların bu özelliğinin ortaya çıkmasıyla, bilim insanları bu davranışları matematiksel ifadelerle çevirmek istemişlerdir (Marcu ve Grava, 2021). Varılmak istenen nokta ise, kendi kendine öğrenebilen ve değerlendirme yapabilen sistemleri geliştirmektir. Canlı davranışlarını inceleyen sibernetiğin de bu konuya oldukça katkısı bulunmaktadır (Batta, 2020).

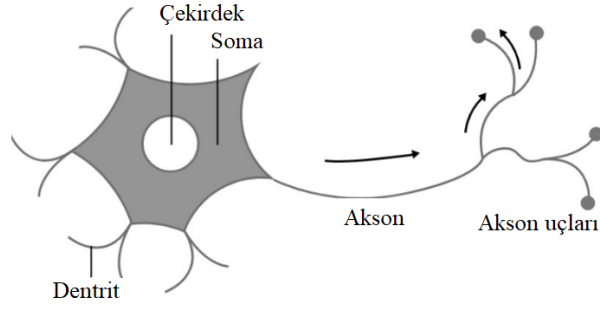
Girdi verisini çıktı verisine dönüştürebilen çalışmaların ilk ortaya çıkışı 1890'lı yıllara kadar dayanmaktadır. Fakat o dönemin mühendislik altyapısı henüz olgunlaşmadığından dolayı ilk yapay sinir ağı modeli, 1943 yılında Warren McCulloch ve Walter Pitts tarafından geliştirilebilmiştir (Keskenler ve Keskenler, 2017). Elektrik devreleri kullanılarak insan beyninin hesaplama ve karar verme yeteneği, McCulloch ve Walter tarafından yapay bir şekilde taklit edilmektedir (Maind ve Wankar, 2014). Devamında bilim insanları bu konudaki gelişmelere katkıda bulunarak insan beynindeki öğrenme kavramını ele almışlardır (Suzuki, 2011). 1949'da *Hebbian Öğrenme* adı verilen teori Donald Hebb tarafından geliştirilmiştir. 1951 yılında icat edilen nöro-bilgisayar ve 1957 yılında farkına varılan en basit tek katmanlı yapay sinir ağı olan "perceptron"un (algılayıcı) keşfi, bu konudaki çalışmaların hızlanmasını sağlamıştır (Sathya ve Abraham, 2013). Aynı dönemde ortaya atılan yapay zekâ kavramı, yapay sinir ağlarından çok ayrı bir konu olarak ele alınmıştır. Bu da, YSA çalışmalarının 1960'lı yılların sonuna doğru duraklamaya girmesiyle sonuçlanmıştır (Dongare, Kharde, ve Kachare, 2012). 1970 yılında Fukushima tarafından YSA ile görüntü işleme modelinin geliştirilmesi, YSA'yı yeniden araştırmaların merkezine çekmiştir (Keskenler ve Keskenler, 2017). Böylelikle 1980'lerde başlayan bilgisayar sistemlerindeki gelişmeye paralel olarak YSA'da da gelişmeler yaşanmıştır. 1990'lı yıllardan itibaren de deneysel ve teorik veriyle desteklenen YSA çalışmaları yapay zekâ kavramının içinde kendine yer bulmaktadır (Sathya ve Abraham, 2013).

Günümüzde, finans, tıp, enerji, otomotiv, havacılık, üretim, askeri vb. sistemlerde sıklıkla kullanılan YSA'lar; gerçek zamanlı veriyi paralel ağlarda işleyebilme, hatalı ve bozuk veriyi tolere edebilme, genelleme, sınıflandırma, doğrusal olmama ve kendi kendine öğrenme kabiliyetlerine sahiptirler (Krenker, Bester, ve Kos, 2011). Bunu yaparken, insan beyninin yeni bilgi türetme, filtreleme, keşfetme, tahmin ve yorumlama yeteneğini kullanmaktadır (Abiodun vd., 2018).

Bu çalışmada ele alınan konunun paraşüt yardımcı gemi sevk sistemleri olması sebebiyle, paraşütün havadaki konumunun sürekli olarak değişimi söz konusudur. Paraşüt, gemi ve rüzgâra ait hız ve konum değerlerinin geminin seyri boyunca sabit kalamamasından dolayı, paraşüt üzerindeki aerodinamik kuvvetler ve nihayetinde de gemiye aktarılan ek çekme kuvvetinin belirli hesaplama adımlarındaki değerlerinin bilinmesi, ana makine enerji verimliliği konusunda tahmin yapabilmeyi sağlamaktadır. Bu gibi durumlarda, sistemin çalışma sınırları belirlenerek, belirli aralıklarla hesaplamalar yapılmakta, hesaplanmayan ara değerler ise çeşitli tahminleme yöntemleri ile belirlenmeye çalışılmaktadır. YSA'nın bu konuda sağladığı avantaj, paraşüt kontrolcü mekanizmasının istenilen çalışma performansını sergileyebilmesi için önceden belirlenen uçuş yörüngesi üzerinde paraşütün sahip olduğu konumlarda oluşacak aerodinamik kuvvet katsayılarının tahminine imkân sağlamasıdır.

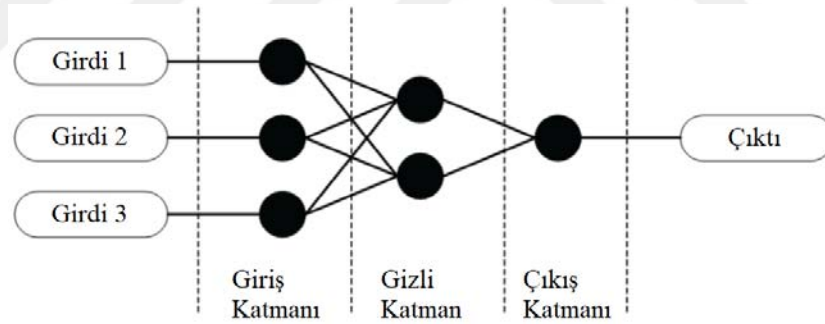
6.1 YSA Yapısı

YSA, biyolojik sinir ağlarının yapısını ve işlevini simüle etmeye çalışan matematiksel modeller olarak tanımlanmaktadır. Biyolojik sinir ağlarındakine benzer şekilde, nöronlar (sinir ağı) bu yapay ağların da temel yapı taşıdır. Biyolojik bir sinir hücresinde veri aktarımı, bir hücrenin akson uçlarından gelen bilginin diğer bir hücrenin dentritinden alınmasıyla gerçekleşmektedir (Mishra ve Srivastava, 2014). Şekil 6.1'de, biyolojik bir sinir hücresine ait bölümler ve veri akış yönü gösterilmektedir.



Şekil 6.1 Biyolojik sinir ağı (Suzuki, 2011)

Biyolojik sinir ağlarında bilginin iletimi elektro-kimyasal olaylar sayesinde gerçekleşmekte iken; YSA’da, çarpma, toplama ve bölme olarak da adlandırılan üç temel matematiksel aşamada yürütülmektedir (Krenker vd., 2011). İlk aşamada, yapay nörona giren bilgiler ağırlıklandırılmaktadır ve bu işleme çarpma da denilmektedir. Devamında ise tüm ağırlıklı girdiler toplanarak, son aşamadaki aktivasyon fonksiyonundan geçirilmektedir. Belirtildiği gibi üç temel aşamadan geçen girdi verisi sadece iyi organize edilmiş bir YSA’da anlamlı çıktı verisine dönüştürülmektedir. Basit bir YSA modeli Şekil 6.2’de gösterilmektedir.



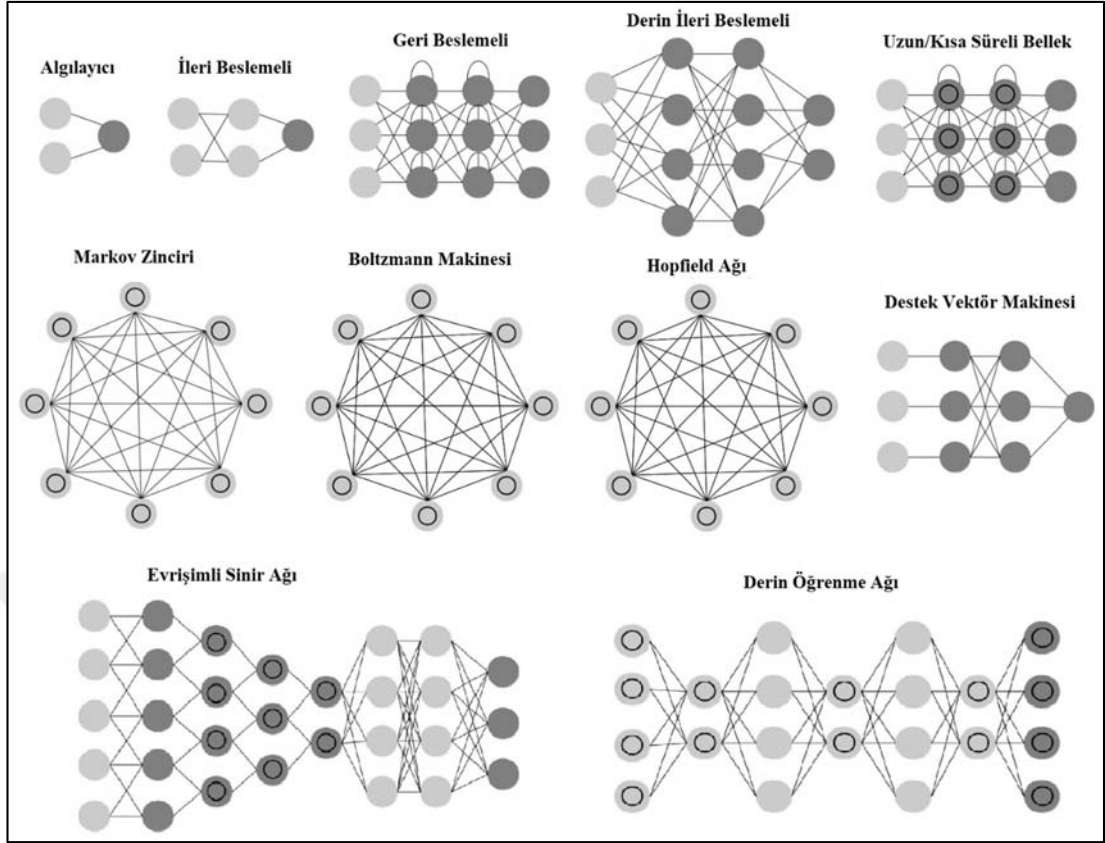
Şekil 6.2 Basit yapay sinir ağı modeli (Krenker vd., 2011)

Şekil 6.2’de gösterilen basit yapıdaki, standart denilebilecek YSA modelinin topolojisinde değişim yapılmak suretiyle farklı problemlerin çözümüne uygun hale getirilmesi, YSA’nın esnekliğini göstermektedir (Wang vd., 2016). Böylece, farklı problemleri çözerken istenilen hesaplama verimliliği farklı tipteki ağ yapılarıyla sağlanmaktadır. Yapılan bu ayarlama; katmanlar arasındaki bağlantının şekli, katmanlardaki nöron sayıları (daireler) ve ardışık gizli katman sayısı gibi unsurları içermektedir.

Girdiler, giriş katmanındaki nöronlara aktarılmaktadır. Burada bilinmesi gereken en önemli husus, YSA'nın sadece sayısal girdileri kabul etmesidir. Dilsel ifadeler sayısal karşılıkları ile değiştirilerek kullanılmaktadır. Giriş katmanındaki girdi verisi, ağırlıklarıyla çarpılarak ara katmana aktarılmakta, bu sayede üretilecek çıktı verisi üzerinde ayarlama yapılabilir. Ara katmanda ise, toplama fonksiyonu kullanılarak net girdi verisi hesaplanmaktadır. Çıktı değerini elde edebilmek için ise toplam net veriye aktivasyon fonksiyonu uygulanarak, ister tek ister birden fazla çıktı verisine ulaşılmaktadır (Suzuki, 2011). Buradan da anlaşılacağı üzere, istenen çıktı verileri için girdi ağırlıkları ve aktivasyon fonksiyonu yüksek önem arz etmektedir. Sigmoid, Relu, Hiperbolik tanjant, Doğrultulmuş lineer gibi çeşitli aktivasyon fonksiyonlarına, problemin girdi ve çıktı verisine bağlı olarak ihtiyaç duyulmaktadır (Marcu ve Grava, 2021).

6.2 YSA Türleri

YSA'lar daha önce de söylendiği üzere farklı topolojilere sahip olacak şekilde tasarlanabilmektedir. Burada YSA çeşitliliğini sağlayan temel unsurlar; bağlantı şekli (ağ yapısı), veri türü ve öğrenme algoritmasının farklılığından kaynaklanmaktadır. En basit yapay sinir ağı olan Algılayıcı (Perceptron)'dan başlayarak, İleri Beslemeli Ağlar, Geri Beslemeli Ağları, Derin İleri Beslemeli Ağlar, Uzun/Kısa Süreli Bellekli Ağlar, Markov Zinciri, Boltzman Makinesi, Hopfield Ağı, Destek Vektör Makinesi, Evrişimli Sinir Ağları ve Derin Öğrenme Ağları gibi YSA türleri bulunmaktadır ve Şekil 6.3'te ağ topolojileri gösterilmektedir.



Şekil 6.3 Örnek yapay sinir ağı topolojileri (Veribilimcisi, 2022)

Bir YSA modelinin bağlantı şekline göre düzenlenmesi temelde iki unsurdan kaynaklanmaktadır. İlki, ileri beslemeli ağ yapısı olup, nöronlar arasındaki bağlantıların düzenlenmesi için yeni girdi verisine ihtiyaç duyulmamaktadır. Diğeri ise, geri beslemeli ağlar olup bağlantılar girdi verisiyle veya bir önceki katmanla ilişkilendirilmektedir. Burada amaç, ağın öğrenme becerisini artırmak olup, verilen her yeni veri girdisinde nöronların ağırlık dereceleri değiştirilmektedir. Bu döngü sayesinde ağ daha verimli çalışma performansı göstermekteyken, tekrarlayan işlem adımları sebebiyle daha uzun sürede ağın öğrenme işlemi tamamlanmaktadır (Abiodun vd., 2018).

Kalitatif ve kantitatif olarak toplanan girdi verisi de ağın yapısını etkilemektedir. Kalitatif verinin kullanıldığı bir yapay sinir ağı, genellikle sınıflandırma yapmak amacıyla tasarlanmakta iken; kantitatif veri genellikle, kurulu bir sisteme ait bağımlı/bağımsız değişkenlerin bilgisini içermektedir (Wilamowski, 2009).

Yapay sinir ağının yapısını etkileyen bir diğer unsur ise öğrenme algoritmasının çalışma prensibidir. İnsan beyninin faaliyetlerini simüle etmek üzere tasarlanan bu ağlarda temelde iki farklı öğrenme yöntemi vardır. İlki girdi ve çıktıların birlikte verildiği “Öğretmenli Öğrenme”; diğeri ise girdilerin verildiği fakat çıktıların ağ tarafından oluşturulması istenen “Öğretmensiz Öğrenme”dir (Marcu ve Grava, 2021). Takviyeli ve karma öğrenme yöntemleri ise bu iki yöntemin çeşitli özelliklerinin birlikte kullanımı sonucunda oluşturulmuştur.

6.3 Öğrenme Yöntemleri

YSA, gerçekleşmiş örnek olaylardan elde edilen bilgileri kullanarak öğrenme gerçekleştiren bir yöntem olarak bilimsel ve endüstriyel uygulamalarda kendine yer bulmaktadır (Batta, 2020). Örnek olaya ait girdi ve çıktı verisi birlikte kullanılabilceği gibi sadece girdi verisi kullanılarak da öğrenme işlemi yapılabilmektedir. Girdi verisinin çeşitliliği bir olaya farklı açılardan bakmayı sağlamaktadır (Shrestha ve Mahmood, 2019). Bir duruma ait birbiriyle tutarlı girdi verisinin hacmi ne kadar geniş ise öğrenme işlemi sonunda o kadar başarılı sonuç alınmaktadır. Hatalı verinin, toplam veri seti içindeki oranı arttıkça, ağın öğrenme ve tahmin etme performansı düşmektedir (Singh, Thakur, ve Sharma, 2016). Ağın öğrenme işlemi, nöron bağlantılarına verilen ağırlık değerlerini değiştirerek yapılmaktadır. Bir sonraki nörona iletilen bilginin sonuca katkısı yükseldikçe, o nöronla ilgili bağlantının ağırlık derecesi de artmaktadır (Dongare vd., 2012). Bu sayede, ağa ait öğrenme algoritmasının örnek olayları yorumlayarak ağırlık değerlerine karar vermesi ile öğrenme işlemi tamamlanmaktadır.

6.3.1 Öğretmenli Öğrenme

Bu öğrenme stratejisi, YSA sisteminin öğrenme sürecinde örnek olaya ait girdi ve çıktı değerlerini birlikte kullanması olarak tanımlanmaktadır. Yani, yaşanmış her olayın girdi değerleri sonucunda meydana gelen olayın sonucu arasındaki ilişkinin belirlenme sürecinde öğrenme gerçekleşmektedir. Öğretmenli öğrenme yöntemi denilmesinin sebebi çıktı verisinin sisteme önceden tanıtılmasıdır şeklinde de yorumlanmaktadır (Wang, Lin, ve Dang, 2020).

6.3.2 Öğretmensiz Öğrenme

Bu yöntemde ise, adından da anlaşılacağı üzere YSA algoritmasının öğrenme süresinde “öğretmen” yani çıktı verisi kullanılmamaktadır. Örneklerdeki değişkenler arasındaki ilişki ağı kendisi tarafından bulunmaktadır. Bu tür örnekler daha çok sınıflandırma konusuna ait problemler olup, ağdan elde edilen çıktıların anlamlandırılması gerekmektedir (Sathya ve Abraham, 2013).

6.3.3 Takviyeli Öğrenme

Bu öğrenme yöntemi yukarıda anlatılan iki yöntemin birleştirilmiş haline de benzemektedir. Ağa sunulan örnek olayların girdi değerlerinin karşılığında çıktı değerleri ağa tanıtılmaz, ağdan kendi kendine öğrenmesi ve çıktı değeri üretmesi beklenmektedir. Fakat çıktı değerlerinin doğru olup olmadığı öğretmen tarafından ağa gönderilen sinyal tarafından ağa aktarılmaktadır. Bu sayede, ağ bu geri beslemeyi kullanarak kendini yeniden eğitmektedir. Bu öğrenme süreci diğer iki stratejiye göre nispeten daha uzun süre gerektirmektedir (Maind ve Wankar, 2014).

6.3.4 Karma Öğrenme

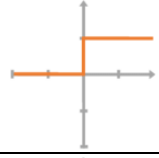
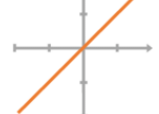
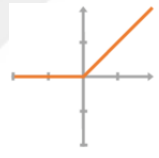
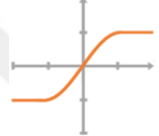
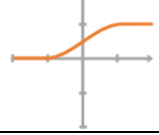
YSA’da öğrenme süreci örnek olayların yorumlanmasıyla gerçekleşmektedir. Bu tür öğrenmelerde örneklemin bir kısmı öğretmenli yöntem ile tanıtılırken başka bir kısmı ise öğretmensiz öğrenme ile ağa aktarılmaktadır. Olasılık Tabanlı Yapay Sinir Ağları ve Radyal Tabanlı Yapay Sinir Ağları bu yöntemi kullanan örnek öğrenme yöntemleridir (Krenker vd., 2011).

6.4 Aktivasyon ve Toplama Fonksiyonları

Temel olarak, bir YSA’da; girdiler ağırlıklarla tanımlanır ve ağı çıkışında bir aktivasyon fonksiyonundan geçerek çıktı değerine ulaşmaktadır. Burada aktivasyon fonksiyonunun görevi; sonuçları, elde edilmek istenen değerlere göre doğrusal veya doğrusal olmayan karakterde gerçek dünyada kullanılabilir hale dönüştürmektir (Dongare vd., 2012). Öğrenme yöntemlerinde olduğu gibi aktivasyon fonksiyonlarında da birbirine göre avantajlar bulunmaktadır. Doğrusal fonksiyonlarda parçalı fonksiyon tanımlama, doğrusal olmayan fonksiyonlarda ise, fonksiyonun sınır

değerleri ve eğri karakteristiği gibi özelliklerinin tanımlanmasıyla yapay öğrenme algoritması oluşturulmaktadır (Marcu ve Grava, 2021). Sık kullanılan aktivasyon fonksiyonlarından birkaçı Tablo 6.1’de gösterilmektedir.

Tablo 6.1 Sık kullanılan aktivasyon fonksiyonları (Şengöz, 2022)

Fonksiyon adı	İşlevi	Grafik gösterimi
İkili adım fonksiyonu	İkili sınıflandırma durumunda kullanılır. Çoklu sınıflandırmalar için uygun değildir.	
Doğrusal fonksiyon	İkili adım fonksiyonuna benzer çalışmakta olup, basit doğrusal çıktıların elde edilmesinde kullanılır.	
ReLU	Grafikten de anlaşılacağı gibi, negatif değer üreten nöronlar aktive edilmezler. Bu tür fonksiyonun negatif tarafta da çalışması için farklı alt modelleri türetilmiştir.	
Hiperbolik tanjant	Sigmoid fonksiyonuna benzer olup, -1 ve 1 arasında çıktı üretmektedir. Çok katmanlı ağlarda genellikle tercih edilmezler.	
Sigmoid	En çok kullanılan fonksiyon türü olup, çıktıları 0 ve 1 arasında bulunmaktadır. Bu özellik olasılık problemlerine uygundur.	

6.5 Performans Kriterleri

Yapay sinir ağları, eğer problemle uyumlu bir model oluşturulmuş ise, öğrenme sürecinde genellikle çok düşük hata oranlarına sahip olmaktadır. Algoritmanın çalışma performansını daha sağlıklı ölçebilmek için, eğitim verisinin ötesinde, daha önce ağa tanıtılmayan girdi verisinden elde edilen sonuca bakılmaktadır (Kumar, Raghuwanshi, ve Singh, 2011). Yeni veriye ait öngöründe bulunan YSA’nın verdiği sonuç ile gerçek sonuç arasındaki farkın ölçümü çeşitli yöntemlerle yapılmaktadır. Literatürde ağın performansını değerlendiren ve birbirine göre çeşitli avantajları bulunan kriterlerden bazıları aşağıda listelenmektedir.

- Ortalama Mutlak Hata = $\frac{\sum |e_t|}{N}$,

- Ortalama Mutlak Yüzde Hata, $= \frac{1}{N} \sum \left| \frac{e_t}{y_t} \right| \cdot (100)$,
- Hata Kareleri Ortalaması $= \frac{\sum (e_t)^2}{N}$,
- Hata Kareleri Ortalaması Karekökü $= \sqrt{\frac{\sum (e_t)^2}{N}}$,
- Hata Kareleri Toplamı $= \sum (e_t)^2$

Burada, e_t öngörü hatasını, y_t gerçek değer, N örneklem sayısını ifade etmektedir.

6.6 YSA Tasarımı

Herhangi bir yapay sinir ağı oluşturmak için, nöronların bağlantı şekilleri, öğrenme yöntemi, her katmandaki nöron sayısı, gizli katman sayısı, toplama ve aktivasyon fonksiyonlarının belirlenmesi gerektiği yukarıda anlatılmaktadır (Krenker vd., 2011). Fakat eldeki örnek veriye uygun modelin tasarlanması, deneme yanılma ve eski tecrübelerin yorumlanması da gerektirmektedir (May, Dandy, ve Maier, 2011). Kurulan algoritmanın başarısı, doğru parametre değerlerinin seçilip seçilmediğiyle ilgilidir ve performans kriterleriyle ölçülebilmektedir (Wang vd., 2020). Eğer algoritmanın verdiği sonuçların kararlı ve doğruya yakın olması isteniyorsa YSA tasarım süreci sistematik şekilde yürütülmelidir.

Katman ve nöron sayısının artışı ağı karmaşıklığını artıracak gibi performansının artmasını da (belli bir optimum seviye artışta) sağlayabilmektedir (Shrestha ve Mahmood, 2019). Bunun yanında karmaşık yapıdan dolayı ağ daha yavaş öğrenmekte ve yeni veriyle karşılaşma durumunda daha yavaş tahminleme yapmaktadır (Suzuki, 2011). Ayrıca, yüksek sayıdaki nöron ve ara katman, ağı örnek veri setini ezberlemesine de neden olmaktadır (Maind ve Wankar, 2014). Olması gerekenin altında nöron ve katman sayısı tercih etme durumunda ise, yeterince öğrenme sağlanamayacağı için hata oranı artmakta ve ağı performansı düşmektedir (Krenker vd., 2011).

Öğrenme yöntemi, yapay sinir ağının hangi uygulamada kullanılacağından (tahminleme, sınıflandırma, örüntü tanıma, vb.) ve veri seti çeşidinden etkilenmektedir (Shrestha ve Mahmood, 2019). Örneklerden öğrenme işlemini gerçekleştiren YSA için örneklem sayısı ve ağırlıkların sürekli güncellenip güncellenmeyeceğine de öğrenme

yönteminin seçimi sırasında karar verilmektedir. Tüm bunlar ağın çalışması üzerinde etkili olmakta ve hata yüzdesini etkilemektedir (Dongare vd., 2012).

Ağıdaki nöron ve katmanların birbiriyle bağlantı şekli, ağın topolojisini belirlemektedir. Şekil 6.3'ten de görüleceği üzere, farklı ağ topolojilerinin meydana getirilme sebebi, probleme ait girdi verisi türüne ve algoritmanın öğrenme yöntemine dayanmaktadır (Veribilimcisi, 2022).

Aktivasyon fonksiyonu seçimi doğrudan girdi ve çıktı değerlerinin türüne bağlıdır. Tablo 6.1'de gösterilen temel aktivasyon fonksiyonları, tahmini yapılacak olan veri setinin çeşidine göre seçilmektedir. Doğrusal fonksiyonların türevi her noktada aynı olduğu için geri beslemeli ağlarda kullanımı uygun değildir (Sathya ve Abraham, 2013).

BÖLÜM YEDİ

UYGULAMA

Günümüzde çevre ve insan sağlığını koruyan kuralların sıkı denetimler ile kontrol altında tutulmaya çalışılması ve artan işletme maliyetleri sebebiyle; daha az fosil yakıt ihtiyacı olan ve sürdürülebilir sistemlerin tasarımı üzerinde yoğun çaba harcanmaktadır. Bu çalışmada, deniz taşımacılığındaki uluslararası çabalardan biri olan egzoz gazı salımını azaltmaya yönelik uygulamalardan, gemi ana makinesinin yakıt tüketimine doğrudan etkisi olan paraşüt destekli gemi sevk sisteminin, gemi enerji verimliliğine olan etkisi incelenmektedir. Uluslararası Gemilerden Kaynaklanan Kirliliği Önleme Sözleşmesi'nde (MARPOL) önlemler; teknik, operasyonel ve yönetimle ilgili konular olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Paraşüt yardımcı gemi sevk sistemine sahip bir gemide ise, bu önlemlerden teknik ve operasyonel olanlar bir arada bulunmaktadır. Gemilerin inşa ve işletim sürecini yönlendirmede ve öncelikli uygulamaların seçiminde, bu önlemlerin şirketler tarafından nasıl karşılanacağı MARPOL sözleşmesinde tavsiye şeklinde sunulmakta olup, kesin uygulama bilgisi içermemektedir. Şirketler sadece, enerji verimliliği konusunda belirlenen alt limitlerin yerine getirilmesiyle mükellef tutulmaktadır.

Bu araştırmanın temel amacı ise, gemilerin seyir yönetimi sırasında değerlendirilen meteorolojik olaylardan biri olan rüzgârın, paraşüt destekli gemi sevk sistemine etkisini enerji verimliliği çerçevesinde incelemektir. Gemilerin seyir planlaması yapılırken, çevre koşulları emniyetli seyir operasyonları için göz önünde bulundurulmaktadır. Bu çalışmayla birlikte; rüzgâr enerjisinin, paraşüt sisteminde gemi için gerekli ek çekme kuvvetine dönüşümü, seyir planlamasına dâhil edilmektedir.

Çalışmanın yürütülmesi sırasında elde edilen bulgular sayesinde, paraşüt yardımcı sevk sisteminin tasarımına ve işletimine ait değişkenlerin neler olduğu belirlenmektedir. Diğer endüstriyel uygulamalarda olduğu gibi, denizcilik sektöründe de mevcut sistemlerin kararlı bir şekilde çalışabilmesi için emniyet unsuru ön planda tutulmaktadır. Geminin taşıdığı yükü, gemiyi ve üzerinde görevli personeli tehlikeli sonuçlara maruz bırakmamak hedeflenmektedir. Bunu gerçekleştirirken, çevre ve

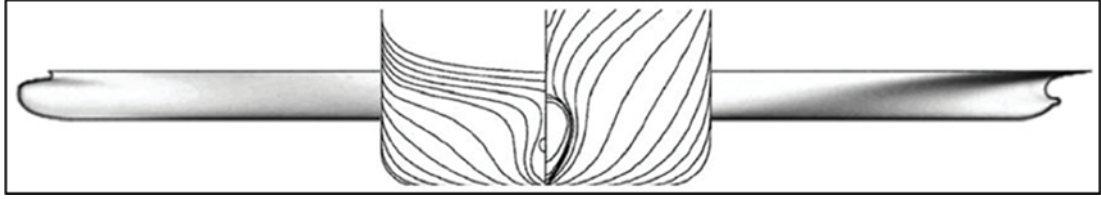
insan sağlığının korunduğu ve maliyet konusunun yönetilebildiği uygulamaların seçimi gerekmektedir.

7.1 Araştırma Geminin zellikleri

Gemi tasarımı, geğmişte bilimden çok bu konuda deneyimli gemi inşa mühendislerinin tecrübeleri ile yönetilmekteydi (Papanikolaou vd., 2011). Ancak, geğmiş uygulamalardan elde edilen tecrübenin yanında, çeşitli temel ve uzmanlaşmış bilimsel ve mühendislik konularında da iyi bir geğmişe sahip olmanın avantajları bulunmaktadır. Tasarım alanında pratik olarak, on yıllardır sıklıkla deneme ve yanılma süreçlerinden kaynaklanan yöntemler gibi sezgisel yöntemler de kullanılarak gemi inşa süreci günümüze kadar ulaşmıştır. Deneme-yanılma yöntemlerinin kullanımı sonucunda inşa edilen gemilere ait istatistiklerin değerlendirilmesiyle elde edilen veri tabanı sayesinde, başarılı modeller geliştirilerek mevcut gemilerin meydana çıkışı sağlanmaktadır.

Bu çalışmada ise, ITTC'nin deneylerini yaptığı, dünyaca kabul görmüş araştırma-geliştirme ve akademik çalışmalarda sıklıkla kullanılan Panamax sınıfı gemi formlarından biri olan KCS modeli kullanılmaktadır. Burada bahsedilen konteyner gemilerine ait sınıf tanımı; gemilerin su çekimi, tam boyu ve taşıyabildiği konteyner adedinin birer fonksiyonu olup, 1950lerin ortalarında başlayan konteynerizasyonun gemilerde meydana getirdiği değişikliği ifade etmek için kullanılmaktadır (Ammar ve Seddiek, 2020). Genellikle altı sınıfa ayrılan konteyner gemileri, 2006 yılı itibariyle 400 metrelere ulaşan tam boya sahip olmakla birlikte, günümüzde 25.000 TEU taşıma kapasitesine ulaşmıştır (Merk, 2018). Konteyner gemilerinin geçirdiği evreler ve sahip oldukları kapasiteler aşağıda listelenmektedir (Tran ve Haasis, 2015):

- Birinci jenerasyon; 1956-1970 arasında, 500-800 TEU,
- İkinci jenerasyon; 1970-1980 arasında, 1.000-2.500 TEU,
- nc jenerasyon; 1980-1988 arasında, 3.000-4.500 TEU,
- Dördüncü jenerasyon; 1988-2000 arasında, 4.000-6.000 TEU,
- Beşinci jenerasyon; 2000-2005 arasında, 6.000-8.500 TEU,
- Altıncı jenerasyon; 2006-günümüz, 11.000-25.000 TEU.



Şekil 7.1 KCS modeli gövde planı (Islam vd., 2011)

KRISO konteyner gemisi, gemi direnci konusunda düzenli olarak kıyaslama çalışmalarında kullanılmaktadır ve formu ve boyutları bilinen geminin sahip olduğu sevk ve makine sistemi tasarımı ise benzer form ve boyutlara sahip gemilerden referans alınarak yapılmaktadır. Güvenilir deneysel verilerin mevcudiyeti, geminin kullanımını motive etmektedir. KCS'nin gövde geometrisi Şekil 7.1'de gösterilmekte olup, genel özellikleri Tablo 7.1'de listelenmektedir.

Tablo 7.1 KCS'nin genel özellikleri

Ölçüm	Değer	Birim
Deplasman tonajı ($\rho=1,025 \text{ t/m}^3$)	53330	t
Deplasman hacmi	52030	m^3
Su hattı boyu (L_{wl})	232,5	m
Dikmeler arası boy (L_{bp})	230	m
Genişlik (B)	32,2	m
Derinlik (D)	19,0	m
Gemi ortasında su çekimi (T)	10,8	m
Islak alan (A_w) (dümen dâhil)	9645	m^2
Orta kesit alanı (A_m)	341,802	m^2
Su hattı alanı (A_{wp})	6124,884	m^2
Prizmatik katsayı (C_p)	0,671	
Blok katsayısı (C_b)	0,651	
Orta kesit alan katsayısı (C_m)	0,985	
Su hattı alan katsayısı (C_{wp})	0,84	
Sepiye merkezinin boyuna yeri (LCB)	108,22	Kıç dikmeden başa doğru, m
Yüzme merkezinin boyuna yeri (LCF)	98,436	Kıç dikmeden başa doğru, m
LCB %	47,799	Kıç dikmeden başa doğru, % L_{bp}
LCF %	43,478	Kıç dikmeden başa doğru, % L_{bp}

Tablo 7.1'de verilen bilgiler 1:1 ölçeğindeki gerçek boyutlu gemiye aittir. Daha önce de bahsedildiği üzere, gerçek boyutlu bir geminin çekme deneyinin yapılması anlamsızdır. Çekme deneyleri, geminin belirli bir ölçekte küçültülmüş modeliyle yapıldığı için, bu deneylere model deneyleri de denilmektedir. Bu çalışmada KCS'ye ait sakin su model deneyi sonuçları, HAD yöntemi simülasyon sonuçlarıyla

karşılaştırılmaktadır. Bunun sebebi ise, KCS'ye ait ek direnç değerlerinin test ortamında değil de, zaman ve maliyetten kazanma adına gerçekleştirilen HAD yönteminden türetilmek istenmesidir. Sakin su simülasyonlarının model deneyi sonuçları ile doğrulanmasıyla, yüksek doğrulukta matematiksel deney sonucu elde edilebilmektedir. Bu sayede, HAD yönteminde kullanılacak değişkenlerin değerleri belirlenebilmektedir. Sonraki adımda, farklı gemi hızlarında gerek sakin su, gerekse de dalga ve rüzgârın etkilerinden kaynaklı ek direnç hesaplanabilmektedir. Bu çalışmadaki model ölçeği 1:31,599 olup, bu ölçek MOERI (Maritime and Ocean Engineering Research Institute) tarafından yürütülen deneylerde de kullanılmaktadır. Tablo 7.2'de model gemiye ait genel özellikler yer almaktadır.

Tablo 7.2 31,599 ölçekli model gemiye ait genel özellikler

Ölçüm	Değer	Birim
Deplasman hacmi	1,6490	m ³
Su hattı boyu (L_{wl})	7,3570	m
Dikmeler arası boy (L_{bp})	7,2786	m
Genişlik (B)	1,0190	m
Derinlik (D)	0,6013	m
Gemi ortasında su çekimi (T)	0,3418	m
Islak alan (A_w) (dümen dâhil)	9,5528	m ²
Prizmatik katsayı (C_p)	0,671	
Blok katsayısı (C_b)	0,651	
Orta kesit alan katsayısı (C_m)	0,985	

7.2 Rotanın Belirlenmesi

Dünya ticaretinde uluslararası deniz taşımacılığına olan eğilimin artması, ürünlerin deniz yoluyla düşük maliyetli bir şekilde taşınabilmesinden kaynaklanmaktadır (Mazraati, 2011). Tablo 7.3'ten de görüleceği üzere, 1970 yılında yaklaşık 2,6 milyar ton yük deniz taşımacılığı ile nakledilmişken, bu miktar 2020 yılında yaklaşık 10,65 milyar ton yüke çıkarak, taşınan yük 4 kattan daha fazla ağırlığa ulaşmıştır.

Tablo 7.3 Uluslararası ticarete denizyolu ile taşınan yük miktarı (UNCTAD, 2021)

Ölçüm	Taşınan toplam yük (milyon ton)
1970	2,605
1980	3,704
1990	4,008
2000	5,984
2010	8,408
2015	10,023
2018	11,019
2020	10,648

Küreselleşen dünya ekonomisi sayesinde, üretim ve tüketim alışkanlıkları değişim göstermekte; bunu da, hava, kara ve demiryolu taşımacılığına göre daha az maliyetli olmanın yanında, daha çevreci ve büyük miktardaki yükleri tek seferde güvenli bir şekilde taşıma kabiliyeti olan deniz yolu taşımacılığı sağlamaktadır (UNCTAD, 2019). Kullanılan gemi tipleri, ticaret mallarının türüne göre çeşitlendirilmektedir. Ham petrol, petrol türevleri ve gazlar, sıvı dökme yük taşımacılığının konusu iken; kömür, tahıl ve demir cevheri gibi ürünler de kuru dökme yük taşımacılığının kapsamında değerlendirilmektedir. Bunun yanında, çeşitli ürünleri bir arada taşıma imkânı sunan konteyner gemileri bulunmaktadır ve konteynerlere ait özellikler uluslararası standartlarla belirlenmektedir (Dekker, Bloemhof, ve Mallidis, 2012). Sıvı ve gazları konteyner içinde taşımak için ise, farklı özelliklere sahip tank konteynerler kullanılmaktadır. Ayrıca, tekerlekli araç taşımacılığı Ro-Ro gemileriyle yapılmaktadır. Ticaret malları farklı türdeki gemiler ile taşınırken, yıllar içinde ticari ürünlerin çeşidindeki değişim, gemi türlerini ve sahip oldukları taşıma kapasitelerini etkilemektedir. Tablo 7.4'te, dünya gemi filosundaki gemi türlerinin yıllar içinde toplam yük taşıma kapasitesindeki (DWT) değişim gösterilmektedir.

Tablo 7.4 Gemi türlerinin dünya ticaretinde kullanım oranları (UNCTAD, 2018, 2021)

Gemi türü	1980 (%)	2018 (%)	2020 (%)
Kuru dökme yük	27,20	42,50	42,77
Konteyner	1,60	13,10	13,20
Petrol Tankeri	49,70	29,20	29,00
Genel kargo	17,00	3,90	3,60
Diğer	4,50	11,30	11,43

1980'den 2020'ye gelirken kuru dökme yük gemilerinin sahip olduğu taşıma kapasitesi 1,57 katına çıkarken, konteyner gemileri yaklaşık 8,25 kat DWT'a ulaşmaktadır. Bu gelişmeyi sağlayan etkenler; konteynerlerin, yükleri dış etkilerden koruyabilmesi, hızlı yükleme-boşaltma yapılabilmesi, farklı yükleri bir arada taşıyabilmesi ve diğer taşımacılık türlerine kolay entegrasyonu olarak sıralanabilmektedir (Agamez-Arias ve Moyano-Fuentes, 2017). Buna karşılık, petrolün gerek kara gerekse de denizaltından boru hatları ile taşınması sonucunda, petrol ve türevlerini taşıyan gemi ihtiyacındaki azalma görülmektedir. Birçok farklı yükün bir arada taşınmasına olanak sağlayan genel kargo gemilerinde ise, tehlikeli yük taşımacılığı kapsamında getirilen düzenleme ve kurallardan etkilenmeyle birlikte, bu tip gemilere olan ihtiyaç giderek azalma göstermektedir.

Gemi türlerinde yaşanan yapısal dönüşümün maliyetine ilave olarak, denizcilikte çevre ve insan sağlığını korumaya yönelik getirilen ek kurallar da ek maliyete neden olmaktadır (Lähteenmäki-Uutela, Repka, Haukioja ve Pohjola, 2017). Düşük emisyon değerine sahip yakıtların maliyetinin yüksek oluşu, denizcilik sektörünü alternatif uygun maliyetli yakıtların kullanımını teşvik etmektedir. Deniz taşımacılığını sürdürülebilir kılmak için, gemi inşa ve tasarım sürecinde farklı teknolojilerin gemi sevinde kullanımı da değerlendirilmektedir. 2050 yılında denizcilikte emisyonların yarıya düşürülmesini hedefleyen IMO kuralı, sıfır karbon emisyonlu kaynakların kullanımının önünü açmaktadır (Chou, Kosmas, Acciaro, ve Renken, 2021).

Yukarıda belirtildiği üzere; dünya ticaretindeki değişim, denizyolu taşımacılığında kullanılan gemilerin türünde ve bu türlerin toplam yük taşıma kapasitesine göre sahip oldukları kapasite oranında etkili olmaktadır. Bunun yanında, gemi boyutlarında büyüme tetiklenmekte ve ticaret rotalarında yeni küresel stratejiler benimsenmektedir (Zhen, Zhuge, Murong, Yan, ve Wang, 2019).

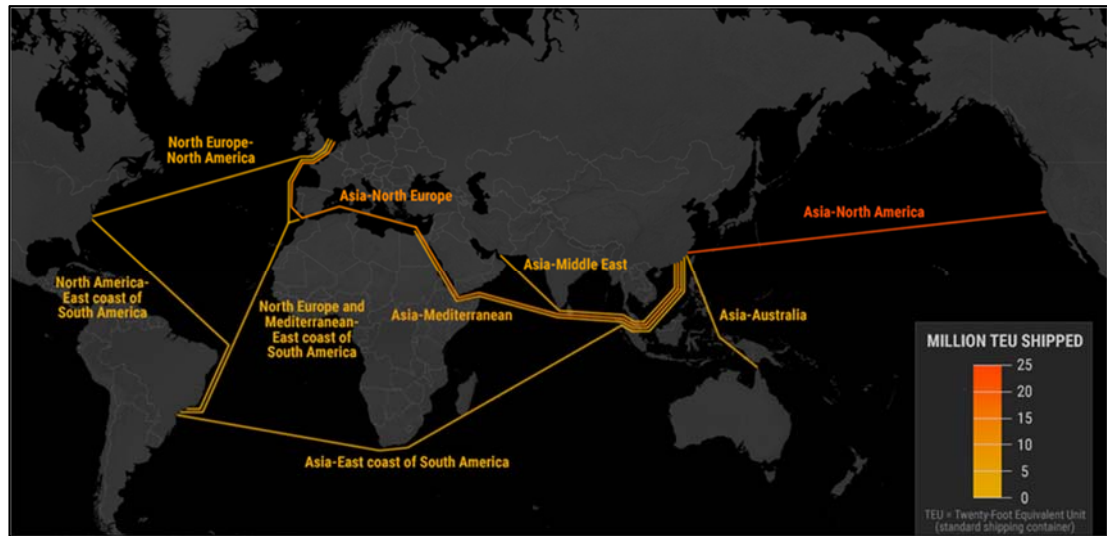
Şimdiye kadar incelenen husus, dünya ticaret mallarının çeşidindeki değişime bağlı olarak, deniz taşımacılığında kullanılan gemilerin tür ve boyutlarındaki değişimi içermektedir. Son 30 yılda konteyner yüklerindeki artış incelendiğinde, Doğu-Batı taşımacılık hattı %39,1 ile en çok paya sahiptir ve Asya kıtası bu rotadaki üretim üssü olma özelliğini üstlenmektedir (UNCTAD, 2019). Bu durumu, Asya limanlarının toplam yük elleçleme operasyonlarının, 2019 yılında dünyada elleçlenen toplam

yükün yaklaşık %65'ine karşılık gelmesi açıklamaktadır (UNCTAD, 2020). 2021 yılında ise, Trans-Pasifik hattında 31,2 milyon TEU yük taşınarak, en yoğun konteyner taşımacılığı yapılan rota konumundadır. 2021 yılında, 26,3 milyon TEU ile Asya-Avrupa hattında ve 8 milyon TEU ile de Trans-Atlantik hattında konteyner nakledilmiştir (UNCTAD, 2021). Tablo 7.5'ten de görüleceği üzere; 2014, 2017, 2020 ve 2021 yıllarında bu hatlarda taşınan konteyner miktarları yer almakta ve dünya ticaretinde 2020 yılında Kovid-19 sebebiyle yaşanan yavaşlama evresi gözlemlenmektedir (UNCTAD, 2020, 2021).

Tablo 7.5 Taşınan konteyner adetleri (milyon TEU) (UNCTAD, 2021)

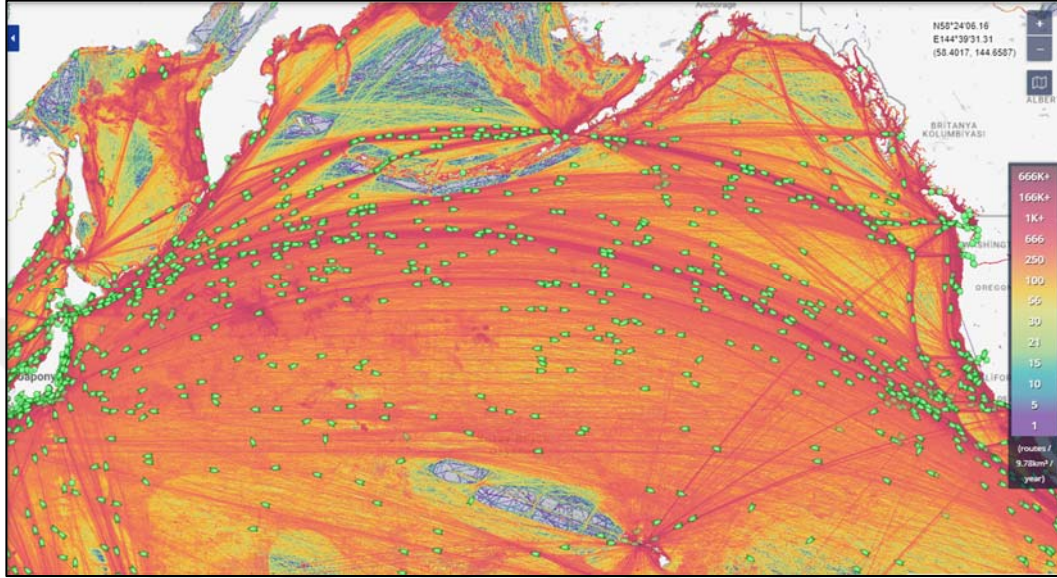
Yıl	Trans - Pasifik			Trans - Atlantik			Asya - Avrupa		
	Doğu yönü	Batı yönü	Toplam	Doğu yönü	Batı yönü	Toplam	Doğu yönü	Batı yönü	Toplam
	D.Asya-K.Ame.	K.Ame.-D.Asya		K.Ame. - K.Avrupa ve Akdeniz	K.Avrupa ve Akdeniz - K. Ame.		K.Avrupa ve Akdeniz - D.Asya	D.Asya - K. Avrupa ve Akdeniz	
2014	16,2	7	23,2	2,8	3,9	6,7	6,3	15,5	21,8
2017	19,3	7,3	26,6	2,9	4,6	7,5	7,1	16,4	23,5
2020	20,6	6,9	27,5	2,8	4,8	7,6	7,2	16,9	24,1
2021	24,1	7,1	31,2	2,8	5,2	8,0	7,8	18,5	26,3

Konteyner taşımacılığı ile dünyanın dört bir yanına ulaştırılan ticaret mallarının yoğunluklu olarak hangi rotalarda taşındığı Şekil 7.2'de gösterilmektedir.



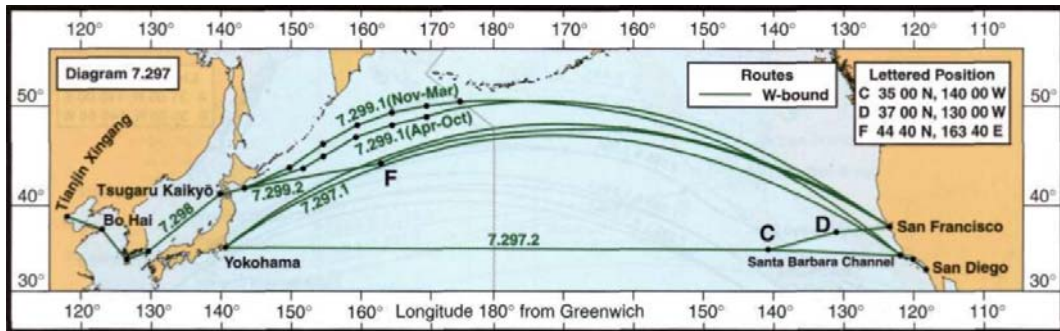
Şekil 7.2 Dünya üzerinde en çok kullanılan konteyner rotaları (Geopoliticalfutures, 2022)

Yukarıda verilen bilgilerden, Kuzey Pasifik Okyanusu'nun yoğun bir şekilde konteyner taşımacılığı için kullanıldığı sonucuna ulaşılabilmektedir. Bu sebeple, Kuzey Pasifik Okyanusu üzerinde ticari gemiler tarafından gerçekleştirilen okyanus aşırı seyirlere ait deniz taşımacılığı yoğunluk haritasına ihtiyaç duyulmaktadır.



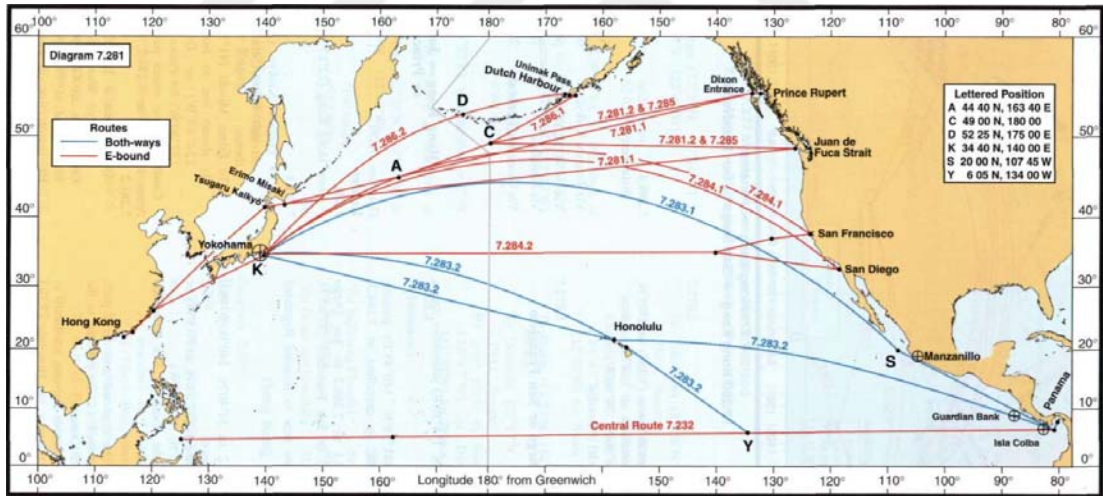
Şekil 7.3 Kuzey Pasifik Okyanusu taşımacılık rotaları yoğunluk haritası (Marinetraffic, 2021)

Şekil 7.3'te görüldüğü gibi, Kuzey Pasifik Okyanusu üzerinde seyir yapacak olan bir konteyner gemisi, Doğu-Batı yönünde Yokohama ve San Diego limanlarını karşılıklı olarak kullanabilme potansiyeline sahiptir. Bu da; bu çalışmada, Yokohama ve San Diego limanları arasında gidiş-dönüş seferi yapacak olan bir konteyner gemisine ait ana makine enerji verimliliği araştırmasının yapılmasına imkân sağlamaktadır. Seçilen rotada seyir yapacak ve sevk sistemlerinde en az bir ana makineye sahip gemilere, konvansiyonel olarak önerilen, San Diego-Yokohama seyir rotası tavsiyeleri Şekil 7.4'te yer almaktadır.



Şekil 7.4 San Diego-Yokohama seferi için tavsiye edilen rotalar (Admiralty, 2004)

Yukarıdaki şekilde yer alan 7.297.1 ve 7.297.2 olarak numaralandırılan rotalar, San Diego'dan (32°38'N, 117°15'W) Yokohama'ya (35°26'N, 139°43'E) seyir yapacak bir gemi için önerilmektedir. Rota no:7.297.1, Haziran-Ağustos ayları arasında önerilmekte olup, toplam 4930 deniz mili uzunluğundaki büyük daire seyrine aittir. Rota no:7.297.2 ise, Eylül-Mayıs ayları arasında planlanan seyir için tavsiye edilen rota olup, San Diego'dan C noktasına (35°00'N, 140°00'W), oradan da Yokohama'ya toplam 5160 deniz millik kerte hattı (*rhumb-line*) seyrini ifade etmektedir. Yılın farklı aylarında farklı rotaların öneriliyor oluşu, seyir halinde oluşacak dalga, akıntı ve hava olaylarına ait geçmiş verilerin değerlendirilmesinden kaynaklanmaktadır (Admiralty, 2004). Benzer rota tavsiyesi, Yokohama'dan (35°26'N, 139°43'E) San Diego'ya (32°38'N, 117°15'W) yapılacak seyir için de geçerlidir ve Şekil 7.5'te gösterilmektedir. Rota no: 7.284.1, toplam 4930 deniz mili uzunluğundaki büyük daire seyrini ifade ederken; Rota no:7.284.2, kötü hava koşullarından kaçınmak için kullanılan 5160 deniz mili uzunluğundaki kerte hattını göstermektedir.



Şekil 7.5 Yokohama-San Diego seferi için tavsiye edilen rotalar (Admiralty, 2004)

Gemi nakliye şirketleri, kargo yüklerinde seyir güvenliğini ve dakikliği korumak için çaba sarf ederken, yakıt tüketimi ve çevre etkilerini azaltmayı da hedeflemektedir. Genel olarak, daha yavaş seyir hızı ile en kısa rota üzerinde yolculuk yapmak enerji tasarrufu sağlarken, hıza bağlı olarak yolculuk süresi değişim göstermekte ve işletme maliyetleri de bu değişimden etkilenmektedir. Bir gemi işletmeye alındığında, kullanılacak nakliye rotaları; geminin hızı, müşterinin müsaade ettiği nakliye süresi ve maliyet gereklilikleri, gemi sistemlerinin operasyonel ihtiyaçları, gemi personelinin

cretleri, sigorta, liman/kanal ücretleri ve çeşitli finansal faktörlere dayanarak seçilmektedir (Kobayashi, Hashimoto, Taniguchi, ve Yoneda, 2015).

Bu bölümde özetlenen faktörler, gelecek dönemde deniz taşımacılığı konusunda rekabetçi kararların uygulamaya konulmasını teşvik etmektedir. Belirtilen faktörlerin mevcut şartlar göz önünde bulundurularak analiz edilmesi ve stratejik planların geliştirmesi, küresel politikalardan doğrudan etkilenmektedir. Fakat söz konusu tercihlerin rekabetçi, sürdürülebilir ve yüksek verimliliği hedefleyen özellikte olmasıyla, küresel eğilimlere daha kolay adaptasyon sağlama imkânına erişilebilmektedir.

7.2.1 Pasifik Okyanusu'nda Ticaret

20. yüzyılın ortalarından bu yana, özellikle Çin, Japonya, Güney Kore ve Tayvan gibi Batı Pasifik Kıyısı lkeleri ile Kuzey Amerika, büyük ölçekte Amerika Birleşik Devletleri, arasındaki ticarete büyüme gerçekleşmektedir (Brown ve Takada, 2017). Bunun yanında; Singapur, Tayland, Malezya, Filipinler ve Endonezya gibi Güneydoğu Asya lkeleri ile Kuzey Amerika arasındaki ticarete de önemli gelişmeler yaşanmaktadır. Bu ticari genişleme sayesinde, Batı Pasifik'te Japonya ve Güney Kore, güneyde Avustralya ve Güneydoğu Asya ve kuzeyde de Kuzey Amerika'nın Pasifik'e kıyısı limanları, toplam ticaretin büyük bir bölümünü karşılar konuma gelmektedir. Sonuç olarak, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki New York Limanı popülerliğini yitirerek, Los Angeles ve Long Beach limanları önemli uluslararası ticaret merkezleri olmuşlardır (Aregall, Bergqvist, ve Monios, 2018).

Böylece, Pasifik Okyanusu üzerinde doğu-batı ve kuzey-güney yönlü yapılan deniz taşımacılığı hizmetleri sayesinde; hammadde, yarı mamul ve nihai tüketim ürünleri dünya çapında dağıtılmaktadır. Japonya, tonaj olarak çoğunlukla ham madde ithal ederek; motorlu taşıtlar, makineler, hassas ve elektronik ürünleri dünya pazarına sunmaktadır. Japonya'yı takip eden Çin, 1990'dan sonra önemli ölçüde ticari atak yaparak son kullanıcı ürünlerini dünya ülkelerine ulatırmaktadır. Pasifik'in diğer ticaret ülkeleri olan Avustralya ve Yeni Zelanda, yoğun olarak hammadde ihracatı yaparken; Güney Kore ve Tayvan hammadde ithalatı yapmaktadır (Britannica, 2022).

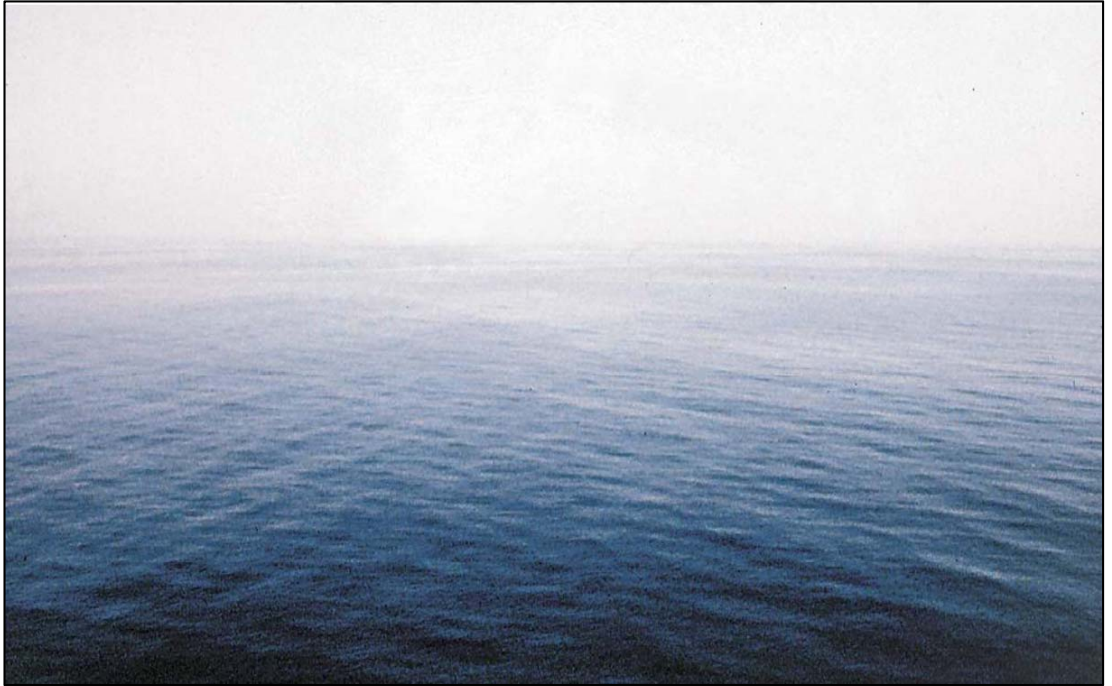
Bunun yanında, Japonya, Güney Kore, Çin ve Filipinler dünya ticari gemi filosunun önemli bir bölümünü oluştururken; Japonya, Güney Kore ve Tayvan dünyanın önemli gemi inşa eden ülkeleri arasında yer almaktadır. Kuzey Amerika’da Los Angeles ve Long Beach limanlarına ek olarak, San Francisco Körfezi ve Puget Sound bölgesi limanları da önemli ticaret merkezlerindendir (Lau, Ng, Fu, ve Li, 2013). Japonya’da, Tokyo ve Osaka Körfezi; Güney Kore’de Pusan; Çin’de Şanghay ve Hong Kong; Tayvan’da Kao-hsiung ve Avustralya’da Sydney limanları diğer önemli ticaret merkezleri olarak faaliyetlerine devam etmektedir (Ashrafi, Walker, Magnan, Adams, ve Acciaro, 2020). Singapur ise, Pasifik ve Hint Okyanusu’na komşu olması sebebiyle, bu iki büyük okyanus arasındaki gemi trafiğine hâkim konumda yer almaktadır (Wu, Zhang, ve Lou, 2020).

7.2.2 Çevresel Faktörlerin Deniz Ortamına Etkileri

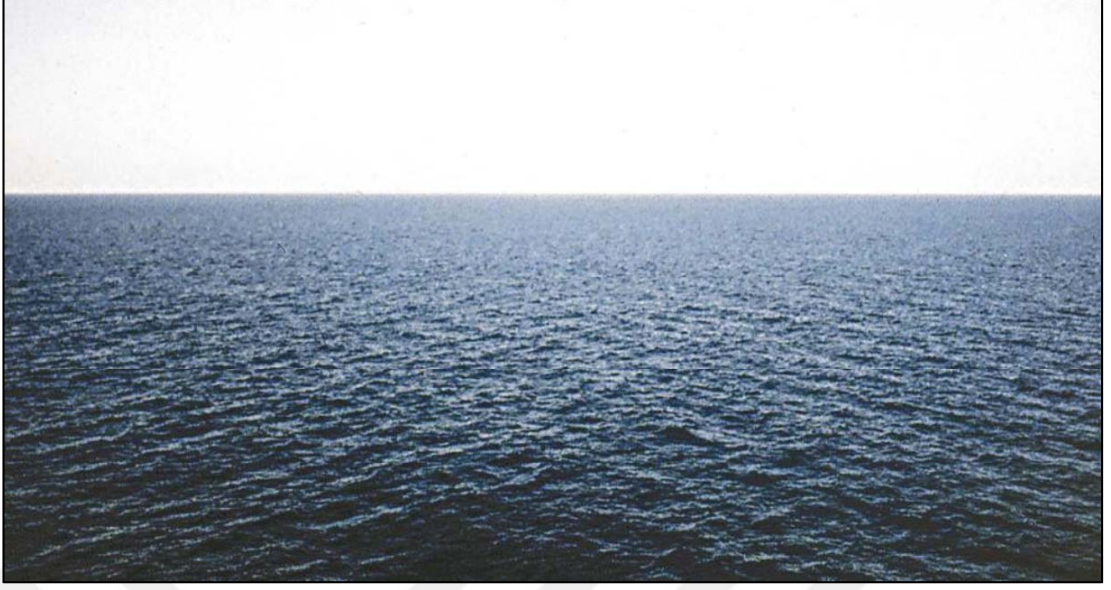
Deniz araçlarını tasarlarken, kullanım amacına ve çalışma bölgesine göre makine, donanım ve yapısal bileşenlere ait parametrelere, uluslararası kurallar ve müşteri talebi doğrultusunda karar verilmektedir. Bunun yanında belirli denizcilik performansına sahip gemileri daha verimli ve emniyetli bir şekilde işletebilmek için bir takım operasyonel önlemler alınmaktadır. Bunlardan biri, deniz yüzeyinde meydana gelen dalgalar olup, bazı volkanik patlamalar, depremler ve bir takım doğa olayları haricinde, rüzgârdan kaynaklanmaktadır (Ryabkova, Karaev, Gou, ve Titchenko, 2019). Bunun haricinde, yüzey akıntılarının da geminin seyrini ciddi derecede etkileyeceği durumlarla karşılaşılabilir (Kennedy, 2014). Denizlerde oluşan dalgaların yüksekliği, rüzgârın ne kadar süredir estiğine, açık suda ilerleme mesafesine ve şiddetine bağlı olarak değişmektedir (Ryabkova vd., 2019). Açık denizlerde esen rüzgârın sınıflandırılmasında, *Beaufort (Bofor) Rüzgâr Ölçeği* kullanılmaktadır ve karadan uzakta meydana gelen dalgaları yüksekliklerine göre tanımlamaktadır (Meaden vd., 2007). Bu sayede, dalga ve rüzgârın koşullarına bağlı olarak seyir bölgesi planlanmaktadır. Şekil 7.6 ve Şekil 7.19 arasındaki görseller, rüzgarın deniz yüzeyinde meydana getirdiği dalgaları Beaufort ölçeğinde tanımlamaktadır (Admiralty, 2004).



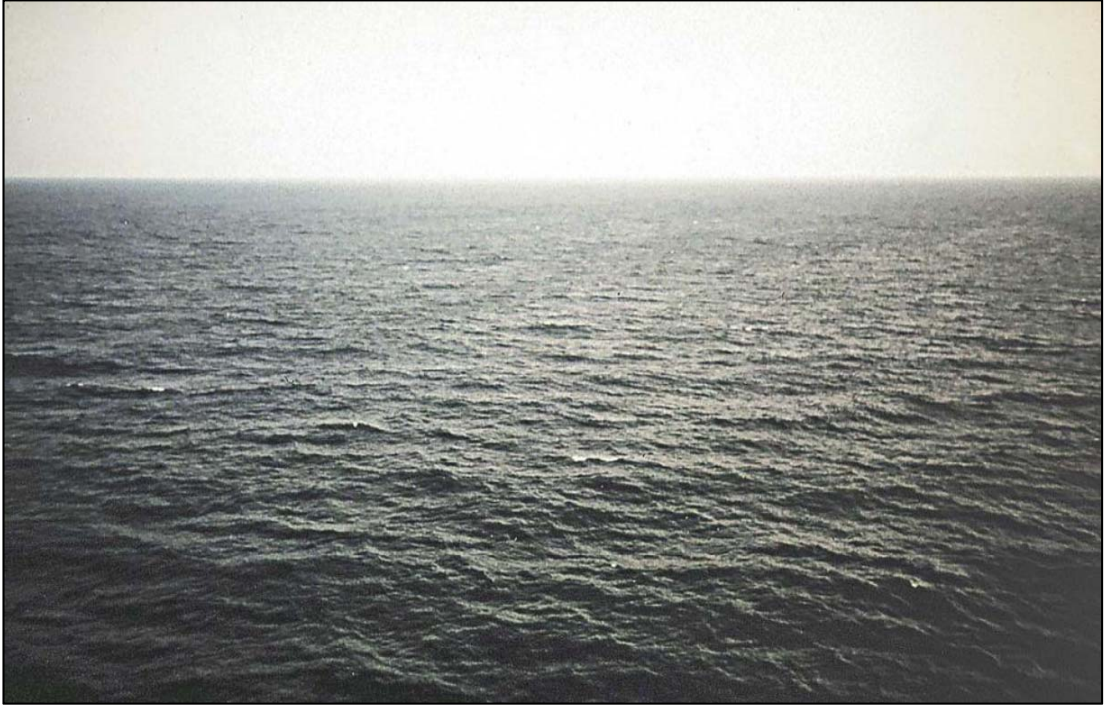
Şekil 7.6 Beaufort ölçeği:0 durumunda deniz yüzeyi (Admiralty, 2004)



Şekil 7.7 Beaufort ölçeği:1 durumunda deniz yüzeyi (Admiralty, 2004)



Şekil 7.8 Beaufort ölçeği:2 durumunda deniz yüzeyi (Admiralty, 2004)



Şekil 7.9 Beaufort ölçeği:3 durumunda deniz yüzeyi (Admiralty, 2004)



Şekil 7.10 Beaufort ölçeği:4 durumunda deniz yüzeyi (Admiralty, 2004)



Şekil 7.11 Beaufort ölçeği:5 durumunda deniz yüzeyi (Admiralty, 2004)



Şekil 7.12 Beaufort ölçeği:6 durumunda deniz yüzeyi (Admiralty, 2004)



Şekil 7.13 Beaufort ölçeği:7 durumunda deniz yüzeyi (Admiralty, 2004)



Şekil 7.14 Beaufort ölçeği:8 durumunda deniz yüzeyi (Admiralty, 2004)



Şekil 7.15 Beaufort ölçeği:9 durumunda deniz yüzeyi (Admiralty, 2004)



Şekil 7.16 Beaufort ölçeği:10 durumunda deniz yüzeyi (Admiralty, 2004)



Şekil 7.17 Beaufort ölçeği:11 durumunda deniz yüzeyi (Admiralty, 2004)



Şekil 7.18 Beaufort ölçeği:12 durumunda deniz yüzeyi-1 (Admiralty, 2004)



Şekil 7.19 Beaufort ölçeği:12 durumunda deniz yüzeyi-2 (Admiralty, 2004)

Yukarıdaki şekillerden de görüleceği üzere, dalga yüksekliği ve rüzgâr hızı gemilerin seyrine doğrudan etki etmektedir. Deniz durumunu sakinden harikeyne kadar ölçeklemede kullanılan Beaufort rüzgâr ölçeği, gemilerin seyri sırasında

karşılaşacağı zorlukları ifade edebilmek için 0 ile 12 arasında orantılı olarak tanımlanmaktadır. Bu değer büyüdükçe, gemilerin seyri sırasında karşılaşacağı tehlikeli durumların olasılığı da artmaktadır. Yükselen rüzgâr hızı ile birlikte, gemilerin manevra kabiliyetleri düşmekte, yük ve gemide maddi kayıp, yolcu ve mürettebatta ise can kaybı olma olasılığı artmaktadır.

Tablo 7.6 Beaufort (Bofor) rüzgâr ölçeği (MGM, 2022)

Bofor no	Rüzgârın tanımı	Açık denizde 10 m yükseklikteki ortalama rüzgâr hızı		Rüzgârın denizde yaptığı etki	Yaklaşık dalga yüksekliği metre
		knot	m/s		
0	Sakin	1	0-0,2	Deniz çarşaf gibi düzdür.	-
1	Esinti	1-3	0,3-1,5	Çok küçük, az belirgin ve köpüksüz dalgacıklar.	0,1
2	Hafif rüzgâr	4-6	1,6-3,3	Kısa fakat daha belirgin küçük dalgacıklar. Düzgün görünüşlü, çatlamayan dalga tepeleri oluşur.	0,2 (0,3)
3	Tatlı rüzgâr	7-10	3,4-5,4	Tepeleri kırılmaya başlayan dalgacıklar birleşir ve köpüklenir.	0,6 (1)
4	Orta rüzgâr	11-16	5,5-7,9	Küçük dalgalar genişlemeye başlar. Kırılan dalga köpükleri daha sık hale gelir.	1 (1,5)
5	Sert rüzgâr	17-21	8,0-10,7	Orta boyutlu dalgalar daha belirgin gelişir ve hafif serpinti olasılığı vardır.	2 (2,5)
6	Kuvvetli rüzgâr	22-27	10,8-13,8	Büyük dalgalar oluşmaya başlar ve dalga köpükleri yayılarak serpinti ihtimali artar.	3 (4)
7	Fırtınamsı rüzgâr	28-33	13,9-17,1	Kırılan dalgaların köpükleri rüzgâr boyunca savrulur ve denizde kabarma başlar.	4 (5,5)
8	Fırtına	34-40	17,2-20,7	Uzun boylu, oldukça yüksek dalgalar oluşarak, dalga tepelerinin kenarları rüzgâr boyunca kırılır ve köpük oluşumu gözlenir.	5,5 (7,5)
9	Kuvvetli fırtına	41-47	20,8-24,4	Yüksek dalgalar oluşarak, serpinti ve köpükler rüzgâr boyunca daha da yoğunlaşır. Dalga tepeleri devrilmeye ve yıkılmaya başlayarak, serpinti görüş mesafesini etkiler.	7 (10)
10	Tam fırtına	48-55	24,5-28,4	Uzun sorguçlu çok yüksek dalgalar, serpinti ve köpükleri büyük parçalar halinde rüzgâr yönünde savurur. Yükselen ve kabaran deniz yüzeyi beyaz görünmeye başlar.	9 (12)
11	Çok şiddetli fırtına	56-63	28,5-32,6	Çok az görülen yüksek dalgalar meydana gelir. Rüzgâr yönü boyunca köpük ve serpinti oluşumu deniz yüzeyini beyazlaştırır ve dalga tepelerinden köpük püskürmektedir. Görüş mesafesi azalmıştır.	11,5 (16)
12	Harikeyn	64 ve üzeri	32,7 ve üzeri	Gökyüzü köpük ve serpinti ile kaplanmıştır. Deniz tamamen bembeyazdır. Görüş uzaklığı çok azalmıştır.	14 ve üzeri

Tablo 7.6’da, günümüzde deniz seyirlerinde kullanılan Beaufort ölçeği (0 ve 12 seviyeleri arasında) sahip olduğu bütün özellikleriyle tanımlanmakta olup, genişletilmiş ölçek (13-17) yalnızca tropikal iklim koşullarının bulunduğu bölgelerde kullanılmaktadır (Sampe ve Xie, 2007).

1921’de Birleşik Krallık Meteoroloji Ofisi’nin çabaları sayesinde nicel hale getirilen Beaufort ölçeğinde rüzgâr hızı, $v = 1,87 \times \text{Beaufort no}^{3/2} \text{ mil/saat}$ halinde kullanılmaya başlanmıştır. Sonrasında ise, 1926’da Uluslararası Meteoroloji Komitesi, $v = 0,837 \times \text{Beaufort no}^{3/2} \text{ m/s}$ tanımlamasını kabul ederek, rüzgâr hızı ve Beaufort ölçeği arasındaki dönüşümü standart hale getirmektedir (Meaden vd., 2007).

Bir geminin toplam direnci, sakin su direnci ve dalga, rüzgâr ve akıntı kaynaklı ek dirençten meydana geldiğinden dolayı, belirli bir hızda hareket halindeki geminin sevk gücü çevre şartlarından doğrudan etkilenmektedir. Operasyon halindeki bir geminin direncini anlık olarak tahmin etmek oldukça güçtür. Bu sebeple, gemilerin seyir boyunca karşılaştıkları deniz durumlarının ortalaması alınarak, belirli bir sapma doğrultusunda direnç tahmini yapılabilmektedir (Bentin vd., 2016).

7.2.3 Seçilen Çalışma Bölgesine Ait Çevre Koşulları

Pasifik Okyanusu’ndaki rüzgâr ve basınç sistemleri, dünya atmosferinin dönmesi sonucu oluşan *Coriolis* kuvveti ve dünyanın ekseninin eğikliği sebebiyle gelişen rüzgâr modellerinden doğrudan etkilenmektedir. Güney ve Kuzey yarım kürelerdeki atmosferik sistemler, Pasifik Okyanusu’nun sahip olduğu geniş açık su kütlesi sayesinde, Ekvator etrafında yansımaktadır. Burada meydana gelen rüzgâr ve basınç sistemleri ise ticaret rüzgârlarının oluşumunu tetiklemektedir. Bununla birlikte, Kuzey Pasifik’te aynı enlem üzerindeki iklim koşulları beklenildiği kadar tek düze olmayıp, doğu-batı hattında önemli iklim farklılıkları aynı anda yaşanabilmektedir (Britannica, 2022).

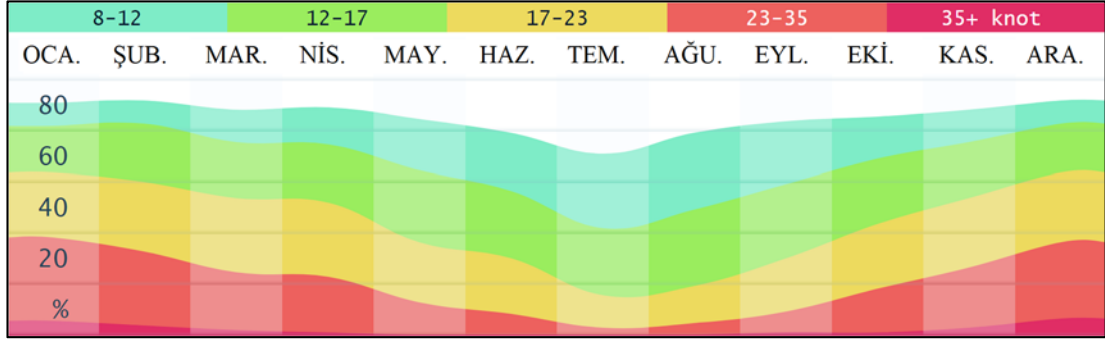
Pasifik Okyanusu’nun orta bölümünde (ekvatorial) hâkim olan ve yüksek basınç merkezinden alçak basınç merkezine doğru esen rüzgârlar, ticaret rüzgârlarının yani alizelerin oluşumunu tetiklemektedir (Traut vd., 2014). Peru ve Ekvador’un açıklarından başlayan bu hava hareketi, Doğu Asya’ya (Endonezya ve Malezya dolayları) kadar ulaşmakta ve yükselen hava büyük daire hattı üzerinden dönüş yaparak Pasifik’in kuzeyinden geçmekte, Kuzey Amerika’nın batı kıyılarında döngüyü tamamlamaktadır (Windy.app, 2022). Pasifik’in doğu kıyısından batı kıyısına taşınan bu sıcak hava kütlesi, beraberinde deniz yüzeyindeki sıcak suyu da

taşımaktadır. Bu su hareketi, dipteki soğuk ve besin yönünden yüksek değere sahip su kütlelerinin yükselmesini beraberinde getirmektedir (Sampe ve Xie, 2007). Fakat zaman içinde bu hareketin etkisi azalmakta ve tersine bir hareket gerçekleşmektedir. Batıya taşınan sıcak hava ve su kütlesi doğuya doğru yönelerek, soğuk su seviyesini azaltmaktadır. Bunun sonucunda, doğu kıyısında, yağmur, sel ve fırtına oluşumu gözlemlenerek, “El Nino” olarak adlandırılan meteorolojik olayın gerçekleşmesine neden olmaktadır ve bu hareketin tam tersi olan; doğu kıyısında soğuk su seviyesinin olağandan daha fazla yükselmesiyle, sıcak hava batı Pasifik’e yüksek bir hızla ilerlemekte, “La Nina” adı verilen durum ortaya çıkmaktadır (Chen, Hsieh, ve Liu, 2012). Buradan da görüldüğü üzere, araştırmanın yapıldığı bölge olan Kuzey Pasifik’teki çevre koşullarının yıl içinde süreli olarak değişimi söz konusudur. Hedeflenen seyrin gerçekleştirilebilmesi için geminin farklı çevre koşullarındaki güç ihtiyacının hesaplanması, ayrıca değişen rüzgâr durumu sebebiyle paraşüt sistemden elde edilecek ek çekme kuvvetinin bilinmesi zorunluluğu oluşmaktadır.

Boyutları ve özellikleri belirtilen konteyner gemisine, tam yüklü halde San Diego ve Yokohama limanları arasında yaptığı gidiş-dönüş seferi sırasında, paraşüt yardımcı sevk sistemi tarafından aktarılan ek çekme kuvvetinin hesaplanmasında; paraşüt üzerine gelen rüzgârın seyir boyunca sahip olacağı hız ve yön bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, gemi ek direnci hesabındaki seyir bölgesi çevre koşulları Tablo 7.7’deki bilgilerden elde edilmektedir.

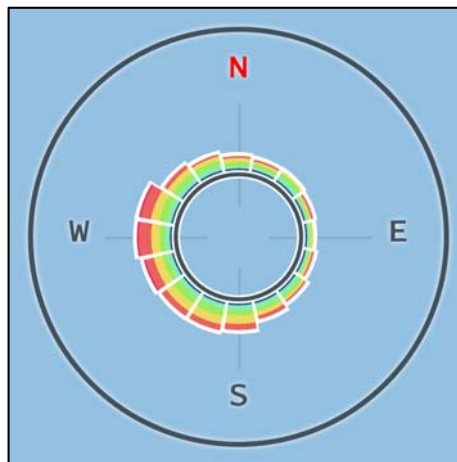
Paraşüt üzerine gelen rüzgâr hızı arttıkça paraşütten elde edilen çekme kuvveti de artmaktadır. Bunun aksine, gemiye etkiyen rüzgâr hızının artması, geminin suyun üstünde kalan bölümünün rüzgâr direncinde ve rüzgârın deniz yüzeyinde meydana getirdiği dalga sistemi sebebiyle de dalga direncinde artışa sebep olmaktadır. Konvansiyonel sevk sistemine sahip bir gemi, belirlenen seyir rotası boyunca maruz kaldığı çevre koşullarından dolayı rüzgâr ve dalganın negatif etkilerini yenebilmek için ana makinelerinden ek güç talep etmektedir. Paraşüt destekli sevk sistemli bir gemide; bu ek güç, rüzgârın sahip olduğu enerjinin ek çekme kuvvetine dönüşümünden dolayı daha az olacaktır. Hatta paraşüt sevk sisteminin gemi yapısı ve geminin çalışma bölgesiyle uyumlu olacak şekilde seçilmesiyle, talep edilen ek sevk kuvvetinden daha fazlası da sağlanabilmektedir. Bu sebeplerle, bu bölümde, seçilen

seyir rotasındaki çevresel faktörler ve bunlara ait özellikler yer almaktadır. Şekil 7.20’de Kuzey Pasifik Okyanusu için son 10 yıllık rüzgâr hızı ortalaması gösterilmektedir (Windy.app, 2022).



Şekil 7.20 Kuzey Pasifik Okyanusu 2012-2021 arası rüzgâr hızı istatistiği (Windy.app, 2022)

Paraşütün, rüzgâr enerjisinden faydalanarak gemiye ek çekme kuvveti sağlayabilmesi için rüzgâr hızı önemli bir kriterdir, fakat tek başına yeterli olmamaktadır. Bunun yanında, rüzgârın gemiye göre sahip olduğu bağıl hız vektörü, çekme halatındaki gerilme kuvvetinin sevk sistemi için faydalı kuvvete dönüşümünde önemli bir etkiye sahiptir. Çünkü geminin ilerleme yönünde kuvvet bileşenine sahip olmayan bir halat gerilmesi, geminin sevkine katkı sağlayamamaktadır. Bu sebeple, gemi rota bilgisi, rüzgâr şiddeti ve yönü birlikte değerlendirilmektedir. Şekil 7.21’deki rüzgârgülü diyagramı, Kuzey Pasifik Okyanusu’na ait 2012-2021 yılları arasındaki rüzgâr istatistiğini gösterilmektedir (Windy.app, 2022).



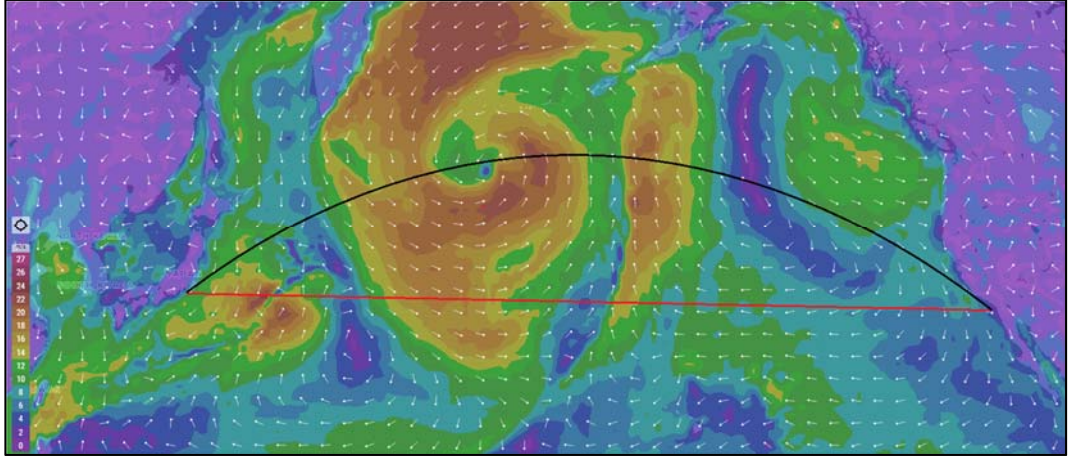
Şekil 7.21 Kuzey Pasifik Okyanusu rüzgâr istatistiği (2012-2021) (Windy.app, 2022)

Seçilen rota üzerindeki rüzgâr yönü ve hızı, paraşüt sistem verimliliğini etkilerken; rüzgârın gemi st yapısını etkilemesiyle gemi gövdesinde ek rüzgâr direnci, deniz yüzeyinde meydana gelen dalga sistemi sebebiyle de ek dalga direnci oluşumunu gözlemlenmektedir. Yani, artan rüzgâr hızıyla birlikte paraşüt sistemi verimliliğinde olumlu sonuçlar ortaya çıkarken, gemi sevk sistemi için olumsuz sonuçlar meydana gelmektedir. Dolayısıyla, rotanın gemi sevk sistemine etkisini değerlendirebilmek için çalışma bölgesinin deniz durumu karakteristiğini incelemek gerekmektedir. Bu çalışmada ele alınan seyir bölgesinin deniz durumu karakteristiği Tablo 7.7’de yer almaktadır. Ayrıca, Kuzey Pasifik Okyanusu için Deniz Durumu 5’in bu bölgede seyir yapacak olan bir gemiye ait ortalama ek direnci hesaplamada kullanılabileceği de ifade edilmektedir (Durante vd., 2020).

Tablo 7.7 Kuzey Pasifik Okyanusu deniz durumu karakteristiği (Durante vd., 2020)

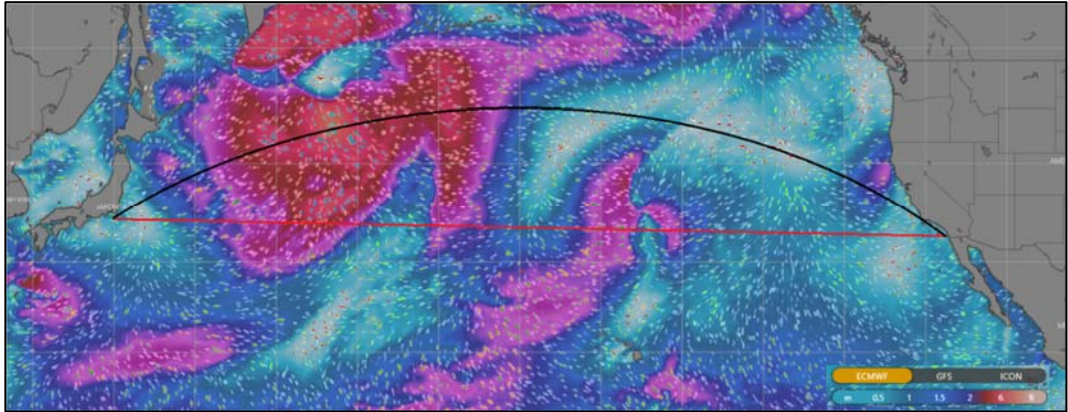
Deniz durumu	Karakteristik dalga yüksekliği (m)	Deniz durumu olasılığı (%)		Ort.	Açılma oranı (%)	En olası dalga periyodu (saniye)		
		Bales, 1982	Lee ve Bales, 1984			Bales, 1982	Lee ve Bales, 1984	Ort.
0-1	0,05	0	1,3	0,65	99,35	–	–	–
2	0,3	4,1	6,4	5,25	94,1	7,5	6,3	6,9
3	0,88	16,9	15,5	16,2	77,9	7,5	7,5	7,5
4	1,88	27,8	31,6	29,7	48,2	8,8	8,8	8,8
5	3,25	23,5	20,94	22,22	25,98	9,7	9,7	9,7
6	5	16,3	15,03	15,67	10,32	13,8	12,4	13,1
7	7,5	9,1	7,6	8,35	1,96	13,8	15	14,4
8	11,5	2,2	1,56	1,88	0,08	18	16,4	17,2
>8	>14	0,1	0,07	0,09	0	20	20	20

Çalışmada kullanılan konteyner gemisinin seyir yapacağı bölgeye ait kış mevsimi aylarından biri olan şubat ayı içerisindeki bir günün rüzgâr durumu şekil 7.22’de gösterilmektedir (Windfinder, 2022). Daha önce de bahsedildiği üzere, ekvatora yakın (Pasifik’in orta bölgesi) bölgede Pasifik’in doğu kıyısından yola çıkan ve Doğu Asya’ya uzanan hava kütlesi, büyük daire hattı üzerinden Pasifik’in doğu kıyısına dönüş yaptığı şekil 7.22’den görülebilmektedir.



Şekil 7.22 Kuzey Pasifik Okyanusu rüzgâr verisi örneği (14 Şubat 2022) (Windfinder, 2022)

Geminin sefer bölgesinde meydana gelen deniz yüzeyi dalgalarını gösteren örnek veri ise Şekil 7.23'te yer almaktadır (Windy, 2022). Bu dalgaların rüzgârın indüklemesi ile oluştuğu çıkarımı, örnek rüzgâr ve dalga verisinin karşılaştırılması yapılarak da elde edilebilmektedir.



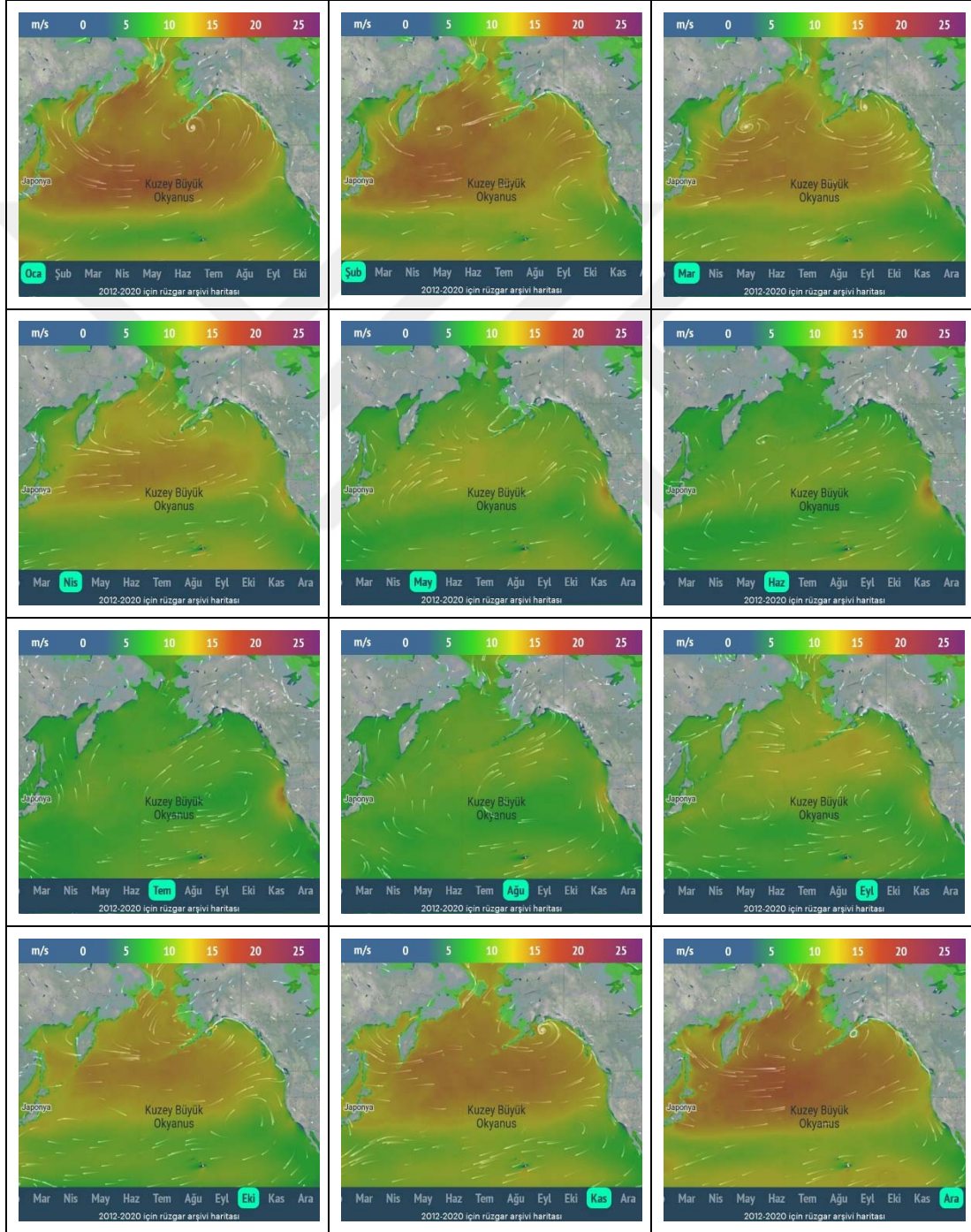
Şekil 7.23 Kuzey Pasifik Okyanusu rüzgâr dalgası verisi örneği (14 Şubat 2022) (Windy, 2022)

Tablo 7.8'de yer alan ve seyir bölgesine ait 2012-2020 yılları arasında meydana gelen rüzgarın ölçümü sonucunda elde edilen aylık ortalama rüzgar verisi kullanılarak, seyir bölgesinde paraşüt üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler ve bu kuvvetlerin gemi enerji verimliliğine katkısı hesaplanabilmektedir.

2012-2020 yılları arşiv verisi incelendiğinde, aylık ortalama rüzgâr hızlarının; Ocak'ta 12 m/s (deniz durumu 6), Nisan'da 10,5 m/s (deniz durumu 5), Temmuz'da 8 m/s (deniz durumu 5), Ekim'de 10,2 m/s (deniz durumu 5) olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Bu aylar bulundukları mevsimlerin ortanca ayları olması sebebiyle,

mevsim ortalamaları için kayda değer bilgiler sunmaktadır. Bu veri ışığında, yıllık ortalama rüzgâr hızı, Kuzey Pasifik Okyanusu için 10,2 m/s olarak elde edilmektedir. Bu da, bu bölgedeki yıllık ortalama deniz çevresi iklim koşullarının Deniz Durumu 5'e karşılık geldiğinin göstergesidir.

Tablo 7.8 Kuzey Pasifik Okyanusu için 2012-2020 yılları arasındaki aylık ortalama rüzgar haritaları (Windy.app, 2022)



7.3 Direnç ve Güç Hesabı

Gemilerin istenen servis hızında ve meydana gelebilecek olumsuz hava koşullarında emniyetli seyir gerçekleştirebilmeleri için gerekli olan ek sevk kuvvetini sağlayabilen sistemlere sahip olmasında, gemi tasarım süresinde ele alınan direnç ve güç hesabı önemli rol oynamaktadır. Ayrıca, gerekli sevk gücünün hesaplanmasıyla, gemi sevk makinelerinin boyut ve kütlesi belirlenebilmekte ve işletme maliyetleri hakkında tahminleme yapılabilmektedir. Bu durumun gerekliliği, tasarım sürecinde kurulu ana makine gücü ile gemi gövde formu arasındaki doğru eşleşmeyi belirleme ihtiyacından kaynaklanmaktadır (Odabasi vd., 1983). Güç hesabı problemi deneysel teknikler, sayısal yöntemler ve teorik analizler gibi çeşitli yöntemlerin kullanımını gerektirmektedir. Gemiye ait hidrodinamik özellikler konusunda, gövde formu ve suyun etkileşimi sırasında meydana gelen sınır tabaka ve serbest yüzey dalga sisteminin yapısından dolayı bir takım belirsizlikler bulunmaktadır (Molland vd., 2017).

Birçok araştırmacı tarafından gerek deneysel gerekse de sayısal olarak gemi direnç değerlerinin hesaplandığı ve sonuçların birbiriyle doğrulandığı bir gövde formunun seçilmesi, yeni analizlerin türetilmesine imkân sağlamaktadır (Kim, Van, ve Kim, 2001). Bu sebeple, KRISO Konteyner Gemisi'nin gövde formundan yola çıkılarak, üst yapısı bulunan ve farklı çevre koşullarında seyir yapan gerçek boyutlu gemiye ait direnç ve güç değerleri elde edilebilmektedir.

En basit haliyle, model direnç testinin sonucu, toplam direnç katsayısı C_T ile Froude sayısı F_n arasında boyutsal olarak karşılık gelmeyen bir ilişki olarak ifade edilmektedir. Gerek model deneyleri gerekse de modele ait HAD simülasyonları pervanesiz gemi ile yapılmaktadır. Bu çalışmadaki direnç hesaplarının ilk adımında, HAD yöntemi sonuçları model deneyleriyle doğrulanmaktadır. Daha sonra çeşitli hız ve çevre şartlarında HAD analizleri türetilerek, direnç değerleri gerçek gemi boyutuna aktarılmaktadır. Bu dönüşüm işlemini yapabilen başlıca dört adet yöntem bulunmaktadır. Bunlar (Yılmaz, 2008):

- 1957 ITTC yöntemi,
- 1978 ITTC yöntemi,

- Hughes-Prohaska yöntemi,
- Telfer GEOSIM yöntemi olarak bilinmektedir.

Bu çalışmada, direnç değerlerini model ölçeğinden gemi boyutuna dönüştürmede Hughes-Prohaska yöntemi benimsenmektedir. Bu yöntem, toplam direnci Denklem 7.1’de gösterildiği gibi iki bileşene ayırmaktadır.

$$C_T = ((1 + k) \times C_{F0}) + C_W \quad (7.1)$$

Burada, C_{F0} ıslak alanı gemi veya modele eş olan düz levhanın sürtünme direnç katsayısıdır. $(1 + k)$ form faktörü olup, C_W gemi ve model için aynı olan dalga direnci katsayısını ifade etmektedir. Bu yöntemin uygulama adımları şu şekildedir:

- 1- Geminin Froude sayısına karşılık gelen hızda model gemi için toplam direnç (R_{Tm}), direnç tahmin yöntemlerinden biri kullanılarak hesaplanmaktadır. Denklem 7.2’deki hesaba göre, gerçek boyutlu geminin 24 knot hız (V_s), yani $F_n=0,26$ ’da yüzdüğü koşulda doğrulama yapılmakta; bu da, 2,197 m/s model gemi hızına (V_m) karşılık gelmektedir. Burada, L_s geminin ve L_m modelin hesap boyudur.

$$V_m = V_s / (L_s / L_m)^{0,5} \quad (7.2)$$

- 2- Denklem 7.3’ten, model gemi için toplam direnç katsayısı C_{Tm} elde edilmektedir.

$$C_{Tm} = R_{Tm} / (\frac{1}{2} \rho_m S_m V_m^2) \quad (7.3)$$

Burada, ρ_m model deneyinin yapıldığı suyun yoğunluğu, S_m modelin ıslak yüzey alanıdır.

- 3- Dalga direnci katsayısı Denklem 7.4’ten hesaplanmaktadır.

$$C_W = C_{Tm} - C_{F0m}(1 + k) \quad (7.4)$$

- 4- Gemiye ait sürtünme direnç katsayısı (C_{F0s}) ve modelle aynı olan dalga direnci katsayı kullanılarak, geminin toplam direnci bulunmaktadır.

Denklem 7.5 gemi için toplam direnç katsayısını (C_{Ts}); Denklem 7.6 ise, gemi için toplam direnci (R_{Ts}) ifade etmektedir.

$$C_{Ts} = C_{F0s}(1 + k) + C_W + C_A \quad (7.5)$$

$$R_{Ts} = 0,5 \times C_{Ts} \times \rho_s \times S_s \times V_s^2 \quad (7.6)$$

Buradaki, sürtünme direnç katsayısı C_{F0s} , Denklem 7.7’den bulunmaktadır ve Reynolds sayısına (Rn) bağlı olarak elde edilmektedir. ρ_s geminin yüzdüğü suyun yoğunluğu, S_s geminin ıslak yüzey alanıdır. Model ve gemi arasındaki uyum katsayısı ise $C_A = 0,0004$ olarak alınmaktadır. 3-boyutlu ve akım kaynaklı etkileri hesaba katabilmek için ise $(1 + k)$ form faktörü kullanılmaktadır.

$$C_{F0} = 0,067/(\log_{10} Rn - 2)^2 \quad (7.7)$$

7.3.1 Gemi Direnci Doğrulama Çalışmaları

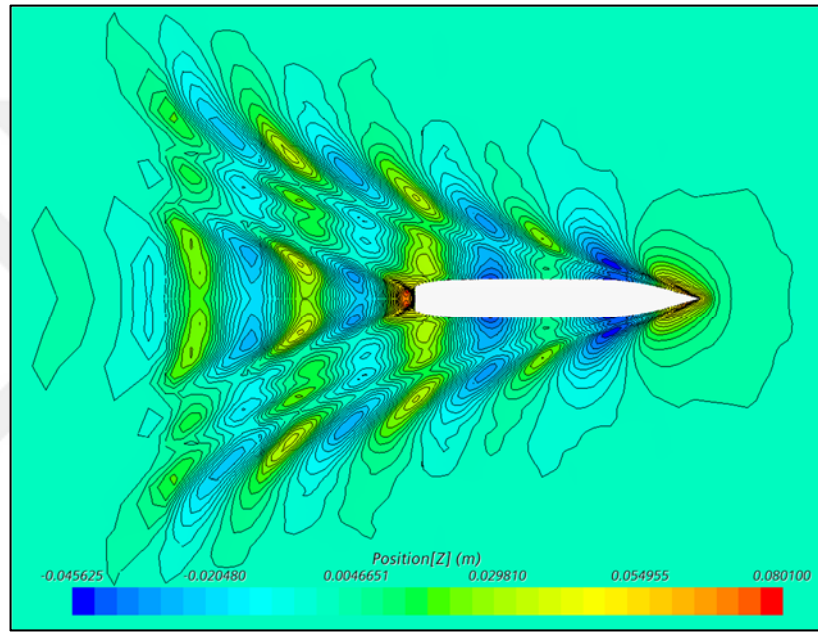
Benzer çalışmalarda olduğu gibi, bu çalışmada da HAD simülasyon sonuçları model deneyi sonuçlarıyla doğrulanmaktadır. Böylelikle, HAD yönteminde kullanılan değişkenlere karar verilerek yeni analizler türetilabilmektedir. KCS’nin 31,599 ölçekli ve üst yapının dâhil edilmediği modeline ait sakin su çekme deneyi (Islam vd., 2017) ve HAD analizi sonuçları Tablo 7.9’da gösterilmektedir.

Tablo 7.9 KCS modeline ait gemi çekme tankı deneyi ve HAD analizi sonuçları

V_m [m/s]	Fn	Rn	R_{Tm} (Deney) [N]	C_{Tm} (Deney)	R_{Tm} (HAD) [N]	C_{Tm} (HAD)	Hata oranı [%]
0,9126	0,108	5,24E+06	15,064	0,003796	15,300	0,003856	1,57
1,2844	0,152	7,38E+06	28,620	0,003641	27,889	0,003548	-2,55
1,6478	0,195	9,47E+06	44,955	0,003475	44,260	0,003421	-1,55
1,9182	0,227	1,10E+07	60,780	0,003467	60,749	0,003465	-0,05
2,1970	0,260	1,26E+07	85,348	0,003711	83,744	0,003641	-1,88
2,3829	0,282	1,37E+07	121,776	0,004501	123,547	0,004566	1,45

KCS’nin 31,599 ölçekli modeline ait sakin su ortamındaki HAD yöntemiyle yapılan direnç analizinden elde edilen C_{Tm} değeri $F_n=0,152$ için 0,003548’dir. Bu da,

R_{Tm} 'nin 27,889'a eşit ve hata oranının en yüksek olduğu (%2,55) hesaplama olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tür çalışmalarda hata payının %5'ler düzeyine karar kabul gördüğü gerçeği göz önünde bulundurulduğunda (Islam vd., 2017); ilk aşama doğrulama çalışmasıyla, HAD yöntemindeki hesaplama parametrelerinin, türetilcek yeni analizler için de kullanımı uygun bulunmaktadır. Doğrulama çalışmaları sırasında elde edilen, geminin sudaki ilerleme hareketinden kaynaklanan, serbest su yüzeyine ait dalga sistemi Şekil 7.24'te gösterilmekte ve tüm analizler için 10^{-3} mertebesinde yakınsama kriteri kullanılmaktadır.



Şekil 7.24 0,26 Froude sayısında meydana gelen serbest su yüzeyi dalga sistemi

7.3.2 HAD Yöntemine Ait Parametrelerin Belirlenmesi

HAD yöntemine ait doğrulama çalışmaları sonucunda karar verilen hesaplama parametreleri, mümkün olan en kısa sürede kabul edilebilir hata payında analiz sonucu vermeyi hedeflemektedir. Sonlu hacimler yöntemi ile yapılan HAD analizlerinin özünde; geometrinin sonlu küçük hacimlere bölünmesi ve her bir hacme ait fiziksel özelliklerin belirlenme süreci ve buna ilişkin bir takım kabul ve kısıtlar yer almaktadır. Bunları aşağıda belirtildiği gibi sıralayabiliriz:

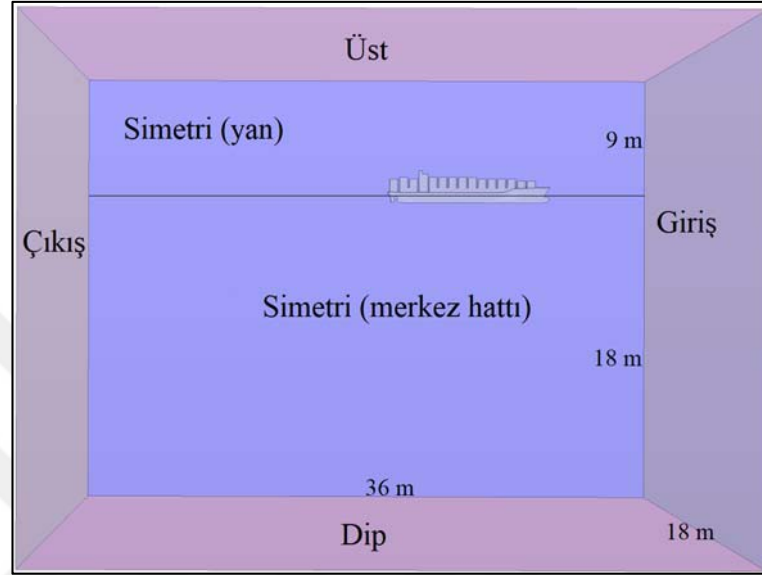
- Kontrol hacminin boyutlarına karar verilmesi,
- Akışkanın özelliklerinin belirlenmesi,

- Başlangıç ve sınır koşullarının belirlenmesi,
- Gemi serbestlik derecesinin belirlenmesi ve,
- Ağ örgüsünün yapısal ve boyutsal özellikleri olup,

çözüm algoritmasında kullanılacak denklem takımlarına bu kabul ve kısıtlar altında karar verilmektedir.

Yukarıda sıralanan parametrelerden, kontrol hacmi boyutları ve sınır koşulları Şekil 7.25'te gösterilmektedir. “Giriş” yüzeyi, 9 metre yüksekliğinde hava girişi ve 18 metre derinliğinde su girişi olacak şekilde ikiye ayrılmaktadır. Buradan kontrol hacmine giriş yapan akışkan hızları zamanla değişim göstermemekte ve geminin baş bodoslaması ile karşılaşması için geminin su hattı boyuna eşit bir mesafeyi kat etmesi gerekmektedir. “Çıkış” yüzeyi ise hava ve suyun atmosfer ortamına açıldığı ve serbest su yüzeyinin olduğu alanı tanımlamaktadır ve gemi gövdesinden ayrılan akışkan buraya ulaşabilmek için geminin su hattı boyunun 3 katından daha uzun bir mesafede ilerlemektedir. “Üst” yüzey, kontrol hacmine hava girişinin olduğu ve su hattı üstünde yer alan hava ile dolu olan hacmin en üst yüzeyini temsil etmektedir. “Dip” yüzeyi, geminin ilerlemesi sırasında deniz tabanı etkilerinin oluşamayacağı bir derinlik olan, serbest su yüzeyinin (su hattının) 18 metre altına konumlandırılan yüzeydir. HAD analizleri yapılırken zamandan tasarruf edebilmek için, gemilerin iskele ve sancak bölümlerinin çoğunlukla eş olması durumu göz önünde bulundurulduğunda, “Simetri (merkez hattı)” tanımlaması yapılabilmektedir. Bu sayede, hesaplama süresinden tasarruf sağlanabilmektedir. Gemi üzerine etkiyen kuvvetlerin yarısının hesaplanmasından dolayı, analiz sonuçlarının iki ile çarpılması gerekmektedir. “Simetri yan” yüzey ise, serbest su yüzeyi dalgalarının oluşumuna engel teşkil etmeyecek bir genişlik olan, gemi merkez hattından 18 metrelik bir uzaklıkta yer almaktadır. Aynı zamanda, bu tanımlama ile su ve havanın yan yüzeyden yansıması da engellenmektedir. Tüm bu yüzey ve boyut tanımlamaları; HAD analizlerinin yürütüldüğü, akademik ve ticari araştırmalarda sıklıkla kullanılan Star-CCM+ paket programının tavsiyelerine de uymaktadır. Ayrıca, bu çalışmada kullanılan ticari yazılımın (Star-CCM+) kullanım desteği Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi tarafından sağlanmıştır.

HAD analizlerinde kullanılan suyun yoğunluğu $997,561 \text{ kg/m}^3$ olup, dinamik viskozitesi $8,8871 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$ 'dir ve havanın $1,18415 \text{ kg/m}^3$ yoğunluğa ve $1,85508 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$ dinamik viskoziteye sahip olduğu kabul edilmektedir. Gemi ağırlık merkezinden etkiyen yerçekimi ivmesi ise $9,81 \text{ m/s}^2$ olarak kullanılmaktadır.



Şekil 7.25 Kontrol hacmi boyutları ve sınır koşulları

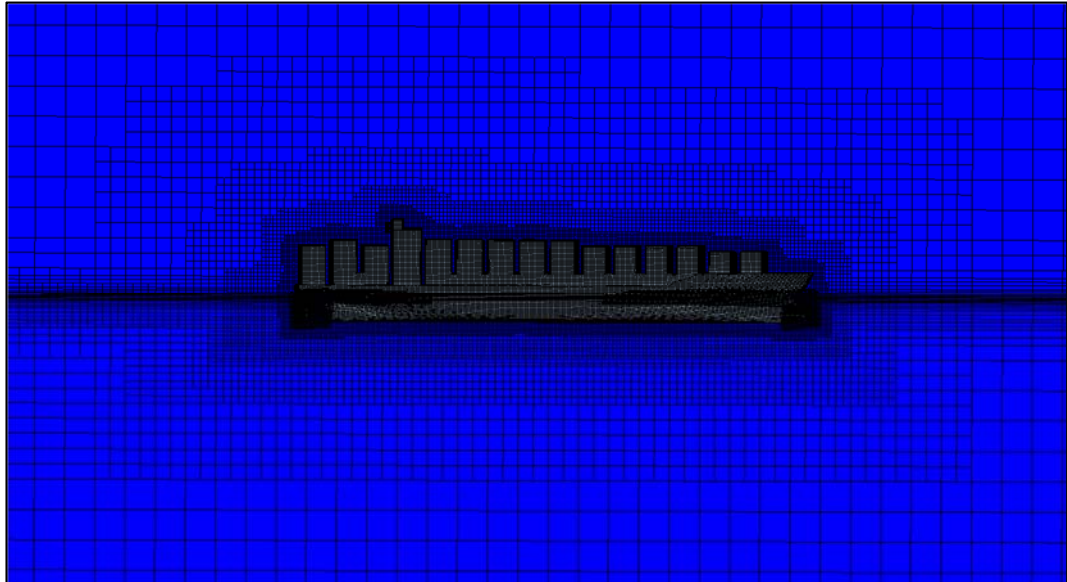
Deniz üzerinde yüzen bir geminin altı serbestlik derecesinde hareket edebileceği bilinmektedir. Fakat matematiksel çözüm algoritmalarının işleyişi için gerekli zamanın ve gerekli bilgisayar gücünün sınırlandırılması gerekmektedir. Bu sebeple, gemi hareketlerinden sadece dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketi göz önünde bulundurulmaktadır. Bu hareket kısıtlaması aynı zamanda gemi model tankı deneyleri için de geçerli olup, uluslararası düzeyde kabul görmektedir (ITTC, 2017).

Geminin etrafındaki akışkan hareketlerinin simüle edilerek gemi gövdesine etkiyen direncin hesaplanmasında, sınır koşulları ve hesaplama geometrisinin boyutlarının belirlenmesi kadar; sonlu küçük akışkan hacimlerinin şekil ve boyutları da yüksek derecede önem arz etmektedir. Burada, akışkan alanının matematiksel ifadeler olan ağ elemanlarına dönüştürülmesi ve her bir düğüm noktasının sahip olduğu fiziksel büyüklükten yola çıkılarak analiz sonucuna ulaşılması etkili olmaktadır. Matematiksel modellemede kullanılan ağ yapısını oluşturan elemanlara ait özellikler Tablo 7.10'da gösterilmektedir.

Tablo 7.10 Direnç analizlerine ait matematiksel modelin ağ yapısı özellikleri

Özellikler	Değerler
Ağ yüzeyi temel boyutu	0,1125 m
Hedef ağ yüzeyi boyutu (akışkan alanı)	0,05625 m
Hedef ağ yüzeyi boyutu (gemi gövdesi)	0,028125 m
Minimum ağ yüzeyi boyutu (bütün yüzeyler)	0,00703125 m
Maksimum ağ yüzeyi boyutu (dış yüzeyler)	1,8 m
Yüzey büyüme oranı	1,3
Gemi gövdesinde sınır tabaka kalınlığı	0,02 m
Gemi gövdesinde sınır tabaka katman sayısı	6
Gemi gövdesinde sınır tabaka katman büyüme oranı	1,5
Ağ eleman yapısı	Trimmed cell mesher (Budanmış hücre yapısı)
Toplam eleman sayısı	801.985

Bu çalışma kapsamında tamamlanan bütün HAD analizleri zamana bağlı yürütülmekte olup, her bir analizde 250 saniyelik gemi hareketi simüle edilmektedir. Sakin su direnç analizleri için zaman adımı 0,006 saniye; karışık dalga sistemine ait analizlerde ise, zaman adımı, dalga periyodu/256'ya eşit olacak şekilde belirlenmektedir. Ayrıca geminin dalgayı baştan aldığı kabul edilmekte ve Pierson-Moskowitz dalga spektrumu kullanılmaktadır (Ozdemir, Cosgun, Dogrul, ve Barlas, 2016).

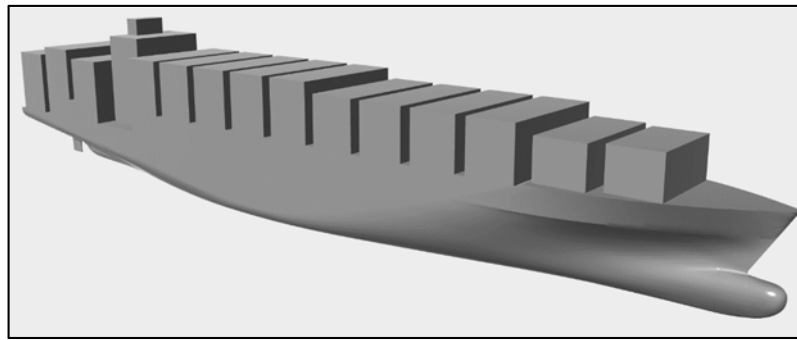


Şekil 7.26 Sayısal hesaplama için oluşturulan ağ yapısına ait orta kesit görünüşü

Şekil 7.26’da, yukarıda belirlenen ağ yapısı parametreleri kullanılarak elde edilen matematiksel çözüm ağının, geminin orta kesitindeki görünüşü yer almaktadır. Şekilden de görüleceği üzere, gemi geometrisine ve serbest su yüzeyine yakın yerlerdeki ağ yapısı hassaslaşmakta, bu bölgelerden uzaklaştıkça daha düşük hassasiyette ağ elemanları bulunmaktadır. Bunun sebebi, akışkan alanda hareket eden geminin gövdesine etkiyen direncin hesaplanmasında; gemi gövdesinden uzaklaştıkça azalan akışkan alan etkisi nedeniyle, kontrol hacminin her bölgesinde yüksek hassasiyette ağ yapısı oluşturma zorunluluğunun bulunmamasıdır.

7.3.3 Dalga ve Rüzgâr Kaynaklı Ek Direncin Hesaplanması

KCS’nin bir konteyner gemisi olması sebebiyle; güvertesinde yük taşıması durumunda geminin üzerine gelen hava kaynaklı ek rüzgâr direnci oluşmaktadır. Burada bahsi geçen ek direnci hesaplarken, seyir bölgesindeki rüzgârın etkisi irdelenmeyip, geminin sudaki hareketi sırasında sahip olduğu ilerleme hızı kaynaklı üst yapıda meydana gelen hava direncinin etkisi göz önünde bulundurulmaktadır. Bu nedenle, benzer boyut ve taşıma kapasitesine sahip konteyner gemilerinden yola çıkılarak (Seok ve Park, 2020), KCS’nin toplam 3.600 TEU yük taşıdığı durumda, sahip olacağı üst yapı formu Şekil 7.27’de gösterilmektedir. Çalışmanın devamındaki direnç analizlerinde, geminin tam yüklü olduğu kabulü yapılmakta ve üst yapının mevcut olduğu gemi modeli kullanılmaktadır.



Şekil 7.27 Üst yapıya sahip KCS modeli

Güverte üstü yapının da göz önünde bulundurulmasıyla, deney ortamında ihmal edilen üst yapıya ait ek direnç değeri; yani, güverte üzerinde bulunan konteynerlerin ve yaşam mahallinin neden olduğu ek rüzgâr direncinin de içinde olduğu toplam direnç değeri hesaplanabilmektedir ve sonuçlar Tablo 7.11’de gösterilmektedir.

Tablo 7.11 KCS modeline ait üst yapı rüzgâr direncinin dâhil edildiği HAD analiz sonuçları

V_m [m/s]	F_n	R_n	R_{Tm} (HAD) [N]	C_{Tm} (HAD)	Ek direnç oranı [%]
0,9126	0,108	5,24E+06	16,097	0,004056	5,21
1,2844	0,152	7,38E+06	28,859	0,003671	3,48
1,6478	0,195	9,47E+06	45,372	0,003507	2,51
1,9182	0,227	1,10E+07	61,901	0,003531	1,90
2,1970	0,260	1,26E+07	85,065	0,003699	1,58
2,3829	0,282	1,37E+07	125,133	0,004625	1,28

Tablo 7.11’de, üst yapıya gelen havanın gemi direncini artırdığı, HAD analizleri ile kanıtlanmaktadır ve her bir Froude sayısındaki toplam direncin artış oranı, ilgili seyir hızındaki sakin su direncinin %1,28’i ile %5,21’i arasındaki artışı ile sonuçlanmaktadır. Okyanus aşırı sefer yapan bir geminin içinde bulunacağı açık deniz ortamı mevsim ve iklim koşullarına göre değişmektedir. Daha önce de bahsedildiği üzere, Kuzey Pasifik Okyanusu için yıllık deniz durumu ortalaması, eğer gemi ek direnci söz konusu ise, Deniz Durumu 5 olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada, araştırma gemisinin tam yüklü üst yapısının da dâhil edildiği ve dalgayı baştan aldığı durum için ek direnç analizleri Deniz Durumu 4, 5 ve 6 koşullarında gerçekleştirilmekte ve elde edilen sonuçlar Tablo 7.12’de gösterilmektedir.

Tablo 7.12 Model geminin farklı deniz durumlarındaki direnç tahmin sonuçları

F_n	Sakin su		Deniz Durumu 4		Deniz Durumu 5		Deniz Durumu 6	
	R_{Tm} [N]	C_{Tm}	R_{Tm} [N]	C_{Tm}	R_{Tm}[N]	C_{Tm}	R_{Tm} [N]	C_{Tm}
0,108	16,097	0,004056	16,912	0,004262	17,907	0,004513	24,323	0,006129
0,152	28,859	0,003671	29,834	0,003796	31,024	0,003947	40,740	0,005183
0,195	45,372	0,003507	46,481	0,003593	47,833	0,003697	59,203	0,004576
0,227	61,901	0,003531	63,042	0,003596	64,435	0,003675	75,840	0,004326
0,260	85,065	0,003699	86,370	0,003755	87,962	0,003825	101,719	0,004423
0,282	125,133	0,004625	126,695	0,004683	128,6	0,004753	141,544	0,005232

Çalışmada kullanılan ve KCS’nin su altı geometrisinden türetilen konteyner gemisinin toplam direnci, seyir hızı ve seyir bölgesindeki çevre koşullarından etkilenmektedir. Üst yapıdan ve farklı deniz koşullarından kaynaklı ek direnç değerleri, Tablo 7.13’ten de görüldüğü üzere, sakin su toplam direncinin oranı şeklinde ifade edilmektedir.

Tablo 7.13 Model geminin farklı hızlardaki ek direnç oranları

Fn	Üst yapı ek direnç oranı	Deniz Durumu 4 ek direnç oranı	Deniz Durumu 5 ek direnç oranı	Deniz Durumu 6 ek direnç oranı
	%	%	%	%
0,108	5,21	5,07	11,24	51,10
0,152	3,48	3,38	7,50	41,17
0,195	2,51	2,44	5,42	30,48
0,227	1,90	1,84	4,09	22,52
0,260	1,58	1,53	3,41	19,58
0,282	1,28	1,25	2,77	13,11

Gerçek boyutlu gemiler inşa edilmeden önce, model ölçeğinde yapılan deneysel ve sayısal çalışmaların sonuçları, gemilerin sevki için gerekli tahrik gücünü hesaplamada kullanılmaktadır. Yukarıda yapılan çalışmalarda, direnç değerleri model deneyleri ile birçok kez hesaplanmış ve HAD analizlerinde farklı araştırmacılar tarafından kullanılan KCS'nin, 31,599 ölçekli gemi modeline ait farklı çevre koşullarındaki toplam direnci tahmin edilmektedir. Tablo 7.14'te bulunan gerçek boyutlu ve üst yapının yer aldığı gemi için elde edilen toplam direnç katsayısı değerleri, Hughes-Prohaska yönteminin kullanıldığı ve form faktörünün 1,164'e eşit olduğu durum için geçerlidir.

Tablo 7.14 Tam boyutlu gemiye ait toplam direnç katsayısı değerleri

Fn	Vs [m/s]	Vs [knot]	Rn	Sakin su	Deniz Durumu 4	Deniz Durumu 5	Deniz Durumu 6
				C _{Ts}	C _{Ts}	C _{Ts}	C _{Ts}
0,108	5,13	9,97	9,31E+08	0,002561	0,002766	0,003017	0,004634
0,152	7,22	14,04	1,31E+09	0,002320	0,002444	0,002595	0,003831
0,195	9,26	18,01	1,68E+09	0,002251	0,002337	0,002442	0,003321
0,227	10,78	20,96	1,96E+09	0,002330	0,002395	0,002475	0,003125
0,260	12,35	24,01	2,24E+09	0,002545	0,002602	0,002671	0,003269
0,282	13,39	26,04	2,43E+09	0,003499	0,003556	0,003627	0,004105

Gerçek boyutlu geminin farklı seyir hızı ve çevre koşullarında sahip olduğu toplam gemi direnç kuvveti değeri ise Tablo 7.15'te yer almaktadır ve deniz suyunun yoğunluğu, $\rho_s = 1025 \text{ kg/m}^3$ olarak kullanılmaktadır.

Tablo 7.15 Tam boyutlu gemiye ait toplam direnç kuvveti değerleri

Fn	Vs [m/s]	Vs [knot]	Rn	Sakin su	Deniz Durumu 4	Deniz Durumu 5	Deniz Durumu 6
				R _{Ts} [kN]	R _{Ts} [kN]	R _{Ts} [kN]	R _{Ts} [kN]
0,108	5,13	9,97	9,31E+08	333,14	359,87	392,48	602,81
0,152	7,22	14,04	1,31E+09	597,80	629,77	668,77	987,28
0,195	9,26	18,01	1,68E+09	954,84	991,18	1.035,51	1.408,25
0,227	10,78	20,96	1,96E+09	1.339,16	1.376,58	1.422,24	1.796,12
0,260	12,35	24,01	2,24E+09	1.918,78	1.961,56	2.013,75	2.464,74
0,282	13,39	26,04	2,43E+09	3.103,06	3.154,25	3.216,71	3.641,05

7.3.4 Gerekli Sevk Gücünün Hesaplanması

Gemi sevk sistemlerinin tasarımı sırasında sadece belirli hızlardaki toplam gemi direncini hesaplamak yetersiz kalmaktadır. Bir sevk sisteminde, ana makine, dişli kutusu (şanzıman), şaft ve pervanenin mekanik verimliliği kurulu ana makine gücünü etkilemektedir. İtki sistemlerindeki en önemli enerji kaybı, akışkan madde içinde çalışan pervane üzerinde gerçekleşmektedir (Luo vd., 2016). Pervanedeki enerji kayıpları sebebiyle, şaft çıkışından pervaneye sağlanan güç, efektif güçten daha fazla olmaktadır. Pervane verimliliği olarak adlandırılan bu faktör, genellikle %55 ve %65 arasında kullanılmaktadır (Molland vd., 2017). Buna ek olarak, ~%2 şaft kayıpları, ~%5 dişli kutusu kayıpları, ~%15 deniz marjini ve ~%15 maksimum sürekli makine devri (MCR) azaltma oranı da kurulu ana makine gücünü belirlerken kullanılan önemli enerji kayıplarıdır (Zhao vd., 2015). Bu çalışmada, yukarıda belirtilen hususlar doğrultusunda pervane verimliliği %60 olarak kullanılmakta ve ek enerji kayıpları da göz önünde bulundurulduğunda, toplam sevk verimliliği %40 kabul edilmektedir. Tablo 7.16'da ise tam boyutlu gemiye ait ana makine güçleri yer almaktadır.

Tablo 7.16 Tam boyutlu gemiye ait gerekli ana makine güç değerleri

Fn	Vs [m/s]	Vs [knot]	Sakin su	Deniz Durumu 4	Deniz Durumu 5	Deniz Durumu 6
			Güç [kW]	Güç [kW]	Güç [kW]	Güç [kW]
0,108	5,13	9,97	4.273	4.615	5.034	7.731
0,152	7,22	14,04	10.790	11.367	12.071	17.821
0,195	9,26	18,01	22.111	22.952	23.979	32.610
0,227	10,78	20,96	36.099	37.108	38.339	48.417
0,260	12,35	24,01	59.243	60.564	62.175	76.100
0,282	13,39	26,04	103.915	105.629	107.721	121.931

Mevcut bir gemi formu için, gerekli ana makine güç değerlerindeki değişim, çoğunlukla gemi hızından ve çevre koşullarından etkilenmektedir. Bunun yanında, ana makinenin çalışması sırasında kullanılacak yardımcı makine ve donanımların kapasitesi de kurulu ana makine gücünden etkilenmektedir. Gerek işletme ve bakım, gerekse de ilk yatırım maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda, geminin seyir hızı ortalaması gidiş ve dönüş seyirleri için 15 knot olarak belirlenmektedir.

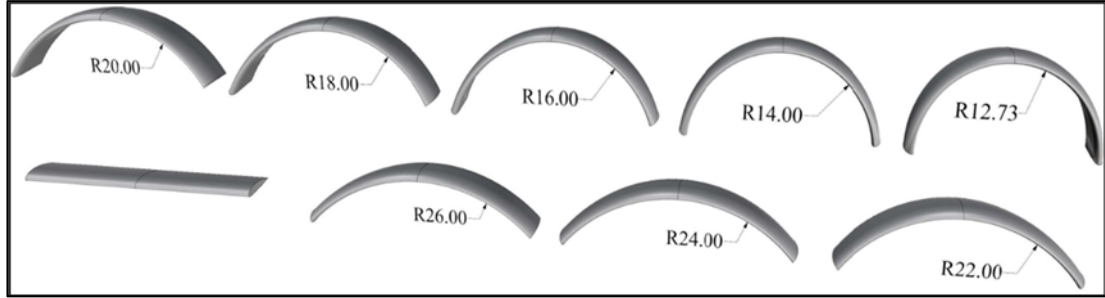
7.4 Paraşüt Sistemi Tasarımı

Paraşüt yardımcı gemi sevk sistemi tasarlarırken, gemi özellikleri ve çevre koşullarının enerji verimliliği üzerindeki etkisi bilinmelidir. Bunun yanında, paraşüt sisteme ait gerek tasarım gerekse de işletme parametreleri de gemi enerji verimliliği üzerinde yüksek derecede öneme sahiptir. Paraşütün ve uçuğu yörüngesinin geometrik özellikleri, çekme halatının uzunluğu, paraşütün gemiye göre konumu ve uçuş yörüngesi üzerinde sahip olduğu hız, uçuş irtifası ve koşulu (statik uçuş veya dinamik uçuş) gibi değişkenler, kurulu sistem üzerinden elde edilecek faydalı çekme kuvvetinin şiddetini belirlemektedir.

7.4.1 Tasarlanan Paraşüt Modelleri

Çekme uçurtmaları üzerinde meydana gelen aerodinamik kuvvet oluşumu, uçak kanadındakine benzerdir. Fakat aradaki en büyük fark, uçak kanadının rijit yapısından dolayı düz yapıda imal edilebilmesinden kaynaklanmaktadır. Paraşüt yapıların kumaştan üretilmesi ve halatlar kullanılarak kontrol edilmesi sebebiyle düz kanat formunda tasarımı gerçekleştirememektedir. Bu sebeple, üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetlerin de etkisiyle, bu esnek yapı kolaylıkla eğrisel forma dönüşebilmektedir. Eğrisel yapıdaki paraşüt geometrisi sayesinde paraşütün havadaki uçuşu kontrol edilerek, önceden belirlenen uçuş yörüngesi üzerindeki hareketi de sağlanmaktadır. Havadaki uçuşu kontrol edilebilen (dinamik uçuş koşulu) bir paraşüte sahip sistemin verimliliği, statik uçuş karakteristiğine sahip bir sisteme göre çok daha fazladır (Cadalen, Griffon vd., 2018). Buna neden olan faktör ise, statik uçuş koşulunda paraşütün kendine ait hızının olması sebebiyle esen rüzgârla arasındaki bağıl hız vektörünün bulunmamasıdır. Bu çalışmada kullanılmak üzere, farklı eğrisellikte sekiz adet paraşüt formu ve karşılaştırma yapabilmek için bir adet düz kanat formu olmak

üzere; toplamda dokuz adet paraşüt modeli, aynı yüzey alanına (320 m^2) sahip olacak şekilde modellenmektedir ve Şekil 7.28’de gösterilmektedir.



Şekil 7.28 Modellenen paraşüt geometrileri (Göksu ve Erginer, 2022)

Her bir paraşüt modeli, 320 metrekaire yüzey alanına ve ilgili literatürde sıklıkla kullanılan NACA4415 kesite sahiptir ve aralarındaki tek fark eğrilik yarıçapıdır. Eğrilik yarıçapının $12,73$ metre olduğu model, yarım daire formunda olup, diğer modellerde eğrilik yarıçapının kademeli artışı söz konusudur. Böylelikle, paraşüt eğriliğinin aerodinamik kuvvetler üzerindeki etkisi incelenmekte ve uygun forma karar verilmektedir. Eğrilik yarıçapındaki değişiklik, paraşüt modelinin en/boy oranını etkilemekte, kanat formu için literatürde tavsiye edildiği gibi 5 olarak kabul edilen bu oran, yarım daire formundaki paraşüt için $3,18$ olmaktadır. Böylelikle, 320 m^2 alanlı düz kanat formu için kord uzunluğu 8 metre ve kanat açıklığı ise 40 metre olmaktadır.

7.4.2 Sayısal Doğrulama Çalışmaları

Bu çalışmada, KCS için NACA4415 kesitli paraşüte sahip yardımcı paraşüt sevk sistemi tasarımı yapılmaktadır. Paraşüt sevk sistemine ait değişkenlerin etki düzeylerini belirleyebilmek için farklı paraşüt geometrileri modellenmektedir. Günümüz mühendislik tasarımlarının büyük bir bölümünde olduğu gibi, bu çalışma için de, tasarlanan paraşüt sevk sisteminin ön değerlendirme çalışmaları bilgisayar ortamında nümerik yöntemler kullanılarak yapılmaktadır. Bunu yapabilmek için ise, çalışmanın doğrulanabilir bir zemin üzerine kurulması gerekmektedir. Bu sebeple, paraşüt kesit formunun NACA4415 olması dolayısıyla, kesit üzerinde meydana gelen aerodinamik kuvvet katsayıları HAD yöntemi ile hesap edilmekte ve elde edilen sonuçlar rüzgâr tüneli deneyleriyle karşılaştırılmaktadır.

Paraşüte gelen rüzgârın, üniform akış rejiminde, sabit hızda ve yoğunlukta (kararlı hal ve sabit yoğunluklu hava akımı koşulları) olduğu kabul edilmekte ve 10^{-3} yakınsama kriteri kullanılarak 2-boyutlu ve 3-boyutlu doğrulama çalışmaları yürütülmektedir. Sayısal çözümleme için oluşturulan ağ yapısının özellikleri belirlenirken, deneysel ve sayısal analizlerin sonuçları arasındaki hata payı göz önünde bulundurulmakta ve sayısal yöntemle ait sonuçların belirli bir hata payı ile elde edilmesi, mevcut bilgisayar sisteminin kapasitesine bağlı olarak değişmektedir.

Tablo 7.17 Doğrulama çalışmalarında kullanılan ağ parametreleri (Göksu ve Erginer, 2022)

Özellikler	Hassas ağ yapısı	Orta ağ yapısı	Kaba ağ yapısı
Ağ yüzeyi temel boyutu	Kord uzunluğunun %5'i	Kord uzunluğunun %5'i	Kord uzunluğunun %5'i
Hedef ağ yüzeyi boyutu (akışkan alanı)	Temel boyutun %100'ü	Temel boyutun %100'ü	Temel boyutun %100'ü
Hedef ağ yüzeyi boyutu (paraşüt yüzeyi)	Temel boyutun %10'u	Temel boyutun %25'i	Temel boyutun %50'si
Minimum ağ yüzeyi boyutu (bütün yüzeyler)	Temel boyutun %10'u	Temel boyutun %10'u	Temel boyutun %25'i
Maksimum ağ yüzeyi boyutu (dış yüzeyler)	Temel boyutun %100'ü	Temel boyutun %200'ü	Temel boyutun %400'ü
Yüzey büyüme oranı	1,3	1,3	1,3
Paraşüt üzerinde sınır tabaka katmanı sayısı	25	25	25
Paraşüt üzerinde sınır tabaka büyüme oranı	1,3	1,3	1,3
Paraşüt üzerinde sınır tabaka kalınlığı	Temel boyutun %50'si	Temel boyutun %50'si	Temel boyutun %50'si
İz bölgesi izotropik boyutu	Temel boyutun %25'i	Temel boyutun %25'i	Temel boyutun %50'si
Ağ modeli	Trimmed cell mesher (budanmış hücre yapısı)	Trimmed cell mesher (budanmış hücre yapısı)	Trimmed cell mesher (budanmış hücre yapısı)
Toplam eleman sayısı	3,049605E+06	1,311573E+06	2,642330E+05
Her bir iterasyon için geçen ortalama süre	22,82 saniye	6,14 saniye	1,425 saniye
10 derecelik atak açısında kaldırma kuvveti katsayısındaki hata oranı	%0,3	%1,3	%1,88

Bu bölümdeki doğrulama çalışmaları; NACA4415 aerofoil kesiti için, Tablo 7.17'de özellikleri verilen kaba, orta ve hassas ağ yapılarında, 1 milyon Reynolds sayısı ve Spalart-Allmaras türbülans modeli kullanılarak yürütülmektedir. Bu çalışmalarından beklenen, optimal ağ yapısının elde edilmesi sayesinde sayısal analiz sonuçlarının deney verilerine yaklaşmasıdır. Orta derece hassasiyete sahip ağ yapısında, deney sonucuna göre %1,3 sapma yaşanmaktayken, hassas ağ yapısında %0,3 sapma gerçekleşmektedir. Fakat bu iki farklı ağ yapısında, problemin çözümü için gerekli süre birbirinin yaklaşık 4 katı olmaktadır. Hassas ağ yapısı kullanmak

yerine, ilave %1 hata payı kabul edilerek çözüm süresinin dörtte bire indirilmesi tercih edilmektedir. Bunun yanında, hassas ve kaba ağ yapıları arasında analiz için gerekli süre yaklaşık olarak birbirinin 16 katına ulaşmaktadır. Kullanılan üç farklı ağ yapısında, hassas olandan kaba olana gidildikçe, her bir ağ yapısı diğerine göre yaklaşık 4 kat daha hızlı sonuç vermektedir. Bunun aksine, hata oranlarındaki artış ise belirtildiği kadar hızlı olmamaktadır. Bu sebeplerle, orta boyutlu ağ yapısı modeli tercih edilmekte, kaba ağ yapısı %2'ye yaklaşan hata payı sebebiyle tercih edilmemektedir. Ayrıca, mevcut bilgisayar altyapısı göz önüne alındığında, orta boyutlu ağ, bu araştırmadaki ilgili analizleri gerçekleştirme olanağını sunmaktadır. Doğruluğu artırmak için deney sonuçlarına en yakın HAD analiz sonuçları gerektiğinde, gelişmiş bilgi işlem yetenekleri bulunan bilgisayar altyapısı olması dâhilinde daha hassas ağ yapıları da önerilmektedir.

Paraşütün geometrik özelliğine bağlı olarak, kesit profili üzerinde akan havanın meydana getirdiği aerodinamik kuvvetlerin büyüklüğünü tahmin etmek yüksek önem arz etmektedir. HAD çalışmalarını deneysel çalışmalardan üstün kılan yönü, daha az maliyet ve zaman gerektirmeleridir. Rüzgâr tüneli çalışmaları, aerofoil formlara ait HAD analizlerini doğrulayabilmede kıyaslama kriteri konumunda bulunmaktadır. İlk aşamada, kord uzunluğu 1 metre olan NACA4415 profili için 2-boyutlu HAD analiz sonuçları; K-Epsilon, K-Omega (SST-Menter) ve Spalart-Allmaras türbülans modelleri kullanılarak, 1 milyon Reynolds sayısında NASA (National Aeronautics and Space Administration - Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi) tarafından yapılan deney sonuçlarıyla karşılaştırılmaktadır. Tablo 7.18'de 2-boyutlu akışkan alanındaki HAD analizlerinden elde edilen kaldırma kuvveti katsayıları, deney sonuçlarıyla kıyaslanmaktadır.

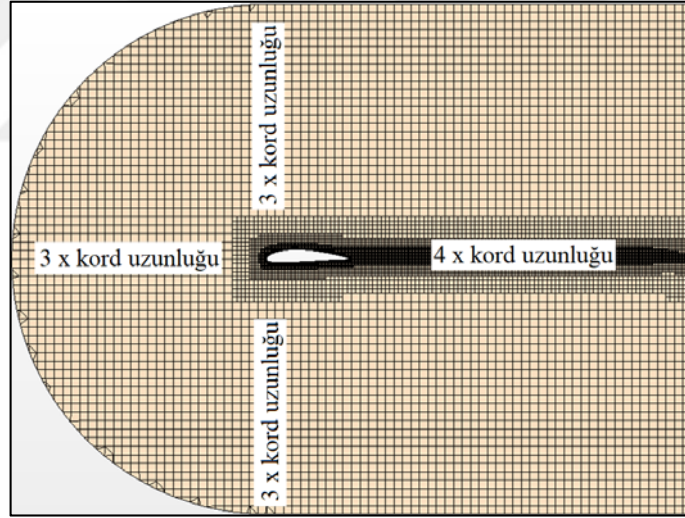
Tablo 7.18 2-boyutlu doğrulama çalışmalarına ait kaldırma kuvveti katsayıları (Göksu ve Erginer, 2022)

Atak açısı	Türbülans modeli			Rüzgâr tüneli deneyi
	K-Epsilon	K-Omega (SST-Menter)	Spalart-Allmaras	
0	0,3958	0,3502	0,3885	0,4126
5	0,9137	0,8308	0,8952	1,0270
10	1,3856	1,2200	1,3423	1,3374
15	1,6741	1,4675	1,5463	1,5372

İkinci aşamada, 1 metrekaare yüzey alanına sahip NACA4415 kesitli düz kanat formu için 3-boyutlu HAD analizlerinden elde edilen kaldırma kuvveti katsayıları, 1 milyon Reynolds sayısındaki rüzgâr tüneli deney sonuçlarıyla karşılaştırılmaktadır. Tablo 7.19'daki değerler, sonsuz kanat yaklaşımının uygulandığı ve 2-boyutlu analiz geometrisine, 1 metrelik kanat açıklığı kazandırılarak elde edilen 3-boyutlu akışkan alanından türetilmiş sonuçları göstermektedir.

Tablo 7.19 3-boyutlu doğrulama çalışmalarına ait kaldırma kuvveti katsayıları (Göksu ve Erginer, 2022)

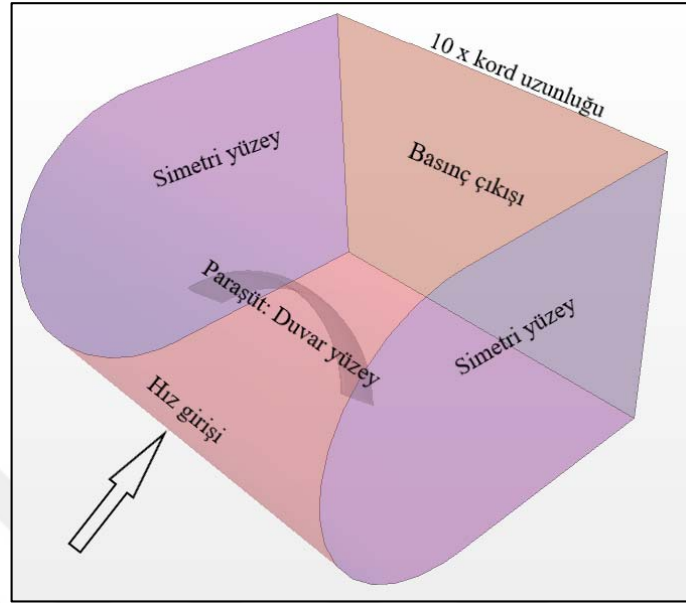
Atak açısı	Türbülans modeli			Rüzgâr tüneli deneyi
	K-Epsilon	K-Omega (SST Menter)	Spalart-Allmaras	
0	0,4200	0,3872	0,4183	0,4126
5	0,9598	0,9181	0,9567	1,0270
10	1,4176	1,2927	1,3548	1,3374
15	1,6466	1,3660	1,4997	1,5372



Şekil 7.29 HAD analizleri ağ yapısı genel boyutları (Göksu ve Erginer, 2022)

Şekil 7.29'da, doğrulama çalışmalarında kullanılmak üzere modellenen orta boyutlu ağ elemanlarının bulunduğu yapı ve ağın genel boyutları gösterilmektedir. Yapılan 2-boyutlu ve 3-boyutlu HAD çalışmalarında üç farklı türbülans modeli kullanılmaktadır. Rüzgar tüneli deney sonuçları ile karşılaştırma yapıldığında, Spalart-Allmaras türbülans modelinin ürettiği sonuçların deneysel veriye daha yakın olduğu görülmektedir. Böylelikle, paraşüt üzerinde meydana gelen aerodinamik kuvvetlerin

tahmin edilmesinde kullanılacak sayısal modellemeye ait parametrelere karar verilmektedir.

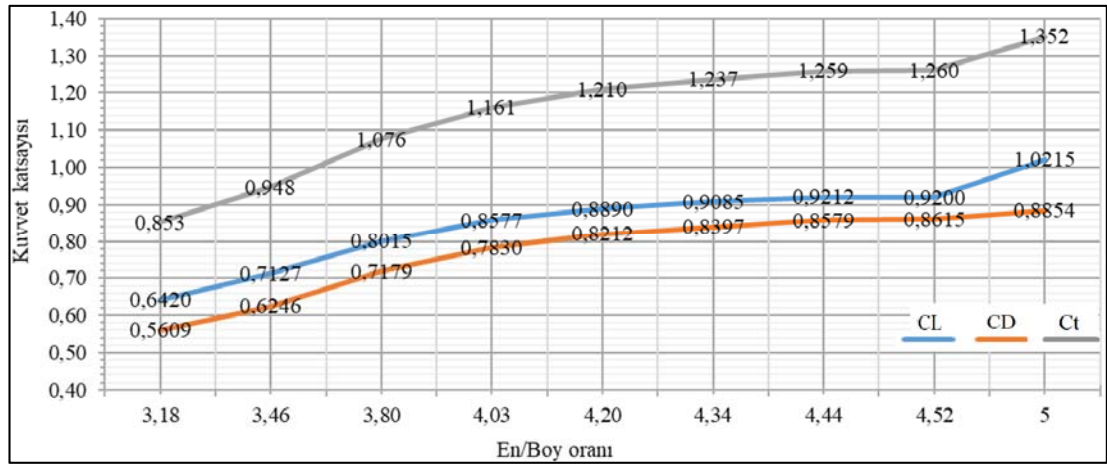


Şekil 7.30 HAD analizleri için genel sınır koşulları (Göksu ve Erginer, 2022)

Ayrıca, çalışmanın devamında kullanılan ve sisteme ait parametrelerin belirlenmesi için yürütülecek HAD analizlerine ait genel sınır koşulları Şekil 7.30'da gösterilmektedir.

7.4.3 Paraşüt Modelleri ve Yörünge Geometrilerinin Karşılaştırılması

Paraşütler, uçak kanatları gibi aerodinamik kuvvet etkilerinin kolayca tahmin edilebildiği basit araçlar değildir. İkisi arasındaki en temel fark, uçağın üzerinde yerleşik itme gücüne sahip bir sistemin bulunuyor oluşudur. Paraşütler ise rüzgârdan üretilen kuvvetleri kullanmaktadır. Ayrıca, uçaklar kendi ağırlık merkezi etrafında dengelenirken; paraşütler, çekme noktaları ve kendi ağırlık merkezi etrafında dengelenmektedir. Bunun yanında, paraşüt tasarımını karmaşıklaştıran unsur, formun rijit olmamasıdır. Bu sebeple, paraşüt geometrisi seçilirken, form etrafında meydana gelen hava olaylarının iyi tahmin edilmesi gerekmektedir. Şekil 7.31'de, çalışma için modellenen ve 320 metrekare alana sahip 9 adet paraşüt formu üzerinde, atak açısının 45 derece ve bağıl rüzgâr hızının 5 m/s olduğu durumda oluşan, kaldırma kuvveti katsayıları yer almaktadır.



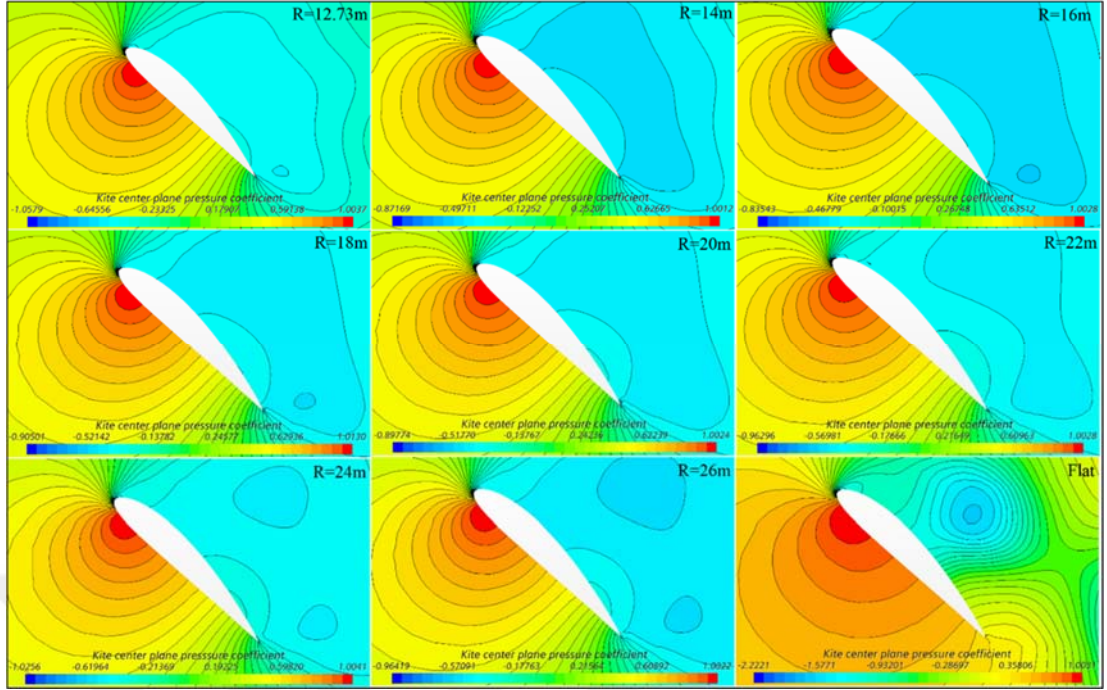
Şekil 7.31 Modellenen paraşüt formlarına ait kuvvet katsayıları (Göksu ve Erginer, 2022)

Daha öncede belirtildiği gibi en/boy oranı 5 olan form, düz kanat geometrisi olup, en/boy oranının 3,18 olduğu durum ise yarım daire formundaki paraşüt geometrisini temsil etmektedir. Tablo 7.20’de ise, 45 derecelik atak açısı ve 5 m/s’lik bağıl rüzgâr hızı durumundaki kaldırma ve sürüklenme katsayıları yer almaktadır.

Tablo 7.20 Paraşüt modellerine ait kaldırma ve sürüklenme kuvveti katsayıları

Eğrilik yarıçapı (m)	En/Boy oranı	C _L	C _D	C _L / C _D
12,73	3,18	0,6420	0,5609	1,145
14	3,46	0,7127	0,6246	1,141
16	3,80	0,8015	0,7179	1,116
18	4,03	0,8577	0,7830	1,095
20	4,20	0,8890	0,8212	1,083
22	4,34	0,9085	0,8397	1,082
24	4,44	0,9212	0,8579	1,074
26	4,52	0,9200	0,8615	1,068
Düz kanat	5	1,0215	0,8854	1,154

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarıyla, bir yüzeye etki eden kuvvetleri ve kuvvet katsayılarını hesaplamanın yanı sıra, kuvvetlerin yüzey üzerindeki dağılımları da belirlenebilmektedir. Bu konuda, boyutsuz bir sayı olan *basınç katsayısı* kullanılarak, paraşüt geometrisi yakınlarındaki akışkan hareketleri görselleştirilebilmektedir ve Şekil 7.32’de, modellenen paraşüt geometrilerinin merkez hattı yakınındaki basınç dağılımları gösterilmektedir. Böylelikle, kritik akışkan bölgeleri belirlenebilmektedir.

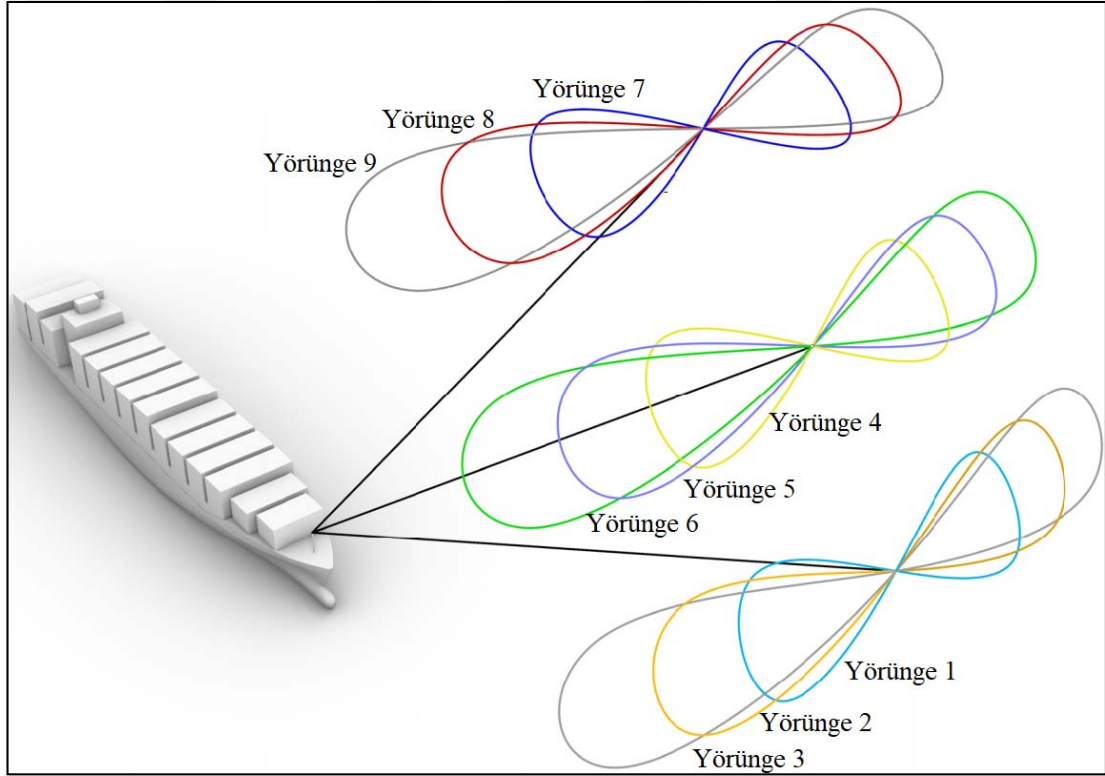


Şekil 7.32 Paraşüt modellerine ait merkez hattı basınç katsayısı dağılımları (Göksu ve Erginer, 2022)

Paraşüt geometrisinin aerodinamik kuvvetlere ve paraşüt etrafında meydana gelen akışkan hareketlerine olan etkisini belirledikten sonra; paraşüt üzerinde oluşan kuvvetlerin, gemi enerji verimliliği konusunda etkin kullanımı için 8-şekli yörüngenin özelliklerini belirlemek gerekmektedir. Çekme halatının, 8-şekli yörüngenin merkez noktasından geçtiği düşünüldüğünde; çekme halatı ve deniz yüzeyi arasındaki *kalkıntı açısı*, halat ve gemi ilerleme yönü arasındaki *azimut açısı* ve son olarak da, yörüngenin yatay konumdaki uç noktaları arasındaki *hareket aralığı*, paraşüt sisteminin verimliliğini etkileyen unsurlar olarak ele alınmaktadır. Bu değişkenlerden, azimut açısının en etkili konumunun gemi ilerleme yönünde olduğu düşünülmektedir. Aksi halde, çekme halatı üzerinde meydana gelen gerilme kuvvetinin bir bölümü yanal çekme kuvvetine dönüşmekte; bu da, geminin ilerleme hareketine katkı sağlamadığı gibi, geminin rotasından sapmasına da neden olabilmektedir. Kalkıntı açısının 30, 40 ve 50 derece olduğu durumlar ve yörünge hareket aralığının 20, 30 ve 40 derece olduğu durumları ifade eden 9 farklı uçuş yörüngesi birbiriyle karşılaştırılmakta ve uygun yörünge modeline karar verilmektedir. Bu karşılaştırmalarda kullanılan parametre değerleri ve yörüngelerin özellikleri Tablo 7.21’de gösterilmekte olup, Şekil 7.33’te ise tasarlanan yörüngeler tanıtılmaktadır.

Tablo 7.21 Yörünge seçiminde kullanılan parametre değerleri

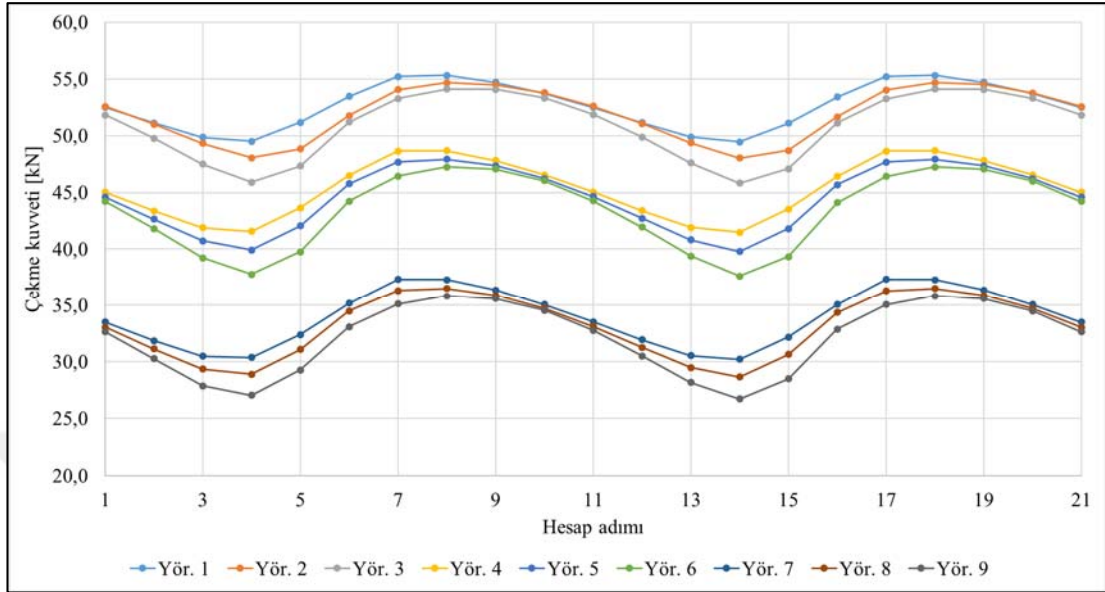
Yörüngeler	Yör. 1	Yör. 2	Yör. 3	Yör. 4	Yör. 5	Yör. 6	Yör. 7	Yör. 8	Yör. 9
Hareket aralığı (derece)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Kalkıntı açısı (θ)	30	30	30	40	40	40	50	50	50
Gemi hızı	15 (7,716)					knot (m/s)			
Rüzgâr açısı (γ)	180 (kuzeyli)					derece			
Gemi ilerleme yönü (ψ)	0 (kuzey)					derece			
Halat uzunluğu	300					m			
Rüzgâr hızı (10 metrede)	8					m/s			
Paraşüt hızı	27					m/s			
Havanın yoğunluğu	1,18415					kg/m ³			
Paraşüt alanı	320					m ²			
Eğrilik yarıçapı	20					m			



Şekil 7.33 Tasarlanan 8-şekli yörünge modelleri

Dokuz farklı yörünge'nin her birinin sahip olduğu değerler ve hesaplama parametreleri yukarıda belirtilmektedir. Bu değerler kullanılarak yapılan analizlerin sonuçları da Şekil 7.34'te yer almaktadır. Görüldüğü üzere, Yörünge 1, 2 ve 3'ün kullanımı sonucunda elde edilen çekme değerleri diğer yörüngelere göre daha fazladır.

Bunun sebebi ise, kalkıntı açısının artması sonucunda halat üzerinde meydana gelen gerilme kuvvetinin gemi ilerleme yönündeki bileşeninin azalmasıdır.



Şekil 7.34 Dokuz farklı 8-şekli yörüngeye ait analiz sonuçları

Paraşüt üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetlerden maksimum düzeyde yararlanabilmek için kalkıntı açısının sıfır derece olması gerekmektedir. Fakat paraşüt sevk sisteminden sürdürülebilir bir şekilde fayda sağlayabilmek ve emniyetli operasyonel süreçleri tamamlayabilmek için işletme parametrelerinin gerekli tedbirler kapsamında seçimi hayati önem arz etmektedir.

7.4.4 Sisteme Ait Parametrelerin Belirlenmesi

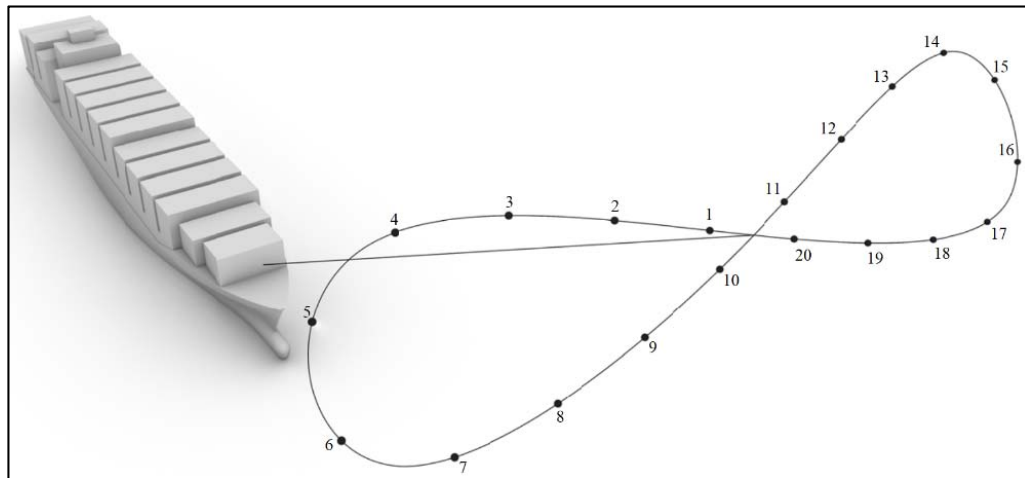
Havada meydana gelen rüzgârın sahip olduğu enerjiyi gemilerde çekme kuvveti olarak kullanmanın temelinde, rüzgârdan elektrik enerjisi üreten sistemler yer almaktadır. Paraşüt üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetleri herhangi bir dönüşüme tabi tutmadan doğrudan çekme halatı üzerine aktarırken, enerji dönüşüm sürecinin bulunmaması, gemi sevk sistemleri için faydalı bir unsurdur.

Diğer mühendislik sistemlerinde olduğu gibi, burada da, paraşüt sisteminin özelliklerinin gemi ve geminin çalışma şartlarına göre belirlenmesi gerekmektedir. Daha önceden de bahsedildiği üzere, paraşüt formuna ait eğrilik yarıçapı bu değerlerden bir tanesidir. Eğrilik yarıçapına karar verirken, aerodinamik kuvvet

katsayıları ve paraşüt gövdesi yakınında meydana gelen hava olaylarının önceden biliniyor oluşu büyük fayda sağlamaktadır. Bu sebeple, bu çalışma için dokuz farklı paraşüt geometrisi tasarlanarak bu değerlerin değişimi incelenmektedir. Tablo 7.20'den de görüldüğü üzere, düz kanat formundan yarım daire paraşüt formuna dönüşüm sırasında kaldırma ve sürüklenme kuvvet katsayıları azalmaktadır. Bu değişim, aynı alana sahip paraşütlerden farklı kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri elde edilebileceğini göstermektedir. Düz kanat formunun, bu çalışma için kullanılamayacağı, sadece karşılaştırma yapabilmek için tasarlandığı bilinmektedir. Eğrisel bir formun kullanımı sırasında ise, eğrilik yarıçapının artmasıyla birlikte kuvvet katsayılarının artması, yani yarım daire formundan mümkün olduğunca uzak durulması gerektiği sonucuna varılmaktadır. İdeal paraşüt eğrilik yarıçapına karar verirken, paraşütün merkez hattındaki hava hareketlerine de bakılmaktadır. Eğrilik yarıçapının 12,73 m, 16 m, 18 m, 24 m ve 26 m olduğu yapılarda, formun üst bölgesinde türbülans oluşumları Şekil 7.32'de görülmektedir. Böyle bir hava hareketi, esnek yapıda olan paraşüt geometrisinin, istenildiği gibi stabil kalamamasına, bu sebeple de kontrol süreci için bir takım zorluklara neden olacağı düşüncesini beraberinde getirmektedir. Eğrilik yarıçapının 14 m, 20 m ve 22 m olduğu durumlardaki aerodinamik hareketler birbirine benzerlik göstermektedir. Fakat 14 m yarıçaplı formun aerodinamik kuvvet katsayıları, 20 m ve 22 m yarıçapa sahip formlara göre oldukça düşük olduğu için tercih edilmemektedir. 20 ve 22 metre yarıçapı olan formların ise kuvvet katsayıları birbirine çok yakındır. Yarıçapın 22 m olduğu durumda da geniş bir hava akım bölgesinin paraşüt üzerinden ayrılması ve test sırasında kullanılan bağıl rüzgâr hızının gerçek koşullar altında daha da artacağı göz önünde bulundurulduğunda, türbülans olayına zemin hazırlayacağı gerekçesiyle tercihi söz konusu değildir. Belirtilen bu nedenlerden ötürü, bu çalışmada ileriki hesaplamalar için bahsedilecek paraşüt formuna ait yarıçap ölçüsü 20 metre olarak belirlenmektedir.

Verimlilik ve sürdürülebilirlik ilkeleri göz önünde bulundurularak karar verilen paraşüt eğrilik yarıçapından sonra, paraşütün uçuş yörüngesinin de benzer ilkeler doğrultusunda değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, 3 farklı kalkıntı açısı ve 3 farklı hareket sığası için yapılan değerlendirmeler sonunda; kalkıntı açısının 30 derece olduğu durumlarda daha yüksek halat gerilme kuvvetinin oluştuğu Şekil 7.34'te

gösterilmektedir. Kalkıntı açısının 40 ve 50 derece olarak uygulandığı durumlar, aerodinamik kuvvetlerin verimli kullanılamaması dolayısıyla tavsiye edilmemektedir. Kalkıntı açısının 30 dereceden daha küçük olmaması gerektiği ise, gerek çalışmanın devamında yapılan HAD analizleri, gerekse de 8-şekilli yörünge üzerindeki dinamik paraşüt hareketleri sebebiyle tavsiye edilmemektedir. 30 dereceden daha az olan kalkıntı açılarında, HAD analizlerinde yakınsama problemiyle karşılaşmakta, bunun sebebi ise türbülanslı hava ortamına bağlanmaktadır. Sayısal modellemedeki akışkan hareketleri, gerçek koşulların birer simülasyonu olması sebebiyle, kapsamlı öngörü sunabilmektedir ve türbülanslı ortamda paraşüt üzerindeki aerodinamik kuvvetlerin stabil olmadığını göstermektedir. Daha önceki kıyaslama ilkeleri çerçevesinden bakıldığında, “Yörünge 2” adıyla belirtilen ve paraşütün havadaki uçuş hareketini ifade eden 8-şekilli yörünge modeli kullanılmakta ve sıfır derecelik azimut açısı ile birlikte uygulanmasına karar verilmektedir. 2 numaralı yörünge seçiminde 30 derecelik hareket alanı etkili olup, hareket alanının küçüldüğü durumlarda halata aktarılan çekme kuvvetindeki artış, analiz sonuçlarından gözlemlenmektedir. Fakat hareket sığasının gereğinden fazla küçültülmesi, paraşütün uçuşunu kontrol eden bağlantı halatları ve kontrolcü mekanizmaya ilave yük getireceği düşüncesiyle tercih edilmemektedir (Cadalen, Griffon vd., 2018). Seçilen yörünge modelinin üzerinde hareket eden paraşüte etkiyen aerodinamik kuvvetlerin hesabı; zaman adımıyla yapılmakta ve yörünge üzerinde tam bir tur uçuşa ait ortalama değerler kullanılarak tamamlanmaktadır. Yörünge hattının eşit uzunluklu bölümlere ayrılmasıyla elde edilen hesaplama konumları (zaman adımları) Şekil 7.35’te gösterilmektedir.



Şekil 7.35 Yörünge 2 için hesap adımı konumları

Yörünge 2 modeli üzerindeki hesaplama adımlarına ait konumların kalkıntı ve azimut açıları ise Tablo 7.22’de yer almaktadır.

Tablo 7.22 Yörünge 2’nin bölümlerinin sahip olduğu açısal konumlar

Konum	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Azimut (derece)	1,55	4,69	7,93	11,29	13,89	13,69	10,86	7,69	4,61	1,54
Kalkıntı (derece)	30,53	31,59	32,53	32,98	31,63	28,84	27,52	27,82	28,56	29,49
Konum	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Azimut (derece)	-1,55	-4,69	-7,93	-11,29	-13,89	-13,69	-10,86	-7,69	-4,61	-1,54
Kalkıntı (derece)	30,53	31,59	32,53	32,98	31,63	28,84	27,52	27,82	28,56	29,49

Paraşüt sevk sistemi için karar verilmesi gereken diğer değişkenler; paraşütün en kesit formu, paraşüt alanı ve çekme halatı uzunluğudur. Paraşüt sistemlerini gemilerde yardımcı sevk sistemi olarak kullanmayı hedefleyen ve bu konuda endüstriyel ve akademik çalışmaları bulunan araştırmacılar, paraşüt en kesit formunu NACA4415 olarak uygulamakta ve tavsiye etmektedir (Dadd vd., 2010; Naaijen vd., 2006; Scupi vd., 2015). Paraşütün üzerinde oluşan kuvvetleri gemiye aktaran çekme halatı boyu ise, paraşüt sevk sistemi tasarımlarının yapıldığı ilk uygulamalarda (Naaijen vd., 2006) 150 metre gibi düşük uzunluklarda kullanılsa da; günümüze yakın tarihte yapılan araştırma ve uygulamalarda (SkySails, 2021), 300 metre ve üstü halat uzunluklarının kullanıldığı görülmektedir. Bu da, bu çalışma için 300 metrelik halat boyunun uygun olacağını göstermektedir.

Tablo 7.23 Yardımcı paraşüt sevk sistemi özellikleri

Kesit profili	NACA4415
Paraşüt alanı (m²)	320
Halat uzunluğu (m)	300
Eğrilik yarıçapı (m)	20
Kord uzunluğu (m)	8
En/boy oranı	4,20
Yörünge karakteristiği	Yatay 8-şekilli
Yörünge ortalama kalkıntı açısı (derece)	30
Yörünge ortalama azimut açısı (derece)	0
Yörünge hareket alanı/sığı (derece)	30
Uçuş karakteristiği	Dinamik uçuş
Paraşüt uçuş hızı (m/s)	27

Bu çalışmanın, diğer benzer çalışmalarla (Leloup vd., 2016; Nelissen vd., 2016) kıyaslamasının yapılabilmesi için 320 metrekare paraşüt alanına sahip yardımcı sevk sisteminin gemi ana makine enerji verimliliğine olan katkısı incelenmektedir ve bu sisteme ait özellikler Tablo 7.23'te özetlenmektedir. Çekme halatı uzunluğu hususunda geçmişten günümüze gelen süreçte yaşanan artış, paraşüt alanı için de geçerli olup; günümüzde 400 metrekare alana sahip paraşütlerin ticari gemilerde kullanımı benimsenmektedir (SkySails, 2021).

Özellikleri belirlenen paraşüt sevk sisteminin gemi enerji verimliliğine katkısını hesaplayabilmek için, paraşüt üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetlerin bilinmesi gerekmektedir. Bunu gerçekleştirebilmek için ise, aerodinamik kuvvet katsayılarının farklı atak açılarındaki değerleri bilinmelidir. Bu çalışmada kullanılmak üzere, 20 metre eğrilik yarıçapına sahip NACA4415 kesitli paraşüt üzerine gelen rüzgârın 1 milyon Reynolds sayısına sahip olduğu durumdaki kuvvet katsayıları, atak açısının 0 ve 90 derece arasındaki 5'er derece aralıklı konumları için hesaplanmaktadır. HAD analizleri sonucundan elde edilen kaldırma ve sürüklenme kuvveti katsayıları ise Tablo 7.24'te gösterilmektedir.

Tablo 7.24 Seçilen paraşüt modeli için hesaplanan kuvvet katsayıları

Atak açısı (derece)	C_L	C_D	Atak açısı (derece)	C_L	C_D
0	0,24035	0,01730	5	0,52600	0,03334
10	0,79660	0,06153	15	1,03160	0,10000
20	1,04900	0,17487	25	1,03150	0,27121
30	0,97400	0,39570	35	0,94240	0,54160
40	0,91980	0,68440	45	0,87760	0,81220
50	0,85630	0,94460	55	0,80640	1,06440
60	0,74600	1,18220	65	0,67870	1,30800
70	0,58920	1,41560	75	0,48320	1,50870
80	0,37460	1,61050	85	0,24630	1,64960
90	0,10000	1,68950			

Yukarıdaki bölümlerde de bahsedildiği gibi, paraşütün belirlenen 8-şekilli yörünge üzerindeki uçuşunu, geminin hızı ve yönü, rüzgârın hızı ve yönü, yörünge ve paraşüt sisteminin özellikleri etkilemektedir. Bunun sonucunda, paraşüt geometrisinin 3-boyutlu uzayda farklı konumlarda uçuşu gerçekleşmektedir. Bu da, paraşüt üzerinde meydana gelen aerodinamik kuvvetlerin yön ve şiddetini etkilemektedir. Böylelikle, farklı kaldırma ve sürüklenme kuvvet katsayıları elde edilmektedir. Rüzgâr tüneli

testlerinin uzun zaman alması ve yüksek maliyetli oluşu, araştırmacıları HAD yöntemini kullanmaya yönlendirmektedir. Fakat paraşüte ait akışkanlar dinamiği analizlerinin geminin seyri boyunca paraşütün sahip olacağı her konum için yürütülmesi nispeten yüksek maliyet gerektirmese de, bilgisayar altyapısının hesaplama gücü doğrultusunda değişen, hesaplamaların yapılabilmesi için zamana ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da, paraşüt kontrol mekanizması için gerekli olan anlık verinin elde edilememesi anlamına gelmektedir.

Paraşütün havadaki uçuşunun durdurulamayacak oluşu, hareket esnasındaki hesaplamaların mümkün olan en kısa sürede yapılmasını gerektirmektedir. Bu noktada, mevcut örnek verilerden yola çıkarak, farklı girdi değerleri için aerodinamik kuvvet katsayılarını tahminleme yeteneği bulunan yapay sinir ağları devreye girmektedir. Bu sebeple, parametreleri iyi ayarlanmış ve doğruya en yakın tahmin sonucunu verebilen bir yapay sinir ağı modeli, paraşüt yardımcı sevk sisteminin vazgeçilmez bir parçası olmaktadır. Uygun YSA modelinin belirlenmesi sırasında kullanılan farklı eğitim algoritmalarının göstermiş olduğu performans sonuçları Tablo 7.25'te yer almaktadır.

Tablo 7.25 Uygun YSA öğrenme algoritmasının belirlenmesi

Ağ özellikleri	Öğrenme Algoritmaları		
	Levenberg-Marquardt	Bayesian Regularization	Scaled Conjugate Gradient
Gizli katman nöron sayısı	10	10	10
Bölümlendirme (Eğitim/Doğrulama/Test)	%70 / %15 / %15	%70 / %15 / %15	%70 / %15 / %15
Hata kareleri ortalaması (Eğitim/Doğrulama/Test)	$6,93 \times 10^{-6}$ / $7,75 \times 10^{-2}$ / $1,33 \times 10^{-4}$	$2,41 \times 10^{-5}$ / 0 / $1,02 \times 10^{-3}$	1,31 / $6,75 \times 10^{-2}$ / 1,31
Regresyon (Eğitim/Doğrulama/Test)	0,999 / 0,983 / 0,999	0,999 / 0 / 0,999	-0,455 / 0,844 / -0,400

Tablo 7.25'ten de görüldüğü üzere “Levenberg-Marquardt” öğrenme algoritması, girdi verileriyle diğer algoritmalara göre daha uyumlu çalışmaktadır. Bir sonraki aşamada ise, aynı örnek veri seti, yani seçilen paraşüt geometrisine ait hesaplanan kuvvet katsayıları kullanılarak farklı bölümlendirme oranları ve gizli nöron sayılarına sahip YSA modelleri oluşturulmakta ve Levenberg-Marquardt öğrenme algoritması kullanan bu ağların gösterdiği performans değerleri Tablo 7.26'da yer almaktadır.

Tablo 7.26 Levenberg-Marquardt algoritması ile öğrenen farklı YSA modellerinin performans göstergeleri

Bölümlendirme (Eğitim %60 / Doğrulama %20 / Test %20)		
Gizli katman nöron sayısı	Hata kareleri ortalaması (Eğitim/Doğrulama/Test)	Regresyon (Eğitim/Doğrulama/Test)
5	$1,08 \times 10^{-5} / 2,64 \times 10^{-3} / 2,69 \times 10^{-3}$	0,999 / 0,996 / 0,996
10	$1,78 \times 10^{-3} / 2,85 \times 10^{-2} / 1,79 \times 10^{-1}$	0,996 / 0,937 / 0,562
20	$4,66 \times 10^{-19} / 2,83 \times 10^{-1} / 3,76 \times 10^{-1}$	1,000 / 0,855 / -0,295
50	$4,36 \times 10^{-3} / 8,22 \times 10^{-1} / 2,78 \times 10^{-1}$	0,993 / 0,515 / 0,762
Bölümlendirme (Eğitim %70 / Doğrulama %15 / Test %15)		
Gizli katman nöron sayısı	Hata kareleri ortalaması (Eğitim/Doğrulama/Test)	Regresyon (Eğitim/Doğrulama/Test)
5	$4,53 \times 10^{-5} / 3,90 \times 10^{-3} / 4,01 \times 10^{-4}$	0,999 / 0,998 / 0,999
10	$2,46 \times 10^{-5} / 1,68 \times 10^{-3} / 6,11 \times 10^{-5}$	0,999 / 0,998 / 0,999
20	$4,12 \times 10^{-20} / 2,22 \times 10^{-1} / 6,27 \times 10^{-2}$	0,999 / 0,737 / 0,917
50	$6,14 \times 10^{-4} / 6,45 \times 10^{-1} / 2,28 \times 10^{-1}$	0,998 / 0,767 / 0,457
Bölümlendirme (Eğitim %80 / Doğrulama %10 / Test %10)		
Gizli katman nöron sayısı	Hata kareleri ortalaması (Eğitim/Doğrulama/Test)	Regresyon (Eğitim/Doğrulama/Test)
5	$4,75 \times 10^{-4} / 2,07 \times 10^{-3} / 1,85 \times 10^{-3}$	0,999 / 0,998 / 0,910
10	$9,66 \times 10^{-4} / 1,20 \times 10^{-2} / 7,87 \times 10^{-3}$	0,998 / 0,970 / 0,941
20	$3,40 \times 10^{-3} / 3,00 \times 10^{-2} / 2,44 \times 10^{-1}$	0,993 / 0,978 / 0,999
50	$1,05 \times 10^{-15} / 4,47 \times 10^{-1} / 9,02 \times 10^{-1}$	0,999 / 0,318 / 0,712

Yapay sinir ağı modeli oluşturulurken, ağın parametre değerlerinin seçimi örnek girdi verisine göre belirlenmektedir. Levenberg-Marquardt öğrenme algoritmasının girdi verisine uygunluğu test edildikten sonra, YSA'nın gizli katman nöron sayısı ve bölümlendirme oranları değiştirilerek denemeler yapılmaktadır. Bunun sonucunda da YSA modelleri içinden en yüksek performans değerine sahip olanı seçilmekte ve ağ yapısının korunmasını sağlamak için kaydedilmektedir. Böylece, gelecekteki tahminleme sürecinde aynı YSA modelinin kullanımıyla birlikte, yaşanması muhtemel yüksek hatalı hesaplamaların önüne geçilmektedir. Bu çalışma için, yapılan denemeler sonunda, örnek veri setinin %70'inin öğrenme, %15'inin doğrulama ve kalan %15'inin ise YSA modelinin test sürecinde kullanımının uygunluğuna karar verilmektedir. Ayrıca, gizli katman nöron sayısının 10 olduğu YSA modeli, diğer modellere göre daha yüksek performans göstermektedir. Yukarıda yapılan denemeler ile paraşüt yardımcı sevk sisteminde, paraşütün belirlenen yörünge uçuşu sırasında

sahip olacağı farklı atak açılarındaki aerodinamik kuvvet katsayıları tahmin edilebilmektedir.

7.5 Uygulama: Kuzey Pasifik Okyanusu'nda Seyir Yapan Bir Konteyner Gemisinde Paraşüt Yardımlı Sevk Sisteminin Kullanımı

Günümüz koşulları altında değerlendirdiğimizde; Kuzey Pasifik Okyanusu üzerinde yıllık 30 milyondan fazla konteyner taşınmaktadır. Bu da, bu bölgeyi dünyanın en yoğun konteyner taşımacılığı yapılan bölgesi yapmaktadır. Buna neden olan en büyük etken; Çin, Japonya ve Güney Kore'nin sahip olduğu üretim gücüdür. Kuzey Amerika'nın batı kıyıları ve Asya'nın doğu kıyıları arasında yapılan konteyner taşımacılığı, aynı zamanda dünya ticareti için de yüksek önem arz etmektedir. Sonuç olarak, konteyner taşımacılığı yapan nakliye firmaları da bu bölgedeki ticaretten pay almak istemektedir. Fakat gerek uluslararası ve ulusal çevre koruma kurallarına uyum için gerekli olan teknik donanımın satın alma, gerekse de bu donanımların işletme maliyetleri, aşılması gereken birer engel olarak karşımıza çıkmaktadır. İşletme maliyetlerine bakıldığında, gemilerde ana enerji kaynağı olan petrol ürünlerinin fiyatında yaşanan artış, nakliye firmalarını alternatif enerji kaynaklarını kullanmaya teşvik etmektedir. Bunun yanında, SO_x, NO_x ve partikül madde salımını engelleyen yeni teknoloji ile donatılmış ana ve yardımcı makinelerin ilk yatırımının yüksek maliyetli oluşu, hem yeni inşa hem de gemi revizyon projelerindeki giderleri artırmaktadır.

Bütün unsurlar bir arada düşünüldüğünde; kullanımı sonunda zararlı madde salımına neden olmayan, gemi sevk sisteminde değişim gerektirmeyen, gemi üzerinde kargo ve yaşam mahallinin hacmini kısıtlamayan, kontrol ve otomasyon sistemini barındıran, eldesi için maliyet gerektirmeyen rüzgâr enerjisinin gemilerde yardımcı enerji kaynağı olarak kullanımı ön plana çıkmaktadır. Bunu da, önceden belirlenen rota üzerinde dinamik uçuş hareketi gerçekleştiren yardımcı paraşüt sevk sistemi sağlamaktadır. Gemi ve rüzgârın hız ve yönlerinin seyir öncesinde değerlendirilmek zorunda oluşu, her sistemde olduğu gibi bu sistemde de dikkat edilmesi gereken konuyu ifade etmektedir.

Geminin ve rüzgârın sahip olduğu hız gradyanlarının neden olduğu ve paraşüt üzerine etki eden efektif rüzgâr hızı, yüksek irtifalara çıkıldığında artış göstermekte ve üniform akış düzenine erişmektedir. Bu da, rüzgâr enerjisini gemi sevkinde geleneksel yelken donanımı şeklinde kullanmanın ötesine geçirmektedir. Paraşütün karada elektrik enerjisi eldesinde kullanımı ile başlayan ve paraşüt üzerinde meydana gelen aerodinamik kuvvetleri gemiyi çekmede kullanabilmek için, gemi ve paraşüt sisteme ait parametrelerin gerek tasarım gerekse de işletme sürecinin öncesinde değerlendirilmesi zorunluluk teşkil etmektedir. Paraşütün havadaki rüzgârı kullanarak gemiye çekme kuvveti sağlaması, sevk sistemi için faydalı iken; rüzgârın deniz yüzeyinde dalga sistemi meydana getirmesi gemi sevk sistemi için ek yük oluşturmaktadır. Bu iki değer dengesinde olduğu, hatta rüzgârdan elde edilen çekme kuvvetinin ek dalga ve rüzgâr direncinden daha fazla olduğu durumlarda, paraşüt yardımcı sevk sisteminin kullanımı tavsiye edilmektedir. Böylece, en azından gemi üzerine etkiyen ek direnç paraşüt sistemden karşılanarak, gemi ana makinesinin ilave yakıt harcama gerekliliği ortadan kalkmaktadır.

7.5.1 Sakin Suda Paraşüt Kullanımı

Yokohama ve San Diego limanları arasında, tam yüklü halde, ara durak olmaksızın gidiş-dönüş seferi yapan 3.600 TEU kapasiteli bir konteyner gemisinin, yardımcı paraşüt sevk sisteminden elde edeceği enerji tasarrufu bu çalışmada incelenmektedir. İlk aşamada; geminin, rüzgârın meydana getirdiği dalgaya maruz kalmadığı varsayımıyla, paraşüt sistemin seyir boyunca sevk sistemine sağladığı çekme kuvveti etkisi değerlendirilmekte olup; gerçekte böyle bir durum oluşmamakta, sadece karşılaştırma yapabilme amacıyla kullanılmaktadır.

Yokohama-San Diego arası geleneksel rota tavsiyesi, yaz mevsiminde 4930 deniz millik büyük daire seyri olup; kalan aylarda ise, daha uzun fakat daha az meteorolojik olayın meydana geldiği 5160 deniz millik kerte seyrinin yapılması üzerinedir. Dört mevsimin ortanca ayları, yani Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim, için tavsiye edilen rotalarda paraşüt sistemin kullanımı sonucunda elde edilecek enerji tasarruf oranlarını belirleyebilmek için referans seyir rotası her iki yön için de sakin su büyük daire seyri olarak kabul edilmektedir. Her iki tavsiye rota için de, geminin kalkış, yanaşma, körfez giriş ve çıkış bölgelerindeki seyrine ait hesaplamalar yanıltıcı bilgi vermemesi adına

çalışma kapsamına dâhil edilmemektedir. Bunun sonucunda, büyük daire hattı seyir mesafesi 4860 deniz millik uzunluğu ifade ederken, kerte seyri 5085 deniz millik bölümü kapsamaktadır. Gemi seyir hızı 15 knot olduğundan, sırasıyla 324 ve 339 saatlik iki ayrı okyanus aşırı rotaya ait analizler yapılmaktadır. Rüzgâr ve gemiye ait seyir verisi, büyük daire seyrinde 6 saatlik, yani 90 deniz millik, 54 adet bölüm için ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Kerte seyrinde ise, 56 adet 90 deniz millik ve 1 adet 45 deniz millik bölümlerden elde edilen rüzgâr ve gemiye ait seyir bilgisi kullanılarak yardımcı paraşüt sevk sisteminin katkısı değerlendirilmektedir. Tablo 7.27’de, Yokohama-San Diego seferi için gerekli ana makine toplam enerji ihtiyacı ve paraşüt sistem katkıları, büyük daire ve kerte seyri için değerlendirilmektedir.

Tablo 7.27 Yokohama-San Diego seferine ait analiz sonuçları

Aylar	Ocak	Nisan	Temmuz	Ekim
Sakin su gemi toplam direnç kuvveti [kN]	684,48	684,48	684,48	684,48
Gerekli enerji (Paraşüt yok, Büyük daire seyri) [kWh]	1.711.189	1.711.189	1.711.189	1.711.189
Gerekli enerji (Paraşüt yok, Kerte seyri) [kWh]	1.790.410	1.790.410	1.790.410	1.790.410
Paraşüt katkısı (Büyük daire seyri) [kN]	87,31	113,95	42,59	93,45
Paraşüt katkısı (Kerte seyri) [kN]	110,69	83,39	0,00	44,21
Gerekli enerji (Paraşüt var, Büyük daire seyri) [kWh]	1.492.915	1.426.315	1.604.714	1.477.565
Gerekli enerji (Paraşüt var, Kerte seyri) [kWh]	1.500.876	1.572.285	1.790.410	1.674.769
Paraşüt sistem katkısı (Büyük daire seyri) [%]	12,76	16,65	6,22	13,65
Paraşüt sistem katkısı (Kerte seyri) [%]	16,17	12,18	0,00	6,46

Tablo 7.28’de ise San Diego-Yokohama seferine ait paraşüt yardımcı sevk sisteminin kullanımı sonucunda elde edilecek enerji tasarrufu değerleri yer almaktadır.

Tablo 7.28 San Diego-Yokohama seferine ait analiz sonuçları

Aylar	Ocak	Nisan	Temmuz	Ekim
Sakin su gemi toplam direnç kuvveti [kN]	684,48	684,48	684,48	684,48
Gerekli enerji (Paraşüt yok, Büyük daire seyri) [kWh]	1.711.189	1.711.189	1.711.189	1.711.189
Gerekli enerji (Paraşüt yok, Kerte seyri) [kWh]	1.790.410	1.790.410	1.790.410	1.790.410
Paraşüt katkısı (Büyük daire seyri) [kN]	0,00	0,00	0,00	0,00
Paraşüt katkısı (Kerte seyri) [kN]	0,00	0,00	27,85	27,14
Gerekli enerji (Paraşüt var, Büyük daire seyri) [kWh]	1.711.189	1.711.189	1.711.189	1.711.189
Gerekli enerji (Paraşüt var, Kerte seyri) [kWh]	1.790.410	1.790.410	1.717.562	1.719.420
Paraşüt sistem katkısı (Büyük daire seyri) [%]	0,00	0,00	0,00	0,00
Paraşüt sistem katkısı (Kerte seyri) [%]	0,00	0,00	4,07	3,97

7.5.2 Çevre Koşullarının Sistem Verimliliğine Etkisi

Gemilerin direnci söz konusu olduğunda, deneysel ve sayısal analizler sırasında çoğunlukla üst yapı ve çevre koşullarından kaynaklı ek direncin göz ardı edildiği görülmektedir. Fakat gemilerin gerçek seyir koşulları düşünüldüğünde, idealden uzaklaşmaktadır. Gemilerin su üstündeki bölümüne etki eden rüzgâr direncinin ve gemi gövdesinin deniz ortamındaki hareketinden kaynaklı dalga direncinin oluşumu söz konusudur. Bu etkiler hesaplandığında, gemi ana makinesinden pervaneye aktarılması gereken güç ihtiyacının artması gerektiği çıkarımı yapılabilmektedir. Gemilerde enerji verimliliği üzerine yapılacak herhangi bir araştırmada ise, ek direncin göz ardı edilmesi pek de mümkün olmamaktadır. Tablo 7.29’da Yokohama-San Diego ve Tablo 7.30’da San Diego-Yokohama seferlerine ait paraşüt sevk sistemi kullanımı sonucunda, ek direncin de dâhil edildiği durumlar için elde edilen enerji verimliliği değerlendirmeleri yer almaktadır.

Tablo 7.29 Yokohama-San Diego seferi için ek dirençli duruma ait sonuçlar

Aylar	Ocak	Nisan	Temmuz	Ekim
Gemi toplam direnç kuvveti (ek dirençli durum) [kN]	1089,49	757,81	757,81	757,81
Gerekli enerji (Paraşüt yok, Büyük daire seyri) [kWh]	2.723.707	1.894.512	1.894.512	1.894.512
Gerekli enerji (Paraşüt yok, Kerte seyri) [kWh]	2.849.805	1.982.221	1.982.221	1.982.221
Paraşüt katkısı (Büyük daire seyri) [kN]	87,31	113,95	42,59	93,45
Paraşüt katkısı (Kerte seyri) [kN]	110,69	83,39	0,00	44,21
Gerekli enerji (Paraşüt var, Büyük daire seyri) [kWh]	2.505.433	1.609.639	1.788.038	1.660.889
Gerekli enerji (Paraşüt var, Kerte seyri) [kWh]	2.560.270	1.764.096	1.982.221	1.866.580
Paraşüt sistem katkısı (Büyük daire seyri) [%]	8,01	15,04	5,62	12,33
Paraşüt sistem katkısı (Kerte seyri) [%]	10,16	11,00	0,00	5,83

Tablo 7.30 San Diego-Yokohama seferi için ek dirençli duruma ait sonuçlar

Aylar	Ocak	Nisan	Temmuz	Ekim
Gemi toplam direnç kuvveti (ek dirençli durum) [kN]	1089,49	757,81	757,81	757,81
Gerekli enerji (Paraşüt yok, Büyük daire seyri) [kWh]	2.723.707	1.894.512	1.894.512	1.894.512
Gerekli enerji (Paraşüt yok, Kerte seyri) [kWh]	2.849.805	1.982.221	1.982.221	1.982.221
Paraşüt katkısı (Büyük daire seyri) [kN]	0,00	0,00	0,00	0,00
Paraşüt katkısı (Kerte seyri) [kN]	0,00	0,00	27,85	27,14
Gerekli enerji (Paraşüt var, Büyük daire seyri) [kWh]	2.723.707	1.894.512	1.894.512	1.894.512
Gerekli enerji (Paraşüt var, Kerte seyri) [kWh]	2.849.805	1.982.221	1.909.373	1.911.231
Paraşüt sistem katkısı (Büyük daire seyri) [%]	0,00	0,00	0,00	0,00
Paraşüt sistem katkısı (Kerte seyri) [%]	0,00	0,00	3,68	3,58

7.6 Bulgular

Kuzey Pasifik Okyanusu'na kıyı Yokohama ve San Diego limanları arasında gidiş-dönüş seferi yapan bir konteyner gemisinin, geleneksel olarak kullandığı iki farklı rota üzerindeki ticari rüzgârların etkisi, paraşüt yardımlı sevk sistemi özelinde değerlendirilmektedir. Bu değerlendirmeyi yapabilmek için, gemiye ait sakin su ve seyir sırasında karşılaşılan çevre koşullarının indüklediği ek direncin hesaplanması gerekmektedir. Bu sebeple, çeşitli deneysel ve matematiksel yöntemlerle direnç deneyleri yapılmış bir gemi formu kullanılmaktadır. Endüstriyel ve akademik çalışmalarda gerek kıyaslama gerekse de doğrulama yapabilme imkânı sunan ve tanınırlığı çok yüksek bir 3. Jenerasyon konteyner gemisi modeli olan KRISO Konteyner Gemisi (KCS) gövde formu kullanılmaktadır.

Bilindiği üzere, ticari ürünlerin nakliyesi en ucuz şekilde deniz yolu taşımacılığı ile gerçekleştirilmektedir. Bu da, deniz yolu ile taşınan ürün miktarının son 50 yılda yaklaşık 4 katına ulaşmasını sağlamıştır. Nakledilecek ürünler; yer altı ve üstünden elde edilen ham maddeler olacağı gibi yarı işlenmiş mamuller de olabilmektedir. Hatta endüstriyel üretim sürecinden geçmiş nihai ürünlerin nakliyesinde çeşitli emniyet tedbirleri uygulanmaktadır. Bu yüklerden bazıları, petrol ve türevleri gibi yanıcı maddeler; asitlik derecesi yüksek, patlayıcı ve aşındırıcı özelliği bulunan sıvı ve gazlar; tahıl gibi çok taneli ürünler; lastik tekerlekli kara taşıtları, yaş sebze ve meyve, canlı hayvanlar ve hatta seyahat eden insanlar olarak tanımlanabilmektedir. Böylelikle, denizde alınması gereken çeşitli emniyet ve güvenlik tedbirleri ve üstelik çeşitli talepler doğrultusunda, gemilerin yapısal özellikleri değişim göstermektedir. Sonucunda ise, farklı gemi türlerinin tasarımı ve kullanımı zorunlu kılınmaktadır. Zaman içinde ürün çeşitliliğinde yaşanan değişimler ve deniz yolu ile nakledilecek ürünlerin miktarının değişmesi gemi türlerinin kullanım oranlarını etkilemektedir. Son 40 yılda; petrolün boru hatlarıyla taşınmasıyla petrol tankerlerine olan ihtiyaç %40 azalmakta; kuru dökme yük taşıyan gemilerin toplam kapasitesi ticaret hacminin artmasıyla birlikte yaklaşık 1,5 katına çıkarak, genel kargo gemilerinde ise beşte birine inmekte iken; diğer yandan konteyner gemilerinin toplam yük taşıma kapasitesi de yaklaşık 8,25 katına çıkmaktadır. Gemi boyutlarındaki artışın sınırlı olması dolayısıyla da konteyner gemi sayısında buna bağlı bir artış gözlemlenmektedir. Bu artışta,

konteynerler içinde her türlü ürünün çevre şartlarından etkilenmeden taşınabilmesi büyük bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır.

Pasifik Okyanusu'nun kuzey bölümünde, Kuzey Amerika'nın batı kıyıları ve Doğu Asya arasında nakledilen konteyner adedi 2021 yılında 31,2 milyon TEU'ya ulaşarak tüm zamanların en yükseğine ulaşmıştır (UNCTAD, 2021). Geçmiş yıllara ait veriler incelendiğinde konteyner taşımacılığının sürekli artış ivmesine sahip olduğu görülmektedir. Kuzey Pasifik'te batı-doğu hattında toplam bölge yükünün üçte ikisi taşınmaktadır. Bu da, Çin'in son yirmi yılda gerçekleştirmiş olduğu ticari büyümeden kaynaklanmaktadır. Çin'deki büyüme sadece yük miktarını ve çeşitliliğini artırmakla kalmayıp, çevresinde bulunan Güney Kore, Japonya ve Tayvan'la olan ticari rekabetin de artışına neden olmaktadır. Büyüme yönlü gerçekleşen bu domino etki sayesinde, Doğu Asya ülkeleri tüm dünyaya ticari ürün ihracatı yapan ülke olma konumuna erişmektedir. Bu büyümede etkili olan diğer bir unsur ise, Güney Pasifik ülkelerinin sahip olduğu ham maddelerin endüstriyel üretimde girdi olarak kullanılmasıdır.

Tarihin eski dönemlerinde kıtalar arası nakliye rüzgâr gücü, hatta insan gücü takviyesiyle yapılmaktaydı. Rüzgârın gemi sevk sisteminde ana enerji kaynağı olarak kullanımı, emniyetli seyir koşullarını sağlayabilmek adına zaman içinde azalma göstermektedir. Günümüzde ticari gemilerin sevk sistemlerinde çoğunlukla içten yanmalı ana makineler kullanılmaktadır. Burada, içten yanmalı makinelere sahip gemilerin daimi olarak çalışabilmesi ve daha hızlı seyir yapabilmesinin etkisi hissedilmektedir. Çünkü endüstriyel dönüşüm ile birlikte ticari ürünleri mümkün olan en kısa sürede kayıpsız bir şekilde nakletme ihtiyacı doğmaktadır. Ayrıca, nakliye rotasını planlarken, meteorolojik olayların takibi ve tahmini olumlu katkılar sağlamaktadır. Havadaki rüzgârın şiddeti ve sürekliliği, deniz yüzeyi dalgalarının formunu etkilemektedir. Fırtınaya varan rüzgâr hızları deniz yüzeyinde ilerleyen gemilerin seyrini tehlikeye atabilmektedir. Buna ilave olarak, gemi üst yapısına etki eden rüzgâr, gemi sevki ve stabilitesi konusunda olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir. Bunlara, deniz yüzeyi akıntıları da eklenince, uygun seyir rotası seçimi gemiler için önemli bir kriter haline dönüşmektedir. Yokohama-San Diego arasında geleneksel motorlu gemiler için tavsiye edilen rota, çevre koşullarının uygun olması durumunda büyük daire seyri olup, kötü hava koşullarından kaçınmak için kerte seyrinin yapılması

önerilmektedir. Kerte seyri, büyük daire seyrine göre yaklaşık %4,6 daha uzundur; fakat gemiyi, insanı ve yükü korumak için fazla yakıt tüketilerek tedbir alınmaktadır. Özellikle kış aylarında, büyük daire hattı seyir bölgesinde esen rüzgârın zaman zaman fırtınaya dönmesi (8 Bofor şiddeti), 8 metreyi aşan dalga yüksekliğine neden olmaktadır. Bu da, bu bölgede seyir yapan gemilerin hayatta kalmasını zorlaştırmaktadır ve hatta imkânsız hale getirmektedir.

Kuzey Yarım Küre'nin 30° ve 50° enlemleri arasında yıl boyunca hâkim rüzgâr yönü batıdan doğuya doğrudur. Paraşüt sevk sistemine sahip bir geminin rüzgârdan fayda sağlayabilmesi için rüzgârın geminin kıç bölgesinden yaklaşık 120 derecelik (60° iskele, 60° sancak bölge) alandan esmesi gerekliliği göz önüne alındığında, doğu-batı yönündeki bir seyirde rüzgâr enerjisinin katkısı beklenildiği kadar olamamaktadır.

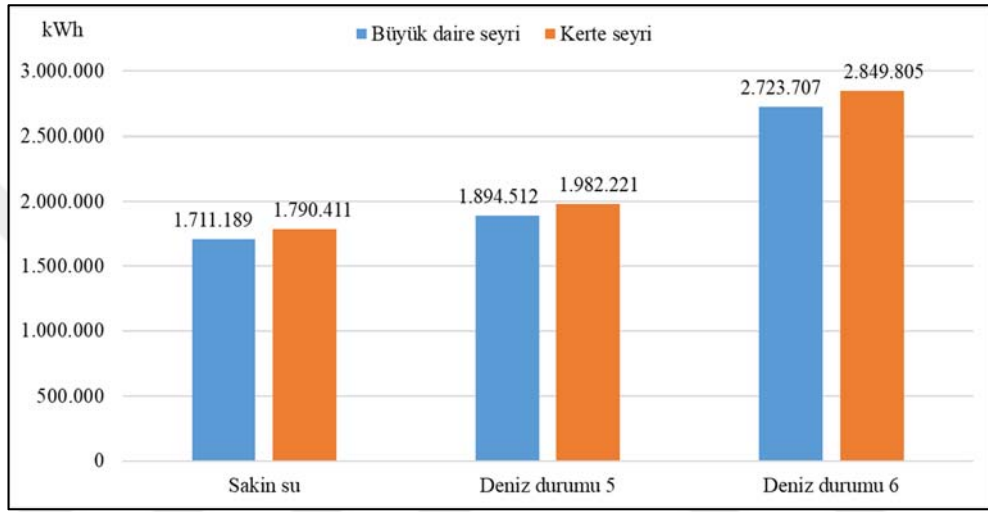
Gemilerin tasarımı söz konusu olduğunda, sevk sisteminin beklenen talepleri yerine getirebilmesi gemi direncinin yüksek doğrulukta tahminine ihtiyaç duymaktadır. İnşa süreci başlamadan önce belirli bir ölçekle küçültülmüş gemi modelinin, gemi çekme tankında deneye tabii tutulması geleneksel yöntem olup, gerçeğe en yakın sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Bu yöntem pahalıdır, fakat sayısal hesaplama yöntemlerine karşılaştırma ve doğrulama imkânı sunması sebebiyle sıklıkla kullanılmaktadır. Direnç deneyi yapılan bir gemi modelinin hareketleri, bilgisayar ortamında modellenerek ve belirli kabuller altında kullanılan matematiksel denklemler yardımıyla simüle edilebilmektedir. Çoğunlukla sayısal modellemede kullanılan küçültme ölçeği ile deney ortamındaki model ölçeği eşittir ve aynı Froude sayılarında her iki yöntemden elde edilen toplam direnç katsayıları birbiriyle karşılaştırılmaktadır. Böylece, sayısal modellemenin gerek sınır koşulları gerekse de matematiksel ağ yapısının boyut ve geometrisi düzenlenmektedir. Sayısal model parametrelerinin seçimi, hızlı ve yüksek hassasiyette analiz sonuçları eldesini hedeflerken, gemi gövdesinin özellikle baş ve kıç bölümlerindeki formunu da koruyabilmelidir. Çekme deneyi koşullarında olduğu gibi gemi formu suyun içinde ilerlememekte, ancak bu durum, geminin baş bölümünden gelen suyun kıç yönünde akışı ile sağlanabilmektedir. Açık suda seyreden bir geminin direncini tahmin edebilmek için hazırlanan modelinin boyutları çekme tankının en, boy ve genişliği ile uyumlu olmalıdır. Aksi takdirde, gemi formu, taban derinliği sebebiyle sığ su etkisi;

genişlik dolayısıyla yansıyan dalga etkisi ve tank uzunluğu sebebiyle de tam gelişmemiş dalga sistemi etkisine maruz kalabilmektedir. Deney tankı için geçerli olan bu etkilerin benzerleri HAD yöntemi için de geçerli olup, uygun kontrol hacmi seçimi geminin boyutlarına ve ulaştığı en yüksek hıza göre yapılmaktadır. Gemi her iki yöntemde de dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketi yapmakta, bu da geminin farklı hızlardaki trim ve su çekimi değerlerini hesaplamayı sağlamaktadır. Ayrıca, sakin su deney sonuçlarıyla doğrulanabilen uygun değişken değerleri atanmış bir matematiksel çözüm algoritmasında, çeşitli dalga ve rüzgâr durumlarına ait ek direnç tahmini de yapılabilmektedir.

Çekme tankı deneylerinde kullanılan ve gerçek gemi formunun korunduğu, sadece belirli bir oranda küçültüldüğü model geminin yapımı hassas ve üzerinde emek sarf edilmesi gereken bir husustur. Araştırmacılar, bu süreci basite indirgeyerek ve model hazırlık aşamasını mümkün olan en kısa zamanda tamamlayarak çekme deneylerine geçmeyi hedeflemektedir. Bunun sonucunda ise, geminin rüzgârla doğrudan temas halinde olan güverte üstü bölümü modellenmemektedir. Ek rüzgâr direnci hesabı genellikle, çeşitli deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak, sakin su direncinin oranı şeklinde ifade edilmektedir. Bu çalışmada yapılan analizler, yaklaşık 10-26 knot arasındaki hızları kapsamaktadır ve rüzgâr direncinin sakin su direncine oranı %1,28-5,21 arasında değişim gösterdiği sonucuna varılmaktadır. Çekme deneylerinde asıl hedeflenen konu, geminin belirli sabit hızlarla giderken sevk sisteminden talep ettiği gücü bulabilmektir. Model tankının özelliklerine bağlı olarak, çoğunlukla sakin su ve düzenli dalga durumuna ait deneyler yapılmaktadır. Gemi formunun denizcilik özelliklerinin tam anlamıyla aydınlatılabilmesi için yapılması gereken çeşitli manevra ve düzensiz dalga testleri gerek zaman gerekse de yüksek maliyet dolayısıyla HAD ortamında yürütülmektedir.

Açık deniz seyri yapan bir geminin seyir koşulları düşünüldüğünde, dalgadan kaynaklı ek direnç, özellikle suyun yoğunluğu sebebiyle, rüzgâr direncinden çok daha fazla olmaktadır. Bir konteyner gemisinin açık deniz seyir hızının genellikle 14-18 knot arasında olduğu bilinmektedir. Bu hız aralığında yaklaşık 250 metre tam boya ve 11 metre su çekimine sahip geminin, deniz durumunun 6 olduğu koşullarda ek dalga direnci, sakin su direncinin yaklaşık %30-40'ına kadar ulaşmaktadır. Şekil 7.36'da,

seçilen iki liman arasında 15 knot hızda yapılan büyük daire ve kerte seyirlerinde harcanacak sevk sistemi enerjisine ait değerler yer almaktadır. Seyir koşullarına bağlı rota optimizasyonu yapabilmenin temelinde ise, gerekli ek direnç hesaplarının olası senaryoları kapsaması yer almaktadır. En basit yönüyle değerlendirecek olursak, sakin su ortamında gemi hızını 10 knot yerine iki katı olan 20 knot'a çıkarmanın sonucunda, ana makineden talep edilen güç yaklaşık 8,5 katına çıkmaktadır. Bu da, yaklaşık olarak hız artış oranının küpüne denk gelmektedir.



şekil 7.36 Farklı seyir koşullarında gereken enerji miktarları

Paraşüt yardımcı sevk sisteminin en önemli parçası, havada belirlenen yörünge üzerinde uçarken meydana gelen aerodinamik kuvvetleri çekme halatına aktaran paraşüt modelidir. Gemilerin güverteleri üzerinde yük taşımaları, hatta çeşitli seyir ve yükleme-boşaltma donanımlarını barındırmaları sebebiyle, paraşüt sistemlerden az yer kaplamaları ve hafif olmaları beklenmektedir. Havanın yaklaşık $1,25 \text{ kg/m}^3$ yoğunlukta olduğu düşünülürse, deniz suyunun yoğunluğu (1025 kg/m^3) havanınkinin yaklaşık 800 katına eşittir. Bu da, aynı hızla akan iki akışkan maddenin sahip olduğu kinetik enerjiyi benzer oranda etkilemektedir. Dolayısıyla, rüzgârdan etkili bir şekilde fayda sağlayabilmek için büyük paraşüt alanlarının kullanımı sonucunda gemi üzerinde depolama sorunu oluşmaktadır. Bunun en basit çözümü; esnek, katlanabilen ve böylece az yer kaplayan yapıların kullanılmasıdır. Bu problemin çözümü, esnek paraşüt yapısının havada istenilen formda uçabilmesinin sağlanıp sağlanamayacağının analizini zorunlu kılmaktadır. Bahsi geçen, esnek ve katlanabilen paraşüt yapısı, uçak kanadına benzer bir geometriye sahip olamayacağı için eğrisel formda imal

edilmektedir. Fakat eğrisel formdaki paraşüt geometrisinin, eğrilik yarıçapına bağlı olarak sayısız formda üretimi söz konusudur. Uygun eğrilik yarıçapına sahip paraşüt formunu bulabilmek ve düz kanat formu ile karşılaştırma yapabilmek için, aynı alana sahip 1 adet düz kanat formu ve 8 adet eğrisel formda paraşüt geometrileri modellenmektedir. Burada incelenmesi gereken hususlar; paraşüt etrafında meydana gelen akışkan hareketlerinin simüle edilmesi ve paraşütün aerodinamik özelliklerini belirleyen kaldırma ve sürüklenme kuvvet katsayılarının belirlenmesidir.

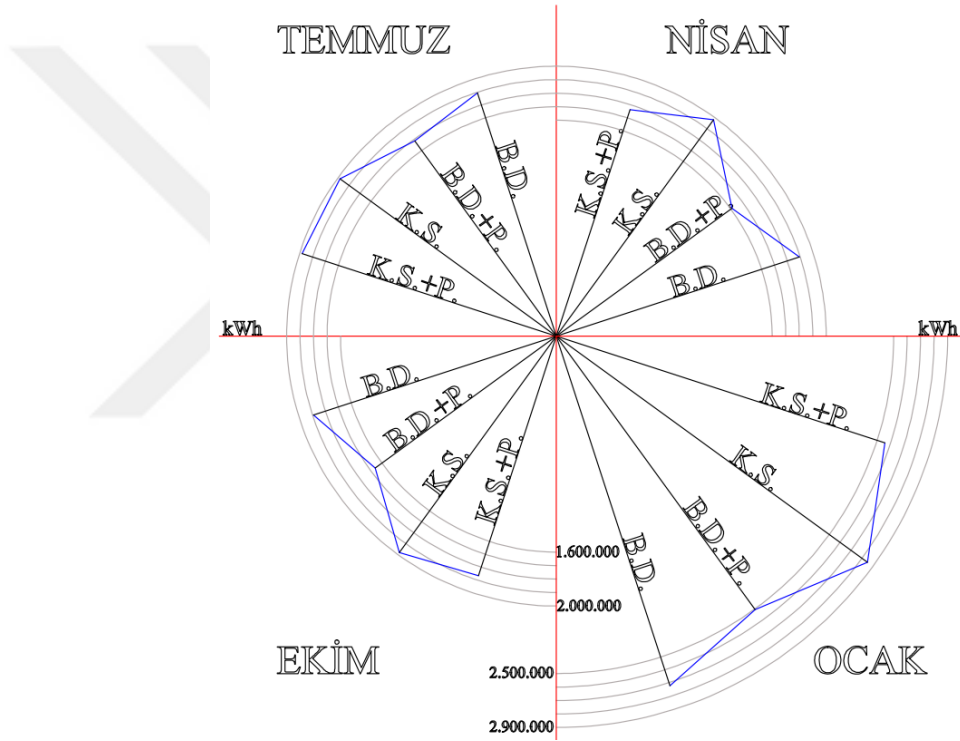
Geçerli bir HAD analizi için matematiksel modelleme sırasında oluşturulan hesap ağının geometrik özellikleri istenen sonucu verebilecek hassasiyette ayarlanmaktadır. Bu ayarlamalarda, mümkün olan en kısa zamanda ve yüksek doğrulukta analiz sonuçları elde edebilmek için; ağ hücrelerinin kenar uzunluklarına ve hücre şekillerine, sınır tabaka kalınlığına ve katman sayısına, akışkanın etkileşimde bulunacağı yüzey şekline ve akışkan hızına bağlı seçilen türbülans modeline, kabul edilebilir doğrulukta hassasiyete ulaşabilmek için yürütülmesi gereken iterasyon sayısına ve akışkan alanının genel boyutlarına karar verilmektedir.

Havada, dengeli, kontrol edilebilir ve verimli paraşüt uçuşu sağlamanın diğer unsurları ise, çekme halatının uzunluğu, bu halatın gemi ve deniz yüzeyine göre sahip olduğu açısız konum (kalkıntı ve azimut açıları) ve üzerinde uçtuğu 8-şekilli yörüngenin modelidir. Yeryüzünün coğrafik şekilleri ve yerleşim yerleri dolayısıyla, kara ve deniz yüzeyinde rüzgâr hızları farklılık göstermektedir. Ayrıca, yüksek irtifalardaki rüzgârın hızı ve akış özellikleri değişmektedir. Yeryüzüne yakın yerlerde yüzey şeklinden etkilenen rüzgârın hız gradyanları, türbülanslı akış koşulunda hareket etmekte olduğundan paraşüt üzerine stabil hava girişi sağlanamamaktadır. İrtifanın artması sonucunda, yüzey sürtünmesi ve yüzey şekli sebebiyle hava hareketinde bozucu etkiler azalmakta, bu sebeple de daha hızlı ve üniform düzende hava akışı meydana gelmektedir. Bilinen bu etkiler sebebiyle, paraşütün belirli bir yükseklikte uçuşu sağlanarak, düzenli aerodinamik kuvvet eldesi hedeflenmektedir. Paraşüt üzerindeki kuvvetleri gemiye aktaran halatın gemiye göre konumu yüksek önem içermekte olup, halatın geminin ilerleme yönünde oluşu, yani sıfır derece ortalama azimut açısı, yanal sürüklenme kuvvetinin oluşumunu engellemektedir. Böylelikle, geminin dümen sistemine ek yük getirilmemekte ve rotadan sapmaya neden olacak

kuvvet oluşumu önlenebilmektedir. Çekme halatının sahip olduğu diğer açısal değer ise, 8 şekilli yörüngedeki hareket sırasında elde edilen ortalama kalkıntı açısıdır. Bu açının 90 derece olması, paraşütün geminin güvertesine paralel olmasını, 0 derece olması ise geminin pruvası yönünde deniz yüzeyine paralel olmasını ifade etmektedir. Bu çalışmada, 30, 40 ve 50 derecelik kalkıntı açıları üzerine analizler yapılmakta ve sonucunda ise 30 derecelik kalkıntı açısı seçilmektedir. Paraşütün belirlenen açısal konumlarda hareketi sürerken, çekme halatının dolanmasının önlenmesi ve dinamik paraşüt hareketinden kaynaklı bağıl efektif rüzgâr hızı artışı sayesinde verimli çalışma koşulları sağlanmaktadır. 8-şekilli yörüngenin sığası üzerine yapılan incelemelerde 20, 30 ve 40 derecelik açılara sahip yörünge sığaları karşılaştırılmaktadır. Bunun sonucunda ise, gerekli ticari ve akademik çalışmalardan elde edilen bulgular doğrultusunda, 30 derecelik sığanın uygunluğuna karar verilmektedir. Bunun yanında, paraşütün yörünge üzerindeki dinamik hareketi sırasındaki uçuş hızı, yine bu konudaki benzer araştırmalardan yola çıkarak 27 m/s olarak belirlenmektedir.

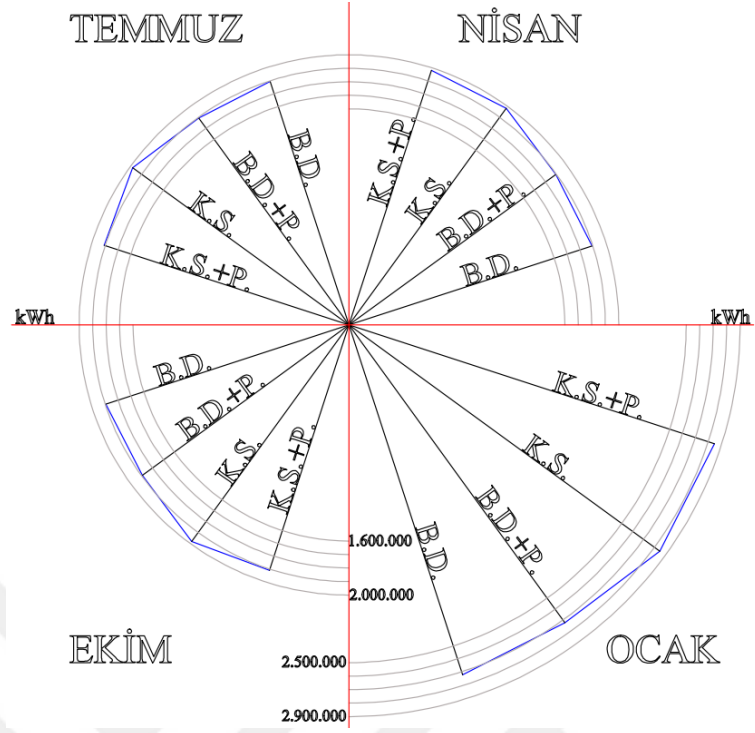
Rüzgârın deniz yüzeyinde dalga oluşumuna sebep olmadığı durumda; 300 metre halat uzunluğu, NACA4415 kesitli 320 metre kare paraşüt alanı, 30 derece kalkıntı ve 0 derecelik azimut açısının kullanıldığı paraşüt yardımcı sevk sisteminde; Yokohama'dan San Diego'ya yapılan büyük daire seyrinde, Ocak ayında %12,76, Nisan ayında %16,65, Temmuz ayında %6,22 ve Ekim ayında %13,65 enerji tasarrufu sağlama potansiyeline erişilmektedir. Fakat mevsimsel etkiler dâhil edilerek hesaplanan ek dirençli koşulda; aynı sefer için toplam gerekli sevk gücünden, Ocak ayında %8,01, Nisan ayında %15,04, Temmuz ayında %5,62 ve Ekim ayında %12,33 olacak şekilde tasarruf edebilme imkânı bulunmaktadır. Ocak ayındaki verimliliğin diğer aylara göre daha fazla düşmesindeki neden, olumsuz hava şartlarıdır ve 2012-2020 yılları ortalaması Ocak ayı için Deniz Durumu 6'nın hâkim olduğunu göstermektedir. Fakat yine de, Yokohama-San Diego seferi için ortalama %10,25 enerji tasarrufu değerine ulaşılmaktadır. Her iki liman arasında büyük daire hattında karşılıklı gidiş-dönüş seferi yapıldığında ise yıllık ortalama enerji kazanımı yaklaşık %5,12 değerine ulaşmaktadır. Burada, enerji tasarruf oranının düşüşünde San Diego'dan Yokohama'ya yapılan büyük daire seyri sırasında rüzgâr ve geminin konumundan kaynaklı olarak enerji kazancının elde edilememesinin etkisi görülmektedir. Kerte seyri için ise; Yokohama-San Diego seferinde yıllık ortalama

%6,75, San Diego-Yokohama seferinde ortalama %4,3 enerji tasarrufu potansiyeli bulunmaktadır. Mevcut koşullar altında paraşüt alanının 320 metrekare oluşu enerji tasarruf miktarlarını kısıtlamaktadır. Bunu aşabilmek için 400, 600, hatta ticari paraşüt destekli sevk sistemi üretici firmaların hedeflediği gibi 1000 metrekare paraşüt alanlarının kullanımıyla daha yüksek oranlarda enerji tasarrufu potansiyeline erişilebilmektedir. Şekil 7.37 ve 7.38’de Yokohama ve San Diego limanları arasında yapılacak olan seferlerde, büyük daire ve kerte seyrinde yardımcı paraşüt sisteminin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlara ait gerekli toplam ana makine sevk enerjisi miktarları gösterilmektedir.



Şekil 7.37 Yokohama-San Diego hattı gerekli ana makine sevk gücü değerleri*

* B.D.: Büyük daire seyri, B.D.+P.: Paraşüt sistemi mevcutken büyük daire seyri, K.S.: Kerte seyri, K.S.+P.: Paraşüt sistemi mevcutken kerte seyri



Şekil 7.38 San Diego-Yokohama hattı gerekli ana makine sevk gücü değerleri*

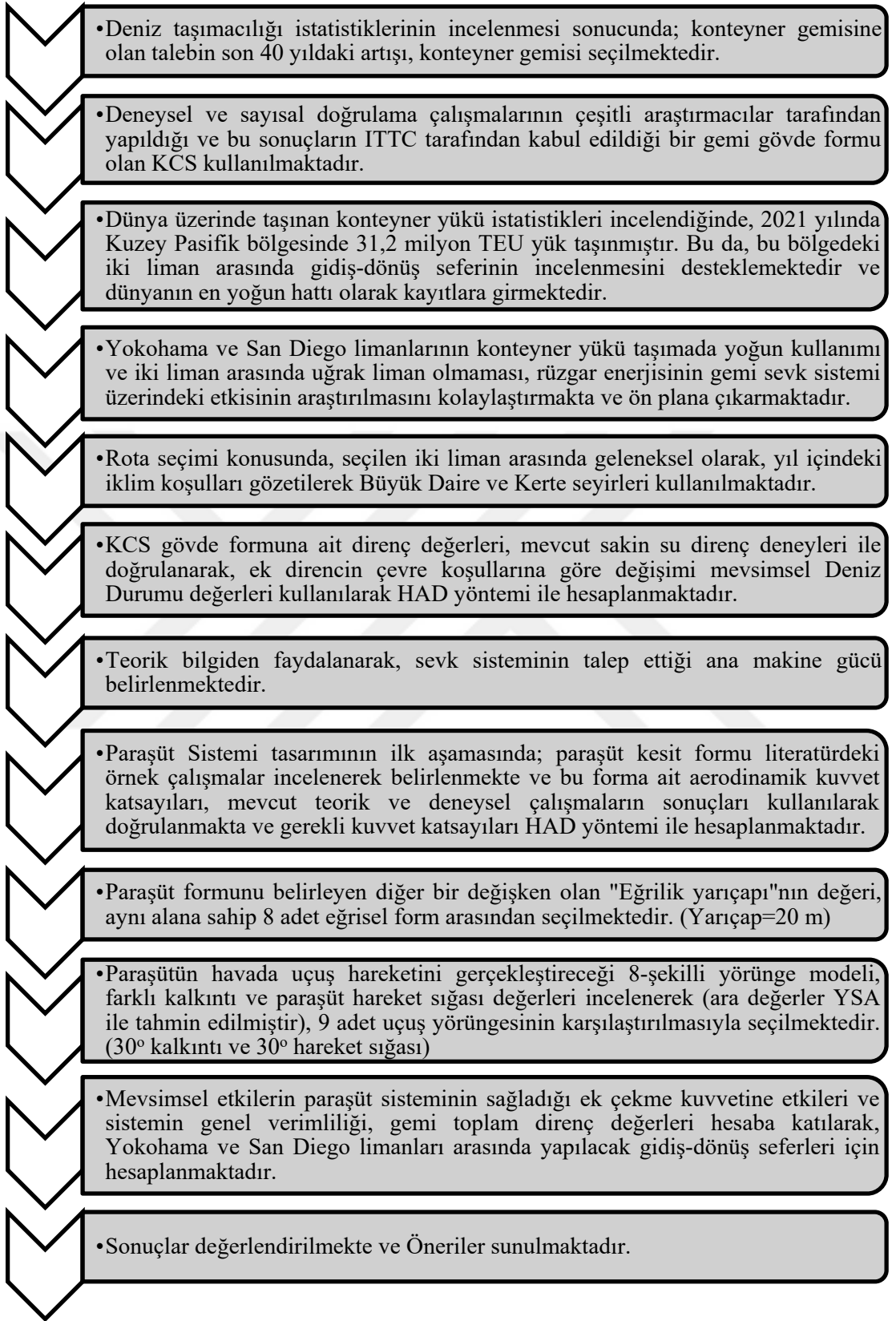
* B.D.: Büyük daire seyri, B.D.+P.: Paraşüt sistemi mevcutken büyük daire seyri, K.S.: Kerte seyri, K.S.+P.: Paraşüt sistemi mevcutken kerte seyri

BÖLÜM SEKİZ

SONUÇ ve ÖNERİLER

Yakın gelecekte sera gazı ve partikül madde salımı hakkında IMO'nun daha sıkı kuralları yürürlüğe koyacağı, denizcilik sektörü tarafından iyi bilinen ve sürekli takip edilen bir konudur. Birbiriyle etkileşim içinde olan, gemi tasarım ve işletme sürecinin katkısıyla, yenilikçi alternatif enerji kaynaklarının gemilerde kullanımı konusunda araştırma ve geliştirme çalışmalarına hız kazandırılmaya çalışılmaktadır. Bu kapsamda, gemilerin fosil yakıt tüketimini azaltacak ve temini sürecinde maliyet unsuru içermeyen rüzgâr enerjisinin kullanımı hususunda inceleme ve değerlendirmelere önem verilmelidir. Paraşüt yardımcı sevk sistemine sahip bir geminin daha az yakıtı ihtiyaç duyması, çevre ve insan sağlığını korumanın yanında, işletme maliyetlerinde de düşüşe neden olmaktadır. Ayrıca, işletme giderlerinin azalmasıyla da kâr marjı artmakta ve rekabetçi taşımacılık ortamı için gerekli zemin oluşturulmaktadır. Böylelikle, gemi üzerinde fosil yakıt kullanan ana sevk sistemi bulundurmanın haricinde, yardımcı sevk sistemine sahip gemiler sayesinde, ana sevk sisteminde yaşanacak herhangi bir olumsuz durumun sonuçlarının hafifletilmesi de sağlanacaktır.

Alternatif enerji kaynağı kullanan sevk sistemlerinin tasarım sürecinde çeşitli deneysel ve sayısal araştırmaların yürütülmesiyle birtakım ön değerlendirme sonuçlarına varılmaktadır. Elde edilen bu bilgi, tasarım ve üretim sürecinde karşılaşılabilecek olumsuzluklardan korunmayı ve böylelikle yüksek maliyetler gerektiren gemi tasarım süreçlerine katkı sağlayacaktır. Aksi takdirde, verimliliği düşük, günümüz teknolojisini içermeyen ve sürdürülebilir olmayan sistemlerin tasarımı gerçekleştirilecektir. Bunun için, öncelikle, sayısal hesaplamaların güvenilir deney sonuçlarıyla doğrulanması ve gerekli modifikasyonların yapılarak daha çevreci ve daha verimli sistemlerin tasarımı yapılmalıdır. Bu sebeplerle, günümüze kadar paraşüt yardımcı gemi sevk sistemi konusunda yapılmış bilimsel araştırmaların sonuçlarından elde edilen bulgular, bu çalışmanın yapılması konusunda yüksek önem arz etmektedir. Bu doktora tezi kapsamında yürütülen araştırmaların işlem basamakları Şekil 8.1'de gösterildiği gibi yukarıdan aşağıya doğru ilerlemektedir.



Şekil 8.1 Çalışmanın işlem basamakları

8.1 Sonuçlar

Paraşüt yardımcı gemi sevk sistemi tasarlamadaki ana hedef, gemilerde karbonsuz enerji kaynaklarının kullanımını teşvik eden düzenlemelere uyum sağlayacak bir enerji kaynağı olan rüzgârın kullanımı sırasında göz önünde bulundurulması gereken değişkenleri ve yenilikçi gemi sevk sistemlerinin tasarım parametrelerini tanımlayabilmektir. Deniz taşımacılığının, diğer taşımacılık türlerine göre uygun maliyetli oluşu, büyük miktardaki yükleri tek seferde taşıyabilmesinden kaynaklanmaktadır. Deniz taşımacılığı istatistiklerinin incelenmesiyle, konteyner gemisi ihtiyaının son 40 yılda 8 katından daha fazlasına ulaştığı görülmektedir. Bu artışın yaşanmasında, konteyner içinde taşınan yükün emniyetli bir şekilde nakliyesinin gerçekleştirilmesinin etkisi bir hayli fazladır. Ticari gemi türlerinin y k çeşidinden etkilenmesi ve Kuzey Amerika-Doğu Asya arasındaki ticaret hacminin genişlemesi sonucunda, Kuzey Pasifik bölgesinde 2021 yılı içinde toplam 31,2 milyon konteyner nakli gerçekleştirilmiştir. Böylece, dünya üzerinde konteyner yükünün en yoğun taşındığı bölge olan Kuzey Pasifik'te çalışan konteyner gemilerinde, karbonsuz bir enerji kaynağının, yani rüzgârın, kullanımı desteklenmelidir.

Kuzey Pasifik Okyanusu'nda yıl boyunca değişken hava olayları gözlenmekle birlikte; özellikle kış aylarında, kuzey enlemlerinde fırtına oluşumu görülmektedir. Bu sebeple, büyük daire seyri genellikle Haziran-Ağustos ayları arasında önerilmekte olup, kötü hava koşullarından kaçınabilmek için yaklaşık %4,6 daha uzun bir rota olan kerte hattı kullanılmaktadır. Seyir bölgesindeki dalga ve rüzgâr etkisi gemilerin sadece yapısal emniyeti için sorun teşkil etmemektedir. Bunun yanında, artan sevk sistemi güç talebi, işletme giderlerinde ciddi artışa neden olmaktadır. 14-18 knot aralığında Deniz Durumu 6 için gerekli olan ek g  ihtiyaı, sakin su direncinin %30-40'ına ulaşmaktadır. Böylece, rota tercihi konusunda en kısa rotanın değil; emniyetli ve toplamda en az enerjinin harcandığı rotanın seçilmesi gerekmektedir.

Paraşüt sisteminin sahip olduğu ana bileşenler; çekme halatı, kontrol mekanizması ve paraşüt geometrisidir. Halat uzunluğu, yüksek irtifalardaki üniform ve güverte seviyesinden daha hızlı esen rüzgâra ulaşabilme konusunda önem arz etmektedir. Bu çalışmada ele alınan 300 metrelik halat uzunluğu, bilimsel ve endüstriyel araştırmalarda sıklıkla kullanılmakta olup, benzer çalışmalarla karşılaştırma

yapabilme imkânı sunmaktadır. Paraşütün, önceden belirlenen yörünge üzerinde uçabilmesini sağlayan kontrol mekanizması, paraşütün dinamik uçuşunu sağlayarak, bağıl rüzgâr hızının çok daha üstünde efektif rüzgâr hızı elde etmede kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında tasarlanan paraşüt sistemde yer alan paraşütün uçuş hızının, ticari paraşüt üreticileri tarafından hedeflenen değer olan 27 m/s olarak seçilmesi, mevcut sistem verimini maksimize ederek; hızın karesi ile orantılı olacak şekilde artan aerodinamik kuvvet oluşumu ve gemi ana makine yakıt verimliliğinde artışı desteklemektedir. Paraşüt kontrol parametrelerinden olan azimut açısı, kalkıntı açısı ve 8-şekilli yörünge hareket sığası da kontrolcü mekanizma sayesinde istenilen değerlerde tutulmaktadır. Azimut açısının ortalama değerinin sıfır dereceye yakın tutulmasıyla, gemi gövdesine rotadan saptırıcı yanal kuvvetlerin aktarılmasının önüne geçilmektedir. Bu sayede dümen sisteminin etkin çalışması sağlanarak gemi emniyeti tehlikeye atılmamaktadır. Kalkıntı açısının ise 30 derece olarak seçilmesi, hem istenen 8-şekilli yörünge elde edilmesini, hem de çekme halatı üzerindeki gerilme kuvvetinin büyük bir kısmının gemi sevk sistemine ek çekme kuvveti olarak aktarılmasını sağlamaktadır. Ayrıca, analiz sonuçlarından da görüldüğü üzere, paraşüt hareket sığasının daraltılması, paraşütün yörünge üzerindeki tam bir turunda ortalama daha fazla aerodinamik kuvvete maruz kalması ile sonuçlanmaktadır. Fakat 1000 metre kareye ulaşması hedeflenen paraşüt alanı düşünüldüğünde, gerek halat üzerindeki burulma kuvvetleri, gerekse de paraşütün istenen 8-şekilli yörüngeyi emniyetli bir şekilde tamamlayabilmesi için aerodinamik kuvvetlerden, dolayısıyla ek çekme kuvvetinden kabul edilebilir sınırlar dâhilinde fedakârlık yapılmaktadır ve bu çalışmada, hareket sığası 30 derece olarak kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak, paraşüt modelinin formuna karar verilmesi sürecinde, paraşüt etrafında oluşan hava hareketlerinin simüle edilmesi ve forma ait aerodinamik kuvvet katsayılarının belirlenmesiyle; paraşüt etrafında görece daha düzenli hava hareketlerinin gerçekleştiği formun seçilmesi ve optimum kuvvet katsayılarının elde edilmesiyle, sürdürülebilir ve emniyetli paraşüt operasyonları desteklenmektedir. Mevcut çalışma için bu analizler yapıldığında, NACA4415 kesitli ve 320 m² alana sahip paraşüt için 20 metrelik eğrilik yarıçapı uygun bulunmaktadır.

Paraşüt sistemlerin sahip olduğu en önemli iki dezavantajı; artan rüzgâr hızıyla birlikte deniz ortamının sertleşmesi ve sistemin çalışabilmesi için rüzgârın gemiye

kıçtan belirli bir açı ile gelmesinin gerekli oluşudur. Rota üzerinde mevcut olan rüzgâr hızı ve gemi ek direnci birlikte düşünüldüğünde, bu çalışmadaki ortalama seyir hızı 15 knot olarak belirlenmektedir. Bu sayede, paraşüt sistemden ek çekme kuvveti sağlanırken, aynı zamanda taşınacak yükün günümüz koşullarında talep edilen teslimat süresindeki artışın önüne geçilmektedir. Rüzgâr ve geminin birbirine göre konumlarının etkisi ise, mevcut rota planlama algoritmasına ilave edilecek yeni değerlendirme prosedürleri ile analiz edilebilmektedir. Tipik bir hava tahmini odaklı rota oluşturmanın haricinde, gemilerin sevki sırasında karşılaşılabilecek hava durumlarının gemi üzerinde kurulu paraşüt sisteminden elde edilecek sevk gücüne katkısı değerlendirilmelidir. Farklı seyir koşullarının, farklı yolculuk planlarına ve farklı yakıt tüketimine yol açması, hava durumunun seyir üzerindeki etkisini göstermekte ve enerji verimliliğine yönelik en uygun yolculuk planını paraşüt yardımcı sevk sistemine sahip bir gemi için yapmayı zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle karar vericiler, nakliye şirketleri ve hatta gemi tasarımcıları, daha fazla kâr elde edebilmek için öngörülen sonuçlara dayanarak en verimli ve emniyetli rotayı seçmeyi hedeflemektedir.

Gemi sevk sistemlerinde birincil enerji kaynağı olarak fosil yakıtların kullanılması çevre koruma politikalarında her geçen gün hızla sıkılaştırma önlemlerinin alınmasını tetiklemektedir. Bu nedenle, deniz taşımacılığında yenilikçi tahrik sistemlerine olan ilgi artmaya devam etmektedir. Paraşüt sistemler hem elektrik enerjisi hem de çekme kuvveti üretebilmesi sebebiyle denizcilikte geniş bir kullanım imkânına erişmektedir. Kara araçlarında içten yanmalı motorların yerini almaya başlayan elektrik motorlarının, yakın gelecekte deniz araçlarında da yaygın olarak kullanılacağı görüşü, bu yenilikçi sistemin gemilere kurulumunu teşvik etmektedir. Bu görüş, Yokohama-San Diego seferi için yıllık ortalama deniz durumu da göz önünde bulundurulduğunda, büyük daire seyri yapılması durumunda yaklaşık %10,25 düzeyinde ana makine yakıt tasarrufuna erişileceğinin elde edilmesiyle desteklenmektedir.

8.2 Öneriler

Bu çalışmanın ana konusu; rüzgâr enerjisinin, paraşüt yardımcı gemi sevk sisteminde çekme kuvvetine dönüşümü sırasında karar verilmesi gereken sistem bileşenlerini tanımlayarak, enerji verimliliğine etkilerini belirleyebilmektir. Bu

sebeple, dünya üzerinde son 40 yılda kapasite oranında en fazla artış görülen konteyner gemi tipi seçilerek, dünya üzerinde en fazla adetli konteyner taşımacılığı yapılan bölge olan Kuzey Pasifik Okyanusu rotalarından biri olan Yokohama-San Diego seferi seçilmiştir. Özelliklerine karar verilen sistemin seçilen rotada kullanımı, ticari rüzgârların önemini pekiştirmektedir. Bu kapsamda, aşağıda yer alan önerilere, çalışmanın bulgularından elde edilen veriler doğrultusunda ulaşılmaktadır.

Gemilerde alternatif enerji kaynağı kullanımının gün geçtikçe arttığı görülmektedir. Günümüz koşullarında, gemilerin gerek yardımcı gerekse de ana makinelerinin ihtiyaç duyduğu enerjinin büyük bir bölümü fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Denizcilik sektörüne ait uluslararası kural ve düzenlemelerin hâlihazırdaki ana amaçlarından biri, çevre ve insan sağlığına zararlı her türlü yakıtın gemilerdeki kullanımına kısıtlama getirmektedir. Bu kapsamda, karbon ve kükürt içermeyen, yanması sonucunda partikül madde açığa çıkarmayan, ucuz, yenilenebilir, yüksek boyutlarda depolama ihtiyacı olmayan ve gemi emniyetinde risk unsuru oluşturmayan alternatif enerji kaynaklarından biri olan rüzgârın, gemi sevk sistemlerinde kullanımı teşvik edilmelidir. Bu teşvik programı gerek ulusal gerekse de uluslararası yasal düzenlemeler ile desteklenerek, karbon içeren yakıtları daha az kullanan gemilerin inşası ve işletilmesi sağlanmalıdır.

Gemi tasarım sürecinin iteratif işlem basamaklarından oluşması sebebiyle, türüne karar verilen gemi formunun belirlenmesi sırasında; ilk işlem basamağının, bilinen ve üzerinde çalışılmış bir gemi gövde formu olmasına özen gösterilmeli, bu sayede ilerleyen işlem adımlarında uygulanacak yapısal değişikliklerin sonuca etkilerini değerlendirme imkânı oluşturulmalıdır.

Son 40 yılda, hem deniz yolu ile nakliyecilik faaliyetlerinin hacmi genişlemekte, hem de gemi türlerine olan ihtiyaçta değişiklik görülmektedir. Kuru yük taşıyan gemiler, taşıma kapasitesi bakımından lider olmakla birlikte, konteyner gemisine olan talep 8 katından daha fazlasına ulaşmaktadır. Bu da, konteyner gemisi üzerinde bulunan sistemlerin tasarımı için giderek artan derecede önem verilmesini gerektirmektedir. Ayrıca, en yoğun konteyner taşımacılığı yapılan bölge olan Kuzey Pasifik'e komşu ülkelerin ticari faaliyetleri yakından incelenerek, paraşüt yardımcı

sevk sistemlerinin tasarlanabilmesi ve üretilebilmesi için sektör temsilcileri bir araya getirilmelidir.

Her türlü yükün taşındığı konteynerler, çoğunlukla son tüketim ürünlerinin nakliyesini sağlamaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle, bilgi ve iletişim sistemleri gelişmiş, böylece dünyanın neresinde olunursa olunsun insanların tüketim ürünlerine en hızlı şekilde ulaşmayı istemesiyle sonuçlanmaktadır. Bunun sonucunda, konteyner gemilerinin mümkün olan en kısa sürede seferlerini tamamlamaları talebi doğrultusunda, seyir hızlarında artış talep edilmektedir. Fakat artan yakıt maliyetleri ve çevre koruma düzenlemeleri gemilerin hızlarında artışa engel olmaktadır. Bunun üstesinden gelebilmenin bir yolu, suda ilerlemesi sırasında daha az direnç ile karşılaşan gemi formlarının tasarlanması; diğeri ise, yenilikçi ve çevreci bir sistem olan paraşütlerin gemilere kurulumunun mümkün olan en kısa sürede yapılmasıdır. Ayrıca, yapılan gemi direnç analizlerine bakıldığında; gemilerdeki hız artışı, gerekli sevk sistemi gücünü hız artış oranının küpüyle orantılı olacak şekilde artırmaktadır. Bu da, gemilerde seyir optimizasyonu problemini ortaya çıkarmakta ve bu problemin çözümü için, yeni emisyon kuralları çerçevesinde, tipik gemi hava durumu yönlendirme sisteminin dışına çıkmayı zorunlu kılmaktadır. Rüzgârın gemilerde alternatif enerji kaynağı olarak kullanımı düşünüldüğünde, seyir öncesinde yapılacak hava durumu tahmininin değerlendirmesiyle, gemi hızı ve rota tercihi gibi seyir parametreleri güncel veriler doğrultusunda uyarlanmalıdır. Bunu yaparken, yüzyıllar boyunca yelkenli gemilerin kullandığı ve dünyanın iklim özellikleri neticesinde ortaya çıkan ticari rüzgârların bulunduğu bölgeler öncelikli olarak değerlendirilmelidir. Hatta rota üzerindeki meteorolojik olayların önceden tahmin edilmesi sayesinde, sabit seyir hızı uygulamanın yanı sıra, çevre koşulları değerlendirilerek, seyir süresi boyunca farklı seyir hızları da kullanılmalıdır. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus; rota üzerindeki deniz durumu ve rüzgâr bilgisinin, mevcut gemi sevk sistemi teknik donanımı kapsamında irdelenmesi gerekliliğidir.

Kuzey Pasifik'te 30-50 derece enlemleri arasındaki hâkim rüzgârın batıdan doğuya esmesi sebebiyle, paraşüt sevk sistemi hakkındaki ilk değerlendirmeler yapıldığında, doğu-batı seferi için elde edilecek enerji tasarruf değerinin batı-doğu hattına göre çok daha aşağılarda kalacağı söylenebilmektedir. Fakat bu bölgede taşınan konteynerlerin

üçte ikisi doğu yönünde, kalan üçte biri ise batı yönünde taşınmaktadır. Bu ise, bir geminin aynı rota üzerinde gidiş-dönüş seferi için; doğuya olan yolculukta tam yüklü olması, batıya olan dönüş seferinde ise kısmi yüklü olması durumu meydana getirmektedir. Geminin tam yüklü olduğu koşul altında daha fazla enerji ihtiyacı olmakta ve deniz durumu da düşünüldüğünde, yıllık ortalama %10,25 enerji tasarrufu elde edilmektedir. Batıya olan seferde ise, kısmi yüklü geminin enerji ihtiyacının tam yüklü durumdan daha az olması sebebiyle doğal bir enerji tasarrufu söz konusudur. Bu sebeple, bu çalışma özelinde incelenen Yokohama-San Diego seferi için paraşüt yardımcı sevk sisteminin bu düzeyde bir ana makine yakıt tasarrufu potansiyeli, fosil yakıt kullanımını azaltma konusunda değerlendirilmelidir. Buna ilave olarak, incelenen transit konteyner nakli durumu dışında, ara durakları bulunan bir rotada yükleme-boşaltma operasyonlarının yapılması halinde ise; uğrak liman sefer planının rota üzerindeki çevre koşullarına, özellikle de rüzgâra göre yapılmasıyla paraşüt sevk sisteminden beklenen performansın artırılması sağlanacaktır.

Geleneksel içten yanmalı ana makineleri olan gemilerde, seyir planlaması genellikle emniyet, zaman ve enerji tasarrufu kriterleri göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Bu doğrultuda, seçilen iki liman arasında en kısa yol olan büyük daire seyri rota üzerindeki çevre koşullarının izin verdiği sürece tavsiye edilmekte olup, olumsuz hava şartlarından etkilenmemek için yaklaşık %4,6 daha uzun olan kerte seyri önerilmektedir. Olumsuz hava koşulları, geminin sadece seyir emniyetini zora sokmayıp, deniz yüzey dalgalarının oluşumunu tetikleyerek ana makine enerji ihtiyacını artırmaktadır. Bu da, paraşüt sistemlerden ek çekme kuvveti sağlamada olumlu etkisi olan yüksek rüzgâr hızının tercih edilmesi durumu ile çelişmekte ve paraşüt yardımcı sevk sistemlerinin en büyük dezavantajı oluşmaktadır. Rüzgâr hızı odaklı gemi servis hızının seçimi konusunda; seyir için ayrılan gün sayısı, personel giderleri, yıllık toplam sefer sayısı ve gemi işletimi sırasında değerlendirilmesi gereken diğer maliyet kalemleri üzerinde değerlendirme yapılmalıdır. Planlanan bir seferde %10 daha az yakıt tüketiminin sağlandığı durumda, gemi bünyesinde daha az yakıtın depolanmasıyla, geminin ticari yük taşıma kapasitesinde artış elde edilebilmekte ve geminin hizmette olduğu yıllar boyunca daha fazla gelir sağlanabilmektedir.

Bu araştırmanın konusu kapsamında, paraşüt yardımcı gemi sevk sistemlerinin tasarımı ve ön değerlendirmesi yapılırken irdelenmesi gereken değişkenler; paraşüt alanı, kesit formu ve eğrilik yarıçapı; çekme halatı uzunluğu; hareket sığası sebebiyle 8-şekilli yörünge şekli; paraşüt uçuş hızı ve azimut ve kalkıntı açıları gibi paraşüt kontrol açıları olarak ifade edilmektedir. Paraşüt alanı, gemi boyu ve hedeflenen enerji verimliliği düzeyi ile doğru orantılı olup, paraşüt alanının artması sonucunda daha fazla çekme kuvveti elde edilebilmesi dolayısıyla, gemi ile uyumlu olacak şekilde paraşüt alanı artırılmalıdır. Rüzgâr ile doğrudan etkileşimde bulunan paraşütlerin en kesit formlarının aerofoil özellikte olması gerektiği, havada yapmış olduğu dinamik hareketlerin emniyetli oluşunu sağlarken, paraşüt üzerine gelen rüzgârdan mümkün olan en üst düzeyde faydalanmayı sağlayacaktır. Paraşüt geometrilerinin tasarlanmasında, en temel fakat en hayati konu aerofoil kesitin beklentilere cevap verebilmesidir. Bu sebeple, kalkıntı açısı da göz önünde bulundurulduğunda, bileşke aerodinamik kuvvet katsayısının en fazla olduğu kesit formu tercih edilmelidir. Bu analizler yapılırken, modellenen paraşüte ait uygun eğrilik yarıçapı da kuvvet katsayıları ve paraşüt etrafındaki hava olayları göz önünde bulundurularak seçilmelidir. Çekme halatı uzunluğu, paraşütün uçuş irtifasını belirleyen en önemli unsur olması sebebiyle ve gemi güvertesinden yükseldikçe üniform ve daha hızlı esen rüzgâra erişilmesi sebebiyle, paraşüt kontrol ve salma/toplama mekanizmasının izin verdiği maksimum uzunluğa sahip olması tercih edilmelidir. Yalnız, bu değerlendirme yapılırken yeryüzünden yükseldikçe artan rüzgâr hızının 500 metrelik irtifaya kadar gerçekleşmekte olduğu unutulmamalıdır. 8-şekilli yörünge formunu belirlerken kullanılan hareket sığasının değişimi, paraşüt üzerinde meydana gelen toplam aerodinamik kuvvetleri ve dolayısıyla ek çekme kuvvetini doğrudan etkilemektedir. Hareket sığasının 20, 30 ve 40 derece olduğu durumlar bu çalışmada analiz edilmekte ve daralan hareket sığası faydalı kuvveti artırmaktadır. Buradan yola çıkarak, sıfır derecelik bir hareket sığası maksimum verimlilikte çalışacaktır. Fakat böyle bir sistemin sürdürülebilir ve emniyetli olduğu söylenememektedir. Bunun yerine, paraşüt sisteme ait paraşüt alanı, kalkıntı ve azimut açıları gibi diğer değişkenlerin de hesaba katılması sonucunda elde edilen verinin değerlendirilmesi gerekliliğidir. Ancak bu sayede sistemin geneli ile uyumlu çalışacak 8-şekilli yörünge formu belirlenebilmektedir. Paraşüt uçuş hızının artması, paraşüt üzerine yönelen havanın

efektif hızını artırarak sistemden daha fazla fayda sağlamayla sonuçlanmaktadır. Bu çalışmada ele alınan ve tavsiye edilen paraşüt hızı 27 m/s olup, ticari paraşüt sistem üreticilerinin de benimsediği bir değer olan 100 km/h'lik paraşüt hızına çok yakın bir değerdir. Yörünge modelinin sahip olduğu ve gemiye ilerleme yönünde çekme kuvvetinin aktarımında önemli bir rol oynayan azimut açısı, tercihen geminin merkez hattı doğrultusunda tutulmalıdır. Aksi takdirde, gemiye aktarılan yanal çekme kuvvetinin dümen sistemi tarafından tolere edilemediği durumda seyir emniyeti tehlikeye atılmaktadır. Paraşüt yardımcı sevk sistemli bir gemi inşa edilmeden veya mevcut bir gemi paraşüt sistem ile donatılmadan önce dümen sisteminin etkinliği ve sınırları analiz edilmelidir. Kalkıntı açısı konusuna değinildiğinde, çekme halatındaki gerilmenin gemi gövdesine aktarılması konusunda incelenmesi gereken bir husustur. Aerodinamik kuvvetleri, çekme yönünde maksimum düzeyde kullanabilmek için, kalkıntı açısının 0 derece olması gerekmektedir. Fakat böyle bir açısal konuma sahip çekme halatı ve paraşütün emniyetli çalışması sağlanamamaktadır. Gerek 8-şekilli yörünge üzerinde yapılan döngüsel hareketler, gerekse de rüzgâr ve dalganın gemi ve paraşüt sistemini doğrudan etkilemesi neticesinde kullanımı söz konusu olmamaktadır. Ayrıca, diğer bir uç açısal konum olan 90 derecelik kalkıntı açısı, paraşüt üzerinde meydana gelen kuvvetlerin çekme yönünde iletilememesi dolayısıyla kullanıma uygun değildir. Bunun yerine, emniyetli operasyonel süreçleri destekleyen belirli bir kalkıntı açısı seçimi gerekmektedir. Bu çalışmada, 30, 40 ve 50 derecelik kalkıntı açıları incelenmiş ve 30 derecelik kalkıntı açısının gemilere ek çekme kuvveti sağlayan paraşüt sistemlerde kullanımı, yapılan analizler sonucunda elde edilen bilgiler doğrultusunda, tavsiye edilmektedir.

Paraşüt yardımcı sevk sistemi bulunan bir gemide paraşüt sistemin verimliliğini artırmak için bir takım iyileştirmeler yapılabilir. Bunlar, mevcut kontrolcü mekanizmanın özelliklerini paraşüt yapısını önceden belirlenen 8-şekilli yörünge üzerinde tutmanın bir adım ötesine geçirerek, aynı paraşüt modelinin (genel yapıyı bozmadan) küçük farklılıklara sahip olacak şekilde farklı eğrilik yarıçapının olduğu modele dönüşümünün sağlanabilmesidir. Tasarlanacak ek kontrol sistemi sayesinde, paraşüt üzerinde meydana gelen aerodinamik kuvvetler sürekli bir izleme ve yönlendirme imkânına erişerek sistem verimliliği kontrol altına alınabilecektir. Buna ilave olarak, hava hareketleri nedeniyle yapısı bozulan paraşütün istenilen forma

dönüştürülmesi de bahsi geçen ek kontrol sistemi sayesinde yapılabilecektir. Paraşüt formu konusunda değinilecek diğer bir husus ise, farklı geometrik özellikteki paraşüt modellerinin gemide hazır bulundurulmasıyla birlikte; farklı gemi ve paraşüt çalışma koşullarının bulunduğu durumlar için alternatif tercihler yapabilmeye olanak sağlanacaktır. Paraşütün uçuş hareketlerinin dinamik olması, yani yörünge üzerinde açısız konumların sürekli olarak değişmesine bağılı olarak, elde edilen aerodinamik kuvvetlerde dalgalanmalar meydana gelerek döngüsel kuvvet oluşumu söz konusudur. Açısız konumların sürekli değişimi neticesinde daimi bir kuvvet tahmin süreci gerekmekte olup, örnek ana değerler için bu tahminler HAD yöntemi kullanılarak yapılmaktadır. Açısız değerlerin örnek değerlerin dışında olması durumunda ise, parametreleri iyi ayarlanmış (hedeflenen yakınsama kriterine uygun), Yapay Sinir Ağları modeli vb. ara değer tahmin algoritmaları kullanılmalıdır. Ayrıca bu algoritmalar, seyir planlaması sürecinde ilgili deniz ve kara personeline değerlendirilen meteorolojik koşulların paraşüt sistemine uygun olup olmadığına karar verme konusunda da yardımcı olmaktadır.

Yapılan bütün araştırma ve değerlendirmelerden elde edilen bu bilgi birikimi sayesinde, gelecek çalışmalarda; farklı üst yapı modeli (tam yüklü, kısmi yüklü koşullar), değişken seyir hızları ve sefer odaklı hava durumu tahmini (14-28 günlük meteorolojik tahminler) süreçlerinin birleştirildiğı ve bu sayede değerlendirmelerin yapıldığı bir yazılım sistemine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu konuda, ulusal ve yerli kaynakların kullanımını hedefleyen projeler, hatta doğrudan paraşüt sistemleri üzerine yoğunlaşmış bir araştırma ve geliştirme merkezinin kurulması, ülkemizin geleceğine katkı sağlayacağı düşünülerek tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abiodun, O. I., Jantan, A., Omolara, A. E., Dada, K. V., Mohamed, N. A. E. ve Arshad, H. (2018). State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey. *Heliyon*, 4(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00938>
- Acomi, N. ve Acomi, O. C. (2014). Improving the Voyage Energy Efficiency by Using EEOI. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 138, 531–536. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.07.234>
- Admiralty. (2004). *Ocean Passages for the World: NP 136* (Fifth Edit). United Kingdom Hydrographic Office.
- Adnanes, A. K. (2012). *Energy efficiency in marine vessels*. https://library.e.abb.com/public/9c632630a46c06dac1257a8a003ac7dc/ABBGenerations_16_Energy_efficiency_in_marine_vessels.pdf
- Agamez-Arias, A. del M. ve Moyano-Fuentes, J. (2017). Intermodal transport in freight distribution: a literature review. *Transport Reviews*, 37(6), 782–807. <https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1297868>
- Agarwal, A. K. (2007). Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(3), 233–271. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.08.003>
- Ahmed, M., Hably, A. ve Bacha, S. (2012). High altitude wind power systems: A survey on flexible power kites. *Proceedings - 2012 20th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2012*, 2085–2091. <https://doi.org/10.1109/ICEIMach.2012.6350170>
- Airseas. (12 Ocak 2022). *Seawing*. <https://www.airseas.com/seawing>
- Akpınar, E. K. ve Akpınar, S. (2005). An assessment on seasonal analysis of wind energy characteristics and wind turbine characteristics. *Energy Conversion and Management*, 46(11–12), 1848–1867. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.08.012>

- Alauzet, F., Frey, P. J., George, P. L. ve Mohammadi, B. (2007). 3D transient fixed point mesh adaptation for time-dependent problems: Application to CFD simulations. *Journal of Computational Physics*, 222(2), 592–623. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2006.08.012>
- Allal, A. A., Mansouri, K., Youssfi, M. ve Qbadou, M. (2018). Toward energy saving and environmental protection by implementation of autonomous ship. *19th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, 177–180. <https://doi.org/10.1109/MELCON.2018.8379089>
- Altosole, M., Dubbioso, G., Figari, M., Viviani, M., Michetti, S. ve Millerani Trapani, A. (2010). Simulation of the dynamic behaviour of a CODLAG propulsion plant. *RINA, Royal Institution of Naval Architects - Warship 2010: Advanced Technologies in Naval Design and Construction*, June, 109–115. <https://doi.org/10.3940/rina.ws.2010.13>
- Ammar, N. R. ve Seddiek, I. S. (2020). An environmental and economic analysis of emission reduction strategies for container ships with emphasis on the improved energy efficiency indexes. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(18), 23342–23355. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08861-7>
- Ammari, H. D. ve Al-Maaitah, A. (2003). Assessment of wind-generation potentiality in Jordan using the site effectiveness approach. *Energy*, 28(15), 1579–1592. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(03\)00152-X](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00152-X)
- An, K., Fung, J. C. H. ve Yim, S. H. L. (2013). Sensitivity of inflow boundary conditions on downstream wind and turbulence profiles through building obstacles using a CFD approach. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 115, 137–149. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.01.004>
- Ančić, I. ve Šestan, A. (2015). Influence of the required EEDI reduction factor on the CO₂ emission from bulk carriers. *Energy Policy*, 84, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.04.031>
- Ashrafi, M., Walker, T. R., Magnan, G. M., Adams, M. ve Acciaro, M. (2020). A

- review of corporate sustainability drivers in maritime ports: a multi-stakeholder perspective. *Maritime Policy and Management*, 47(8), 1027–1044. <https://doi.org/10.1080/03088839.2020.1736354>
- Aydin, M. ve Salci, A. (2008). Resistance characteristics of fishing boats series of ITU. *Marine Technology and SNAME News*, 45(04), 194–210.
- Ballini, F. ve Bozzo, R. (2015). Air pollution from ships in ports: The socio-economic benefit of cold-ironing technology. *Research in Transportation Business and Management*, 17(2015), 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2015.10.007>
- Ballini, Fabio, Ölçer, A., Brandt, J. ve Neumann, D. (2017). Health costs and economic impact of wind assisted ship propulsion. *Ocean Engineering*, 146(July), 477–485. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.09.014>
- Ballini, Fabio, Ölçer, A. I. ve Neumann, D. (2017). Health costs and economic impact of wind assisted ship propulsion. *Ocean Engineering*, 146(July), 477–485. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.09.014>
- Ballou, P. J. (2013). Ship energy efficiency management requires a total solution approach. *Marine Technology Society Journal*, 47(1), 83–95.
- Balsamo, F., Capasso, C., Lauria, D. ve Veneri, O. (2020). Optimal design and energy management of hybrid storage systems for marine propulsion applications. *Applied Energy*, 278(July). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115629>
- Barsan, E. ve Grosan, N. V. (2011). Kite towed ships and kite generated power-intuitive methods for reducing marine pollution. *14th International Congress of the International-Maritime-Association-of-the-Mediterranean (IMAM)*, 1113–1117.
- Batta, M. (2020). Machine Learning Algorithms - A Review. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 9(1), 381–386. <https://doi.org/10.21275/ART20203995>
- Baykal, R. (1991). *Gemilerde güç hesabı*. İTÜ Baskısı.

- Bencatel, R., Keerthivarman, S., Kolmanovsky, I. ve Girard, A. R. (2021). Full State Feedback Foiling Control for America's Cup Catamarans. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 29(1), 1–17. <https://doi.org/10.1109/TCST.2019.2955059>
- Bentin, M., Zastrau, D., Schlaak, M., Freye, D., Elsner, R. ve Kotzur, S. (2016). A New Routing Optimization Tool-influence of Wind and Waves on Fuel Consumption of Ships with and without Wind Assisted Ship Propulsion Systems. *Transportation Research Procedia*, 14, 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.051>
- Bertram, V. (2016). Practical Ship Hydrodynamics. In *Practical Ship Hydrodynamics* (2. Baskı). Butterworth-Heinemann.
- Beşikçi, E. B., Kececi, T., Arslan, O. ve Turan, O. (2016). An application of fuzzy-AHP to ship operational energy efficiency measures. *Ocean Engineering*, 121, 392–402. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.05.031>
- Bezdan, M., Erginer, E., Erkurt, O. ve Göksu, B. (2021). İkonografik Bilgiler Işığında İnşa Edilen Fenike Gemisinin İncelemesi. *Arkeoloji ve Sanat Dergisi*, 168.
- Bidaoui, H., El Abbassi, I., El Bouardi, A. ve Darcherif, A. (2019). Wind Speed Data Analysis Using Weibull and Rayleigh Distribution Functions, Case Study: Five Cities Northern Morocco. *Procedia Manufacturing*, 32, 786–793. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.286>
- Boviatsis, M. ve Tselentis, B. (2019). A comparative analysis between EU MRV and IMO DCS – the need to adopt a harmonised regulatory system. *16th International Conference on Environmental Science and Technology*.
- Britannica. (15 Şubat 2022). *Pacific Ocean*. <https://www.britannica.com/place/Pacific-Ocean>
- Brown, D. K. (1994). Powering of Warships. *Warship International*, 31(3), 234–258.
- Brown, T. M. ve Takada, H. (2017). Indicators of Marine Pollution in the North Pacific

- Ocean. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 73(2), 171–175.
<https://doi.org/10.1007/s00244-017-0424-7>
- Brynolf, S., Baldi, F. ve Johnson, H. (2016). Energy Efficiency and Fuel Changes to Reduce Environmental Impacts. K. Andersson (Ed.), *Shipping and the Environment* içinde (1–426). Springer Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49045-7>
- Cadalen, B., Griffon, F., Lanusse, P., Sabatier, J. ve Parlier, Y. (2018). Modelling and Control of a Tethered Kite In Dynamic Flight. *Journal of Sailing Technology*, 3(1), 1–24. <https://doi.org/10.5957/jst.2018.03>
- Cadalen, B., Lanusse, P., Sabatier, J., Griffon, F. ve Parlier, Y. (2018). Robust control of a tethered kite for ship propulsion. *2018 European Control Conference (ECC)*, 3065–3070.
- Cai, S., Mémin, E., Dérian, P. ve Xu, C. (2018). Motion estimation under location uncertainty for turbulent fluid flows. *Experiments in Fluids*, 59(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s00348-017-2458-z>
- Cairns, J., Vezza, M., Green, R. ve MacVicar, D. (2021). Numerical optimisation of a ship wind-assisted propulsion system using blowing and suction over a range of wind conditions. *Ocean Engineering*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109903>
- Çengel, Y. A. ve Cimbala, J. M. (2013). *Fluid Mechanics: Fundamentals And Applications* (3. Baskı). McGraw-Hill Higher Education.
- Cepeda, M. A. F., Assis, L. F., Marujo, L. G. ve Caprace, J. D. (2017). Effects of slow steaming strategies on a ship fleet. *Marine Systems and Ocean Technology*, 12(3), 178–186. <https://doi.org/10.1007/s40868-017-0033-3>
- Chaware, P. ve Sewatkar, C. M. (2018). Effects of tangential and radial velocity on fluid flow and heat transfer for flow through a pipe with twisted tape insert—laminar flow. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 43(9), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12046-018-0893-z>

- Chen, J. M., Hsieh, C. M. ve Liu, J. S. (2012). Possible influences of ENSO on winter shipping in the north pacific. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 23(4), 397–411. [https://doi.org/10.3319/TAO.2012.03.02.01\(A\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2012.03.02.01(A))
- Chou, T., Kosmas, V., Acciaro, M. ve Renken, K. (2021). A comeback of wind power in shipping: An economic and operational review on the wind-assisted ship propulsion technology. *Sustainability (Switzerland)*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/su13041880>
- Dadd, G. M., Hudson, D. A. ve Shenoi, R. A. (2010). Comparison of two kite force models with experiment. *Journal of Aircraft*, 47(1), 212–224. <https://doi.org/10.2514/1.44738>
- Dadd, G. M., Hudson, D. A. ve Shenoi, R. A. (2011). Determination of kite forces using three-dimensional flight trajectories for ship propulsion. *Renewable Energy*, 36(10), 2667–2678. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.027>
- Dapelo, D. ve Bridgeman, J. (2018). Euler-Lagrange Computational Fluid Dynamics simulation of a full-scale unconfined anaerobic digester for wastewater sludge treatment. *Advances in Engineering Software*, 117, 153–169. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.08.009>
- De Kat, J. O. ve Mouawad, J. (2019). Green ship technologies. In H. N. Psaraftis (Ed.), *Sustainable Shipping* (33–92). Springer Nature Switzerland AG. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04330-8_2
- Dekker, R., Bloemhof, J. ve Mallidis, I. (2012). Operations Research for green logistics - An overview of aspects, issues, contributions and challenges. *European Journal of Operational Research*, 219(3), 671–679. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.11.010>
- Dewan, M. H., Yaakob, O. ve Suzana, A. (2018). Barriers for adoption of energy efficiency operational measures in shipping industry. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 17(2), 169–193. <https://doi.org/10.1007/s13437-018-0138-3>
- Dongare, A. D., Kharde, R. R. ve Kachare, A. D. (2012). Introduction to Artificial

- Neural Network. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2(1), 189–194. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1082.1323verep=rep1vetype=pdf>
- Durante, D., Broglia, R., Diez, M., Olivieri, A., Campana, E. F. ve Stern, F. (2020). Accurate experimental benchmark study of a catamaran in regular and irregular head waves including uncertainty quantification. *Ocean Engineering*, 195, 106685. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106685>
- Fagiano, L., Milanese, M., Razza, V. ve Gerlero, I. (2010). Control of power kites for naval propulsion. *Proceedings of the 2010 American Control Conference, ACC 2010*, 4325–4330. <https://doi.org/10.1109/acc.2010.5530824>
- Faitar, C. ve Novac, I. (2016). A new approach on the upgrade of energetic system based on green energy. A complex comparative analysis of the EEDI and EEOI. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 145(4). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/145/4/042014>
- Fritz, F. (2013). Application of an Automated Kite System for Ship Propulsion and Power Generation. *Airborne Wind Energy içinde* (359–372). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39965-7>
- Galvez, A. ve Iglesias, A. (2013). A new iterative mutually coupled hybrid GA-PSO approach for curve fitting in manufacturing. *Applied Soft Computing*, 13(3), 1491–1504. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.05.030>
- Garbatov, Y. ve Georgiev, P. (2021). Risk-Based Conceptual Ship Design of a Bulk Carrier Accounting for Energy Efficiency Design Index (EEDI). *International Journal of Maritime Engineering*, 163(A1), 51–62. <https://doi.org/10.5750/ijme.v163ia1.5>
- Geertsma, R. D., Negenborn, R. R., Visser, K. ve Hopman, J. J. (2017). Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. *Applied Energy*, 194, 30–54. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.060>

- Geopoliticalfutures. (8 Şubat 2022). *Top Container Ship Trade Routes*.
<https://geopoliticalfutures.com/top-container-ship-trade-routes>
- Göksu, B. ve Erginer, K. E. (2022). Evaluation of the Canopy Curvature for a Kite Assisted Ship Propulsion System. *Naval Engineers Journal*, 134(1), 85–104.
- Goldsworthy, L. ve Goldsworthy, B. (2015). Modelling of ship engine exhaust emissions in ports and extensive coastal waters based on terrestrial AIS data - An Australian case study. *Environmental Modelling and Software*, 63, 45–60.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.009>
- Gonca, G. (2009). *Gemi Donatımında Detay Dizayn ve Modelleme*. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Gonzalez Aregall, M., Bergqvist, R. ve Monios, J. (2018). A global review of the hinterland dimension of green port strategies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 59(January), 23–34.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.12.013>
- Göksu, B. (2017). *Gemi Dizel Makinelerinde Planlı Bakım Sistemi Uygulamaları ve Arıza Modlarının Analizi*. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Grimmelius, H., de Vos, P., Krijgsman, M. ve van Deursen, E. (2011). Control of Hybrid Ship Drive Systems. *10th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries*, 1–15.
- Grosan, V. N. ve Barsan, E. (2013). Manoeuvrability and course stability of the kite towed ship under influence of the external factors. *15th International Congress of the International-Maritime-Association-of-the-Mediterranean (IMAM)*, 103–108.
- Gürsel, K. T., Taner, M., Ünsalan, D., Neşer, G. ve Altunsaray, E. (2020). Improving Resistance Properties of High-Speed Ships. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, 23(2), 8–18. <https://doi.org/10.21279/1454-864X-20-I2-001>
- Hall, K. C., Ekici, K., Thomas, J. P. ve Dowell, E. H. (2013). Harmonic balance

- methods applied to computational fluid dynamics problems. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 27(2), 52–67. <https://doi.org/10.1080/10618562.2012.742512>
- Hansen, J. F. ve Wendt, F. (2015). History and State of the Art in Commercial Electric Ship Propulsion, Integrated Power Systems, and Future Trends. *Proceedings of the IEEE*, 103(12), 2229–2242. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2458990>
- Hansen, S. ve Fradelos, S. (2018). An Integrated Vessel Performance System for Environmental Compliance. A. I. Ölçer (Ed.), *Trends and Challenges in Maritime Energy Management* içinde (185–198). Springer International Publishing AG. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74576-3_14
- Hanzu, R., Duse, A., Grosan, N. ve Varsami, C. (2015). New Perspectives for Marine Environment Protection Through Innovative Marine Propulsion Systems. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, VII(2), 62–65.
- Hasan, S. M. R. (2011). *Impact of EEDI on Ship Design and Hydrodynamics: A Study of the Energy Efficiency Design Index and Other Related Emission Control Indexes*. Chalmers University of Technology.
- Herdzik, J. (2011). Emissions from marine engines versus IMO certification and requirements of tier 3. *Journal of KONES*, 18(2), 161–167.
- Hoffmann, J. (2010). Shipping out of the economic crisis. *The Brown Journal of World Affairs*, 16(2), 121–130.
- Hsu, T. P., Chen, C. L. ve Hsieh, T. H. (2017). A Graphical Method for Great Circle Routes. *Polish Maritime Research*, 24(1), 12–21. <https://doi.org/10.1515/pomr-2017-0002>
- IMO. (2014). *Marine Environment Protection Committee (MEPC), 67th session, 13 to 17 October 2014*. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MEPC-67th-session.aspx>

- IMO. (2018). *Marine Environment Protection Committee (MEPC), 72nd session, 9-13 April 2018*.
<https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MEPC-72nd-session.aspx>
- IMO. (25 Kasım 2020). *Energy Efficiency and Greenhouse Gas Emissions*.
<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/AirPollution-Default.aspx>
- IMO. (2021). *Marine Environment Protection Committee (MEPC 76), 10 to 17 June 2021 (remote session)*.
<https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MEPC76meeting-summary.aspx>
- IMO. (15 Şubat 2022). *Energy Efficiency Measures, Energy Efficiency Design Index (EEDI)*. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx>
- Inal, O. B., Charpentier, J. F. ve Deniz, C. (2022). Hybrid power and propulsion systems for ships: Current status and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 111965. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111965>
- Insel, M., Gokcay, S. ve Saydam, A. Z. (2018). A Decision Support System for Energy Efficient Ship Propulsion. A. I. Ölçer (Ed.), *Trends and Challenges in Maritime Energy Management* içinde (143–155). Springer International Publishing AG. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74576-3_11
- Islam, H., Rahaman, M. M., Akimoto, H. ve Islam, M. R. (2017). Calm water resistance prediction of a container ship using reynolds averaged navier-stokes based solver. *Procedia Engineering*, 194, 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.112>
- Islam, M. R., Saidur, R. ve Rahim, N. A. (2011). Assessment of wind energy potentiality at Kudat and Labuan, Malaysia using Weibull distribution function. *Energy*, 36(2), 985–992. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.011>
- ITTC. (2014). *ITTC Symbols and Terminology List* (Issue September).

<https://ittc.info/media/4004/structured-list2014.pdf>

ITTC. (2017). ITTC – Recommended Procedures and Guidelines 7.5-02-02-01 Resistance Test. *International Towing Tank Conference*. ittc.info/media/1217/75-02-02-01.pdf

IWSA. (12 Ocak 2022). *Our Mission*. <https://www.wind-ship.org/en/what-we-do/mission/>

Izaguirre-Alza, P., Pérez-Rojas, L., Torres-Benayas, A. ve Pérez-Arribas, F. (2012). EU-CargoXpress: Wind Propulsion Concept. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 48, 1314–1323. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1107>

Jafarzadeh, S., Pedersen, E., Notti, E., Sala, A. ve Ellingsen, H. (2014). A Bond Graph Approach to Improve the Energy Efficiency of Ships. *Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.

Jannis, H. (2012). *The Technical and Economic Potential of Airborne Wind Energy*. Utrecht University.

Johnson, H. (2013). *Towards Understanding Energy Efficiency in Shipping*. Chalmers University of Technology.

Johnson, H. ve Styhre, L. (2015). Increased energy efficiency in short sea shipping through decreased time in port. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 71, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.11.008>

Joung, T.-H., Kang, S.-G., Lee, J.-K. ve Ahn, J. (2020). The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas(GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 4(1), 1–7. <https://doi.org/10.1080/25725084.2019.1707938>

Kafalı, K. (1994). *Gemi formunun statik ve dinamik esasları*. İTÜ Baskısı.

Kavvadias, K. C., Tosios, A. P. ve Maroulis, Z. B. (2010). Design of a combined heating, cooling and power system: Sizing, operation strategy selection and

- parametric analysis. *Energy Conversion and Management*, 51(4), 833–845.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.019>
- Kawabuchi, M., Kawakita, C., Mizokami, S., Higasa, S., Kodan, Y. ve Takano, S. (2011). CFD Predictions of Bubbly Flow around an Energy-saving Ship with Mitsubishi Air Lubrication System. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 48(1), 53–57. <http://www.mhi.co.jp/en/technology/review/pdf/e481/e481053.pdf>
- Kaya, A. Y. ve Erginer, K. E. (2021). An analysis of decision-making process of shipowners for implementing energy efficiency measures on existing ships: The case of Turkish maritime industry. *Ocean Engineering*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110001>
- Kennedy, J. J. (2014). A review of uncertainty in in situ measurements and data sets of sea surface temperature. *Reviews of Geophysics*, 52(1), 1–32. <https://doi.org/10.1029/88EO01108>
- Keskenler, M. F. ve Keskenler, E. F. (2017). Geçmişten Günümüze Yapay Sinir Ağları ve Tarihçesi. *Takvim-i Vekayi*, 5(2), 8–18. <https://dergipark.org.tr/takvim/issue/33375/346279>
- Kim, W. J., Van, S. H. ve Kim, D. H. (2001). Measurement of flows around modern commercial ship models. *Experiments in Fluids*, 31(5), 567–578. <https://doi.org/10.1007/s003480100332>
- Kobayashi, E., Hashimoto, H., Taniguchi, Y. ve Yoneda, S. (2015). Advanced optimized weather routing for an ocean-going vessel. *2015 International Association of Institutes of Navigation World Congress, IAIN 2015 - Proceedings, October*. <https://doi.org/10.1109/IAIN.2015.7352247>
- Kocal, T. (2020). Examination of the Operating Costs and Environmental Impact of Alternative Fuels Used in Ships. *Journal of Transportation and Logistics*, 5, 83–91. <https://doi.org/10.26650/jtl.2020.0020>
- Koenhardono, E. S., Djatmiko, E. B., Soeprijanto, A. ve Irawan, M. I. (2014). Neural network-based engine propeller matching (NN-EPM) for trimaran patrol ship.

- Applied Mechanics and Materials*, 493, 388–394.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.493.388>
- Konur, O. ve Erginer, E. (2016). Energy Efficiency Optimization Techniques for Solar Powered Boats. *The Second Global Conference on Innovation in Marine Technology and the Future of Maritime Transportation, October*, 356–367.
- Koumentakos, A. G. (2019). Developments in electric and green marine ships. *Applied System Innovation*, 2(4), 1–21. <https://doi.org/10.3390/asi2040034>
- Krenker, A., Bester, J. ve Kos, A. (2011). Introduction to the Artificial Neural Networks. *Artificial Neural Networks - Methodological Advances and Biomedical Applications*. <https://doi.org/10.5772/15751>
- Kumar, M., Raghuwanshi, N. S. ve Singh, R. (2011). Artificial neural networks approach in evapotranspiration modeling: A review. *Irrigation Science*, 29(1), 11–25. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0230-8>
- Kupras, L. K. ve van Keimpema, H. (1985). Microcomputer aids preliminary ship design. *International Shipbuilding Progress*, 32(368), 99–110.
- Kurniawan, A. (2016). A Review of Solar-Powered Boat Development. *IPTEK The Journal for Technology and Science*, 27(1). <https://doi.org/10.12962/j20882033.v27i1.761>
- Labeckas, G. ve Slavinskas, S. (2013). Performance and emission characteristics of a direct injection diesel engine operating on KDV synthetic diesel fuel. *Energy Conversion and Management*, 66, 173–188. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.10.004>
- Lähtenmäki-Uutela, A., Repka, S., Haukioja, T. ve Pohjola, T. (2017). How to recognize and measure the economic impacts of environmental regulation: The Sulphur Emission Control Area case. *Journal of Cleaner Production*, 154, 553–565. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.224>
- Lai, K., Lun, V. Y. H., Wong, C. W. Y. ve Cheng, T. C. E. (2011). Green shipping

- practices in the shipping industry: Conceptualization, adoption, and implications. *Resources, Conservation ve Recycling*, 55(6), 631–638. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.12.004>
- Lau, Y. Y., Ng, A. K. Y., Fu, X. ve Li, K. X. (2013). Evolution and research trends of container shipping. *Maritime Policy and Management*, 40(7), 654–674. <https://doi.org/10.1080/03088839.2013.851459>
- Lee, K. J., Shin, D., Yoo, D. W., Choi, H. K. ve Kim, H. J. (2013). Hybrid photovoltaic/diesel green ship operating in standalone and grid-connected mode - Experimental investigation. *Energy*, 49(1), 475–483. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.004>
- Lele, A. ve Rao, K. V. S. (2016). Ship propulsion strategies by using wind energy. *International Conference on Emerging Technological Trends*.
- Leloup, R., Roncin, K., Behrel, M., Bles, G., Leroux, J. B., Jochum, C. ve Parlier, Y. (2016). A continuous and analytical modeling for kites as auxiliary propulsion devoted to merchant ships, including fuel saving estimation. *Renewable Energy*, 86, 483–496. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.036>
- Li, L., Zhou, B., Huang, H. ve Sun, H. (2021). Vortex generator design and numerical investigation for wake non-uniformity and cavitation fluctuation pressure reduction. *Ocean Engineering*, 229(March). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108965>
- LibertyKite. (12 Ocak 2022). *Shop*. <https://libertykite.com/en/the-liberty-kite/>
- Linke, A. (2009). Collision in a cross-shaped domain - A steady 2d Navier-Stokes example demonstrating the importance of mass conservation in CFD. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 198(41–44), 3278–3286. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2009.06.016>
- Lintermann, A. (2021). Computational Meshing for CFD Simulations. *Clinical and Biomedical Engineering in the Human Nose* içinde (85–115). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6716-2_6

- Litwin, W., Leśniewski, W. ve Kowalski, J. (2017). Energy Efficient and Environmentally Friendly Hybrid Conversion of Inland Passenger Vessel. *Polish Maritime Research*, 24(4), 77–84. <https://doi.org/10.1515/pomr-2017-0138>
- Luo, S., Ma, N. ve Hirakawa, Y. (2016). Evaluation of resistance increase and speed loss of a ship in wind and waves. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 1(3), 212–218. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2016.04.001>
- Maind, S. B. ve Wankar, P. (2014). Research Paper on Basic of Artificial Neural Network. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 2(1), 96–100.
- Malcevic, I. ve Ghattas, O. (2002). Dynamic-mesh finite element method for Lagrangian computational fluid dynamics. *Finite Elements in Analysis and Design*, 38(10), 965–982. [https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(02\)00088-4](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(02)00088-4)
- Manwell, J. F., McGowan, J. G. ve Rogers, A. L. (2010). *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley ve Sons.
- Marcu, D. C. ve Grava, C. (2021). The impact of activation functions on training and performance of a deep neural network. *2021 16th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems, EMES 2021 - Proceedings*, 4, 25–28. <https://doi.org/10.1109/EMES52337.2021.9484108>
- Marinetraffic. (1 Temmuz 2021). *MarineTraffic: Global Ship Tracking Intelligence*. <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx-%0A164.9centery42.8zoom4#>
- May, R., Dandy, G. ve Maier, H. (2011). Review of Input Variable Selection Methods for Artificial Neural Networks. *Artificial Neural Networks - Methodological Advances and Biomedical Applications*, 3. <https://doi.org/10.5772/16004>
- Mazraati, M. (2011). Challenges and prospects of international marine bunker fuels demand. *OPEC Energy Review*, 35(1), 1–26. <https://doi.org/10.1111/j.1753-0237.2010.00182.x>
- Meaden, G. T., Kochev, S., Kolendowicz, L., Kosa-Kiss, A., Marcinoniene, I., Sioutas,

- M., Tooming, H. ve Tyrrell, J. (2007). Comparing the theoretical versions of the Beaufort scale, the T-Scale and the Fujita scale. *Atmospheric Research*, 83(2-4 SPEC. ISS.), 446–449. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2005.11.014>
- MEPC. (2009). *MEPC.1/Circ.684 Guidelines for Voluntary Use of the Ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI)*. International Maritime Organization. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Technical and Operational Measures/MEPC.1_Circ.684_Guidelines for Voluntary use of EEOI.pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Technical%20and%20Operational%20Measures/MEPC.1_Circ.684_Guidelines%20for%20Voluntary%20use%20of%20EEOI.pdf)
- MEPC. (2011). *Amendments to the Annex of the Protocol Of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Technical and Operational Measures/Resolution MEPC.203\(62\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Technical%20and%20Operational%20Measures/Resolution%20MEPC.203(62).pdf)
- MEPC. (2016). *Resolution MEPC.282(70) 2016 Guidelines for the Development of a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)*. International Maritime Organization. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Resolutions/MEPC_282\(70\)_2016 Guidelines for the development of a SEEMP \(including Corrigendum\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Resolutions/MEPC_282(70)_2016%20Guidelines%20for%20the%20development%20of%20a%20SEEMP%20(including%20Corrigendum).pdf)
- Merk, O. (2018). Container Ship Size and Port Relocation. *International Transport Forum*. <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/d790ae41-en.pdf?expires=1650444154&eid=idveaccname=guestvechecksum=5F8C7D23AC87C843EF468DA68BCFA07C>
- MGM. (7 Ocak 2022). *Beaufort (bofor) rüzgâr ıskalası*. <https://www.mgm.gov.tr/FILES/genel/makale/beaufort.pdf>
- Mishra, M. ve Srivastava, M. (2014). A view of Artificial Neural Network. *IEEE International Conference on Advances in Engineering ve Technology Research (ICAETR - 2014)*, 8–10.
- Mogan, S. R. C., Chen, D., Hartwig, J. W., Sahin, I. ve Tafuni, A. (2018).

- Hydrodynamic analysis and optimization of the Titan submarine via the SPH and Finite-Volume methods. *Computers and Fluids*, 174, 271–282. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2018.08.014>
- Molland, A. F., Turnock, S. R. ve Hudson, D. A. (2017). Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power. *Analisis Standar Pelayanan Minimal Pada Instalasi Rawat Jalan di RSUD Kota Semarang*, 2. Baskı. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316494196>
- MSC. (2008). International Code on Intact Stability. *Resolution MSC.267(85)*.
- Naaijen, P., Koster, V. ve Dallinga, R. P. (2006). On the power savings by an auxiliary kite propulsion system. *International Shipbuilding Progress*, 53(4), 255–279.
- Nelissen, D., Traut, M., Kohler, J., Mao, W., Faber, J. ve Ahdour, S. (2016). *Study on the analysis of market potentials and market barriers for wind propulsion technologies for ships*.
- Nguyen, H. P., Hoang, A. T., Nizetic, S., Nguyen, X. P., Le, A. T., Luong, C. N., Chu, V. D. ve Pham, V. V. (2020). The electric propulsion system as a green solution for management strategy of CO2 emission in ocean shipping: A comprehensive review. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, July, 1–29. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12580>
- Nguyen, V. S., Im, N. K. ve Dao, Q. D. (2017). Azimuth method for ship position in celestial navigation. *International Journal of E-Navigation and Maritime Economy*, 7, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2017.06.006>
- Nielsen, R. F., Haglind, F. ve Larsen, U. (2014). Design and modeling of an advanced marine machinery system including waste heat recovery and removal of sulphur oxides. *Energy Conversion and Management*, 85(2014), 687–693. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.038>
- Nikbakht, S., Kamarian, S. ve Shakeri, M. (2019). A review on optimization of composite structures Part II: Functionally graded materials. *Composite Structures*, 214(December 2018), 83–102. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.105>

- Nuchturee, C., Li, T. ve Xia, H. (2020). Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110145>
- Odabasi, A. Y., Wallsend, T. ve Wear, N. (1983). Semi-Empirical Method for Wave Resistance Prediction. *The Proceedings of the Second DTNSRDC Workshop On Ship Wave-Resistance Computations*, 62–71.
- Odabaşı, A. Y. (1981). Hydrodynamic reaction to large amplitude rolling motion. *International Shipbuilding Progress*, 28(320), 74–82.
- Ogar, O. B., Nitonye, S. ve John-Hope, I. (2018). Design Analysis and Optimal Matching of a Controllable Pitch Propeller to the Hull and Diesel Engine of a CODOG System. *Journal of Power and Energy Engineering*, 6(3), 53–74. <https://doi.org/10.4236/jpee.2018.63005>
- Oliveira, P. C. M. ve Botter, R. C. (2018). Operational and cost based analysis of ship to ship—transshipment in Brazil: An application to the iron ore in the port of Santos. *Progress in Maritime Technology and Engineering* içinde (53–60).
- Ouchi, K., Uzawa, K., Kanai, A. ve Katori, M. (2013). Wind Challenger the Next Generation Hybrid Sailing Vessel. *International Symposium on Marine Propulsors*, May, 562–567. <http://www.marinepropulsors.com/proceedings/2013/11B.3.pdf>
- Ozdemir, Y. H., Cosgun, T., Dogrul, A. ve Barlas, B. (2016). A Numerical Application to Predict the Resistance and Wave Pattern of Kriso Container Ship. *Brodogradnja: Teorija i Praksa Brodogradnje i Pomorske Tehnike*, 67(2), 47–65.
- Paluszny, A., Matthäi, S. K. ve Hohmeyer, M. (2007). Hybrid finite element-finite volume discretization of complex geologic structures and a new simulation workflow demonstrated on fractured rocks. *Geofluids*, 7(2), 186–208. <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2007.00180.x>
- Papanikolaou, A., Harries, S., Wilken, M. ve Zaraphonitis, G. (2011). Integrated design and multiobjective optimization approach to ship design. *RINA, Royal Institution of Naval Architects - International Conference on Computer*

- Applications in Shipbuilding*, 3, 31–42. <https://doi.org/10.3940/rina.iccas.2011.50>
- Patel, K. S., Patel, S. B., Patel, U. B. ve Ahuja, A. P. (2014). CFD Analysis of an Aerofoil. *International Journal of Engineering Research*, 3(3), 154–158. http://www.ijer.in/ijer/publication/v3s3/IJER_2014_305.pdf
- Paulig, X., Bungart, M. ve Specht, B. (2013). Conceptual Design of Textile Kites Considering Overall System Performance. *Airborne Wind Energy* içinde (547–562). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39965-7>
- Peco. (20 Aralık 2021). *Harnessing the Wind*. <https://c03.apogee.net/mvc/home/hes/land/el?utilityname=peco2vespc=kidsveid=16214>
- Pereira, V. M., Brina, O., Marcos Gonzales, A., Narata, A. P., Bijlenga, P., Schaller, K., Lovblad, K. O. ve Ouared, R. (2013). Evaluation of the influence of inlet boundary conditions on computational fluid dynamics for intracranial aneurysms: A virtual experiment. *Journal of Biomechanics*, 46(9), 1531–1539. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2013.03.024>
- Perera, L. P. ve Mo, B. (2016). Data analysis on marine engine operating regions in relation to ship navigation. *Ocean Engineering*, 128(August), 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.10.029>
- Pérez Arribas, F. (2007). Some methods to obtain the added resistance of a ship advancing in waves. *Ocean Engineering*, 34(7), 946–955. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2006.06.002>
- Pergande, M., Wang, K., Neitzel-petersen, J. C. ve Abdel-maksoud, M. (2017). Efficient Prediction of Crashback Performance of Controllable Pitch Propellers. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Marine Propulsors, June*.
- Petkovic, M., Zubcic, M., Krcum, M. ve Pavic, I. (2021). Wind assisted ship propulsion technologies - Can they help in emissions reduction? *NAŠE MORE: Znanstveni Časopis Za More i Pomorstvo*, 68(2), 102–109. <https://doi.org/10.17818/NM/2021/2.6>

- Podeur, V., Merdrignac, D., Behrel, M., Roncin, K., Fonti, C., Jochum, C., Parlier, Y. ve Renaud, P. (2018). Fuel economy assessment tool for auxiliary kite propulsion of merchant ship. *La Houille Blanche*, 2018-Febru(1), 5–7. <https://doi.org/10.1051/lhb/2018001>
- Pope, K., Dincer, I. ve Naterer, G. F. (2010). Energy and exergy efficiency comparison of horizontal and vertical axis wind turbines. *Renewable Energy*, 35(9), 2102–2113. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.02.013>
- Prousalidis, J. M., Tsekouras, G. J. ve Kanellos, F. (2011). New challenges emerged from the development of more efficient electric energy generation units. *IEEE Electric Ship Technologies Symposium, ESTS 2011*, 374–381. <https://doi.org/10.1109/ESTS.2011.5770901>
- Prpić-Oršić, J., Vettor, R., Faltinsen, O. M. ve Guedes Soares, C. (2016). The influence of route choice and operating conditions on fuel consumption and CO2 emission of ships. *Journal of Marine Science and Technology (Japan)*, 21(3), 434–457. <https://doi.org/10.1007/s00773-015-0367-5>
- Qi, X., Jiao, J., Tang, T., Chu, Y. ve Shi, S. (2017). Study on optimize design of central cooling system. *2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, 1512–1515. <https://doi.org/10.1109/ITNEC.2017.8285048>
- Rahman, S. (2017). An Evaluation of the Energy Efficiency Design Index Baseline for Passenger Vessels of Bangladesh. *Journal of Marine Technology and Environment*, 2, 69–79.
- Ran, H., Janson, C. E. ve Allenström, B. (2013). Auxiliary kite propulsion contribution to ship thrust. *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 8, 1–9. <https://doi.org/10.1115/OMAE2013-11458>
- Rezaeiha, A., Montazeri, H. ve Blocken, B. (2019). On the accuracy of turbulence models for CFD simulations of vertical axis wind turbines. *Energy*, 180, 838–857. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.053>

- RicePropulsion. (12 Kasım 2021). *Ship Propulsion*. http://www.ricepropulsion.com/TNLS/ship_propulsion.htm
- Roncin, K., Behrel, M., Iachkine, P. ve Leroux, J. B. (2020). Benchmark sea trials on a 6-meter boat powered by kite. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(18). <https://doi.org/10.3390/APP10186148>
- Rutkowski, G. (2017). Study of Green Shipping Technologies - Harnessing Wind, Waves and Solar Power in New Generation Marine Propulsion Systems. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 10(4), 627–632. <https://doi.org/10.12716/1001.10.04.12>
- Ryabkova, M., Karaev, V., Guo, J. ve Titchenko, Y. (2019). A Review of Wave Spectrum Models as Applied to the Problem of Radar Probing of the Sea Surface. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(10), 7104–7134. <https://doi.org/10.1029/2018JC014804>
- Sabuncu, T. (1992). *Gemi Hareketleri* (2. Baskı). İTÜ Baskısı.
- Sampe, T. ve Xie, S. P. (2007). Mapping high sea winds from space: A global climatology. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(12), 1965–1978. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-12-1965>
- Sasaki, N., Kuroda, M., Fujisawa, J., Imoto, T. ve Sato, M. (2009). On the Model Tests and Design Method of Hybrid CRP Podded Propulsion System of a Feeder Container Ship. *First International Symposium on Marine Propulsors, June*. <https://www.marinepropulsors.com/proceedings/2009/TA2-1-Sasaki> - On the Model Tests and Design Method of Hybrid CRP Podd.pdf
- Sathya, R. ve Abraham, A. (2013). Comparison of Supervised and Unsupervised Learning Algorithms for Pattern Classification. *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence*, 2(2), 34–38. <https://doi.org/10.14569/ijarai.2013.020206>
- Scupi, A., Avital, E. J., Dinu, D., Williams, J. J. R. ve Munjiza, A. (2015). Large Eddy Simulation of Flows Around a Kite Used as an Auxiliary Propulsion System.

- Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 137(10), 1–8.
<https://doi.org/10.1115/1.4030482>
- Seddiek, I. S. ve Elgohary, M. M. (2014). Eco-friendly selection of ship emissions reduction strategies with emphasis on SO_x and NO_x emissions. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6(3), 737–748.
<https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0209>
- Şengöz, N. (25 Mart 2022). *Yapay Sinir Ağları*. Derinogrenme.Com.
<https://www.derinogrenme.com/2017/03/04/yapay-sinir-aglari/>
- Seo, S., Park, S. ve Koo, B. Y. (2017). Effect of wave periods on added resistance and motions of a ship in head sea simulations. *Ocean Engineering*, 137(April), 309–327. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.04.009>
- Seok, J. ve Park, J. C. (2020). Comparative study of air resistance with and without a superstructure on a container ship using numerical simulation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/JMSE8040267>
- Sherbaz, S. ve Duan, W. (2014). Ship trim optimization: Assessment of influence of trim on resistance of MOERI container ship. *The Scientific World Journal*.
<https://doi.org/10.1155/2014/603695>
- Shi, Y. (2016). Reducing greenhouse gas emissions from international shipping: Is it time to consider market-based measures? *Marine Policy*, 64, 123–134.
<https://doi.org/10.1016/j.marpol.2015.11.013>
- Shrestha, A. ve Mahmood, A. (2019). Review of deep learning algorithms and architectures. *IEEE Access*, 7, 53040–53065.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2912200>
- Singh, A., Thakur, N. ve Sharma, A. (2016). A review of supervised machine learning algorithms. *2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, 1310–1315.
- Skysails. (12 Aralık 2017). *Kite drive for yachts*. <https://skysails-group.com/wp->

content/uploads/2021/05/SkySailsYacht_Brochure_EN.pdf

SkySails. (17 Aralık 2021). *SkySails propulsion system: For cargo vessels*.
[https://skysails-group.com/wp-](https://skysails-group.com/wp-content/uploads/2021/05/SkySailsMarine_Brochure_EN_web.pdf)

content/uploads/2021/05/SkySailsMarine_Brochure_EN_web.pdf

SkyTug. (12 Ocak 2022). *Partners*. <https://www.skytug.co.uk/partners-1>

Smogeli, Ø. N. (2006). *Control of Marine Propellers*. Norwegian University of Science and Technology.

Soydan Oksal, N. G., Akoz, M. S. ve Simsek, O. (2020). Numerical modelling of trapezoidal weir flow with RANS, LES and DES models. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 45(1), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s12046-020-01332-2>

Stoll, R., Gibbs, J. A., Salesky, S. T., Anderson, W. ve Calaf, M. (2020). Large-Eddy Simulation of the Atmospheric Boundary Layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 177(2–3), 541–581. <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00556-3>

Sun, W., Hu, Q., Hu, S., Su, J., Xu, J., Wei, J. ve Huang, G. (2020). Numerical analysis of full-scale ship self-propulsion performance with direct comparison to statistical sea trial results. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/JMSE8010024>

Sunneland, J. ve Dufourq, M. S. G. (2018). *An alternative future for shipping – the way there: Risks and benefits of energy efficiency measures and alternative fuels for CO2 reduction in container ships*.

Suzuki, K. (2011). Artificial Neural Networks - Methodological Advances and Biomedical Applications. In *Artificial Neural Networks - Methodological Advances and Biomedical Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/644>

Svanberg, M., Ellis, J., Lundgren, J. ve Landälv, I. (2018). Renewable methanol as a fuel for the shipping industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94(June), 1217–1228. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.058>

- Takabatake, K. ve Sakai, M. (2020). Flexible discretization technique for DEM-CFD simulations including thin walls. *Advanced Powder Technology*, 31(5), 1825–1837. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.02.017>
- Takinaci, A. C. (2006). On the fairing of resistance test data: A software-based approach. *Ocean Engineering*, 33(17–18), 2260–2269. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2005.11.004>
- Takinaci, A. C. ve Atlar, M. (2002). Performance assessment of a concept propulsor: The thrust-balanced propeller. *Ocean Engineering*, 29(2), 129–149. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(01\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(01)00005-1)
- Takinaci, A. C. ve Önen, M. (2013). Low Engine Power - Less Emission. *Atmosphere* 2013.
- Talluri, L., Nalianda, D. K., Kyprianidis, K. G., Nikolaidis, T. ve Pilidis, P. (2016). Techno economic and environmental assessment of wind assisted marine propulsion systems. *Ocean Engineering*, 121, 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.05.047>
- Terziev, M., Tezdogan, T. ve Incecik, A. (2019). A geosim analysis of ship resistance decomposition and scale effects with the aid of CFD. *Applied Ocean Research*, 92(March). <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.101930>
- Tokuşlu, A. (2020). Analyzing the Energy Efficiency Design Index (EEDI) Performance of a Container Ship. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 7(2), 114–119. <https://doi.org/10.30897/ijegeo>
- Tran, N. K. ve Haasis, H. D. (2015). An empirical study of fleet expansion and growth of ship size in container liner shipping. *International Journal of Production Economics*, 159, 241–253. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.09.016>
- Traut, M., Gilbert, P., Walsh, C., Bows, A., Filippone, A., Stansby, P. ve Wood, R. (2014). Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes. *Applied Energy*, 113, 362–372. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.026>

- Tu, H., Yang, Y., Zhang, L., Xie, D., Lyu, X., Song, L., Guan, Y. min ve Sun, J. (2018). A modified admiralty coefficient for estimating power curves in EEDI calculations. *Ocean Engineering*, 150, 309–317. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.12.068>
- Tutar, M. ve Hold, A. E. (2001). Computational modelling of flow around a circular cylinder in sub-critical flow regime with various turbulence models. In *International Journal for Numerical Methods in Fluids* (Vol. 35, Issue 7, 763–784). [https://doi.org/10.1002/1097-0363\(20010415\)35:7<763::AID-FLD112>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/1097-0363(20010415)35:7<763::AID-FLD112>3.0.CO;2-S)
- Tzannatos, E. (2010). Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus - Greece. *Atmospheric Environment*, 44(3), 400–407. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.10.024>
- UNCTAD. (2018). Review of Maritime Transport 2018 Report. In *United Nations Conference on Trade and Development*. <https://unctad.org/webflyer/review-maritime-transport-2018>
- UNCTAD. (2019). Review of Maritime Transport 2019 Report. In *United Nations Conference on Trade and Development*. <https://doi.org/10.7225/toms.v10.n01.009>
- UNCTAD. (2020). *Review of Maritime Transport 2020 Report*. <https://doi.org/10.18356/edeca49a-en>
- UNCTAD. (2021). Review of Maritime Report 2021. In *United Nations Conference on Trade and Development*. http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2015_en.pdf
- Vakili, S., Ölçer, A. I. ve Ballini, F. (2021). The development of a transdisciplinary policy framework for shipping companies to mitigate underwater noise pollution from commercial vessels. *Marine Pollution Bulletin*, 171(May). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112687>
- van der Vlugt, R., Peschel, J. ve Schmehl, R. (2013). Design and Experimental Characterization of a Pumping Kite Power System. *Airborne wind energy içinde* (403–425). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39965-7>

- VardMarine. (9 Kasım 2021). *Ship Model Testing*.
<https://vardmarine.com/services/ship-model-testing/>
- Vaz, G., Waals, O. J., Ottens, H., Fathi, F., Souëf, T. Le ve Kiu, K. (2009). Current affairs: Model tests, semi-empirical predictions and CFD computations for current coefficients of semi-submersibles. *Proceedings of the ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.
- Veribilimcisi. (5 Ocak 2022). *Yapay Sinir Ağları (Neural Network)*.
<https://veribilimcisi.com/2017/08/13/yapay-sinir-aglari/>
- Viola, I. M., Sacher, M., Xu, J. ve Wang, F. (2015). A numerical method for the design of ships with wind-assisted propulsion. *Ocean Engineering*, 105(2015), 33–42.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.06.009>
- Wais, P. (2017). A review of Weibull functions in wind sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70(September 2016), 1099–1107.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.014>
- Wang, K., Yan, X., Yuan, Y. ve Li, F. (2016). Real-time optimization of ship energy efficiency based on the prediction technology of working condition. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 46, 81–93.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.03.014>
- Wang, Shihao. (2021). Research on Marine Photovoltaic Grid-connected System Based on Super Capacitor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 680(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/680/1/012016>
- Wang, Shuguang, Lam, W. H., Cui, Y., Zhang, T., Jiang, J., Sun, C., Guo, J., Ma, Y. ve Hamill, G. (2019). Semi-empirical wake structure model of rotors using joint axial momentum theory and DES-SA method. *Ocean Engineering*, 191(October).
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106525>
- Wang, X., Lin, X. ve Dang, X. (2020). Supervised learning in spiking neural networks: A review of algorithms and evaluations. *Neural Networks*, 125, 258–280.
<https://doi.org/10.1016/j.neunet.2020.02.011>

- Watson, D. G. M. (2002). *Practical Ship Design* (R. Bhattacharyya ve M. E. McCornick (Ed.); Vol. 1). Elsevier.
- Weintrit, A. ve Kopacz, P. (2011). A Novel Approach to Loxodrome (Rhumb Line), Orthodrome (Great Circle) and Geodesic Line in ECDIS and Navigation in General. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 5(4), 123–132. <https://doi.org/10.1201/b11344-21>
- Wellicome, J. F. ve Wilkinson, S. (1984). *Ship Propulsion Kites: An Initial Study*. University of Southampton Department of Ship Science.
- Wen, Y., Geng, X., Wu, L., Yip, T. L., Huang, L. ve Wu, D. (2017). Green routing design in short seas. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 9(3), 371–390. <https://doi.org/10.1504/IJSTL.2017.083474>
- Wilamowski, B. M. (2009). Neural network architectures and learning algorithms. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 3(4), 56–63. <https://doi.org/10.1109/MIE.2009.934790>
- Windfinder. (14 Şubat 2022). *Wind forecast for North pacific Ocean*. <https://www.windfinder.com/#4/42.3910/-159.1699>
- Windy.app. (9 Şubat 2022). *North Pacific Ocean, Asia: weather statistics and wind history*. <https://windy.app/forecast2/spot/598109/North+Pacific+Ocean%2C+Asia/statistics#?>
- Windy. (14 Şubat 2022). *Windy.com*. <https://www.windy.com/tr/-Dalgalar-waves?waves,2022021900,21.085,-162.773,4>
- Wingit. (12 Kasım 2021). *Wing Commander RC Manual*. <http://www.kite-boat-systems.com/download/ManualWingCommanderRC.pdf>
- Wu, P. ve Bucknall, R. (2020). Hybrid fuel cell and battery propulsion system modelling and multi-objective optimisation for a coastal ferry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(4), 3193–3208.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.152>

- Wu, X., Zhang, L. ve Luo, M. (2020). Current strategic planning for sustainability in international shipping. *Environment, Development and Sustainability*, 22(3), 1729–1747. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-00303-2>
- Xing, H., Stuart, C., Spence, S. ve Chen, H. (2021). Alternative fuel options for low carbon maritime transportation: Pathways to 2050. *Journal of Cleaner Production*, 297(April 2018), 126651. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126651>
- Xsens. (21 Aralık 2021). *Kitepower 2.0 - Airborne Wind Energy at its finest*. <https://www.xsens.com/cases/kitepower-2-0-airborne-wind-energy-at-its-finest>
- Yiğit, K. (2018). Gemi Teknolojisinde Alternatif Enerji Sistemlerinin Kullanım Potansiyelinin İncelenmesi. *GMO Journal of Ship and Marine Technology Journal*, 214(December), 5–18.
- Yılmaz, T. (2008). *Gemi Mühendisliği El Kitabı*. Gemi Mühendisleri Odası Yayınları.
- Yu, J., Tang, G., Song, X., Yu, X., Qi, Y., Li, D. ve Zhang, Y. (2018). Ship arrival prediction and its value on daily container terminal operation. *Ocean Engineering*, 157(January), 73–86. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.038>
- Yuan, Y., Zhang, T., Shen, B., Yan, X. ve Long, T. (2018). A fuzzy logic energy management strategy for a photovoltaic/diesel/battery hybrid ship based on experimental database. *Energies*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/en11092211>
- Zaccone, R., Ottaviani, E., Figari, M. ve Altosole, M. (2018). Ship voyage optimization for safe and energy-efficient navigation: A dynamic programming approach. *Ocean Engineering*, 153(October 2017), 215–224. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.100>
- Zaidi, S., Ristea, M. ve Bocănete, P. (2014). Prediction of the towing force generated by a kite attached to a KVLCC2 tanker model. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2(3), 669–676. <https://doi.org/10.5593/sgem2014/b32/s15.088>

- Zawawi, M. H., Saleha, A., Salwa, A., Hassan, N. H., Zahari, N. M., Ramli, M. Z. ve Muda, Z. C. (2018). A review: Fundamentals of computational fluid dynamics (CFD). *AIP Conference Proceedings*, 2030, 020252. <https://doi.org/10.1063/1.5066893>
- Zhang, P., Lozano, J. ve Wang, Y. (2021). Using Flettner Rotors and Parafoil as alternative propulsion systems for bulk carriers. *Journal of Cleaner Production*, 317(1), 128418. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128418>
- Zhao, F., Yang, W., Tan, W. W., Chou, S. K. ve Yu, W. (2015). An Overall Ship Propulsion Model for Fuel Efficiency Study. *Energy Procedia*, 75(65), 813–818. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.139>
- Zhen, L., Zhuge, D., Murong, L., Yan, R. ve Wang, S. (2019). Operation management of green ports and shipping networks: overview and research opportunities. *Frontiers of Engineering Management*, 6(2), 152–162. <https://doi.org/10.1007/s42524-019-0027-2>
- Zhu, X. (2020). Research on Energy-Saving Technology of Ocean-Going Ship Electrical Equipment. *E3S Web of Conferences*, 204. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020402002>
- Zis, T., North, R. J., Angeloudis, P., Ochieng, W. Y. ve Bell, M. G. H. (2014). Evaluation of cold ironing and speed reduction policies to reduce ship emissions near and at ports. *Maritime Economics and Logistics*, 16(4), 371–398. <https://doi.org/10.1057/mel.2014.6>

EKLER

EK 1: Yörünge 1, 2 ve 3 için hesap adımı açısıl konum değerleri

Yörünge 1			Yörünge 2			Yörünge 3		
Konum	Azimut (derece)	Kalkıntı (derece)	Konum	Azimut (derece)	Kalkıntı (derece)	Konum	Azimut (derece)	Kalkıntı (derece)
1	1,24	30,63	1	1,55	30,53	1	3,72	30,98
2	3,44	31,68	2	4,69	31,59	2	7,82	32,06
3	5,77	32,55	3	7,93	32,53	3	12,03	32,97
4	8,23	32,61	4	11,29	32,98	4	16,24	33,19
5	9,44	30,89	5	13,89	31,63	5	18,77	30,91
6	9,26	28,76	6	13,69	28,84	6	16,26	28,1
7	7,54	27,36	7	10,86	27,52	7	12,25	27,78
8	5,21	27,7	8	7,69	27,82	8	8,26	28,23
9	3,02	28,54	9	4,61	28,56	9	4,29	28,98
10	0,89	29,55	10	1,54	29,49	10	0,31	29,92
11	-1,24	30,63	11	-1,55	30,53	11	-3,72	30,98
12	-3,44	31,68	12	-4,69	31,59	12	-7,82	32,06
13	-5,77	32,55	13	-7,93	32,53	13	-12,03	32,97
14	-8,23	32,61	14	-11,29	32,98	14	-16,24	33,19
15	-9,44	30,89	15	-13,89	31,63	15	-18,77	30,91
16	-9,26	28,76	16	-13,69	28,84	16	-16,26	28,1
17	-7,54	27,36	17	-10,86	27,52	17	-12,25	27,78
18	-5,21	27,7	18	-7,69	27,82	18	-8,26	28,23
19	-3,02	28,54	19	-4,61	28,56	19	-4,29	28,98
20	-0,89	29,55	20	-1,54	29,49	20	-0,31	29,92

EK 2: Yörünge 4, 5 ve 6 için hesap adımı açısıl konum değerleri

Yörünge 4			Yörünge 5			Yörünge 6		
Konum	Azimut (derece)	Kalkıntı (derece)	Konum	Azimut (derece)	Kalkıntı (derece)	Konum	Azimut (derece)	Kalkıntı (derece)
1	1,41	40,63	1	2,82	40,85	1	4,22	40,98
2	3,91	41,68	2	6,44	41,89	2	8,91	42,06
3	6,6	42,55	3	10,21	42,75	3	13,73	42,97
4	9,4	42,61	4	14	42,85	4	18,49	43,19
5	10,69	40,89	5	15,98	40,82	5	21,1	40,91
6	10,39	38,76	6	14,52	38,15	6	18,1	38,1
7	8,41	37,36	7	11,04	37,53	7	13,66	37,78
8	5,82	37,7	8	7,57	38,01	8	9,25	38,23
9	3,4	38,54	9	4,14	38,82	9	4,83	38,98
10	1,01	39,55	10	0,69	39,79	10	0,35	39,92
11	-1,41	40,63	11	-2,82	40,85	11	-4,22	40,98
12	-3,91	41,68	12	-6,44	41,89	12	-8,91	42,06
13	-6,6	42,55	13	-10,21	42,75	13	-13,73	42,97
14	-9,4	42,61	14	-14	42,85	14	-18,49	43,19
15	-10,69	40,89	15	-15,98	40,82	15	-21,1	40,91
16	-10,39	38,76	16	-14,52	38,15	16	-18,1	38,1
17	-8,41	37,36	17	-11,04	37,53	17	-13,66	37,78
18	-5,82	37,7	18	-7,57	38,01	18	-9,25	38,23
19	-3,4	38,54	19	-4,14	38,82	19	-4,83	38,98
20	-1,01	39,55	20	-0,69	39,79	20	-0,35	39,92

EK 3: Yörünge 7, 8 ve 9 için hesap adımı açısal konum değerleri

Yörünge 7			Yörünge 8			Yörünge 9		
Konum	Azimut (derece)	Kalkıntı (derece)	Konum	Azimut (derece)	Kalkıntı (derece)	Konum	Azimut (derece)	Kalkıntı (derece)
1	1,68	50,63	1	3,38	50,85	1	5,06	50,98
2	4,71	51,68	2	7,75	51,89	2	10,73	52,06
3	7,97	52,55	3	12,32	52,75	3	16,53	52,97
4	11,34	52,61	4	16,84	52,85	4	22,14	53,19
5	12,75	50,89	5	18,93	50,82	5	24,81	50,91
6	12,24	48,76	6	16,97	48,15	6	21,07	48,1
7	9,84	47,36	7	12,9	47,53	7	15,95	47,78
8	6,84	47,7	8	8,89	48,01	8	10,87	48,23
9	4,01	48,54	9	4,9	48,82	9	5,72	48,98
10	1,2	49,55	10	0,82	49,79	10	0,41	49,92
11	-1,68	50,63	11	-3,38	50,85	11	-5,06	50,98
12	-4,71	51,68	12	-7,75	51,89	12	-10,73	52,06
13	-7,97	52,55	13	-12,32	52,75	13	-16,53	52,97
14	-11,34	52,61	14	-16,84	52,85	14	-22,14	53,19
15	-12,75	50,89	15	-18,93	50,82	15	-24,81	50,91
16	-12,24	48,76	16	-16,97	48,15	16	-21,07	48,1
17	-9,84	47,36	17	-12,9	47,53	17	-15,95	47,78
18	-6,84	47,7	18	-8,89	48,01	18	-10,87	48,23
19	-4,01	48,54	19	-4,9	48,82	19	-5,72	48,98
20	-1,2	49,55	20	-0,82	49,79	20	-0,41	49,92

EK 4: Paraşütün Yörünge-2 üzerinde tam bir turu için örnek hesaplama-1

Konum	Tahmin edilen C_L	Tahmin edilen C_D	T_x [kN]	T_y [kN]	T_z [kN]
1	0,969	0,083	119,35	3,23	-70,41
2	0,961	0,082	116,47	9,56	-71,87
3	0,952	0,081	113,31	15,78	-72,97
4	0,939	0,079	111,34	22,23	-73,68
5	0,936	0,079	113,47	28,06	-72,00
6	0,956	0,081	118,91	28,96	-67,39
7	0,972	0,084	122,56	23,51	-65,02
8	0,976	0,084	123,41	16,66	-65,71
9	0,976	0,084	122,96	9,91	-67,15
10	0,973	0,084	121,60	3,27	-68,79
11	0,968	0,083	119,44	-3,23	-70,47
12	0,961	0,082	116,66	-9,57	-71,98
13	0,951	0,081	113,55	-15,82	-73,12
14	0,939	0,079	111,25	-22,21	-73,62
15	0,939	0,079	112,90	-27,92	-71,63
16	0,957	0,082	118,52	-28,87	-67,17
17	0,972	0,084	122,48	-23,50	-64,98
18	0,976	0,084	123,42	-16,66	-65,72
19	0,976	0,084	122,98	-9,92	-67,15
20	0,973	0,084	121,57	-3,27	-68,78
Ortalama	0,961	0,082	118,31	0,01	-69,48

* Seyir yönü (ψ): Kuzey (0°), Rüzgâr yönü (γ): 180° (Kuzeyli), $V_{rüzgar_{10}}=10$ m/s, $u_{gemi}=15$ knot, $\varphi=0^\circ$, $v_{paraşüt}=27$ m/s, $r=300$ m

EK 5: Paraşütün Yörünge-2 üzerinde tam bir turu için örnek hesaplama-2

Konum	Tahmin edilen C_L	Tahmin edilen C_D	T_x [kN]	T_y [kN]	T_z [kN]
1	0,726	0,054	123,70	3,35	-72,98
2	0,686	0,050	114,80	9,42	-70,84
3	0,648	0,045	106,49	14,83	-68,57
4	0,614	0,042	100,15	19,99	-66,27
5	0,597	0,040	98,83	24,44	-62,70
6	0,609	0,041	103,53	25,22	-58,68
7	0,642	0,045	111,03	21,30	-58,90
8	0,674	0,048	117,24	15,83	-62,43
9	0,704	0,052	122,34	9,86	-66,81
10	0,732	0,055	126,49	3,40	-71,56
11	0,758	0,058	129,61	-3,51	-76,46
12	0,781	0,061	131,78	-10,81	-81,31
13	0,802	0,063	133,41	-18,58	-85,91
14	0,823	0,065	135,85	-27,12	-89,89
15	0,851	0,069	142,42	-35,22	-90,36
16	0,873	0,071	150,43	-36,64	-85,26
17	0,864	0,070	151,60	-29,08	-80,43
18	0,837	0,067	147,11	-19,86	-78,33
19	0,804	0,063	140,46	-11,33	-76,70
20	0,766	0,059	132,47	-3,56	-74,94
Ortalama	0,740	0,056	125,99	-2,40	-73,97

* Seyir yönü (ψ): Kuzey (0°), Rüzgâr yönü (γ): 160° , $V_{rüzgar_10m}=10$ m/s, $u_{gemi}=15$ knot, $\varphi=0^\circ$, $v_{paraşüt}=27$ m/s, $r=300$ m

EK 6: Paraşütün Yörünge-2 üzerinde tam bir turu için örnek hesaplama-3

Konum	Tahmin edilen C_L	Tahmin edilen C_D	T_x [kN]	T_y [kN]	T_z [kN]
1	0,508	0,030	110,66	2,99	-65,29
2	0,483	0,028	103,47	8,49	-63,84
3	0,451	0,024	94,86	13,21	-61,08
4	0,408	0,020	84,81	16,93	-56,12
5	0,369	0,017	77,35	19,13	-49,08
6	0,376	0,017	81,05	19,74	-45,94
7	0,422	0,022	92,85	17,81	-49,26
8	0,460	0,025	101,93	13,76	-54,27
9	0,488	0,028	108,03	8,71	-58,99
10	0,510	0,030	112,27	3,02	-63,52
11	0,529	0,032	115,35	-3,12	-68,05
12	0,547	0,034	117,89	-9,67	-72,74
13	0,568	0,036	120,56	-16,79	-77,64
14	0,593	0,039	124,65	-24,88	-82,48
15	0,622	0,042	132,16	-32,68	-83,85
16	0,632	0,044	138,28	-33,68	-78,37
17	0,607	0,041	135,35	-25,97	-71,81
18	0,577	0,037	129,04	-17,42	-68,71
19	0,552	0,035	122,92	-9,91	-67,13
20	0,530	0,032	116,96	-3,14	-66,17
Ortalama	0,512	0,031	111,02	-2,67	-65,22

* Seyir yönü (ψ): Kuzey (0°), Rüzgâr yönü (γ): 140° , $V_{rüzgar_10m}=10$ m/s, $u_{gemi}=15$ knot, $\varphi=0^\circ$, $v_{paraşüt}=27$ m/s, $r=300$ m

EK 7: Paraşütün Yörünge-2 üzerinde tam bir turu için örnek hesaplama-4

Konum	Tahmin edilen C_L	Tahmin edilen C_D	T_x [kN]	T_y [kN]	T_z [kN]
1	0,281	0,008	69,91	1,89	-41,25
2	0,269	0,007	65,89	5,41	-40,66
3	0,341	0,014	82,12	11,44	-52,88
4	0,403	0,020	95,81	19,13	-63,40
5	0,443	0,024	106,01	26,22	-67,26
6	0,444	0,024	109,58	26,69	-62,10
7	0,403	0,020	101,48	19,47	-53,83
8	0,340	0,014	86,09	11,62	-45,84
9	0,268	0,007	67,74	5,46	-36,99
10	0,282	0,008	70,84	1,90	-40,08
11	0,350	0,015	87,12	-2,36	-51,40
12	0,407	0,020	99,94	-8,20	-61,67
13	0,451	0,024	109,20	-15,21	-70,32
14	0,486	0,028	116,04	-23,17	-76,78
15	0,509	0,030	122,44	-30,28	-77,68
16	0,511	0,030	126,70	-30,86	-71,81
17	0,489	0,028	123,81	-23,75	-65,68
18	0,455	0,025	115,62	-15,61	-61,56
19	0,410	0,020	103,80	-8,37	-56,68
20	0,351	0,015	88,27	-2,37	-49,94
Ortalama	0,395	0,019	97,42	-1,55	-57,39

* Seyir yönü (ψ): Kuzey (0°), Rüzgâr yönü (γ): 125° , $V_{rüzgar_10m}=10$ m/s, $u_{gemi}=15$ knot, $\varphi=0^\circ$, $v_{paraşüt}=27$ m/s, $r=300$ m