

GEMİ ve DENİZ TEKNOLOJİSİ

GMO JOURNAL OF SHIP AND MARINE TECHNOLOGY



TMMOB GEMİ MÜHENDİSLERİ ODASI

The Turkish Chamber of Naval Architects and Marine Engineers

GMO



**1 TEMMUZ
DENİZCİLİK VE KABOTAJ BAYRAMI
KUTLU OLSUN!**

**Happy 96th Anniversary of Turkish Maritime and Cabotage
Day, 01 July 2022!**



TMMOB GEMİ MÜHENDİSLERİ ODASI



Sahibi / Publisher:
TMMOB GEMİ MÜHENDİSLERİ ODASI
UCTEA, The Turkish Chamber of Naval Architects & Marine Engineers

İmtiyaz Sahibi / Owner
Ahmet UZUN

Baş Editör / Editor-in-Chief
Prof. Ahmet Dursun ALKAN PhD
Yıldız Technical University, Naval Arch. and Maritime
Faculty, Istanbul, Turkey

Yardımcı Editörler / Associate Editor
Asst. Prof. Onur USTA PhD
National Defense University, Turkish Naval Academy,
Istanbul, Turkey

Asst. Prof. Dursun Murat SEKBAN PhD
Karadeniz Technical University, Sürmene Faculty of
Marine Sciences, Trabzon, Turkey

Asst. Prof. Ali DOĞRUL PhD
National Defense University, Turkish Naval
Academy, Istanbul, Turkey

Teknik Editörler / Technical Editors
Res. Asst. Abdullah TÜRK
Karadeniz Technical University, Sürmene Faculty of
Marine Sciences, Trabzon, Turkey

Res. Asst. S. Aykut KORKMAZ
Dokuz Eylül University, Maritime Faculty, Izmir, Turkey

Yayın Sekreteri / Editorial Secretary
Tuğba AKTAŞ

Yönetim / Management

TMMOB GMO
Postane Mahallesi, Nil Sokak No: 39
34940 Tuzla, İstanbul, Türkiye
T : +90 216 447 40 30 - 31 -32
E-Mail: GMOShipMar@gmo.org.tr
<http://www.gmoshipmar.org>
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/gdt>

Yayın Türü / Publication Type / Sayı / Number
Sürelî Yayın (6 Aylık) / Periodical, 6 months
Sayı / Number : 221

Basıldığı Yer ve Tarih / Printed in / Date
Cenkler Matbaacılık Amb. San. Tic. Ltd. Şti.
Halil İbrahim Karaoğlanoğlu Cad.
Civan Sok. No: 7
Seyrantepe, 4 Levent, İstanbul, Türkiye
T: +90 212 283 02 77 – 264 18 21
www.cenkler.com
E-ISSN: 2651-530X ISSN: 1300-1973
Baskı Tarihi / Date of print : June 2022
Baskı Sayısı / Number of prints : 50



Değerli Meslektaşlar ve Okurlar,

Bu sayımızda ilgi çekici konuların çalışıldığı on adet makale yayınlıyoruz. Son yıllarda önemi artan açık deniz rüzgar enerjisi alanında iki makale yer almaktadır. İlk makalede Türkiye için açık deniz rüzgâr enerjisi potansiyelinin önemi vurgulanarak Dikili (İzmir) açıklarında yer alacak bir açık deniz rüzgâr çiftliğinin teknik açıdan kavramsal tasarımı sunulmaktadır. Diğer çalışmada iki yüzer rüzgâr türbini platformu üzerinden açık kaynaklı panel yöntemi kodlarına dair bir kıyaslama çalışması sunulmuştur.

Su altı deniz araçları ile ilgili iki makale yer almaktadır. Birinci makalede bir denizaltının manevra türevlerinin ve enine stabilitesi incelenmiştir. Denizaltıların havadan bağımsız tahrik sistemlerini inceleyen iki makale sunulmuştur. İlk makalede denizaltılarda kullanılan bir havadan bağımsız tahrik sisteminin termodinamik performans analizi gerçekleştirilmiştir. Diğer bir makalede ise denizaltıların havadan bağımsız tahrik sistemleri derleme bir çalışma olarak sunulmuştur. Gemi manevraları konusunda bir başka makalede bir su üstü deniz aracı azimut itcinin manevra karakteristikleri incelenmiştir. Otonom su üstü araçlar için çarpışma önleyici sistem önerisinin yapıldığı bir makale, eklemeli imalat teknolojilerinin deniz endüstrisi açısından değerlendirildiği iki ayrı makale ve Bodrum yat endüstrisini inceleyen bir makale yer almaktadır.

Bilimsel makale, mesleki ve teknik konuları raporlayan yazılarımızın dergimize güç katacağını belirtiyoruz. Bir sonraki sayımızı Aralık 2022 ayı sonunda çıkaracağız.

Sağlık ve mutluluklar dileriz.

Dear Colleagues and Readers,

In this issue, we publish ten articles on interesting topics. There are two articles in the field of offshore wind energy, which has gained importance in recent years. In the first article, the technical conceptual design of an offshore wind farm to be located off the coast of Dikili (Izmir) is presented, emphasizing the importance of offshore wind energy potential for Türkiye. In the other study, a comparison study of open source panel method codes over two floating wind turbine platforms is presented.

There are two articles about underwater marine vehicles. In the first article, the maneuvering derivatives and the transverse stability of a submarine are examined. There are two articles examining the air-independent propulsion systems for submarines are presented. In the first article, the thermodynamic performance analysis of an air-independent propulsion system used in submarines is presented. As a review article, the air-independent propulsion systems of submarines are studied. In another article, the maneuvering characteristics of the azimuth thruster in a surface vessel were examined. As regards the concerns of the remaining articles, an anti-collision system is proposed for autonomous surface vehicles, two separate articles in which additive manufacturing technologies are evaluated in terms of the needs of the marine industry, and an article that examines the analyses of Bodrum (Türkiye) yacht industry.

We are looking forward your valuable submissions including scientific articles, technical and professional reports for our next issue to be published at the end of December 2022.

We wish you a healthy and happy days.

Saygılarımızla / Regards.

Prof.Dr. Ahmet Dursun ALKAN - Baş Editör / Editor-in-Chief
Dr.Onur USTA - Yardımcı Editör / Deputy Editor
Dr. Dursun Murat SEKBAN - Yardımcı Editör / Deputy Editor
Dr. Ali DOĞRUL - Yardımcı Editör / Deputy Editor
Arş.Gör. / Res.Asst. Abdullah TÜRK - Teknik Editör / Technical Editor
Arş.Gör. / Res.Asst.Aykut KORKMAZ - Teknik Editör / Technical Editor

Gemi ve Deniz Teknolojisi (GDT) Dergisi; TMMOB Gemi Mühendisleri Odası'nın 1955 yılından beri yılda en az 2 kez yayımlanan, üyelerinin meslekle ilgili bilgilerini geliştirmeyi, gemi ve deniz teknolojilerine katkıda bulunmayı, özellikle sektörün ülke çıkarları yönünde gelişmesini ve teknolojik yeniliklerin duyurulmasını amaçlayan bir dergidir. GDT, uluslararası düzeyde, hakemli, çok disiplinli, alanında özgün çalışmalara yer veren bir bilimsel dergidir.

Dergide; başta Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri/Deniz Teknolojisi Mühendisliği olmak üzere, Denizcilik, Makine, Elektrik/Elektronik, Endüstri Mühendisliği alanlarında bilimsel nitelikli araştırma makaleleri, derlemeler, teknik notlar, kitap incelemeleri, editöre mektuplar ile konferans ve toplantıların genişletilmiş raporlarına yer verilmektedir. Dergide yer alan makaleler Türkçe veya İngilizce olarak yayımlanmaktadır.

Açık erişimli yayın politikası izleyen GDT Dergisi, değişik bilimsel bakış açılarını okuyucularına sunmaktadır. Dergide yayımlanan makalelerin bilim, içerik ve dil bakımından sorumluluğu yazarlarına aittir. Basın Ahlak Esasları, ulusal ve uluslararası etik kural ve mevzuatlarına uyulur. Doğrudan veya dolaylı olarak ifade edilen görüşler kurumun resmi görüşleri olarak görülmemelidir. Dergide, makale değerlendirme sürecinde çift-kör hakemlik sistemi kullanılmaktadır.

GMO Journal of Ship and Marine Technology (GMOShipMar); is a journal that has been published annually since 1955, aiming to improve its members' knowledge about the profession of ship and marine technologies, to develop the sector especially in the interests of the country and to announce technological innovations. GMOShipMar is an international, refereed, multidisciplinary scientific journal that has been published at least 2 times a year.

In the journal; scientific research articles, reviews, technical notes, book reviews, letters to the editor, and extended reports of conferences and meetings, particularly in Naval Architecture and Marine Engineering, Maritime Technology, Machinery, Electrical / Electronics, Industrial Engineering and other related sciences. Articles in the journal are published in Turkish or English.

Following Open Access Model of Publishing, GMOShipMar presents a variety of scientific viewpoints. The authors are responsible for the scientific, contextual, and linguistic aspects of the articles published in the journal. The views expressed or implied in this publication, unless otherwise noted, should not be interpreted as official positions of the institution. In the journal, double-blind review system, which means that both the reviewer and author identities are concealed from the reviewers, and vice versa, is used throughout the review process.

Makale göndermek için lütfen aşağıdaki DergiPark sistemimizi kullanınız / Please use our online system for paper submissions

www.dergipark.org.tr/en/pub/gdt/

International Day for Women in Maritime 2022



INTERNATIONAL DAY FOR
**WOMEN IN
MARITIME**
18 MAY



[\(https://www.imo.org/\)](https://www.imo.org/)

ALAN EDİTÖRLERİ / SECTION EDITORS

Naval Architecture

Prof. Alberto FRANCESCUTTO - University of Trieste, Trieste, Italy
Prof. Dr. Murat ÖZKÖK - Karadeniz Technical University, Istanbul, Turkey
Asst. Prof. Dr. Ziya SAYDAM - Piri Reis University, Istanbul, Turkey

Marine Hydrodynamics

Prof. Dr. Mehmet Ali BAYKAL - Gedik University, Istanbul, Turkey
Prof. Dr. Şakir BAL - Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey
Assoc. Prof. Dr. Yiğit Kemal DEMİREL - Strathclyde University, Glasgow, UK
Dr. Ersegun Deniz GEDİKLİ - University of Hawaii at Manoa, Hawaii, USA

Marine Engineering

Prof. Dr. Yasin ÜST - Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey
Assoc. Prof. Dr. Görkem KÖKKÜLÜNK - Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey
Assoc. Prof. Dr. Levent BİLGİLİ - Bandırma 17 Eylül Üniversitesi, Balıkesir, Turkey

Maritime Engineering

Prof. Dr. Ercan KÖSE - Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey
Prof. Dr. Özcan ARSLAN - Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey
Asst. Prof. Dr. Hasan ÖLMEZ - Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey

Offshore Technology

Prof. Dr. İsmail Hakkı HELVACIOĞLU - Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey
Assoc. Prof. Dr. Özgür Özgüç - Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey
Dr. İsmail Başaran - ABS, London, UK

Marine Electronics

Assoc. Prof. Dr. Fatih ERDEN - National Defence University, Istanbul, Turkey

Maritime Economics

Prof. Dr. Oral ERDOĞAN - Piri Reis University, Istanbul, Turkey

Energy and Environment

Prof. Dr. Bahri ŞAHİN - Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey
Prof. Dr. Adrian BEJAN - Duke University, North Carolina, USA
Asst. Prof. Dr. Ümit GÜNEŞ - Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey

YAZIM VE DİL EDİTÖRÜ / LANGUAGE EDITOR

Assoc. Prof. Dr. Yiğit Kemal DEMİREL - University of Strathclyde, Glasgow, Scotland

EDİTÖRLER KURULU / EDITORIAL BOARD

- Prof. Dr. Karin ANDERSSON - Chalmers University, Gothenburg, Sweden
Prof. Dr. Mehmet ATLAR - Strathclyde University, Glasgow, UK
Prof. Dr. Serdar BEJİ - Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey
Prof. Dr. Volker BERTRAM - DNV, Hamburg, Germany
Prof. Dr. M.Sander ÇALIŞAL - Piri Reis University, Istanbul, Turkey
Prof. Dr. Fahri ÇELİK - Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey
Prof. Dr. Bettar O. EL-MOCTAR - University of Duisburg-Essen, Duisburg, DE
Prof. Dr. Oral ERDOĞAN - Piri Reis University, Istanbul, Turkey
Prof. Dr. Odd M.FALTINSEN - NTNU, Trondheim, Norway
Prof. Dr. Ömer GÖREN - Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey
Prof. Dr. Oğuz Salim SÖĞÜT - Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey
Prof. Dr. Atilla İNCECİK - Strathclyde University, UK
Prof. Dr. Rumen KISHEV - Varna Technical University, Varna, Bulgaria
Prof. Dr. Abdi KÜKNER - Istanbul, Turkey
Prof. Dr. Emin KORKUT - Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey
Prof. Dr. Gökdeniz NEŞER - Dokuz Eylül University, İzmir, Turkey
Assoc.Prof. Dr. Ömer Kemal KINACI - Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey
Prof. Dr. Aykut ÖLÇER - World Maritime University, Malmö, Sweden
Prof. Dr. Süleyman ÖZKAYNAK - Piri Reis University, Istanbul, Turkey
Prof. Ing. Claudio PENSA - University of Naples "Federico II", Naples, Italy
Prof. Dr. Philippe RIGO - University of Liege, Liege, Belgium
Prof.Dr.Muzaffer FEYZİOĞLU - Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey
Prof. Dr. Ahmet TAŞDEMİR - Piri Reis University, Istanbul, Turkey
Prof. Ing.Giorgio TRINCAS - University of Trieste, Trieste, Italy
Prof. Dr. Osman TURAN - Strathclyde University, Glasgow, UK
Prof. Dr. Omar YAAKOB - Universiti Teknologi Malaysia, Johor, Malaysia
Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ - Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey
Prof. Dr. Oğuz Salim SÖĞÜT - Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey
Assoc.Prof.Dr. Veysel ALANKAYA - Istanbul, Turkey
Dr. Bekir ŞENER - Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey
Dr. Emrah ERGİNER - Dokuz Eylül University, Izmir, Turkey
Dr. Güner ÖZMEN - Dokuz Eylül University, Izmir, Turkey
Dr. Emre PEŞMAN - Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey
Dr. Tahsin TEZDOĞAN - Strathclyde University, Glasgow, UK
Dr. Serkan TÜRKMEN - Newcastle University, Newcastle, UK
Assoc.Prof.Dr. Uğur Oral ÜNAL - Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

- Dikili Açıklarında Bir Açık Deniz Rüzgâr Çiftliğinin Kavramsal Tasarımı** 7
A Conceptual Design of an Offshore Wind Farm off the Dikili Shores
Erdem Acar, Serdar Beji
(Araştırma Makalesi / Research Article)
- Bodrum Yat İnşa Sektörünün GZFT/PESTLE Analizi** 24
SWOT/PESTLE Analysis of the Bodrum Yacht Building Industry
Bülent İbrahim Turan, Mehmet Akman, Fuat Turan
(Araştırma Makalesi / Research Article)
- Darpa Denizaltı Modelinde Derinliğe Bağlı Olarak Değişen Hidrodinamik Manevra Türevlerinin ve Yatay Stabilitenin İncelenmesi** 42
An Investigation of Hydrodynamic Maneuvering Derivatives and Horizontal Stability of Darpa Suboff Depending on Depth
Furkan Çavdar, Şakir Bal
(Araştırma Makalesi / Research Article)
- Denizaltılarında Havadan Bağımsız Tahrik Sistemi Olarak Kullanılan MESMA Sisteminin Termodinamik Performans Analizi** 59
Thermodynamic Performance Analysis of the MESMA System Used as an Air-Independent Propulsion System in Submarines
İbrahim Özşarı
(Araştırma Makalesi / Research Article)
- Otonom Su Üstü Araçları için COLREG Kurallarını İçeren Çarpışma Önleyici Sistem** 75
A Collision Avoidance System Based on COLREGs Rules for Autonomous Surface Vessels
Gökhan Budak
(Araştırma Makalesi / Research Article)
- Açık Kaynaklı Panel Yöntemi Kodlarının Ticari Kod ile Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi** 86
Comparison and Evaluation of Open-Source Panel Method Codes against Commercial Codes
Muhammed Uçar, Emre Uzunoğlu, Elif Oğuz
(Araştırma Makalesi / Research Article)

- Dönebilir İtcinin Sert Hava Koşullarında Bir Balıkçı Gemisinin Manevra Kabiliyetine Etkisi** 109
The Effect of Azimuth Thruster on the Manoeuvring Ability of a Stern Trawler in Rough Weather Conditions
Ömer Kemal Kınacı, Kadir Sariöz, Ömer Gören, Aydın Sülüs
(Araştırma Makalesi / Research Article)
- Denizaltılarda Stirling Motor Temelli Havadan Bağımsız Tahrik Sistemlerinin (AIP) Değerlendirilmesi** 134
Assessment of Stirling Engine Based Air Independent Propulsion Systems in Submarines
Kadir Beytullah Gündüz, Yasemin Arıkan Özden
(Derleme / Review)
- Eklemeli İmalat Yöntemiyle Tekne İnşaatında Dolgu Yoğunluğu ve Örüntüsünün Mukavemet Üzerindeki Bileşik Etkisi** 163
The Effects of Infill Density and Pattern on the Strength of Marine Small Craft Building by Additive Manufacturing Method
Ayberk Sözen, Gökdeniz Neşer2
(Araştırma Makalesi / Research Article)
- Eklemeli İmalat Teknikleri ve Gemi İnşaatı Endüstrisindeki Potansiyeli** 178
Additive Manufacturing Techniques and Their Potential in the Shipbuilding Industry
Ali Alicioğlu, M. Erden Yıldızdağ
(Araştırma Makalesi / Research Article)

Dikili Açıklarında Bir Açık Deniz Rüzgâr Çiftliğinin Kavramsal Tasarımı

Erdem Acar ¹, Serdar Beji ²

^{1,2} Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

¹ acarerdem@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4645-2606

² (sorumlu yazar), sbeji@itu.edu.tr, 0000-0002-1927-9262

ÖZET

Bu çalışmada, Türkiye için açık deniz rüzgâr enerji potansiyelinin önemi vurgulanarak bir açık deniz rüzgâr çiftliğinin teknik açıdan kavramsal tasarımı sunulmaktadır. 640,000 m² büyüklüğünde bir alanı kapsayacak şekilde önerilen açık deniz rüzgâr çiftliği için seçilen yer Türkiye'nin Ege Denizi bölgesinde bir sahil kasabası olan Dikili'nin güneybatı kıyılarıdır. Rüzgâr türbini modeli, göbek yüksekliği 78 m olan Vestas V80-2.0 Offshore (IEC IIA sınıfı) tipi olarak tavsiye edilmekte olup, önerilen açık deniz rüzgâr çiftliğinin kurulu gücü 20 MW olacaktır. Şebeke bağlantı noktası, önerilen açık deniz rüzgâr çiftliğine en yakın ve en uygun yer olan Narlıdere Limanı olarak belirlenmiştir. Temel tipi ise su derinliği ve deniz tabanı koşulları dikkate alınarak tek kazıklı (mono-pile) temel olarak seçilmiştir. Önerilen açık deniz rüzgâr çiftliğinin yıllık tahmini ortalama enerji üretimi 72 GW olacaktır.

Anahtar kelimeler: Açık deniz rüzgâr enerjisi, açık deniz rüzgâr çiftlikleri, açık deniz rüzgâr çiftliği tasarımı

Makale geçmişi: Geliş 29/12/2021 – Kabul 23/03/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1050615>

A Conceptual Design of an Offshore Wind Farm off the Dikili Shores

Erdem Acar ¹, Serdar Beji ²

^{1,2} Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, Türkiye

¹ acarerdem@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4645-2606

² (corresponding author), sbeji@itu.edu.tr, 0000-0002-1927-9262

ABSTRACT

In this study, importance of the offshore wind energy potential for Turkey is emphasized by working out a technical conceptual design of an offshore wind farm (OWF). The site selected for the proposed OWF with an area of 640,000 m² is located in the southwestern shores of Dikili, a coastal town in the Aegean Sea region of Turkey. The wind turbine model recommended is Vestas V80 - 2.0 Offshore (IEC IIA class) type with a hub height of 78 m, hence the installed power of the OWF composed of ten units is 20 MW. The grid connection point is determined as the Port of Narlıdere, which is the nearest convenient place to the proposed OWF. The foundation type is selected as mono-pile foundation according to the water depth and seabed conditions. The proposed OWF is estimated to yield average annual energy of 72 GW.

Keywords: Offshore wind energy, offshore wind farms, design of an offshore wind farm

Article history: Received 29/12/2021 – Accepted 23/03/2022

1. Introduction

Presently, an appreciable number of onshore wind farms is realized in Turkey but as yet no offshore wind farm (OWF) is installed (Argin and Yerci, 2015). Conceptual design suggestions and feasibility studies on potential OWFs are also lacking. The purpose of this study is to emphasize the importance of offshore wind potential of Turkey and suggest a conceptual design case for the use of this potential. Accordingly, without considering environmental and financial aspects, a conceptual technical design of a potential OWF off the Dikili shores is presented by making exemplary use of the *Horns Rev I Wind Farm*, which is the first large-scale offshore wind farm in the world, located on the west coast of Denmark.

Turkey has a significant wind energy potential due to her available high power densities, especially in coastal areas. Compared to European countries, Turkey has the highest technical wind energy potential with 83 GW over the wind class 3 (Satir et al., 2017). The use of technical wind energy is considered economically viable up to wind class 3 (annual average wind speed of 6.4 - 7.0 m/s at 50 m height) (Hau, 2013). As can be observed from Figure 1 the Aegean Sea has wind speed profiles similar to the North Sea (above 8 m/s at 50 m height), where approximately 70% of offshore wind projects are located today. Despite the significant offshore wind capacity indicated by the European Environment Agency, Turkey is one of the countries that has not yet started to exploit this capacity. To pave the way, feasibility studies and possible conceptual design suggestions should be done first (Satir et al., 2017).

Figure 1 shows an overview of the annual average wind speed at 50 m height with a coverage area up to 50 km. Offshore wind projects are potentially feasible at wind speeds above 7 m/s; these areas are marked with orange and red. Offshore wind potential of Turkey is summarized below (World Bank Group, 2020):

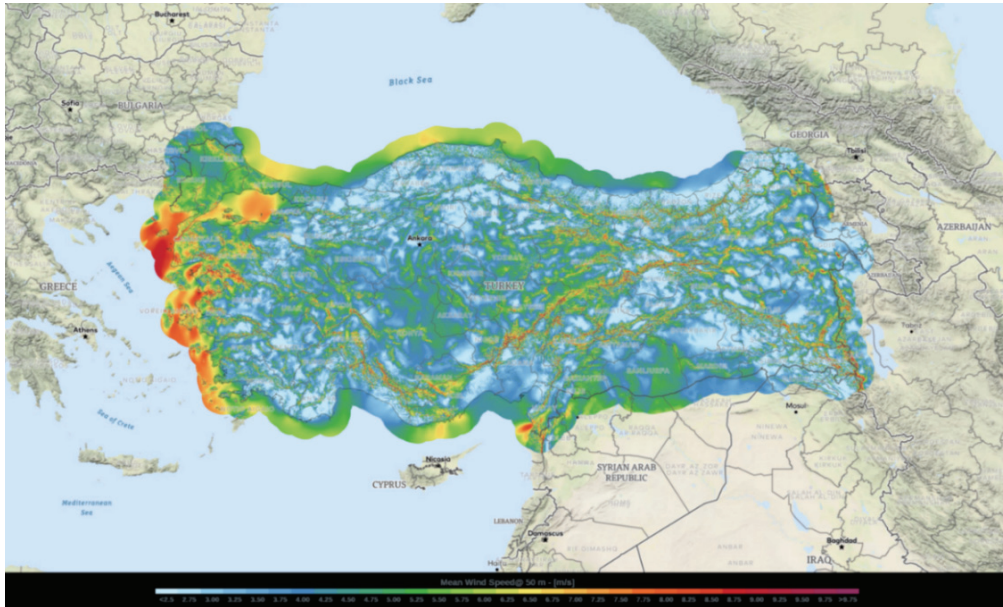


Figure 1. Annual average wind speed map of Turkey (Global Wind Atlas, 2020).

- The most suitable areas for offshore wind are in the northwest of the Aegean Sea where wind speeds reach up to 9 m/s.
- The Marmara Sea and the Black Sea have good wind speeds of 7 - 8 m/s.

- There are many opportunities on the west coast.
- The regions with water depth of less than 50 m have an offshore wind energy potential of 12 GW for bottom-fixed foundations.

2. Design Parameters for an Offshore Wind Farm

The lifecycle (estimated 25 years) of a typical OWF project consists of four stages (Aquaret, 2018):

- Design and planning,
- Construction and installation,
- Operation and maintenance,
- Decommissioning.

The design of an OWF process begins with a detailed assessment of the internal (size of wind farm, financing of project, potential locations) and the external (water depth, marine life, shipping routes, borders, grid connection, soil, restrictions) design conditions at the site of interest (Beji and Lützen, 2017). The following points must be decided for the design of an OWF:

1. A location for the wind farm,
2. The size and layout of wind farm,
3. The type, model and hub height of wind turbine,
4. The type of foundation.

We will be following this order in the technical design approach of the OWF off the Dikili shores.

2.1. Location

First, a suitable location must be determined (Aquaret, 2018). The site selected for the proposed OWF is the southwestern shores of Dikili, located in the Aegean region of Turkey, is a district of Izmir province. The location of the proposed OWF is opposite the Island of Karaada in the Bay of Narlıdere, the Gulf of Çandarlı as shown in Figure 2.

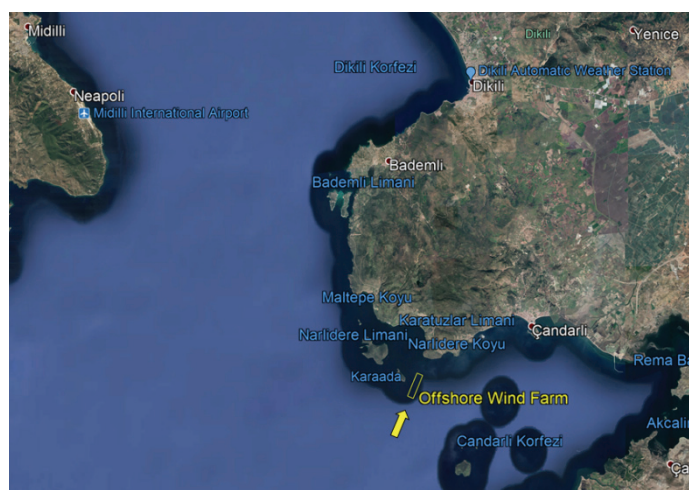


Figure 2. Location of the proposed offshore wind farm.

The minimum distance from the Dikili shores to the northwest corner of the proposed OWF is 1.16 km and the coordinates defining the boundaries of the proposed OWF as obtained from the Google Earth Pro are indicated in Figure 3.



Figure 3. Coordinates of the proposed offshore wind farm.

Northwest corner: 38°54'22.61"N 26°50'52.05"E

Northeast corner: 38°54'17.67"N 26°51'07.39"E

Southwest corner: 38°53'34.70"N 26°50'26.55"E

Southeast corner: 38°53'29.76"N 26°50'41.89"E

2.1.1. Criteria for selecting location

2.1.1.1. Wind potential

The wind speed at the selected location for an OWF must be within an acceptable range. Accurate and reliable wind data are required for a better assessment of the selected location. The wind data should include wind speed, wind direction, temperature and humidity information (Argin and Yerci, 2015).

Turkish State Meteorological Service is the governmental agency that provides wind data information only for onshore locations. There is no meteorological observation station in the seas of Turkey. The nearest meteorological observation station to the location of the proposed OWF is Dikili Automatic Weather Station, whose coordinates are 39°04'25.3"N 26°53'16.8"E (39.07°N 26.88°E) as indicated in Figure 1. Dikili Automatic Weather Station is 19.7 km from the center of the proposed OWF, whose coordinates are 38°53'56.18"N 26°50'46.97"E (38.89°N 26.84°E). On the other hand, Karaada with coordinates 38°54'00"N 26°50'24"E (38.90°N 26.84°E) is the nearest location to the proposed OWF; therefore, the wind data of Karaada, which could be obtained from the Meteoblue weather archive, is used for the proposed OWF. The Meteoblue provides high-quality local weather information for any location in the world, whether on land or at sea. The Meteoblue climate diagrams are based on hourly weather model simulations (Meteoblue, 2020).

The dominant wind direction in Karaada is North-North-East (NNE), as shown in Figure 4. The wind rose for Karaada is obtained from the Meteoblue climate diagrams. It indicates the hours per year the

wind (at 10 m height from the sea) blows from the indicated direction. NNE: Wind blows from NNE to South-South-West (SSW).

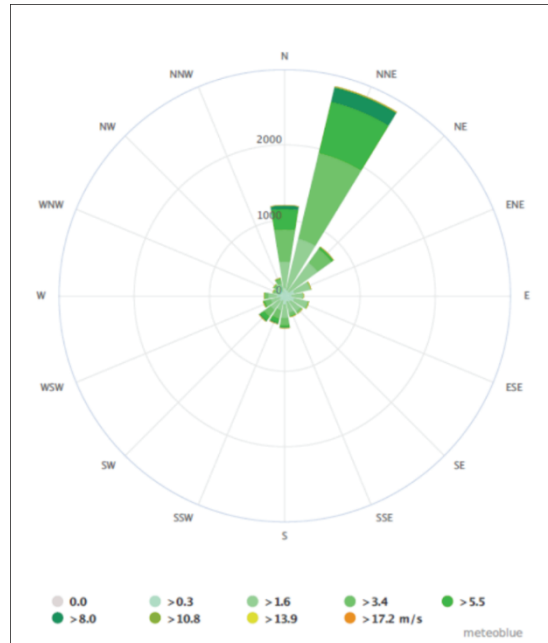


Figure 4. Wind rose for Karaada at 10 m height (Meteoblue, 2020).

The annual average wind speed is 8.75 m/s (at 50 m height) at the center of the proposed OWF, as shown in Figure 5. The annual average wind speed map of the southern shores of Dikili is obtained from the GWA. This wind data information gives the best possible estimate for the wind energy potential of the proposed OWF (GWA, 2020).

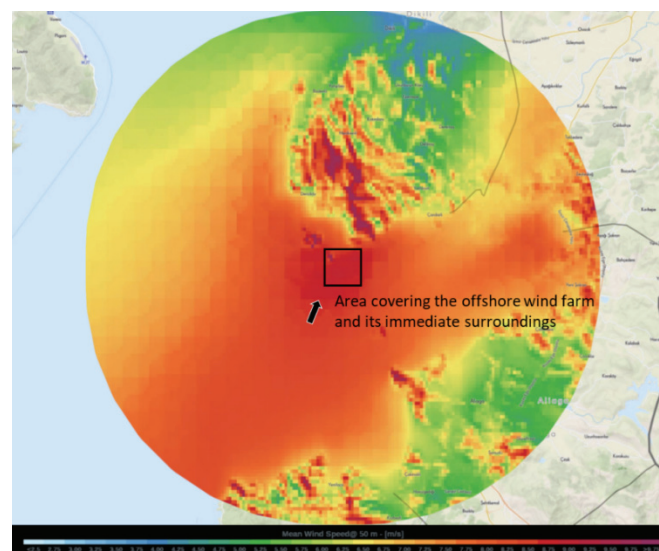


Figure 5. Annual average wind speed map of the southern shores of Dikili (GWA, 2020).

2.1.1.2. Territorial waters

In the Aegean Sea there are many Greek islands quite close to Turkey as can be observed in the map (Argin and Yerci, 2015) in Figure 6. The location of the proposed OWF is therefore determined to be in the territorial waters of Turkey to avoid problems concerning national borders.



Figure 6. Territorial waters of Turkey (red) and Greece (blue) in the Aegean Sea based on 6 nm and the location of the proposed OWF.

2.1.1.3. Civil aviation

The selected location for an OWF should not be in the vicinity of airports (Argin and Yerci, 2015). According to the Regulation on Communication, Navigation and Surveillance Systems Obstacle Criteria of the Directorate General of Civil Aviation; wind farms are required to be installed at least 2 km away from airports air/ground communication stations and at least 15 km away from navigation aid systems. The location of the proposed OWF fulfills this requirement comfortably as the nearest airport, Midilli International Airport, is approximately 25 km away.

2.1.1.4. Marine traffic

The selected location for an OWF should be away from heavy marine traffic (Argin and Yerci, 2015). According to the free maps showing marine transport routes in the Aegean Sea, the major maritime routes in the Aegean Sea are not close to the proposed OWF. Local maritime traffic and the mooring areas should be carefully checked with information to be obtained from the Office of Navigation, Hydrography and Oceanography before the installation phase. But during the design phase, this requirement is fulfilled as the location of the proposed OWF is off the shipping routes.

2.1.1.5. Submarine pipelines and cable lines

The selected location for an OWF should not be on submarine pipelines and cable lines (Argin and Yerci, 2015). A check, using the Annual Notices to Mariners publication of the Office of Navigation, Hydrography and Oceanography concerning submarine pipelines and cable lines reveals that the proposed OWF is outside such a region.

2.2. Wind Farm Layout

The layout of wind turbines in a wind farm requires many considerations like turbine wake effects, ambient wind, available area, environmental restrictions, and visibility (Beji and Lützen, 2017). In an OWF the closer the turbines are placed together, the lower the cost of the power cables is. However, closer spacing increases turbulence and energy losses associated with turbine wakes, which in turn results in less power generation (depending upon topology, wind climate, etc.) and higher maintenance cost. Compared to the land-based turbines the offshore turbines can be larger (an advantage of lower ambient turbulence) and accordingly larger turbine spacing (5 - 8 rotor diameters) is needed (Manwell, 2013; Dalén, 2013). Keeping these points in mind the present wind farm area is planned as ten units offshore wind turbine (OWT) facing the NNE direction in two rows, with five wind turbines per row. The layout of wind turbines in the wind farm area is shown in Figure 7.

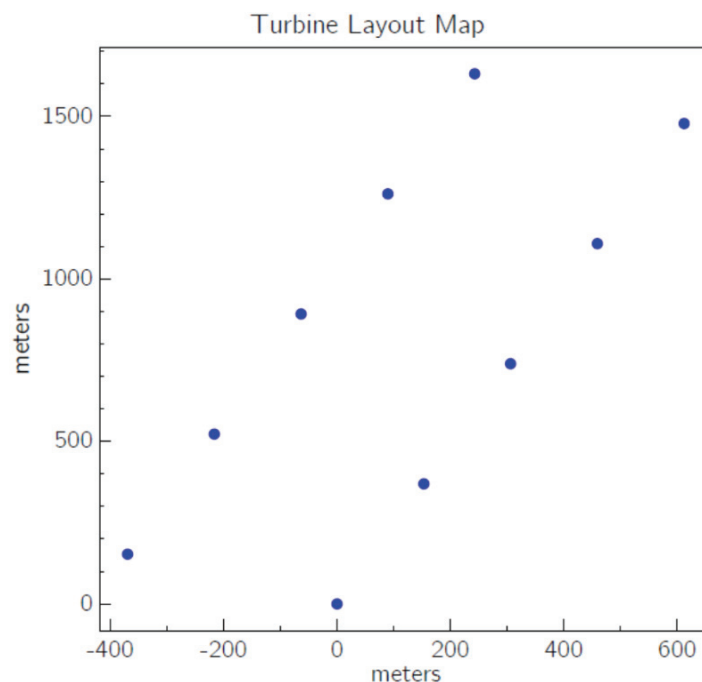


Figure 7. Turbine layout map of the proposed offshore wind farm (SAM, 2019).

- Number of rows = 2 (in the NNE-SSW axis)
- Turbines per row = 5 (facing the NNE direction)
- Row spacing = 400 m (5 rotor diameters)
- Turbine spacing = 400 m (5 rotor diameters)
- Size of the wind farm (with 10 turbines) = 400 x 1600 m = 640,000 m²

2.3. Wind Turbine

It is crucial to select the appropriate OWT model. Although offshore wind speeds are generally higher than onshore, this factor have prevented land-based turbines from being used offshore in the past. There are many differences between offshore turbines and land-based turbines. (Aquaret, 2018).

Several OWT manufacturers are on the market. Siemens Gamesa Renewable Energy is the current market leader with 69% of the total installed OWTs. MHI Vestas Offshore Wind is the second turbine manufacturer with 24%, followed by Senvion with 5%. These three manufacturers represent 98% of all OWTs installed in Europe at the end of 2018 (Wind Europe, 2019).

The selected wind turbine for the proposed OWF is *Vestas V80 - 2.0 Offshore* (78 m hub height). Figure 8 is a photograph of these turbines (Hau, 2013) while Figure 9 is the power curve of this particular turbine (SAM, 2019). Main parameters of the turbine are listed in Table 1. The wind turbine V80-2.0 Offshore is a production of Vestas Wind Systems A/S, a Danish manufacturer operating since 1979 (Wind-turbine-models, 2019).



Figure 8. Vestas V80 - 2.0 offshore wind turbines of the North Hoyle wind farm (Hau, 2013).

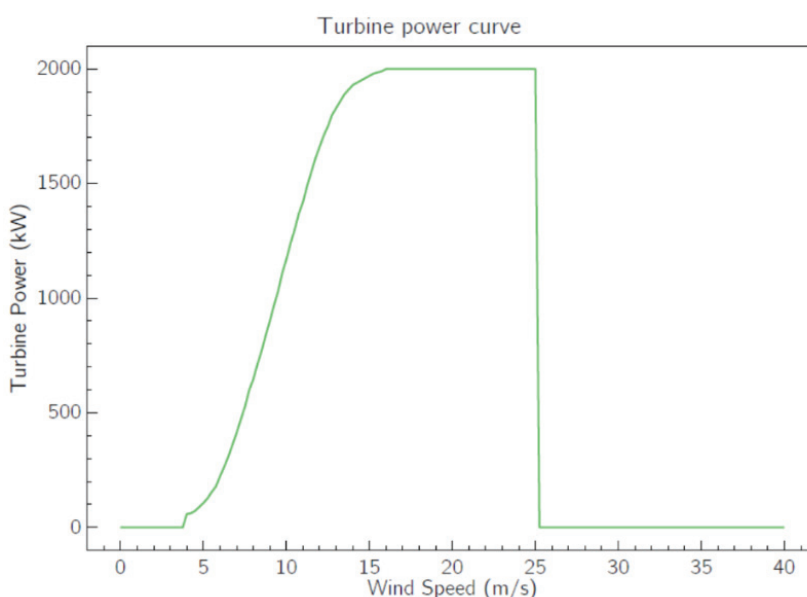


Figure 9. Power curve for Vestas V80 - 2.0 offshore turbine (SAM, 2019).

Table 1. Vestas V80 - 2.0 offshore wind turbine parameters (Wind-turbine-models, 2019).

Rotor	Diameter:	80 m
	Area swept:	5027 m ²
	Nominal revolutions:	16.7 rpm
	Operational interval:	9 - 19 rpm
	Number of blades:	3
	Power regulation:	Pitch
	Air brake:	3 separate hydraulic pitch cylinders
Tower	Hub height:	78 m
Operational data	Cut-in wind speed:	4 m/s
	Nominal wind speed:	15 m/s
	Cut-out wind speed:	25 m/s
Generator	Type:	Asynchronous doubly fed
	Nominal output:	2000 kW
	Operational data:	50 Hz / 60 Hz, 690 V
Gearbox	Type:	Planet/parallel axles
Control	Type:	Remote monitoring
Weight	Nacelle:	67 t
	Rotor:	37 t
	Tower (IEC IIA):	190 t

2.3.1. Estimated annual average wind speed at hub height

For power calculations it is necessary to estimate the wind speed at the hub height. For such estimations basically two different wind profile formulations are used: the logarithmic profile and the 1/7-power-law profile (Beji and Lützen, 2017). Basically, these two profiles give similar results, the choice of one over the other is merely a matter of preference; the logarithmic profile is used here,

$$U(h) = U(h_{ref}) \left[\frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{ref}}{z_0}\right)} \right] \quad (1)$$

where $U(h)$ is the wind speed at the height h , $U(h_{ref})$ is the wind speed available for a definite reference height h_{ref} , and z_0 is the roughness length determined according to the surface properties over which the wind blows. For the present case $h_{ref} = 50$ m and $U(h_{ref}) = 8.75$ m/s are the available reference height and corresponding wind speed. Taking $z_0 = 0.0002$ m as the roughness length suggested for a choppy sea surface, the wind speed at the hub height $h = 78$ m is estimated as

$$U(78) = 8.75 \left[\frac{\ln\left(\frac{78}{0.0002}\right)}{\ln\left(\frac{50}{0.0002}\right)} \right] = 9.063 \text{ m/s} \cong 9.0 \text{ m/s}$$

which is used in the subsequent relevant calculations.

2.3.2. Wind turbine IEC class

The selected wind turbine IEC (International Electrotechnical Commission) class is IIA, according to the annual average wind speed U_{avg} at the hub height of the proposed OWF. The wind speed parameters of the selected wind turbine class are taken from the Wind Turbine Generator System (WTGS) classes to IEC 61400-1 and listed in below (Hau, 2013):

WTGS Class: II - Medium wind

Turbulence Intensity Category: A - Higher turbulence

$$I_{15} = 18\%, \quad \alpha = 2, \quad U_{avg} = U(78) = 9.0 \text{ m/s}$$

The turbulence intensity can be calculated by using the formula

$$I_u = \frac{I_{15} \left(\alpha + \frac{15}{U_{avg}} \right)}{(\alpha + 1)} \quad (2)$$

$$I_u = \frac{0.18 \left(2 + \frac{15}{9.0} \right)}{(2 + 1)} = 0.22 = 22.0\%$$

which indicates Category A-Higher turbulence.

2.3.3. Estimated energy production

The total rated power of the proposed OWF (10 turbines) is $P_{rated} = 10 \cdot 2.0 \text{ MW} = 20 \text{ MW}$. On the other hand, the capacity factor is defined as

$$cf = T_{equivalent} / T_{year} \quad (3)$$

where $T_{equivalent}$ is the equivalent hours of operation at nominal wind speed and $T_{year} = 365 \cdot 24 = 8760 \text{ hours}$ is the total hours in a year. Typically, $cf \approx 0.35 - 0.45$ but a much more accurate estimate is possible by the use of the Weibull or Rayleigh distribution. The Weibull probability density function (pdf) (Strach-Sonsalla et al., 2016) is given by

$$f_w(k, a, U) = (k/a)(U/a)e^{-(U/a)^k} \quad (4)$$

where k is the shape factor ranging between $k = 1 - 4$ but typically taken as $k = 2$, U the wind speed and a the Weibull scale parameter given by

$$a = \frac{U_{avg}}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right)} \quad (5)$$

where U_{avg} is the annual average wind speed and $\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt$ is the Gamma function. For the typically used value of $k = 2$ the exact value of the Gamma function is

$$\Gamma \left(1 + \frac{1}{2} \right) = \frac{1}{2} \pi^{1/2} = 0.8862269254$$

Annual yield of a turbine is calculated by the following integral:

$$E_{Turbine} = T_{year} \int_{U_{ci}}^{U_{co}} P(U)f(U) dU \quad (6)$$

where $P(U)$ is the power according to the given power-curve of the turbine for the wind speed U , $f(U)$ the pdf, $U_{ci} = 4$ m/s the cut-in and $U_{co} = 25$ m/s the cut-out wind speeds for the turbine as specified by the manufacturer (see Table 1). Considering the following equation

$$E_{Turbine} = P_{rated} \cdot T_{equivalent} = P_{rated} \cdot cf \cdot T_{year} = T_{year} \int_{U_{ci}}^{U_{co}} P(U)f(U) dU \quad (7)$$

The capacity factor cf can be written as

$$cf = \frac{1}{P_{rated}} \int_{U_{ci}}^{U_{co}} P(U)f(U) dU \quad (8)$$

Using the manufacturer-supplied power-curve of the turbine given in Figure 9 and the Weibull pdf defined above by $f_W(k, a, U)$ with the scale parameter $a = 10.155$ m/s determined according to the chosen $k = 2$ value and the mean wind speed $U_{mean} = 9.0$ m/s at the hub height, a numerical integration yields the capacity factor for the present problem as $cf = 0.4117$. Since

$$T_{equivalent} = cf \cdot T_{year} = 0.4117 \cdot T_{year}$$

the yearly energy production estimate for a single turbine is then

$$E_{Turbine} = P_{rated} \cdot cf \cdot T_{year} = 2.0 \cdot 0.4117 \cdot 8760 \cong 7213 \text{ MW} \cdot \text{hours} \cong 7.2 \text{ GW} \cdot \text{h/year}$$

The proposed OWF with 10 turbines is then expected to generate an estimated energy of

$$E = 10 \cdot 7.2 \text{ GW} \cdot \text{h/year} \cong 72 \text{ GW} \cdot \text{h/year}$$

2.3.4. Grid connection

The selected grid connection point is the Port of Narlıdere, which is the nearest suitable location to the proposed OWF. Since power cables and their laying are costly, a minimum distance to the grid on the land is aimed; accordingly, from the proposed OWF to the Bay of Narlıdere shores is only 4.83 km. As the distance to shore is quite short (< 8 km) there is no need to connect the OWTs output to an offshore substation. Substations are costly and subjected to failure risks. The electricity generated by the OWTs can be transmitted directly to the shore and then integrated into the public grid (Dalén, 2013). A schematic description of the grid connection, which is a string topology type, is given in Figure 10. Compared to the looped topology the string topology is a fairly simple and reliable power connection. Generally, power cables in wind farms are relatively low voltage (24 to 33 kV) (Manwell, 2013); therefore, power collection and transmission voltages can be taken as 30 kV on the average for the proposed OWF. The electrical system of the proposed OWF is briefly listed in Table 2.

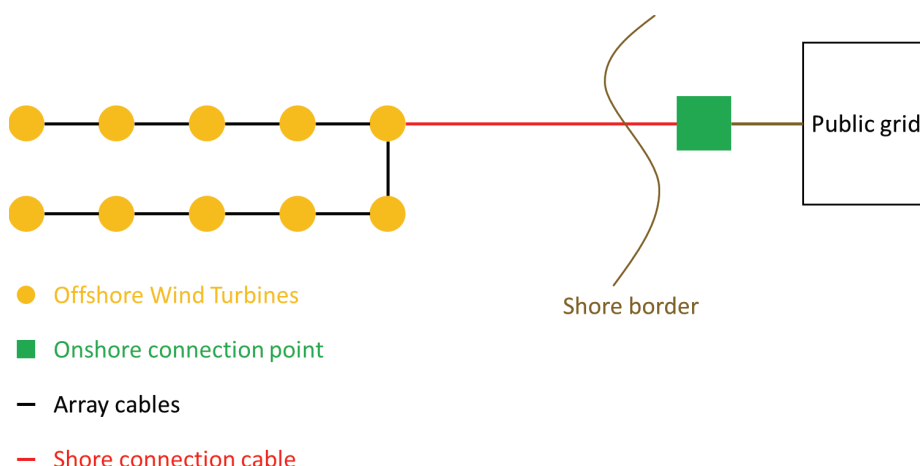


Figure 10. Grid connection topology for the proposed offshore wind turbines.

Table 2. Electrical system of the proposed offshore wind farm.

Installed power:	10 x 2 MW = 20 MW
Power collection voltage:	30 kV
Power transmission voltage:	30 kV
Distance to shore:	1.16 km
Shore connection:	AC connection on shore, wind farm voltage level
Network topology:	2 strings of 5 turbines

2.4. Substructure and Foundation

The selected foundation type for the proposed OWF is mono-pile foundation. Temporary design parameters of the mono-pile foundation system are given in Table 3. Selection of the foundation type depends on the water depth and seabed conditions; e. g., soil type, extent of scouring. The maximum water depth at the location of the proposed OWF is 25 m as shown in the bathymetry map (Openseamap, 2019) given in Figure 11. The type of soil in the location of the proposed OWF is gravelly mud as described in the seabed substrate map (Europe-geology, 2020) given in Figure 12, which is obtained from the EMODnet-Geology project powered by the EuroGeoSurveys' European Geological Data Infrastructure.

Mono-pile foundations are proven technology, quite commonly used in shallow waters. They represent 81.5% of all installed substructures in Europe at the end of 2018 (Wind Europe, 2019). Mono-piles are usually economic and technically feasible for water depths less than 30 m (Strach-Sonsalla et al., 2016). Suitable soil conditions for mono-piles are sand and silt layers, as they do not require pre-drilling (Dalén, 2013).



Figure 11. Bathymetry map of the southern shores of Dikili (Openseamap, 2019).

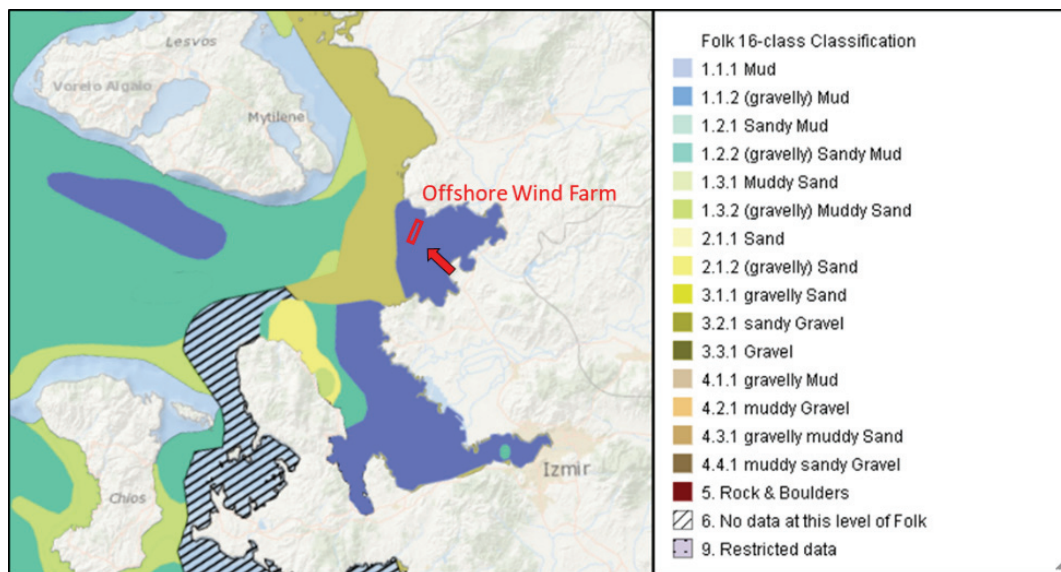


Figure 12. Seabed substrate map of the Dikili shores (Europe-geology, 2020).

A mono-pile consists of two main parts; a pile and a transition piece made of high-quality steel. The pile is a cylindrical tube driven into the ground using a hydraulic hammer. The transition piece is connected to the pile by a grouting system. The transition piece is equipped with work platform, intermediate platform, boat landing, navigation lights, etc., and the tower is bolted on the top of the transition piece (Dalén, 2013). A schematic diagram of a mono-pile foundation system (Mott MacDonald, 2010) is shown in Figure 13.

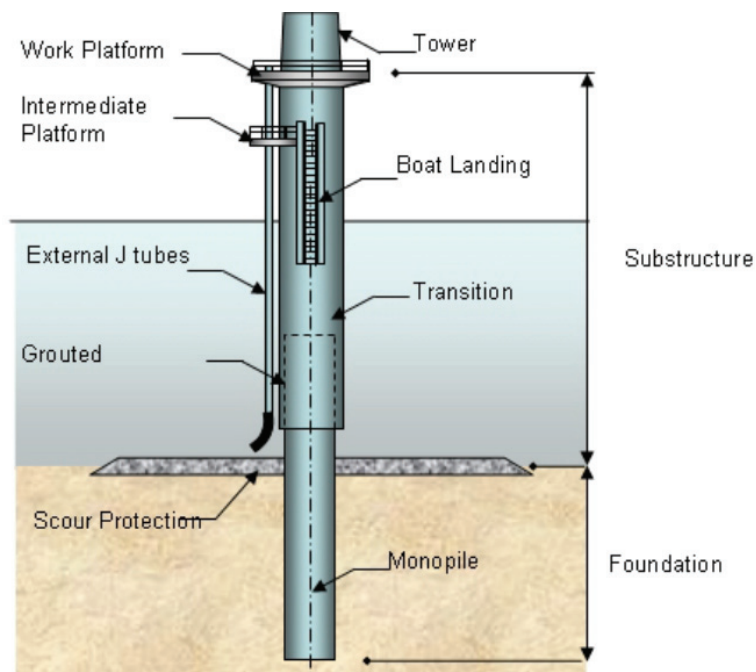


Figure 13. Schematic diagram of a mono-pile foundation system (Mott MacDonald, 2010).

Table 3. Temporary design parameters of the mono-pile foundation system.

The pile diameter (D) is 4 m and the wall thickness is 50 mm.
The effective fixity length ($6D$ for general calculations) is 24 m (seabed penetration).
The transition piece diameter is 4.6 m and the grout is 6 m.
The working platform is 9 m above the sea level.
Two layers of stones (gravel) are used for the scour protection.

3. Conclusions and Recommendations

Offshore winds are stronger, more stable, and less turbulent than onshore winds. All these aspects positively contribute to the service life of an offshore turbine. From the technical and environmental points of view, offshore wind projects are considered more advantageous. On the other hand, initial installation, operation and maintenance costs of an offshore wind farm are unquestionably higher compared to those of an onshore wind farm. Decision on the choice must be made by a careful consideration and weighting of all these aspects.

Turkey has a rapidly growing economy with a corresponding increase in energy demand. A large portion of Turkey's energy demand is met by imported fossil fuels. Potential OWFs together with onshore wind farms can help to meet Turkey's increasing energy demand and reduce her dependency on energy imports. Further, OWFs can also help to reduce greenhouse gas emissions.

In this study, a potential OWF with size of 640,000 m² (400 x 1600 m) project is designed technically as a case study. The proposed OWF is located opposite the Island of Karaada in the Bay of Narlıdere, 1.16 km distance from the southwestern shores of Dikili. The annual average wind speed is 8.75 m/s (at 50

m height) at the center of the proposed OWF. With strong and steady winds, this site is suitable location for the wind power generation. At the same time, there is the possibility that the proposed OWF and its infrastructure will affect the ecosystem in the area. Always various impacts are observed on the immediate environment where an OWF is installed (Aquaret, 2018). However, with careful planning and research, these environmental disturbances can be prevented. In any OWF project to be realized, the following issues should be explored (Manwell, 2013; Dalén, 2013):

- Noise impact,
- Barriers of water flow,
- Visual impact,
- Impacts on radio signals,
- Impacts on birds,
- Impacts on marine life,
- Impacts on benthic fauna and flora,
- Possibility of ship collisions.

Installed power of the proposed OWF is 20 MW. The ten units *Vestas V80 - 2.0 Offshore* model wind turbine with 78 m hub height and 80 m rotor diameter (in two rows with five turbines each facing the NNE direction) are proposed to be installed in mud (gravelly) type soil at a maximum water depth of 25 m using the mono-pile foundation system. As of 2020, according to the United States Energy Information Administration (EIA), electricity net consumption of Turkey is 263,952 GWh/year (population of Turkey is 84,428,280) and total consumption per capita is around 3126 kWh/year (EIA, 2022). The proposed OWF will generate an estimated 72 GWh/year of electricity energy. This clean and sustainable electricity, which can be transmitted directly into the public grid from the Port of Narlıdere connection point, can meet the annual electricity needs of approximately 23,000 households (as of 2020, Dikili has a total population of 45,217). This is more than half of Dikili's population and 23,000 households would definitely accommodate more than the total population of Dikili.

Finally, it should be emphasized that an OWF project must be analyzed economically during the development phase. Accordingly, a feasibility study should be done before the proposed OWF project is realized and the following costs should be calculated for the financing of the project (Barutçu, 2010):

- Project and license costs,
- Turbine costs,
- Electrical infrastructure costs,
- Installation costs,
- Transportation costs,
- Construction costs,
- Operation and maintenance costs.

Acknowledgement

The authors are indebted to Dipl. Ing. Uwe Lützen for his help in calculations of estimated energy production.

References

- Aquaret, <https://www.aquaret.com/images/stories/aquaret/pdf/chapter5.pdf> [date retrieved 12.10.2018].
- Argin, M. and Yerci, V. (2015). The Assessment of Offshore Wind Power Potential of Turkey, Ninth International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO).
- Barutçu, B. (2010). Wind Energy and Conversion Technology, EBT 527E Course Notes, Istanbul Technical University.
- Beji, S. and Lützen, U. (2017). Offshore Wind Farm Design, ADM 507E Course Notes, Istanbul Technical University.
- Dalén, G. (2013). Offshore Wind Power, M. Kaltschmitt et al. (eds.), Renewable Energy Systems, Springer, New York.
- EIA (Energy Information Administration), <https://www.eia.gov/opendata/qb.php?sdid=INTL.2-2-TUR-BKWH.A> [date retrieved 11.03.2022].
- Europe-geology, <https://www.europe-geology.eu/marine-geology/seabed-substrate/> [date retrieved 05.01.2020].
- GWA (Global Wind Atlas), <https://globalwindatlas.info/Dikili> [date retrieved 04.01.2020].
- Hau, E. (2013). Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, Third translated edition, Springer, Heidelberg.
- Manwell, J. F. (2013). Offshore Wind Energy Technology Trends, Challenges, and Risks, M. Kaltschmitt et al. (eds.), Renewable Energy Systems, Springer, New York.
- Meteoblue, https://www.meteoblue.com/tr/hava/archive/export/karaada_turkiye_310395 [date retrieved 10.02.2020].
- Mott MacDonald (2010). Schematic diagram of a mono-pile foundation system, Offshore Wind Presentation - IEEE Boston PES.
- Openseamap, <https://map.openseamap.org/Karaada> [date retrieved 19.07.2019].
- SAM (System Advisor Model). (2019). Turbine Power Curve, Turbine Layout Map, SAM version 2018.11.11.
- Satir, M., Murphy, F., McDonnell, K. (2017). Feasibility Study of an Offshore Wind Farm in the Aegean Sea, Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Strach-Sonsalla, M., Stammler, M., Wenske, J., Jonkman, J., Vorpahl, F. (2016). Offshore Wind Energy, Ocean Renewable Energy-Part E/49.
- Wind Europe. (2019). Offshore Wind in Europe: Key Trends and Statistics 2018, Wind Europe Annual Report, Brussels.
- Wind-turbine-models, <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/668-vestas-v80-offshore> [date retrieved 29.10.2019].
- World Bank Group, <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/publication/expanding-offshore-wind-in-emerging-markets> [date retrieved 28.01.2020].

Bodrum Yat İnşa Sektörünün GZFT/PESTLE Analizi

Bülent İbrahim Turan ¹, Mehmet Akman ², Fuat Turan ³

^{1,2} Motorlu Araçlar Ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Bodrum Denizcilik Meslek Yüksekokulu, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla, Türkiye

³ Fuat Turan Marine Yat Yapım Müh. Tur. İth. İhr. ve Tic. Ltd. Şti., Muğla, Türkiye

¹ (sorumlu yazar), bulentibrahimturan@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9690-6955

² mehmetakman@mu.edu.tr, 0000-0002-6274-2742

³ fuatturan@superonline.com, 0000-0002-5906-5381

ÖZET

Bodrum yat inşa sektörü, Türkiye'nin eşsiz, katma değeri yüksek, yetkin ve gelişen sektörlerinden biridir. Bölgede uzun yıllardır yeni imalatın yanı sıra, bakım-onarım ve çekek hizmetleri gerçekleştirilmektedir. Yüksek kalitede üretilen Bodrum Guletleri ile tırhandiller zamanla Bodrum'un markaları haline gelmiştir. Bu çalışmada Bodrum yat inşa sektörü 2011-2021 yılları arasındaki tesis sayısı ve üretim değerleri baz alınarak incelenmiş, bölgesel üretim verileri, küresel ve yerel ölçekte analiz edilmiştir. Ayrıca toplanan veriler doğrultusunda Çevre-Değer-Kaynak uyumu yaklaşımı ile GZFT Analizi yapılarak Bodrum yat inşa sektörü için güç, zayıflık, fırsat ve tehdit faktörleri belirlenmiştir. Daha sonra analiz edilen faktörler, siyasal, ekonomik, sosyal, teknolojik, yasal ve çevre (PESTLE) analizi ile de kategorize edilerek detaylandırılmıştır. Son olarak elde edilen bulgular, Bodrum yat inşa sektörünün gelişimi için atılabilecek adımlar kapsamında stratejik karar verme sürecine katkı sağlayacak şekilde değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Bodrum yat inşa, Bodrum Guleti, GZFT, PESTLE Analizi, Çekek

Makale geçmişi: Geliş 16/02/2022 – Kabul 11/05/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1074404>

SWOT/PESTLE Analysis of the Bodrum Yacht Building Industry

Bülent İbrahim Turan ¹, Mehmet Akman ², Fuat Turan ³

^{1,2} Motor Vehicle and Transportation Technologies, Bodrum Maritime Vocational School, Muğla Sıtkı Koçman University, Muğla, Türkiye

³ Fuat Turan Marine Yacht Construction Eng. Tou. Imp. Exp. ve Tra. Ltd. Com., Muğla, Türkiye

¹ (corresponding author), bulentibrahimturan@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9690-6955

² mehmetakman@mu.edu.tr, 0000-0002-6274-2742

³ fuatturan@superonline.com, 0000-0002-5906-5381

ABSTRACT

The yacht building in Bodrum is one of the unique, high value-added, competent, and developing industries in Turkey. The new building, repair & maintenance, and boatyard operations have been carried out in this region for many years. Bodrum Gulets with round and transom sterns and tirhandils produced in high quality have become the brands of Bodrum over the years. In this study, the Bodrum yacht building industry is investigated to determine the number of facilities and their production values within 2011-2021. Then the regional production data is analyzed within the global and local scale yacht building. The strength, weakness, opportunity, and threat factors are determined for the Bodrum yacht building industry within SWOT analysis using the Environment-Value-Resource congruence approach. Then the analyzed factors are clustered and detailed with political, economic, social, technological, legal and environmental (PESTLE) analysis. Finally, the findings are evaluated to contribute to the strategic decision-making process within the scope of the steps that can be taken for the development of the Bodrum yacht building industry.

Keywords: Bodrum yacht building, Bodrum Gulet, SWOT, PESTLE Analysis, Boatyard

Article history: Received 16/02/2022 – Accepted 11/05/2022

1. Introduction

Yachts are luxury water vehicles propelled by an engine and/or sail and generally used for leisure and entertainment purposes. Aesthetics, comfort, quality, and private design are at the forefront of yachts compared to large-tonnage commercial vessels. Therefore, the yacht building industry with high value-added and strong interaction with other sectors, high foreign currency inflows, is one of the most essential sectors for the leading countries in maritime. Over the years, there have been significant developments in terms of yacht building capacity. Although there were fluctuations in the sector in 2020 due to the impact of COVID-19, the total number of projects in the 2022 world order book increased by 24.7% with 1024 projects compared to 2021 (Montigneaux & Robinson, 2021). On the other hand, the share of marine tourism revenue in total tourism is approximately 20%, and the marine tourism revenues, which were 1.9 billion US dollars in 2002, increased to 7.2 billion US dollars in 2019 in the Turkish yacht management sector (İMEAK-DTO, 2021). On a regional basis, yacht management is one of the developing fields in the southern Aegean region. Only in the Muğla region, there are 27 marinas with a capacity of 6,904 yachts and 538 yacht enterprises including 6,241 passengers (GEKA, 2018). Moreover, it was reported that the number of yachts to be used in yacht management will increase by more than 2 times and reach the level of 48000 in 2030 compared to 2015 (Yüksek, 2013). In addition, it is estimated that the Blue Voyage market size is about 300 million USD in 2020 and this value is reported to be increased to 500 million USD in 2022 (Kalyoncu, 2020). Besides, Turkey is known for semi-custom and full custom production in the yacht building industry (Montigneaux & Robinson, 2021), low labour costs, as well as the workers' qualification and skills, are the factors that promoted Turkey's rank in the global yacht building industry (Merendino, 2014; Zaltsman, 2021). Since the end of the 1990s, the yacht building industry in Turkey has grown remarkably, especially with the effect of superyacht and megayacht production (Gürler, 2013).

The yacht building industry, on the other hand, is mainly located in the Mediterranean and southern Aegean regions in Turkey. In Muğla province, yacht building, repair, and maintenance activities with boatyard operations are generally conducted in Bodrum, Marmaris, Ören, and Fethiye regions. Among the yacht manufacturing centres located on the Aegean coast of Turkey, especially the Bodrum region has been making great progress in the production of megayachts, as well as traditional wooden gulets and large leisure crafts, and attracts great attention from foreign markets (Hazneci, 2009). In the Bodrum peninsula, especially wooden yacht building is very famous and defined as a cultural heritage today. Boatbuilding in this region dates back to the reign of King Mausolous in the 4th century, even BC. It is stated that Egyptian King Ptolemy had warships built in Bodrum in the 3rd century (Kükner, 2009). The Bodrum region had also continued to be one of the important centres of shipbuilding during the Ottoman Period. It is known that the first ship was laid in the Ottoman Shipyard in Bodrum in 1784 (Bodrum Belediyesi, 2020). In Bodrum, where military-purpose boats were built until the 20th century, later boats were built to be used in commercial cargo transport, fishing, or sponge diving activities. By the 1950s, wooden boats accepted as the predecessors of world brand "Bodrum Gulets", started to be built (Ayaz, 2015; Binder, 2019). On the other hand, with the popularity of the Blue Voyage after the 1960s, the demand for leisure crafts has increased leading the number of Bodrum Gulets have increase (Kükner, 2007, 2009). Although Bodrum is known for its Bodrum Gulets, there are many different types of sailing yachts and motor yachts built in this region.

The growth in the yacht building and management industries requires a strategic decision-making process for short, medium, and long-term plannings since yachting is a global and competitive field in the maritime sector. However, there is a lack of cumulative, segmented, and detailed data for the Bodrum yacht building industry, and qualitative and quantitative evaluations are required to reveal

the specific strength, weaknesses, opportunity, and threat (SWOT) factors. Therefore, in this study, the strengths and weaknesses of the Bodrum yacht building industry are determined and the threats and opportunities (SWOT) to the industry are discussed in the light of the sectoral data, then a PESTLE analysis including clustered data related to political, economic, social, technological, legal and environmental factors is conducted to evaluate the conditions that affect the yacht building industry in Bodrum. Within this scope, the properties of yacht types specific to the Bodrum region are introduced first and the local yacht building industry is analyzed under the framework of the world and Turkish yacht building. The environment-value-resources (E-V-R) model is used for SWOT/PESTLE analysis and strategic outcomes and measures are presented. It is aimed that this study will contribute to the strategic decision-making process in the Turkish shipbuilding industry since there is a need for particular analyses of the yacht building in recent years in Bodrum.

2. Boat Types Specific to Bodrum

Bodrum Gulets with round and transom sterns as well as tirhandils stand out among the unique yacht types produced in Bodrum today. These yachts mainly used in the marine tourism sector, have many differences in terms of production technique, engineering, and design. Figure 1 shows Bodrum Gulets with round (top-left) and transom (top-right) stern yachts and a tirhandil (below) anchored in Bodrum harbour.



Figure 1. A Bodrum Gulet with round stern (top-left), transom stern (top-right), and a tirhandil (below)

2.1. Bodrum Gulets

Bodrum Gulets, which are among the iconic boats of Bodrum, has emerged as the usual gulet forms have changed over time. The forms of the gulets, which previously served for purposes such as sponge fishing, fishing, or cargo transportation, changed with the effect of the marine tourism that developed in the 1960s and took the form known as Bodrum Gulet today (Köyağasıoğlu, 2014; Kükner, 2007, 2009). The aesthetic concern, which increased with the effect of use, especially in the Blue Voyage, played an important role in the emergence of Bodrum Gulet forms (Büyükkeçeci & Turan, 2018). On

the other hand, with the introduction of lamination technique in the manufacture of yachts in Bodrum in the 1980s by Naval Engineer Fuat Turan, flexibility in the form and dimensions of the gulets manufactured in Bodrum has been increased, and it has become possible to produce larger gulets compared to the traditionally defined masonry manufacturing method (Turan & Akman, 2021b; Turan & Özcan, 2018). Today, Bodrum Gulets are not only made of wood but also steel. The yacht named Meira, with a hull in the form of a Bodrum Gulet and a full length of 50 m, built in Bodrum is listed among the largest yachts ever built in Bodrum and is made of steel (Turan & Akman, 2021b).

2.2. Transom Stern Type Yachts

The concept of transom stern, which is used to describe the stern form in the maritime literature, is also used for defining a specific yacht form obtained by changing the stern structure of Bodrum Gulets in Turkey. The transom stern form, which has been used for centuries in sailboats in Northern Europe, started to be seen in Bodrum after 1985 (Köyağasıoğlu, 2014). These boats, whose hull form is similar to Bodrum Gulets, have a transom stern form, which is in the form of a cross beam, unlike Bodrum Gulets (Kükner, 2009). Transom stern type hulls have emerged with the idea of making the stern of Bodrum Gulets, which are widely used in the Blue Voyage, a flat form and having the additional volume on the aft lower deck with the added aft forecabin. In this way, the volume gained at the aft lower deck was used both as an additional cabin and as a galley with a crew area, allowing the boats to have a more efficient interior layout.

2.3. Tirhandils

Tirhandils are defined by symmetrical fore-aft forms, a beam of one-third of the length overall, a convex and inward-curving bow stem structure, a handrail close to the sea, and a clear sheer line (Köyağasıoğlu, 2014). The form of the tirhandil, the traditional fishing vessel of the Eastern Mediterranean, remained virtually unchanged for three centuries (Gür, 2020). These boats, which are shipped as sailing and motorized, have quite different features in terms of use. Tirhandils, which provide flexibility to the users in the interior volume with their wider middle part compared to Bodrum Gulets and transom stern type yachts, begin to lose their characteristic features above a certain length overall, so the number of tirhandils manufactured over 20 m is quite low (Turan & Akman, 2021a). As a result, the number of tirhandils in marine tourism is limited and these boats are generally manufactured for private use.

3. Method

Strength-weakness-opportunity-threat (SWOT) analysis is one of the substantial tools used in the strategic decision-making process by analyzing and evaluating the circumstances of businesses or different sectors. The simplicity of applying the SWOT Analysis is seen as the advantage and consequently, it is listed as the most widely applied strategic method (Phadermrod et al., 2019). In SWOT analysis, strengths are the performance indicators for success, and weaknesses are the factors that hinder successful performance; opportunities are trends thoughts and situations towards specific goals, and threats generally refer to external and uncontrollable forces and events (Phadermrod et al., 2019). Since the 1960s, SWOT analysis has been widely used and the analysis methodology during the decision-making process has developed over the years (Dyson, 2004). The original form of the SWOT analysis was based on qualitative and subjective views therefore the method was not applicable for long-term plans within the strategic decisions (Phadermrod et al., 2019). Afterwards, the quantitative,

risk and importance-based approaches have been added to the methodology for more convenient evaluation (Arslan & Turan, 2009; Phadermrod et al., 2019; Yang, 2010). On the other hand, the PESTLE approach can be used together with the SWOT analysis rather than as an alternative analysis type (NMBL Strategies, 2021). In PESTLE analysis, political, economic, social, technological, legal and environmental factors affecting the existing system are clustered and detailed (Srdjevic et al., 2012). Therefore, the PESTLE approach contributes to better understanding and decision-making processes. Consequently, the Bodrum yacht building industry which has different dynamics affecting competition power like location, cost, design and built know-how, technology and materials, is evaluated within a multi-criteria-based SWOT/PESTLE analysis.

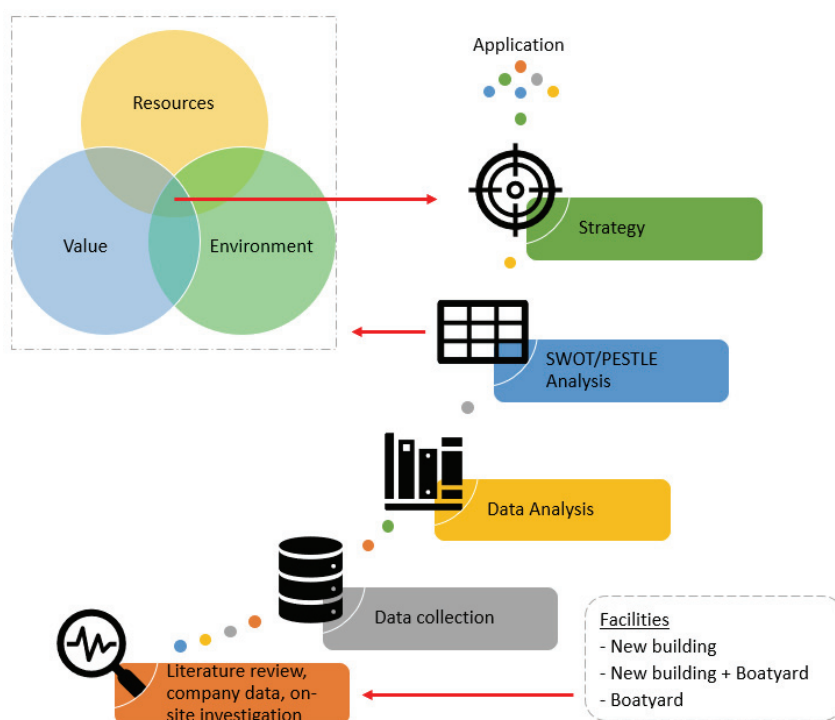


Figure 1. Analysis and evaluation process for Bodrum yacht building industry

In this study, the activities of enterprises in yacht building, repair & maintenance, and boatyard operations are investigated and numerical data of the yachts produced by the largest companies are analyzed considering the last decade. The facilities operating in the yacht building and repair & maintenance fields are divided into three main groups. These groups are categorized as the new building, boatyard, and new building + boatyard facilities. The yacht building facilities refer to 15 m and above buildings located in the Bodrum region. The yachts, canoes, or similar recreational watercraft under 15 m are not included in this group. The facilities in the boatyard group, on the other hand, are considered as facilities that do not build yachts and only provide wintering, landing, and repair & maintenance services. This group includes the boatyard areas of the marinas located in Bodrum. The facilities in the new building + boatyard group include both the new building and, wintering, landing, and repair & maintenance activities. The numerical data obtained from literature, sector reports, and on-site investigations, are statistically analyzed and evaluated within SWOT/PESTLE analysis based on the global and Turkish yacht building industry. During SWOT/PESTLE analysis, the E-V-R (Environment-Value-Resources) congruence model (Thompson, 1999) provided a framework to determine the needs and measures used for strategic assessments for the Bodrum yacht building industry. In this model, environment refers to the external factors affecting the success of the industry,

which are detailed in opportunities and threats. Resources within strength and weakness define the factors that are expected to fulfil the environmental needs and, value shows the leadership and culture of the enterprise on the effectiveness and control ability of environment and resources matching (Thompson, 1999). Subsequently, the fitting of these three concepts provides an effective strategic positioning and successful actions to reach the targets. The analysis and evaluation process steps are given in Figure 2.

4. Yacht Building Industry in Macro and Micro Scales

The data collected within the scope of the research are evaluated by narrowing down to micro scales that include yacht building parameters of Turkey and Bodrum region, starting from the macro scale, which includes the parameters on the global scale.

4.1. Turkish Yacht Building Industry

The data published in Global Order Book 2021 (Boat International, 2020) shows that the total length of the yachts built by the world yacht building sectors increases dramatically until 2009, decreases between 2009 and 2013, then continues with an upward trend between 2013 and 2019 (See Figure 3). Italy, Germany, The Netherlands, Turkey, and Norway are listed as the top yacht builder countries by volume, and the distribution of the yachts between the length of 24 and 37 m increases from 57.9% to 61.1% from 2021 to 2022 (Montigneaux & Robinson, 2021).

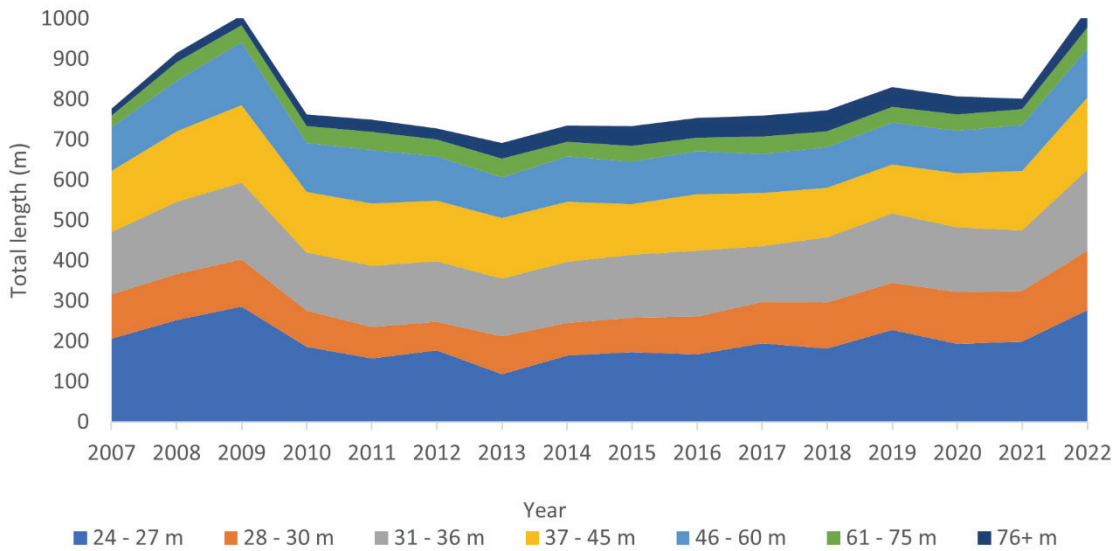


Figure 2. The change in the total length of yachts manufactured by the world yacht manufacturing sector by years (Boat International, 2020; Montigneaux & Robinson, 2021)

The number of yacht projects in Turkey for 2021 is recorded as 76 (Boat International, 2020), and 91 for 2022 (Montigneaux & Robinson, 2021). The collected data show that the yacht building industry is in an upward trend not only on the global scale but also in Turkey. According to the same reports, Turkey is in the fourth rank by total gross tonnage and the second rank by the number of yacht projects among the top five countries as shown in Figure 4 (Boat International, 2020; Montigneaux & Robinson, 2021).

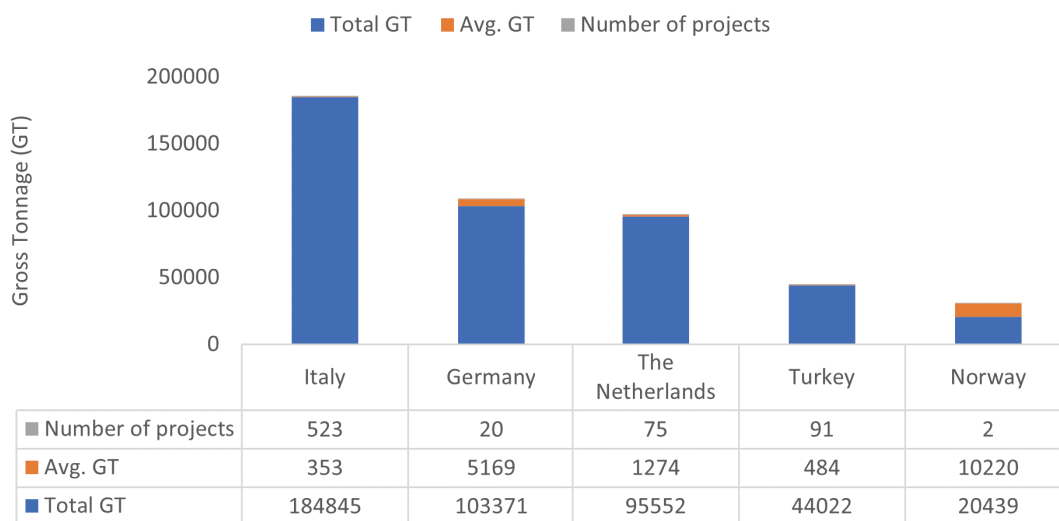


Figure 3. Yacht building project data of top five countries for 2022 (Montigneaux & Robinson, 2021)

4.2. Bodrum Yacht Building Industry

Collected data shows that new buildings and boatyard facilities in Bodrum are mainly located in the İçmeler Region, maintaining its attractiveness despite the decline in the last 10 years. It is also seen that with the closure of the facilities in Yalıkavak, Ortakent, Kızılağaç, and Gumbet, new building and boatyard has shrunk considerably in these regions. The number of yacht building and boatyard facilities, which was 58 in total in 2011, decreased to 35 in 2021. Table 1 shows the distribution facilities in Bodrum from 2011 to 2021.

Table 1. Distribution of facilities in Bodrum from 2011 to 2021

Region	New Building Facility			Boatyard Facility			New Building + Boatyard Facility		
	2011	2016	2021	2011	2016	2021	2011	2016	2021
İçmeler	35	24	18	4	4	4	6	5	4
Yalıkavak	0	0	0	1	1	1	3	2	2
Kızılağaç	3	2	2	0	0	0	0	0	0
Yalıçiftlik	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Ortakent	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Gümbet	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Bodrum (marina)	0	0	0	1	1	1	0	0	0
Turgutreis	0	0	0	1	1	1	0	0	0
TOTAL	39	27	21	9	7	7	10	8	7

Table 1 shows that especially the number of the new building facilities decreases from 2011 to 2021 in Bodrum. On the other hand, even though the numbers of the boatyard facilities and the new building + boatyard facilities decrease from 2011 to 2016, there is no significant difference in the numbers in the last five years period. The overall number of the facilities decreased by 40% compared to 2011. The collected data shows that only 5 of the 14 facilities that provide yacht repair&maintenance services in Bodrum for 2021 use travel lifts while the others use slipways. Among the travel lifts used in Bodrum, the maximum capacity is recorded as 450 tons, and this lift can lift a yacht of approximately 48 m.

Even the number of facilities decreases in the last ten years, production data in yacht building shows that there is no remarkable change in the number of delivered yachts. In Table 2, the numbers of the delivered yachts, as well as the total and average length from 2011 to 2021, are shown. The share of the Bodrum yacht building industry in terms of project numbers is within the range of 5-10% compared to the total number of yacht projects built in Turkey.

Table 2. Number of the delivered yachts in Bodrum from 2011 to 2021

Year	Sailing yacht			Motoryacht			Overall		
	Number	Total length	Avg. length	Number	Total length	Avg. length	Number	Total length	Avg. length
2011	5	204.00	40.80	1	19.00	19.00	6	223.00	37.17
2012	2	68.40	34.20	3	81.70	27.23	5	150.10	30.02
2013	3	86.66	28.89	1	15.00	15.00	4	101.66	25.42
2014	3	96.90	32.30	0	0.00	0.00	3	96.90	32.30
2015	5	152.90	30.58	3	76.90	25.63	8	229.80	28.73
2016	2	45.00	22.50	2	35.40	17.70	4	80.40	20.10
2017	4	114.50	28.63	0	0.00	0.00	4	114.50	28.63
2018	6	159.40	26.57	0	0.00	0.00	6	159.40	26.57
2019	3	84.90	28.30	0	0.00	0.00	3	84.90	28.30
2020	5	129.83	25.97	1	15.00	15.00	6	144.83	24.14
2021	5	138.31	27.66	0	0	0.00	5	138.31	27.66

The data shows that sailing yacht types constitute the majority among the delivered yachts in Bodrum between the years 2011 and 2021. The average length of the delivered sailing yachts is calculated as 29.67 and it varies between 22.50 and 40.80. According to reports, Turkey is listed in the third rank by having a 10.5% share of the global total length yacht production in 2021 (Boat International, 2020), whereas Bodrum produces 4% of the total length of Turkish yacht building. However, considering global sailing yacht production data for 2021 (Boat International, 2020), Bodrum has a share of about 6.8% in total for the yachts with an overall length of 24 m and above. The decrease that occurred until 2016 is related to the sectoral and economic problems experienced, and the decrease between the years 2020 and 2021 is attributed to the impact of the COVID-19 pandemic.

5. SWOT/PESTLE Analysis Results

The strengths are evaluated within the resource of historical and cultural background, location advantages, and weaknesses are analyzed under data inventory and building costs. Opportunities and threats are determined considering the external factors related to local and global developments. S, W, O, T factors are determined considering the sectoral reports, literature studies, obtained numerical data and observations. Then, considering the internal and external factors PESTLE analysis is conducted for categorical assessments.

5.1. Strengths

5.1.1. Historical and cultural background-know how

The fact that boat building in Bodrum dates back thousands of years has brought specialization and experience to the region, especially in wooden boats. Although the boat building in Bodrum stopped with the end of the Ottoman Shipyard's activities in the 1850s, it continued with the tirhandil type boat

produced in 1933, and today it has become a large industry (Binder, 2019). In addition to wooden yacht building, yachts made of steel, aluminium, and composite materials are also built in the facilities located in Bodrum (Turan & Akman, 2021b). Prestigious yachts built with alternative production techniques and construction materials show that experience and knowledge of the yacht building industry in Bodrum is at a level that can compete with rival regions.

5.1.2. Location (logistics, transportation: airport)

Transportation and logistics that include highway, airway, and seaway transportation alternatives are among the guiding criterion evaluated in the selection of a yacht building facility (Hazneci, 2009). Muğla province has Dalaman Airport and Bodrum-Milas Airport, each of which has served over 3.5 million passengers annually, according to 2017 and 2018 data (Muğla Büyükşehir Belediyesi Ulaşım Dairesi Başkanlığı Ulaşım Planlama Şube Müdürlüğü, 2018), which triggers yacht management and charter fields. In addition, Bodrum is connected to the surrounding towns and cities by common highway connections.

5.1.3. Blue Voyage and other marine tourism alternatives

There are many types of research underlining the interaction between Blue Voyage and yacht building industries in Bodrum (Kükner, 2007, 2009; Turan, 2021). The increasing demand for Blue Voyage is directly related to the demand in the yacht building industry which has a worldwide reputation today (Turan & Özcan, 2018). Besides, yacht tourism has its 10how10ics and is an individual-based field. Therefore, yachting is one of the least affected industries by external factors. COVID 19 pandemic is a current example of which the yacht building industry has increased its capacity. Previous studies 10how that COVID 19 affected cruise tourism and this global pandemic situation creates uncertainty in this marine tourism sector (Depellegrin et al., 2020; Milošević, 2020; Renaud, 2020; Tatenhove, 2021; Urbanyi-Popiolek, 2020). On the other hand, the global Covid-19 crisis causes customers to shift to marine tourism alternatives. The pandemic situation promotes travelling by sea more individually such as yachting tourism (Milošević, 2020). By providing a safe and isolated holiday option, Blue Voyage is among the least affected sectors by the COVID-19 situation and it is seen as a safe marine vacation type (Arlı, 2020). Blue Voyage is generally conducted by Bodrum Gulets and tirhandils therefore the number of new buildings along with repair and maintenance activities are expected to increase. In other words, the significant relationship between the yacht building and the Blue Voyage industries minimizes the negative impact of the COVID-19 on the yacht building industry. In this perspective, Blue Voyage is among the strengths of the Bodrum yacht building industry.

5.1.4. Specific yacht types: Bodrum Gulets and, tirhandils

Yacht types specific to Bodrum are the primary factors contributing to yacht building in the region. Gulets, manufactured and exported in Bodrum in the 1960s and 1970s, played a role in the recognition of the yacht building industry in Turkey by Europe (Ünlüsü, 2004). Gulet building in Bodrum started at the end of the 1950s with the construction of two separate gulets (Binder, 2019).

5.1.5. Government incentives for shipyard establishment and yacht building

The existing and to be established shipyard facilities along with the new shipbuilding projects are supported by the incentives given by the Turkish Ministry of Industry and Technology. The government

incentives aim to alleviate the financial burden on the shipyards and increase employment. According to the report (Sungur, 2021), about 12% of the total incentives were distributed to various shipyards including yacht building facilities.

5.2. Weakness

5.2.1. Publicity and advertisement

Bodrum has a worldwide reputation for its tourism alternatives. However, specific yacht types need to be promoted especially in the global market. Recognition in the global market is one of the essential elements for the permanence of the yacht building in Bodrum.

5.2.2. Lack of collected data about the economical and production parameters

It has been observed that up-to-date and detailed economic data on yacht building and related sectors such as maintenance, repair, management, and operation in the Muğla region are quite limited (Turan & Akman, 2021b). Apart from merchant ships built in Turkey, yacht building data based on technical parameters such as length, tonnage, certification, construction material, techniques, etc. are missing.

5.2.3. High dependence on import raw materials, equipment, and machinery

According to the collected data, imported raw materials, equipment, and machines constitute a major part of the manufacturing process of the yacht building in Bodrum (Turan & Akman, 2021b). When the budget tables of three different wooden sailing yachts constructed in Bodrum between 2016 and 2020 with length overall of 20 m, 26 m and 43 m are analyzed, it is seen that imported products constitute 60 to 63 % of the total budgets. Sail & rigging equipment, engines and auxiliary system components, paint, varnish, entertainment tools, navigation system electronics and deck equipment are the equipment that contain mostly imported elements. On the other hand, the importation of raw materials used in the manufacture of non-imported products indirectly increases the dependency on imported materials of yacht building in Turkey. This circumstance increases the probability of being affected by external conditions that may cause delays or fluctuations in prices. Moreover, due to the high dependency on the imported materials in yacht building, yachts are generally priced in foreign currencies and seen as luxury-segment products by domestic customers.

5.2.4. Lack of segmentation and targeting strategies

It is observed that facilities in Bodrum have been producing various types of yachts with different construction materials and techniques. Even this ability represents a high level of flexibility, it precludes the yacht manufacturers in Bodrum to specialize in a specific type of yacht as well as the construction material and the techniques. Segmentation and targeting strategies on the other hand enable the enterprises to focus on a particular group of customers.

5.2.5. Lack of technological development in the manufacturing processes

During yacht building, particularly for wooden yachts, traditional cutting, assembling and outfitting processes are still conducted, which decreases the technological competition power of the shipyard facilities. Therefore, the reworks in the building processes are inevitable causing longer delivery time

and relatively poor quality. Moreover, most shipyards do not have an integrated enterprise resource planning (ERP) system to be used for each production and management process. As a result, a culture of continuous improvement could not be established in the shipyards.

5.2.6. Required amendments in regulations

Boats under 12 meters in length overall are not subject to class or certification rules. The length limit subject to the rules should be lowered below 12 meters and the boat building should be standardized to increase quality. Moreover, the boats that do not comply with any rules should not be allowed to be built.

5.3. Opportunities

5.3.1. Increasing demand for yachts with the length between 24-37 m

As analyzed in the previous sections, the reports (Boat International, 2020; Montigneaux & Robinson, 2021) show that demand for semi-custom yachts inclines in the global market. Moreover, demand for yachts with a length overall between 24 m and 37 m is in the upward trend for 2022 according to Global Order Book 2022 (Montigneaux & Robinson, 2021). The overall length of delivered sailing yachts in Bodrum between 2011 and 2021 varies from 22.50 m to 40.80 m which fits the global demand.

5.3.2. New yacht building facilities (Ören)

The boatyard and manufacturing centre, which is under construction in the Ören Region, is an opportunity for the Bodrum yacht building industry, due to its close location to Bodrum. The project has an area of 238,000 square meters consists of 31 hangars (Bodrum Ören Deniz Hizmetleri Sanayi Turizm ve Ticaret A.Ş., 2019) and is planned to be completed by 2023 (Turan & Akman, 2021b).

5.3.3. Initiatives in yacht-building education and training

In Bodrum, four vocational high schools and two university programs related to maritime and yacht building. Moreover, the demand for these schools where it is aimed to fulfil the demand for qualified employees in the sector is increasing. In addition, a project supported by the Ministry of Industry and Technology is being conducted by Muğla Sıtkı Koçman University named “Blue Generation” (GEKA, 2021). In this project, it is aimed to establish an applied, simulator, and computer-aided education and training centre for the individuals with the workforce potential needed for the yacht building and yacht tourism sectors.

5.3.4. University-industry collaboration

Unsan and Soylemez (Ünsan & Söylemez, 2004) underline the importance of the university-shipbuilding industry collaboration and refer to the universities as the core of the shipbuilding industry in Turkey. Especially in full custom and semi-custom yacht projects, computer-based design and optimization with research & development studies contribute to the added value of the industry. In addition, material testing and certification are required for enhanced design and production. The university-industry collaboration is needed to gain a competitive advantage against rivals in the yacht building market.

5.3.5. Compliance with the class rules and maritime regulations

The shipyards can produce numerous types of yachts with various building materials. Even though wood is the primary building material, steel, composite and aluminium boats can be built in Bodrum shipyards. The design and manufacturing facilities have extensive know-how for building luxury yachts complying with the class rules, European norms and maritime regulations, which increases the international competitiveness of the shipyards.

5.4. Threats

5.4.1. Economical parameters-fragile economy

Materials, machinery, rigging, and other outfitting equipment are imported and the cost of them constitutes more than 60% of the total cost of a sailing yacht built in Bodrum. The dependency on foreign currency increases the vulnerability of the sector to fluctuations in exchange rates.

5.4.2. Lack of energy supply

Energy supply is listed among the essential criterion that affects the location selection process of a yacht building facility (Hazneci, 2009). Yacht building has intense energy consumption which also promotes the carbon footprint of the sector. Purkis (Purkis, 2018) states that the negative effects of thermal power plants in terms of the environment also affect the yacht building in Muğla. Moreover, Bodrum is one of the centres that receive intensive immigration and energy consumption increases due to the dramatic increase in population, especially in the summer seasons.

5.4.3. Unplanned and disorganized shipyard facilities

The settlement of shipyards in Bodrum is unplanned and disorganized causing various problems. Based on the unsuitable landforms of Bodrum, the shipyards are scattered in the İçmeler region and most of the shipyards are far away from the shoreline and don't have the capabilities of ship launching or berthing. Therefore, the layout of shipyards decreases the overall production efficiency.

5.5. PESTLE Analysis

The political, economic, social, technological, legal and environmental factors are determined under the defined internal and external factors and tabulated as given in Table 3. The positive factors refer to strengths and opportunities; the negative factors refer to weaknesses and threats, under the internal and external factors, respectively. According to the clustered factors, economic subjects seem the primary topic for the Bodrum yacht building industry. The economic weaknesses and threats are related to the data inventory, marketing, construction material and outfitting equipment, which can be improved by sectoral investments. On the other hand, the geographic location of Bodrum increases the positive factors that the government and private incentives can trigger improvements in the sector. Table 3 shows that even though the number of negative factors is high, Bodrum has a remarkable potential to be a centre of yacht building.

6. Conclusion

The numerical data related to yacht building facilities are analyzed, and internal and external factors affecting the yacht building industry are determined for strategic decision making. According to the analyses, the following conclusions and suggestions for the future strategy are drawn for the Bodrum yacht building industry:

Table 3. SWOT/PESTLE analysis

Analysis → ↓ PESTLE	SWOT	
	Internal Factors	External Factors
Political	<ul style="list-style-type: none"> • Government incentives for shipyard establishment and yacht building (S/+) 	<ul style="list-style-type: none"> • Lack of energy supply (T/-)
Economic	<ul style="list-style-type: none"> • Location: Transportation and logistics (S/+) • Publicity and advertisement (S/+) • Lack of data on economical and production parameters (W/-) • Lack of segmentation and targeting strategies (W/-) • High dependence on import raw materials, equipment, and machinery (W/-) 	<ul style="list-style-type: none"> • Increasing demand for yachts with the length between 24-37 m (O/+) • New yacht building facilities (Ören) (O/+) • Economical parameters-fragile economy (T/-)
Social	<ul style="list-style-type: none"> • Historical and cultural background (S/+) 	<ul style="list-style-type: none"> • Initiatives in yacht-building education and training (O/+)
Technological	<ul style="list-style-type: none"> • Specific yacht types: Bodrum Gulets and Tırhandils (S/+) • Lack of technological development in the manufacturing processes (W/-) 	<ul style="list-style-type: none"> • University-industry collaboration (O/+)
Legal	<ul style="list-style-type: none"> • Required amendments in regulations (W/-) 	<ul style="list-style-type: none"> • Compliance with the class rules and maritime regulations (O/+)
Environmental	<ul style="list-style-type: none"> • Blue Voyage and other tourism alternatives (S/+) 	<ul style="list-style-type: none"> • Unplanned and disorganized shipyard facilities (T/-)

- Boatbuilding in Bodrum has strong social and environmental bases where unique and high-value-added yachts are built. Therefore, the number of influential national and international promotion and advertising activities should be increased. Increasing the number of the international boat-show trade fairs in the region, and seasonal or annual organizations are potential steps to be followed for increasing the awareness of the yacht building industry in Bodrum.

- The current know-how, which is promoted by the historical background in yacht building is remarkable and should be supported with advanced design and engineering optimization studies. Therefore, university-industry relationships should be strengthened under social and technological integration. Increasing the number of R&D projects for improving the building processes to improve quality with efficiency is suggested in this content.

- Political decisions should be supported by technological tools. A detailed and electronic inventory system is needed to evaluate the current situation and foresee the national position in the global area.

Moreover, a master plan for the yacht building, repair, and maintenance industry in Bodrum should be prepared. Targets should be integrated with this master plan to promote the yacht builders as well as the repair & maintenance facilities in the Bodrum region.

- Instead of focusing on a target group of customers, yacht builders tend to produce various yacht types. Segmentation of the domestic and the global market in yacht building is needed. Particularly, domestic demand should be increased by segmentation and targeting.
- To eliminate negativities in the economic factors that arise from dependency on the imported materials, machinery, and equipment domestic production should be supported to increase the number of domestic suppliers in the yacht building industry.
- Related to the new yacht building, repair & maintenance facilities in the Bodrum and Ören regions which will start to operate within 2 years, it is foreseen that energy supply capacities should be increased. Moreover, due to environmental issues, the renewable energy source used should be promoted in the region. Moreover, for the more efficient use of the energy sources and to eliminate the energy losses, the infrastructure of the existing yacht building facilities should be improved. Decreasing the waste in the used raw materials is another target issue in this content. The Government, university and industry collaboration is needed for such improvements.
- It is necessary to increase the education about yacht building and yacht design fields, which is the sub-field of shipbuilding, and to support domestic yacht designs in the industry.

Bodrum is in a good position in the global yacht building market, especially in sailing yacht building. When the situation between 2011-2021 is analyzed from the framework of the E-V-R model, it is seen that the region has many strengths and resources in the yacht building, repair&maintenance industry, as well as many advantages that will allow it to rise to higher ranks in the domestic and global yacht building markets. The findings show that even though the number of facilities in yacht building decreased significantly in the last ten years, the number of the new projects is on the trend an increase over the last two years. In this context, it is predicted that the number of new productions and the increase in total length will continue for 2022 and beyond. SWOT/PESTLE Analysis show that improvements in the yacht building industry in Bodrum depend on the government-industry and university-industry collaborations. For future strategies, actions should be planned to increase these collaborations.

7. References

Arılı, E. (2020). Effects of Covid-19 Process in Marine Business : An Evaluation on Marine Tourism Enterprises. The Eurasia Proceedings of Educational & Social Sciences (EPESS), 119–123.

Arslan, O., & Turan, O. (2009). Analytical investigation of marine casualties at the Strait of Istanbul with SWOT-AHP method. *Maritime Policy and Management*, 36(2), 131–145 <https://doi.org/10.1080/03088830902868081>.

Ayaz, H. (2015). Bodrum ve Turizm Sevdam. Destek Yayınları.

Binder, T. (2019). Bodrum Denizciliği ve Tekne Yapımcılığında Giritli Göçmenlerin Rolü. In *Ege Araştırmaları I-Batı Anadolu'da Giritliler* (pp. 217–250). Ege University Publishing.

Boat International. (2020). 2021 Global Order Book. Boat International. <https://www.boatinternational.com/yacht-market-intelligence/luxury-yachts-on-order/2021-global-order-book>.

Bodrum Belediyesi. (2020). Osmanlı Tersanesi. Bodrum Belediyesi. https://bodrum.bel.tr/page.php?id=25/osmanli_tersanesi.

Bodrum Ören Deniz Hizmetleri Sanayi Turizm ve Ticaret A.Ş. (2019). Bodrum Ören Deniz Hizmetleri Sanayi Turizm ve Ticaret A.Ş. Bodrum Ören Deniz Hizmetleri Sanayi Turizm ve Ticaret A.Ş. <http://www.bodrumorenyatimalat.com/>

Büyükkeçeci, E., & Turan, B. I. (2018). Türkiye’de Tekne Tasarımında Tasarımcının Rolünün Araştırılması: Gulet ve Motor Yat Karşılaştırması. UTAK 2018- 3. Ulusal Tasarım Araştırmaları Konferansı: Tasarım ve Umut Bildiri Kitabı, 159–171.

Depellegrin, D., Bastianini, M., Fadini, A., & Menegon, S. (2020). The effects of COVID-19 induced lockdown measures on maritime settings of a coastal region. *Science of the Total Environment*, 740 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140123>.

Dyson, R. G. (2004). Strategic development and SWOT analysis at the University of Warwick. *European Journal of Operational Research*, 152(3), 631–640, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00062-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00062-6).

GEKA, (2018), Muğla İli Yatırım Destek ve Tanıtım Stratejisi.

GEKA. (2021). Sosyal Gelişmeyi Destekleme Programı. GEKA. <https://geka.gov.tr/tr/basvurusu-devam-eden-destekler/destek/2021-yili-sogep>.

Gür, M. C. (2020). Kürekten Yelkene Kaybolan Miras. Koç Üniversitesi.

Gürler, A. (2013). A Comparative Study on the Yacht Building Industry: The Role of Design Strategy and Management in the Development of the Yacht Building Industry in the World and Turkey. Istanbul Technical University.

Hazneci, C. (2009). Türkiye’de Yat ve Küçük Tekne İmalatı Yapacak Yeni Tersane Alanlarının Yatırım Uygunluğu ve Yer Seçimi Açılırlarından İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi.

İMEAK-DTO. (2021). Denizcilik Sektör Raporu.

Kalyoncu, Y. (2020). Türkiye’de mavi tur pazarının büyüklüğü 300 milyon dolara ulaştı. Anadolu Ajansı, <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/turkiyede-mavi-tur-pazarinin-buyuklugu-300-milyon-dolara-ulasti/2016676>.

Köyağasıoğlu, Y. (2014). Denizin Kanatlı Perileri Yelkenliler, Naviga Publishings.

Kükner, A. (2007). Türk Guleti. *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, 174, 7–8.

Kükner, A. (2009). Türk Tipi Yelkenli Tekne Gulet. *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, 181, 5–12.

Merendino, A. (2014). Mega Yacht, Italian Leadership and Financial Crisis. Empirical Evidence on How Italian Leading Companies in Mega Yacht Sector Overcome the Crisis. *European Scientific Journal*, 10(28), 9–35.

Milošević, D. (2020). The impact of COVID 19 on maritime tourism: challenges and recommendations for Montenegro. Student International Scientific Conference.

Montigneaux, R., & Robinson, N. (2021). Global order book: Over 1,000 superyacht projects on order in 2022. Boat International. <https://www.boatinternational.com/yacht-market-intelligence/luxury-yachts-on-order/how-many-superyachts-on-order-for-2022>.

Muğla Büyükşehir Belediyesi Ulaşım Dairesi Başkanlığı Ulaşım Planlama Şube Müdürlüğü. (2018). Muğla Ulaşım Ana Planı. [https://www.mugla.bel.tr/uploads/komisyoneraportr/Ek-6 MUAP RAPOR 4.pdf](https://www.mugla.bel.tr/uploads/komisyoneraportr/Ek-6_MUAP_RAPOR_4.pdf).

NMBL Strategies. (2021). Four Alternatives to a SWOT Analysis. NMBL Strategies. <https://www.nmbstrategies.com/blog/four-alternatives-to-a-swot-analysis>.

Phadermrod, B., Crowder, R. M., & Wills, G. B. (2019). Importance-Performance Analysis based SWOT analysis. *International Journal of Information Management*, 44, 194–203. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2016.03.009>.

Purkis, S. (2018). Muğla'nın Kaliteli Bir Yaşam Ekseninde Gelişme Olanaklarının Kömürle Enerji Üretimi Çerçevesinde Değerlendirilmesi. *Eğitim Bilim Toplum Dergisi*, 16(62), 10–27.

Renaud, L. (2020). Reconsidering global mobility–distancing from mass cruise tourism in the aftermath of COVID-19. *Tourism Geographies*, 22(3), 679–689. <https://doi.org/10.1080/14616688.2020.1762116>

Srdjevic, Z., Bajcetic, R., & Srdjevic, B. (2012). Identifying the Criteria Set for Multicriteria Decision Making Based on SWOT/PESTLE Analysis: A Case Study of Reconstructing A Water Intake Structure. *Water Resource Management*, 26, 3379–3393.

Sungur, E. (2021). Tersanelere 2 milyar 300 milyon lira teşvik. *Denizcilik Dergisi*.

Tatenhove, J. P. M. van. (2021). COVID-19 and European maritime futures : different pathways to deal with the pandemic. *Maritime Studies*.

Thompson, J. L. (1999). A strategic perspective of entrepreneurship. *International Journal of Entrepreneurial Behaviour & Research*, 5(6), 279–296. <https://doi.org/10.1108/13552559910306105>

Turan, B. I. (2021). Konfor ve Lüks Unsurlarının Bodrum Guletleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Dergisi*, 13(1), 37–55. <https://doi.org/10.18613/deudfd.942940>.

Turan, B. I., & Akman, M. (2021a). Modeling and Comparison of Bodrum Gulets' Hull Forms with Round and Transom Sterns. *Journal of ETA Maritime Science*, 9(2), 120–129. <https://doi.org/10.4274/jems.2021.09327>.

Turan, B. I., & Akman, M. (2021b). Muğla'da Yat İmalatı Sektörü. In O. Bahar & M. Avcı (Eds.), *Muğla Kent Ekonomisi* (1st ed., pp. 126–149). Detay Yayıncılık.

Turan, B. I., & Özcan, A. C. (2018). Akdeniz'e Özgü Bir Kültür ve Tasarım Etkinliği: Mavi Yolculuk ve Bodrum Guleti. 1. Uluslararası Akdeniz Sempozyumu, 180–200.

Ünlüsü, C. (2004). Türkiye'de Mega Yat Yapımı. *Gemi Mühendisliği ve Sanayimiz Sempozyumu*, 16–19.

Ünsan, Y., & Söylemez, M. (2004). Dünya Rekabet Ortamında Gemi İnşa Sektörünün En Önemli Dostu: Üniversite. *Gemi Mühendisliği ve Sanayimiz Sempozyumu*, 52–63.

Urbanyi-Popiolek, I. (2020). Maritime Tourism in the Time of COVID-19 Pandemic in the Baltic Sea Region – Challenges for Ferry and Cruise Operators. 63rd International Scientific Conference on Economic and Social Development – “Building Resilient Society,” 397–405.



Yang, Y. (2010). SWOT-TOPSIS integration method for strategic decision. Proceedings of the International Conference on E-Business and E-Government, ICEE 2010, 1575–1578. <https://doi.org/10.1109/ICEE.2010.399>.

Yüksek, G. (2013). Türkiye’de Yat ve Marina İşletmeciliği: İstihdam Değerlendirmesi için Mevcut Durum Analizi. *Beykoz Akademi Dergisi*, 1(1), 59–84.

Zaltsman, J. (2021). Forget Hot Baths. Turkey Is Now the World’s Third-Largest Builder of Superyachts. *Robb Report*. <https://robbreport.com/motors/marine/turkey-worlds-third-largest-builder-superyachts-1234638862/>.

Darpa Denizalti Modelinde Derinliğe Bağlı Olarak Değişen Hidrodinamik Manevra Türevlerinin ve Yatay Stabilitenin İncelenmesi

Furkan Çavdar ¹, Şakir Bal ²

^{1,2}Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi,
Ayazaga Kampüsü, Maslak-Sarıyer, İstanbul, Türkiye

¹(sorumlu yazar), cavdarf@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3245-5432

² sbal@itu.edu.tr, 0000-0001-8688-8482

ÖZET

Bilindiği üzere, DARPA SUBOFF denizaltı modeli derin suda yatay stabiliteye sahip değildir. Bu çalışmada, denizaltı modelinin periskop (şnorkel) seyri esnasında veya su yüzeyine yakın hareket ederken yatay stabilitesi 3 serbestlik dereceli olarak tespit edilmiştir. Denizaltı stabilitesi ve hidrodinamik manevra türevleri tespit edilirken farklı derinliklerde yanıl öteleme kuvvetine ait doğrusal katsayılar ve savrulma açısal momentine ait doğrusal katsayılar kullanılmıştır. Denizaltı çapı D olmak üzere, derinlikler 1.1D, 2.2D, 3.3D ve 6D olarak seçilmiştir. Manevra türevleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodlarıyla bir seri sistematik analiz yapılarak elde edilmiştir. Hesaplamalı analizlerde gerekli doğrulama çalışmaları da yapılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde boyuna ve yanıl kuvvet türevleri, ve savrulma momenti türevleri hesaplanarak doğrusal modelde X_0 , X_v , X_d , X_δ , Y_v , Y_r , Y_δ , N_v , N_r ve N_δ katsayıları belirlenmiş ve hidrodinamik model oluşturulmuştur. Farklı derinliklere göre elde edilen hidrodinamik türevler ile denizaltının yatay stabiliteye sahip olup olmadığı tespit edilmiştir. Denizaltı modelinin, serbest su yüzeyine yakın seyir durumlarında yatay stabiliteye sahip olduğu ve 4.6D derinlikten itibaren ise yatay stabilitesini kaybettiği bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: DARPA denizaltı modeli, yatay stabilite, manevra türevleri, HAD, derinlik etkisi.

Makale geçmişi: Geliş 08/03/2022 – Kabul 25/05/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1084413>

An Investigation of Hydrodynamic Maneuvering Derivatives and Horizontal Stability of Darpa Suboff Depending on Depth

Furkan Cavdar ¹, Şakir Bal ²

^{1,2} Istanbul Technical University Department of Naval Architecture and Marine Engineering,
Ayazaga Campus, Maslak-Sariyer, Istanbul

¹(corresponding author), cavdarf@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3245-5432

² sbal@itu.edu.tr, 0000-0001-8688-8482

ABSTRACT

It is known that DARPA SUBOFF submarine model does not have a horizontal stability in deep water. In this study, the horizontal stability of submarine model moving during the periscope (snorkel) position or close to the free water surface, has been determined in 3 DoF (degrees of freedom). While determining the submarine stability and hydrodynamic maneuvering derivatives, linear coefficients of lateral translational force at different depths and linear coefficients of yaw angular moment were used. The depths were selected as 1.1D, 2.2D, 3.3D and 6D, here D is submarine diameter. The maneuvering derivatives were obtained by performing systematic analyzes with the computational fluid dynamics method. Necessary validation studies were also carried out in computational analyzes. In computational fluid dynamics analysis, longitudinal and lateral force derivatives, and yaw moment derivatives were determined and X_0 , X_v , X_d , X_δ , Y_v , Y_r , Y_δ , N_v , N_r ve N_δ terms were computed in the linear model. A hydrodynamic model was generated with these coefficients. The horizontal stability was then determined with the effects of different depths by using this hydrodynamic model. It has been found that the submarine model has horizontal stability when cruising close to the free water surface and loses its horizontal stability for water depths greater than 4.6D.

Keywords: DARPA SUBOFF, horizontal stability, maneuvering derivatives, CFD, depth effect.

Article history: Received 08/03/2022 – Accepted 25/05/2022

Nomenclature

C2 :	Hull, Sail and Stern Obsession Model	VOF :	Volume Free Surface Modeling Method
C4 :	Hull and Sail Obsession Model	X :	Submarine longitudinal force component
CAD :	Computer Aided Drawing	X0 :	Submarine resistance coefficient in the X plane
D :	DARPA submarine diameter	Xd :	The depth effect coefficient in the X plane
DARPA :	The Defense Advanced Research Projects Agency	Xg :	Longitudinal center of gravity
DSM :	DARPA Suboff Model	X _δ :	Coefficient of rudder force in the X plane
DTRC :	David Taylor Research Center	Xv :	First-order derivative coefficient of X force with respect to v velocity
Gh :	Number of horizontal stability	Y :	Submarine lateral force component
Gv :	Number of vertical stability	Yv :	First order derivative coefficient of Y force with respect to v velocity
HAD :	Computational Fluid Dynamics	Yr :	First-order derivative coefficient of Y force according to yaw speed r
I :	DARPA submarine yaw moment of inertia	Y _δ :	Coefficient of rudder force in the Y plane
L :	DARPA submarine model size	ρ :	Sea density
LES :	Big Eddy Simulations		
m :	mass of DARPA submarine		
N :	Submarine understeer moment component		
Nv :	First-order derivative coefficient of moment N with respect to velocity v		
Nr :	First-order derivative coefficient of moment N with respect to yaw speed r		
N _δ :	N moment effect coefficient of rudder moment		
PMM :	Planar Motion Mechanism		
r :	Submarine yaw angular velocity		
RANS :	Reynold Mean Navier Stokes Equations		
u :	Submarine longitudinal velocity		
v :	Submarine lateral velocity		

1. Introduction

Submarines moving close to the free surface are needed for reasons such as air requirement, battery charging, GPS location determination and communication with the base (Kırıkbaş et al., 2021a). Because of these needs, it is necessary to examine the course keeping capabilities and stability of submarines operating at different depths, including near surface. The course keeping capabilities and stability of submarines are directly dependent on many factors such as fin configuration, submarine form, rudders and the depth of the submarine from the free surface. Cruising stability in the horizontal plane can be determined by submarine hydrodynamic derivatives (coefficients). For this reason, the correct calculation of the hydrodynamic derivatives of submarines operating at different depths is important in the maneuver of submarines (Amiri et al., 2019).

In order to investigate the maneuvering performance of submarines, whether in deep water or near free surface, the determination of hydrodynamic derivatives is required. Generally, the methods used to determine the hydrodynamic derivatives of submarines were described as empirical methods, experimental methods and CFD methods. There are studies in the literature that describe the advantages and disadvantages of these methods compared to each other, and studies that examine these three working methods according to each other and share the maneuver results (ITTC, 2008). Also, there are studies in the literature that obtain hydrodynamic derivatives with CFD and empirical approaches and the derivatives are validated by experimental data (Duman, S., Bal, S., 2019). In order to develop these methods, some submarine models have been created to be used in the literature. There are studies in which the submarine models used in the common literature are introduced and standard maneuvering tests are applied (Kırıkbaş et al., 2021b). Darpa submarine model is an example of this. With the increase in the use of submarines, some regulations have been made to determine the maneuvering performance of submarines (Kırıkbaş et al., 2021c). Maneuver tests were also applied to the Darpa SUBOFF submarine model at different depths and at different drift angles, according to the standards determined, and the coefficients for the model were given for depths close to the surface (Efremov and Milanov, 2019). These linear coefficients are also evident for deep waters (Roddy 1990). In this study, it was reported that the submarine did not have horizontal stability in deep water conditions. The reason why DARPA Suboff Geometry does not have horizontal stability has been explained in the literature. It has been noted that for DARPA geometry, sail-induced and rudder-induced eddies are too large and quickly render the submarine model physically unstable (Ashok and Smith 2013). First of all, the stability of the system should be checked and only then will the hydrodynamic derivative determination work be meaningful. Therefore, in this study, a study was conducted on the calculation of derivatives after controlling the stability of the submarine at different depths (Racine and Peterson, 2012). So, what is the deep-water limit? It has been found that depth has a significant effect on submarine resistance when the depth Froude number is greater than 0.7 (Dogrul, A., 2019). Here, this depth limit has been chosen to define the deep-water case.

In this study, the STAR-CCM+ package program has been used to implement the CFD method. In the study, static drift tests were applied to determine the hydrodynamic derivatives representing the lateral velocity derivatives in accordance with the examples given in the literature. In addition, pure yaw tests were applied to determine the hydrodynamic derivatives representing the yaw angular velocity derivatives (Yoon, H., 2009). The wave resistance of submarine and rudder performance at different depths close to the free water surface were investigated. First, the results from CFD analysis were validated with those of experiments given in literature. Then, the hydrodynamic derivatives and rudder geometries derivatives were calculated on the horizontal axis for the DSM. The near-surface (snorkel) depths of the DSM have also been considered. According to these derivatives, the horizontal

stability characteristic of DSM, which is known as unstable in deep water, at depths close to the free surface has been investigated.

2. Hydrodynamic Model

In this study, horizontal stability has been examined. The necessary quantities for investigating the horizontal stability are the lateral forces and yaw moment. Therefore, the model has three degrees of freedom. Three degrees of freedom are represented by two translational and one rotational motion. The force - moment symbols for these degrees of freedom are defined in Table 1 with the translation - rotational speeds and position - angle information.

Table 1: Symbols used for degrees of freedom of submarine.

Degrees of Freedom	Remark	Force and moment	Translational and rotational speed	Position and Angle
1	X direction translation	X	u	x
2	Y direction translation	Y	v	y
3	N direction rotation	N	r	ψ

The directions of translational and rotational motions are defined in Figure 1 with the arrow direction denoting the positive direction.

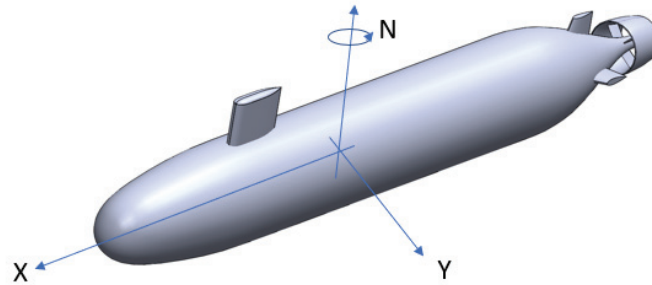


Figure 1. Three degrees of freedom system for submarine

The hydrodynamic model to be used in the three-degree-of-freedom system is given in equations 1, 2, and 3 as follows (Inoune et al., 1981);

$$X_H = X_o + X_v * v^2 + X_\delta * \delta^2 + X_d \quad (1)$$

$$Y_H = Y_v * v + Y_r * r + Y_\delta * \delta \quad (2)$$

$$N_H = N_v * v + N_r * r + N_\delta * \delta \quad (3)$$

Here, X_H denotes the hydrodynamic forces in the X direction and Y_H in the Y direction. N_H represents the hydrodynamic moment in the N direction. The X_o coefficient is the sum of the drag forces in the X direction obtained from the linear motion of the DSM while moving at a speed of 6.5 knots in deep

water without any rudder effect or drift effect. The X_v coefficient represents the first-order derivative of the forces in the X direction according to the lateral velocity v . X_d refers to the force acting in the x direction depending on the depth. The X_δ coefficient represents the sum of the rudder-induced forces in the x direction. The Y_v coefficient represents the first-order derivative of the forces in the Y direction according to the v lateral velocity. The Y_r coefficient represents the first order derivative according to the yaw angular velocity r of the forces in the Y direction, and the Y_δ coefficient represents the sum of the rudder-induced forces in the Y direction. The N_v coefficient shows the first order derivative of the moments in the N direction according to the v lateral velocity, and the N_r coefficient shows the first order derivative of the moments in the N direction according to the yaw angular velocity r . The N_δ coefficient is the sum of the rudder-induced moments in the N direction. All coefficients vary with depth, except for X_o . The submarine model image is shown in Figure 2. The physical variables and terms used for nondimensionalization are given Table 1.



Figure 2. DARPA Suboff 3D model

The non-dimensional terms used in the study are given in Table 2.

Table 2. Non-dimensionalization terms

Variables	Terms for Nondimensionalization
Velocity	U
Angular velocity	U/L
Forces	$0.5 \cdot \rho \cdot L^2 \cdot U^2$
Moments	$0.5 \cdot \rho \cdot L^3 \cdot U^2$
Acceleration	U^2/L
Angular acceleration	U^2/L^2

In Figure 3, a submarine image at different depths is given.

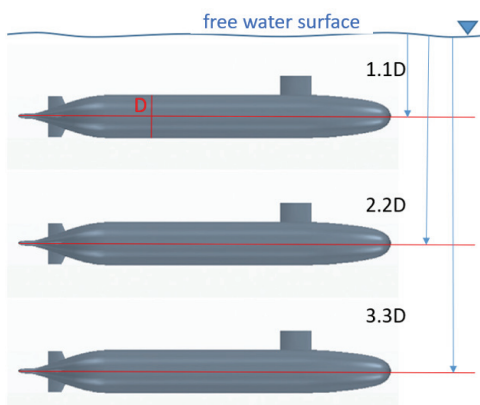


Figure 3. DARPA Suboff at different depths

3. Validation and Verification Analysis

In order to minimize the effects of the outer boundaries on the computational domain, a sufficiently large computational domain should be selected. In this study, the main dimensions of the domain are 1.5L from the front, 5L from the back, 2L from the sides and 2L from the top and bottom (Sezen et al., 2018).

Three different mesh studies were performed for each model. The total number of meshes in the mesh structure and the increase in the mesh structure from coarse to fine show proportionality. There are studies in the literature with an increase rate of 1.6 mesh (Li et al., 2019). In this study, the mesh growth rate was chosen as 1.6. The mesh independence information and parameters are shown in Table 3.

Table 3. A study on mesh independence

Depth	Naming	Basic size	Number of cells	Cell increase rate
1.1D	Coarse	10.00	727044	-
1.1D	Medium	7.50	1223770	1.683
1.1D	Fine	6.0	1927698	1.575
2.2D	Coarse	10.0	677568	-
2.2D	Medium	7.50	1115281	1.646
2.2D	Fine	6.0	1766403	1.583
3.3D	Coarse	10.0	662324	-
3.3D	Medium	7.50	1086891	1.641
3.3D	Fine	6.0	1738435	1.599
Deep water	Coarse	10.0	560894	-
Deep water	Medium	7.50	896523	1.598
Deep water	Fine	6.0	1408255	1.570

The results of static drift tests with $k - \epsilon$ turbulence model at different depths are compared in Table 4. Thus, it has been noticed that the error level has decreased below 2 percent in X force, 4 percent Y force, and 3 percent N moment between the medium density mesh and fine mesh.

Table 4. Mesh percent difference values

Depth	Mesh naming (difference)	%X difference	%Y difference	%N difference
1.1D	Coarse-Medium	0.58	3.30	3.72
1.1D	Medium-Fine	0.07	3.02	2.55
2.2D	Coarse-Medium	1.14	3.53	2.77
2.2D	Medium- Fine	0.38	1.63	1.44
3.3D	Coarse-Medium	0.99	2.59	0.70
3.3D	Medium- Fine	0.01	1.21	0.78
Deep Water	Coarse-Medium	0.83	1.23	0.78
Deep Water	Medium-Fine	0.22	0.56	0.73

The mesh structure at 1.1D is shown in Figure 4. In order to accurately model the viscous effects of the submarine, a more fine mesh structure was created in the nose, sail and stern areas. In addition, in order to better model the effect of fluctuations on the free water surface, the mesh structure is

arranged according to the depth. This free water surface layer will allow the VOF solution to converge. The Y^+ value should be between 30 and 300 in the analyzes to be made with the RANS method (Sezen et al., 2018; Duman and Bal, 2021). In this study, Y^+ was chosen as 50. The boundary layer thickness in the mesh structure was calculated as 0.06 meters and modeled with 15 layers. The boundary layer expansion ratio was determined as 1.2. Time step in the analysis is chosen 0.2 sec.

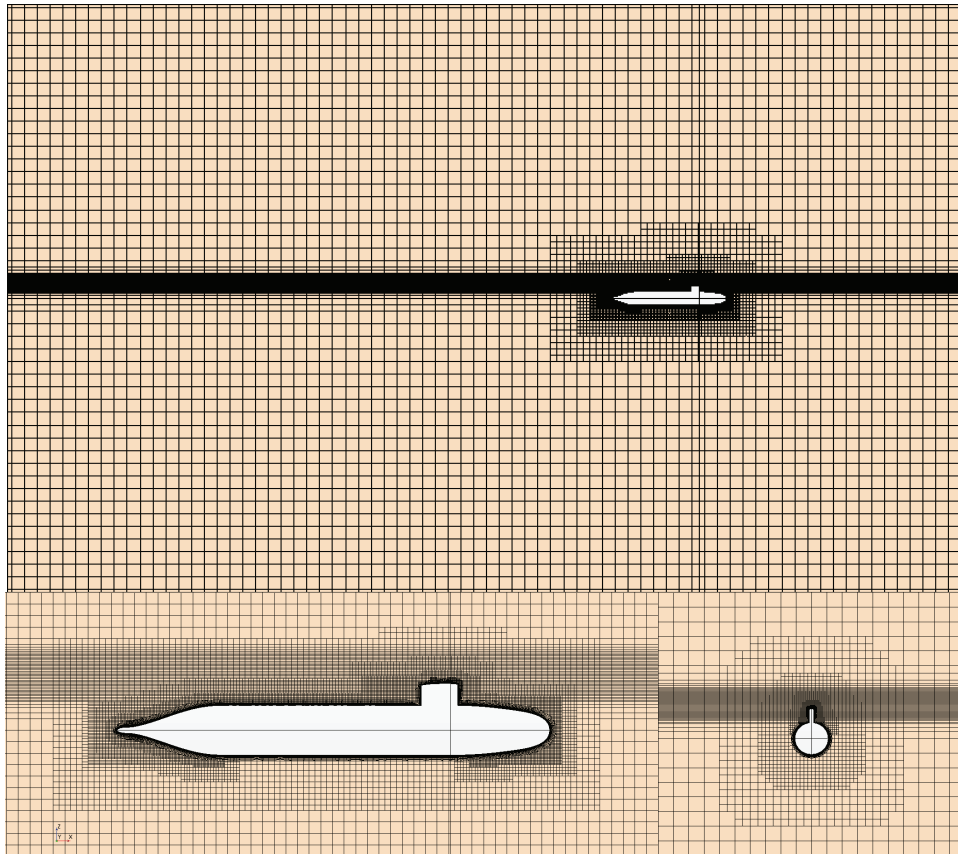


Figure 4. 1.1D mesh structure and computation domain

The flow around underwater platforms is turbulent, and a turbulence model should be chosen in accordance with the effects of Reynolds stresses in CFD studies using the RANS method. It has been observed that the “Realizable” $k - \epsilon$ model responds better to dynamic tests both in terms of results and time optimization (Sakaki and Kerdabadi, 2020). Again, by comparing $k - \epsilon$ and $k - \omega$ models in the literature, it is noted that the $k - \epsilon$ model expresses the rotation effects better (Ray et al., 2009) as well as in non-dynamic tests in submarine maneuvering studies. In this study, $k - \epsilon$ turbulence model was used in static drift tests, and realizable $k - \epsilon$ turbulence model was applied in pure yaw tests.

Deep water validation data for different drift angles with respect to X, Y and N axes are given in Table 5. While the forces and moments were obtained in the analysis results, the forces and moments in the X force, Y force and N moment were used in the analyses. The forces and moment obtained as a result of the analyses are nondimensional according to the terms given in Table 1. As expected, the numbers are negative on the X axis and change the sign on the Y and N axes according to the direction of the drift angle. In the present CFD analysis, Darpa Submarine is assumed to be axisymmetrical and the analysis results show symmetrical behaviors. Therefore, validation data (Roddy, 1990) and analysis results by CFD actually produced different errors under the same conditions. Experimental data do not show symmetrical results.

Table 5. Validation in deep water case (Roddy, 1990)

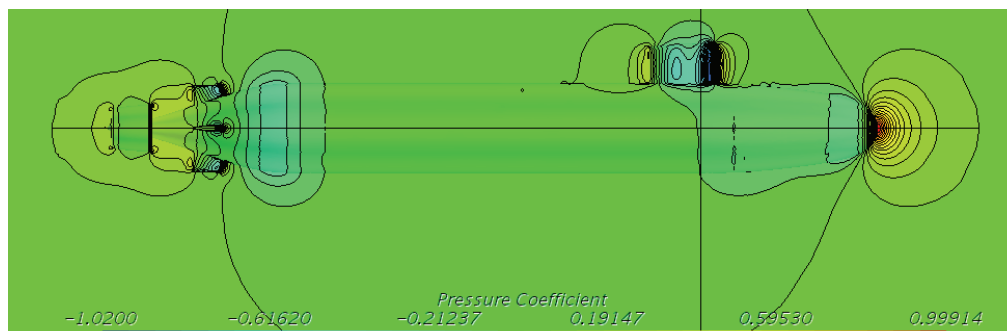
Drift angle	X nondimensional force		
	Validation Data	Analysis Result	%Error
-4	$-1.13 \cdot 10^{-3}$	$-1.15 \cdot 10^{-3}$	1.2
-2	$-1.16 \cdot 10^{-3}$	$-1.08 \cdot 10^{-3}$	6.3
2	$-1.15 \cdot 10^{-3}$	$-1.08 \cdot 10^{-3}$	6.0
4	$-1.13 \cdot 10^{-3}$	$-1.15 \cdot 10^{-3}$	1.8
Drift angle	Y nondimensional force		
	Validation Data	Analysis Result	%Error
-4	$-1.39 \cdot 10^{-3}$	$-1.54 \cdot 10^{-3}$	10.9
-2	$-9.26 \cdot 10^{-4}$	$-7.30 \cdot 10^{-4}$	21.2
2	$7.01 \cdot 10^{-4}$	$7.30 \cdot 10^{-4}$	4.1
4	$1.51 \cdot 10^{-3}$	$1.54 \cdot 10^{-3}$	2.2
Drift angle	N nondimensional moment		
	Validation Data	Analysis Result	%Error
-4	$-1.10 \cdot 10^{-3}$	$-1.05 \cdot 10^{-3}$	4.2
-2	$-5.22 \cdot 10^{-4}$	$-5.28 \cdot 10^{-4}$	1.2
2	$5.68 \cdot 10^{-4}$	$5.28 \cdot 10^{-4}$	7.1
4	$1.11 \cdot 10^{-3}$	$1.05 \cdot 10^{-3}$	4.9

The validation data of submarine resistance at different depths according to the X-axis are given in Table 6. Validation data is taken from this article (Li, D., et al., 2021). The X force (resistance) obtained by CFD method is nondimensional. The resistance is increasing as the submarine approaches to the free surface, as expected.

Table 6. Validation for resistance (Li, D., et al., 2021)

Depth	Validation Data	Analysis Result	% X difference
1.1D	$-2.563 \cdot 10^{-3}$	$-2.697 \cdot 10^{-3}$	5.26
2.2D	$-1.428 \cdot 10^{-3}$	$-1.510 \cdot 10^{-3}$	5.79
3.3D	$-1.125 \cdot 10^{-3}$	$-1.205 \cdot 10^{-3}$	7.10

Pressure distribution and wave deformation on the free surface obtained from CFD method are also shown for the completeness of the paper in Figures 5 and 6, respectively. It can be seen in the Figure 5 that the positive pressures have been detected in the bow section and fore of the sail and negative pressures in the stern region as expected in depth water. In Figure 6 Kelvin wave pattern has been obtained by CFD method. It can be noted that CFD method is modelling the physical problem properly.


Figure 5. Pressure distribution at deep water

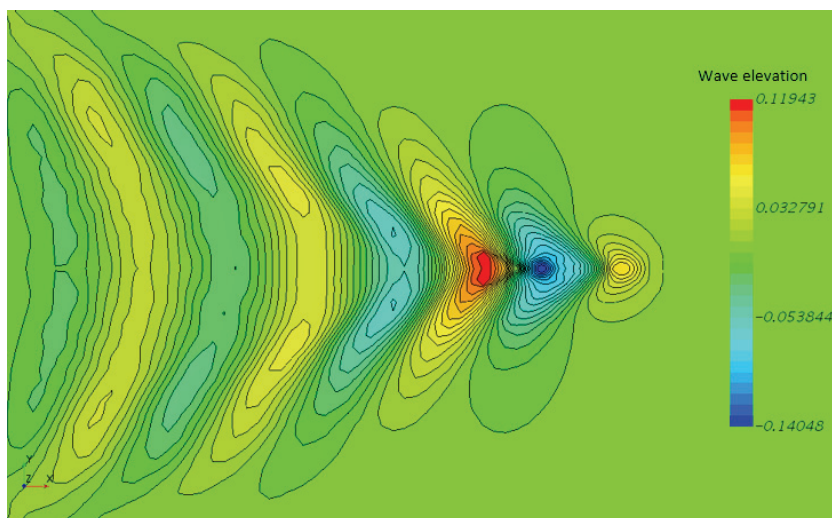


Figure 6. Kelvin wave pattern at 1.1D

4. Cases

The necessary equations for the static drift tests (pure yaw cases) and the determination of hydrodynamic derivatives are given here. Static drift tests are a form of non-accelerated test based on the wall boundary condition. It is initiated with a drag angle. Only forward and lateral translation velocities occur in static drift tests. This test which is free from angular yaw velocity and acceleration, is also free from lateral translational acceleration. The values of the velocities and accelerations of the static drift analyzes are defined in Table 7 according to the submarine coordinates (Yoon, H., 2009).

Table 7. Velocities and accelerations in static drift cases (Yoon, H., 2009)

Motion	Static drift
u	$U_c \cos \beta$
\dot{u}	0
v	$U_c \sin \beta$
\dot{v}	0
r	0
\dot{r}	0

Cases at different drift angles and different depths were considered for the X_v , Y_v and N_v coefficients determined by static drift analysis. The cases performed for the determination of lateral translational hydrodynamic derivatives in static drift experiments are shown in Table 8.

Table 8. Cases studied in static drift analysis.

Depth	Drift angle	Rudder angle
6.0D	4, 2, 0, -2, -4	0
1.1D	4, 2, 0, -2, -4	0
2.2D	4, 2, 0, -2, -4	0
3.3D	4, 2, 0, -2, -4	0

For the determination of the X_v , Y_v and N_v equations, the magnitudes of the X, Y forces and N moment are given in equations 4, 5 and 6, respectively. The equations are in linear form. The effect of angular yaw velocity r is not clearly seen in these equations since the r velocity and acceleration terms are zero.

$$X = X_0 + X_v v \quad (4)$$

$$Y = Y_v v \quad (5)$$

$$N = N_v v \quad (6)$$

Another static drift case is to examine the effect of different rudder angles on the analysis results. In the static drift analysis, X_δ , Y_δ ve N_δ coefficients were determined at different rudder angles and at different depths. The cases performed to determine the hydrodynamic rudder coefficients are shown in Table 9.

Table 9. Cases used for the determination of rudder derivatives

Depth	Drift angle	Rudder angle
6.0D	0	-15, -10, -5, 0, 5, 10, 15
1.1D	0	-15, -10, -5, 0, 5, 10, 15
2.2D	0	-15, -10, -5, 0, 5, 10, 15
3.3D	0	-15, -10, -5, 0, 5, 10, 15

Cases used in pure yaw analyzes were performed for the determination of Y_r ve N_r hydrodynamic derivatives. These analyzes are dynamic and designed to eliminate the lateral translation velocity and lateral translation acceleration. In Table 10, the pure yaw speeds and accelerations of the model are given with respect to ship coordinate system (Yoon, H., 2009).

Table 10. Velocities and accelerations in model coordinates in pure yaw analysis (Yoon, H., 2009)

Motion	Pure yaw
u	$U_c \sqrt{1 + \varepsilon^2 \cos^2 wt}$
\dot{u}	$-U_c w \frac{\varepsilon^2 \sin 2wt}{2\sqrt{1 + \varepsilon^2 \cos^2 wt}}$
v	0
\dot{v}	0
r	$\varepsilon w \sin wt \frac{1}{1 + \varepsilon^2 \cos^2 wt}$
\dot{r}	$\varepsilon w^2 \cos wt \frac{1 + \varepsilon^2 (1 + \sin^2 wt)}{(1 + \varepsilon^2 \cos^2 wt)^2}$

The instantaneous angular yaw velocity and angular yaw acceleration in pure yaw analysis of dynamic tests can be defined as in equations 7 and 8, as follows:

$$r = r_{max} \sin \omega t \quad (7)$$

$$\dot{r} = \dot{r}_{max} \cos \omega t \quad (8)$$

According to the yaw angular velocity and yaw angular acceleration, the hydrodynamic derivatives to be determined for the Y force and the N moment obtained in the analyzes are Y_r and N_r , and additional added masses will also affect the results since the acceleration term is not zero. Hydrodynamic equations of force and moment Y and N are given in equations 9 and 10 as:

$$Y = Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_r r \quad (9)$$

$$N = N_{\dot{r}} \dot{r} + N_r r \quad (10)$$

Forces can also be written as Taylor expansions with respect to model frequency. The frequency in the Taylor series expansion corresponds to the angular yaw velocities of 0.04, 0.08, 0.12 and 0.16 determined for the submarine, and the pure yaw has been determined in accordance with the test results in similar studies. Equations of Taylor expansions have been linearized in this study and higher order terms have been neglected. Linearized Taylor expansion equations are given in equations 11 and 12 (Yoon, H., 2009) as follows:

$$Y = Y_{c1} \cos \omega t + Y_{s1} \sin \omega t \quad (11)$$

$$N = N_{c1} \cos \omega t + N_{s1} \sin \omega t \quad (12)$$

The physical equivalents of Taylor expansion coefficients in the equations are given in equations 13-16. Derivative terms used here with sine represent hydrodynamic derivatives (Y_r and N_r), derivatives represent by cosine added mass (Yoon, H., 2009).

$$Y_{s1} = Y_r r_{max} \quad (13)$$

$$Y_{c1} = Y_{\dot{r}} \dot{r}_{max} \quad (14)$$

$$N_{s1} = N_r r_{max} \quad (15)$$

$$N_{c1} = N_{\dot{r}} \dot{r}_{max} \quad (16)$$

If a curve as in equation 2 is derived for the Y force and N moment from multiple run method, the relevant coefficients can be obtained (Yoon, H., 2009):

$$y = Ax, \quad y = Y, N, \quad x = r_{max}, \quad Y_r, N_r = A \quad (17)$$

The cases to be used for the hydrodynamic derivatives (Y_r ve N_r) of pure yaw analyzes are given in Table 11.

Table 11. Cases for pure yaw derivatives

Depth	Angular yaw velocities	Rudder angle
6.0D	0.04, 0.08, 0.12, 0.16	0
1.1D	0.04, 0.08, 0.12, 0.16	0
2.2D	0.04, 0.08, 0.12, 0.16	0
3.3D	0.04, 0.08, 0.12, 0.16	0

5. Hydrodynamics Derivatives

The lateral translation in Y_v and N_v derivatives was created with the first order curves according to v velocity, in Y_r and N_r derivatives according to yaw angular velocity, and in X_δ , Y_δ and N_δ coefficients according to rudder angle. Only in the X_δ derivative, a second-order curve is used due to the force distribution. Dimensionless coefficient curves varying with depth are shown with in Figure 7. As a result, for the nine derivative values given in the graph, the curves of those values were determined and the numerical coefficients were obtained from the first-order slope of the curves. The coefficients change with depths. As a result of this study, the nine linear derivatives was calculated according to four different depths and thirty-six derivatives were determined.

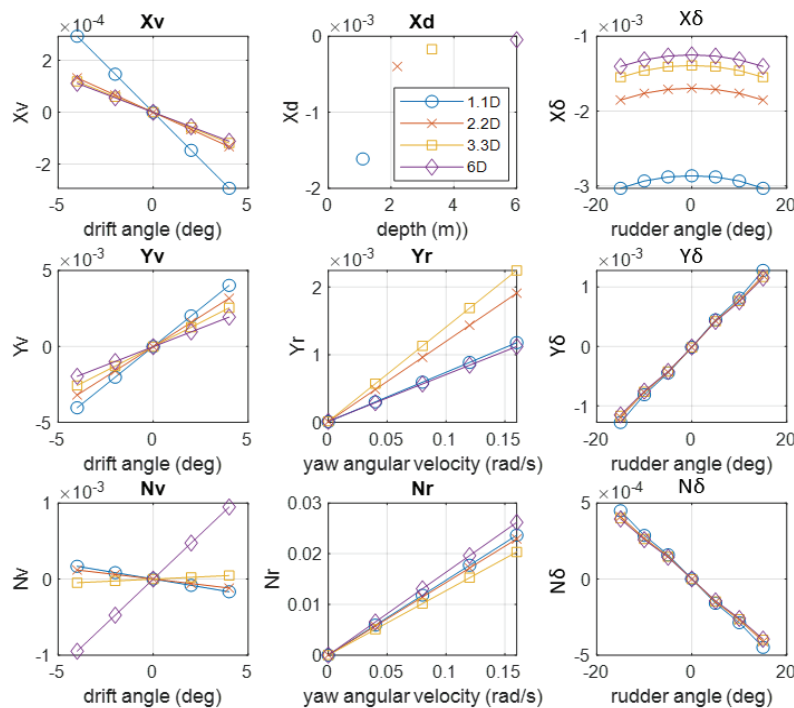


Figure 7. Change in nondimensional hydrodynamic derivatives versus depth

Different values were found for nine derivatives at different depths. Curves of each derivative at different depths have been generated and given. The coefficients are given as nondimensional. It can be seen from this figure that as the depth increases, many coefficients change, as shown in Figure 8. The physical meaning of this is that free surface affects significantly the submarine at different depths.

In order to produce hydrodynamic derivative curves for the submarine, the depth where the submarine is not affected by the free water surface is defined as deep water. If the depth Froude number is less than 0.7, it is assumed as deep water (Dogrul A., 2019). In addition, Hoerner gave the wave resistance change limit as 5D in his book (Hoerner, S. F., 1965). In this study, the aforementioned deep water depth was chosen as 6D as in the literature (Efremov, D. V., & Milanov, E. M., 2019) and the depth Froude number was 0.61. DSM Deep water analyzes and resistance analyzes at 6D depth were compared and the difference was determined as 3%, and the 3% resistance difference corresponds to the sum of X_0 and X_d hydrodynamic derivatives at 6D depth.

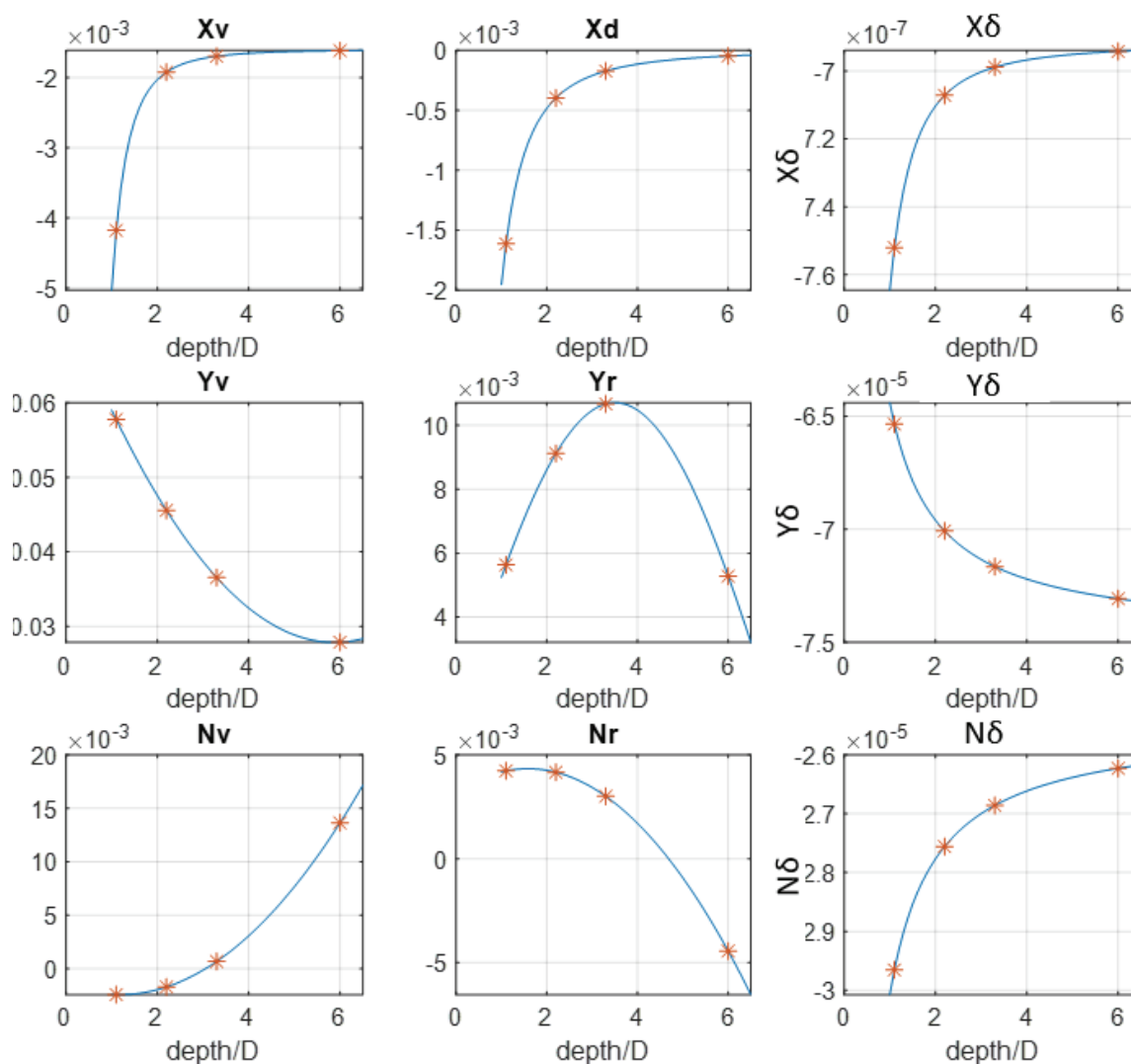


Figure 8. Change in hydrodynamic derivatives versus depth

The curves were derived from the coefficients obtained according to the depths and their equations are given below (Equations 18 to 27). With these formulas, the behavior of intermediate values without

computational fluid dynamics studies can be calculated. Δ in the equations represents the depth distance from the free water surface in meters.

$$X_0 = -1.25 * 10^{-3} \quad (18)$$

$$X_v = -4.50 * 10^{-4} * \Delta^{-3} - 1.6 * 10^{-3} \quad (19)$$

$$X_d = -5.06 * 10^{-4} * \Delta^{-2} + 8.22 * 10^{-6} \quad (20)$$

$$X_\delta = -1.87 * 10^{-8} * \Delta^{-2} - 6.92 * 10^{-7} \quad (21)$$

$$Y_v = -5.07 * 10^{-3} * \Delta^2 + 3.03 * 10^{-2} * \Delta - 7.31 * 10^{-2} \quad (22)$$

$$Y_r = -1.07 * 10^{-2} * \sin (0.83 * \Delta + 0.89) \quad (23)$$

$$Y_\delta = 5.28 * 10^{-6} * \Delta^{-1} - 7.48 * 10^{-5} \quad (24)$$

$$N_v = -2.68 * 10^{-3} * \Delta^2 + 3.22 * 10^{-3} * \Delta + 1.46 * 10^{-3} \quad (25)$$

$$N_r = 1.74 * 10^{-3} * \Delta^2 - 2.80 * \Delta - 3.21 * 10^{-3} \quad (26)$$

$$N_\delta = -2.34 * 10^{-6} * \Delta^{-1} - 2.55 * 10^{-5} \quad (27)$$

It is known that there are only linear derivatives in the horizontal stability formula. Using linear coefficients, submarine horizontal stability index is calculated as follows equation 28 and $x'_G m'$. The $x'_G m'$ term is given as $-0.127 * 10^{-4}$ (Roddy, 1990).

$$G_h = 1 - N'_v \frac{(Y'_r - m')}{[Y'_v(N'_r - x'_G m')]} \quad (28)$$

According to the literature, if the horizontal stability value is between 0 and 1, the system is stable, if it is greater than 1, the system is overstable, and if it is less than 0, the system is unstable. (Roddy, 1990), indicating that the DSM is actually a model with horizontal stability in its near-surface course. Accordingly, the DSM model is horizontally stable in the three-degree-of-freedom system when traveling near the surface. The horizontal stability-depth graph of the DSM model is shown below. The reason why the horizontal stability behavior is not linear with respect to depth is that the linear derivatives do not show linear behavior with respect to depth. Since hydrodynamic derivatives are exposed to different free surface effects depending on the depth and free surface is nonlinear in nature, they do not show a linear behavior (Efremov and Milanov, 2019). The point with yellow star indicates the extremely stable transition depth and the point with red star indicates the greatest horizontal stability that the submarine had, as shown in Figure 9.

Note that the horizontal stability number of DSM is greater than zero for lower depths of 4.6D, and it takes a value greater than 1 for depths between 3.1D and 4.6D (Figure 9). Therefore, DSM has horizontal stability for up to depths of 4.6D depth, even an extreme stable horizontal stability between 3.1D and 4.6D of depths. Below 4.6D of depth, it does not have any horizontal stability.

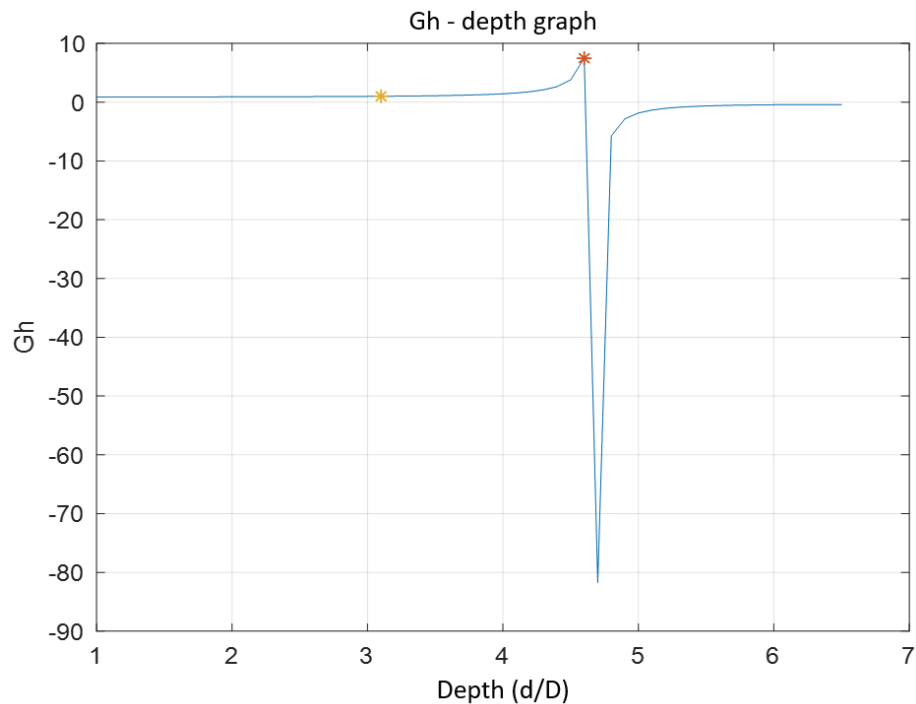


Figure 9. Gh values versus depth ratio

6. Conclusion

The hydrodynamic derivatives of DARPA Submarine moving at different depths were computed and the horizontal stability was investigated. Mesh independence studies and validation were carried out for the designed model. For the submarine model, CFD analyzes were performed according to the depth values selected from the literature (1.1D, 2.2D, 3.3D and 6D depths) and curve fitting was applied to the values obtained for the intermediate depths. Three degrees of freedom linear system was designed and solved numerically to provide the horizontal stability equation in the submarine model. It has been found that the submarine model has different coefficients versus varying depths and different horizontal stability.

It was found that DSM does not have a horizontal stability in deep water. It is confirmed by the studies given in the literature. But the submarine for shallower depths (up to 4.6D depth) has horizontal stability.

References

- Amiri, M. M., Sphaier, S. H., Vitola, M. A., & Esperança, P. T. (2019). URANS investigation of the interaction between the free surface and a shallowly submerged underwater vehicle at steady drift. *Applied Ocean Research*, 84, 192-205.
- Ashok, A., & Smits, A. J. (2013). The turbulent wake of a submarine model in pitch and yaw. In *Eighth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*. Begel House Inc.
- Duman, S., & Bal, S. (2019). A quick-responding technique for parameters of turning maneuver. *Ocean Engineering*, 179, 189-201.
- Duman, S., & Bal, S. (2021). Prediction of the acceleration and stopping manoeuvres of a bare hull surface combatant by closed-form solutions and CFD. *Ocean Engineering*, 235, 109428.

Efremov, D. V., & Milanov, E. M. (2019). Hydrodynamics of DARPA SUBOFF submarine at shallowly immersion conditions. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 13(2).

Hoerner, S. F. (1965). Fluid-dynamic drag. *Hoerner fluid dynamics*.

Inoue, S., Hirano, M., & Kijima, K. (1981). Hydrodynamic derivatives on ship manoeuvring. *International Shipbuilding Progress*, 28(321), 112-125.

ITTC, S. (2008). Final Report and Recommendation to the 25th ITTC. *Proceedings of the 25th ITTC. The Seakeeping Committee*.

Kırıkbaş, O., Kınacı, Ö. K., & Bal, S.,. Sualtı Araçlarının Manevra Karakteristiklerinin Değerlendirilmesi-I: Manevra Analizlerinde Kullanılan Yaklaşımlar. *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, (219), 6-58.

Kırıkbaş, O., Bal, S., & Baykal, M. A. (2021). Comparison Of The Rules Of Classification Societies (IACS Members) In The Area Of Submersible Maneuvering. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (28), 178-183.

Kırıkbaş, O., Kınacı, Ö. K., & Bal, S., Su Altı Araçlarının Manevra Karakteristiklerinin Değerlendirilmesi-II: Akışkan Sınırlarının Etkileri. *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, (220), 135-174.

Liu, Y., Li, Y., & Shang, D. (2019). The hydrodynamic noise suppression of a scaled submarine model by leading-edge serrations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(3), 68.

Li, D., Yang, Q., Zhai, L., Wang, Z., & He, C. L. (2021). Numerical investigation on the wave interferences of submerged bodies operating near the free surface. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 13, 65-74.

Racine, B., & Paterson, E. (2005, June). CFD-based method for simulation of marine-vehicle maneuvering. In *35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit* (p. 4904).

Ray, A., Singh, S. N., & Seshadri, V. (2009, January). Evaluation of linear and nonlinear hydrodynamic coefficients of underwater vehicles using CFD. In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (Vol. 43444, pp. 257-265).

Roddy, R. F. (1990). *Investigation of the stability and control characteristics of several configurations of the DARPA SUBOFF model (DTRC Model 5470) from captive-model experiments*. David Taylor Research Center Bethesda MD Ship Hydromechanics Dept.

Sakaki, A., & Kerdabadi, M. S. (2020). Experimental and numerical determination of the hydrodynamic coefficients of an autonomous underwater vehicle. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*.

Sezen, S., Dogrul, A., Delen, C., & Bal, S. (2018). Investigation of self-propulsion of DARPA Suboff by RANS method. *Ocean Engineering*, 150, 258-271.

Yoon, Hyunse. "Phase-averaged stereo-PIV flow field and force/moment/motion measurements for surface combatant in PMM maneuvers." PhD (Doctor of Philosophy) thesis, University of Iowa, 2009. <https://doi.org/10.17077/etd.jgq7s29l>

Denizaltılarında Havadan Bağımsız Tahrik Sistemi Olarak Kullanılan MESMA Sisteminin Termodinamik Performans Analizi

İbrahim Özsarı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, Türkiye

ibrahim.ozsari@btu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4543-9167

ÖZET

Dünya genelinde, denizlerin sualtı stratejik gücü, gün geçtikçe daha da önemli bir hale gelmektedir. Bu nedenle deniz kuvvetlerinin stratejik düşüncesinde denizaltıların yeri ve önemi gün geçtikçe artmaktadır. Denizaltılar birçok kişi tarafından en gelişmiş ve güçlü savaş araçları olarak kabul edilir. Denizlerde yeni güç odakları ve tehditlerin oluşması nedeni ile ülkelerin sualtı savaş platformlarına ilgileri artmıştır. Bu yüzden günümüzde gelişmiş, yüksek kabiliyetli denizaltılar için büyük yatırımlar yapılmaktadır. Bu çalışmada, denizaltılarında havadan bağımsız tahrik sistemi olarak kullanılan MESMA sisteminin termodinamik performans analizi yapılmıştır. İlk olarak MESMA sisteminin çalışma prensibi gösterilmiştir. MESMA sistemini oluşturan bileşenlerin enerji ve ekserji hesaplamaları yapılmıştır. MESMA sisteminin birincil ve en önemli bölümü olan yanmanın olduğu kısımda detaylı yanma analizi yapılmıştır. Sistemde aktif olarak kullanılmış metanol ve etanol yakıtlarının yanma ürünleri ve yanma ekserjisi, %21 ve %25 oksijen oranlı yanmalardaki sonuçları ile kıyaslanmıştır. Tüm sistemin elde edilen net güç değerleri etanol ve metanol yakıtlarının üç farklı oksijen oranına göre yanması, ekivalans oranı ve yanma odası giriş sıcaklığının değişimi ile sunulmuştur. Net güç bakımından etanol ile metanol yanmasının 10 ile 50 kW arasında bir farkla sonuçlandığı tespit edilmiştir. Yanmadaki oksijen oranının artması ile elde edilen gücün arttığı gösterilmiştir. Ayrıca yanma odası giriş sıcaklığı arttıkça sistem gücü artmıştır. Elde edilen güçler yakın olmasına rağmen verim bakımından incelendiğinde, metanol yanmasının etanol yanmasından belirgin bir fazlalığı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Verim açısından iki yakıt arasında 5 puanlık fark oluşmuştur. Ayrıca ekolojik performans katsayısı (Ecological coefficient of performance/ECOP) yönünden incelenerek hangi şartlarda daha çevre dostu performans elde edileceği gösterilmiştir. Ekolojik performans katsayısı (ECOP) ekivalans oranının 0,3'den 1'e kadar artması ile azalarak artan bir grafik çizmiştir. Ekivalans oranının 1'den 1,5'e bir miktar azaldıktan sonra yatay olarak devam etmiştir. Ekolojik performans katsayısı (ECOP) bakımından metanol yakıtının daha avantajlı olduğu ortaya koyulmuştur.

Anahtar kelimeler: Termodinamik analiz, Havadan bağımsız tahrik, MESMA, Denizaltı, Gemi makineleri, Yanma Analizi

Makale geçmişi: Geliş 09/04/2022 – Kabul 27/04/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1101003>

Thermodynamic Performance Analysis of the MESMA System Used as an Air-Independent Propulsion System in Submarines

İbrahim Özşarı

Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Bursa Technical University, Bursa, Türkiye

ibrahim.ozsari@btu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4543-9167

ABSTRACT

Worldwide, the underwater strategic power of the seas is becoming more and more important day by day. Therefore, the place and importance of submarines in the strategic thinking of the navies are getting bigger and bigger. Submarines are considered as the most advanced and powerful combat vehicles. Due to the emergence of new power centers and threats on the seas, countries' interest in underwater warfare platforms has increased. For this reason, big investments are made in advanced, high-capability submarines. In this study, thermodynamic performance analysis of the MESMA system, which is used as an air-independent propulsion system in submarines, was made. First, the working principle of the MESMA system was shown. Energy and exergy calculations of the components that make up the MESMA system were made. A detailed combustion analysis was carried out in the part where the combustion, which is the primary and most important part of the MESMA system, takes place. Combustion products and combustion exergy of actively used methanol and ethanol fuels in the system were compared with their results in combustion with 21% and 25% oxygen ratios. The net power values of the whole system are presented by the combustion of ethanol and methanol fuels according to three different oxygen ratios, the variation of the equivalence ratio, and the combustion chamber inlet temperature. It has been found that the combustion of ethanol and methanol results in a difference between 10 and 50 kW in terms of net power. It has been shown that the power obtained increases with the increase of the oxygen ratio in the combustion. In addition, the system power increased as the combustion chamber inlet temperature increased. Although the obtained powers are close, it was concluded that methanol combustion has a significant excess of ethanol combustion when examined in terms of efficiency. There was a difference of 5 points between the two fuels in terms of efficiency. In addition, it has been examined in terms of ecological performance coefficient (ECOP) and it has been shown under which conditions a more environmentally friendly performance will be achieved. It has been demonstrated that methanol fuel is more advantageous in terms of ECOP.

Keywords: Thermodynamic analysis; Air independent propulsion; MESMA; Submarine; Ship Machines; Combustion Analysis

Article history: Received 09/04/2022 – Accepted 27/04/2022

1. Giriş

Denizaltılarının askeri, istihbarat ve stratejik olarak önem arz etmesiyle birlikte her geçen yıl denizaltı teknolojileri üzerine yapılan çalışmalar arttırılmaktadır. Bunlardan en önemlisi havadan bağımsız tahrik sistemleridir. Denizaltılarında kullanılan havadan bağımsız tahrik sistemleri; havaya ihtiyaç duyulmaksızın yani denizaltının yüzeye çıkmadan su altında seyir yapabilmesi için gereken tahrik gücünü üreten sistemler olarak adlandırılmaktadır. Denizaltılarda en büyük hedef, deniz yüzeyine bağımlılığı azaltıp olabildiğince uzun süreler su altında kalmasını sağlamaktır. Geleneksel dizel-elektrik denizaltılarının, hava kullanılarak dizel motorlarla çalıştırılan jeneratörler sayesinde pillerini şarj etmek için periyodik olarak yüzeye çıkmaları gerekir. Denizaltılarının su yüzeyine her çıkışları hem yerlerinin tespit edilme ihtimalinden dolayı hem de savunmasız kalmaları nedeniyle çok tehlikelidir. Bunun için denizaltı su altındayken gerekli gücü üretecek havadan bağımsız tahrik (Air Independent Propulsion / AIP) sistemleri geliştirilmiştir. Literatüre bakıldığında havadan bağımsız tahrik sistemleri; Walter türbini ("https://uboa.net/types/walter_hist.htm,"), kapalı devre dizel (Burcher ve Rydill, 1994), stirling motoru (Mohammed Shibil Kurikkal, 2016; Rashad ve Nada, 2021), MESMA (Kerros vd., 1994; Psallidas vd., 2010) ve yakıt pili (Bedir F. ve Alniak M.O., 2004) olarak sıralanmaktadır. Bunların yanı sıra, günümüzde araştırılması yapılan ve üzerinde çalışılan çeşitli havadan bağımsız tahrik sistemleri de bulunmaktadır (Ozturan, H., 2017).

Collins Sınıfı denizaltısında olası kullanım için uygunluk sırasını belirlemek amacı ile havadan bağımsız tahrik (AIP) sistemlerinin operasyonel ihtiyaçları göz önüne alınmıştır. Karasal sistemlerde kullanılan altı yakıt hücresinin, denizaltı uygulamalarında en iyi performansla kullanılacak olanı belirlenmiştir. Denizaltı AIP sistemi ile ilişkili depolama ve reaktan işleme sistemleri için tek bir optimum seçeneğin olmadığı gösterilmiştir (Peter L. Mart ve Jenny Margeridis, 1995). Denizaltıların AIP sistemlerini su altı seyir süreleri yönünden incelenmiş ve eski sistemlere göre bu sürelerin 3-4 kat artarak denizaltılarına kabiliyet özelliği kazandırdığı gösterilmiştir (Edward C. Whitman,). Howaldtswerke-Deutsche Werft (HDW) şirketinin son yıllarda faaliyete giren denizaltıların araştırılmasını ve üretim hedeflerine geçirilmesini sağlayarak, gelecekteki denizaltı AIP sistemleri için yeni teknolojilerin geliştirilmesini ortaya koymuştur (Psoma ve Sattler, 2002). Persson vd. denizaltılarında uzun süren su altı operasyonları sırasında elde edilen bir dizi hava kalitesi parametresinin sonuçlarını incelemiştir. Havadaki partikül ölçümleri, yüksek hava değişim oranları ve verimli hava temizleme cihazları sayesinde hava kirleticilerinin düşük bir seviyede meydana geldiğini göstermiştir (Persson vd., 2006). Geleneksel denizaltı teknolojisinin performans özelliklerini gösteren analiz örnekleri sunulmuş, gelecekteki tasarımlar ve olası tehditlere etkileri belirtilmiştir. Aynı gövde formundaki farklı AIP sistemlerle potansiyel iyileştirmeler araştırılarak olası tespitler ortaya koyulmuştur (Psallidas vd., 2010). Denizaltılarında mevcut tahrik sistemi, hidrojenin emilimi ve desorpsiyonunun yardımcı sistemleri için değişiklik gerektirmeyen bir çözüm önermiştir. Depolama hacmi yoğunluğu, çalışma koşulları, şarj sayısı ve boşaltma çevrimleri gibi farklı kısıtlamalar dikkate alınarak denizaltı otonomisinde önemli bir artış yapılabileceği değerlendirilmiştir (Fiori vd., 2015). 2000 tonluk bir hibrit AIP sistem denizaltısının performansı, tahrik sisteminin ağırlığı, hacmi ve verimliliği analiz edilerek incelenmiştir. İncelenen AIP sisteminin motoru olarak, düşük sıcaklıkta proton değişim membranlı (Proton-exchange membrane/PEM) tip bir yakıt hücresi kullanmıştır. Yakıt hücresinin reaktanları, üç yakıt depolama sistemi (metanol, sıvı hidrojen ve metalhidrit) ve iki oksidan depolama sistemlerinin kombinasyonundan çıkan sonuçlar incelenmiştir (Lee ve Shay, 2018). Denizaltı AIP sistemi kontrol algoritmaları ile yük artışı adımıyla dinamik yanıt yoluyla değerlendirilmiş ve nominal durum geri besleme kontrolörünün kontrol performansı ile geleneksel kontrolör karşılaştırılmıştır. Önerilen nominal durum geri besleme kontrolü ile sistem enerjisini %23,9 arttırdığı gösterilmiştir (Han vd., 2020). Denizaltılar için en uygun AIP teknolojisini seçmek için zorunlu karar matrisi (Finite difference

method/FDM) kullanılarak rasyonel bir karar verme prosedürü geliştirilmiştir. Zorunlu karar matrisinin, çok seçenekli bir ortamda en uygun çözümün belirlenmesinde etkili bir araç olduğu vurgulanmıştır (Menon vd., 2020). Denizaltı atık gazları tahliyesi için deniz suyunda karbondioksit (CO₂) çözünmesi üzerine deneyler yapılmıştır. Reaksiyon basıncına ve deneysel sıcaklığa göre CO₂ konsantrasyonu elde edilerek su altı silah sistemlerinin tecrübe ettiği fiili çalışma koşulları altında, atık gaz arıtma işleminin optimum tasarımı ortaya koyulmuştur (Park ve Choi, 2020). Denizaltılarındaki AIP sistemlerinin gelişmiş teknolojiler ile birleştirilmesinin iyileştirilmiş hedef belirleme, saldırı döngüsü ve nihayetinde artırılmış görev esnekliği, hareket kabiliyeti, dayanıklılık, erişim, güvenlik ve su altında kalma süresi arttırmasının önemi coğrafi ve askeri olarak incelenmiştir (Raska, 2016). HDW, denizaltıların su altı seyir menziline arttırmak için bir yakıt pili sistemi geliştirdiğini belirtmiş ve bu teknolojiyi geliştirmek, inşa etmek, test etmek ve üretim aşamasına getirmek için gereken süreler hakkında bir inceleme sunmuştur (Pommer, H. vd., 2006). Denizaltılarının havadan bağımsız tahrik sistemlerinde MESMA sistemi ile ilgili çalışma yok denecek kadar azdır. Stirling motoru hakkında termodinamiksel çalışmalar yapılmıştır fakat diğer havadan bağımsız tahrik sistemleri için bu tarz analiz çalışmaları yapılmamıştır.

Bu çalışmada, literatürde yapılmamış ve eksiği görülen denizaltılarında havadan bağımsız tahrik sistemi olarak kullanılan MESMA sisteminin çalışma prensibi gösterilmiştir. MESMA sistemi bileşenlerinin enerji ve ekserji yönünden hesaplamaları ortaya koyulmuştur. Sistemin en önemli bölümü olan yanmanın detaylı yanma analiz sonuçları iki farklı yakıt ve iki farklı oksijen oranına göre sunulmuştur. Tüm sistemin termodinamiksel performans analizi etanol ve metanol yakıtlarının üç farklı oksijen oranına göre elde edilen net güç, verim ve ekolojik performans katsayısı (ECOP) bakımından detaylı bir şekilde incelenmesi yapılmıştır.

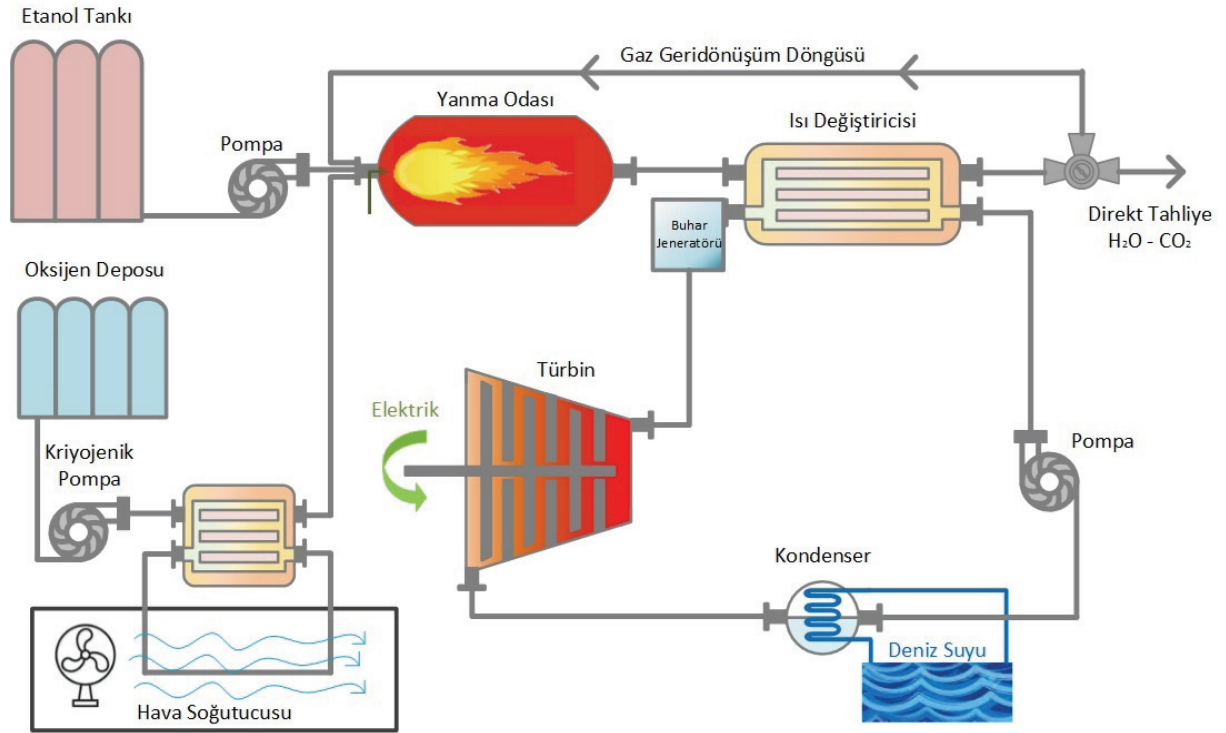
2. Teorik Model ve Simülasyon

MESMA (Module d'Énergie Sous-Marin Autonome) havadan bağımsız tahrik sistemi Fransız Direction des Construction Navales (DCN) şirketi tarafından oluşturulmuş ve geliştirilmiş bir sevk sistemidir (Şekil 1).



Şekil 1. MESMA Sistemi Modülü (<https://klswatch.wordpress.com/> n.d.)

MESMA Sistemi temel olarak kapalı devre bir buhar türbini sistemi olan Rankine çevriminin çalışma prensibine benzemektedir. Düşük sıcaklıklardaki tanklarda depolanmış sıvı oksijen, buharlaştırıcıdan geçirilerek yanma odasında etanol ile yanma gerçekleştirilir. Yanma sonucunda 700 °C sıcaklıkta ve 60 Atm basınçta egzoz gazı ortaya çıkar. Birinci devrede üretilen sıcak gaz ile ikinci devrede buhar oluşturulur. Yüksek sıcaklıktaki buhar, buhar türbinlerine iletilerek ısı enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülür. Alternatör vasıtasıyla türbinden elde edilen mekanik güç ile gerekli elektrik ihtiyacı üretilir. Deniz suyu sadece kondenserde kullanılır. Yakıt olarak ilk başlarda metanol kullanılmış fakat mürettebat için zararlı olduğundan etanolde karar kılınmıştır. Metanolün içinde çok daha fazla zehirli toksik madde bulunduğundan dolayı bu durum gerçekleşmiştir (Kerros vd., 1994). Yanma ürünleri olan su ve karbondioksitin denize tahliye edilmeden önce depolanarak denizaltının görünmezliğinin artırılması düşünülmüştür. Bunun için 60 Atm basınçtaki CO₂'nin en fazla 15 °C olması gerekmektedir. Bunun sağlanması için deniz suyu sıcaklığının yeterince düşük olması veya ekstra bir devre düzeneği olması gerekmektedir. Genellikle egzoz gazları direkt olarak denize tahliye edilmektedir. Böylece birincil devrede kondenser olmasına gerek kalmamaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. MESMA genel çalışma prensibi gösterimi

Sistemlerin optimum çalışma performanslarını bulmak için Matlab programında sayısal bir simülasyon hazırlanmıştır. Sistemin termodinamiksel performans analizi için her bileşenin basınç, sıcaklık, özgül ısı, entalpi ve entropi değerleri hesaplanmıştır. Tüm gazlar ideal gaz olarak kabul edilir ve bunların entalpileri ve özgül ısıları sadece sıcaklıkla değişir. Yanmanın sabit durumda gerçekleştiği varsayılır ve yanma odasının iyi karıştırılan bir reaktör (Well-Stirred Reactor/WSR) olduğu varsayılır ve birincil bölge kalış süresinin 0,002 saniye olduğu varsayılır. Literatüre göre bu tarz yanma odasındaki basınç kaybı %2,5 ile %5 arasında değiştiği için %4 alınmıştır. (Lefebvre ve Ballal, 2010).

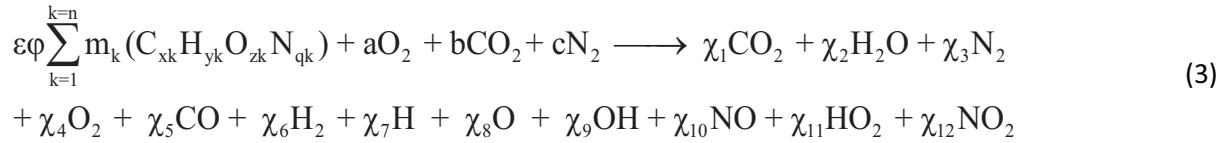
Şekil 2'de gösterilen MESMA sisteminin enerji analizi denklemleri aşağıdaki gibidir:

MESMA sisteminde sıvı akışkanların basınçlarının artırılması için birçok pompa kullanılmaktadır. Pompa işi ve pompa ekserji yıkımı şu şekilde ifade edilir:

$$\dot{W}_P = \frac{v_f(P_e - P_i)}{\eta_P} \quad (1)$$

$$\dot{E}_{Dp} = \dot{E}_e - \dot{E}_i + \dot{W}_P \quad (2)$$

MESMA havadan bağımsız tahrik sisteminin yanma odasındaki türbülans, sürtünme ve türbin girişindeki basınç kaybı ile basınç kaybının %4 olduğu kabul edilir. Termodinamik özellikleri tam olarak hesaplamak için yanma modeli oluşturulmuştur. Yanma ürünleri, denge sabitleri dikkate alınarak eşdeğerlik oranı ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hesaplanır. Yanma modeli için kimyasal denklem şu şekildedir:



Buradaki χ_1 den χ_{12} ye kadar her tür için mol sayısını temsil eder ve x,y,z,q yakıtta bulunan karbon, hidrojen, oksijen ve azot atomlarının sayılarını ifade eder. ϕ genel eşdeğerlik oranıdır. ε yakıtın stokiyometrik yanmasından elde edilen molar hava yakıt oranıdır.

$$f = \frac{FA}{FA_s} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{4a}{4X+Y-2Z} \quad (5)$$

12 bilinmeyen mol sayısını ve mol fraksiyonunu bulmak için temeli Ferguson'un (Ferguson CR., 1986) denge yöntemi kullanılır. Eşitlik ürünlerinin mol fraksiyonlarını çözmek için ek denklemlere ihtiyaç vardır. Bunlardan 6 tanesi, ürünler arası denge kriteri ile sağlanmaktadır. Denge ürünlerinin hesaplanmasında yanma modelinin atom dengesinden gelen 4 denklem daha mevcuttur. Bu denklemler Newton-Raphson ve Gauss sie del yöntemleri ile güvenli ve hassas sonuçlar elde edilir. Bu sonuçları elde edilmesi ve GASEQ ve NASA CEA programları ile validasyonu yazarın Ozsari vd. (2021) ve Ozsari ve Ust (2019) çalışmalarında detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Her türün molar özgül ısı, entalpi ve entropi değerleri, (CHON) sistemlerinin termodinamik özellikleri için eğri uydurma katsayıları ($a_1... a_n$) kullanılarak aşağıdaki ifadelerden elde edilebilir (Turns, 2011):

$$\frac{\bar{h}_k}{R_u T} = a_{1,k} + \frac{a_{2,k}}{2} T + \frac{a_{3,k}}{3} T^2 + \frac{a_{4,k}}{4} T^3 + \frac{a_{5,k}}{5} T^4 + \frac{a_{6,k}}{2} \quad (6)$$

$$\frac{\bar{c}_{p,k}}{R_u} = a_{1,k} + a_{2,k} T + a_{3,k} T^2 + a_{4,k} T^3 + a_{5,k} T^4 \quad (7)$$

$$\frac{\bar{s}_k^0}{R_u T} = a_{1,k} \ln T + a_{2,k} T + \frac{a_{3,k}}{2} T^2 + \frac{a_{4,k}}{3} T^3 + \frac{a_{5,k}}{4} T^4 + a_{7,k} \quad (8)$$

Sabit basınçta, karışımın mol fraksiyonları sıcaklıkla değiştiğçe, ayrışmalara bağlı olarak karışımın entalpisi değişir. Bu, aşağıdaki şekilde tanımlanan gaz karışımının nihai özgül ısını değiştirecektir:

$$h = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^{12} \alpha_k \bar{h}_k [kJ / kg] \quad (9)$$

$$\bar{s} = \frac{R_u}{M} \left[\sum_{k=1}^n \alpha_k (\bar{s}_k^o - \ln \alpha_k) - \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \right] \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P = c_{p_g} = \sum_{k=1}^{12} \frac{\alpha_k}{M} \frac{\partial \bar{h}_k}{\partial T} + \frac{\bar{h}_k}{M} \frac{\partial \alpha_k}{\partial T} - \frac{\alpha_k \bar{h}_k}{M^2} \frac{\partial M}{\partial T} \quad (11)$$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P = c_{p_g} = \frac{1}{M} \left[\sum_{k=1}^{12} \alpha_k \bar{c}_{p_k} + \bar{h}_k \frac{\partial \alpha_k}{\partial T} - h M_T \right] \quad (12)$$

$$M_T = \frac{\partial M}{\partial T} = \sum_{k=1}^{12} M_k \frac{\partial \alpha_k}{\partial T} \quad (13)$$

Burada yanma sıcaklığı T'dir (K). Ürün molar kütlesi M_k ve toplam ürün molar kütlesi M'dir.

$$M = \sum_{k=1}^{12} m_k = \sum_{k=1}^{12} \alpha_k M_k \quad (14)$$

Ürünlerin toplam mol sayısı, reaktanların kütlesini yanma ürünlerinin moleküler ağırlığına aşağıdaki gibi bölerek bulunabilir: Son olarak, $y_1, y_2, y_3 \dots y_{12}$ mol sayısı elde edilir.

$$N = \frac{m_R}{M} \Rightarrow v_i = y_i N \quad (15)$$

Yanma odası çıkış sıcaklığını hesaplamak için:

$$T_e = \frac{T_{pz} c_p m_{ox} + T_{cox} c_{p,cox} m_{cox}}{c_p m_{ox} + c_{p,cox} m_{cox}} \quad (16)$$

Burada T_{pz} birincil bölge hava sıcaklığı, T_{cox} ise dilüzyon havası sıcaklığını ifade etmektedir. Ayrıca yanma odasında oluşan ısı miktarını aşağıdaki denklemle buluruz:

$$Q_{in} = \dot{m}_f LHV / \eta_{cc} \quad (17)$$

Genel olarak, bir sistemdeki toplam ekserji şu şekilde ifade edilir:

$$EX_{Com} = EX_{Ph} + EX_{Ch} + EX_P + EX_K \quad (18)$$

Burada, EX_{Ph} fiziksel ekserjidir, EX_{Ch} kimyasal ekserjidir, EX_K kinetik enerjidir, EX_P potansiyel ekserjidir. EX_K ve EX_P ihmal edilir. Fiziksel ve kimyasal ekserji aşağıdaki gibi ayrıntılı olarak ifade edilir:

$$EX_{ph} = (H_e - H_0) - T_0 (S_e - S_0) \quad (19)$$

$$EX_{ph} = c_p (T_e - T_0) - T_0 \left[c_p \ln \left(\frac{T_e}{T_0} \right) - R \ln \left(\frac{P_e}{P_0} \right) \right] \quad (20)$$

$$EX_{Ch} = x_k ex_{Ch}^k + RT_0 \sum x_k \ln x_k \quad (21)$$

Yanma odasından çıkan sıcak akışkan ile bir nevi kapalı çevrimdeki suya ısı aktarımı yapılmaktadır. Isı değiştiricisinde basınç kaybı, enerji dengesi ve ekserji yıkımı şu şekilde elde edilir:

$$P_4 / P_5 = (1 - \Delta P_{Hex}) \quad (22)$$

$$\dot{m}_s (h_{e2} - h_{i2}) = \dot{m}_g (h_{e1} - h_{i1}) \eta_{Hex} \quad (23)$$

$$\dot{E}_{DHex} = \dot{E}_{i1} + \dot{E}_{i2} - \dot{E}_{e1} - \dot{E}_{e2} \quad (24)$$

Isı değiştiricisinden sıcaklığı yükselmiş kızıgın buhar türbine gönderilir. Buhar türbinindeki güç ve ekserji yıkımı aşağıdaki denklemler ile elde ederiz.

$$\dot{W}_T = \dot{m}_s (h_i - h_e) \quad (25)$$

$$\dot{E}_{DT} = \dot{E}_i - \dot{E}_e - \dot{W}_T \quad (26)$$

Türbinden çıkan buharın soğutulması için kondenserdeki enerji denklemi ve ekserji yıkımı aşağıdaki denklemler vasıtası ile bulunur.

$$\dot{m}_s (h_{i1} - h_{e1}) = \dot{m}_{sw} (h_{e1} - h_{i1}) \eta_{Con} \quad (27)$$

$$\dot{E}_{DCon} = \dot{E}_{e1} + \dot{E}_{i2} - \dot{E}_{i1} - \dot{E}_{e2} \quad (28)$$

Net güç; türbinden elde edilen gücün tüm sistemde kullanılan pompalarda harcanan güçten çıkarılması ile bulunur:

$$\dot{W}_{NET} = \dot{W}_T - \dot{W}_{Pn} \quad (29)$$

Termodinamiksel enerji sistemler için önemli bir performans kriteri ekolojik performans katsayısıdır (ECOP). (G. Gonca ve I. Ozsari, 2016; Gonca, 2018; Gonca ve Genc, 2019; Ust vd., 2005). ECOP, termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları arasında gerçeğçi bir kombinasyon oluşturan, etkin gücün toplam ekserji yıkımı hızına oranı olarak tanımlanmıştır ve şu şekilde elde edilir:

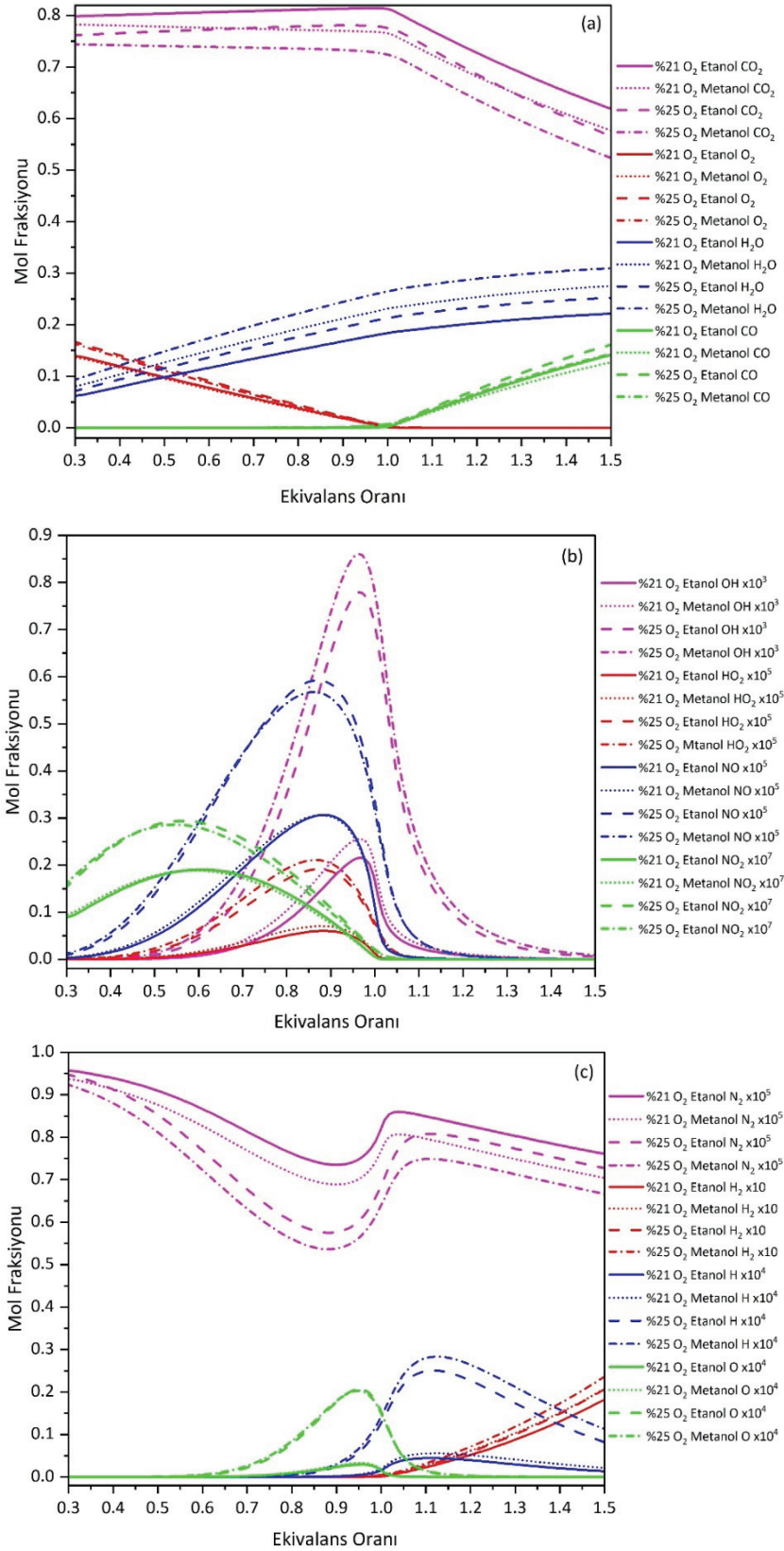
$$ECOP = \frac{W_{NET}}{E_{Dtot}} \quad (30)$$

3. Bulgular ve Tartışma

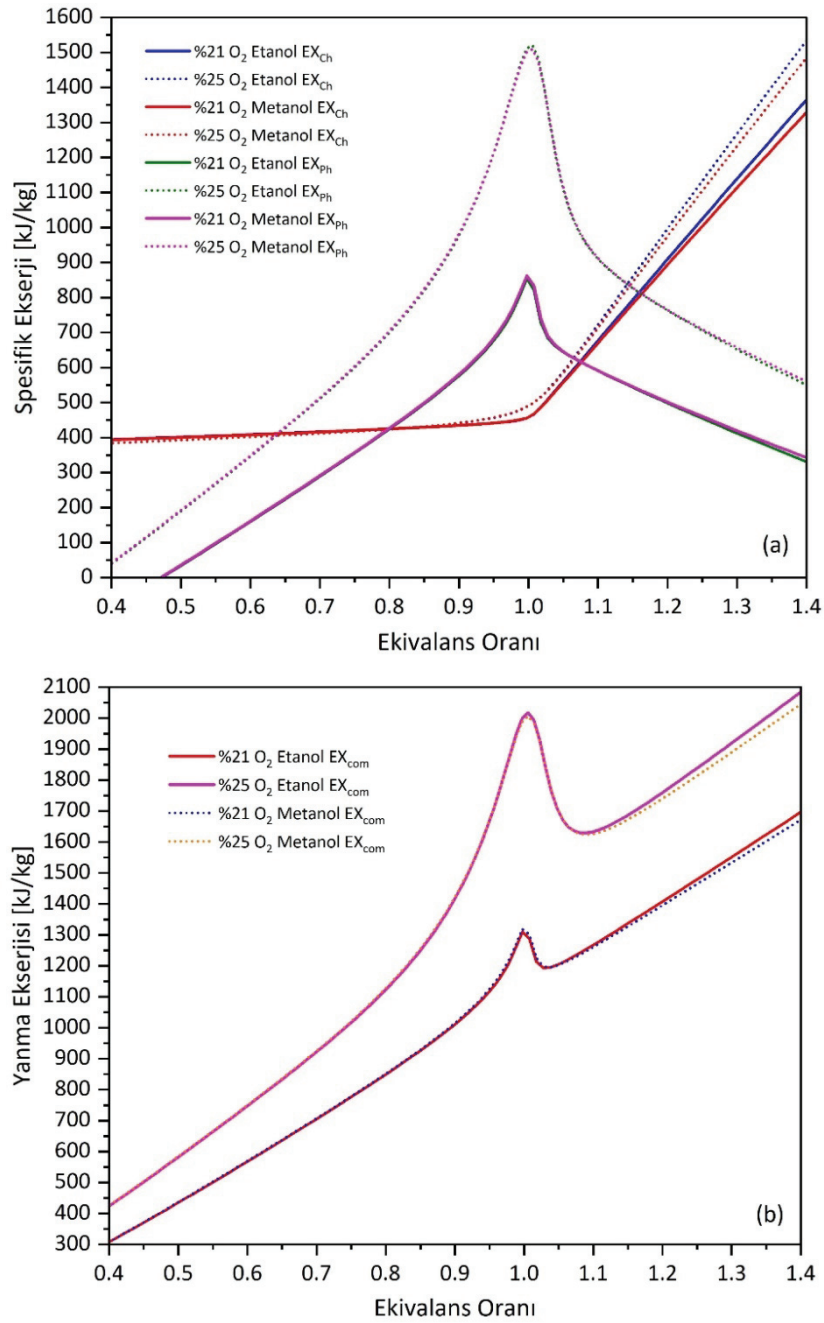
Denizaltılarında havadan bağımsız tahrik sistemi olarak kullanılan MESMA sisteminin ilk denenen ve şu an güncel kullanılan yakıtı olmak üzere 2 farklı yakıt ile detaylı termodinamiksel performans analizi sonuçları şekil 3-7'de sunulmuştur. Yanma ekivalans oranının ve yanma odası giriş sıcaklığının değişimine göre yanma ürünleri sonucu, net güç, verim, ECOP ve yanmanın kimyasal/fiziksel/toplam spesifik ekserjisi hesaplanmış ve sonuçları gösterilmiştir.

MESMA sisteminin en kritik ve önemli bölümü, yanma bölümüdür. Bu yüzden termodinamik performans analizinden doğru ve hassas sonuçlar alınması için yanma sonrası çıkan ürünler ve bunlara bağlı termodinamik özellikler hesaplanmalıdır. Yanma sonucu oluşan bileşenlerin mole fraksiyonları, şekil 3a-c de değişik ölçeklendirmeler ile sergilenmiştir. Burada yakıt olarak etanol ve metanolün, %21 ve %25 oksijen oranlı oksijen yanmalarının sonuçları, ekivalans oranı değişimine göre sunulmuştur. Yanma ekserjisi analizini yapmak için, yanma ürünlerinin mol fraksiyonları mümkün olduğu kadar gerçeğe yakın hesaplanmalıdır. Hesaplamalarda 12 yanma ürünü farklı enerji ve ekserji özelliklerine sahiptir. Hesaplanan birçok yanma ürünü olduğundan, anlaşılır olması için şekil 3; a, b ve c olmak üzere üç kısma ayrılmıştır. şekillerde, tüm eğrileri bir arada sunmak için ölçeklendirme yapılmıştır. şekil 3'te görüldüğü gibi, fakir yanma bölgesinde 0,3-1, iki yakıtın yanmasında da CO₂, O₂ ve NO₂ diğer bölgelere nazaran daha yüksek değerlerdedir. Tam yanma bölgesinde maksimum sıcaklıkların ortaya çıktığı 1 ve civarında ise OH oluşumun arttığı görülmüştür. Sıcaklık artışı ile NO oluşumu artarken buna karşın N₂'de düşüş

görülmüştür. Zengin yanma bölgesinde, 1-1,6 eksik yanma nedeniyle CO, H ve H₂'de önemli artışlar görülmüştür.



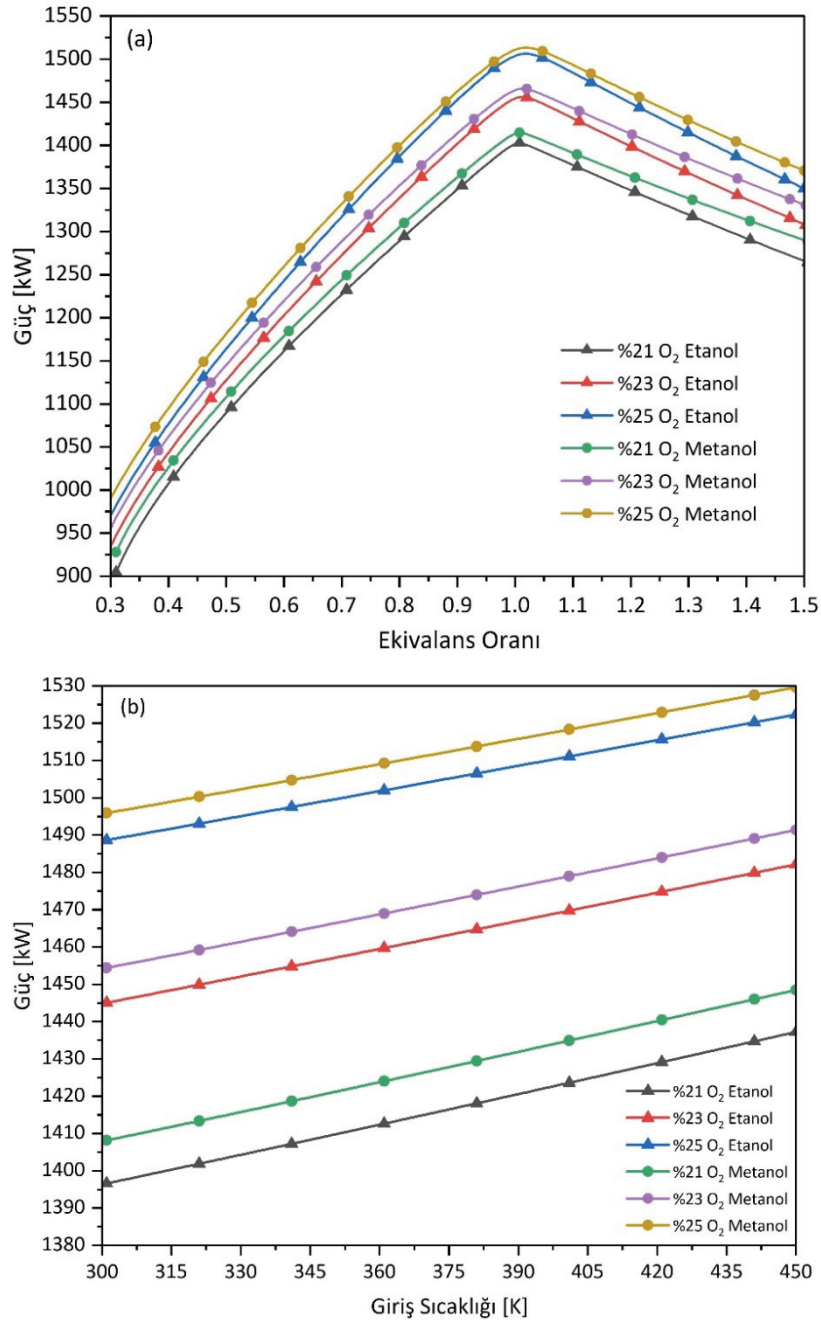
Şekil 3. İki farklı oksijen oranlarında etanol ve metanol yakıtlarının eşdeğerlik oranının değişimine göre CO₂, O₂, H₂O, CO molar fraksiyonları (a) OH, HO₂, NO, NO₂ molar fraksiyonları (b), N₂, H₂, H, O molar fraksiyonları (c)



Şekil 4. İki farklı oksijen oranlarında etanol ve metanol yakıtlarının eşdeğerlik oranının değişimine göre kimyasal ekserji, fiziksel ekserji (a), toplam yanma özgül ekserjisi (b)

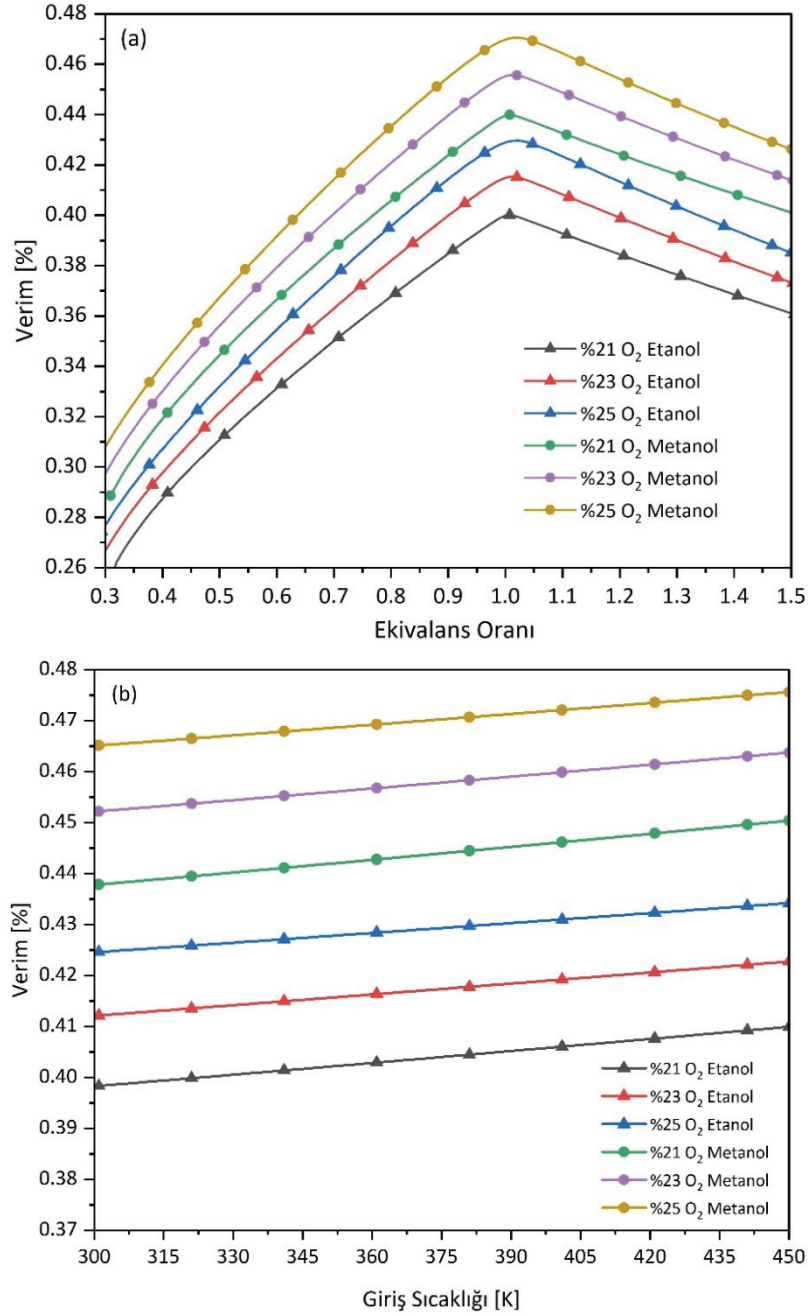
MESMA havadan bağımsız tahrik sisteminde ilk başlarda yakıt olarak metanol yakılmaktaydı. Fakat metanol yakıtının kullanılması personel için tehlikeli olduğu için daha sonra kullanılmamıştır. Metanol baş ağrısı, baş dönmesi, bulantı, koordinasyon kaybı ve sersemlik gibi küçük etkilerinin yanında bilinç kaybı, kalıcı hasarlar ve ölüm gibi çok büyük ve geri dönülemez etkilere de sebep olabilmektedir. Günümüz MESMA sistemlerinde yakıt olarak etanol kullanılmaktadır. Bu iki yakıtı (metanol/etanol), farklı oksijen oranlı yanmaları ile elde edilen sonuçları değerlendirilmiştir. Şekil 4.a'da görüldüğü üzere küçük bir fark ile spesifik fiziksel ekserji bakımından metanol, etanolden daha yüksek değerlere sahiptir. Sadece ekivalan oranı 1 civarında bu durum değişmiştir. Diğer yönden kimyasal ekserji bakımından fakir yanma bölgesinde çakışırken, zengin yanma bölgesinde etanol yakıtının değerleri metanolden daha yüksektir. Her iki yakıtın yanmasında da oksijen oranının artması spesifik ekserjileri arttırmıştır.

Kimyasal ekserji ile fiziksel ekserji değerlerinin toplamı, yanma ekserjisi olarak şekil 4.b'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Üç farklı oksijen oranlarında etanol ve metanol yakıtlarından elde edilen net güç değişimi, eşdeğerlik oranına göre (a), yanma odası giriş sıcaklığına göre (b)

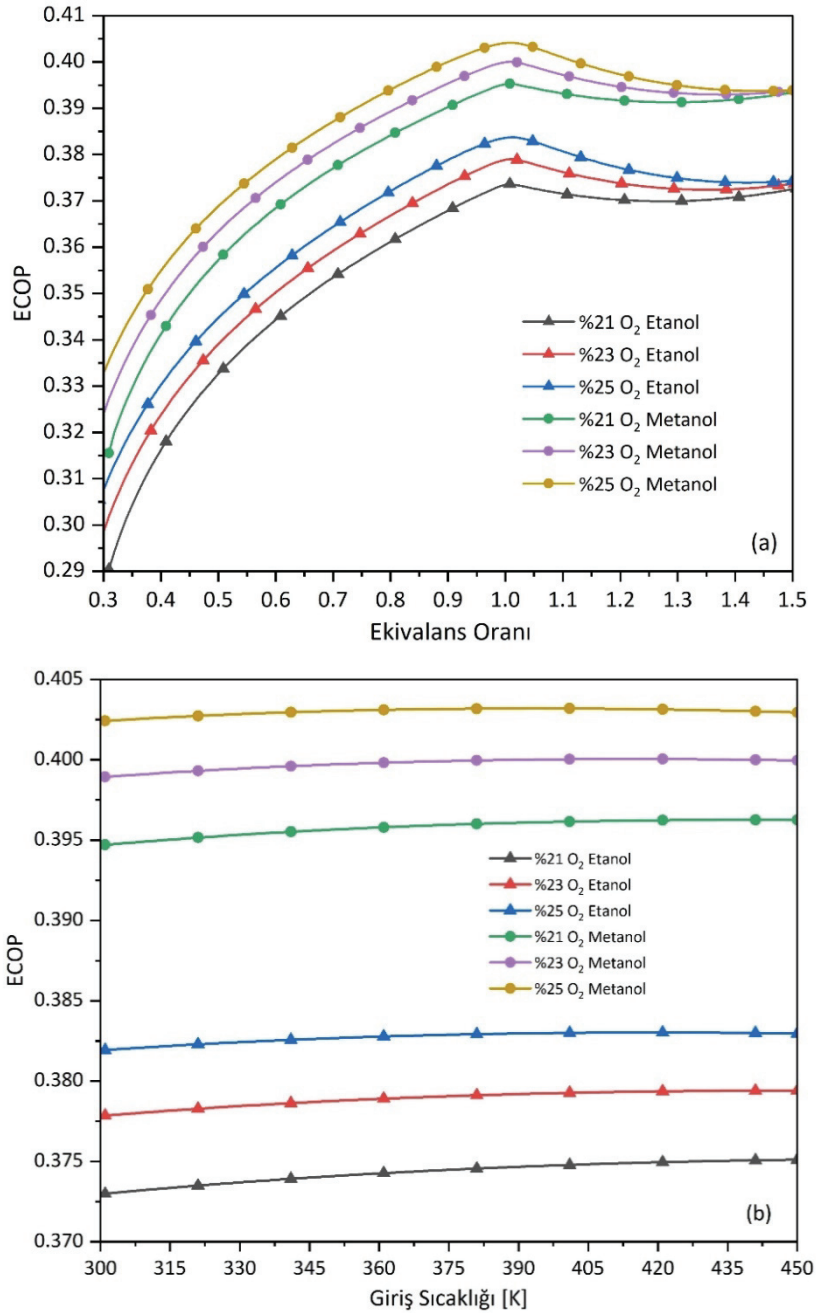
Sistemlerin termodinamiksel performans analizinde ilk bakılan çıktı, elde edilen net iş veya net güçtür. Şekil 5.a'da ekivalans oranının değişimine göre MESMA sisteminden elde edilen güç gösterilmiştir. Ekivalans oranının 0,3'ten teorik tam yanmaya ($\Phi=1$) kadar yanma odası çıkış sıcaklığının arttığı gözlemlenmiştir. Bu şekilde ısı değiştiricisinden aktarılan ısı miktarının artması ile net gücün artması doğaldır. Zengin yanma bölgesinde ekivalans oranı artmasıyla yanma odası çıkışı düşmekte ve doğru orantılı olarak elde edilen güç de azalmaktadır. Etanol yakıtının oksijen yanmasında oksijen oranı %21, %23 ve %25 olarak değiştirildiğinde yaklaşık 50 kW civarında güç artışına yol açtığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum metanol yakıtının yakılmasında da elde edilmiştir.



Şekil 6. Üç farklı oksijen oranlarında etanol ve metanol yakıtlarından elde edilen sistem termal verimi değişimi, eşdeğerlik oranına göre (a), yanma odası giriş sıcaklığına göre (b)

Etanol ile metanolün sonuçlarını kıyasladığımızda ise tüm durumlarda metanol yakıtı kullanılması ile daha fazla güç elde edilmiştir. Bu durum %21 O₂ oranlı oksijen-yanma durumunda yer yer değişerek metanolün etanol yakıtından 30 kW'a kadar daha fazla güce ulaştığı görülmüştür. Bununla birlikte O₂ oranı arttıkça bu farkların 10 kW'lara kadar düştüğü sonucuna ulaşılmıştır. Bu iki yakıtın farklı O₂ oranlı teorik tam yanma durumlarındaki kıyaslama sonuçları, yanma odası giriş sıcaklığını değiştirdiğimizde de görülmüştür (Şekil 5.b). Metanol yakıtı yanması ile elde edilen gücün, etanol yakıtından elde edilen güçten daha fazla olduğu ve bu durumda yanmadaki oksijen oranının %21'den %25'e doğru çıktıkça azaldığı görülmüştür. Oksijen oranının değişimi literatürde %21'den başlayarak %25'e bazı çalışmalarda %35'e kadar incelenmektedir (Escudero vd., 2020). Fakat oksijen oranının artması ile maliyetin çok fazla artması ve denizaltılarında oksijen tanklarının da sınırlı olması nedeni ile %21'den %25'e kadar değişim uygun görülmüştür. Yanma odası giriş sıcaklığının 300 K'den 450 K'e değiştirilmesi ile elde edilen güç

tüm şartlarda lineer olarak artmıştır. Fakat bu artış, %21 O₂ oksijen oranında daha fazla olurken %25'e doğru gidildikçe azalmıştır.



Şekil 7. Üç farklı oksijen oranlarında etanol ve metanol yakıtlarından elde edilen ekolojik performans katsayısı (ECOP) değişimi, eşdeğerlik oranına göre (a), yanma odası giriş sıcaklığına göre (b)

Enerji sistemleri analizinde elde edilmek istenen güce ulaşıldıktan sonra bakılan ilk performans ölçüğü verimdir. İstenilen gücün ne kadar enerji harcanarak sağlandığının öğrenilmesi gerekmektedir. Şekil 6.a'da görüldüğü üzere yanmadaki oksijen oranının artması ile sistem verimi artmıştır. Net güç bakımından etanol ile metanol yanmasının yakın değerlerde olmasına rağmen metanolün yakıt olarak kullanılması durumunda etanolden belirgin bir farkla daha yüksek verime sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bunun nedeni; metanol yanması ile oluşan ısı enerjisinin etanoldekinden daha az olmasıdır. Bunun nedeni ise metanolün alt ısıl değerinin (lower heating value / LHV) etanolden düşük olmasıdır. Yani personel sağlığına bir zararı olmasaydı metanol yerine etanol kullanımının gündeme

gelmeyeceği bu sonuçlar ile net olarak görülmüştür. Teorik tam yanma durumunda, yanma odası giriş sıcaklığını arttırdığımızda da verimin arttığı görülmüştür (Şekil 6.b).

Şekil 7.a ve 7.b; ekivalans oranı ve yanma odası giriş sıcaklığı değişimi, sistemin ekolojik performans katsayısı (ECOP) üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 7.a'da görüldüğü üzere; ekolojik performans katsayısı ekivalans oranının artması ile teorik tam yanmaya kadar artmaktadır. Zengin yanma bölgesinde ise bu durum bir miktar azalarak yatay olarak sabite yakın bir halde devam etmektedir. Oksijen oranı arttıkça her iki yakıtta da ekolojik performans katsayısının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Bunun yanında tüm durumlarda metanol yakıtının yanmasının etonelden daha yüksek olduğu ve daha çevreci bir sonuç verdiği görülmüştür. En düşük ekolojik performans katsayısı sonuçlarına göre %21 etanol yanması, en yüksek değere ise %25 O₂ oranlı metanol yanmasının olduğu net olarak ortadadır. Metanol yakıtı yanması ile elde edilen güç, etanol yakıtından elde edilen güçten daha fazla olduğu ve bu durumun yanmadaki oksijen oranının %21'den %25'e doğru çıktıkça azaldığı görülmüştür. Yanma odası giriş sıcaklığının artırılması ile elde edilen güç tüm şartlarda az da olsa bir artış gösterdiği sonucu elde edilmiştir (Şekil 7.b).

4. Değerlendirme ve Sonuç

Bu çalışmada, denizaltılarında havadan bağımsız tahrik sistemi olarak kullanılan MESMA sisteminin termodinamik performans analizi yapılmıştır. Termodinamik analizde yanma, enerji ve ekserji sonuçları detaylı olarak incelenmiştir. Parametrik analiz sonuçları ekivalans oranının 0.3'den 1.5'e kadar, yanma odası giriş sıcaklığı 300K'den 450K'e kadar artırılması ile etanol ve metanol yakıtlarının farklı oksijen oranlı oksijen-yanmaları ile elde edilmiştir.

- MESMA sisteminin en önemli kısmı olan yanmanın detaylı analizi yapılmıştır. Tüm yanma ürünleri etanol ve metanol yakıtı için iki farklı oksijen oranı ile ekivalans oranına göre sergilenmiştir. Ayrıca bu iki yakıtın yanma ekserjisi sonuçları ortaya koyularak kıyaslaması yapılmıştır.
- Elde edilen net güç bakımından sonuçların etanol ile metanolün yakın değerlere (10-50 kW farka) sahip olduğu gösterilmiştir. Yanmadaki oksijen oranının artması ile elde edilen gücün arttığı tespit edilmiştir. Yanma odası giriş sıcaklığını arttırmak, sistemden elde edilen gücü arttırmıştır.
- Metanol yakılması ile giren ısının, etanol yanmasından daha az olması nedeni ile verim bakımından metanol yakıtının kullanılmasının belirgin bir fazlalığı olduğu ispatlanmıştır. Tüm durum ve şartlarda metanol yanmasının etanol yanmasından daha verimli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. %25 O₂'li etanol yanmasının dahi %21 O₂'li metanol yanmasından daha düşük verime sahip olduğu, hem ekivalans oranı değişiminde hem de yanma odası giriş sıcaklığının değişiminde gösterilmiştir. İki yakıt arasında 5 puan verim farkı mevcuttur.
- Ekolojik performans katsayısı (ECOP) ekivalans oranının 0,3'ten 1'e kadar artması ile azalarak artan bir grafik çizmiştir. Ekivalans oranı 1'den 1,5'e bir miktar azaldıktan sonra yatay olarak devam etmiştir. ECOP yönünden metanolün daha avantajlı olduğu ortaya konulmuştur.

Elde edilen sonuçlar ile MESMA sisteminde metanol yakılması güç yönünden az olsa da verim ve ECOP bakımından etanol yakıtına göre üstünlük sağlamaktadır. Fakat tüm havadan bağımsız tahrik sistemlerinde birinci öncelik personel güvenliği olduğu için artık metanol yakıtı kullanılmamaktadır. Fakat ilerleyen yıllarda gelişen teknolojiler ve alternatif yakıtların bulunması ile daha iyi performanslar sergilenebilecektir.

7. Referanslar

Bedir F., Alniak M.O., 2004. Yakıt Pil Sistemlerinin Çalışma Prensibi Ve Denizaltı Sistemlerdeki Tasarımı. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi 31–37.

Burcher, R., Rydill, L., 1994. Concepts in submarine design, Cambridge ocean technology series. Cambridge University Press, Cambridge [England] ; New York.

Edward C. Whitman, n.d. Air-Independent Propulsion. AIP Technology Creates a New Undersea Threat 1–6.

Escudero, A.I., Aznar, M., Díez, L.I., Mayoral, M.C., Andrés, J.M., 2020. From O₂/CO₂ to O₂/H₂O combustion: The effect of large steam addition on anthracite ignition, burnout and NO_x formation. Fuel Processing Technology 206, 106432. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106432>.

Ferguson CR., 1986. Internal combustion engines – applied thermosciences., New York: John Wiley&Sons Inc.; ed.

Fiori, C., Dell’Era, A., Zuccari, F., Santiangeli, A., D’Orazio, A., Orecchini, F., 2015. Hydrides for submarine applications: Overview and identification of optimal alloys for air independent propulsion maximization. International Journal of Hydrogen Energy 40, 11879–11889. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.105>.

G. Gonca, I. Ozsari, 2016. Exergetic Performance Analysis of a Gas Turbine with two Intercoolers and two Reheaters Fuelled with Different Fuel Kinds. CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING ISTANBUL 2016.

Gonca, G., 2018. The effects of turbine design parameters on the thermo-ecologic performance of a regenerated gas turbine running with different fuel kinds. Applied Thermal Engineering 137, 419–429. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.03.100>.

Gonca, G., Genc, I., 2019. Thermoecology-based performance simulation of a Gas-Mercury-Steam power generation system (GMSPGS). Energy Conversion and Management 189, 91–104. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.081>.

Han, Jaeyoung, Han, Jaesu, Ji, H., Yu, S., 2020. “Model-based” design of thermal management system of a fuel cell “air-independent” propulsion system for underwater shipboard. International Journal of Hydrogen Energy 45, 32449–32463. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.233>.

<https://klswatch.wordpress.com/2011/06/22/second-dcnss-mesma%C2%AE-aip-ready-for-shipment-to-pakistan/>, n.d.

https://uboat.net/types/walter_hist.htm, n.d.

Kerros, P., Inizan, C., Grousset, D., 1994. MESMA: AIP system for submarines, in: Proceedings of OCEANS’94. Presented at the OCEANS’94, IEEE, Brest, France, p. III/457-III/466. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1994.364242>.

Lee J.-C., Shay T., 2018. ANALYSIS OF FUEL CELL APPLIED FOR SUBMARINE AIR INDEPENDENT PROPULSION (AIP) SYSTEM. Journal of Marine Science and Technology 26, 657–666. [https://doi.org/10.6119/JMST.201810_26\(5\).0005](https://doi.org/10.6119/JMST.201810_26(5).0005).

Lefebvre, A.H., Ballal, D.R., 2010. Gas turbine combustion alternative fuels and emissions. Taylor & Francis, Boca Raton [u.a.

Menon, R.R., Vijayakumar, R., Pandey, J.K., 2020. Selection of Optimal Air Independent Propulsion System using Forced Decision Matrix. *Def. Sc. Jl.* 70, 103–109. <https://doi.org/10.14429/dsj.70.13678>.

Mohammed Shibil Kurikkal, 2016. Air Independent Propulsion; Silent Submarines with Stirling Engines. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* 5, 240.

Ozsari, I., Ust, Y., 2019. Effect of varying fuel types on oxy-combustion performance. *Int J Energy Res* er.4868. <https://doi.org/10.1002/er.4868>.

Ozsari, I., Ust, Y., Kayadelen, H.K., 2021. Comparative Energy and Emission Analysis of Oxy-Combustion and Conventional Air Combustion. *Arab J Sci Eng* 46, 2477–2492. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-05130-0>.

Ozturan, H., 2017. IdeaLab'dan Sessiz Denizaltılar için Devrim Yaratacak Teknoloji: sCO₂ Brayton Güç Çevrimi. *MSI IDEF* 172.

Park, E.-Y., Choi, J., 2020. The Performance of Low-Pressure Seawater as a CO₂ Solvent in Underwater Air-Independent Propulsion Systems. *JMSE* 8, 22. <https://doi.org/10.3390/jmse8010022>.

Persson, O., Östberg, C., Pagels, J., Sebastian, A., 2006. Air contaminants in a submarine equipped with air-independent propulsion. *J. Environ. Monit.* 8, 1111–1121. <https://doi.org/10.1039/B605331A>.

Peter L. Mart, Jenny Margeridis, 1995. Fuel Cell Air Independent Propulsion of Submarines. DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Avusturalya DSTO-GD-0042.

Pommer, H., Hauschildt, P., Teppner, R., Hartung, W., 2006. Air-independent propulsion system for submarines. *ThyssenKrupp techforum* 64–69.

Psallidas, K., Whitcomb, C.A., Hootman, J.C., 2010. Design of Conventional Submarines with Advanced Air Independent Propulsion Systems and Determination of Corresponding Theater-Level Impacts: Design of Conventional Submarines. *Naval Engineers Journal* 122, 111–123. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.2010.00196.x>.

Psoma, A., Sattler, G., 2002. Fuel cell systems for submarines: from the first idea to serial production. *Journal of Power Sources* 106, 381–383. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)01044-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)01044-8).

Rashad, M.I., Nada, S.A., 2021. Experimental and theoretical investigation on a proposed free piston Stirling engine with expansion bellow. *Applied Thermal Engineering* 182, 116071. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116071>.

Raska, M., 2016. Diesel-Electric Submarine Modernization in Asia: The Role of Air-Independent Propulsion Systems, in: Bitzinger, R.A. (Ed.), *Emerging Critical Technologies and Security in the Asia-Pacific*. Palgrave Macmillan UK, London, pp. 91–106. https://doi.org/10.1057/9781137461285_8.

Turns, S.R., 2011. *An introduction to combustion: concepts and applications*, 3. ed. ed. McGraw-Hill, Boston.

Ust, Y., Sahin, B., Sogut, O.S., 2005. Performance analysis and optimization of an irreversible dual-cycle based on an ecological coefficient of performance criterion. *Applied Energy* 82, 23–39. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.08.005>.

Otonom Su Üstü Araçları için COLREG Kurallarını İçeren Çarpışma Önleyici Sistem

Gökhan Budak

Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, İzmir, Türkiye

gokhan.budak@ikc.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4043-9304

ÖZET

Bu çalışmada önerilen matematiksel model, MMG (Matematiksel Model Grubu) manevra modeli ve geleneksel PD kontrol sistemine dayalı bir kontrol algoritması olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. MMG modeli, geminin manevra karakteristiklerini hesaplamak için kullanılmaktadır. Kontrol sistemi ise manevra modeliyle birlikte geminin seyir halindeyken herhangi bir engelle karşılaşması durumunda güvenli bir rotanın oluşturulmasını sağlamaktadır. Matlab-Simulink yazılım programında oluşturulan matematiksel model sayesinde COLREG kurallarına uygun olarak rota belirlenebilmektedir. Gemiye ait bilinen hidrodinamik katsayıların MMG modele uygun olması ve geminin seyir test sonuçlarının mevcut olması sebebiyle Esso Osaka gemisi seçilerek bir dizi simülasyon gerçekleştirilmiştir. Öncelikle geminin farklı hızları için dönme ve zigzag testleri yapılarak geminin manevra özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Esso Osaka gemisinin seyir testi sonuçları ile karşılaştırılarak önerilen model doğrulanmıştır. İkinci olarak, belirlenen bir hedef koordinat için geminin rotası elde edilmiştir. Üçüncü olarak ise geminin başlangıç noktası ile önceki simülasyon için belirlenen hedef koordinat arasında farklı büyüklüklerde engel olması durumu düşünülerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak COLREG kurallarına uygun olarak belirlenen sanal koordinatlar sayesinde güvenli yeni rotalar oluşturulmuştur. Geminin manevra karakteristik değerleri kontrol algoritmasına dahil edildiği için sanal koordinatların belirlenmesini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, doğru manevra özelliklerini bulmak önem arz etmektedir. Önerilen matematiksel modelden elde edilen simülasyon sonuçları değerlendirildiğinde, Esso Osaka gemisi için belirlenen koordinatlar arasında güvenli bir rota oluşturulduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: MMG model, Çarpışma önleme, COLREG, Güvenli Taşımacılık

Makale geçmişi: Geliş 16/04/2022 – Kabul 25/06/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1104423>

A Collision Avoidance System Based on COLREGs Rules for Autonomous Surface Vessels

Gökhan Budak

Faculty of Naval Architecture and Maritime, Izmir Katip Celebi University, Izmir, Türkiye

gokhan.budak@ikc.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4043-9304

ABSTRACT

The proposed mathematical model in this study consists of two parts, one is the maneuvering model, called MMG (Mathematical Model Group), and the other is a control algorithm based on traditional PD control system. The MMG model is used to compute the ship's maneuvering characteristics, and a ship can safely reach target coordinates with the help of a control algorithm if it encounters any obstacles along the way. Because of the suitable hydrodynamic coefficients of Esso Osaka, the proposed mathematical model is evaluated using trial test data from Esso Osaka. Firstly, the maneuvering characteristics of the ship were determined by performing the turning and zigzag tests for different velocity of the ship. By comparing the results obtained with the trial test results of the Esso Osaka, the suggested model was verified. Secondly, the ship's route was obtained for a determined target coordinate. Thirdly, a new route is automatically obtained by assuming that there is an obstacle between the starting point of the ship and the target coordinate determined for the previous simulation. As a result, this new route is created thanks to the virtual coordinates determined in accordance with the COLREGs rules. Since the maneuvering characteristic values of the ship are included in the written algorithm, it directly affects the determination of the virtual coordinates. Therefore, it is very important to find accurate maneuvering characteristics. Evaluating the simulation results obtained from the proposed mathematical model, it is concluded that a safe route has been created between the coordinates determined for the Esso Osaka ship. Moreover, the ship reaches the target coordinate without any collision.

Keywords: MMG model, Collision avoidance, COLREGs rules, Safety transportation

Article history: Received 16/04/2022 – Accepted 25/06/2022

1. Introduction

There are internationally accepted rules for marine traffic to be able to navigate safely at sea in accordance with ships' purpose of usage. One of the international rules applied for navigational safety is the COLREGs (Regulations for the Prevention of Collisions at Sea) rules (IMO, 1972). These rules, which are crucial in terms of avoiding collisions of the ship and obtaining a safer route, ensure the regulation of ship traffic. For this reason, it is very significant to include these rules in the algorithm in studies on autonomous ships. The researchers have studied to obtain a safe route for the ships in the marine traffic. For example, Liu et al. (2017) suggested a collision avoidance system-based control algorithm with COLREGs rules. The authors used the Nomoto model to determine the transfer function. Furthermore, the ship maintains a constant speed and maintains more than one nautical mile distance from other vessels. In some studies, hybrid collision avoidance systems have been developed for a safe navigation. Eriksen et al. (2020) proposed the hybrid collision avoidance (COLAV) system for unmanned surface vessels compliant with COLREGs rules and performed the system for three different scenarios. Similarly, A hybrid technique consisting of velocity obstacles (VO) and rapidly exploring random trees (RRT) is proposed to determine the safe route for autonomous surface vessels based on COLREGs rules (Dubey and Louis, 2021). The fuzzy logic, traditional PID control and combined Fuzzy and PID control systems are widely preferred to develop a collision avoidance system by the researchers. Perera et al. (2009) have developed a new decision-making method for avoiding collisions in maritime navigation. The new DM system is built on fuzzy logic and expert knowledge from humans. To avoid collisions and establish the safe route, Li et al. (2019) devised a multi objective optimization approach based on fuzzy controller. Namgung (2021) investigated a local route planning method with a fuzzy inference system to avoid collisions that are compliant with COLREG guidelines. Another study focused on the development of a ship collision avoidance system that uses fuzzy logic systems to detect dangerous situations and quantify the amount of danger using a continuous value (Grinyak and Devyatisil'nyi, 2016). He et al. (2021) suggested a mathematical model including maneuvering model, namely MMG, and a fuzzy adaptive PID control system. In addition, the proposed model conforms to COLREG rules 13 to 17. Another study was about to develop a collision-avoidance system including a nonlinear Norrbinn model based on traditional PID control and COLREGs rules (Zhou et al., 2021). Similarly, based on the traditional PID control system is widely used by the researchers to avoid the collision in the marine traffic, such as Zacccone and Martelli, (2020), Wang et al. (2021). As a result, the reason for using PD control as a control system in this study is that it is a frequently preferred controller in terms of ease of application.

Although the researchers indicate different methods for collision avoidance systems, the goal is to provide safe marine traffic. Huang et al. (2020) provides a complete overview of collision avoidance approaches based on three methods for determining solutions: motion prediction, conflict detection, and conflict resolution.

The proposed mathematical model has two purposes. One of the aims of this study is to obtain a ship trajectory for target coordinates. Another aim is to avoid a collision by automatically altering the ship's trajectory if it encounters any obstacles. First, turning and zigzag tests were simulated to determine Esso Osaka's maneuvering characteristics. Second, a course with obstacles was determined, and the path following simulation was performed using a Matlab-Simulink mathematical model. As a result, the mathematical model can be used to determine a ship's maneuvering characteristics as well as a safe new route under the COLREGs rules if the ship encounters obstacles of various sizes along the course.

2. Mathematical Model

In the event of a constant obstacle between two coordinates, a model is proposed for determining a new safe route under COLREGs rules. This proposed model is divided into two components. One is a maneuvering model that considers the ship's known hydrodynamic coefficients, and the other is a control method for following the route and, if necessary, determining a new one. The MMG model was selected since it was suitable for the known coefficients of the Esso Osaka ship. An algorithm was added to the mathematical model's control section to determine a safe route in compliance with the COLREG regulations to reach the target coordinates, safely.

2.1. Maneuvering Model

Ogawa and Kasai (1978) introduced the MMG model, which includes equations that can be calculated as modules such as hull, rudder, and propeller. Using the ship's axial coordinates, a mathematical model was created by combining three of the six freedom motions known as surge, sway, and yaw. The fixed and moving coordinates of ship are described and other relevant quantities are shown in Figure 1.

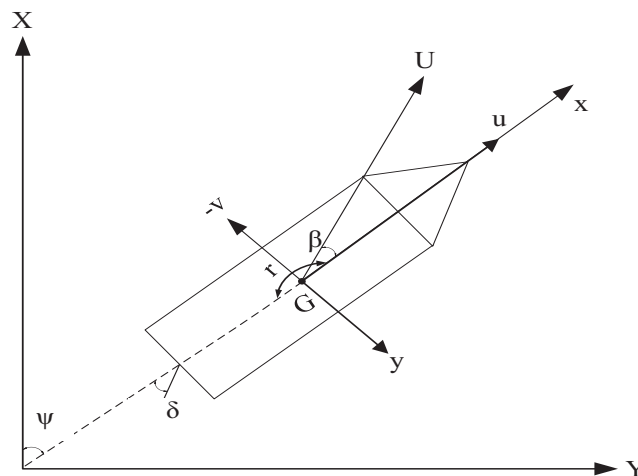


Figure 1. Fixed and ship coordinates

The mathematical expression of the surge, sway and yaw motions is given by Equation. 1.

$$\begin{aligned}
 (m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)vr - mx_G r^2 &= X \\
 (m + m_y)\dot{v} + (m + m_x)ur + mx_G \dot{r} &= Y \\
 (I_{zz} + mx_G^2 + J_{zz})\dot{r} + mx_G(\dot{v} + ur) &= N
 \end{aligned} \tag{1}$$

The total forces and moments are expressed as in Equation. 2. Subscripts H, P, and R denote hull, propeller, and rudder, respectively.

$$\begin{aligned}
 X &= X_H + X_P + X_R \\
 Y &= Y_H + Y_P + Y_R \\
 N &= N_H + N_P + N_R
 \end{aligned} \tag{2}$$

The forces and moment acting on the ship are calculated with Equation 3.

$$\begin{aligned}
 X_H &= -R_0 + X_{vv}v^2 + X_{vr}vr + X_{rr}r^2 + X_{vvvv}v^4 \\
 Y_H &= Y_vv + Y_r r + Y_{vvv}v^3 + Y_{vvr}v^2r + Y_{vrr}vr^2 + Y_{rrr}r^3 \\
 N_H &= N_vv + N_r r + N_{vvv}v^3 + N_{vvr}v^2r + N_{vrr}vr^2 + N_{rrr}r^3
 \end{aligned} \tag{3}$$

where X_{vv} , X_{vr} , X_{rr} , X_{vvvv} , Y_v , Y_r , Y_{vvv} , Y_{vvr} , Y_{vrr} , Y_{rrr} , N_v , N_r , N_{vvv} , N_{vvr} , N_{vrr} and N_{rrr} are known as hydrodynamic derivatives.

While calculating the propeller-induced forces and moment, Equation 4 is written assuming that a force acts in the direction of the ship's surge motion.

$$\begin{aligned}
 X_P &= (1 - t)T \\
 Y_P &= 0 \\
 N_P &= 0
 \end{aligned} \tag{4}$$

Equation 5 expresses propeller-induced forces and moment depending on the rudder angle.

$$\begin{aligned}
 X_R &= -(1 - t_R)F_N \sin\delta \\
 Y_R &= -(1 - a_H)F_N \cos\delta \\
 N_R &= -(x_R + a_H x_H)F_N \cos\delta
 \end{aligned} \tag{5}$$

The equation $F_N = (1/2)\rho A_R U_R^2 f_\alpha \sin\alpha_R$ can be used to calculate the rudder normal force F_N . ρ water density, A_R profile area of movable part of mariner rudder, U_R resultant inflow velocity to rudder, f_α gradient of the normal force coefficient, and α_R effective inflow angle to rudder. The studies by Yasukawa and Yoshimura (2015), Aksu and Köse (2017), and Budak and Beji (2021) were provided detailed information about the MMG model on how to calculate forces and moments. Hydrodynamic coefficient and main characteristics of Esso Osaka can be found in Rhee and Kim (1999), McTaggart (2005), and The Specialist Committee on Esso Osaka (2002).

2.2. Control Algorithm

The ship arrives at the determined target coordinates thanks to the created control algorithm. The angle difference between the ship's instantaneous position and the target coordinate is used as a reference in Equation 6. To eliminate this angle difference, a control system that controls the required rudder angle has been established. The PD controller determines the required rudder angle (Equation 7) to reach the target coordinates.

$$\psi_d = \text{atan} \left(\frac{y_{dp} - y_{sp}}{x_{dp} - x_{sp}} \right) \tag{6}$$

where ψ_d desired heading angle, x_{dp} and y_{dp} destination points, x_{sp} and y_{sp} instantaneous ship position.

$$\delta(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{7}$$

If the ship encounters an obstacle on its way to the target coordinate, a new safe route can be generated automatically under the COLREGs rules. Before the simulation, the coordinates and size of the obstacle must be manually entered into the mathematical model. The proposed control algorithm incorporates the ship's maneuvering characteristics into the calculations when determining the new route to avoid collision. In other words, the desired command must be sent to the rudder while the

ship is a certain distance away from the obstacle for the ship to proceed safely without colliding with it. As a result, the ship's maneuvering characteristics are added as input information to the control system in the mathematical model. In short, the equation is determined by the virtual coordinates, given in Equation 8 and Equation 9, so that the ship can avoid collision according to the COLREGs rules in case of an obstacle.

$$\begin{aligned}
 SY_{pe1} &= Y_{coore} - y_{sp} \\
 SX_{pe1} &= X_{coore} - x_{sp} \\
 S\psi_{pe1} &= \text{atan}\left(\frac{SY_{pe1}}{SX_{pe1}}\right)
 \end{aligned} \tag{8}$$

where SX_{pe1} and SY_{pe1} the first virtual coordinates for the obstacle, X_{coore} and Y_{coore} obstacle's coordinates.

The D value in Equation 9 represents the minimum distance required to pass from the obstacle at a safe distance. SX_{pe2} and SY_{pe2} represents the second virtual coordinates for the obstacle.

$$\begin{aligned}
 SY_{pe2} &= Y_{coore} + D + D * \cos\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) - s\psi_{pe1}\right) \\
 SX_{pe2} &= Y_{coore} + D * \sin(s\psi_{pe1}) \\
 S\psi_{pe2} &= \text{atan}\left(\frac{SY_{pe2}}{SX_{pe2}}\right)
 \end{aligned} \tag{9}$$

3. Simulations

The mathematical model, which included the maneuver model and the control system, was used in Esso Osaka's validation simulations. These performed simulations are turning circle and zigzag tests at varying ship speeds. When the obtained results are compared to the Esso Osaka ship's trial results (Bhawsinka (2011)), the mathematical model produces reliable results. It should be noted that the ship maneuvering characteristics obtained through simulations are used as input data in the developed control algorithm. Table 1 shows the basic dimensions of the simulated Esso Osaka ship.

Table 1. Main characteristics of Esso Osaka ship.

L_{pp} (m)	325.0
B (m)	53.0
T (m)	22.05
C_B (-)	0.831
x_G (m)	10.3
V (m/s)	5.144
D_P (m)	9.10
H_R (m)	13.85
A_R (m ²)	119.82

3.1. Validation of the maneuvering model

The proposed model was used to execute turning and zigzag tests on the Esso Osaka ship, and the ship's maneuvering characteristics were identified. Figure 2-a and Figure 2-b, the simulation results of

the turning tests at different speeds and the trial tests' results are given. Additionally, Figure 2-c and Figure 2-d depict graphs of the ship's velocity change during the turning test. When the simulation results are compared to the trial tests' results, it is determined that the mathematical model's results are compatible.

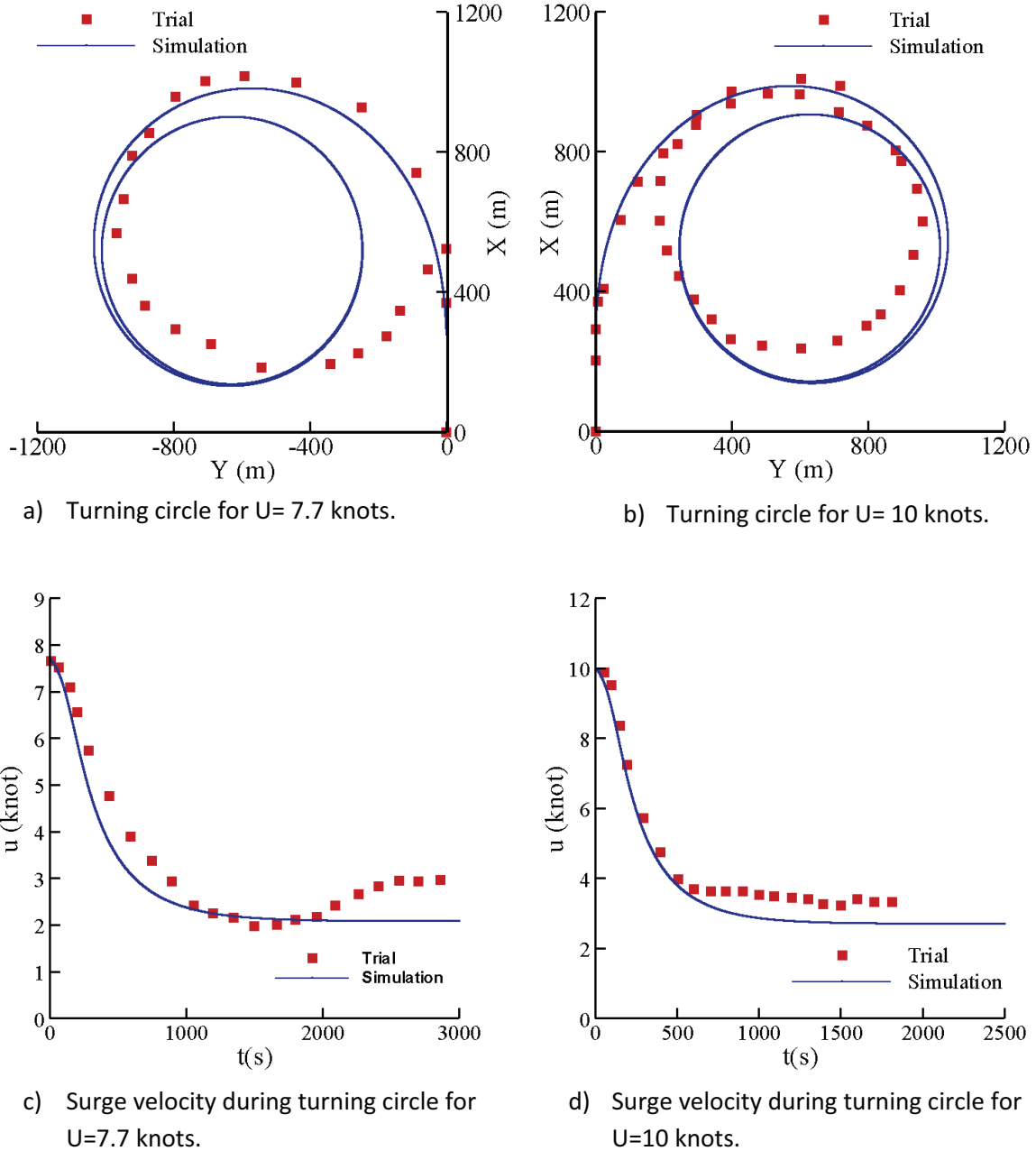


Figure 2. The comparison of the simulations results and the trial data for Esso Osaka ship. a) Turning circle for rudder angle -35° , b) Turning circle for rudder angle 35° , c) Reduction of surge velocity for rudder angle -35° , d) Reduction of surge velocity for rudder angle 35°

Figure 3-a shows the ship's 10/10 zigzag test result at 7.5 knots, and Figure 3-b depicts the ship's 20/20 zigzag test result at 7.8 knots. It can be shown that the trial tests and the simulation results are in near agreement. The findings of both the turning and zigzag tests will be used as data in the collision avoidance simulation that will be carried out as part of the study. As a result, it's critical whether the maneuvering model's outputs are accurate.

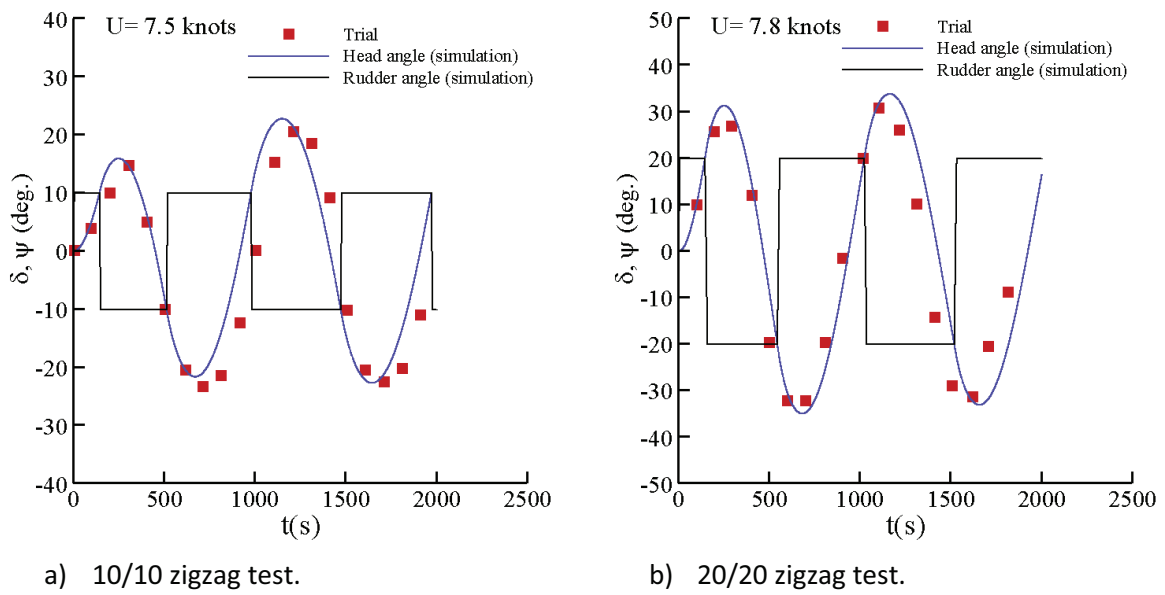


Figure 3. The comparison of the zigzag tests results and the trial data for Esso Osaka ship

a) 10/10 zigzag tests, b) 20/20 zigzag tests

3.2. Simulation of collision avoidance system

Two different simulations were carried out depending on whether the ship encountered an obstacle in its movement towards the target coordinate. When there is no obstacle on the ship's route, the first obtained simulation result to reach the target coordinates is shown in Figure 4.

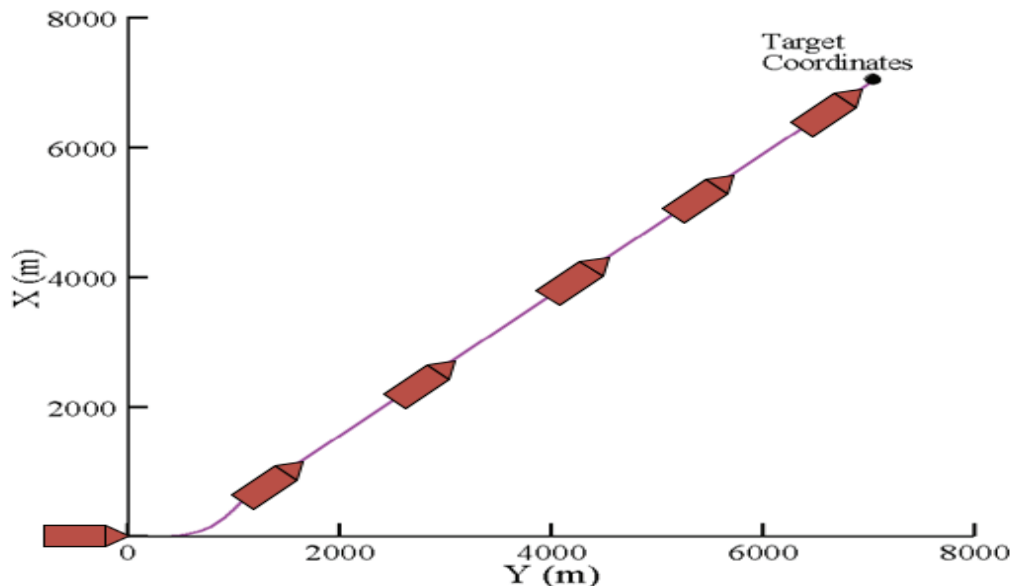


Figure 4. The obtained route for target coordinates without any obstacle

In the second simulations, firstly, two different sizes of the obstacle were defined, and these values were entered into the mathematical model as the initial data before the simulations were performed. The obtained routes were illustrated in Figure 5. The green line (Route 1) is for the obstacle's radius with 100 meters and the blue path (Route 2) is for obstacle's radius with 250 meters. These obtained

ship's routes to the target destination are created according to the COLREGs rules. In terms of safe navigation, the size of the obstacle and the ship's maneuvering characteristics in the calculations are important to determine the virtual coordinates in the algorithm. As a result of simulation, the ship maintained a safe distance to the obstacle and arrived at the target coordinates without any colliding.

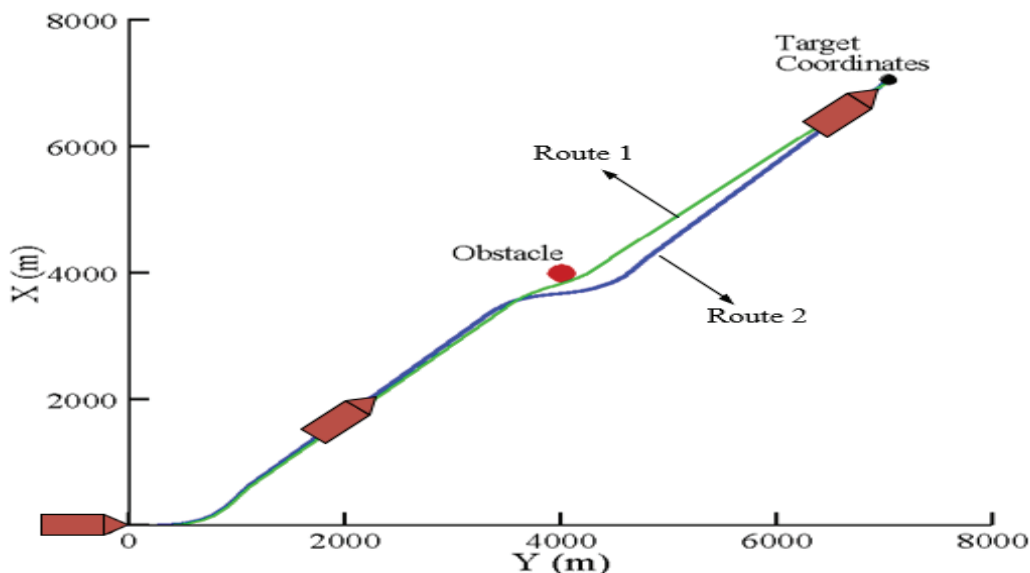


Figure 5. The obtained route for target coordinates with different obstacle sizes

4. Conclusion

The maneuvering model and control algorithm are included in the proposed collision avoidance system. The mathematical model is used to determine the ship's maneuvering characteristics as well as to determine a safe route to the target coordinates. Furthermore, under the COLREGs guidelines, a new path is developed so that the ship avoids colliding with an impediment on the trajectory. Simulations were used to determine the Esso Osaka ship's maneuvering characteristics, which were then compared to trial test results. Because the values of the maneuvering characteristics are used as data in the control algorithm to determine a safe route to avoid a collision, this validation is critical. In other words, the algorithm includes the maneuvering command that the ship begins to maneuver when it is within a certain distance of the obstacle. The size of the obstacle, on the other hand, is critical for safe passage. As a result, before running the simulation, the size of the obstacle should be employed into the mathematical model. The study used the COLREGs rules to find safe routes for two different-sized obstacles. Furthermore, the ship has been observed to reach the target coordinates both with and without obstructions. As a result, the collision avoidance system has determined that the ship arrives at the target coordinates safely and accurately. In the future study, the collision avoidance system will be developed for the situation of a ship colliding with one or more oncoming ships.

5. References

- Aksu, E., and Köse, E. (2017). Evaluation of Mathematical Models for Tankers' Maneuvering Motions. *JEMS*, 2017; 5(1): 95-109.
- Bhawsinka, K. (2011). Maneuvering Simulation of Displacement Type Ship and Planning Hull. Master Thesis. Faculty of Engineering and Applied Sciences, Memorial University of Newfoundland, Canada.

Budak, G., and Beji, S. (2020). Controlled course-keeping simulations of a ship under external disturbances. *Ocean Engineering* 218 (2020) 108126.

Dubey, R., Louis, S. J. (2021). VORRT-COLREGS: A Hybrid Velocity Obstacles and RRT Based COLREGS-Compliant Path Planner for Autonomous Surface Vessels. arXiv:2109.00862. doi = {10.48550/ARXIV.2109.00862}.

Eriksen Bjørn-Olav H., Bitar Glenn, Breivik Morten, Lekkas Anastasios M., (2020). Hybrid Collision Avoidance for ASVs Compliant with COLREGs Rules 8 and 13–17. *Frontiers in Robotics and AI*, Vol 7, DOI=10.3389/frobt.2020.00011.

Grinyak, V. M., Devyatisil'nyi A. S., (2016). Fuzzy Collision Avoidance System for Ships. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* No:2, pp. 93-103. DOI: 10.1134/S106423071601007X.

He, Y., Li, Z., Mou, J., Hu, W., Li, L., Wang, B. (2021). Collision-avoidance path planning for multi-ship encounters considering ship manoeuvrability and COLREGs. *Transportation Safety and Environment*, 2021, Vol. 3, No. 2 103–113.

Huang, Y.; Chen, L.; Chen, P.; Negenborn, R.R.; van Gelder, P.H.A.J.M., (20120). Ship collision avoidance methods: State-of-the-art. *Safety Science*, 121, 451–473, doi:10.1016/j.ssci.2019.09.018.

IMO, (1972). Convention on the international regulations for preventing collisions at sea (COLREGs).<http://www.imo.org>.

Li, J., Wang, H., Zhao, W., Xue, Y. (2019). Ship's Trajectory Planning Based on Improved Multiobjective Algorithm for Collision Avoidance. *J. Adv. Transp.* 2019,4068783.

Liu, J., Zhao, B., Li, L. (2017). Collision Avoidance for Underactuated Ocean-going Vessels Considering COLREGs Constraints. *IEEE Access*. DOI10.1109/ACCESS.2021.3123449.

McTaggart, K. (2005) Simulation of Hydrodynamic Forces and Motions for a Freely Maneuvering Ship in a Seaway. Technical Memorandum, DRDC Atlantic TM 2005-071, December 2005.

Namgung, H. (2021). Collision Risk Inference System for Maritime Autonomous Surface Ships Using COLREGs Rules Compliant Collision Avoidance. *IEEE Access*. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3049238.

Ogawa, A. and Kasai, H., (1978). On the mathematical model of maneuvering motion of ships. *Int. Shipbuild. Prog.* 25 (292), 306–319.

Perera, L. P., Carvalho, J. P., Soares, C. G., (2009). Decision making system for the collision avoidance of marine vessel navigation based on COLREGs rules and regulations. 13th Congress of Intl. Maritime Assoc. of Mediterranean, Istanbul, Turkey, 12-15 Oct. 2009, Page 1121-1128. DOI: 10.13140/2.1.2257.2487.

Rhee K.P and Kim, K. (1999). A New Sea Trial Method for Estimating Hydrodynamic Derivatives. *Journal of Ship & Ocean Technology*. September 1999. Vol.3, No.3; pp. 25-44.

Wang, B., He, Y., Hu, W., Mou, J., Li, L., Zhang, K., Huang, L. (2021). A Decision-Making Method for Autonomous Collision Avoidance for the Stand-On Vessel Based on Motion Process and COLREGs. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 584. <https://doi.org/10.3390/jmse9060584>.

The Specialist Committee on Esso Osaka "Final Report and Recommendations", "The 23rd ITTC International Towing Tank Conference" Feb. 2002 Taejon, Korea



Yasukawa, H. and Yoshimura, Y., 2015. Introduction of mmg standard method for ship maneuvering predictions. *J. Mar. Sci. Technol.* 20, 37–52.

Zaccone, R. and Martelli, M. (2020). A collision avoidance algorithm for ship guidance applications. *Journal of Marine Engineering & Technology* 2020, VOL. 19, NO. S1, 62–75 <https://doi.org/10.1080/20464177.2019.1685836>.

Zhou, Z., Zhang, Y., Wang, S. (2021). A Coordination System between Decision Making and Controlling for Autonomous Collision Avoidance of Large Intelligent Ships. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 1202. <https://doi.org/10.3390/jmse9111202>.

Açık Kaynaklı Panel Yöntemi Kodlarının Ticari Kod ile Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Muhammed Uçar^{1,3}, Emre Uzunoğlu², Elif Oğuz^{3,4}

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

² Deniz Teknolojisi ve Deniz Bilimleri Merkezi (CENTEC), Yüksek Teknik Enstitüsü, Lizbon Üniversitesi, Lizbon, Portekiz

³ Hidrolik Laboratuvarı, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 06800, Ankara, Türkiye

⁴ Rüzgar Enerjisi Araştırma Merkezi (METUWIND), Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 06800, Ankara, Türkiye

¹ ucar.muhammed@metu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6062-7532

² emre.uzunoglu@centec.tecnico.ulisboa.pt, 0000-0001-6880-197X

^{3,4} (sorumlu yazar), elifoguz@metu.edu.tr, 0000-0003-3574-9436

ÖZET

Bu çalışmada, iki yüzer rüzgâr türbini platformu üzerinden açık kaynaklı panel yöntemi kodlarına dair bir kıyaslama çalışması sunulmuştur. HAMS, NEMOH ve WAMIT; sonuçları, hesaplama performansları, kullanım kolaylıkları ve esneklikleri açısından karşılaştırılmıştır. OC3 Hywind Spar ve OC4 DeepCWind Semisubmersible yüzer platformları için WAMIT verileri önceki yayınlardan alınmış olup yapının hareketini temsil eden şu ana parametreler NEMOH ve HAMS değerleri ile karşılaştırılmıştır: yapıya etkiyen dalga kuvvetleri, katma kütle değerleri ve potansiyel sönüm değerleri. Her iki açık kaynak panel yöntemi kodu da, NRMS değerleri baz alınarak, çok elemanlı olan Semisubmersible platformdan ziyade, basit bir tek parça spar platform konseptinde daha başarılı olmuştur. Genel olarak, en yakın sonuçlar, katma kütle için ileri-geri öteleme yönünden; en olumsuz sonuçlar ise, dalıp-çıkma yönündeki radyasyon sönümlenmesinden elde edilmiştir. NEMOH, her iki platformda da baş-kıç vurmada uygun bulunamayacak sonuçlar vermiştir. NEMOH'un bu baş-kıç vurma sonuçları ihmal edilirse, her iki kod da WAMIT'e paralel ve makul derecede yakın sonuçlar vermiştir. Bu çalışmanın amacı, geçerliliği kabul edilmiş bir ticari koda alternatif olarak, araştırmacıların ücretsiz bir açık kaynak kodu seçebilmelerine yardımcı olmaktır.

Anahtar kelimeler: Panel Yöntemi, hidrodinamik katsayılar, açık kaynak, BEM çözücü, kıyaslama çalışması, açık deniz rüzgârı

Makale geçmişi: Geliş 20/04/2022 – Kabul 19/06/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1106386>

Comparison and Evaluation of Open-Source Panel Method Codes against Commercial Codes

Muhammed Uçar ^{1,3}, Emre Uzunoglu ², Elif Oğuz ^{3,4}

¹ Necmettin Erbakan University, Civil Engineering Department, Konya, Türkiye

² Centre for Marine Technology and Ocean Engineering (CENTEC), Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal

³ Hydraulics Laboratory, Civil Engineering Department, Middle East Technical University, 06800, Türkiye

⁴ Center for Wind Energy Research (METUWIND), Middle East Technical University, 06800 Ankara, Türkiye

¹ ucar.muhammed@metu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6062-7532

² emre.uzunoglu@centec.tecnico.ulisboa.pt, 0000-0001-6880-197X

^{3,4} (corresponding author), elifoguz@metu.edu.tr, 0000-0003-3574-9436

ABSTRACT

This work provides a benchmark study regarding the open-source panel method codes of two floating wind turbine platforms. HAMS, NEMOH, and WAMIT are compared in terms of their results, computational performance, user-friendliness, and flexibility. WAMIT's data is sourced from previous publications for the OC3 Hywind Spar and OC4 DeepCWind Semisubmersible. These reference values are compared to NEMOH and HAMS for the main parameters representing the movement of the structure: wave excitation forces, added mass values, and potential damping. Both of the open source panel method codes were quite successful in the concept of a simple one-piece spar float rather than a multibody semi-submersible in terms of NRMS values. Overall, the most close results were obtained from the surge for added mass, and the most unfavorable results were from radiation damping in the heave. NEMOH brings ineligible results for pitch on both platforms. Neglecting the pitch axis results of NEMOH, both codes showed parallel and reasonably close results to WAMIT. The study aims to help researchers to choose a free open-source alternative to a validated commercial code.

Keywords: Panel Method, hydrodynamic coefficients, open-source, BEM solver, benchmark study, offshore wind

Article history: Received 20/04/2022 – Accepted 19/06/2022

1. Introduction

One of the most known and preferred renewable energy sources today is wind energy. However, it is difficult to install and operate wind turbines on land due to noise and visual pollution and insufficient space to install them on land. Compared to the land, there are much higher wind speeds and therefore higher energy potential per square meter on the coasts and the deeper seas as you move away from the coast. To realize this potential, there is a trend toward the Floating Wind Turbines (FWTs) (Shin et al., 2013), and the vision of FWTs was first proposed by Professor William E. Heronemus (1972) at the University of Massachusetts. After the commercial wind industry was well established, the issue was again taken up by the research community. The economic potential of FWTs was demonstrated by Musial et al. (2004).

The cost of onshore wind power today is competitive with most fossil fuels and will likely be cheaper than the new "clean" coal (Andersen et al., 2015). Three main factors play a key role in this success: 1) dramatic reductions in turbine costs, 2) increased reliability, and 3) economy of scale in production. The first two developments were the result of improvements in design techniques and design tools. Aerodynamic research was followed by aero-elastic dynamic models, and finally, the standards were developed as a result of extensive research (Andersen et al., 2015). Offshore wind energy resource is 50% higher than onshore; however, the cost of installing and operating offshore wind power units is about twice that of onshore (IRENA, 2012). On the other hand, cost reduction studies are ongoing for also platform and mooring costs (especially Tension Leg Platform (TLP)) costs. As an example, Compos et al. (2016) compared the costs of steel and an equivalent concrete spar buoy and revealed that the concrete monolithic design was 60% cheaper in terms of material costs. While the wind industry and researchers agree on the higher cost of offshore wind power, many argue that offshore wind power is cost-competitive with land-based fossil fuel production when environmental impacts are added to the cost equation (Butterfield et al., 2007). Offshore wind power generation is mainly located in areas 5–50 km from the shoreline, where the water depth is usually more than 20 m. Studies have shown that conventional fixed foundations will not be economically viable in waters deeper than 30 m (Andersen et al., 2015). Coasts with a narrow coastal shelf, such as the coasts of the United States, China, Japan, Spain, Portugal, and Norway, are an example. Mounting wind turbines on floating support structures opens up the potential to exploit such deepwater resources. To use such deep water sources, wind turbines must be mounted on floating support structures (Cordle and Jonkman, 2011). Fortunately, the long-term survivability of floating structures has been successfully demonstrated for decades by the marine and offshore oil industries (Butterfield et al., 2007).

Floating offshore wind turbine platforms are classified into three main types, spar-buoys, TLPs, and semi-submersibles, and can be stabilized by mechanical means such as deep ballast placement (e.g., a SPAR), mooring line tension (e.g., a TLP), or the waterplane area (e.g., a barge), all platforms use a combination of these methods. Each one of these methods has their advantage and disadvantages depending on site conditions and placement methods in that they are cost-driven in size, complexity and flexibility (Olondriz et al., 2016). Butterfield et al. (2007) presented design challenge trade-offs for stability criteria with a framework for the classification of floating wind turbine platforms to perform first-order economic analysis on a wide variety of platform architectures based on static stability criteria. His classification was subsequently updated by several authors to clarify the primary contributor (Uzunoglu and Guedes Soares, 2020).

In terms of design and analysis, the dynamic behaviour of a structure in water is directly relevant to many technologies, including vessels, offshore platforms, and wave energy converters (WECs). Comprehensive simulation codes are needed to design and analyse coupled dynamics of offshore wind

turbines that take into account aerodynamics, hydrodynamics, mooring dynamics, foundation dynamics, elasticity, fatigue, and combined dynamics of turbine controls (Robertson et al., 2014). Matha et al. described the major modelling challenges, development needs, and advanced modelling methods developed to meet these needs for floating wind turbine codes (Matha et al., 2011). Various numerical methods have been developed to model such a system, from high-fidelity Navier-Stokes computational fluid dynamics (CFD) codes, which model the fluid-structure interactions from first principles, to moderately accurate potential flow time-domain models and simple frequency-domain methods (Lawson et al., 2015). Matha et al. discuss the limits of potential flow methods and Boundary Element Method (BEM) and the competencies of CFD for FWT simulation (Matha et al., 2011). A comparison between a viscose time domain and a CFD model was made by Bhinder et al. (2015) and a methodology for describing and incorporating the drag damping force in potential flow-based models is presented and shown to be in reasonable agreement with CFD simulations (Bhinder et al., 2015). While frequency domain methods continue to be widely used in the offshore oil and gas industries to analyse and design floating structures, these methods are also used for the preliminary design of floating wind turbines. Henderson et al. (2003) utilized linear frequency-domain hydrodynamic techniques to analyse a tri-floater concept and find response amplitude operators (RAOs). Lee (2005) conducted a similar process to investigate a TLP design. Vijay et al. (2016) also used frequency domain analysis to evaluate the motions of a barge with a central moonpool that combines a wave energy converter with a 5-MW turbine. Wayman et al. (2006) modelled various barge and TLP designs in the frequency domain. Sclavounos et al. (2008) conducted a parametric design study for FWT concepts and mooring systems based on coupled linear dynamic analysis in the frequency domain. Potential flow solutions have also been integrated into the system, showing their applicability for initial design purposes (Uzunoglu and Guedes Soares, 2019).

International Energy Agency Wind Tasks 23 and 30, the Offshore Code Comparison Collaboration (OC3) and Offshore Code Comparison Collaboration Continuation (OC4) studies were carried out to evaluate offshore wind turbine modelling tools through code-to-code comparisons. These projects have been successful in demonstrating the effect of different modelling approaches on the simulated responses. These code-to-code comparisons were used only to identify differences, while scale hydrodynamic tank testing was performed in the Dutch Maritime Research Institute's offshore wave basin for data validation and published within the OC5 project as a continuation (Uzunoglu and Guedes Soares, 2019). Several FWT analysis tools were used in OC4, including FAST, ADAMS, Bladed, HAWC2, 3Dfloat, SIMO, SESAM, and DeepC. Various loading conditions were compared in the models. These included a full-system Eigen analysis; a static equilibrium test; free decay tests for each of the platform's six degrees of freedom; "effective RAOs" calculated with regular waves of varying frequencies; Time series response tests with regular waves and irregular waves modelled with rigid rotor under no-wind as well as flexible rotor under steady and turbulent wind (Cordle and Jonkman, 2011). In another study, results from InWave-CACTUS were compared with results from FAST for OC3 Hywind Spar (Robertson et al., 2017). The InWave-CACTUS method showed good agreement with the FAST results for small-amplitude motions (Jonkman et al., 2010). CACTUS (Murray and Barone, 2011) is a lifting-line free vortex wake method implemented at Sandia National Laboratories (SNL) (USA). A modular framework, CACTUS is coupled to InWave (Combourieu et al., 2014; Leroy et al., 2017), a maritime code developed at INNOSEA (Nantes, France) in collaboration with the LHEEA Laboratory of Ecole Centrale de Nantes, integrated with the linear potential flow solver NEMOH.

Coupled dynamic codes developed for modelling FWT platforms include one of two hydrodynamic models: (1) Morison's equation (Morison et al., 1950), or (2) potential flow theory which may also

include the nonlinear viscous drag term from Morison's equation (Robertson et al., 2017). Details of Morison's equation and Potential flow theory are given in section 2.1.

The offshore platforms located on deepwater sites and the most frequently referenced (Penalba et al., 2017) potential flow code WAMIT has long been used in numerous studies for offshore platforms. Parisella and Gourlay (2016) compared and showed that the excitation forces, hydrodynamic coefficients and RAOs are in good agreement for a cargo ship in shallow water between NEMOH and WAMIT results through different conditions and cases. The world's first open-source and widely used potential flow code (Penalba et al., 2017) released in 2014, NEMOH, has also gained some confidence and has been used in a variety of case types in different fields such as; WECs (Lawson et al., 2015; Verbrugghe et al., 2017; Fernandez et al., 2018; Bhinder & Murphy, 2019; Schubert et al., 2020), FWTs (Antonutti et al., 2016; Zhou et al., 2019; Jonkman et al., 2010), Hybrid wind-wave energy platforms (Kohlmann, 2019; Armesto et al., 2016; Gonzalez Jimenez, 2020) and breakwaters (Doss, 2020).

Roessling and Ringwood stated that for a simple vertical cylinder, the codes WAMIT, NEMOH and Achil3D show a very good match for heave. However, compared to WAMIT, NEMOH has the disadvantage of requiring longer computation times (Roessling & Ringwood, 2014). Bhinder and Murphy (2019) compared the three radiation-diffraction panel codes (WAMIT, AQWA and NEMOH) with the experimental results and stated that the results showed a very good agreement for the calculated frequency domain parameters. In this comparison, simulations are made for an irregular (panchromatic) wave using a nonlinear time-domain model. Experimental data and statistical measurements of BEM codes such as correlation coefficient and root mean squared error (RMSE) showed very good results. The authors implied that the nonlinear properties of wave structure interactions can be considered through additional nonlinear viscous drift damping in accordance with Morison's equation (Bhinder & Murphy, 2019). Penalba et al. (2017) compared the results of NEMOH and WAMIT on the added mass, radiation damping and excitation force coefficients added by a WEC and noted that they were consistent with some exceptions. The exceptions include thin element modelling and irregular frequency removal, which expresses uncharacteristic high amplitudes of some frequency components. However, this only affects results in low wave periods, which produces a negligible effect on a FOWT structure (Hughes et al., 2020). Andersson (2018), investigated the reliability of the NEMOH program in his master's thesis on the cases of three container ships. He noted that the results from NEMOH showed positive agreement with WAMIT overall, but with a small shift in amplitudes for pitch. The author stated that the heave and pitch RAO results of NEMOH corresponded well to the WAMIT data while noting that the additional mass and damping coefficients found for heave were overestimated for the same frequency range. Andersson also emphasized the low accuracy of NEMOH in low wave periods. The author questioned whether the reason for the divergent results he found was insufficient input by the authors or a lack of robustness in the NEMOH, and referenced a comparison study (Kim, Y. & Kim, J.-H, 2016), in which ten participants and seventeen-code is compared. As a result, the author reflects that NEMOH cannot be fully compared with the accuracy and robustness of WAMIT (Andersson, 2018).

WAMIT is the most frequently referenced, widely used and validated BEM code for estimating the hydrodynamic behaviour of offshore structures. However, the code is commercial limiting its reach. Two alternative codes can be considered by the research community. Both are open-source; therefore, they can also be developed further. The world's first open-source and widely used BEM code (Penalba et al., 2017), NEMOH, was released in 2014. Several publications have compared its results to WAMIT as mentioned above. Additionally, HAMS is a recently released (Liu et al., 2018; Liu, 2019; Liu, 2021) open-source BEM code that can now be included in benchmark studies to evaluate its output. This

study aims to present the data that serves to present open-source alternatives that serve to obtain the hydrodynamic coefficients.

The paper is structured from here on as follows. The methodology section includes brief explanations for the theories and the codes for the estimation of the structural loads and responses. Then the modelling section introduces the chosen structures and conditions that the comparison is made upon. The mesh study section follows the modelling section and followed by the main study section that discusses the abilities of the open-sourced BEM solvers. The study results in a with a brief conclusion section.

2. Methodology

2.1. Prediction of hydrodynamic loads for offshore structures

2.1.1. Flow regimes

Calculation of wave forces acting on offshore structures can be divided into different basic procedures, depending on the size of the structural element and the wavelength and height of the incoming waves. Morison's equation (Zhao et al., 2019) is used to estimate the forces resulting from wave behaviour, assuming that the diameter of the element is sufficiently small compared to the wavelength (limited by $D/\lambda < 0.2$) so as not to significantly change the wave characteristics. The Morison equation is based on the assumption that the waves are not affected by the presence of the submerged members. Conversely, in nature, incoming waves are reflected from the object (wave diffraction) and the object sends waves due to its movement (wave radiation). If the object is larger than the corresponding wavelength, these two effects become more relevant and act as dispersive forces. Morrison's equation, diffraction and radiation damping effects are omitted, flow separation effect is partly accounted for in the viscous drag term (Chakrabarti, 1987). Besides, for larger structural elements (with $D/\lambda > 0.2$), diffraction theories are required to take into consideration the radiation and diffraction as well (Figure 1). However, these potential flow methods cannot take into account viscous drag forces (van der Tempel et al., 2011). Secondly, the H/D parameter is essential because, in an oscillatory wave flow, the drag forces on the structures (as in the example of a circular tube) affect the flow separation behind the cylinder and thus the formation of large eddies. For a small H/D ratio (< 1.5), the relative displacements of the water particles are so small and the wave height is not unidirectional long enough that the water around the structures remains attached to the surface of the structure and the phenomenon of flow separation and eddy development caused by diffraction is not observed, so the viscous effect can be ignored (Figure 1) (Fitzgerald, 2016). In these conditions, the drag forces are very small and the dominant forces are the inertial forces due to acceleration, so the potential flow diffraction theory should be used to predict wave forces. For $H/D > 8$, approximately, the Morison formulation is required to be used, since the wave flow is unidirectional long enough for a significant eddy flow to develop, and the drag forces are greater. It has been stated that in an intermediate region with $1.5 < H/D < 8$, the flow regime can be quite complex and it is difficult to calculate wave forces (van der Tempel et al., 2011).

2.1.2. The Morison equation

The Morison equation introduced by Morison O'Brien Johnson and Schaaf (Morison et al., 1950) is a semi-empirical equation describing the horizontal hydrodynamic forces acting on a body along the direction of incoming waves. To compute hydrodynamic forces, the equation requires two empirical

coefficients (inertia and drag), the water particle velocities and accelerations and, the geometry of the structure. Three components are combined in the equation: the first term is the “Froude-Krylov force” term which is due to the pressure field generated by the undisturbed waves. The second term is the so-called “added mass” term which is due to the inertia of the surrounding fluid that needs to be accelerated. And the last term is the drag term which is due to the wake region on the “downstream” side of the cylinder (Patel, 1994; Fang & Duan, 2014). For a submerged cylindrical body, the Morison equation can be described with an infinitesimal strip ds as

$$dF = \rho \pi D^2 / 4 \frac{du}{dt} ds + C_A \rho \pi D^2 / 4 \left(\frac{du}{dt} - \frac{du_b}{dt} \right) ds + C_D \rho (u - u_b) |u - u_b| / 2 D ds \quad (1)$$

dF is the total fluid force, ρ is the fluid density, D is the cylinder diameter, u is the fluid velocity, u_b is the velocity of the body, C_A is the added mass coefficient, and C_D is the drag coefficient. By summation of the first and second term, one can obtain the inertia term, and $1 + C_A = C_M$, while C_M is the inertia coefficient. C_A , and C_D is investigated by experimental analysis, and the empirical relations for the coefficients are determined accordingly. The case studies of this paper have large-diameter submerged members, hence the Morison equation is not utilized in this study. Instead, diffraction theory-based potential flow solvers are used and compared with each other.

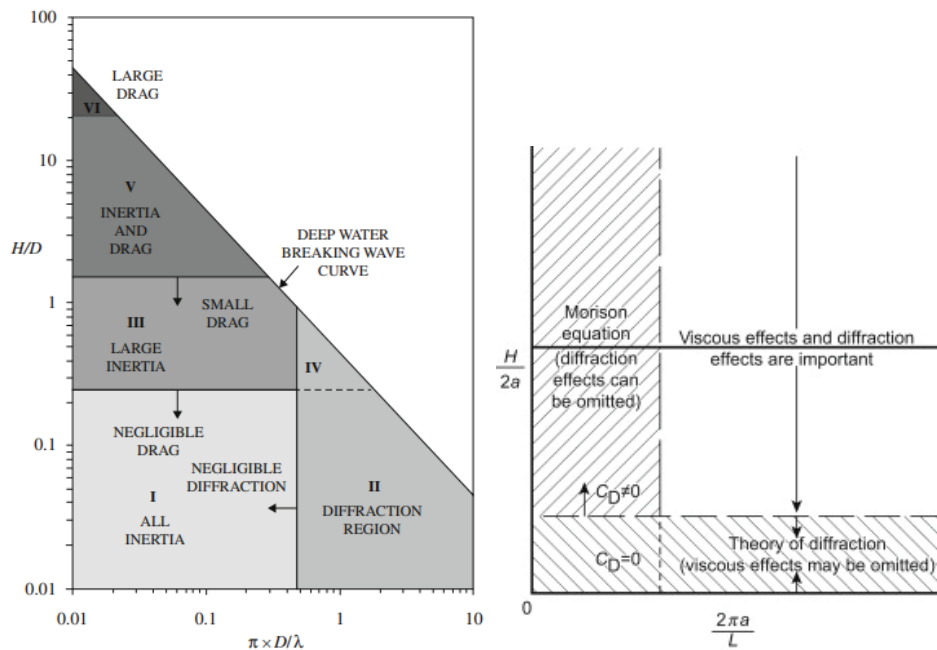


Figure 1. Flow regimes and applicability regions of the theories, $D=2a$ (Fitzgerald, 2016; Wang et al., 2020)

2.1.3. Diffraction Theory-Potential flow approach

In the potential flow theory, it is assumed that the interactions between ocean waves and marine structures occur in a regime where compressibility and viscous effects are negligible, that is, water behaves like an ideal fluid. In offshore engineering, the incompressibility assumption is standard (because of the encountered low speeds); however, viscous effects can play an important role depending on the wavelengths, wave amplitudes, and flow regime compared with the body size. Flow separation is confined around any sharp corner and might be neglected for large structures with relatively small movements, such as offshore platforms, especially in the preliminary design phase.

Thus, the boundary layers are comparatively thin and therefore the drag and viscous forces are substantially smaller than the corresponding potential flow forces (WAMIT User Manual, 2006). The potential theory is based on the potential function ϕ , gradient (∇) of the potential function is velocity field $\nabla\phi = \vec{V}$. Due to the definition of irrotational flow $\nabla \times \vec{V} = 0$, ϕ must satisfy the Laplace equation $\nabla^2\phi = 0$.

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

Boundary value problems arise for the solution of this equation. The bottom and the free surface are required to be solved with dynamic and kinematic boundary conditions. At the bottom, the normal velocity component to the bottom must always be zero. And for the free surface, fluid particles must remain on the surface and free surface pressure must be equal to atmospheric pressure (Babarit & Delhommeau, 2015). Panel methods are popular in hydrodynamics where the floating bodies are discretized into many surface elements (i.e. panels) to solve the boundary conditions on the immersed body. To obtain the velocity potential, ϕ , the problem is transferred to a set of algebraic equations, which are structured by placing a distribution of vortices, sources and/or doublets on the surface elements (panels) with proper boundary conditions. The velocity potential is assumed to be in the form of $\phi = \phi_0(z)\sin(kx - \omega t)$, so the resulting force is also periodic with the frequency ω . Therefore, time-dependent problems with random wave patterns are not suitable to be solved with potential theory approaches (Patel, 1994). Once the velocity potential is solved, the pressures and hence the loads affecting the structure can be calculated by Bernoulli's equation:

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{1}{2}\nabla\phi \cdot \nabla\phi + \frac{p - p_a}{\rho} + gz = 0 \quad (3)$$

2.2. Potential flow solvers

The comparison study made in this paper is based on the potential flow theory and the potential flow solvers. The solvers are developed to analyse the behaviour of offshore structures interacting with surface waves. As explained in the previous section, fluid is assumed to be ideal and the flow is assumed to be periodic. The free surface state is linearized. Diffraction and radiation velocity potentials at the submerged body surface are determined by the solution of an integral equation derived from Green's theorem (Liu, 2019).

Table 1. BEM Solvers and their Characteristics after (Penalba et al., 2017)

BEM solver	Frequency domain	Time-domain	Open source	Usage (%)
WAMIT	+	-	-	80.5
NEMOH	+	-	+	19.5
AQWA	+	-	-	22.0
Aquaplus	+	-	-	9.8
ACHIL3D	-	+	-	4.9
WADAM	+	-	-	7.3
HAMS	+	-	+	NA

HAMS is released in 2021 (Liu, 2021), therefore its usage rate is not included in the table (Penalba et al., 2017). WAMIT was cited in more than 80% of articles referring to a BEM solver, and it was the most frequently referenced BEM code. Therefore, WAMIT can be regarded as the de-facto standard. The reason why WAMIT is taken as the benchmark for NEMOH and HAMS in this study is the common use

of WAMIT by the oil, gas, wave and wind energy community. WAMIT, NEMOH, and HAMS consist of three main procedures designed to work sequentially: pre-processor, processor, and post-processor. WAMIT offers an inclusive user manual that explains each required input file and option of the software, together with all the outputs generated; NEMOH and HAMS only provide a brief explanation of the code with limited instructions for using the software. Parallel processing is available for every BEM code (WAMIT User Manual, 2006; Liu, 2019).

2.2.1. WAMIT

WAMIT is a FORTRAN-based BEM code that offers two fundamentally different methods of geometry discretization: low and high order. The standard discretization method is the low order method in which the geometry of the object is divided into many flat quadrilateral panels. The high-order method provides the advantage of including curvature. WAMIT provides 2 symmetry planes (yOz and xOz), which can reduce the computation time. WAMIT requires a proprietary geometric format (`<file>.gdf` extension) for mesh files, and very few software can export it. Thus, WAMIT users can either use predefined subroutines for simple geometries or certain software such as Rhinoceros or MultiSurf to create their meshes. Since WAMIT produces dimensionless results, parameters such as seawater density or gravity are not required for WAMIT (WAMIT User Manual, 2006). To simulate WAMIT, at least five input files are needed. Mesh geometry file, with `.gdf` extension, defines the wet surface of the body to be analysed. `Config.wam` and `SIM.cfg` specifies many parameters and options including mesh and parallelization. `SIM.pot` calls the mesh file and defines the environmental parameters and the body-fixed coordinate system. `SIM.frc` contains body information such as stiffness and mass matrices and flags for output results (WAMIT User Manual, 2006).

2.2.2. NEMOH

NEMOH is a FORTRAN-based BEM code that requires at least four input files for simulation. One of them is the `ID.dat` file which is a simple file identifying the name of the simulation. Another one is the `input.txt` file containing solver selection. All the parameters needed for NEMOH simulation are in a single input file named `NEMOH.cal`. The last input file required by NEMOH is a mesh file. NEMOH users can use the two MATLAB functions, axially symmetrical (`axiMesh.m`) and non-axial symmetrical (`Mesh.m`), to create their meshes. Additionally, NEMOH includes the `GDFmesh.m` function, which directly reads `.gdf` meshes, a WAMIT extension. It also offers the `NEMOH2WAMIT_01.m` function, which converts NEMOH mesh files to `.gdf` format. NEMOH, geometries are limited to 10000 nodes or 2000 panels, whether they are created with their sub-functions or `.gdf` files. NEMOH offers only the low-order geometry discretization method and the result is quite similar to the low-order mesh created in WAMIT. NEMOH allows only one plane of symmetry (xOz). NEMOH provides a MATLAB wrapper (`NEMOH.m`) to run simulations, making the process user-friendly for users familiar with MATLAB (Penalba et al., 2017).

2.2.3. HAMS

HAMS (Hydrodynamic Analysis of Marine Structures) is written currently in FORTRAN 90 (Liu, 2019). HAMS has no mesh generator inside, instead, the mesh is imported. HAMS offers two symmetry planes, whereas only offers the low-order geometry discretization method. WAMIT's `.gdf` format is required to define the mesh in the first step. Then it is necessary to use the built-in tool `WAMIT_MeshTran.exe` to convert the `.gdf` mesh to HAMS mesh formats such as `WaterplaneMesh.pnl`

and HullMesh.pnl. HAMS requires two additional input files besides these two mesh files. One of them is ControlFile.in, which is the main input control file containing all the necessary parameters. Finally, the Hydrostatic.in file also needs to be filled in for RAO calculations, yet the necessary information can be obtained from the fort.4 file created by WAMIT_MeshTran.exe (Liu, 2021).

2.3. Equations of motion

For hydrodynamic predictions, a floating body can be considered mostly rigid but moving. A floating body of arbitrary form can present hydrodynamic reactions caused by motion in any j direction at all six degrees of freedom (DOF), i . In the case of a simple monochrome incident wave, the equations may look like this:

$$\sum_{j=1}^6 [(A_{ij} + M_{ij})\ddot{\eta}_j + B_{ij}\dot{\eta}_j + C_{ij}\eta_j] = \sum F_i \text{ for } i=1\dots 6 \quad (4)$$

where η is the position of the body, A_{ij} is the hydrodynamic added mass matrix elements, M_{ij} is the generalized mass matrix elements, B_{ij} is the radiation damping or hydrodynamic damping coefficients, C_{ij} is the restoring or hydrostatic stiffness coefficients, and $\sum F_i$ represents the sum of all other forces in the direction of i that may be present. A dot on a symbol indicates a derivation of time. Hydrodynamic properties and radiation damping are the functions of the frequency of motion and Equation (4) needs to be solved for excitation as a harmonic function. The first term, $(A_{ij} + M_{ij})\ddot{\eta}_j$, the inertia of mass is increased by a hydrodynamic "added mass"; because, to accelerate the body, it is also needed to accelerate the water surrounding it. The added mass for submerged objects near the water surface may be negative but is always positive for objects submerged deeply (Bergdahl, 2009). Potential flow approaches are characteristically applied within the frequency domain, and this is essential for determining the RAO. RAO is a frequency-dependent factor and represents the ratio of the floating platform's response (output) based on a regular wave signal (input) (Patel, 1994).

$$RAO(w) = \frac{F_0}{(C - (M + A(w))w^2 + iB(w)w)} \quad (5)$$

3. Modelling

In this study, two of a few well-known structures are chosen to compare potential flow codes. The structures are already verified experimentally and computationally and the structures have different stabilization principles, which is highly important for the code compatibility regarding whether the codes are biased to any stabilization behaviour or excess movement. One is mainly stabilised with ballast-gravity and the other is mainly stabilized with the waterplane area-bouyancy. One of them is a Spar-Buoy concept called "Hywind" developed by Statoil from Norway. The original design was slightly modified by the OC3 to support the National Renewable Energy Laboratory's (NREL) 5 MW base turbine. The current version was named "OC3-Hywind" and was used for the benchmark study of OC3. The other structure is a semi-submersible concept used in the DeepCWind project. DeepCWind is a US-based project that aims to generate test data for use in the verification of FWT modelling tools. NREL's 5 MW base turbine is also used in DeepCWind Semi-Submersible for benchmarking of OC4, a Continuation project of OC3. The same geometry files are drawn in Rhinoceros and used in the compared codes. Mesh effect and independence studies are carried out for NEMOH and HAMS only because there was no commercial license for WAMIT. WAMIT meshes and results are obtained from HydroDyn sample input files for the final versions used in OC3-OC4 projects and distributed freely with FAST (Jonkman, 2005).

3.1. OC3 Hywind Spar-Buoy

The stabilization method of the platform is predominantly ballast type, with high inertial resistance and righting moment thanks to the lower centre of mass. The NREL 5-MW baseline wind turbine tower on top of the OC3-Hywind spar-buoy is erected on a base diameter of 6.5 m, matching the top diameter of the platform. The resulting total tower mass is 249,718 kg and the tower centre of mass (CM) is located at 43.4 m on the tower centreline above the SWL. The critical structural damping rate of 1% was determined for all modes of the isolated tower. The platform consists of two cylindrical zones connected by a linearly tapered conical zone, the diameters of these cylinders are 6.5 meters and 9.4 meters. With this design, the hydrodynamic loads are reduced by using a smaller diameter near the free surface. The 6.5 m diameter cylinder zone extends up to 4 meters under SWL, while the conical zone is 8 meters long vertically. The weight of the floating platform is 7,466,330 kg including ballast. The CM of this mass is located at 89.9155 meters below the SWL along the platform centreline. The floating platform's roll and pitch inertias around CM are both 4.229.230.000 kg.m² and the yaw inertia around the centreline is 164.230.000 kg.m². For stabilization, the platform is connected by three catenary lines spread symmetrically around the centreline (Jonkman, 2010).

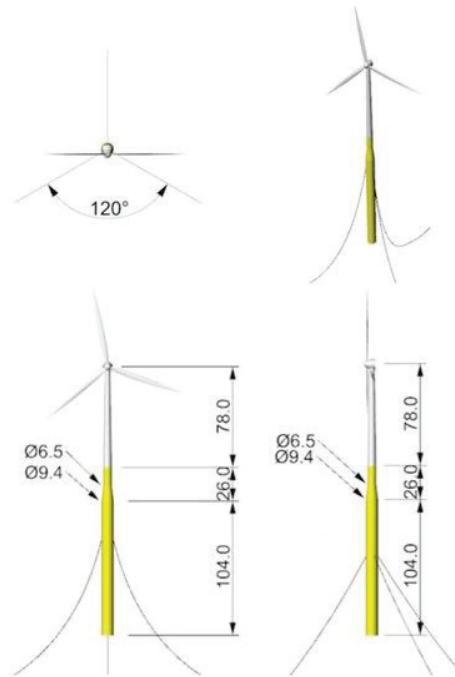


Figure 2. The schematic diagrams of the OC3-Hywind spar with the catenary mooring lines in different views after (Lin et al., 2019).

3.2. OC4 DeepCWind Semisubmersible

The stabilization method of the platform is predominantly buoyancy and ballast, rotational displacements caused by environmental conditions induce large lifting-restoring forces thanks to displaced water volumes. The tower used in the OC4 DeepCWind semi-submersible is almost the same as the OC3-Hywind spar-buoy tower. The only difference is the tower mode shapes caused by changes in the support platform and mooring. The DeepCWind semi-submersible platform consists of a main column on which the tower is mounted, and three offset columns connected to the main column by a series of smaller diameter pontoons and cross members. All three offset columns have larger diameter base columns at the base that helps suppress movement (especially in the direction of heave). The mass of the floating platform including ballast is 1.3473E + 7 kg. The CM of this mass is located at 13.46

m below the SWL along the platform centreline. The floating platform's roll and pitch inertias around the CM are both $6.827E + 9 \text{ kg.m}^2$ and the yaw inertia around the centreline is $1.226E + 10 \text{ kg.m}^2$. To stabilize the platform, moorings are spread out as on the OC3 Hywind Spar-Buoy (Robertson et al., 2014).

3.3. Environmental conditions and solver settings

Gravitational acceleration and seawater density were taken as 9.80665 m/s^2 and 1025 kg/m^3 , respectively. The water depths for OC3-Hywind Spar-Buoy and Semi-Submersible are 320 m and 200 m under SWL respectively. Effects of moorings were not taken into account and only the 0-degree incident waves are represented for NEMOH and HAMS. All calculations were done for six degrees of freedom. Wave periods were simulated from 2 seconds to 25 seconds. This range is preferred because the high response of floating structures to wave effects is observed within this range (Uzunoglu & Guedes Soares, 2020).

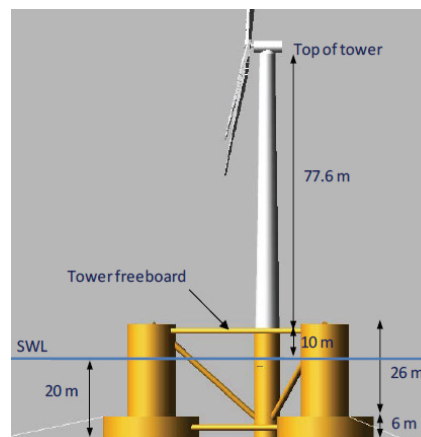


Figure 3. The schematic diagram of the DeepCWind Semi-Submersible (Robertson et al., 2014).

4. Effects of mesh on potential flow solution

For the potential flow solution, DNV suggests a mesh size using $1/6$ of the smaller wave frequency of interest, which corresponds to an average panel side length of 4.6 m. It is also stated in the same document that the mesh size must be small enough to accurately represent the geometry. When the platform volume is compared to a mesh size reference of m3, m4 meshes result in an acceptable volume difference of less than 0.5 percent for both of the structures. This value is compatible with similar studies on panel methods in which geometry should be discretized (Uzunoglu and Guedes Soares, 2020; Jafaryeganeh et al., 2014; Ko et al., 2011). For OC3 Spar Buoy, however, the panel number limitation of NEMOH by 2000 is already reached with m4. Accordingly, an average side length of 1 m mesh is used for the OC3 Hywind Spar Buoy platform and an average side length of 1.5 m mesh is used for the OC4 DeepCWind Semisubmersible platform for potential flow code comparisons with m4 named meshes. However, the effect of mesh intensity is studied below.

Using a larger mesh reduces the number of elements and provides a faster solution, but also affects the accuracy of the results. On the other hand, using finer mesh significantly increases processing time and becomes less important after convergence. Therefore, a trade-off between the acceptable accuracy and the reasonable processing time is required. Although faster solutions are obtained in

potential flow codes compared to CFD studies, it is still important to perform mesh independence studies to maintain the trade-off. In this context, by conducting a study on mesh convergence, the sensitivity of the results to mesh shape and size is examined. The mesh sensitivity is only studied for the open-source codes. Wamit output is received from published sources.

Four meshes and their volumetric and time cost properties are studied for OC3 Hywind Spar-Buoy. The same study is conducted for OC4 DeepCWind Semisubmersible with a difference, the bracings are not included for mesh studies. The effect of bracings on this platform is studied by Uzunoglu and Guedes Soares (Uzunoglu & Guedes Soares, 2015) under different loading conditions, the authors showed that the bracings can be omitted at the preliminary design phases due to the negligible influence on the overall hydrodynamic behaviour. Thus, the bracings are neither included in the mesh study nor included in the calculation of normalized volume $100 \cdot (V_{\text{mesh}} - V_{\text{simple design}}) / V_{\text{simple design}}$. So the increase in panel number due to the inclusion of these bracings increases simulation time cost for both codes but does not affect volumetric representation for the last data of OC4 DeepCWind Semisubmersible that has maximum panel number.

Normalized volume is used for non-dimensional geometrical representations of two platform systems relative to panel numbers. For the lowest panel numbers, only about 90% of the geometry is represented, because the discretized representation of cylindrical shape members in the Cartesian coordinate system needs more faces for polygonal prisms. With the increase in prism faces, the geometrical representation gets better rapidly at a certain point, after that, the increase in panel number becomes less and less effective. As shown in Figure 4, the lines indicating normalized volume values become almost flattened, and the final meshes provide about 99% normalized volume values.

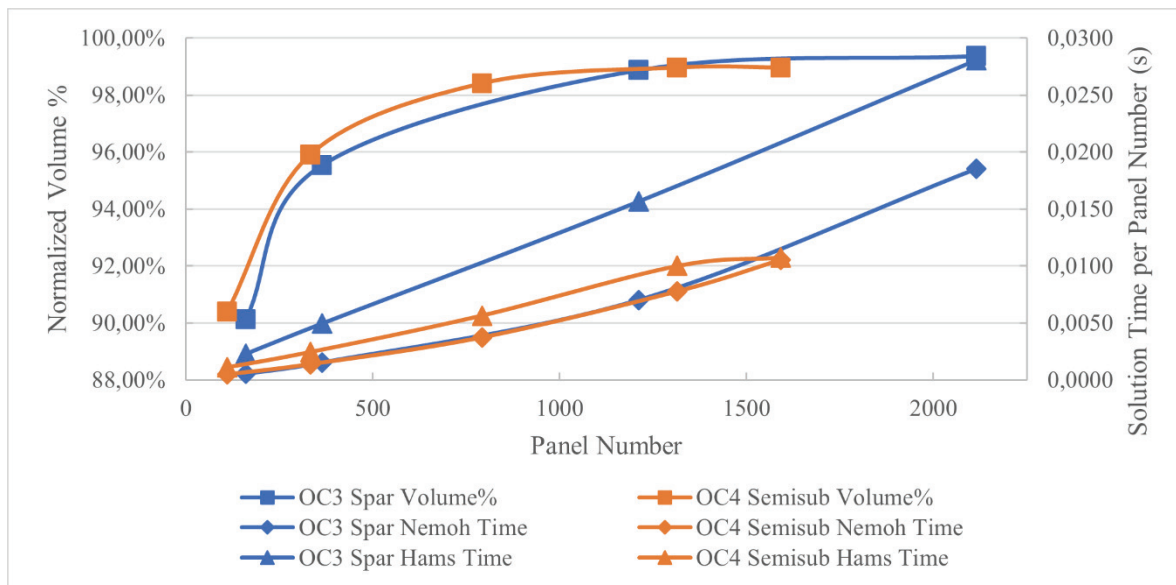


Figure 4. Variation of simulation time cost per panel number and geometrical representation with panel number

On the other hand, solution time per panel number and wave period is used to show the variation of code performances relative to panel numbers. To make a comparison, the processor used in simulations is a 12-core i7-8700K CPU @ 3.70 GHz. To conduct a parallel process, HAMS uses all the cores of the processor without any settings requirements; however, one may increase the OpenMP thread number to a certain limit (WAMIT User Manual, 2006) to enhance the performance. On the other hand, NEMOH needs modification as using “parfor” loops instead of “for” loops (Andersson,

2018) for parallelization in executable files, and thus in source codes, not implemented in this study. For the same amount of wave periods, simulation time cost per panel number always increases with an increasing number of panels almost linearly except the bracing included mesh for semisubmersible platform. For the same platforms, HAMS needs more simulation time to simulate the same geometry and wave periods even with using parallel processing compared to NEMOH.

Instead of representing the distribution of Added Mass (A), Radiation Damping (B) and Excitation Forces (Fe) in each period in a separate graph, the mesh convergence of both floating platforms is decided to be represented with normalized root mean square error (NRMSE) values with increasing panel numbers. While any floating object has six degrees of freedom, only the NRMSE values for surge, heave and pitch axis are represented here. This is due to the symmetrical shapes of the floating bodies, i.e. the effect of 0-degree incident waves is negligible for roll, sway and yaw.

The same meshes are used in both potential flow solvers and the exact panel number of meshes can be read from Table 2, However, the convergence of the results is not close to each other for both floating platforms. As mentioned previously, there is a trade-off between accuracy and time cost in terms of mesh size, this is also observed in this study with a few exceptions which are within an acceptable limit of numerical errors.

Table 2. The data of compared meshes

Meshes	Normalized Volume (%)	Panel Number	Simulation Time(s) / Panel # / period #	
			NEMOH	HAMS
m1_OC3_Spar	90.12	160	0.0005	0.0023
m2_OC3_Spar	95.53	364	0.0015	0.0049
m3_OC3_Spar	98.87	1212	0.0070	0.0157
m4_OC3_Spar	99.36	2115	0.0185	0.0280
m1_OC4_Semisub	90.38	111	0.0005	0.0011
m2_OC4_Semisub	95.91	333	0.0014	0.0024
m3_OC4_Semisub	98.41	792	0.0037	0.0056
m4_OC4_Semisub	98.96	1314	0.0078	0.0100
m4_OC4_Semisub+bracings	98.96	1569	0.0107	0.0109

Comparing the results of both potential flow solvers for the OC3 Spar Buoy platform, the most similar results are obtained for Excitation Force values in each surge, heave and pitch axis. Yet, these results are already within an acceptable limit provided by the coarsest mesh m1_OC3_Spar under 5% except heave axis Fe value in NEMOH. This implies that the Excitation Force accuracy is not highly dependent on the mesh size for such a simple geometry in the studied frequency range. Both codes produced the worst convergence results in radiation damping values in the heave axis, this can be explained by the waterplane area dependence of this value. Other than radiation damping in the heave axis, all of the data for m3_OC3_Spar have an NRMSE difference under 1% for NEMOH and under 5% for HAMS. This proves that the results are gaining independence from mesh size after a mesh intensity and become almost constant, ignoring numerical errors. All of the results except A and Fe in the heave axis and Fe in the pitch axis are converged in NEMOH faster than in HAMS. Yet, this is just proof of precision, not proof of high accuracy. The accuracy comparisons of the codes are discussed in the next section.

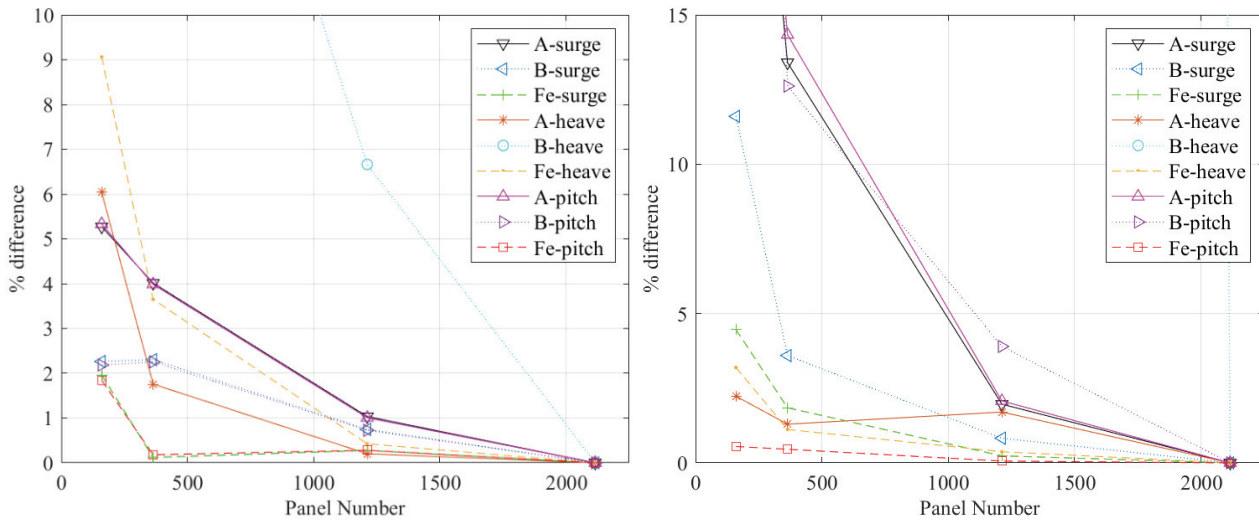


Figure 5. Variation of NRMSE values with panel number for Spar Buoy platform in NEMOH and HAMS

It is noticeable at first glance how close the m3_OC4_Semisub (792 panels) and m4_OC4_Semisub (1314 panel) results are to each other. Contrary to the graph, the independence is not disturbed by the last mesh because the difference between m4_OC4_Semisub and the last mesh is due to the presence of bracings as mentioned previously. Similar to the OC3 Spar Buoy platform, the overall worst convergence results are obtained in the heave axis in radiation damping. Moreover, the subsequent poor convergence results also belong to radiation damping, however, this does not mean the final mesh is inadequate. The compatibility of the radiation damping results for each axis is shown in Figure 6, the pitch axis (B55) in NEMOH is an exception. Comparing the OC3 Spar Buoy platform results with OC4 DeepCWind Semisubmersible, the former has a faster convergence for both potential flow solvers, but the latter has higher precision for NEMOH. The differences are simply due to the complex geometry of the semisubmersible platform.

5. Comparison of BEM solvers

In this study, 0-degree incident wave results of the open-source potential flow solvers NEMOH and HAMS are compared with WAMIT, the most widely accepted and used commercial code. The wider properties of the three BEM solvers are stated in section 2.2. The flexibility and user-friendliness properties of the solvers can be summarized as follows. While WAMIT is the most widely used and accepted code which has an extensive user guide, NEMOH is a widely used open-source code with a user forum with a limited number of users, HAMS is a currently released open-source code needing verification and the code is sparsely documented (Penalba et al., 2017). Although the open-source codes only offer low-order geometry discretization, WAMIT also offers more capable high-order geometry discretization. With a panel limitation of 2000, NEMOH also includes a limited mesh generator, while the remaining codes do not. WAMIT and HAMS are capable of irregular frequency removal and two symmetry plane option, whereas NEMOH cannot. WAMIT generates non-dimensional results, whereas the equivalent information input is simpler in the open-source codes. Although WAMIT enables to use of multiple cores with a parameter in the config.wam and the HAMS enables to determine the number of threads for OpenMP, NEMOH needs source code modification for parallel processing.

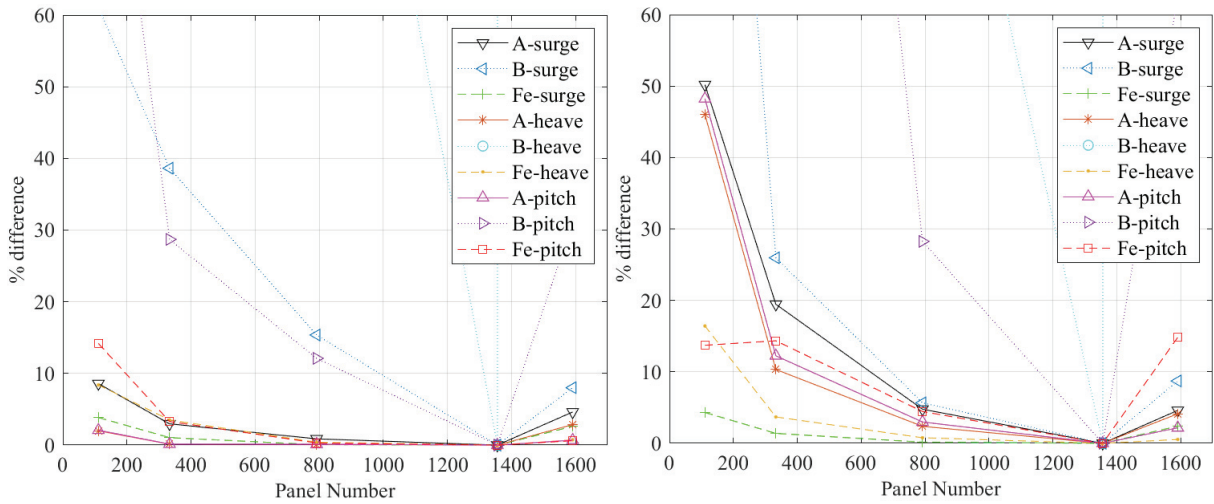


Figure 6. Variation of NRMSE values with panel number for Semisubmersible platform in NEMOH and HAMS

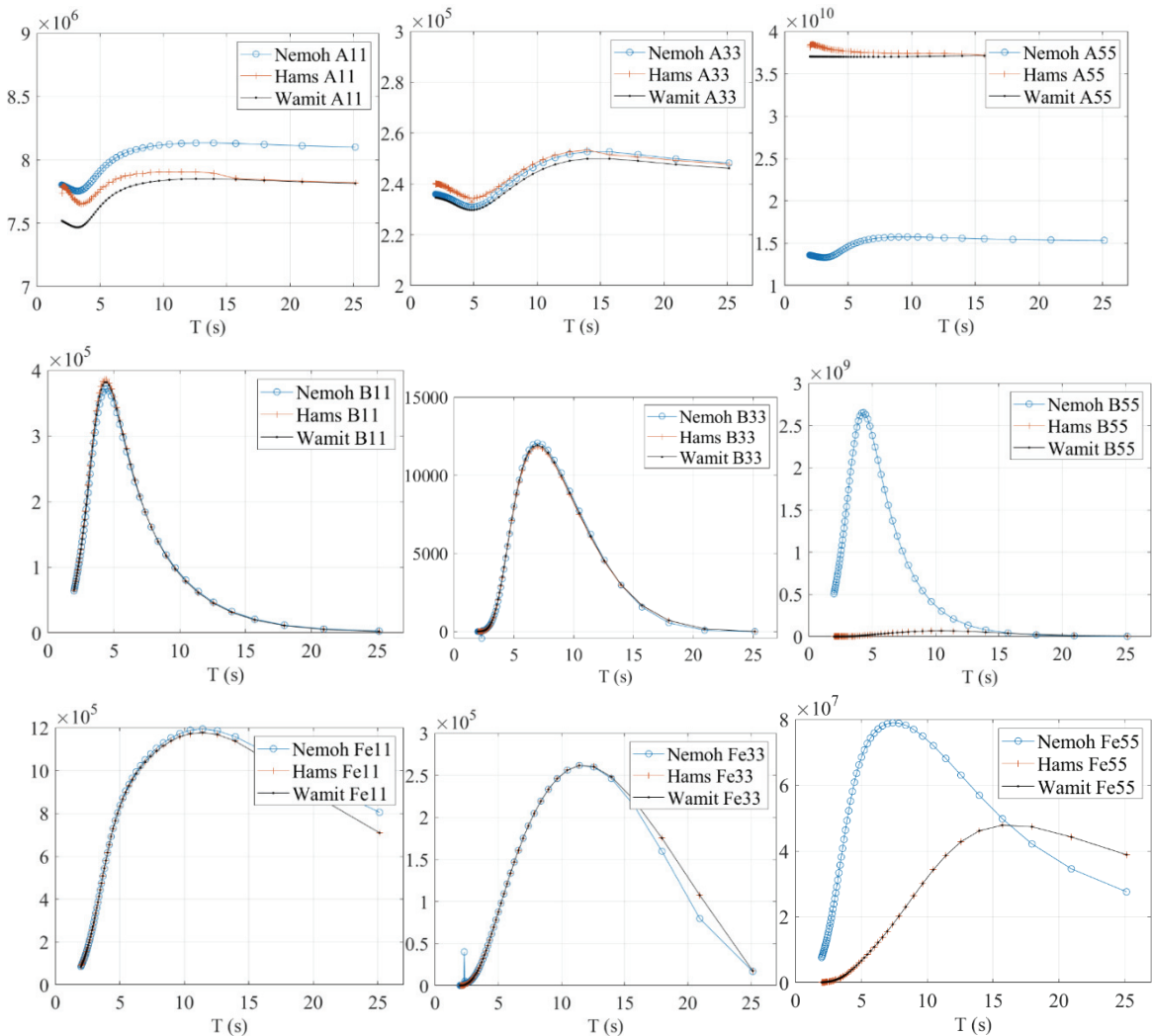


Figure 7. All of the results of OC3 Hywind Spar platform for comparison, units are Ns^2/m for Added Mass, Ns/m for Radiation Damping, and N/m for Excitation Force

A comparison of the codes for the OC3 Hywind Spar-Buoy platform is shown in Figure 7. The results of HAMS are close and tend to be parallel to the WAMIT results with some spikes and steps. Both the

spikes and steps always tend to approach the WAMIT results. On the other hand, the results of NEMOH are almost parallel to WAMIT results with permissible offset, except in pitch. The mesh study revealed that the irrelevant pitch results of NEMOH do not depend on mesh, which is converged and precise. For HAMS, the minimum and maximum NRMS values of added masses are 2.02% in heave and 2.60% in pitch, radiation damping is 1.07% in surge and 47.90% in heave, Excitation force is 1.58% in surge and 20.37% in heave consecutively. Axis-based mean (of A, B, Fe) NRMS values are as follows 1.72% in the surge, 23.43% in heave, and 4.85% in pitch. The statistics reveal that the results of HAMS are adequately close to WAMIT just except for the radiation damping and excitation force in the heave axis. Regarding pitch axis results, beyond the relevant distant results of NEMOH, HAMS itself gave reasonably close results. Ignoring pitch axis results for radiation damping and excitation force, the RMS values of added masses are 3.73% in the surge, 0.70% in heave, and 61.70% in the pitch axis, radiation damping is 5.02% in surge and 355.22% in heave axis, excitation force are 2.67% in surge and 363.65% in heave axis for NEMOH. Both open-source potential flow solvers gave the best results in the surge axis and added mass values overall.

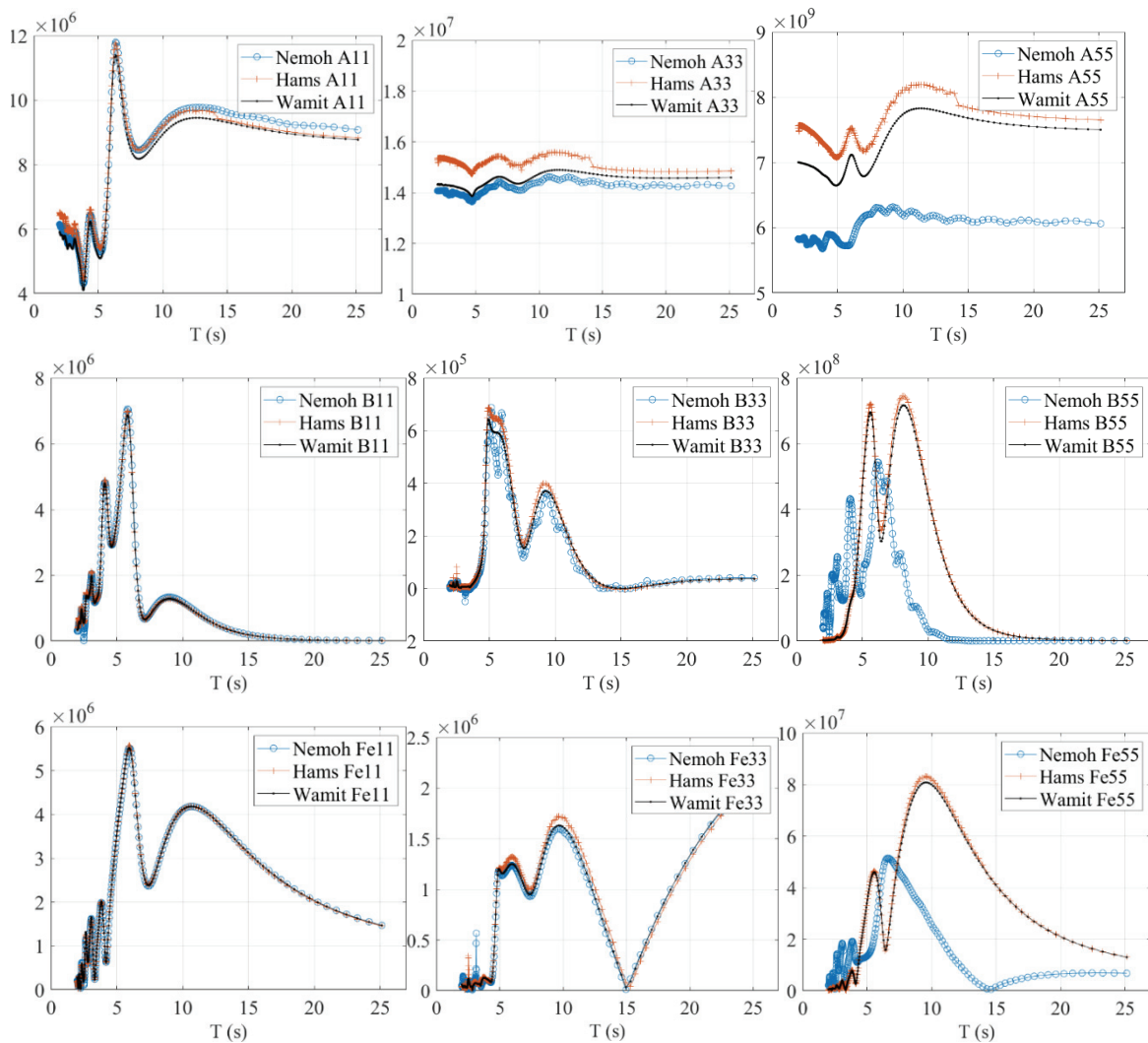


Figure 8. All of the results of OC4 DeepCWind Semisubmersible platform for comparison, units are Ns^2/m for Added Mass, Ns/m for Radiation Damping, and N/m for Excitation Force

Similar to the OC3 Hywind Spar platform, fairly close and mostly parallel results are obtained from HAMS with some spikes and steps, from the OC4 DeepCWind semisubmersible platform as shown in

Figure 8. Not the spikes but the steps mostly approach the WAMIT results but the overall performance of the code is worse than the performance in the case of spar buoy platform due to increased complexity of the hull form. Especially the result of radiation damping in the heave axis is not permissible, which is consistent with the outputs of Andersson (Andersson, 2018). The results of NEMOH tend to follow the same trend as WAMIT despite several fluctuations. The problem of miscalculation of pitch axis values is also observed in this more complex case. While each NRMS value of the HAMS is worse than the spar platform results, the results of NEMOH are better in the heave and pitch axis. Still the results of NEMOH in the pitch axis are far from WAMIT results. For HAMS, the minimum and maximum NRMS values of added masses are 6.31% in heave and 7.65% in the surge, radiation damping is 5.17% in surge and 751.41% in heave, Excitation force are 16.63% in surge and 88.03% in heave consecutively. Axis-based mean (of A, B, Fe) NRMS values are as follows 9.82% in the surge, 281.91% in heave, and 14.59% in pitch for HAMS. Ignoring pitch axis results for radiation damping and excitation force, the NRMS values of added masses are 3.86% in the surge, 1.90% in heave, and 16.35% in the pitch axis, radiation damping is 12.79% in surge and 172.18% in heave axis, excitation force are 29.79% in surge and 85.36% in heave axis for NEMOH. Best results are obtained from both open-source potential flow solvers from surge axis and added mass values, and the most problematic results are obtained from radiation damping overall as in the case of Penalba et al. (2017).

6. Conclusions

In this study, a comparison study was conducted regarding the reliability of open-source panel method codes, based on the solution of two floating wind turbine platforms with a commercial code called WAMIT. NEMOH is the world's first open-source BEM code released in 2014 and is widely used. HAMS is a recently released (Liu, 2019; Liu, 2021) open-source BEM code and both codes need to be verified by comparison. HAMS and NEMOH were compared with WAMIT results and compared with each other on computational performance, flexibility, and user-friendliness. The WAMIT data for the OC3 Hywind Spar and OC4 DeepCWind semi-submersible solutions were taken from previous publications as the basis for this study. These reference values were compared with NEMOH and HAMS for added mass values, potential damping and wave excitation forces. The main purpose of the study is to help researchers select a reliable open-source code as an alternative to approved commercial codes for predicting the hydrodynamic behaviour of offshore structures.

The mesh independence study is represented to show the precision of the codes on their own. To conduct the mesh independence study, four different sized meshes are compared. Rapid convergence is observed for both of the potential flow solvers. The finest meshes of both floating designs have a normalized volumetric representation ratio of about 99%. As expected, the solution time per panel increased as the number of panels increased. Normalized root mean square (RMS) values were utilized for evaluation. Parallel processing was utilized by default in HAMS, but not in NEMOH due to the need for modification in source codes. Even using parallel processing, HAMS was slower than NEMOH. Comparing the mesh convergence, NEMOH showed a faster reaction.

Both of the open-source potential flow codes were quite successful in the simple single-piece spar buoy concept rather than a multibody semisubmersible through NRMS values. The most favourable results were obtained from the surge axis for added mass and the most unfavourable results were obtained from radiation damping in the heave axis. NEMOH gave inappropriate results in the pitch axis for both of the platforms. Neglecting the pitch axis results of NEMOH, both of the codes yielded parallel and reasonably close results to WAMIT.

Further studies are needed to be conducted for different incident wave angles to assess the solution successes of the open-source BEM codes for angle dependencies. The improper solutions of NEMOH in the pitch axis should be improved.

7. References

Andersen, M., Hindhede, D. & Lauridsen, J. Influence of Model Simplifications Excitation Force. Surge for a Floating Foundation for Offshore Wind Turbines. *Energies*, 8, 2015.

Andersson, E. Application of the open-source code Nemoh for modelling of added mass and damping in ship motion simulations. MS Thesis KTH Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 2018.

Antonutti, R., Peyrard, C., Johanning, L., Incecik, A. & Ingram, D. The effects of wind-induced inclination on the dynamics of semi-submersible floating wind turbines in the time domain. *Renewable Energy*, 88, 2016.

Armesto, J. A. et al. Numerical and Experimental Study of a Multi-Use Platform. Volume 6: Ocean Space Utilization; Ocean Renewable Energy, American Society of Mechanical Engineers, 2016. Doi: 10.1115/OMAE2016-54427.

Babarit, A. & Delhommeau, G. Theoretical and numerical aspects of the open source BEM solver NEMOH. 11th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC2015), Nantes, France, 2015.

Bergdahl, L. Wave-Induced Loads and Ship Motions. MS Thesis Chalmers University of Technology G6teborg, Sweden, 2009.

Bhinder, M. A. & Murphy, J. Evaluation of the Viscous Drag for a Domed Cylindrical Moored Wave Energy Converter. *Marine Science and Engineering*, 7, 2019.

Bhinder, M. A., Babarit, A., Gentaz, L. & Ferrant, P. Potential time-domain model with viscous correction and CFD analysis of a generic surging floating wave energy converter. *International Journal of Marine Energy*, 10, 2015.

Butterfield, S., Musial, W. & Jonkman, J. Overview of Offshore Wind Technology. Chinese Renewable Energy Industry Association Wind Power Shanghai Conference, 2007.

Butterfield, S., Musial, W., Jonkman, J. & Sclavounos, P. Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines. Copenhagen Offshore Wind Conference, 2007.

Campos, A., Molins, C., Gironella, X. & Trubat, P. Spar concrete monolithic design for offshore wind turbines. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering*, 169, 2016.

Chakrabarti, S. K. Hydrodynamics of offshore structures: Mathematical theory and its applications in structures. Springer-Verlag New York Inc., New York, NY, 1987.

Combourieu, A., Philippe, M., Rongère, F. & Babarit, A. InWave: A New Flexible Design Tool Dedicated to Wave Energy Converters. Volume 9B: Ocean Renewable Energy, American Society of Mechanical Engineers, 2014. Doi: 10.1115/OMAE2014-24564.

Cordle, A. & Jonkman, J. State of the Art in Floating Wind Turbine Design Tools. 21st International Offshore and Polar Engineering Conference, 2011.

Doss, A. Impact of box type floating breakwater on motion response of hydrodynamically coupled floating platforms downstream. MS Thesis Delft University of Technology Delft, Netherlands, 2020.

E. Uzunoglu and C. Guedes Soares, "Hydrodynamic design of a free-float capable tension leg platform for a 10 MW wind turbine," *Ocean Engineering*, vol. 197, Feb. 2020. Doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106888.

Fang, H. & Duan, M. *The Environment and Environmental Load of Offshore Oil Engineering. Offshore Operation Facilities*, Elsevier, 2014. Doi:10.1016/B978-0-12-396977-4.00001-9.

Fernandez, G. V., Balitsky, P., Stratigaki, V. & Troch, P. Coupling Methodology for Studying the Far Field Effects of Wave Energy Converter Arrays over a Varying Bathymetry. *Energies*, 11(11), 2899, 2018. Doi: 10.3390/en1112899.

Fitzgerald, C. J. *Nonlinear Potential Flow Models. Numerical Modelling of Wave Energy Converters*, Elsevier, 2016. Doi:10.1016/B978-0-12-803210-7.00005-0.

Gonzalez Jimenez, M. A hydrodynamic analysis of three floating offshore wind-wave energy converters differing in the floating stability principle. MS Thesis Delft University of Technology Delft, Netherlands, 2020.

Henderson, A. R. et al. Feasibility Study of Floating Windfarms in Shallow Offshore Sites. *Wind Engineering*, 27, 2003.

Heronemus, W., E. Pollution-Free Energy from Offshore Winds. 8th Annual Conference and Exposition Marine Technology Society, 1972.

Hughes, J., Williams, A. & Masters, I. A blind test on floats in extreme waves using a transient potential flow model. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering and Computational Mechanics* 173, 2020.

IRENA. *Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series*, 2012. Accessed on 05.20.2021 [Online]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2012/RE_Technologies_Cost_Analysis-WIND_POWER.pdf.

Jafaryeganeh, H., Rodrigues, J. M. & Guedes Soares, C. Influence of mesh refinement on the motions predicted by a panel code. *Maritime Technology and Engineering* (ed. Guedes Soares, C.) Taylor & Francis Group, 2014.

Jonkman, J. & Buhl, M. *FAST User's Guide*. NREL/TP-500-38230, 2005.

Jonkman, J. & Musial, W. Offshore Code Comparison Collaboration (OC3) for IEA Wind Task 23 Offshore Wind Technology and Deployment. NREL/TP-5000-48191, 2010. Doi: 10.2172/1004009.

Jonkman, J. Definition of the Floating System for Phase IV of OC3. NREL/TP-500-47535, 2010. Doi: 10.2172/979456.

Kim, Y. & Kim, J.-H. Benchmark study on motions and loads of a 6750-TEU containership. *Ocean Engineering*, 119, 2016.

Ko, K. H., Park, T., Kim, K. H., Kim, Y. & Yoon, D. H. Development of panel generation system for seakeeping analysis. *CAD Computer-Aided Design*, 43, 848–862, 2011.

Kohlmann, L. A frequency-dependent drag coefficient on the motion response of a hybrid STC wind-wave energy converter. 2019.

Lawson, M., Yu, Y., Ruehl, K. & Michelen, C. IMPROVING AND VALIDATING THE WEC--SIM WAVE ENERGY CONVERTER MODELING CODE. 3rd Marine Energy Technology Symposium, 2015.

Lee, K. Responses of floating wind turbines to wind and wave excitation. MS Thesis Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Ocean Engineering, 2005.

Leroy, V., Gilloteaux, J.-C., Philippe, M., Babarit, A. & Ferrant, P. Development of a Simulation Tool Coupling Hydrodynamics and Unsteady Aerodynamics to Study Floating Wind Turbines. Volume 10: Ocean Renewable Energy, American Society of Mechanical Engineers, 2017. Doi: 10.1115/OMAE2017-61203.

Lin, Y. H., Kao, S. H. & Yang, C. H. Investigation of Hydrodynamic Forces for Floating Offshore Wind Turbines on Spar Buoys and Tension Leg Platforms with the Mooring Systems in Waves. Applied Sciences, 9, 608, 2019. Doi: 10.3390/app9030608

Liu, Y. A brief manual for running HAMS. Accessed on 05.28.2021 [online] Available: <https://github.com/YingyiLiu/HAMS/tree/master/Manual>.

Liu, Y. et al. A reliable open-source package for performance evaluation of floating renewable energy systems in coastal and offshore regions. Energy Conversion and Management, 174, 516–536, 2018.

Liu, Y. HAMS: A Frequency-Domain Pre-processor for Wave-Structure Interactions—Theory, Development, and Application. Marine Science and Engineering, 7, 2019.

Matha, D., Schlipf, M., Cordle, A., Pereira, R. & Jonkman, J. Challenges in Simulation of Aerodynamics, Hydrodynamics, and Mooring-Line Dynamics of Floating Offshore Wind Turbines. 21st Offshore and Polar Engineering Conference Maui, Hawaii, 2011.

Morison, J. R., Johnson, J. W. & Schaaf, S. A. The Force Exerted by Surface Waves on Piles. Petroleum Technology, 2, 1950.

Murray, J. & Barone, M. The Development of CACTUS, a Wind and Marine Turbine Performance Simulation Code. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011. Doi:10.2514/6.2011-147.

Musial, W., Butterfield, S. & Boone, A. Feasibility of Floating Platform Systems for Wind Turbines. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004. Doi:10.2514/6.2004-1007.

Olondriz, J., Elorza, I., Trojaola, I., Pujana, A. & Landaluze, J. On the effects of basic platform design characteristics on floating offshore wind turbine control and their mitigation. Journal of Physics: Conference Series, 753, 2016.

Parisella, G. & Gourlay, T. Comparison of open-source code Nemoh with Wamit for cargo ship motions in shallow water. 2016-23, CMST, Curtin University, 2016.

Patel, M. H. Offshore engineering. Mechanical Engineer's Reference Book, Elsevier, 1994. Doi:10.1016/B978-0-7506-1195-4.50018-X.

Penalba, M., Kelly, T. & Ringwood, J. Using NEMOH for Modelling Wave Energy Converters: A Comparative Study with WAMIT. 12th European Wave and Tidal Energy Conference Cork, Ireland, 2017.

Robertson, A. et al. Offshore Code Comparison Collaboration Continuation within IEA Wind Task 30: Phase II Results Regarding a Floating Semisubmersible Wind System. Volume 9B: Ocean Renewable Energy, American Society of Mechanical Engineers, 2014. Doi: 10.1115/OMAE2014-24040.

Robertson, A. N. et al. OC5 Project Phase II: Validation of Global Loads of the DeepCwind Floating Semisubmersible Wind Turbine. Energy Procedia, 137, 2017.

Roessling, A. & Ringwood, J. Finite order approximations to radiation forces for wave energy applications. 1st International Conference on Renewable Energies Offshore, 6771, 2014.

Schubert, B. W., Robertson, W. S. P., Cazzolato, B. S. & Ghayesh, M. H. Linear and nonlinear hydrodynamic models for dynamics of a submerged point absorber wave energy converter. Ocean Engineering, 197, 106828. 2020.

Sclavounos, P., Tracy, C. & Lee, S. Floating Offshore Wind Turbines: Responses in a Seastate Pareto Optimal Designs and Economic Assessment. Volume 6: Nick Newman Symposium on Marine Hydrodynamics; Yoshida and Maeda Special Symposium on Ocean Space Utilization; Special Symposium on Offshore Renewable Energy, ASME/EDC, 2008. Doi: 10.1115/OMAE2008-57056.

Shin, H., Kim, B., Dam, P. T. & Jung, K. Motion of OC4 5MW Semi-Submersible Offshore Wind Turbine in Irregular Waves. Volume 8: Ocean Renewable Energy, American Society of Mechanical Engineers, 2013. Doi: 10.1115/OMAE2013-10463.

Uzunoglu, E. & Guedes Soares, C. Hydrodynamic design of a free-float capable tension leg platform for a 10 MW wind turbine. Ocean Engineering, 197, 2020.

Uzunoglu, E. & Soares, C. Influence of bracings on the hydrodynamic modelling of a semi-submersible offshore wind turbine platform. Renewable Energies Offshore, CRC Press, 2015. Doi: 10.1201/b18973-106.

Uzunoglu, E., & Guedes Soares C. A system for the hydrodynamic design of tension leg platforms of floating wind turbines. Ocean Engineering, vol. 171, pp. 78–92, 2019. Doi: 10.1016/J.OCEANENG.2018.10.052.

van der Tempel, J., Diepeveen, N. F. B., de Vries, W. E. & Cerda Salzmann, D. Offshore environmental loads and wind turbine design: impact of wind, wave, currents and ice. Wind Energy Systems, Elsevier, 2011. Doi:10.1533/9780857090638.4.463.

Verbrugge, T. et al. A Comparison Study of a Generic Coupling Methodology for Modelling Wake Effects of Wave Energy Converter Arrays. Energies, 10(11), 1697, 2017. Doi: 10.3390/en10111697.

Vijay, K. G., Karmakar, D., Uzunoglu, E. & Guedes Soares, C. Performance of barge-type floaters for floating wind turbine. Progress in Renewable Energies Offshore (ed. Guedes Soares, C.) CRC Press, 2016. Doi: 10.1201/9781315229256.

WAMIT Inc. WAMIT User Manual, V7.4, 2006.

Wang, W., Kamath, A., Martin, T., Pákozdi, C. & Bihs, H. A Comparison of Different Wave Modelling Techniques in an Open-Source Hydrodynamic Framework. Marine Science and Engineering, 8, 2020.

Wayman, E. N., Sclavounos, P. D., Butterfield, S., Jonkman, J. & Musial, W. Coupled Dynamic Modelling of Floating Wind Turbine Systems. Offshore Technology Conference, Offshore Technology Conference, 2006. Doi: 10.4043/18287-MS.

Zhao, D., Han, N., Goh, E., Cater, J. & Reinecke, A. Offshore wind turbine aerodynamics modelling and measurements. Wind Turbines and Aerodynamics Energy Harvesters, Elsevier, 2019. Doi:10.1016/B978-0-12-817135-6.00005-3.

Zhou et al. Numerical Modelling of Dynamic Responses of a Floating Offshore Wind Turbine Subject to Focused Waves. Energies, 12, 2019.

Dönebilir İtcinin Sert Hava Koşullarında Bir Balıkçı Gemisinin Manevra Kabiliyetine Etkisi

Ömer Kemal Kınacı ¹, Kadir Sariöz ², Ömer Gören ³, Aydın Sülüs ⁴

^{1,2,3} Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

⁴ Skipsteknisk Mühendislik AŞ, Maltepe, İstanbul, Türkiye

¹ (sorumlu yazar), kemalkinaci@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2956-9562

² sarioz@itu.edu.tr, 0000-0001-9594-4677

³ ogoren@itu.edu.tr, 0000-0002-0413-7376

⁴ aydin.sulus@skipsteknisk.no, 0000-0000-0000-0000

ÖZET

Bu çalışmada; bir balıkçı gemisinin baş tarafında yer alan dönebilir itcinin, gemi manevra performansına etkileri hesaplamalı olarak incelenmiştir. Tek şaftlı, pervaneli ve dümenli geminin ilk tasarımının, 40 ton yüklü durumda ve 3 knot ilerleme hızı ile orta çevre koşullarında manevra performansı yetersiz bulunmuştur. Modifiye edilmiş tasarım, geminin baş tarafında yer alan ve ilave itme kuvveti üretmek için 360 derece dönebilen bir azimut pervanesi ile donatılmıştır. Geminin manevra performansını değerlendirmek için 3 serbestlik dereceli nonlineer gemi hareket denklemleri zaman düzleminde çözülmüştür. Kullanılan matematiksel modelin manevra katsayıları iki farklı yaklaşımla tahmin edilmektedir; birincisi yarı ampirik yöntemlere, diğeri ise hesaplamalı akışkanlar dinamiğine (HAD) dayanmaktadır. Rüzgâr, akım ve dalga gibi dış bozucular, yarı ampirik yöntemlerle matematiksel olarak temsil edilmiştir. Kapsamlı bir hesaplamalı test matrisi oluşturulmuş ve bir balıkçı teknesinin baş tarafına yerleştirilmiş yeterli itme gücüne sahip bir azimut pervanesinin olumsuz çevresel koşullara rağmen geminin manevra performansını önemli ölçüde iyileştirebileceği simülasyonlarla gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Manevra performansı, balıkçı gemisi, azimut, dönebilir itici

Makale geçmişi: Geliş 26/04/2022 – Kabul 25/06/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1108980>

The Effect of Azimuth Thruster on the Manoeuvring Ability of a Stern Trawler in Rough Weather Conditions

Ömer Kemal Kınacı ¹, Kadir Sarıöz ², Ömer Gören ³, Aydın Sülüs ⁴

^{1,2,3} Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, Türkiye

⁴ Skipsteknisk Engineering AŞ, Maltepe, Istanbul, Türkiye

¹ (corresponding author), kemalkinaci@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2956-9562

² sarioz@itu.edu.tr, 0000-0001-9594-4677

³ ogoren@itu.edu.tr, 0000-0002-0413-7376

⁴ aydin.sulus@skipsteknisk.no, 0000-0000-0000-0000

ABSTRACT

The results of computational analyses on the manoeuvring performance of a stern trawler with an azimuth thruster located in the forward part of the vessel are presented. The initial design of the vessel with a single shaft, propeller and rudder is considered to have insufficient manoeuvring performance with a trawl pull load of 40 tons in moderate environmental conditions with a forward speed of 3 knots. The modified design is equipped with an azimuth thruster located in the forward part of the vessel that can rotate 360 degrees to produce additional thrust. In order to assess and simulate the manoeuvring performance of the vessel, the surge, sway and yaw equations are set and solved in the time domain. The hydrodynamic forces due to surge and sway motions and the yaw moment are represented by a nonlinear modular mathematical model. The manoeuvring coefficients of the mathematical model employed are estimated by two distinct approaches; the first one is based on semi-empirical methods and the other is based on computational fluid dynamics (CFD). The external forces due to wind, current and waves are mathematically represented by proven semi-empirical methods based on the results of scaled model tests and full-scale measurements. A comprehensive computational test matrix is established and extensive computational analyses and manoeuvring simulations were carried out to indicate that an azimuth thruster with sufficient thrust located in the forward part of a stern trawler could significantly improve the manoeuvring performance of the vessel despite adverse environmental conditions.

Keywords: Maneuvering performance, stern trawler, azimuth thruster

Article history: Received 26/04/2022 – Accepted 25/06/2022

1. Introduction

Modern stern trawlers are designed for hauling very heavy catches up the stern onto the working deck of the vessel under adverse environmental conditions. Although it is asserted in some studies, such as Yoshimura and Ma (2003), that fishing vessels generally have good performances in manoeuvrability because of large rudders and powerful propeller assists, under particular operational and environmental conditions manoeuvrability may turn out to be a problem. Thus, the present study attempted to take severe environmental conditions into account as well as slow speed in the trawling mode of the vessel's operation. The weight of huge nets not only require powerful engines but also additional manoeuvring devices – such as azimuth thrusters – which may be needed to provide sufficient manoeuvring performance in higher sea states. Another difficulty is due to the slow forward speed to be maintained while pulling the net which reduces the efficiency of the rudder.

In this paper the influence of an azimuth thruster on the manoeuvring performance of a stern trawler is investigated. The stern trawler under investigation is designed by Skipsteknisk. The initial design, Base Case (0), is fitted with a single shaft/propeller and a rudder. The modified design, Base Case (1), is additionally equipped with an azimuth thruster located in the forward part of the vessel that can rotate 360 degrees to produce additional thrust. The manoeuvring performance of these configurations with a trawl pull load of 40 metric tons is assessed and simulated in calm water and moderate to extreme environmental conditions. For each configuration the following conditions are considered:

- Forward speed of 3 knots,
- Trawl pull load of 40 metric tons,
- Wave, wind and a 3 knot current acting on the vessel in beam direction.

In order to assess and simulate the manoeuvring performance of the vessel, surge, sway and yaw equations are set and solved in the time domain. The hydrodynamic forces due to surge and sway motions and the yaw moment are represented by a set of linear and nonlinear coefficients called the manoeuvring derivatives. These coefficients may be estimated by empirical methods, CFD (Computational Fluid Dynamics) based computational procedures or PMM (Planar Motion Mechanism) model tests. It is a known fact that most of the empirical formulas have been derived from the model tests of merchant ships and from the analytical studies of some particular geometrical shapes. In order to have a good correlation between hull form parameters – employed in the empirical formulas – and the manoeuvring derivatives, Kim et al. (2021) recently introduced modified empirical formulas developed for fishing vessels of which hull form characteristics are different from those of merchant ships. In the present study, we prefer to go through the CFD analyses in calculating manoeuvring derivatives, as well, to validate the results of empirical formulas.

Section 2 presents the equations of motion and describes the modular mathematical manoeuvring model including the external forces due to the propeller, thruster, rudder and environmental disturbances such as wind, current and waves to be separately estimated and included in the equations of the motion. The propeller forces are estimated by considering the experimental open water efficiency and the thrust deduction data provided by the designer of the vessel. Thrust reduction due to currents, thruster-hull interaction and ventilation effects are taken into consideration by using suitable empirical methods. The forces and moment due to the rudder are estimated by a well proven empirical method which takes into account the effects of propeller flow on the rudder and the effective

rudder angle in a turn. Methods and procedures used to estimate propeller and thruster forces and forces and moment due to the rudder are also presented.

The empirical methods employed and the CFD based computations performed to estimate the manoeuvring derivatives are explained in Section 3.

Turning performance of the Stern Trawler in calm water conditions is presented in Section 4. In Base Case (0) configuration, only the propeller and rudder are taken into consideration and the effect of a trawl pull load of 40 metric tons on turning performance of the vessel is illustrated. In Base Case (1) configuration, the effect of an azimuth thruster on turning performance in calm water is investigated.

Section 5 presents the methods used to estimate the external forces due to wind, current and waves. As shown in this section several alternative empirical methods are available to estimate the environmental forces. It is shown that the forces and moment predicted by these methods are, generally, in agreement and result in similar manoeuvring behaviour.

Manoeuvring performance of the stern trawler in a range of environmental conditions in Base Case (0) and Base Case (1) configurations are presented and compared in Section 6. Based on these analyses, maximum environmental conditions in which the vessel could maintain the track are estimated in Section 7. The paper ends with a summary of the results and the concluding remarks.

2. The Mathematical Model

The mathematical model to simulate the motions of the ship is the modular MMG mathematical ship manoeuvring model (Yasukawa and Yoshimura, 2015). This model considers the ship hull and its appendages separately and the interaction between them is handled by various parameters. In this section, we first present the ship manoeuvring equations used in this study and then briefly present the models used for the ship hull and its appendages (the propeller, the azimuth thruster and the rudder).

2.1. Equations of motion

Assuming that the effect of roll on the manoeuvring motion is small, only surge, sway and yaw motions are considered in the equations of motion which can be expressed as follows with respect to a ship fixed reference frame at amidships:

$$\begin{aligned}
 X &= m(\dot{u} - vr - x_G r^2) \\
 Y &= m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) \\
 N &= I_z \dot{r} + mx_G(\dot{v} + ru)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

m : ship's mass

I_z : mass moment of inertia of the ship about the vertical axis

X : total force in the x direction

Y : total force in the y direction

N : turning moment around the vertical axis

u : velocity component in the x direction

- v : velocity component in the y direction
 r : yaw rate
 x_G : the distance between the midships and the centre of gravity.

The main components of the external forces are:

- Hydrodynamic forces due to the surrounding fluid (X_F, Y_F, N_F),
- Control surface forces due to control surfaces like rudder and fins (X_R, Y_R, N_R),
- Propulsion forces due to the propellers and thrusters (X_T, Y_T, N_T),
- Environmental disturbances such as wind, current and waves (X_E, Y_E, N_E),
- External forces due to trawl pull loads (X_P, Y_P, N_P).

Then the equations of motion can be written as follows;

$$m(\dot{u} - vr - x_G r^2) = X_F + X_R + X_T + X_E + X_P$$

$$m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) = Y_F + Y_R + Y_T + Y_E + Y_P$$

$$I_z \dot{r} + mx_G(\dot{v} + ru) = N_F + N_R + N_T + N_E + N_P$$

- X_F, Y_F, N_F : Hydrodynamic forces due to the surrounding fluid,
 X_R, Y_R, N_R : Control surface forces due to the rudder and fins,
 X_T, Y_T, N_T : Propulsion forces due to the propeller and thrusters,
 X_E, Y_E, N_E : Environmental loads due to wind, current and waves,
 X_P, Y_P, N_P : External forces due to pull loads such as trawl nets,

2.2. Forces and moment acting on the ship hull

The hydrodynamic forces and moments can be considered as sums of various components with different static and dynamic origins, as follows:

- Added mass and moment components due to the motion in an ideal fluid with no circulation,
- Lift force and moment components due to the motion in an ideal fluid with circulation,
- Viscous force and moment components due to the motion in a viscous fluid.

The hydrodynamic forces due to surge and sway motions and the yaw moment are represented by a set of linear and nonlinear hydrodynamic coefficients. These coefficients may be estimated by empirical methods, CFD based computational procedures or PMM model tests. For the manoeuvring simulations presented in this report, the cubic model for equations of motion is adopted and the manoeuvring derivatives obtained by CFD computations are used with the exception of inertia coefficients. Hydrodynamic forces due to the surrounding fluid are expressed as follows:

Methods and procedures used to estimate the forces due to the propeller and thrusters, rudder and environmental disturbances such as wind, current and waves are explained in the following subsections.

$$\begin{aligned}
 X_F &= \frac{\rho}{2} L^3 (X'_u \dot{u}) + \frac{\rho}{2} L^2 (X'_{vv} v^2) + \frac{\rho}{2} L^3 (X'_{vr} vr) + \frac{\rho}{2} L^4 (X'_{rr} r^2) \\
 Y_F &= \frac{\rho}{2} L^3 (Y'_v \dot{v}) + \frac{\rho}{2} L^4 (Y'_r \dot{r}) + \frac{\rho}{2} L^2 (Y'_v uv) + \frac{\rho}{2} L^3 (Y'_r ur) + \frac{\rho}{2} L^2 (Y'_{vv} v^3) \\
 &\quad + \frac{\rho}{2} L^3 (Y'_{vvr} vvr + Y'_{vrr} vrr) + \frac{\rho}{2} L^4 (Y'_{rrr} r^3) \\
 N_F &= \frac{\rho}{2} L^4 (N'_v \dot{v}) + \frac{\rho}{2} L^5 (N'_r \dot{r}) + \frac{\rho}{2} L^3 (N'_v uv) + \frac{\rho}{2} L^4 (N'_r ur) + \frac{\rho}{2} L^3 (N'_{vv} v^3) \\
 &\quad + \frac{\rho}{2} L^4 (N'_{vvr} vvr + N'_{vrr} vrr) + \frac{\rho}{2} L^5 (N'_{rrr} r^3)
 \end{aligned} \tag{2}$$

2.3. Forces generated by the propeller

The manoeuvring model adopted in this study considers the propeller to generate only a force in the surge direction. Lateral forces or moments are ignored. In this case, the propeller net thrust force may be represented by

$$X_P = (1 - t) \rho n_P^2 D_P^4 K_T (J_P) \tag{3}$$

where t is the thrust deduction fraction, n_P the propeller rotational rate and D_P the propeller diameter. The thrust coefficient $K_T (J_P)$ can be estimated by using the open water test measurements of the propeller as a function of the advance number J_P , which is expressed as:

$$J_P = \frac{u_P}{n_P D_P} = \frac{u(1 - w_P)}{n_P D_P} \tag{4}$$

where u is the axial ship velocity and w_P is the Taylor wake fraction of the propeller behind the ship hull. In order to estimate the thrust coefficient $K_T (J_P)$ for a given advance number, J_P , the open-water test data of the propeller is utilized. The open water characteristics of the propeller are represented by a third-order polynomial. The speed of the vessel is limited to 3 knots while pulling the trawl net. At these low speeds, the wave-making resistance can be ignored and the total resistance may be assumed to be due to the viscous component only:

$$R_T \cong R_V = \frac{1}{2} \rho S u^2 [(1 + k) C_F + \Delta C_F] \tag{5}$$

Frictional resistance coefficient C_F is estimated by using the ITTC 1957 formula. At the self-propulsion condition the thrust is equal to the sum of the total resistance and the trawl pull, i.e., $X_P = X_R + F_P$. The trawl pull load F_P is 40 metric tons.

2.4. Forces and moment generated by the rudder

The components of the hydrodynamic forces acting on the rudder are essentially of the same category as for a ship hull, with an additional complication that the rudder forces are significantly dependent on the velocity of the propeller slip-stream. The true hydrodynamic description of rudder performance and its forces should be based on effective velocity over the rudder, (accounting for the race effect of the propeller), and the effective angle of attack on the rudder. The forces and moment generated by the rudder are (Inoue et al., 1981);

$$\begin{aligned} X_R &= -F_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1 + a_H) F_N \cos \delta \\ N_R &= -(1 + a_H) x_R F_N \cos \delta \end{aligned} \quad (6)$$

where a_H is the ratio of additional lateral force, x_R and z_R are the x and z-coordinates of the centre of lateral force, δ is the rudder angle and F_N is the rudder normal force. The a_H coefficient can be estimated as a function of the block coefficient as follows, IMCA M140 (2000);

$$a_H = 0.62(C_B - 0.6) + 0.227 \quad (7)$$

The normal force on the rudder can be approximated as

$$F_N = \frac{\rho}{2} \frac{6.13\lambda}{\lambda + 2.25} A_R V_R^2 \sin \alpha_R \quad (8)$$

where A_R is the rudder area and λ is the effective aspect ratio. The effective rudder inflow speed can be expressed in the form

$$\begin{aligned} V_R &= V(1 - w_R) \sqrt{1 + K_2 g(s)} \\ V &= \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (9)$$

where u and v are the components of ship speed in x and y directions, respectively, $K_2 = 1.065$ for the port rudder and $K_2 = 0.935$ for the starboard rudder. The term $K_2 g(s)$ represents the effect of the propeller slip-stream on V_R , and

$$\begin{aligned} g(s) &= \eta \kappa [2 - (2 - \kappa)s] s / (1 - s)^2 \\ s &= 1 - u(1 - w_P) / nP \\ \eta &= D_P / H_R \\ \kappa &= 0.6(1 - w_P) / (1 - w_R) \end{aligned} \quad (10)$$

where u is the longitudinal component of ship speed, D_P is the propeller diameter, P is the propeller pitch, H_R is the rudder height, n is the propeller revolution and, w_P and w_R are the effective propeller and rudder wake fractions, respectively. The estimation of the effective rudder wake fraction is made assuming that w_R in the manoeuvring motion could be computed by

$$\frac{w_R}{w_{RO}} = \frac{w_P}{w_{PO}} = \exp(K_1 \beta_P^2) \quad (11)$$

where $K_1 = -4.0$ and the geometrical inflow angle at the propeller position is defined as follows:

$$\beta_P = \beta - x'_P r' \quad (12)$$

The effective rudder wake fraction w_{RO} of full-scale ships may be obtained from the results of the model experiments in the same manner as for the effective propeller wake fraction w_{PO} in the area of the ship propulsion, namely making use of the technique to estimate the full-scale value from the

model experimental results with the concept of the wake ratio. Taking the flow-rectifying effect into considerations, the effective rudder angle, α_R can be expressed in the form,

$$\begin{aligned}\alpha_R &= \delta + \delta_0 - \gamma\beta'_R \\ \beta'_R &= \beta - 2x'_R r'\end{aligned}\quad (13)$$

The flow rectifying effect due the ship's hull and the propeller can be expressed as,

$$\begin{aligned}\gamma &= C_P C_S \\ C_P &= 1/\sqrt{1 + 0.6\eta(2 - 1.4s)s/(1 - s)^2}\end{aligned}\quad (14)$$

The ship flow-rectification coefficient C_P is given in the following form:

$$\begin{aligned}C_S &= K_3 \beta'_R & \text{for} & \quad \beta'_R \leq C_{S0}/K_3 \\ C_S &= C_{S0} & \text{for} & \quad \beta'_R > C_{S0}/K_3\end{aligned}$$

with $K_3 = 0.45$ and $C_{S0} = 0.5$.

2.5. External disturbances – Wind loads

The wind force calculations are based on a steady state one-minute mean wind velocity measured at an elevation of 10 meters above the water surface. For wind velocities at different elevation, adjustments to the equivalent 10-meter velocity are necessary and can be made with the following formula; IMCA M140 (2000) and OCIMF 94 (1994);

$$V_w = v_w \left(\frac{10}{h}\right)^{1/7} \quad (15)$$

where V_w is the 10-meter wind velocity (m/s), v_w is the wind velocity at elevation h (m/s) and h is the elevation above water surface (m). Since the wind speed is subjected to gusts, the one-minute mean value is converted to the hourly mean value by multiplying by 1.15 (IMCA M140, 2000). The wind forces and moment can be estimated by using the following standard formulations, IMCA M140 (2000);

$$\begin{aligned}F_{Wx} &= \frac{\rho_a}{2} V_{Wr}^2 A_T C_{Wx}(\alpha_{Wr}) \\ F_{Wy} &= \frac{\rho_a}{2} V_{Wr}^2 A_L C_{Wy}(\alpha_{Wr}) \\ N_W &= \frac{\rho_a}{2} V_{Wr}^2 A_L L_{BP} C_{Wn}(\alpha_{Wr})\end{aligned}\quad (16)$$

V_{Wr} is the instantaneous wind velocity including the ship's speed over the ground with the following longitudinal and transverse components:

$$\begin{aligned}V_{Wx} &= V_W \cos\alpha_W - u \\ V_{Wy} &= V_W \sin\alpha_W - v \\ V_{Wr} &= \sqrt{V_{Wx}^2 + V_{Wy}^2}\end{aligned}\quad (17)$$

Then, the relative wind direction, i.e. the angle between the speed through the water and the ships heading can be expressed as follows:

$$\alpha_{Wr} = \arctan (V_{Wy}/V_{Wx}) - \psi \quad (18)$$

where ψ is the heading of the vessel. The coefficients C_{Wx} , C_{Wy} and C_{Wn} are calculated using IMCA M140 (2000).

2.6. External disturbances – Current loads

The current forces and moment can be estimated by using the following standard formulations:

$$\begin{aligned} F_{Cx} &= \frac{\rho}{2} V_{Cr}^2 B T C_{Cx}(\alpha_C) \\ F_{Cy} &= \frac{\rho}{2} V_{Cr}^2 L_{BP} T C_{Cy}(\alpha_C) \\ N_C &= \frac{\rho}{2} V_{Cr}^2 L_{BP}^2 T C_{Cn}(\alpha_C) \end{aligned} \quad (19)$$

Here; C_{Cx} , C_{Cy} , and C_{Cn} stand for current coefficients. These coefficients for given current directions can be obtained by model tests or CFD analysis. Alternatively, particularly for early design studies, several empirical methods based on the analysis of model test data are available. For example, Remery and Van Oortmerssen (1973) presented an empirical method to predict current forces on tanker shaped hulls based on several model tests. The longitudinal current force is assumed to be due to the frictional resistance and hence could be estimated by the flat plate resistance in accordance with the ITTC formulation. The transverse current force and current yaw moment coefficients were assumed independent of the Reynolds number and expanded in fifth order Fourier series as a function of relative current direction. The average values of the Fourier coefficients were provided. Details of the parameters in this equation and the in-depth methodology can be found in IMCA M140 (2000).

2.7. External disturbances – Wave drift loads

The wave forces acting on the vessel can be classified into two distinct types as the harmonic first order wave forces and the second order mean wave drift forces. Because of the high frequency and the large magnitude of the first order wave forces the thrusters are not capable to counteract these forces. Therefore, only the second order mean wave drift forces need to be considered. The total wave drift force for a given wave direction can be determined from the following equation, API RP 2SK (2005):

$$F_{WDr}(\alpha_{Wr}) = F_{WDy}(90) \left[\frac{2\sin^2(\alpha_{Wr})}{1 + \sin^2(\alpha_{Wr})} \right] + F_{WDx}(0) \left[\frac{2\cos^2(\alpha_{Wr})}{1 + \cos^2(\alpha_{Wr})} \right] \quad (20)$$

where α_{Wr} stands for relative wave angle, $F_{WDx}(0)$ and $F_{WDy}(90)$ stand for wave drift forces in surge and sway, respectively. The wave drift forces and moment are estimated by using the empirical relation given by DNVGL-ST-0111 (2018).

3. Maneuvering Derivatives of the Vessel and Details of CFD implementation

Basic geometric and hydrostatic properties of the vessel are provided by SKIPSTERNISK. The vessel has single shaft, propeller and rudder. General particulars of the vessel are presented in Table 1 and her profile view in Figure 1.

Table 1: General particulars of the vessel

Length over all	L_{OA}	87.53 m
Length between perpendiculars	L_{BP}	78.60 m
Beam	B	18.00 m
Draught (midship)	T	6.40 m
Draught (AP)	T_A	6.65 m
Draught (FP)	T_F	6.15 m
Displacement	Δ	6500 t
Block coefficient	C_B	0.738
Wetted surface area	S	2110 m ²
Projection area of rudder	A_R	16 m ²
Bilge keel surface area	A_{BK}	42 m ²
Form factor	k	0.41
Frontal wind area	A_{WF}	375 m ²
Transverse wind area	A_{WT}	1160.7 m ²
No of propeller blades	Z	4
Propeller diameter	D	4.5 m
Propeller pitch ratio at 0.7R	P/D	1.2
Expanded blade area ratio	A_E/A_0	0.611

The hydrodynamic coefficients of the trawler are obtained by conducting PMM tests via a RANSE-based CFD on the one hand and by means of empirical formulas on the other.

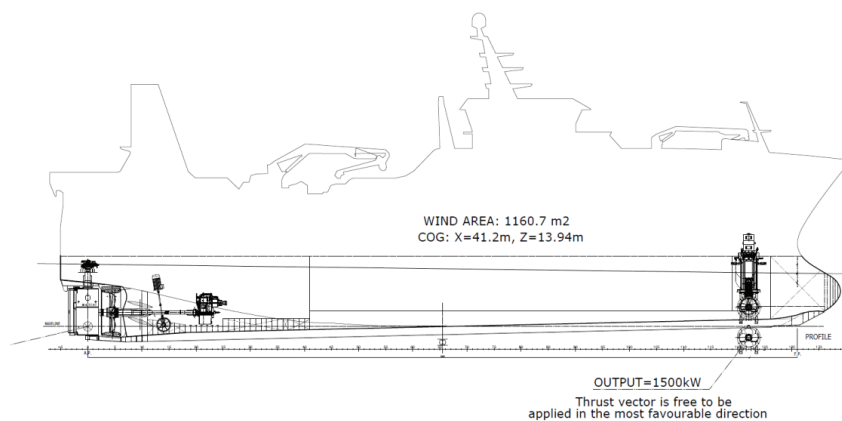


Figure 1. Profile of the stern trawler and the arrangement of the azimuth thruster

3.1. Numerical implementation

A three-dimensional, incompressible and viscous Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations (RANSE) based computational fluid dynamics (CFD) approach is implemented for captive motion tests of the trawler. The flow is turbulent due to high Reynolds number. Realizable k-epsilon is selected as the

turbulence model. Due to low ship speed, a double-body flow model is utilized. Only the underwater hull form is considered while the free water surface boundary condition is selected as “symmetry”. This is to ensure calm water condition during tests (due to low ship speed); therefore, wave resistance is neglected.

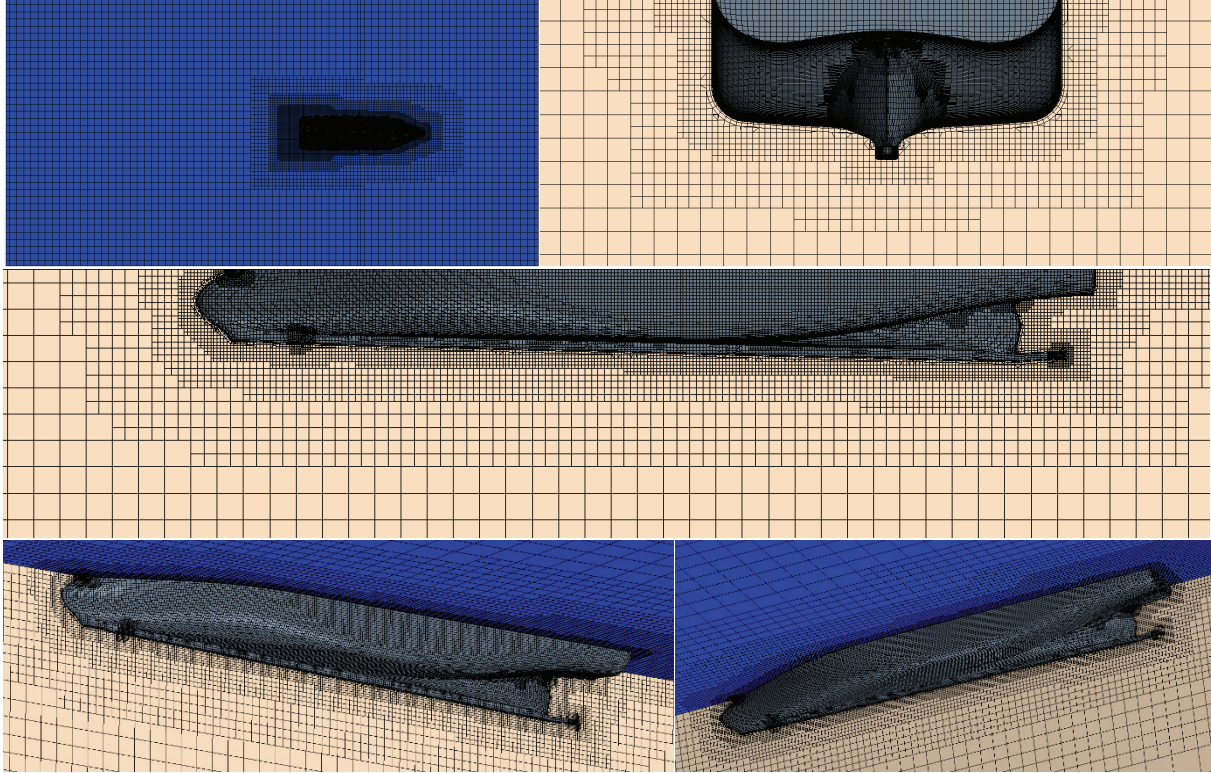


Figure 2. Different views of the grid used in numerical simulations

The underwater form of the trawler is enclosed in a rectangular box. The boundary conditions applied to the six surfaces of this box are explained below:

- The inlet upstream of the trawler: Velocity inlet.
- The outlet downstream of the trawler: Pressure outlet.
- Two side walls (one at the left, the other at the right of the trawler): Velocity inlet.
- The bottom wall: Velocity inlet.
- The top wall: Symmetry (to ensure double-body flow model).

The tests are conducted at 3knots ship speed at full-scale, corresponding to 0.2817m/s for the 1/30 model scale ship. The ship is stationary while a flow velocity of -0.2817m/s is sent from the velocity inlet towards the ship.

Approximately 500k grid elements were used to represent the fluid domain. The cell base size is set to 0.01m. Minimum cell size can get as low as 25% of the base size where refinements are required to solve for high adverse pressure gradients. The maximum cell size is 1600% of the base size and used in inlet, outlet, and side wall surfaces, corresponding to 0.16m. Different views of the grid system implemented in the fluid domain are given in Figure 2. Prism layer thickness is calculated using turbulent boundary layer thickness formula given by

$$\delta \approx 0.37 \frac{L}{Re^{0.2}} \quad (21)$$

where δ denotes the boundary layer thickness, L is the ship length and Re is the Reynolds number (Schlichting, 1979). The boundary layer thickness is found to be $\delta = 0.0106m$. It is represented by 3 prism layers only, due to low ship speed. Wall y^+ are considered during the selection of the number of prism layers. Wall y^+ and the turbulence viscosity ratio contours are given in Figure 3.

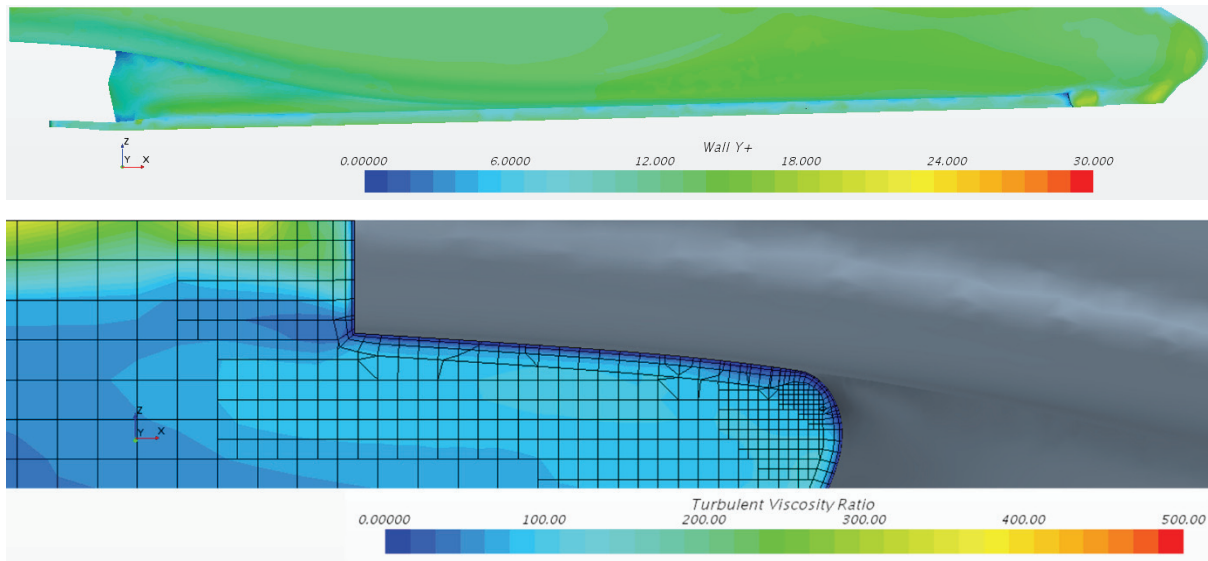


Figure 3. Wall y^+ distribution along the ship (top). The turbulence viscosity ratio at the stern region (bottom)

The steady solver is used for static tests (static drift) while the transient solver is selected for dynamic tests (pure yaw, yaw and drift). The time step size is taken as $\Delta t = 0.02s$ in dynamic tests. Maximum inner iterations are set to 5.

3.2. Validation of the numerical approach

Numerical simulations are validated by the frictional resistance coefficient obtained by CFD and comparing it with the ITTC-1957 frictional correlation line formula:

$$C_{F,ITTC} = \frac{0.075}{(\log Re - 2)^2} \quad (22)$$

where Re denotes the Reynolds number. Results are validated for a full-scale velocity of $U_S = 3knots$. The corresponding model velocity at 1/30 model scale is $U_M = 0.2817m/s$. Considering that the model ship has a length of $L = 2.6232m$, the Reynolds number in this case is $Re \approx 830,000$. Then, the frictional resistance coefficient becomes $C_{F,ITTC} = 4.88 \cdot 10^{-3}$. CFD simulations are conducted for a full-scale ship velocity range of $1knot < U_S < 8knots$. Results are given in Table 2.

The difference between the two results, around the given operation speed of 3 knots, is only 0.6%, which is considered to be negligible.

Table 2. Comparison of frictional resistance coefficients obtained by CFD and ITTC-1957 formula

U_S	U_S	U_M	Re	C_F (ITTC)	R_F (ITTC)	R_F (CFD)	C_F (CFD)	Difference
<i>knots</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	–	–	<i>N</i>	<i>N</i>	–	%
1	0.5144	0.0939	2.77E+05	6.33E-03	0.0671	0.0646	6.10E-03	3.7
2	1.0288	0.1878	5.53E+05	5.35E-03	0.2269	0.2328	5.49E-03	2.6
3	1.5432	0.2817	8.30E+05	4.88E-03	0.4657	0.4683	4.91E-03	0.6
4	2.0576	0.3757	1.11E+06	4.59E-03	0.7775	0.7721	4.55E-03	0.7
5	2.5720	0.4696	1.38E+06	4.37E-03	1.1587	1.1399	4.30E-03	1.6
6	3.0864	0.5635	1.66E+06	4.21E-03	1.6065	1.5705	4.12E-03	2.2
7	3.6008	0.6574	1.94E+06	4.08E-03	2.1188	2.0588	3.97E-03	2.8
8	4.1152	0.7513	2.21E+06	3.97E-03	2.6940	2.5903	3.82E-03	3.8

3.3. Numerical PMM test results

Numerical simulations of static drift tests have been conducted for six cases in a range of $0 \leq \beta \leq 15^\circ$. Full-scale ship velocity is $U_S = 3 \text{ knots}$, corresponding to a model ship velocity of $U_M = 0.2817 \text{ m/s}$ (using Froude similarity). Non-dimensional lateral ship velocity can be calculated by $v' = -\sin \beta$. Numerical results are presented in digital form and graphed in Figure 4.

Pure yaw tests have been conducted for eight cases in a range of $0.05 \leq r' \leq 0.4$. Non-dimensional yaw rate denoted by r' is calculated by $r' = \frac{rL}{U}$. Numerical results are given in Figure 5.

Yaw and drift tests have been conducted for four different yaw rates consisting of $r' = 0.1$, $r' = 0.2$, $r' = 0.3$, and $r' = 0.4$. Each one of these cases were simulated for five drift angles in a range of $0 \leq \beta \leq 15^\circ$ (similar to the static drift tests). With the additional case of $\beta = 0$ available from pure yaw tests, a total of 24 numerical simulations were available for this test. Numerical results are given in Figure 6.

4. Turning Performance in Calm Water

In this section turning performance of the Stern Trawler with a trawl pull load of 40 metric tons in calm water conditions is presented. The forward speed of the vessel is 3 knots with a propeller rotation rate of 88 rpm and the maximum rudder angle is 35 degrees.

4.1. Turning circle test without the azimuth thruster

For the base configuration, only the propeller and rudder are taken into consideration. Figure 7 presents the port and starboard turning manoeuvre simulations with

- a trawl pull load of 40 metric tons
- at 3 knots forward speed
- with propeller rotation rate of 88 rpm and
- a rudder angle of 35 degrees.

The total simulation time is 600 seconds with a time step of 15 seconds.

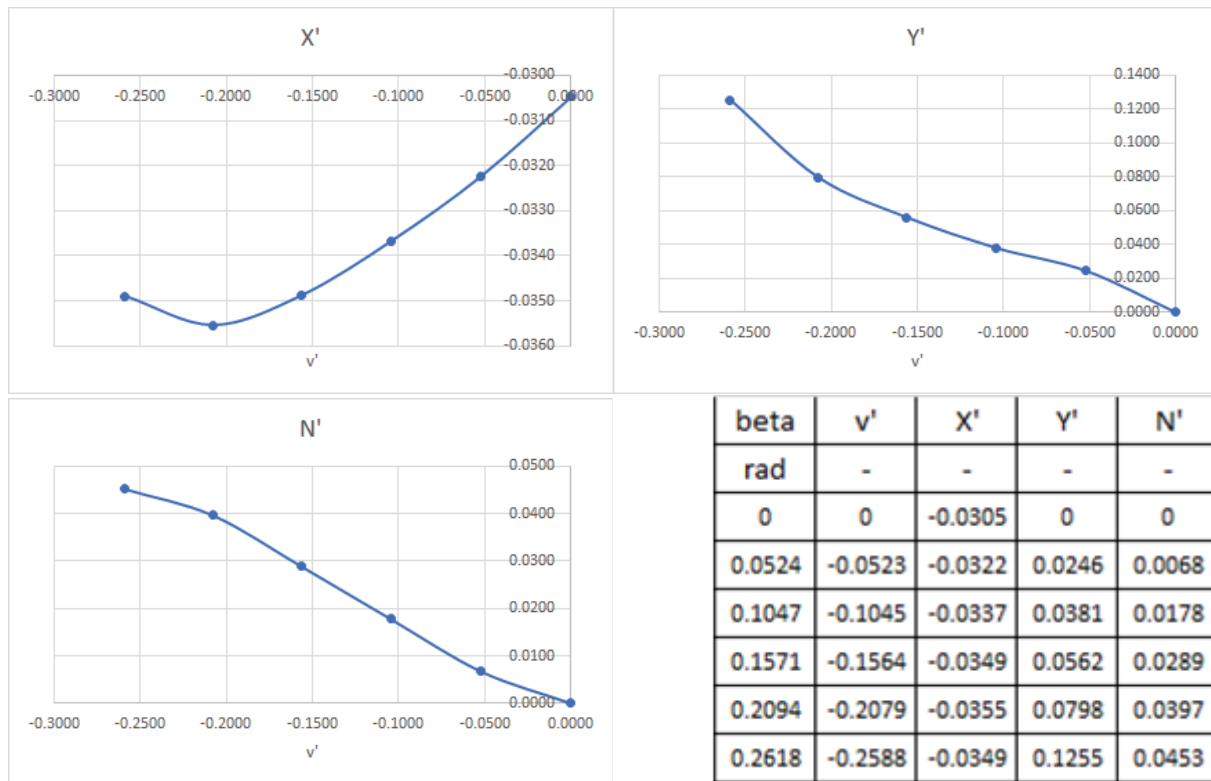


Figure 4. Non-dimensional forces (X' and Y') and moment (N') graphs in static drift tests. Tabular version (right below)

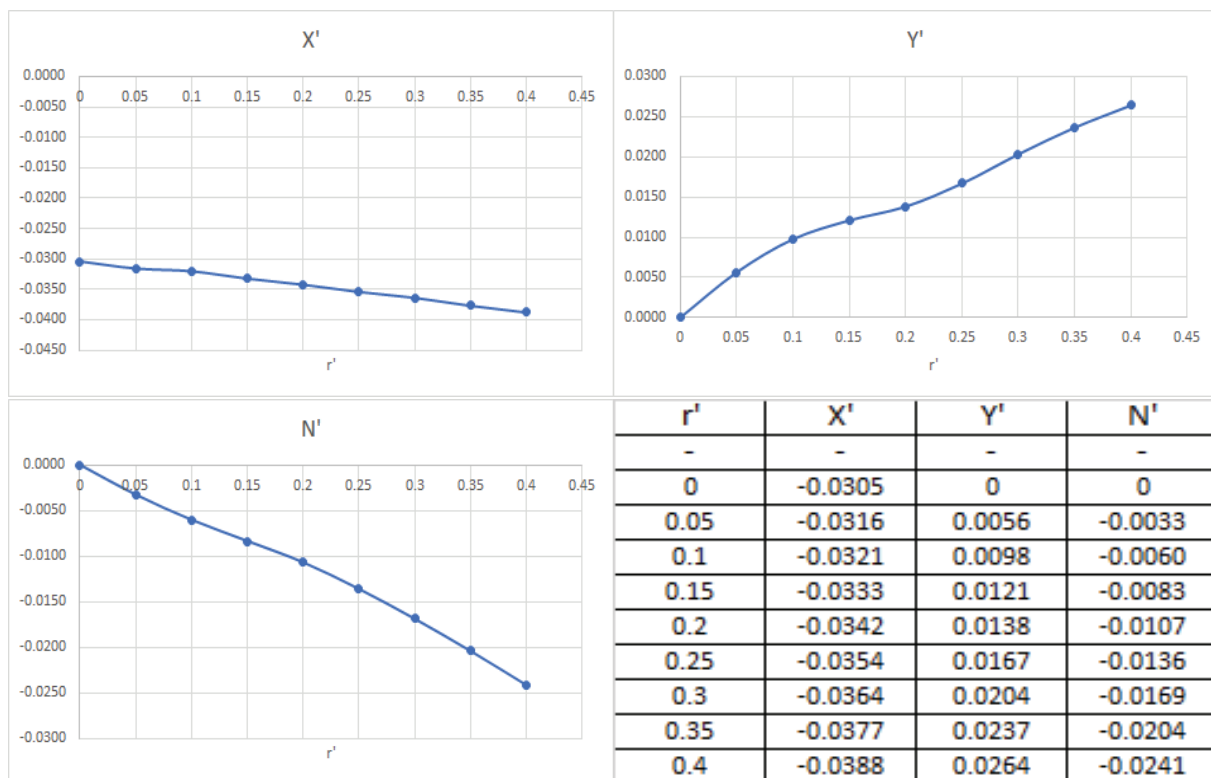


Figure 5. Non-dimensional forces (X' and Y') and moment (N') graphs in pure yaw tests. Tabular version (right below)

4.2. Turning performance with an azimuth thruster

For this configuration, a 1200 kW azimuth thruster located in the forebody is taken into consideration besides the propeller and the rudder. In order to illustrate the effect of the azimuth thruster on the turning performance, two different thrust levels (50 kN and 100 kN) are considered.

Figure 8 presents the turning manoeuvre simulation with

- a trawl pull load of 40 metric tons
- at 3 knots forward speed
- with a propeller rotation rate of 88 rpm
- the rudder angle is 0 degrees
- the direction of the azimuth thrusters 90 degrees

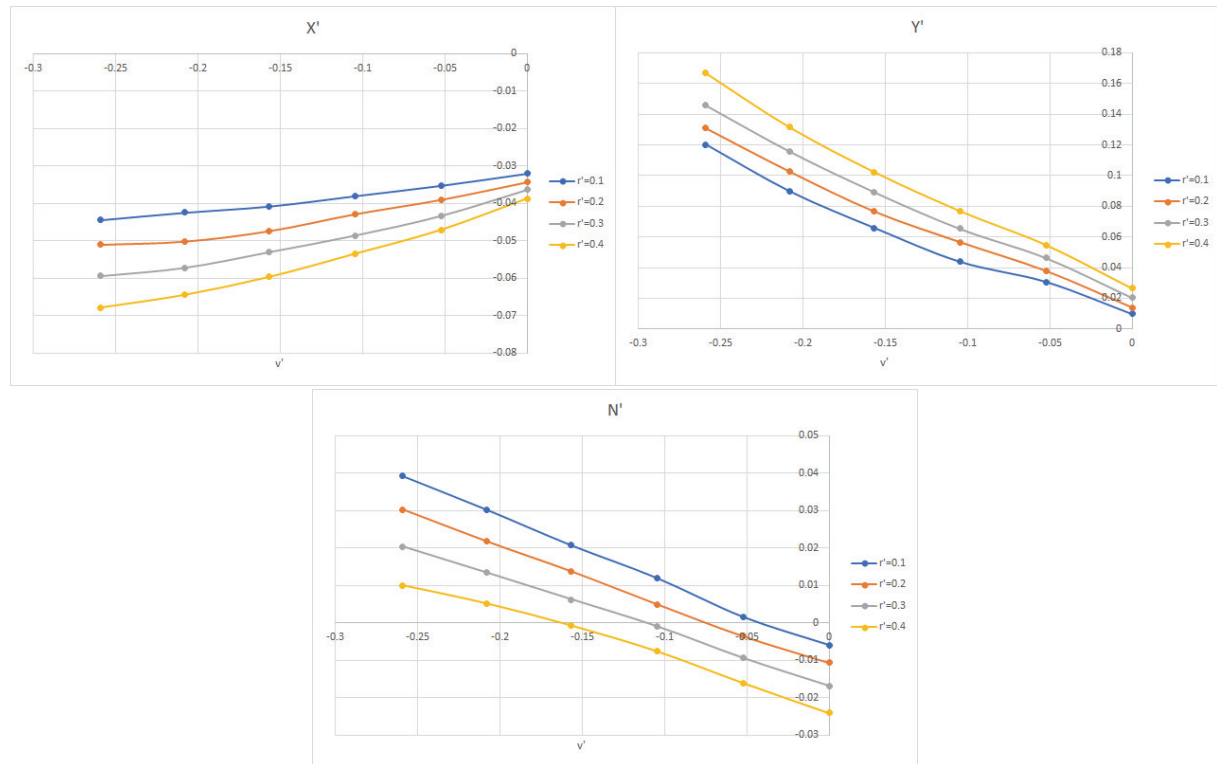


Figure 6. Non-dimensional forces (X' and Y') and moment (N') graphs in yaw and drift tests. Tabular version (right below)

The azimuth thruster provides 50 kN and 100 kN thrust in these simulations. 0 degree represents the vessel's heading and 90 degrees represents the thruster direction perpendicular to the vessel's heading. The total simulation time is 240 seconds with a time step of 10 seconds. The figure shows the effect of the azimuth thruster on the turning performance in calm water conditions.

5. The effect of environmental loads on a ship in surge

In this section, the effect of environmental loads on the vessel's motions are investigated. The vessel is assumed to be subject to surge, sway forces, and yaw moment due to the wind, current and waves. In order to keep station or maintain track, these forces and moment must be compensated by those

generated by the propeller, rudder and the thruster. The details of the methods and procedures used to estimate the wind, current and wave forces are presented in Section 2. The wind and wave characteristics for Beaufort 9 (BF 9) condition are determined in accordance with the recommendations of DNV GL ST-0111 (2018) as given in Table 3.

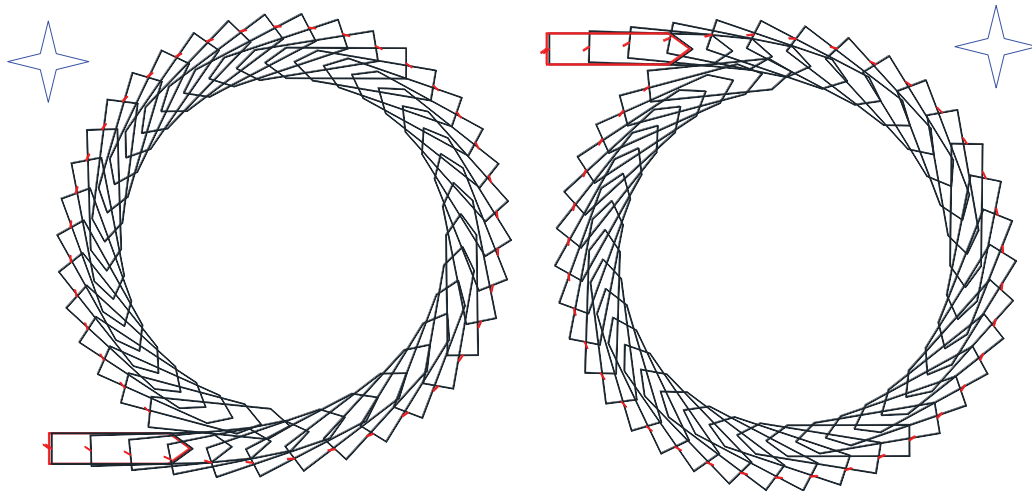


Figure 7. Turning manoeuvre simulation with a trawl pull load of 40 metric tons at 3 knots speed with a rudder angle of 35 degrees to port (left) and starboard (right).

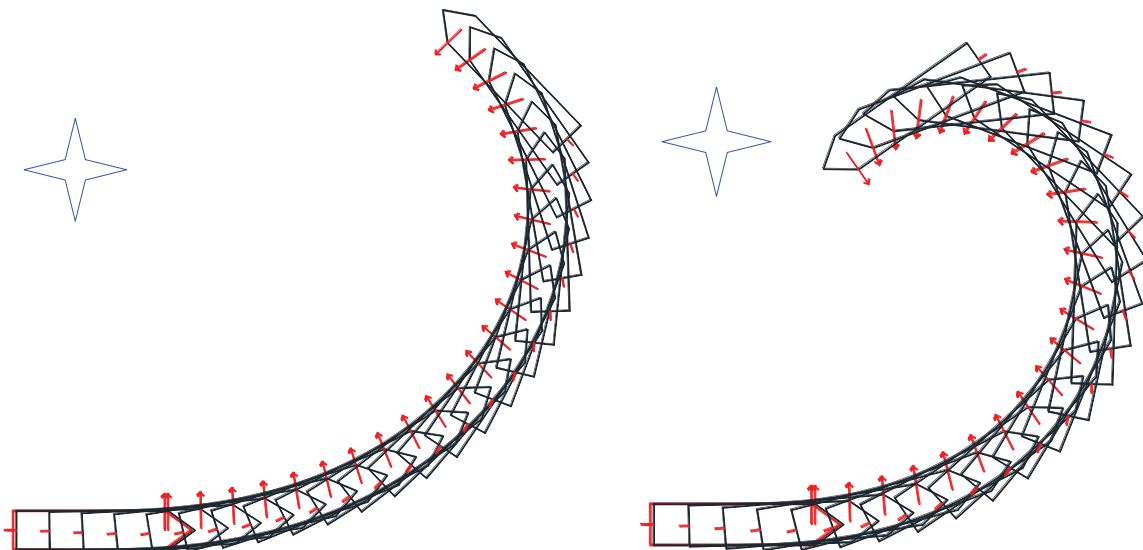


Figure 8. Turning manoeuvre simulation with trawl pull load of 40 metric tons at 3 knots with a rudder angle of 0 degrees. The thrust of the azimuth thruster is 50 kN (left) and 100 kN (right). The direction of the azimuth thruster is 90 degrees.

Table 3. Beaufort 9 sea condition.

Beaufort No	Description	Wind speed [m/s]	Significant wave height [m]	Modal wave period [s]
9	Strong gale	24.4	7.4	10.5

The effect of the environmental loads is considered in this section where the vessel is

- towing a trawl pull load of 40 metric tons
- a steady forward speed of 3 knots
- with a propeller rotational rate of 88 rpm and
- the rudder angle is 0 degrees.

We consider the environmental loads one-by-one in this section and the results obtained for each are presented in the sub-sections below.

5.1. Wind forces

The direction of the wind is perpendicular to the vessel's initial heading. There are no active thrusters other than the propeller. The effect of waves and current are not taken into consideration. Typical examples of manoeuvring simulations based on Isherwood (1994), Blendermann (1994) and DNVGL-ST-0111 (2018) formulations in BF 9 conditions with a wind speed of 24.4 m/s are shown in Figure 9. The total simulation time is 180 seconds and the time interval is 10 seconds. As shown in the figures, different formulations yield similar behaviour of the vessel.

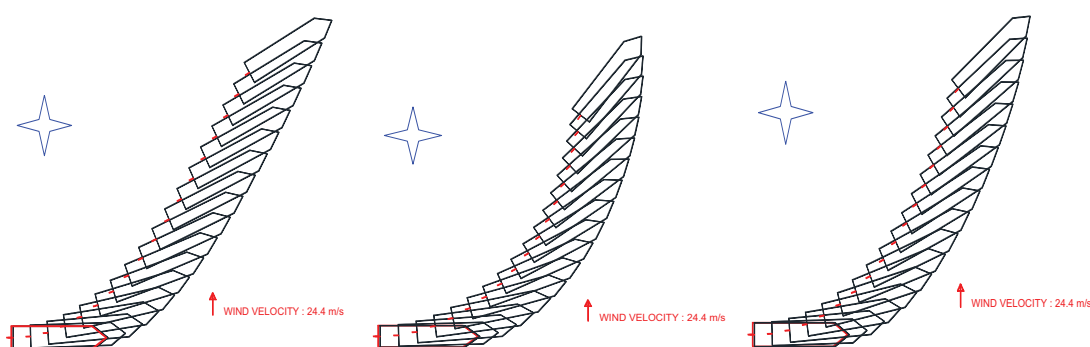


Figure 9. The effect of wind forces (BF 9) on a ship in surge. Isherwood (1994) formulation (left), Blendermann (1994) formulation (middle) and DNVGL-ST (2018) formulation (right).

5.2. Current forces

The direction of the current is perpendicular to the vessel's heading. There are no active thrusters other than the propeller. The current velocity is 3 knots. The effect of wind and waves are not taken into consideration. Typical examples of manoeuvring simulations based on Remery and Van Oortmerssen (1973), Nienhuis (1987), API RP 2SK (2005), IMCA M140 (2000) and DNVGL-ST-0111 (2018) formulations are shown in Figure 10. The total simulation time is 180 seconds and the time interval is 10 seconds.

5.3. Wave drift forces

As explained in Section 2.8, only the second order mean wave drift forces need to be taken into account. Wave drift forces are estimated by the empirical method recommended by DNVGL-ST-0111 (2018). This method considers the wave period which has strong influence on wave drift predictions. Figure 11 illustrates the wave drift effect in BF 9 conditions with a significant wave height of 7.4 m.

Direction of waves is perpendicular to the vessel's heading. There are no active thrusters other than the propeller. The effect of wind and current are not taken into consideration.

In the following sections the effect of the azimuth thruster on manoeuvring performance of the vessel is investigated by simulating the behaviour of the vessel under the effects of wind, waves and current. In order to provide objective comparisons the wind, current and wave drift loads are estimated by DNVGL-ST-0111 (2018) formulations.

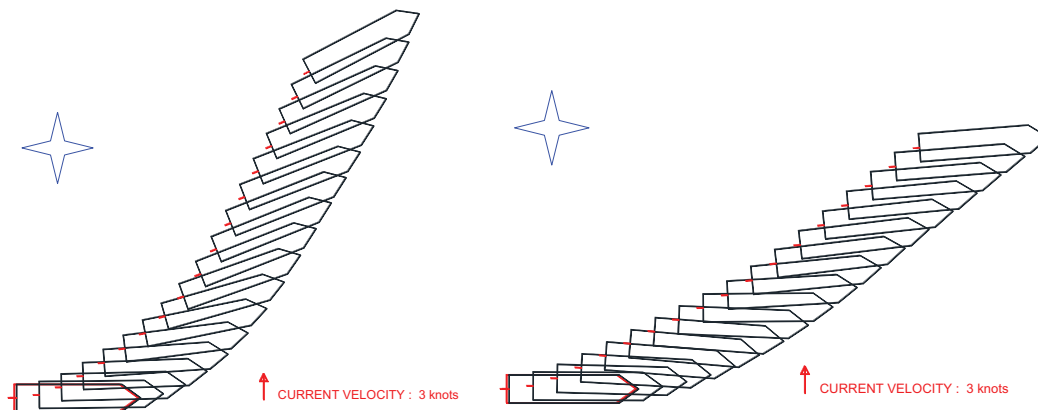


Figure 10. The effect of current forces on a ship in surge. From the left: IMCA M140 (2000), and DNVGL-ST-0111 (2018) formulations.

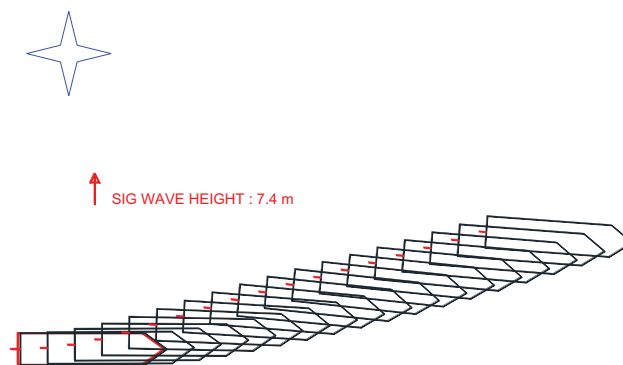


Figure 11. The effect of wave drift forces with DNVGL-ST-0111 (2018) formulation

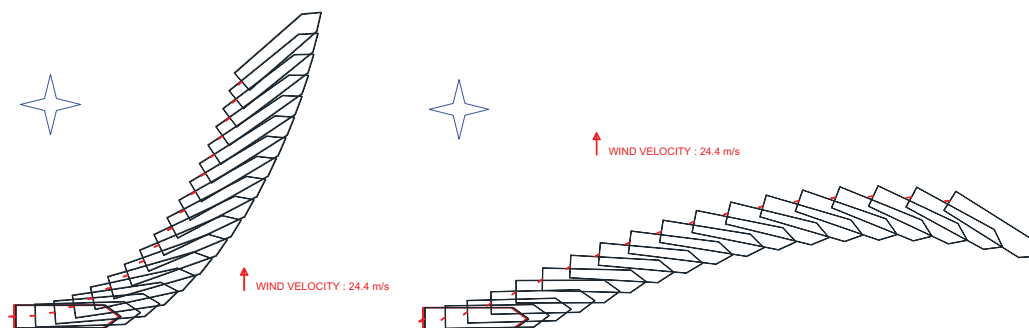
6. The Efficiency of the Azimuth Thruster in BF 9 Conditions

It is shown in Section 4 that the azimuth thruster located in the forward part of the vessel is very effective in calm water conditions while the vessel is towing a trawl net of 40 metric tons with a steady speed of 3 knots. In Section 5, the environmental loads due to wind, current and waves in BF9 conditions are estimated. This section presents the results of manoeuvring simulations with the azimuth thruster under the influence of wind, current and waves in BF9 conditions. The trawler speed is 3 knots and the propeller rotation rate is 88 rpm, unless stated otherwise.

6.1. Keeping track against wind loads

In this section, we illustrate the efficiency of the azimuth thruster in keeping track at 3 knots forward speed with a trawl pull load of 40 metric tons against wind forces and moment in BF 9 conditions with

a mean wind speed of 24.4 m/s. The wind direction is perpendicular to vessel's heading. The total simulation time is 180 seconds and the time interval is 10 seconds.



Rudder = 0 deg, Thruster = 0 kN, Propeller = 88 rpm Rudder = 35 deg, Thruster = 0 kN, Propeller = 100 rpm

Figure 12. The effect of the propeller and the rudder in BF9 conditions using DNVGL-ST-0111 (2018) formulation. The speed increases with increasing propeller rotation rate.

Figure 12 shows a comparison of the behaviour of the vessel in BF 9 conditions at neutral rudder angle (left) and with a rudder angle of 35 degrees (right). Current and wave effects are ignored and the wind forces are estimated by DNVGL-ST-0111 (2018) formulation. As shown in the figure, the propeller rate of rotation (88 rpm) and the forward speed of 3 knots are too low for the rudder to be effective. When the propeller rate of rotation is increased to 100 rpm the rudder becomes effective on controlling the vessels's heading against the wind. However, due to the increase in the propeller rate of rotation, forward speed of the vessel increases to 6 knots. Figure 13 shows the effect of azimuth thruster on keeping track against the wind. The thrust is increased up to 130 kN with constant thruster angle of 90 degrees (perpendicular to vessel heading).

The azimuth thruster needs a thrust more than 100 kN to counteract the environmental loads on the ship, as Figure 13 shows.

The results indicate that in order to maintain track against wind loads in mean BF 9 conditions, at least 120-150 kN thrust is required for this ship. The effectiveness of the rudder at 3 knots forward velocity is negligible. The propeller rate of rotation needs to be increased for the rudder to be effective, resulting in an increase in the forward velocity.

6.2. Keeping track against current loads

In this section, the efficiency of the azimuth thruster in keeping track

- with a trawl pull load of 40 metric tons
- at 3 knots forward speed and
- a propeller rotation rate of 88rpm

against current forces with a mean current velocity of 3 knots is illustrated. The current direction is perpendicular to vessel's heading.

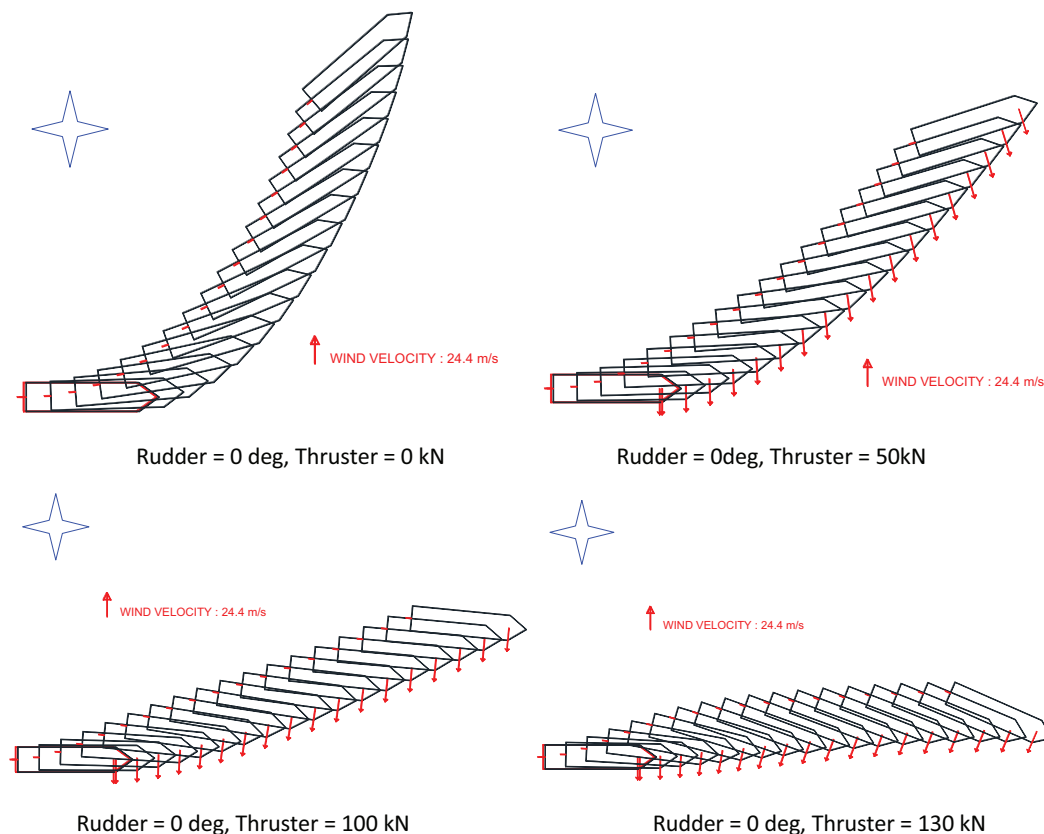


Figure 13. The effect of the azimuth thruster in BF 9 conditions using DNVGL-ST-0111 (2018)

Figure 14 shows a comparison of the behaviour of the vessel in uniform current with a mean velocity of 3 knots with neutral rudder angle (left) and with a rudder angle of 35 degrees (right). The azimuth thruster produces zero net force in these simulations. Wind and wave effects are ignored and the current forces and moment are estimated by DNVGL-ST-0111 (2018) formulation. As shown in the figure, the propeller rotation rate at 88 rpm and the forward ship speed at 3 knots are too low for the rudder to be effective. When the propeller rotation rate is increased to 100 rpm, the rudder becomes effective on controlling the vessels's heading against the current. However, due to the increase in the propeller rate of rotation, forward speed of the vessel increases to 6 knots.

Figure 15 shows the effect of the azimuth thruster on keeping track against the current. The thrust is increased from 50 kN to 100 kN at a constant thruster angle of 90 degrees (perpendicular to vessel heading). The present computations also showed that the response of the ship is much better when the azimuth thruster and the rudder work together (despite a decrease in the thruster angle).

These results indicate that in order to maintain track against current loads due to a 3 knots uniform current, at least 100-120 kN thrust is required. The effectiveness of the rudder at 3 knots forward velocity is negligible and for the rudder to be effective the propeller rate of rotation needs to be increased resulting in an increase in the forward velocity.

6.3. Keeping track against wave drift loads

The efficiency of the azimuth thruster in keeping track against wave drift loads is presented in this section. The ship is moving forward

- with a trawl pull load of 40 metric tons
- at 3 knots forward speed and
- a propeller rotation rate of 88rpm

against wave drift forces and moment in mean BF 9 conditions with a significant wave height of 7.4 m. The wave direction is perpendicular to vessel's heading. Wind and current effects are ignored and the wave drift forces and moment are estimated by DNVGL-ST-0111 (2018) formulation. The total simulation time is 180 seconds and the time interval is 10 seconds. Results with and without the azimuth thruster are given in Figure 16.

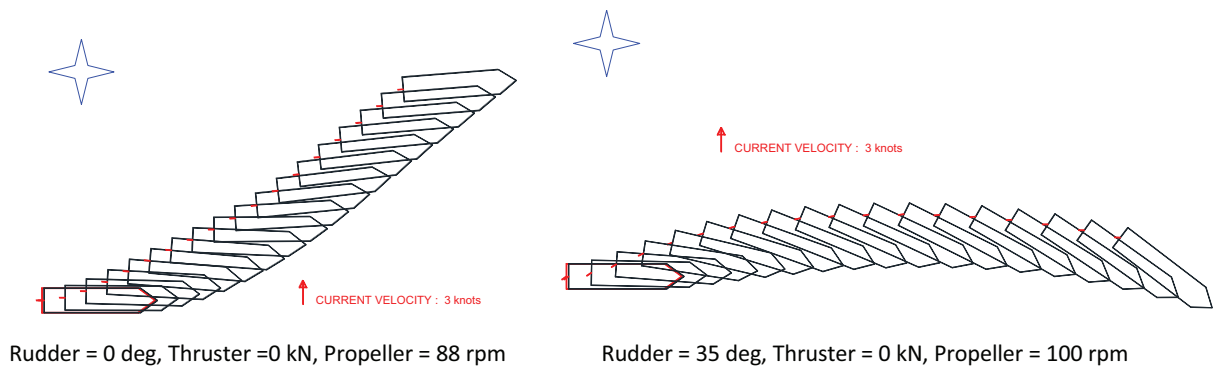


Figure 14. The response of the ship to current loads without the azimuth thruster using DNVGL-ST-0111 (2018) formulation

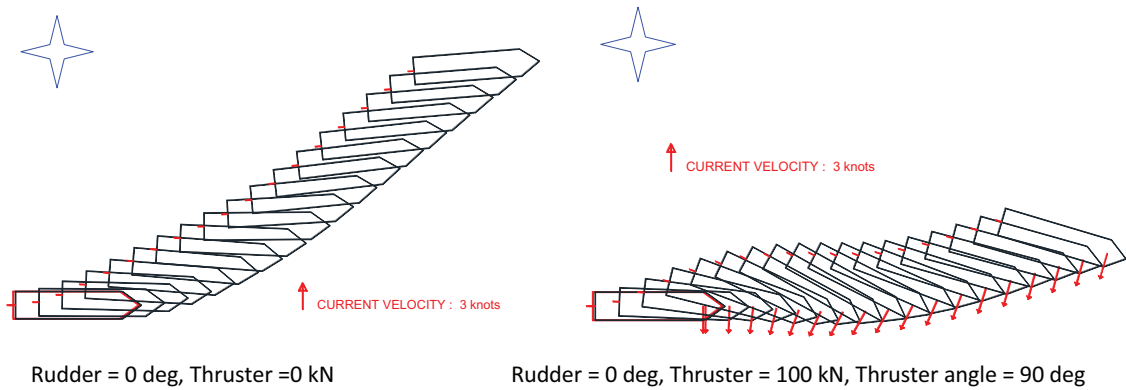


Figure 15. The response of the ship to current loads with the azimuth thruster using DNVGL-ST-0111 (2018) formulation.

These results indicate that the ship can maintain its course in waves without the thruster but the sway distance is considerably high. With

- an azimuth thruster providing 50 kN thrust
- at an angle of 60 degrees and
- a rudder at 35 degrees,

the sway translation distance of the ship can be limited.

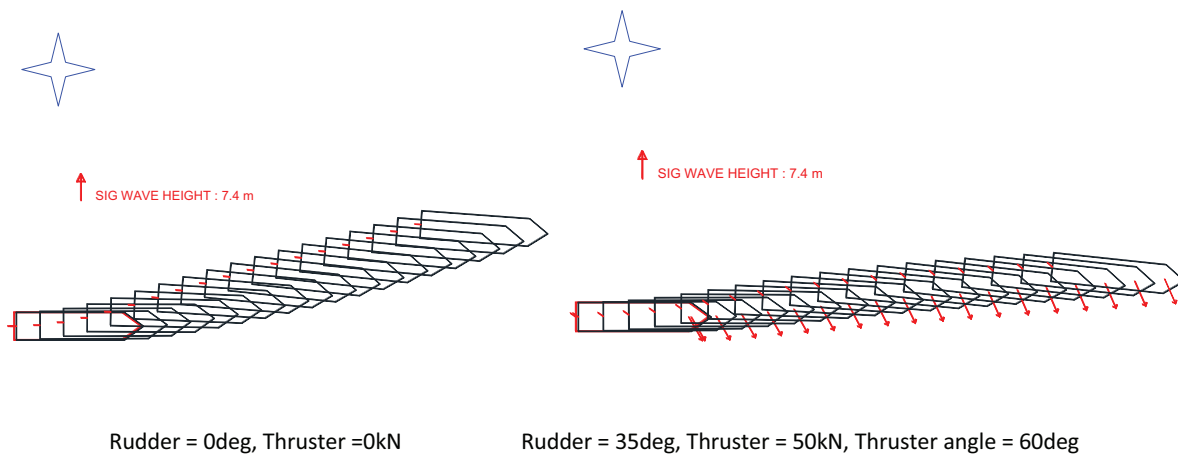


Figure 16. Ship response to wave drift loads using DNVGL-ST-0111 formulation in BF 9.

7. Maximum environmental conditions for keeping track

This section presents maximum wave, wind and current conditions in which the vessel is able to keep track with an azimuth thruster of about 175 kN effective thrust (205 kN nominal thrust) capacity. Depending on the current velocity, four cases are considered in the following sub-sections. Wind, current and wave drift forces are estimated by DNVGL-ST-0111 (2018) formulations. The wind and wave characteristics for Beaufort 6-9 (BF 6-9) conditions are determined in accordance with the recommendations of DNV GL ST-0111 (2018) as given in Table 4.

Figure 17 presents various environmental scenarios and the required thrust for the vessel to maintain its course. The efficiency of the azimuth thruster in keeping track

- with a trawl pull load of 40 metric tons
- at 3 knots forward speed
- a propeller rotation rate of 88rpm

against wind and wave forces and moment is evaluated. In this figure, the ship cannot keep its track when the required thruster force is above 175 kN.

Table 4. Definition of sea conditions in Beaufort scale.

Beaufort No	Description	Wind speed [m/s]	Significant wave height [m]	Modal wave period [s]
6	Strong breeze	13.8	3.1	8.5
7	Moderate gale	17.1	4.2	9.0
8	Gale	20.7	5.7	10.0
9	Strong gale	24.4	7.4	10.5

8. Summary of Results and Conclusions

In this paper, results of computational analyses on the manoeuvring performance of astern trawler are presented. The manoeuvring performance of the vessel is assessed and simulated for two different configurations with a ship forward speed of 3 knots and a trawl pull load of 40 metric tons in calm

water and Beaufort 9 environmental conditions. The first configuration considers the propeller and the rudder only while the second configuration also takes into account an azimuth thruster installed in the fore body.

First, the manoeuvring derivatives are computed by empirical and CFD based methods and the manoeuvring equations of motion are set. The external forces due to the propeller, rudder and the azimuth thruster are estimated by suitable semi-empirical methods. Several empirical methods to estimate the environmental forces due to wind, waves and current are compared and DNVGL-ST-0111 (2018) formulation is selected as the standard method.

In Base Case (1) configuration, the vessel is fitted with an azimuth thruster in the forebody. The nominal thrust of this thruster at full power is specified as 205 kN by the manufacturer. Because of the thrust losses due to the thruster-hull interaction, current and ventilation effects the actual thrust is estimated to be limited to about 175 kN.

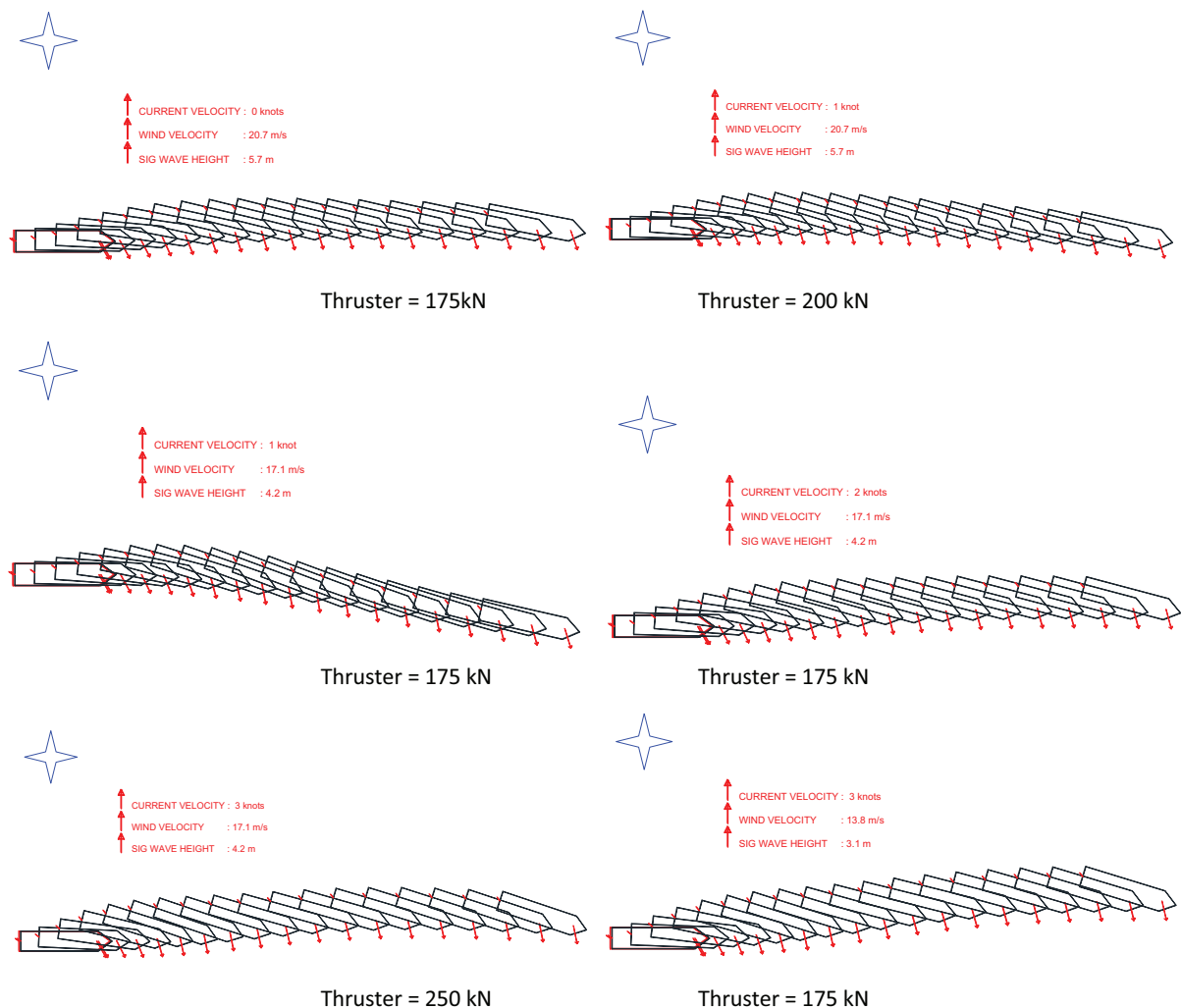


Figure 17. Ship motion response under different environmental conditions. The rudder is at 35 degrees and the thruster angle is 60 degrees in all simulations.

In calm water conditions at 3 knots forward speed (propeller rpm 88) with a trawl pull load of 40 metric tons it is shown that the turning ability of the vessel with 35-degree rudder angle is satisfactory. However, in BF 9 conditions with a mean wind speed of 24.4 m/s the rudder becomes ineffective at

keeping track or turning the vessel. Similar effect is observed with increasing wave height and current velocity. The rudder efficiency in rough weather conditions could be increased by increasing the propeller rpm resulting in an increased ship forward speed. However, the focus of this study is the manoeuvring performance at 3 knots forward speed with a trawl pull load of 40 metric tons. Hence, the propeller rpm is assumed to be constant at 88 rpm while considering many of the cases with the environmental loads.

In BF 9 conditions with a wind speed of 24.4 m/s (current and wave effects are ignored) it is estimated that in order to maintain track against wind loads at least 120-150 kN thrust is required. When the combined effects of wind and significant wave height of 7.4 m are taken into consideration, the required minimum thrust of the azimuth thruster increases. Due to the thrust losses the actual thrust is estimated to be limited to about 175 kN. Therefore, it is concluded that the proposed azimuth thruster could not be able to produce sufficient thrust to keep track in BF 9 wind and wave conditions even without current effects. Further analyses have been carried out to consider the maximum environmental conditions in which the vessel could maintain track by using the azimuth thruster. It was found that the ship can maintain its course at a maximum of BF 8 with the azimuth thruster when the wind, wave and current loads are combined.

Acknowledgement

The present work is supported by Skipsteknisk, Türkiye.

References

- API RP 2SK, (2005) *“Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures – Recommended Practice”*, American Petroleum Institute (API), Third Edition, October 2005.
- Blendermann, W. (1994) *“Parameter Identification of Wind Loads on Ships”*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 51, pp 339-351.
- DNVGL-ST-0111, (2018) *“Assessment of Station Keeping Capability of Dynamic Positioning Vessels”*, DNV-GL, 2018.
- IMCA M140, (2000) *“Specification for DP Capability Plots”*, The International Marine Contractors Association, June 2000.
- Inoue S., Hirano M. and Kijima K., (1981) *“Hydrodynamic Derivatives on Ship Manoeuvring”*, International Shipbuilding Progress, Vol. 28, No 321.
- Isherwood. R. M., (1972) *“Wind Resistance of Merchant Ships”*, Transactions of RINA, Vol. 115, pp 327-338.
- Kim, S.-H., Lee, C.-K. and Lee, S.-M. (2021) *“Estimation of Maneuverability of Fishing Vessel Considering Hull-Form Characteristics”*, J. Marine Science and Eng., 9, 569
- Nienhuis. U., (1987) *“Simulations of Low Frequency Motions of Dynamically Positioned Offshore Structures”*, Transactions of RINA, Vol. 129.



OCIMF 94, (1994) *"Prediction of Wind and Current Loads on VLCCs"*, Oil Companies International Marine Forum (OCIMF), Second Edition.

Remery G. F. M. and van Oortmersen G., (1973) *"The Mean Wave, Wind and Current Forces on Offshore Structures and their Role in the Design of Mooring Systems"*, Offshore Technology Conference, Paper Number OTC 1741, 1973.

Schlichting, H., (1979) *"Boundary-Layer Theory"*, 7th edition McGraw-Hill.

Yasukawa, H., & Yoshimura, Y. (2015). Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. *Journal of Marine Science and Technology*, 20(1), 37-52.

Yoshimura, Y. and Ma, N. (2003) *"Manoeuvring Prediction of Fishing Vessels"*, MARSIM'03, Conf. Proc., pRC-29-1-10, 25-28 Aug. 2003, Kanazawa, Japan.

Denizaltılarda Stirling Motor Temelli Havadan Bağımsız Tahrik Sistemlerinin (AIP) Değerlendirilmesi

Kadir Beytullah Gündüz ¹, Yasemin Arıkan Özden ²

^{1,2} Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Yıldız, Türkiye

¹ (sorumlu yazar), kgunduz@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6878-8357

² yarikan@yildiz.edu.tr, 0000-0001-9909-0859

ÖZET

Ülkelerin savunma güçlerinde özellikle donanma kuvvetleri önemli bir yere sahiptir. Donanma kuvvetlerinin mihenk taşı olan denizaltılar II. Dünya Savaşı'nda ne kadar önemli bir güç olduğunu etkili bir biçimde göstermiştir. O günden günümüze denizaltılarda yapılan teknolojik gelişmeler bir hayli hız kazanmıştır. Bahsi geçen gelişmelerin en başında ise kuşkusuz tahrik sistemlerinde yapılan gelişmeler gelmektedir. Özellikle AIP (Havadan Bağımsız Tahrik) sistemlerinin kullanımı ile hızlı bir gelişim gözlenmiştir. Klasik dizel-elektrik denizaltılardan kapalı çevrimlere yakıt hücresi teknolojisine sahip denizaltılardan Stirling temelli denizaltılara kadar birçok varyant uygulanmaktadır. İsveç ve Japonya gibi gelişmiş ülkelerin donanmalarında da Stirling motor kullanımının denizaltı uygulamaları göze çarpmaktadır. Stirling motorlarının Yakıt hücrelerine kıyasla daha düşük yakıt ikmal maliyetleri ve MESMA sistemine göre daha sessiz olması başlıca avantajları olmaktadır. Ayrıca içten yanmalı motorlara kıyasla egzoz gaz atımının daha kontrollü olması tercih edilmesinin başlıca sebepleri arasında yer almaktadır. Stirling motorlarının yakın geçmişte geliştirilmesi ve NASA'ya ait radyoizitop aracında temel güç kaynağı olarak tercih edilmesi, motorun oksijene gerek duymaksızın ne kadar verimli ve bakım gereksiniminin minimum seviyede olduğunun göstergesidir. Bu makalede Stirling motorunun günümüze kadar gelen süreçte nasıl geliştirildiği ve denizaltı uygulamalarında neden tercih edildiği, avantajları ve geleceği hakkında irdelemelerde bulunulacaktır.

Anahtar kelimeler: Denizaltı, Havadan Bağımsız Tahrik Sistemi (AIP), Stirling motoru

Makale geçmişi: Geliş 08/05/2022 – Kabul 10/06/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1113622>

Assessment of Stirling Engine Based Air Independent Propulsion Systems in Submarines

Kadir Beytullah Gündüz¹, Yasemin Arıkan Özden²

^{1,2} Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering, Yıldız Technical University, Yıldız, Türkiye

¹ (corresponding author), kgunduz@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6878-8357

² yarikan@yildiz.edu.tr, 0000-0001-9909-0859

ABSTRACT

In the defense forces of countries, especially the navy forces have an important place. Submarines are the cornerstone of naval forces and their power has been effectively demonstrated in World War II. Since then, technological developments in submarines have accelerated considerably. Undoubtedly, the developments made in the propulsion systems are at the forefront of the mentioned developments. Especially with the use of AIP (Air Independent Propulsion Systems) systems, a rapid development has been observed. Many different propulsion systems are applied on submarines, classical diesel-electric submarines, closed-cycle submarines, fuel-cell technology and Stirling-based submarines. In the navies of developed countries such as Sweden and Japan applications of Stirling engines stand out. The main advantages of Stirling engines are lower refueling costs compared to Fuel cells and quieter operation than the MESMA system. In addition, the fact that the exhaust gas emission is more controlled compared to internal combustion engines is among the main reasons why it is preferred. The recent development of Stirling engines and the preference of NASA's radioisotope vehicle as the main power source shows how efficient the engine is without the need for oxygen and maintenance requirements at a minimum level. In this article, it will be discussed how the Stirling engine has been developed until today and why it is preferred in submarine applications, its advantages and its future.

Keywords: Submarine, Air Independent Propulsion (AIP), Stirling Engine

Article history: Received 08/05/2022 – Accepted 10/06/2022

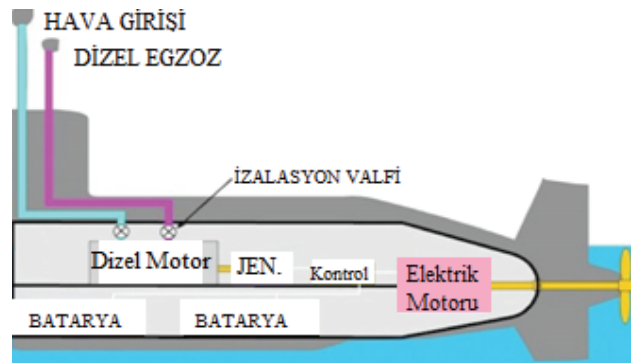
1. Giriş

Ülkelerin savunma ve taarruz yönünden donanma kuvvetleri oldukça önemli bir konuma sahiptir. Donanma kuvvetlerinde taarruz, çıkarma ve savunma alanlarında etkili olan birçok askeri taşıt bulunmaktadır. Bu taşıtların başında su altında gitmesiyle ayrı bir yere sahip olan denizaltılar gelmektedir. Denizaltıların birçok faaliyet için görev alabilmeleri ve oldukça uzun süren operasyonları gerçekleştirmeleri önemli bir enerji ihtiyaçlarının olduğunu göstermektedir. Denizaltıların satıha çıkmadan görevlerini yapabilmeleri ve kendi bünyelerinde enerjilerini sağlamaları hayati bir yere sahiptir. Bu alanda II. Dünya savaşından itibaren birçok gelişme yaşanmıştır.

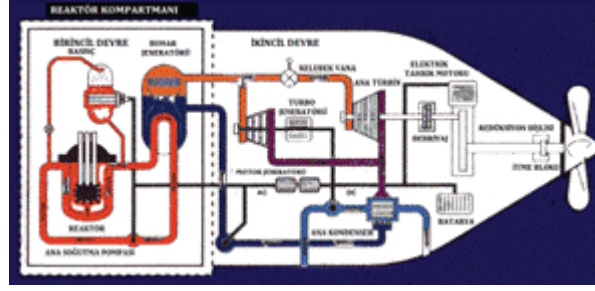
Denizaltılarda günümüze kadar farklı birçok tahrik sistemi kullanılmıştır. Geliştirilen yeni sistemler ile geçmişe göre çok daha kapsamlı niteliklere sahip denizaltılar uzun süren operasyon faaliyetlerini başarılı bir şekilde gerçekleştirebilmektedir. Genel olarak denizaltılarda kullanılan tahrik sistemleri klasik dizel-elektrik, AIP sistemler ve nükleer tahrikli sistemler olarak sınıflandırılabilir.

1.1. Tahrik Sistemlerine Göre Denizaltılar

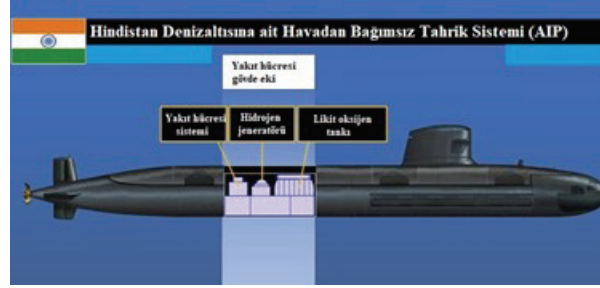
Denizaltıların en önemli bileşenini tahrik sistemleri oluşturmaktadır. Bunun başlıca nedeni ise tahrik sisteminin hareket ve manevraya doğrudan etki etmesi ve denizaltıların gizliliğinde önemli bir rol oynayan ses ve titreşim oluşturan ana etmen olarak gösterilmeleridir. Denizaltıların suyun altında hareketleri sırasında enerji üretimi için gerekli olan oksijen elementinden mahrum kalmaları denizaltıların kullanımındaki temel sorunu oluşturmaktadır. Operasyonel faaliyetler esnasında denizaltıların enerji üretimi için su yüzeyine çıkmaları denizaltıların en savunmasız zamanı olarak nitelendirilmektedir. Bu durum Şekil 1'de örneği gösterilmiş olan klasik dizel-elektrik sevk sistemine sahip denizaltıların en büyük sorunlarından biri olarak değerlendirilirken, diğer bir sorun ise suyun altında enerji üretmediği için su altındaki faaliyetlerin kısa periyotlar halinde ilerlemesidir. Yakın geçmişte farklı tip tahrik sistemlerinin gelişmesi ile bu sorun ortadan kalkmıştır. Özellikle nükleer sevk sistemine sahip denizaltıların dört kilogram uranyum elementinin radyoaktif enerjisiyle denizaltının kullanım ömründen daha fazla süre enerjisinin yetmesi bunun en büyük örneğini teşkil etmektedir (Şekil 2). AIP sistemler ise bu sorunu başka bir çözüm yolu ile aşmayı başarmıştır (Şekil 3). Havadan bağımsız olarak enerji üretebilen ve bunu nükleer güce sahip olmaksızın yapabilen birçok varyant bulunmaktadır. Nükleer denizaltılar da AIP sınıfına girebilir, ancak nükleer denizaltılar radyoaktif tehlike, yüksek maliyet ve yüksek teknoloji seviyesi nedeniyle çok yaygın değildir ve sadece altı ülke (ABD, Rusya, İngiltere, Fransa, Çin ve Hindistan) tarafından kullanılmaktadır (Watch, 2012).



Şekil 1. Klasik Dizel-Elektrik Tahrik Sistemi (Baino, 2018)



Şekil 2. Nükleer Tahrik Sistemi (Association, 2021)



Şekil 3. Havadan Bağımsız Tahrik Sistemi (Sutton, 2020)

1.2. Havadan Bağımsız Tahrik Sistemleri (AIP)

Klasik dizel-elektrikli denizaltıların özellikle yüksek hızlarda su altı seyir süreleri sınırlıdır. Dizel jeneratörleri çalıştırmak için şnorkel seyri yapmak zorunda kalan klasik dizel-elektrikli denizaltılar, bu durumdan kaynaklı savunma zafiyeti vermektedir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için nükleer tahrikli denizaltı uygulamaları yapılmıştır. Ancak bu çözüm teknolojik gereksinime ihtiyaç duymakla birlikte maliyetli olmaktadır. Aynı zamanda nükleer atık ürünlerinin atımı güvenlik problemi yaratmaktadır (Katoch, 2021).

Denizaltıların su altı seyir sürelerini arttırmanın daha ucuz ve güvenli bir yoluna duyulan ihtiyaç, yakıt hücresi, Stirling motoru gibi AIP sistemlerinin araştırılmasına yol açmıştır. Havadan Bağımsız Tahrik (AIP) sistemleri nükleer tahrik sistemlerine alternatif olarak geliştirilmiştir. AIP Sistemleri nükleer tahrik sistemleri ile kıyaslandığında, nükleer tahrik sistemleri kadar uzun sualtı operasyon süresi elde edemese de çok daha sessiz, düşük maliyetli, teknolojik gereksinimi daha az ve güvenli sistemler olarak tanımlanabilmektedir (Patrick, 2012). AIP sistemler, klasik dizel-elektrikli denizaltıların su altı operasyon sürelerini günlerden haftalara hatta aylara çıkarabilmektedir. Bu sebeple klasik dizel-elektrikli tahrik sistemlerine göre büyük bir avantaja sahip olmaktadır. AIP sistemlerin bir başka kayda değer özelliği ise klasik dizel-elektrikli denizaltılara kolayca entegrasyon işleminin yapılabilmesidir. Genel olarak entegrasyon işlemi paralel boy ekleme yöntemi ile yapılabilir de alternatif olarak tahrik sistemindeki modernizasyon işlemiyle de yapılabilir (Jang, 2021). Modernizasyon işleminde dizel jeneratörler daha kompakt ve güç oranı yüksek jeneratörler ile yenilenir, elektrik tahrik motoru güncel versiyonları ile değiştirilerek bu sırada kazanılan hacim ile AIP sistemin entegrasyon işlemi yapılabilir.

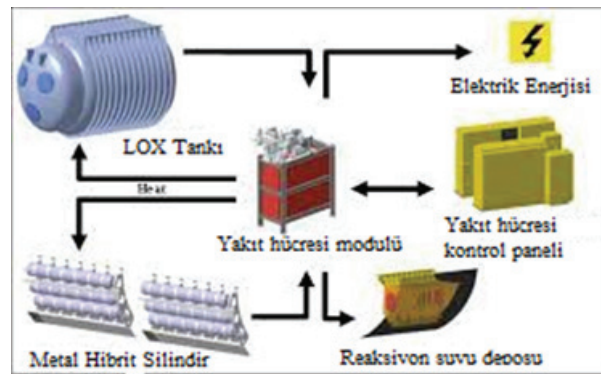
Günümüzde havadan bağımsız tahrik sistemlerinin birçok farklı tipi kullanılmakta ve temel aldığı enerji üretici sistemlerine göre kendi arasında ayrılmaktadır. Günümüze kadar olan gelişim süreci 1860'lı yıllara kadar uzanmaktadır. 1867 yılında geliştirilen, Narcís Monturiol i Estarriol denizaltısı peroksitle çalışan havadan bağımsız bir buhar motoru ile çalışmasıyla ilk AIP sistem olma özelliğini taşımaktadır (Joubert, 2008). 1908'de Rus İmparatorluk Donanması tarafından, basınçlı hava ile beslenen ve su altında tükenen benzinli bir motor kullanan denizaltı Pochtovy denize indirilmiştir (Gray, 1985).

Almanya'da Helmut Walther 1935'te kapalı çevrim olarak çalışan denizaltılar için türbin projesini tanıtmıştır. Walther'in türbini olarak adlandırılan bu sistem, İkinci Dünya Savaşı sırasında birkaç Alman denizaltısına kurulmuştur. Sovyetler Birliği'nde de İkinci Dünya Savaşı'ndan önce kapalı çevrim olarak çalışan güç sistemleri üzerine araştırmalar başlamıştır. Savaştan sonra, 50'li yıllardan itibaren, ağırlıklı olarak nükleer enerjili denizaltılar üzerine çalışmalar yapılmıştır. Daha sonraki yıllarda nükleer olmayan AIP sistemler üzerine araştırmalar hız kazanmıştır (Preston, 1988).

1950 yılında İngilizler HMS Explorer ve HMS Excalibur isimli havadan bağımsız tahrik sistemine sahip denizaltıları denize indirmiştir (Preston, 1988). Sovyetler Birliği de bu teknolojiyi denemiş ve bir deney denizaltısı inşa etmiştir. Hidrojen peroksit, uçucu olması, çeşitli metallerle yüksek oranda reaktif olması ve denizaltılar tarafından yüksek oranda tüketilmesi nedeniyle zamanla terk edilmiştir. Bunu denediği bilinen ülkeler, Sovyetler ve İngiltere'dir. Amerika Birleşik Devletleri denizaltı tahriki için yeterince küçük bir nükleer reaktör geliştirdiğinde hidrojen peroksiti terk etmiştir. (Preston, 1988). İkinci Dünya Savaşı sırasında Kriegsmarine, Walter peroksit sistemine alternatif olarak, TİP XXVIIIB Seehund cüce denizaltısının bir çeşidi olan "Klein U-boot" da dahil olmak üzere kapalı dizel çevrim sistemini ilk kez kullanarak birtakım deneyler yapmıştır (Rossler, 2001). Aşağıda günümüze kadar kullanılan başlıca havadan bağımsız tahrik sistemleri incelenmektedir.

1.2.1. Yakıt Hücresi

Yakıt hücresi teknolojisi basit anlamda kimyasal reaksiyon kullanarak elektrik enerjisi üreten bir sistem olarak tanımlanmaktadır. Şekil 4'te yakıt hücresinin sistem bileşenleri verilmiştir. Yakıt hücreleri, kimyasal enerjiyi gürültü veya yanma olmaksızın doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren enerji dönüştürücülerdir. Yakıt hücrelerinde, depolanan hidrojen ve oksijen ile elektroliz işlemi gerçekleştirilerek su ve elektrik enerjisi açığa çıkarılmaktadır. Elektrik enerjisi doğrudan denizaltının aküsünü beslemek için kullanılmaktadır. Egzoz gazı üretmediği ve çok az ısı yaydığı için, yakıt hücresi sistemi, dalış basıncından bağımsız olarak ve denizaltının akustik izi üzerinde herhangi bir bozulma etkisi olmaksızın çalışabilmektedir. (ThyssenKrupp, 2020).



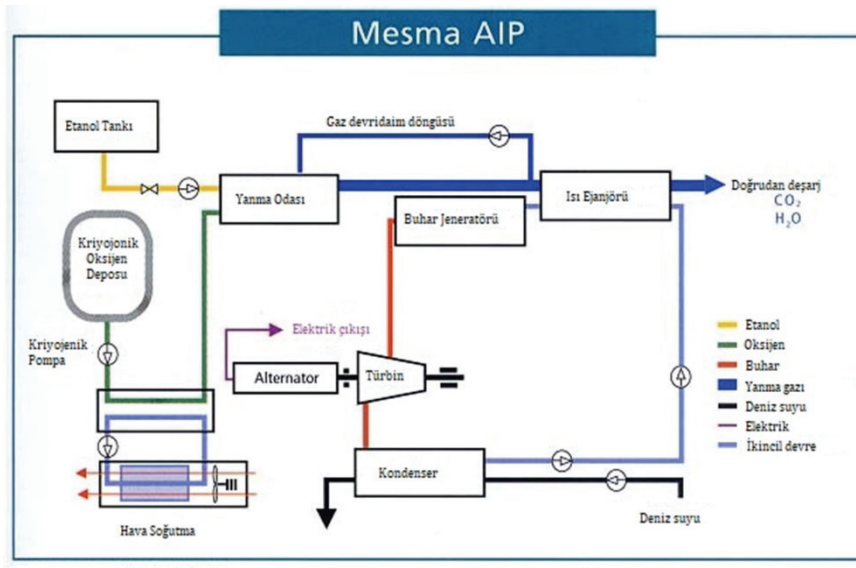
Şekil 4. Yakıt hücresi (FC) çalışma şematiği (Krummrich & Gmbh, 2010)

Halihazırda yakıt hücreli tahrik sistemleriyle çalışan veya yapım aşamasında olan çok sayıda denizaltı bulunmaktadır. Düşük gürültü ve kızılötesi izler, yüksek verimlilik ve düşük bakım gereksinimleri, yakıt hücresi sistemlerini nükleer olmayan yeni denizaltılar için alternatif çözüm haline getirmektedir. Yakıt hücresi sisteminde hidrojen ve oksijen stoklama zorunluluğu ağırlık ve hacim konusunda zorlayıcı olmaktadır. Ayrıca AIP stoklarının ikmali için özel şartlar ve araçlar da sağlanmalıdır. Yakıt hücrelerinin

karmaşık çalışma prensibi ve üretim zorluğu birkaç üreticiyi tekel durumunda tutmaktadır. (ThyssenKrupp, 2020).

1.2.2. MESMA (Otonom Denizaltı Enerji Modülü)

MESMA sisteminin çalışma prensibi kısaca alkol türevi olan metanol veya etanol ile oksijenin yakılmasıyla su buharının oluşturulması ve bu buharın da türbinden geçirilerek tahrik sağladığı kapalı devre buhar türbinlerine dayanmaktadır. Şekil 5'te MESMA sisteminin çalışma şematiği verilmiştir. Türbin kullanarak elektrik enerjisi ürettiği için çalışma prensibi olarak nükleer tahrikli denizaltılara benzerlik göstermektedir. Nükleer tahrik sisteminden tek farkı enerji kaynağı olarak nükleer reaktör yerine etanol-oksijen karışımını kullanmasıdır (Buckingham, Mimeche, Hardy, & Mimarest, 2008).



Şekil 5. MESMA AIP sisteminin şematik gösterimi (Baino, 2018)

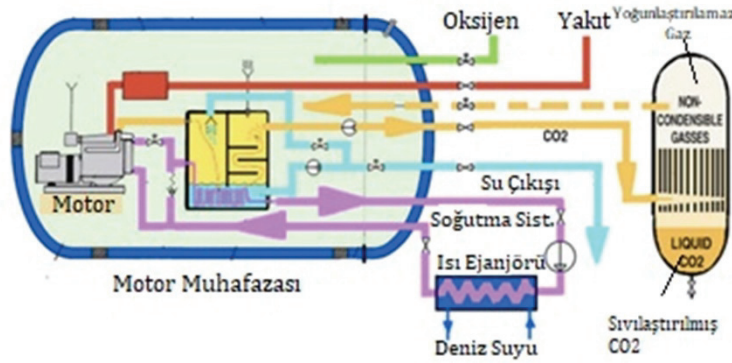
MESMA'nın avantajları alternatifleriyle karşılaştırıldığında daha yüksek su altı seyir hızlarına izin vermesi ve daha yüksek güç çıkışı sunmasıdır. En büyük dezavantajı ise düşük verimliliğidir. Buna ek olarak oksijen tüketim hızı çok yüksektir ve karmaşık bir sisteme sahiptir. Belirtilen dezavantajlarından dolayı birçok donanma MESMA yerine Stirling motoru veya yakıt hücresi alternatiflerini tercih etmektedir (Kerros, Inizan, & Grousset, 2002).

1.2.3. Kapalı Dizel Çevrim

Kapalı dizel çevrimi, denizaltı tam dalmış durumdayken dizel makinaları çalıştırmak suretiyle depolanmış oksijeni kullanarak elektrik enerjisi üretmeye dayanmaktadır (Şekil 6). Satıhtayken yani yüzeydeyken veya şnorkel derinliğindeyken dizel makinalar normal şekilde çalıştırılmaktadır. Oksijenin, argon gibi durağan gazlarla karıştırıldığı kapalı devre dizel teknolojisinde, yanma sonrası da bu durağan gazlar geri dönüşüme tabi tutulurken, diğer gazlar soğutulurken gemiden uzaklaştırılmaktadır (Tihonov, Bazykin, & Mukhanov, 2019).

Kapalı dizel çevrim sistemi, dizel jeneratörlerin yüksek gürültü ile çalışması ve dizel motorların su altındayken çalışabilmesi için gereken oksijen miktarının fazla olması diğer tip AIP sistemlere karşı geri planda kalmasına neden olmuştur. 1960'larda bu teknolojiyi kullanan Sovyet denizaltıları, yangın riskinin yüksek olmasından dolayı kapalı dizel çevrimini kullanmayı bırakmışlardır. Kapalı Dizel Çevrim

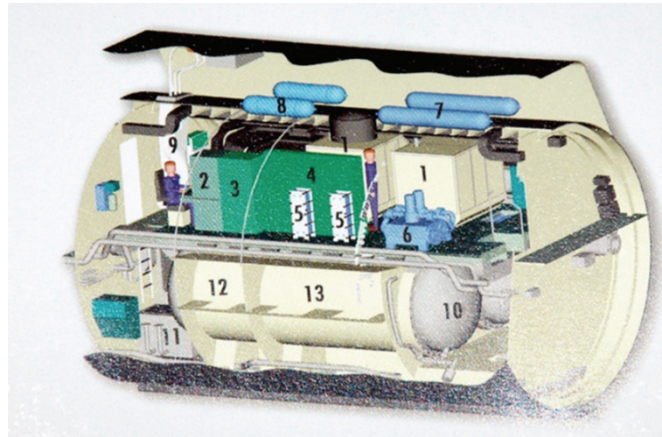
sistemi nispeten daha ucuz olmasına ve standart dizel yakıt kullanımıyla lojistiği basitleştirmesine rağmen modern denizaltılar için tercih edilmemektedir. (Buckingham vd., 2008).



Şekil 6. Kapalı dizel çevrim AIP sisteminin şematik gösterimi (Coates, 2013)

1.2.4. Stirling Motoru Temelli AIP Sistemi

1980'li yıllarda Stirling motorlu AIP sistemi ilk olarak İsveçli Kockums şirketi tarafından bir denizaltıda kullanılmıştır. Nükleer sonrası dönemde üretilen ilk modern AIP sistem olma özelliğini taşımaktadır. Stirling motorları dıştan yanmalı bir motor olma özelliğiyle iki temel sorunla başa çıkabilmektedir. İlki patlamasız sessiz yanma ile çalışabilmesi ve basit termodinamik çevrimi sayesinde herhangi bir sıcaklık farkı ile çalışabilmesidir. Yakıt hücrelerine yakın bir sessizlikte çalışması, basit sistem prensipleri ve hidrojen stokuna gerek duymamasıyla öne çıkmaktadır. Olgunlaşmış ve basit bir teknoloji olduğundan güvenli ve yaygın kullanılmaktadır. (STM ThinkTech, 2021) Ömür devri maliyeti rakiplerine oranla oldukça düşük olmaktadır. Dezavantajı ise verimli çalışma derinliği kısıtlaması olarak gösterilmektedir. Şekil 7'de Stirling AIP sistem modülü gösterilmiştir.



Şekil 7. Stirling AIP Modülüne ait denizaltı kesit modeli (Özden, 2010)

1.3. Havadan Bağımsız Tahrik (AIP) Sistemlerinin Kıyaslanması

Hali hazırda kullanılan havadan bağımsız tahrik sistemleri üstünlükleri ve zayıflıkları yönünden karşılaştırılmıştır. Donanmalar tarafından en yaygın tercih edilen sistemlerin yakıt hücresi ve Stirling motoru olduğu görülmektedir. Havadan bağımsız tahrik sistemlerinin başlıca avantaj ve dezavantajları aşağıda Tablo 1'de özetle sunulmuştur.

Tablo 1: AIP sistemlerin başlıca avantaj ve dezavantajları

AIP Sistemler	Avantajları	Dezavantajları
Yakıt Hücresi	<ul style="list-style-type: none"> • AIP sistemleri arasında en sessiz sistemdir (Mart & Margeridis, 1995). • Düşük sıcaklık ve yüksek verimle çalışabilmektedir. • Günümüzde yaygınlaşan en ileri teknolojiye sahip AIP sistem olarak görülmektedir. • Uzun kullanım ömrüne sahiptir. • Yakıt Pilleri, belirli koşullar altında %80'in üzerinde bir verime ulaşabilmektedir (J. C. Lee & Shay, 2018). 	<ul style="list-style-type: none"> • Hidrojen ve oksijen stoklama zorunluluğu vardır. Bu yüzden ağırlık ve hacim konusunda olumsuz etkisi vardır. • Karmaşık çalışma prensibine ve üretim zorluğu bulunmaktadır. Bu nedenle birkaç üretici tekel konumundadır (Fruhling & Schiemann, 2015). • Diğer AIP sistemleri arasında en maliyetli olanıdır.
MESMA	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek güç çıkışı sunmaktadır. • Bu sayede AIP'ler arasında en yüksek sualtı seyir hızına ulaşabilmektedir. • Derinlik limiti olmamasıyla öne çıkmaktadır. 	<ul style="list-style-type: none"> • Oksijen ve yakıt tüketimi oldukça fazladır. • Düşük verime sahiptir. • Sistem donanımı hantal hacimli olması önemli olumsuz özelliğidir (Jang, 2021). • Gürültülü seviyesi yüksektir. • Karmaşık tesisat sistemlerine sahiptir.
Kapalı Dizel Çevrim	<ul style="list-style-type: none"> • Oldukça basit bir sisteme sahiptir. • Ek bir AIP modülüne ihtiyaç duymamaktadır. • İlk yatırım maliyeti düşüktür. • Standart dizel yakıtı kullanmaktadır. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dizel makine çalıştırdığı için yüksek oksijen gazına ihtiyaç duymaktadır. • Yangın riski oldukça yüksektir. • Eski bir sistemdir ve günümüzde kullanılmamaktadır.
Stirling Motor	<ul style="list-style-type: none"> • Yakıt hücrelerine yakın bir sessizliğe sahiptir. • Basit sistem prensipleri ve hidrojen stokuna gerek duymaması öne çıkmaktadır. • Kullanılan ilk modern AIP sistemidir. Bu nedenle olgunlaşmış ve basit bir teknolojiye sahiptir. • Güvenli ve yaygın olarak kullanılmaktadır. • Ömür devri maliyeti rakiplerine oranla oldukça düşüktür. • Egzoz atımı oldukça basit bir sisteme dayanmaktadır (H. Nilsson, 1988). 	<ul style="list-style-type: none"> • Akustik ve termal iz oluşturmaktadır. • Verimli çalışma derinliği 250-300 metre ile sınırlıdır (Ahmed, Huang, Ahmed, & Wang, 2020). • Hareketli parçaların bulunması sebebiyle yakıt hücresi sistemine oranla gürültülü olmaktadır. • Hacim olarak büyüktür ve güç/hacim oranı düşüktür.

Tabloda AIP sistemlerin olumlu ve olumsuz tarafları özetlenmiştir. AIP sistemi seçilirken uygulanacağı denizaltının özellikleri ve üretim amacı dikkate alınmalıdır. Denizaltıda kullanılacak olan AIP sisteminin seçiminde birçok parametre göz önünde bulundurulmaktadır. AIP sistemlerinin birbirleri arasındaki avantajları ve dezavantajları göz önüne alındığı zaman, iki farklı AIP sistemi ön plana çıkmaktadır. İlk olarak yakıt hücresi tercih edilebilir seçenek olarak görülmektedir. Yakıt hücresinin diğer AIP sistemlere

göre oldukça yüksek verime sahip olması ve son yıllarda üretilen ve yapılması planlanan denizaltılarda tercih edilmesi büyük avantaj sağlamaktadır (Jang, 2021). Diğer yandan kimyasal reaksiyon sonucu elektrik üretimini gerçekleştirdiği için egzoz atımı, yanma odası gibi problemler doğurmamaktadır (Psoma & Sattler, 2002). Buna ek olarak en sessiz AIP sistem olduğu için akustik iz oluşturmamaktadır. Bu özellik tercih edilmesindeki başlıca sebeplerinden biri olarak görülmektedir (Han, Charpentier, & Tang, 2012).

Yakıt hücresine rakip olarak görülen diğer bir sistem ise Stirling motorudur. Stirling AIP sistemi ilk modern AIP sistem örneğini teşkil etmektedir. Bu nedenle uzun yıllar boyunca geliştirilme imkânı bulmuştur. Ayrıca yakıt hücresi dışında diğer AIP sistemlerle kıyaslandığında daha sessiz bir sistemdir (Han vd., 2012). Dıştan yanmalı olarak çalışması sebebiyle basit bir çalışma prensibine sahiptir. Yakıt hücresi sistemi ile kıyaslandığındaki en büyük avantajı hidrojen stokuna gerek duymamasıdır. Günümüzdeki AIP sistemine sahip denizaltılarda yaygın kullanımı mevcuttur (bkz. Tablo 2). Yakıt hücresi gibi teknolojik gereksinimlerinin yüksek olmaması sebebiyle belirli teknolojik birikimi olan ülkelerin kendi Stirling AIP sistemini geliştirmesi mümkün olabilmektedir.

Stirling motoru dıştan yanmalı bir motor olsa da ısı ile çalıştığı için belirli bir termal iz oluşturmaktadır. Buna ek olarak hareketli parçaların bulunması gürültü yayarak akustik iz oluşturmaya sebebiyet vermektedir. Stirling AIP sisteminin en büyük dezavantajlarından biri de çalışma derinliğinin kısıtlı olmasıdır. Bu dezavantaj, denizaltının 300 metreye kadarki dalmış durumdayken AIP sistemi aktive ederek bataryaları doldurması, sonrasında ise pasif duruma getirip daha derine inerek operasyonunu gerçekleştirmesi ile mümkün görünmektedir. Stirling AIP sistemi, denizaltının özellikleri ve üretim amacı doğrultusunda tercih edilebilir sistem olarak değerlendirilebilir.

2. Stirling Motoru

Stirling motorunun mucidi İskoç kilisesinin başrahipliğini yapan Robert Stirling (1790-1878), kendi icadı olan Stirling motoruna hava motoru adını vermiştir. O günlerde buhar motoru pek çok alanda kullanılmaktaydı ancak buhar motorları sıklıkla patlayıp insanların ölümüne yol açmaktaydı bu nedenle Stirling motoru alternatif bir motor olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1816 yılında Stirling yeni "hava motoru" için ilk patentini almıştır. Bunu izleyen yıllarda helyum ve hidrojen gibi genleşme katsayısı yüksek olan gazlar işletme akışkanı olarak tercih edilmeye başlanmıştır. Stirling motorları kendi başına bir motor sınıfını tanımlamaktadır. Bu motorlar sıcak hava veya helyum gibi gazları kapalı bir çevrimde sürekli kullanan motorlar olarak nitelendirilmektedir.

Motor içindeki gaz içten yanmalı motorlar gibi motor dışına atık olarak gönderilmez aksine motor çevriminin bölümleri arasında kullanılmaktadır. Stirling motorunun içindeki sıcak gaz soğuk rejeneratör içinden aktığında onu ısıtmaktadır. Bu, havayı ısısının geri kalanını kaybedeceği ve çevrimin tamamlanacağı motorun soğuk tarafına geçmeden önce, bir miktar soğutmaktadır. Bu işlem, bir çevrimini her tamamladığında egzoz yoluyla kalan bütün ısısını dışarı atan içten yanmalı motorlarla benzerlik göstermektedir.

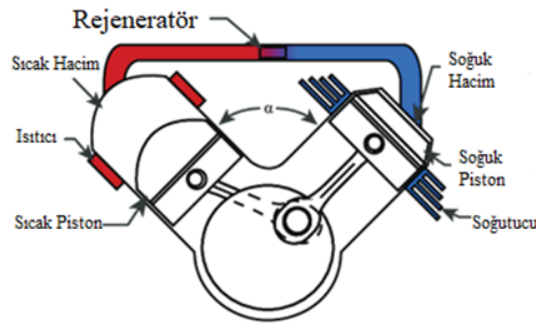
2.1. Stirling Motorunun Çalışma Prensibi

Stirling motoru, harici olarak uygulanan bir sıcaklık farkı temelinde çalışan bir ısı motorudur. Sıcak ve soğuk sıcaklık farkını koruyarak motor çalışmakta ve mekanik güç üretebilmektedir (Şekil 8). İçten yanmalı motorlardan farklı bir çalışma şekline sahiptir. Kapalı bir çevrime sahiptir, yani çalışma gazı motorun içine sızdırmaz şekilde kapatılmıştır. Bu, çalışma gazının (havanın) ortamdan çekildiği, yakıtla yakıldığı ve egzoz olarak dışarı atıldığı içten yanmalı motorların tam ters şekli olmaktadır. Bundan dolayı

içten yanmalı bir motorda vanalar ve zamanlama mekanizmaları gereklidir. Ancak bir Stirling motorunda bu tür bileşenlere gerek duyulmamaktadır. Ayrıca, Stirling motoru kapalı bir çevrime sahip olduğundan dolayı ısıyı oluşturmak için kullanılan yakıt türüyle sınırlı olmamaktadır. Kirlenici olmayan güneş enerjisi veya karbon nötr olan biokütlenin (odun, kabuk, etanol, vb.) yakılması da dahil olmak üzere birçok ısı kaynağını kullanabilmektedir. (Normani, 2013).

Stirling motorunun temel çalışma prensibi şu şekildedir; motor çalışma gazı olarak nitelendirilen hava, helyum veya hidrojen gibi bir gazla doldurulmaktadır. Motorun içinde gaz ısıtılır, basıncı artırılır ve sonuç olarak pistonları hareket ettirmektedir. Devamında gaz soğutulur ve basıncı düşürülmektedir.

Daha sonra tekrar ısıtılır ve döngü tekrarlanmaktadır. Gerçek bir motorda bu, tipik olarak, bir içten yanmalı motor ile aynı hızda, çok hızlı gerçekleşmektedir. Çalışma gazı, motorun içinde, sıcak ve soğuk uçlar arasında çok hızlı bir şekilde ileri geri hareket ettirilir, sürekli olarak ısı kazanır ve kaybeder ve bunun sonucunda güç üretilmektedir (Normani, 2013).



Şekil 8. Stirling motorunun çalışma prensibinin gösterimi (Nightingale, 1986)

Motorun içindeki çalışma gazını ısıtıp soğutmak için ısıtıcı ve soğutucu kullanılmaktadır. Isıtıcı ve soğutucu, içinde çalışma gazının aktığı dar borulardan (veya geçitlerden) oluşan tipik olarak kompakt ısı eşanjörleridir. Çalışan gaz ya ısı kazanmakta ya da ısı kaybetmektedir.

Isıtıcının dış yüzeyi, brülör alevi veya konsantre güneş enerjisi gibi yüksek sıcaklık kaynağına maruz kalmaktadır. Soğutucunun dış yüzeyi ortam havası veya su gibi bir soğuk sıcaklık kaynağına maruz kalmaktadır. Isıtıcı ve soğutucu arasında bir rejeneratör bulunmaktadır. Bir rejeneratör, ısıtıcının ısı girdi gereksinimini ve soğutucunun ısı uzaklaştırma gereksinimini azaltarak bir Stirling motorunun verimliliğini arttırmaktadır. Motorun çalışması için bir rejeneratöre sahip olmak gerekli değildir, ancak yakıt maliyeti söz konusu olduğunda, maliyet düşürme açısından bir rejeneratöre sahip olmak avantaj sağlayacaktır (Normani, 2013).

Rejeneratör, çalışma gazının ısıtıcıdan soğutucuya geçerken ısı enerjisinin bir kısmını depolamak ve böylece soğutucu üzerindeki soğutma talebini azaltmaktadır.

Dönüş yolunda, çalışma gazı soğutucudan ısıtıcıya hareket ettikçe, bu ısı enerjisinin bir kısmını geri kazanarak ısıtıcının ısıtma ihtiyacını azaltmaktadır. Bir rejeneratör temel olarak çalışma gazını ısıtıcıya girmeden önce ısıtmakta ve çalışma gazını soğutucuya girmeden önce soğutmaktadır.

2.2. Stirling Bileşenleri

Stirling motoru günümüzde birçok farklı amaçta ve bu amaçlar doğrultusunda birçok farklı tipte bulunmaktadır. Şekil 9'da Stirling motoruna ait bileşenler gösterilmiştir. Ancak Stirling motorunu

oluşturan temel bileşenler birbiri arasında benzerlik göstermektedir. Stirling motoru temel anlamda birkaç bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler kısaca şu şekilde tanımlanabilmektedir:

Isıtıcı: Stirling motorunun sıcak bölgesindeki silindiri ısıtan kısım olarak tanımlanmaktadır. Isıtıcı kaynağı, dıştan yanmalı bir sistem olduğundan dolayı herhangi bir yakıt olabilmektedir. Isıtıcı kaynağı fosil yakıtlar, biodizel, alkol, güneş vb. farklı yapılarda kullanılmaktadır.

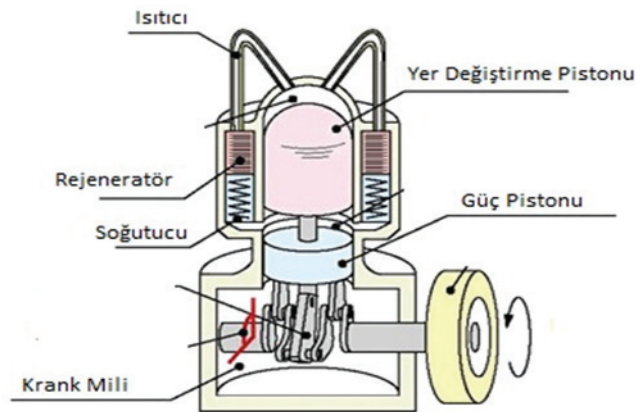
Silindir: Pistonların içinde hareket ettiği yapı olarak tanımlanmaktadır. Farklı Stirling tiplerinde silindir sayısı değişebilmekte ve maruz kaldığı sıcaklık miktarına karşı farklı materyallerden yapılabilmektedir.

Piston: Silindir içerisinde bulunan ve sıcaklığın değişmesi ile genişleyen hava sayesinde hareket eden parça olarak tanımlanmaktadır. Farklı Stirling motor tiplerine göre soğuk-piston sıcak-piston veya genelde serbest pistonlu Stirling motorda bulunan yer değiştirme ve güç piston olarak da tanımlanmaktadır. Güç pistonu Stirling motor içerisinde oluşturulan hareketi krank miline ileten veya elektrik enerjisine çeviren parçadır. Yer değiştirme pistonu ise sıcak tarafta bulunan ve hareket etmesiyle güç pistonunu hareket ettiren kısımdır.

Soğutucu: Isıtıcı tarafından ısınan hava pistonu hareket verdikten sonra hava soğuk bölgeye ilerlemekte, burada havayı soğutarak sıcaklık farkı oluşturmakta ve motorun verimli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır.

Rejeneratör: Stirling motorunun sıcak ve soğuk bölgeye geçişindeki ısıyı depolayan ve motora tekrar kazandıran ve bu sayede motor verimini arttıran kısımdır.

Krank Mili ve Şaft: Pistonların silindir içinde lineer hareketini sağlamak için bağlı olduğu parça şaft olarak tanımlanmaktadır. Krank mili ise pistonların lineer hareketini dögüsel harekete çeviren kısımdır.



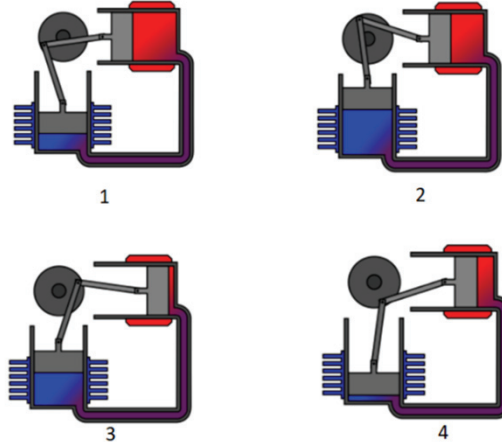
Şekil 9. Stirling motoru temel bileşenleri (Masato Kitazaki, 2017)

2.3. Stirling Motor Tipleri

Stirling motoru bazı temel bileşenlerinin veya formunun farklılaşması ile çeşitli tiplere ayrılmıştır. Bu farkların başında silindir piston düzeneğinin çeşitlenmesi ve volan-krank yapısının değişmesi gelmektedir. Stirling motorlar dört ana tipte incelenmektedir. Bunlar Alfa tipi, Beta tipi, Gama tipi ve son yıllarda ilgi görmekte ve kullanılmakta olan serbest pistonlu Stirling motor tipi olarak tanımlanmaktadır.

2.3.1. Alfa Tipi

Alfa tipi pistonlar iki adet piston, bir adet volan, pistonların bulunduğu kapalı bir gaz haznesi, ısı eşanjörleri, ısı üretici ve bir adet volandan oluşmaktadır. Üst kısma yerleştirilmiş olan pistonun etrafı ısı kaynağıyla ısıtılarak içerisinde bulunan gazın aktifleşmesi hedeflenmektedir. Isınan gaz pistonu ileri geri itmeye başlar, bağlı bulunan diğer piston da harekete başlar bu sayede sıcak ve soğuk gaz hazne içerisinde yer değiştirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu iki pistonun kranklarla bağlı olduğu volan yardımıyla oluşan enerji aktarılıp kullanılmaktadır (Şekil 10) (Stirling, 2017).

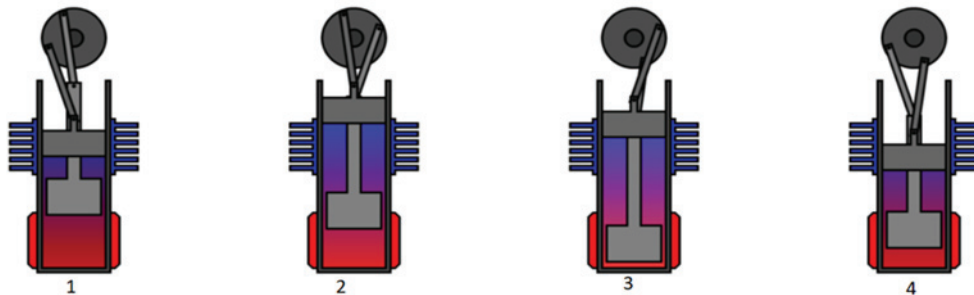


Şekil 10. Alfa Tipi Stirling motorunun hareket döngüsü gösterimi (Richard Wheeler, 2007)

Bu tür bir motor, yüksek güç / hacim oranına sahiptir, ancak genellikle sıcak pistonun yüksek sıcaklığı ve contalarının dayanıklılığı nedeniyle teknik sorunları vardır. Pratikte, bu piston genellikle bazı ek ölçü alan pahasına contaları sıcak bölgeden uzaklaştırmak için büyük bir yalıtım kafası taşımaktadır. Krank açısının verimlilik üzerinde önemli bir etkisi vardır ve en iyi açının sıklıkla deneysel olarak bulunması gerekmektedir.

2.3.2. Beta Tipi

Aynı şaft üzerinde iki adet piston bulunmaktadır. Bu iki piston birbirine bağlıdır. Alt tarafta bulunan pistonun bulunduğu hazne ısıtılarak kapalı hazne içerisindeki gazın ısınarak aktifleşmesi sağlanmaktadır. Bu sayede piston yukarı yönlü hareketine başlamaktadır. Bağlı bulunan diğer piston da bununla birlikte soğuk gazı hazne içerisinde hareket etmesine yardımcı olmaktadır (Şekil 11). Pistonların kranklarla bağlı olduğu volan yardımıyla oluşan enerji aktarılıp kullanılmaktadır (Gheith, Hachem, Aloui, & Ben Nasrallah, 2018).

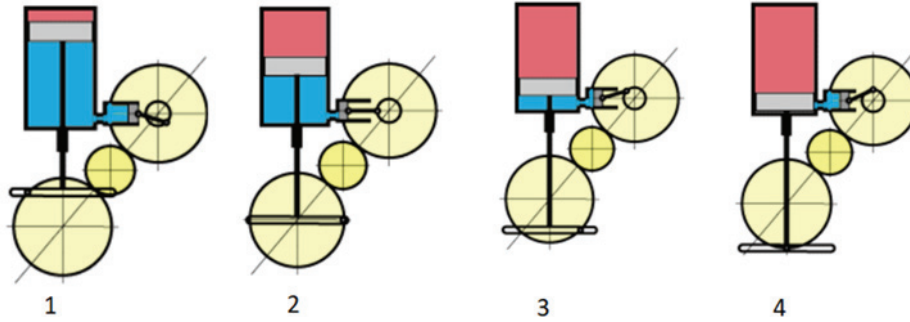


Şekil 11. Beta tipi Stirling motorunun hareket döngüsü gösterimi (Wikipedia, 2011)

Beta tipinde, alfa tipinden farklı olarak, güç pistonu sıcak gazla temas halinde olmadığından, sıcak bölgedeki contalar teknik problem çıkarmamaktadır.

2.3.3. Gama Tipi

Gama tipinde iki ayrı piston bulunmaktadır. Büyük olan pistonun bulunduğu hazne ısıtılarak içerisinde bulunan gazın aktifleşmesi sağlanmaktadır. Bu sayede volan ile birbirine bağlı olan pistonlar harekete başlamaktadır. İki silindirdeki gaz aralarında serbestçe akabilmekte ve tek bir gövde olarak kalmaktadır (Şekil 12). Bu konfigürasyon, ikisi arasındaki bağlantının hacmi nedeniyle daha düşük bir sıkıştırma oranı üretmektedir. Ancak mekanik olarak daha basittir ve genellikle çok silindirli Stirling motorlarında kullanılmaktadır (Stirling, 2017).



Şekil 12. Gama tipi Stirling motorunun hareket döngüsü gösterimi (Pierre Gras, 2007)

2.3.4. Serbest Pistonlu Stirling Motoru

Beta tipine benzer özelliklere sahiptir. Tek silindir içinde bir şaftta, yer değiştirme ve güç pistonu bulunmaktadır. Herhangi bir krank veya volan parçası bulunmamaktadır. Döngüsel hareket üreten bir parçası olmadığı için yalnız lineer hareket üretmektedir. Genleşen hava pistonu ittikten sonra yay sayesinde geri tepki vererek döngü haline gelmekte ve belirli frekanslarda hareketine devam etmektedir.

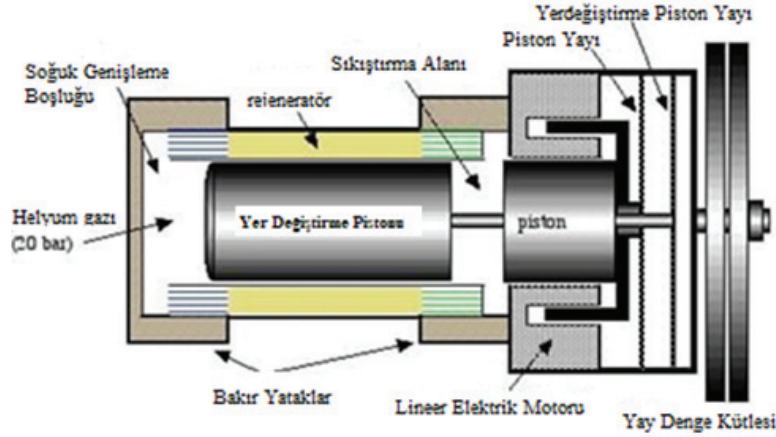
2.3.5. Tek Pistonlu Serbest Stirling Motoru

En basit tipteki serbest pistonlu motordur (Şekil 13). İki zamanlı buji ile ateşlemeli motorun silindiriyle aynı şekilde çalışan tek bir silindire sahiptir. Hava ve yakıt karıştırılarak silindir beslenir, karışım sıkıştırılır ve ardından ateşlenerek bir güç stroku sağlanır. Aynı zamanda yanma gazları dışarı atılır ve döngü tekrarlanır. Serbest piston versiyonunda, piston bir krank miline değil, bir sıçrama odasına, hava veya başka bir gaz içeren bir silindirin içine kapatılmış ikinci bir pistonla bağlıdır (Şekil 14). Bu piston güç pistonu olarak tanımlanmaktadır.

Güç stroku sırasında ana motor pistonu, sıçrama odası pistonunu odanın içindeki gazı sıkıştırmaya zorlamaktadır. Güç strokunun sonunda, sıcak silindir bölgesinin içindeki gaz yüksek basınç altındadır ve motor pistonu iter yayın tepkisiyle üstüne geri dönmeye zorlayarak sıkıştırma ve ateşleme strokunu yeniden başlatmaktadır (Breeze, 2018).



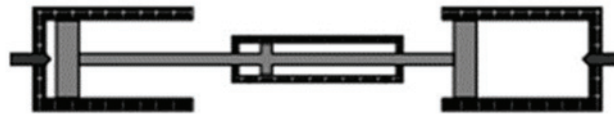
Şekil 13. Tek Pistonlu Stirling Motoru (Paul Breeze, 2018)



Şekil 14. Serbest Pistonlu Stirling motorunun şematik gösterimi (Zhu vd., 2018)

2.3.6. Çift Pistonlu Serbest Stirling Motoru

Serbest pistonlu motorun ikinci bir yaygın türü çift pistonlu motordur. Şekil 15'te basit motor düzeniği verilmiştir. Bu motor tipinde, her biri kendi pistonuna sahip motor silindiri bulunmaktadır. Bununla birlikte, bu pistonlar arka arkaya bağlıdır, böylece bir piston güç stroku boyunca hareket ederken ikinci pistonun içeriğini (sanki bir sıçrama odasıymış gibi) sıkıştırmakta ve genişletmektedir. Bununla birlikte, her biri diğerini tahrik ettiğinden, her bir silindirdeki yanma döngülerinin son derece hassas bir şekilde kontrol edilmesini gerektirmektedir. Silindirlerin her birinde hem strok uzunluğu hem de sıkıştırma oranı kısmen ikincinin kontrolü altındadır ve senkronizasyon mükemmel değilse dengesizliklere yol açabilmektedir. Motorlar prensipte oldukça verimlidir. Tek pistonlu versiyonda olduğu gibi, motor ya hidrolik tahrik için ya da lineer bir jeneratör aracılığıyla elektrik üretmek için kullanılmaktadır.



Şekil 15. Çift Pistonlu Stirling Motoru (Paul Breeze, 2018)

3. Stirling Motorunun Matematiksel Modeli

1816'da Robert Stirling tarafından icat edilmesinden sonra matematiksel model analizi 1871'de Gustave Schmidt tarafından yapılmıştır. Bu model kapalı bir Stirling çevriminin performansı için çözüm üretmiştir. Bugün, bir Stirling motorunun tasarımı ve performans analizi ampirik ve analitik modeller kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Günümüze kadar özellikle serbest pistonlu Stirling motorlarının tasarımı ve icadından bu yana pek çok matematiksel model geliştirilmiştir. Bu çalışmalardan öne çıkan

isimlerden biri de 1960'ların başında Beale olmuştur. Ampirik modellerde çoğunlukla boyutsuz motor gücünü tahmin etmek için Beale sayısı olarak adlandırılan bir parametre kullanılmıştır. Motora bağlı olarak diğer çalışma parametreleri frekans, basınç, genişleme hacmi ve analitik modeller gibi dinamik ve termodinamik analizlere dayanmaktadır. Genel olarak, bir Stirling motor çevriminin termodinamik analizi çok karmaşıktır (de la Bat, Dobson, Harms, & Bell, 2020). Serbest pistonlu Stirling motoru'nda hareketin döngüsel olmaması ve krank bulunmaması nedeniyle farklı matematiksel model yöntemleri geliştirilmiştir.

3.1. Schmidt Modeli (İdeal İzotermal Model)

Stirling motorunun farklı bölümlerde farklı bölmelere sahip olması nedeniyle çalışma sıvısının tamamı aynı termodinamiği yaşamamaktadır.

Schmidt modeli, ana motor bölmelerinin, yani motorun sıkıştırma alanı, soğutucu, rejeneratör, ısıtıcı ve genişleme alanı izotermal kabul edilmektedir. Soğutucu ısı alıcı sıcaklığında ($T_{soğuk}$) olduğu varsayılmaktadır. Isıtıcı ve genişleme boşluğunun ısı kaynağı sıcaklığında ($T_{sıcak}$) olduğu varsayılmaktadır. Model daha sonra sıkıştırma ve genişletmenin hacim değişikliklerini dahil ederek hesaplanmaktadır. Aralarında bir faz kayması olan sinüzoidal hareket varsayılarak boşluklar belirlenmektedir. Tüm uzaylar izotermal olarak kabul edildiğinden, Schmidt modeli bazen izotermal model olarak adlandırılmaktadır (Deetlefs & Dobson, 2014).

Bu modelin en önemli özelliği, basınç için bir denklemin üretilmesidir. Bu denklem tüm döngü için tanımlanmıştır. Basınç denklemi aşağıdaki gibidir (Denklem 1):

$$p = \frac{MR}{\frac{V_e}{T_e} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_c}{T_c}} \quad (1)$$

P: basınç, M: mol kütlesi, R: gaz sabiti V: hacim ve T: sıcaklığı tanımlamaktadır. Alt indisler ise Şekil 16'daki bölgelere ait olan sıcaklık ve basınç değerleridir.

İzotermal sıcaklık varsayımlarını ekledikten sonra aşağıdaki formül elde edilmektedir (Denklem 2):

$$p = \frac{MR}{\frac{V_{sıcak}}{T_{sıcak}} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_{soğuk}}{T_{soğuk}}} \quad (2)$$

Sadece etkin rejeneratör sıcaklığı (Denklem 3) (T_r) ($T_{sıcak}$) ve ($T_{soğuk}$) cinsinden yazılmalıdır. Rejeneratörün uzunluğu (L_r) boyunca lineer bir sıcaklık profili varsayılır ve bu profil, uzunluğu boyunca kütleye göre (m_r) entegre edilir (Denklem 4). Efektif sıcaklığı bulmak için aşağıdaki formül kullanılır (Denklem 5). Daha sonra aşağıdaki gibi ideal gaz denklemi (Denklem 6) ile karşılaştırılır:

$$T_r(x) = \frac{T_{sıcak} - T_{soğuk}}{L_r} x + T_{soğuk} \quad (3)$$

$$m_r = \int_0^{V_r} \rho dV = \int_0^{L_r} \frac{p}{RT_r(x)} A_r dx = \frac{pV}{RT_{eff}} \quad (4)$$

$$T_{eff} = \frac{(T_{sıcak} - T_{soğuk})}{\ln\left(\frac{T_{sıcak}}{T_{soğuk}}\right)} \quad (5)$$

Basınç denklemi daha sonra aşağıdaki gibi yeniden yazılmaktadır:

$$p = \frac{MR}{\frac{V_{sıcak}}{T_{sıcak}} + \frac{V_r \ln\left(\frac{T_{sıcak}}{T_{soğuk}}\right)}{(T_{sıcak} - T_{soğuk})} + \frac{V_{soğuk}}{T_{soğuk}}} \quad (6)$$

Çevrim başına yapılan işi bulmak için analitik bir çözüm olmamasına rağmen, (Urieli and Berchowitz, 1984) tarafından geliştirilen basınç terimini Fourier serisi açılımı ile çözülebilmektedir.

3.2. Finkelstein modeli (İdeal adyabatik model)

Sıkıştırma ve genişletme süreçleri bazen daha iyi tahmin edildiğinden izotermal yerine adyabatik olarak Finkelstein modeli tasarlanmıştır. Finkelstein model varsayımlarının çoğu Schmidt modeliyle aynıdır, sıcaklıklar sıkıştırma ve genişleme boşluklarında çözülmektedir.

Finkelstein modeli, şunları gerektirir: kütle korunumu denklemi, enerjinin korunumu denklemi ve belirtici denklem. Adyabatik model, küçük ölçekli motorlar ve özellikle yüksek frekanslarda çalışan büyük motorlar için daha başarılı bir model olduğu varsayılmaktadır (Chen, N. and Griffin, 1983).

Ancak Finkelstein modelinin çözümü Schmidt modeline göre daha zordur. Schmidt modeli, döngü sırasında herhangi bir noktadaki basınç için bir denklem üretirken, Finkelstein modeli ise yalnızca bir ifade üretir, “dp/dt” akışın yönüne bağlı olan koşullu sıcaklık terimlerini içermektedir. Basıncın sayısal entegrasyonla çözülmesi gerektiğinden, artık kapalı biçimli bir çözüm olmamaktadır.

3.3. Second-Order Analiz

İkinci merteye yöntemler, döngü analizi ve bireysel kayıp mekanizmaları ile başlamaktadır. Döngü analizi, gücü, verimliliği ve kaybı tahmin eder, terimler ise bunları ayarlamak için kullanılmaktadır. Kullanılacak ortak döngü ya Schmidt modeli ya da Finkelstein modeli olmaktadır. Ancak bazen yarı adyabatik çevrimler de kullanılmıştır; özellikle Philips firması tarafından dikkate değer olarak görülmüştür (Martini, 1983).

Bu kayıp terimlerini ayrı ayrı tanımlayarak, nerede iyileştirmelerin yapılabileceğini belirlemek daha kolay olmaktadır. Güç kaybı için mekanizmalar şunları içermektedir; akış sürtünmesi, mekanik sürtünme, verimsiz bir rejeneratör nedeniyle yeniden ısıtma kaybı, rejeneratör matrisi yoluyla gaz ve katı iletimi. İkinci dereceden yöntemler karmaşık olmayan bir tasarım yöntemi sunsa da optimizasyon işlemi daha çok kinematik Stirling motoru için geliştirilmiştir (Martini, 1983).

3.4. Third-Order Analiz

Akış her zaman kararsız olduğundan, bir Stirling motorunun akışı tersine çevirerek çalışması en büyük karmaşıklık faktörüdür. (Chen, N. and Griffin, 1983) tarafından belirtildiği gibi, üçüncü merteye yöntemler üç temel prosedürden oluşmaktadır: 1) çalışma alanını bir kontrol hacimleri ağına bölmek, 2) kütle, momentum ve enerjinin korunumu için diferansiyel denklemleri ve çalışma akışkanı için bir durum denklemi kurmak 3) eş zamanlı olarak fark denklemleri sistemini bazı yeterli sayısal yöntemlerle çözmek.

Urieli tarafından sunulan üçüncü dereceden bilgisayar simülasyonu, düşük tersine çevrildiğinde bir basınç düşüşünü göz ardı etme problemini önlemek için düşük sürtünmelerde yayılım sürtünme faktörünü Reynolds sürtünme faktörü ile değiştirmiştir (Urieli, 1977).

Üçüncü mertebeden analiz genellikle daha tercih edilen yöntem olmuştur. Doğru sonuçlar verme konusunda en büyük potansiyele sahiptir bu sayede başlangıç aşamasındaki motor parametrelerini yakalayabilmektedir. Diferansiyel denklemler, çalışan akışkanın kinetik enerjisinin ihmal edilmesi gibi belirli varsayımlarla da basitleştirilebilmektedir. Üçüncü dereceden yöntemlerin en büyük dezavantajı, tasarım iyileştirmelerine ilişkin anlayışın büyük ölçüde kaybolması ve sadece parametrik bir çalışma ile belirlenmesi, yani parametrelerin değiştirilerek her durum için analizin tekrarlanması gerekmektedir.

3.5. Dinamik Analiz

Yukarıda bahsedilen tüm yöntemlerde, piston ve krank açısı referans alınarak hesaplamalar yapıldığı için döngüsel hareket eden Stirling motorlarında daha efektif kullanılmaktadır. Serbest pistonlu Stirling motorlarında hem döngüsel bir hareketin olmaması hem de güç ve yer değiştirme pistonunun belirli faz farkı ile hareket etmesinden dolayı dinamik analiz yöntemi tercih edilmektedir. Dinamik analizde, güç ve yer değiştirici piston dinamik kütle olarak, yaylar sönümleyici sistem olarak ele alınmaktadır. Bu sayede güç ve yer değiştirici piston hareketleri anlık olarak belirlenmektedir.

Hareket denklemlerinin genel formu aşağıdaki gibidir (Denklem 7) (Kankam, M.D. and Rauch, 1991):

$$[M][\ddot{X}] + [C][\dot{X}] + [K][X] = [F(t)] \quad (7)$$

[M], [C] ve [K] sistem kütleleri, sönüm katsayıları ve sertlik katsayıları için matrisleri ifade etmektedir. [F(t)] ise zamana bağlı hareketin kuvvetini temsil etmektedir. Tipik bir uygulama aşağıdaki gibi görünecektir (bkz. Şekil 16):

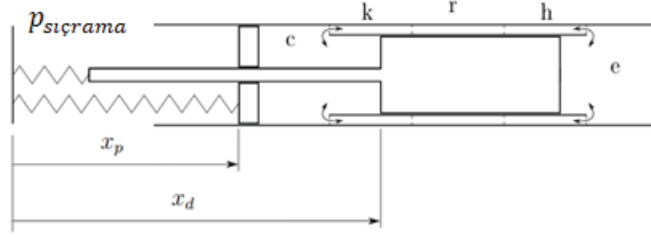
$$m_p \ddot{x}_p + C_p \dot{x}_p + C_{pd} (\dot{x}_p - \dot{x}_d) + k_p x_p = (p_{sıçrama} - p_c) A_p - F_{yük} \quad (8)$$

$$m_d \ddot{x}_d + C_d \dot{x}_d + C_{pd} (\dot{x}_d - \dot{x}_p) + k_d x_d = p_c A_c - p_e A_e + p_{sıçrama} A_{rot} \quad (9)$$

Kuvvet terimi $F = \text{Basınç} \times \text{Alan}$ cinsinden ifade edilmektedir (Denklem 8). Görülebileceği gibi, zamana bağlı kuvvet terimleri, bir elektrik jeneratörü gibi yükün yanı sıra çalışma alanındaki basınca da bağlı olmaktadır (Denklem 8 ve 9). Elektrik jeneratörünün karakteristiğinin bilindiği varsayılarak, basınçlar için bir ifade belirlenmesi gerekmektedir.

Dinamik analize yönelik farklı yaklaşımlar burada görülebilmektedir. Doğrusal harmonik analiz (LHA) ve kontrol tabanlı tasarım gibi birçok farklı yaklaşım olmasına rağmen, bunlar her zaman basitleştirici varsayımlar gerektirmektedir. (Chen, N. and Griffin, 1986) tarafından sunulan LHA (Linear Harmonic Analysis, Doğrusal harmonik analiz), periyodik değişkenler için sinüzoidal fonksiyonlar içerir, burada (Riofrio, J., Al-Dakkan, K., Hofacker, M. and Barth, 2008) tarafından sunulan kontrol tabanlı tasarım basınç dalgalarını belirlemek için Schmidt modeli kullanılmaktadır.

Varsayımları basitleştirme ihtiyacından kaçınmak için, üçüncü dereceden bir yaklaşımla motor boyunca basıncı belirlemek mümkün olmaktadır. Kısacası çalışma alanı bir dizi kontrol hacmine bölünmekte ve basınç sayısal olarak belirlenmektedir.



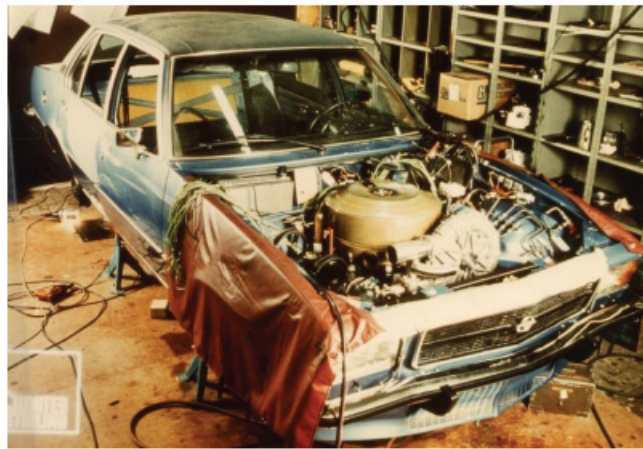
Şekil 16. Dinamik Analiz (Deetlefs & Dobson, 2014)

4. Stirling Motorunun Gelişimi

Stirling motoru icadından sonra teknoloji ile birlikte pek çok yenilik kazanmıştır. Robert Stirling 1816 yılında ekonomizör denilen günümüz rejeneratörünün ilk çalışması olarak adlandırılan parçayı motora eklemiştir. Sonrasında Sadi Carnot (1796-1832) Carnot verimini diğer ismi ile termal verimi bulmuştur. Stirling verimi ideal şartlarda Carnot verimine eşit sayılmaktadır. İlerleyen yıllarda Stirling motorunun farklı alanlarda kullanılması ve gelişimi gözlemlenmektedir.

İlk modern sayılan Stirling motoru 1938 yılında Philips tarafından üretilmiştir. Philips 200 beygir gücünde otobüs, inşaat makineleri gibi araçlarda kullanılabilecek Stirling motorunu yapmıştır. V4-235 olarak adlandırılan motor yüksek hız ve basınçta çalışabilmektedir. US (Stirling Birliği), V4-265 adında başka bir motor geliştirmiş ve 10 000 saatlik çalışma süresi elde etmeyi başarmıştır (D. Nilsson & Engineer, 2014).

Otomotiv sektöründe ilk Stirling motorunu kullanan Ford firması olmuştur. İki modelde kullanılan Stirling motoru Ford -Pinto ve Ford -Taunus modellerinde sırasıyla V4-31 ve V4-35 ismiyle üretilmiştir. 1978 yılında ASE (Otomotiv Stirling Motoru) kurulmuştur. ASE 10 yıllık iş birliği için kurulmuş ve NASA, US (Stirling Birliği), MTI (Mekanik Teknoloji) şirketleri tarafından desteklenmiştir (Nasn-, Cr-, & Ernst, 1997). Proje finansmanını Amerika Birleşik Devleti Enerji Bakanlığı üstlenmiştir. Projeye 125 milyon dolar kaynak sağlanmıştır. İlk projesi ise Opel -Record marka araçta kullanılan P40 Stirling motoru olmuştur (Şekil 17) (D. Nilsson & Engineer, 2014).



Şekil 17. Opel-Record araçta kullanılan P40 Stirling motoru (D. Nilsson & Engineer, 2014)

1970'lerde United Stirling tarafından geliştirilmiş 50'den fazla motor farklı uygulamalarda üretilmiş ve kullanılmıştır. NASA tarafından yönetilen Otomotiv Stirling Motoru programında JPL, Advanco ve

McDonnell Douglas şirketleri ile güneş enerjisi ile çalışabilen Stirling motor programına dahil edilmiştir (Nasn- vd., 1997).

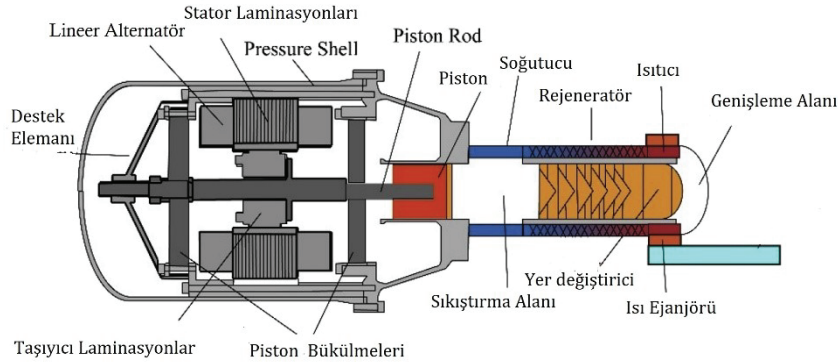
5. Nasa'nın Stirling Motor Çalışmaları

ASRG (Advanced Stirling Radioisotope Generator-Gelişmiş Stirling Radyoizotop Jeneratörü), ilk olarak NASA'nın Glenn Araştırma Merkezi'nde geliştirilen bir radyoizotop güç sistemidir (Şekil 18). Uzay gemilerinde kullanılmak üzere radyoaktif bozuma ısısını elektrığe dönüştürmek için bir Stirling güç dönüştürme teknolojisini kullanmaktadır.

ASRG tarafından yapılan enerji dönüştürme işlemi, benzer miktarda güç üretmek için önceki radyoizotop sistemlerine göre yaklaşık dört kat daha verimlidir ve diğer benzer jeneratörler gibi plütonyum- 238'in yaklaşık dörtte birini kullanabilmektedir.

NASA Glenn Araştırma Merkezi, on yıldan fazla bir süredir RPS (Radioisotope Power Systems-Radyoizotop Güç Sistemleri)'inde potansiyel kullanım için yüksek verimli Stirling güç dönüştürücülerinin geliştirilmesini desteklemektedir. Stirling güç dönüştürücülerini, doğrusal bir alternatörü salınım yaptırarak ısıyı elektrığe dönüştüren motorlar olarak tanımlanmaktadır (Narayan ve Gupta 2015).

Serbest pistonlu Stirling güç dönüştürücü üzerinde yapılan çalışmalar neticesinde, NASA'nın Glenn Araştırma Merkezi'ndeki Stirling Araştırma Laboratuvarı'nda 14 yıllık bakım gerektirmeksizin çalışma başarısı elde edilmiştir. Bu teknolojinin, uzay aracına uzun süreli, gelecekteki uzay görevlerinde güç verme yeteneğini arttırabilmeye yardımcı olması beklenmektedir (Doreen Zudell, 2020).



Şekil 18. NASA'nın Radyoizotopuna ait Stirling Motoru (Metscher, 2014)

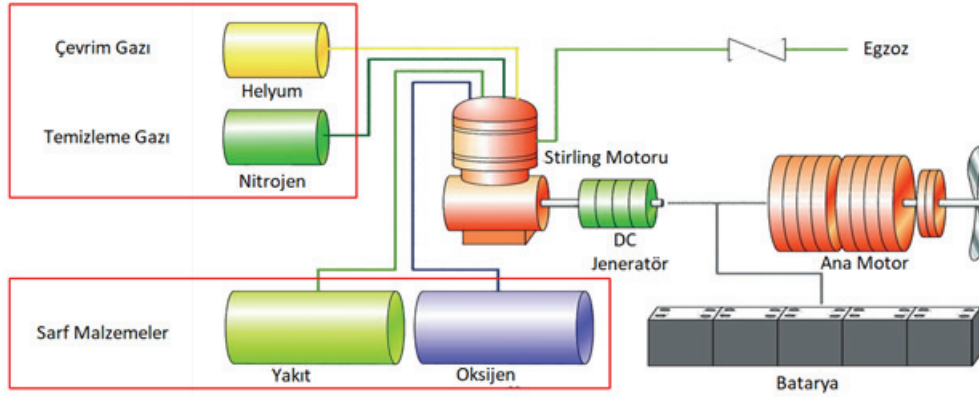
6. AIP Sistemi olarak Stirling Motorun İncelenmesi

Stirling motoru kapalı devreye sahip bir motor olması sebebiyle içten yanmalı motorlarda olduğu gibi tekrarlı ateşlenme olayı gerçekleşmemektedir. Stirling motorlarına ısı kaynağından ısının sürekli verilmesi ve dıştan yanmalı bir sistem olduğu için sabit hacimde gerçekleşmesi egzoz gaz çıkışının içten yanmalı motorlara kıyasla oldukça düşük seviyelerde olmasına olanak sağlamaktadır. Denizaltılarda egzoz çıkışı yapılabilmesi için denizaltının su yüzeyine çıkması gerekmektedir ki bu da denizaltı için en savunmasız olduğu süreç olarak tanımlanmaktadır. Bundan dolayı Stirling motoru denizaltılar için uygun bir AIP sistem oluşturmak için tercih edilmiştir (Şekil 19).

Stirling motorunun farklı uygulamalar için geliştirilmesi İsveç'te yirmi yılı aşkın bir süredir devam etmektedir. 1968 ve 1988 yılları arasında geliştirme çalışmaları United Stirling AB tarafından

yapılmıştır. 1988'in başında Kockums firması, United Stirling'i satın almış ve çalışmaya Stirling motorlarının sualtı uygulamasıyla devam etmeye karar vermiştir (H. Nilsson, 1988).

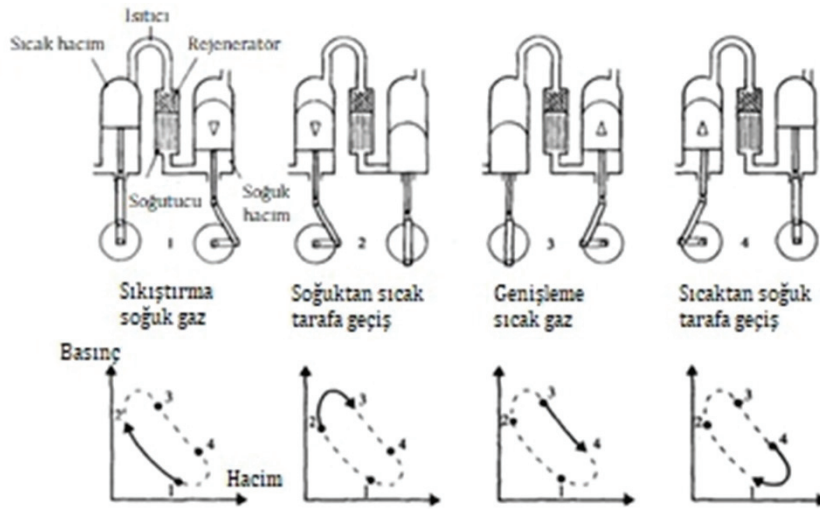
Stirling motoru V4-275R, özellikle denizaltı kurulumu için üretilmiş 75 kW gücünde bir motordur. Düşük gürültü ve titreşim için tasarlanmıştır. Yüksek basınçlı yanma odası temel motorla kolayca entegre edilebilmektedir. Bu motor tipi İsveç denizaltısı Nacken'de ve Fransız denizaltısı SAGA'da kurulmuştur. Her iki denizaltı da çalışır durumdadır ve Stirling sistemlerinin denemelerdeki sonuçları olumlu olmuştur (H. Nilsson, 1988).



Şekil 19. Stirling AIP Sistem Açılımı (D. Nilsson & Engineer, 2014)

6.1. V4-275R Stirling motoru

USAB (United Stirling AB), İsveç Kraliyet Donanması için ana denizaltı yüklenicisi Kockums ile ortaklaşa yapılan kapsamlı geliştirme sözleşmeleri sonucunda, 1970'lerin başından itibaren sualtı Stirling uygulamalarıyla ilgili çalışmaktadır. Şekil 20' de sualtı uygulamalarına ait Stirling motorunun çevrimi verilmiştir.

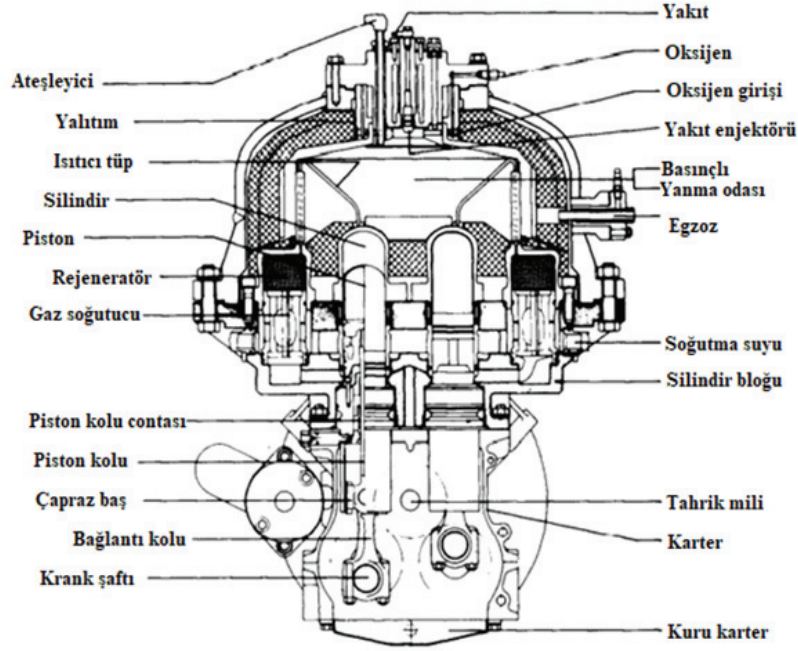


Şekil 20. Stirling Motoru Çevriminin Şematik ve Grafik gösterimi (Bratt, 1990)

Programın amacı orta büyüklükteki denizaltılar için hibrit enerji santralleri geliştirmek olmuştur. Ayrıca denizaltılar için enerji sistemleri tasarlanmış ve inşa edilmiştir. Stirling çevrimi, denizaltılar için büyük önem taşıyan pistonlu içten yanmalı motor çevrimlerine kıyasla düşük çevrimsel tork değişimleri ve

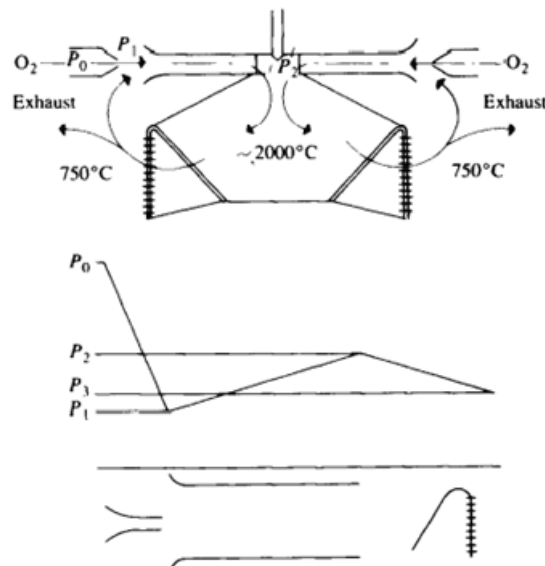
düşük seviyede gürültü ve titreşim sağlamaktadır. Yanma işlemi sürekli ve ortam üzerine çıkabilen sabit basınçta gerçekleşmektedir (H. Nilsson, 1988).

Stirling motor sistemi, büyük ve karmaşık olan egzoz gazı sıkıştırmasına veya egzoz gazı için bir çözme sistemine gerek kalmadan yaklaşık 300 m derinliğe daldırılmış olarak çalışabilmektedir. İlk su altı Stirling motoru Şekil 21'de gösterilmiştir.



Şekil 21. V4-275R Stirling Motoru detaylı şematik görseli (H. Nilsson, 1988)

Büyük ve karmaşık olan egzoz gazı için gaz sıkıştırma veya çözme sistemi, dizel egzoz gazının saf oksijen, yani adyabatik alev sıcaklığı anlamına gelen 4000 °C kullanılarak basınçlı yanmasını kontrol etmek için egzoz gazı devridaimi (bkz. Şekil 22) kullanılmaktadır. Bir mikroişlemci, temel çalışma modlarında motoru ve işlem değişkenlerini uzaktan izlemektedir (H. Nilsson, 1988).



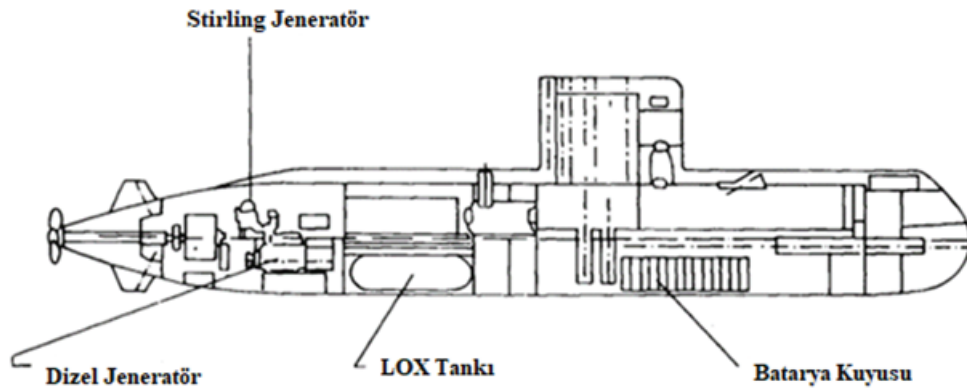
Şekil 22. V4-275R Stirling Motorunun egzoz gazı çıkış tanımlaması (H. Nilsson, 1988)

6.2 Denizaltılar için İlk Fizibilite Çalışması

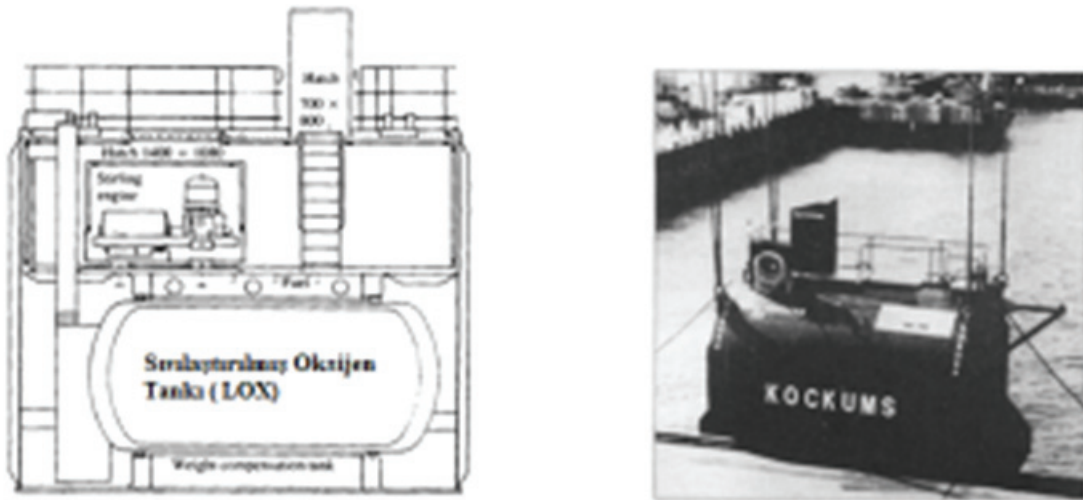
İsveç Kraliyet Donanması ve Kockums Şirketi tarafından yapılan testler ve çalışmalar denizaltılar için havadan bağımsız enerji dönüşüm sistemlerini kapsamaktadır.

Bir dizi proje ve prototip testleri ısı motorları kullanılarak gerçekleştirilmiştir (kapalı çevrim Dizel motor ve Stirling motoru). Proje kapsamında yakıt hücreleri ve yüksek enerji yoğunluklu piller kullanılmıştır. İlk aşamada 100 tonluk bir denizaltı için yapılan çalışmalarda sadece Stirling AIP modül eklendiğinde operasyon süresinin beş kat uzadığı gözlemlenmiştir. Daha sonraki çalışmalarda toplam denizaltı ağırlığı korunacak şekilde batarya kapasitesi yarıya düşürülmüş ve kalan hacme Stirling AIP modülü eklenmiştir. Bu uygulamada da su altı operasyon süresinin arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 23).

Aşağıda açıklanan Stirling AIP modülünün nihai tasarımı gösterilmektedir. AIP modülü tam pil kapasitesi korunarak denizaltıya ek paralel gövde kesiti şeklinde eklenmiştir. Havadan bağımsız bir güç kaynağı olarak Stirling AIP sistemi yakın vadeli en iyi potansiyele sahip AIP sistem olarak kabul edilmiştir. İsveç Kraliyet Donanması tam ölçekli bir denizaltı için AIP sistem geliştirilmesinde Stirling AIP sistemle devam etmiştir (H. Nilsson, 1988).



Şekil 23. Stirling AIP Sistem Yerleşimi (H. Nilsson, 1988)



Şekil 24. V4-275R Stirling Motorunun AIP modül şematik ve gerçek görseli (H. Nilsson, 1988)

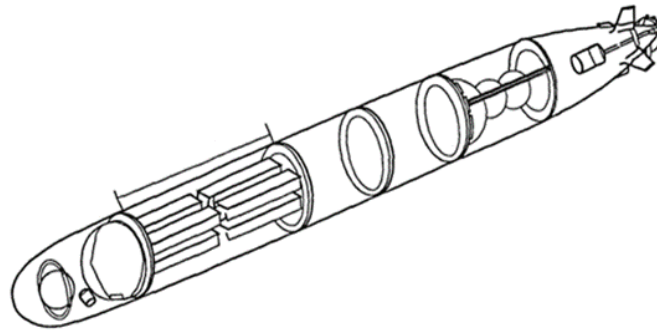
Başarıya ulaşan testler neticesinde gerçek bir denizaltı için Stirling AIP modülünü barındıran eklenti yapılması öngörülmüştür. 1982 yılında başlatılan sualtı motoru geliştirme programı neticesinde standart Stirling motoru 4-275 başarı ile üretilmiştir. Sıvı oksijen tankı ile entegrasyonuna yönelik

İsveç'teki AGA Cryon şirketinin köklü kriyojenik teknolojisine sahip oksijen sistemi kullanılmıştır. 1984 yılından itibaren Stirling motor sistemi tam ölçekli bir denizaltı test bölümünde başarıyla test edilmiştir (Şekil 24). Bu programın bir sonraki adımı eklenti üretilerek Stirling AIP sisteminin operasyonel bir İsveç denizaltısına entegrasyonu olmuştur. Kockums şirketi bu operasyonu üstlenmiş ve başarı ile entegrasyon işlemini tamamlamıştır (H. Nilsson, 1988).

6.3 Stirling Motoru İnsansız Denizaltı Uygulaması: SAGA

1987 yılında Stirling AIP sistemini geliştirmek için başka bir proje başlatılmıştır. İnsansız bir sualtı aracı için sistem geliştirilmesi amaçlanmıştır. İnsansız sualtı aracı için güç talebi 5 ila 15 kW aralığında olup bazı uygulamalarda 20 kW'a kadar yükselebilmektedir. Projede kullanılan 4-95 isimli motor olup, orijinal olarak 40 kW'lık bir otomotiv motoru olarak tasarlanmıştır (Şekil 26). Ayrıca jeneratör setlerinde ve güneş enerjisi sistemlerinde de kullanılmıştır. Bu tipte toplam 50 motor üretilmiş ve 150.000 saati aşkın bir süre çalıştırılmış ve motorun performansının yeterli olduğu kanıtlanmıştır (Bratt, 1990).

Proje, İsveç Savunma Malzeme İdaresi ve İsveç Ulusal Sanayi Kurulu tarafından ortaklaşa desteklenmiştir. Projenin ilk aşaması olarak laboratuvarında bir prototip sistemin üretilmesi ve test edilmesi başarı ile tamamlanmıştır. Motor sisteminin entegre olduğu ikinci aşamada gövde bölümünde sıvı oksijen deposu ve yakıt deposu eklenmiştir. Gövde bölümünün boyutu, ABD Donanması'nda insansız sualtı araçlarında kullanılan birinci nesil DARPA UUV'nin boyutlarıyla benzerlik göstermektedir (Şekil 25) (Bratt, 1990).



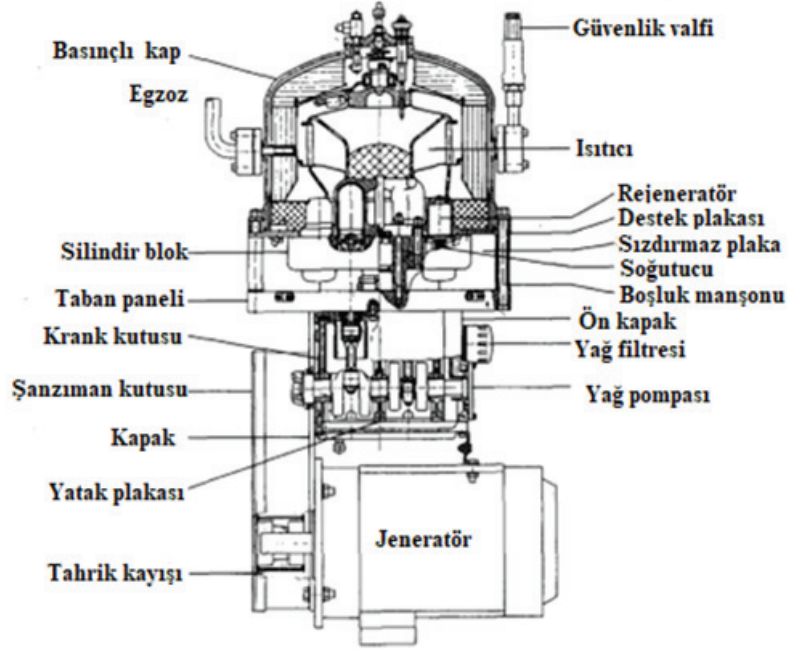
Şekil 25. SAGA denizaltısının gövde bölümünün benzerlik gösterdiği DARPA UUV (İnsansız Su altı Aracı) (A. Lee, James, Kuhn, & Baum, 1989)

6.4. Stirling motor temelli AIP sistem Kullanımı

Stirling Motoru denizaltı AIP sistemi olarak kullanılmasıyla birçok farklı denizaltı sınıfları da Stirling motorunu tercih etmiştir. Kronolojik sırayla gelişmeler şu şekildedir:

- HMS Gotland; 1995: Stirling AIP ile yeni inşa edilen dünyanın ilk deniz denizaltısı
- 2001: Japonya, Kawasaki Heavy Industries, Japon denizaltısı Asashio'nun Stirling AIP iyileştirmesini yapmıştır.
- 2003-2004: İsveç Västergötland sınıfındaki iki denizaltı Stirling AIP ile donatılmıştır.
- 2005: Västergötland sınıfındaki son iki Denizaltı Stirling AIP ile modernize edilmiştir. Singapur donanmasında görev almaktadır.
- 2005: Japonya, Soryu sınıfı denizaltında Stirling AIP ile inşa edilmiştir.

- 2010: A26 ve Gotland sınıfı orta yaşam yükseltmesi için geliştirilen yeni nesil Stirling AIP sistemi kullanılmıştır (D. Nilsson & Engineer, 2014).



Şekil 26. V4-95R Stirling Motorunun şematik gösterimi (Bratt, 1990)

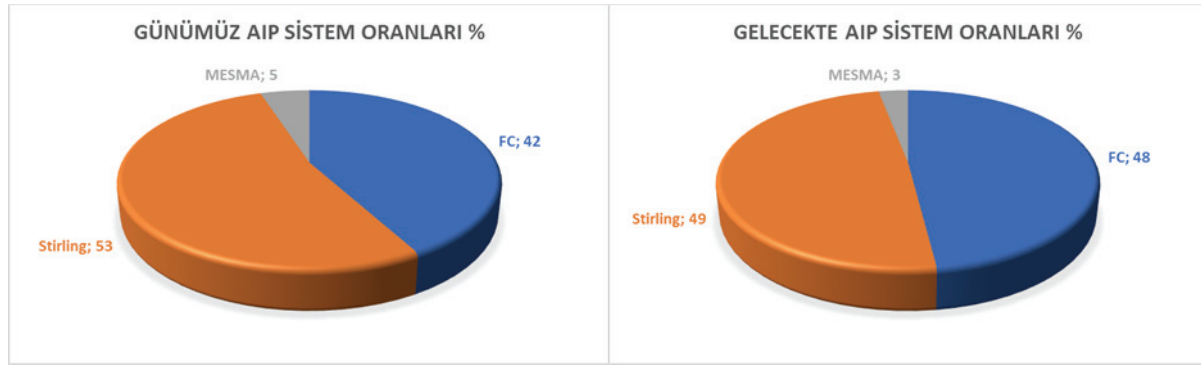
Tablo 2. Ülkelerin günümüzde kullandıkları ve yapılması planlanan AIP sistemleri (Sutton, 2016)

Ülke Donanmaları	Günümüz (Adet)	Yapılması Planlanan (Adet)	Toplam	AIP Tipi	Sınıfı
Türkiye		6	6	Yakıt hücresi	Type-214
Çin	15	5	20	Stirling	YUAN
Çin	1		1	Stirling	QING
Almanya	5	1	6	Yakıt hücresi	Type-212
Yunanistan	4	2	6	Yakıt hücresi	Type-214
Yunanistan	1		1	Yakıt hücresi	Type-209
Hindistan	3	2	5	Yakıt hücresi	Scorpone
İtalya	3	3	6	Yakıt hücresi	Type-212
Japonya	8	3	11	Stirling	Soryu
Japonya	1		1	Stirling	Asashio
Pakistan	3		3	MESMA	Agosta 90B
Pakistan		8	8	Stirling	YUAN
Portekiz	2		2	Yakıt hücresi	Type-214
Rusya		3	3	Yakıt hücresi	Lada
Singapur	2		2	Stirling	Archer
Singapur		2	2	TBC	Type-218SG
Güney Kore	7	2	9	Yakıt hücresi	Type-214
İspanya		4	4	Yakıt hücresi	S-80
İsveç	2	-2	0	Stirling	Södermanland
İsveç		2	2	Stirling	A26
İsveç	3		3	Stirling	Gotland
Tayland		3	3	Stirling	YUAN

Günümüz denizaltılarında AIP kullanan ülkelerin yarısından fazlası Stirling AIP sistemini tercih etmektedir. İsveç, Çin, Japonya, Singapur ve Tayland Stirling AIP sistem kullanan ülkeler arasında yer almaktadır. Yakın zamanda Çin Pakistan'a sekiz adet Yuan Sınıfı denizaltı satışı gerçekleştirecektir. Yakın zamanda yapılması planlanan Çin'e ait Yuan sınıfı denizaltılara beş adet daha ekleme yapılacaktır (Xuanzun, 2021). Çin hükümeti 320 kW gücünde Stirling motor ürettiğini belirtmiş ve %40 termal verimle çalışacağını iddia etmiştir. Çin Donanması 1000 kW gücünde Stirling motor üretmeyi amaçladıklarını açıklamıştır (Chinese Navy, 2021).

Tablo 2'de ülke donanmalarına ait AIP kullanan denizaltıların tipleri, sınıfları ve yapılması planlanan AIP sistemine sahip denizaltıların sayısı verilmiştir.

Burada yer alan Stirling AIP sınıfına sahip denizaltıların Çin donanmasına ait denizaltılar hariç diğer tüm sınıflar Kockums firması tarafından geliştirilen Stirling AIP modülünü kullanmaktadır. Günümüzde kullanılan AIP sistemlerinin birbirleri ile oranları ve yakın gelecekteki durumları Şekil 27'de gösterilmiştir (Sutton, 2016).



Şekil 27. Ülkelerin günümüz ve gelecekte yapılması planlanan AIP sistem tiplerinin oranları

7. Sonuç

Tahrik sistemi, denizaltıların performansını belirleyen başlıca unsurlardan biridir. Günümüzde denizaltı tahrikinde ön plana çıkan havadan bağımsız tahrik sistemlerinin, nükleer ve klasik dizel-elektrik tahrik sistemlerine karşı üstünlükleri ile gelecekte denizaltılarda kullanımlarının daha yaygın olacağı beklenmektedir. Stirling AIP sistemi yüksek teknoloji gerektirmemesi ve bakım maliyetlerinin düşük olması sebebiyle diğer AIP sistemlere göre ön plana çıkmaktadır. Sunduğu avantajlarla Stirling AIP sisteminin günümüzde olduğu gibi gelecekte de geliştirilmeye ve tercih edilmeye devam edileceği düşünülmektedir. Bu sonuca hali hazırda kullanılma oranlarına ve ülkelerin donanma güçlerine bakarak varmak mümkündür.

NASA'nın radyoizotop güç sisteminde kullandığı ve son yıllarda üzerinde çalışmalar yapılan serbest pistonlu Stirling motorunun, havadan bağımsız Stirling sisteminde kullanılması ile halihazırda kullanılan Stirling motorunun dezavantajlarını ortadan kaldırma imkânı sunabilecektir. Serbest pistonlu Stirling motorunun lineer çalışma mantığı, hareketli parçasının az olması ve güç/hacim oranının diğer Stirling motorlarına göre oldukça fazla olması nedeniyle AIP sisteminde kullanılmaya çok uygun olduğu görülmektedir.

Stirling AIP sistemine sahip HMS Gotland denizaltısının USS Donald Reagan uçak gemisini 2005 yılında yapılan tatbikatta fark edilmeden batırması oldukça dikkat çeken bir olay olmuştur. Olay sonrası Amerikan Donanması iki yıllığına HMS Gotland denizaltısını incelemelerde bulunmak üzere kiralamıştır. Bu olay Stirling AIP sisteminin kabiliyetini gösteren somut bir örnek olma niteliği taşımaktadır.

Stirling AIP sisteminin yakıt hücresi gibi nadir malzemelere sahip olmaması ve basit çalışma prensibi gibi avantajlarından dolayı ülkemizde ar-ge çalışmaları yapılarak olumlu sonuçlar doğrultusunda denizaltılarda değerlendirilmesi uygun olabilecektir. Türkiye’de yapılması planlanan MILDEN projesinde de denizaltı tahrik sistemi olarak Stirling AIP sisteminin de değerlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle tahrik sistemi modernizasyon işlemleri için Stirling AIP sisteminin entegrasyon işleminin elverişli olması ve başarılı modernizasyon işlemlerinin gerçekleşmiş olması nedeniyle iyi bir tercih olarak görülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü’nün FYL-2021-4172 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Çalışmalarımıza olan desteklerinden ötürü Dr. Münir Cansın ÖZDEN’ e ve Enishan ÖZCAN’ a teşekkürlerimizi sunarız.

Referanslar

Ahmed, F., Huang, H., Ahmed, S., & Wang, X. (2020). A comprehensive review on modeling and performance optimization of Stirling engine. *International Journal of Energy Research*, 44(8), 6098–6127. <https://doi.org/10.1002/er.5214>

Association, W. N. (2021). Nuclear-Powered Ships. Tarihinde adresinden erişildi <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.aspx>

Baino, T. (2018). Overview of Hull Design of Diesel Electric Submarines with Air Independent Propulsion (AIP) System – The Maritime Review. Tarihinde adresinden erişildi <https://maritimereview.ph/2018/09/26/2281/>

Bratt, C. (1990). The 4-95 Stirling engine for underwater application. *Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 5, 530–533. <https://doi.org/10.1109/iecec.1990.748005>

Breeze, P. (2018). Stirling Engines and Free Piston Engines. *Piston Engine-Based Power Plants*, 59–70. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812904-3.00006-9>

Buckingham, J., Mimeche, C., Hardy, T., & Mimarest, C. (2008). Submarine Power and Propulsion - Application of Technology to Deliver Customer Benefit. *UDT Europe 2008*, (June), 1–17.

Chen, N. and Griffin, F. (1983). A Review of Stirling Engine Mathematical Models. Oak Ridge National Laboratory (ORNL).

Chen, N. and Griffin, F. (1986). Linear harmonic analysis of free-piston Stirling engines.

Chinese Navy. (2021). China invents most powerful Stirling engine for AIP submarines. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.china-arms.com/china-best-aip-submarine-engine/>

Coates, P. (2013). Air Independent Propulsion. Tarihinde adresinden erişildi <http://gentleseas.blogspot.com/2014/07/air-independent-propulsion-game-changer.html>

de la Bat, B. J. G., Dobson, R. T., Harms, T. M., & Bell, A. J. (2020). Simulation, manufacture and experimental validation of a novel single-acting free-piston Stirling engine electric generator. *Applied Energy*, 263(January), 114585. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114585>

Deetlefs, I. N., & Dobson, R. T. (2014). Design, simulation, manufacture and testing of a free-piston stirling engine. (December), 1–90. Tarihinde adresinden erişildi <http://scholar.sun.ac.za>

Doreen Zudell. (2020). Stirling Convertor Sets 14-Year Continuous Operation Milestone. NASA. Tarihinde adresinden erişildi <https://rps.nasa.gov/news/40/stirling-convertor-sets-14-year-continuous-operation-milestone/>

Fruhling, C., & Schiemann, M. (2015). Subsea power supply based on submarine propulsion technology. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, 2(May), 982–993. <https://doi.org/10.4043/25732-ms>

Gheith, R., Hachem, H., Aloui, F., & Ben Nasrallah, S. (2018). Stirling Engines. İçinde Comprehensive Energy Systems (C. 4–5). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00409-0>

Gray, R. (1985). Conway's All the World's Fighting Ships, 1906-1921. İçinde Conway's All the World's Fighting Ships, 1906-1921 (s. 314,315).

Han, J., Charpentier, J. F., & Tang, T. (2012). State of the art of fuel cells for ship applications. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, (April), 1456–1461. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2012.6237306>

Jang, J. (2021). A Study on the Submarine Air Independent Propulsion System: Focused on Submarines Currently in Operation. Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, 24(4), 418–425. <https://doi.org/10.9766/kimst.2021.24.4.418>

Joubert, S. (2008). A steam powered submarine: the Ictíneo Low-tech Magazine, 24 August 2008. Low-tech Magazine.

Kankam, M.D. and Rauch, J. (1991). Comparative survey of dynamic analyses of freepiston Stirling engines. 26th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference.

Katoch, L. G. P. C. (2021). AIP and Nuclear Powered Submarines. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.spsmai.com/experts-speak/?id=976&q=AIP-and-Nuclear-Powered-Submarines>

Kerros, P., Inizan, C., & Grousset, D. (2002). MESMA: AIP system for submarines. III/457-III/466. <https://doi.org/10.1109/oceans.1994.364242>

Krummrich, S., & Gmbh, H. W. (2010). Fuel Cell Methanol Reformer System for Submarines. Energy, 78, 1–6.

Lee, A., James, B. D., Kuhn, I. F., & Baum, G. N. (1989). A comparative analysis of electrochemical power sources for the DARPA UUV Program. Proceedings of the 6th International Symposium on Unmanned, (6339), 168–188. <https://doi.org/10.1109/uust.1989.754714>

Lee, J. C., & Shay, T. (2018). Analysis of fuel cell applied for submarine air independent propulsion (AIP) system. Journal of Marine Science and Technology (Taiwan), 26(5), 657–666. [https://doi.org/10.6119/JMST.201810_26\(5\).0005](https://doi.org/10.6119/JMST.201810_26(5).0005)

Mart, P. L., & Margeridis, J. (1995). Fuel Cell Air Independent Propulsion of Submarines. 54. Tarihinde adresinden erişildi <http://www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA304112>

Martini, W. (1983). Stirling Engine Design Manual. National Aerospace and Space Administration (NASA).

Masato Kitazaki. (2017). Development of Zero Emission Generating System “Stirling Engine”. Journal of the Japan Institute of Marine Engineering,.

Metscher, J. F. (2014). Free-Piston Stirling Converter Model Development, Validation, and Analysis for Space Power Systems. 73.

NARAYAN, S., & GUPTA, V. (2015). Overview of Working of Stirling Engines. Journal of Engineering Studies and Research, 21(4), 45–53. <https://doi.org/10.29081/jesr.v21i4.132>

Nasn-, D. O. E., Cr-, N., & Ernst, W. D. (1997). Automotive Stirling Engine Development Project. Renewable Energy. Tarihinde adresinden erişildi http://mac6.ma.psu.edu/stirling/reports/19970012689_1997021349.pdf

Nightingale, N. P. (1986). Mod II Design Report. U.S. Department Of Energy, 54. Tarihinde adresinden erişildi http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19880002196_1988002196.pdf

Nilsson, D., & Engineer, S. D. (2014). Development of the Stirling AIP system Stirling AIP system explained Transit area Diesel engine Battery = Days. (1).

Nilsson, H. (1988). Submarine power systems using the V4-275R Stirling engine. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 202(4), 257–267. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1988_202_036_02

Normani, F. (2013). Stirling Engine Manual.

Özden, M. C. (2010). DİZEL/ELEKTRİK DENİZALTIILARIN DİZAYN AÇISINDAN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ.

Patrick, R. (2012). Nuclear air independent propulsion. Asia-Pacific Defence Reporter, 38(1), 24–30.

Paul Breeze. (2018). Piston Engine and Based Power Plants.

Pierre Gras. (2007). Gamma Stirling Engine. Tarihinde adresinden erişildi <http://www.moteurstirling.com/gamma.php>

Preston, A. (1988). Submarine Warfare. Brown Books.

Psoma, A., & Sattler, G. (2002). Fuel cell systems for submarines: From the first idea to serial production. Journal of Power Sources, 106(1–2), 381–383. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)01044-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)01044-8)

Richard Wheeler. (2007). Alpha Stirling Engine. Tarihinde adresinden erişildi https://tr.m.wikipedia.org/wiki/Dosya:Alpha_Stirling_frame_4.svg

Riofrio, J., Al-Dakkan, K., Hofacker, M. and Barth, E. (2008). Control-based design of free-piston Stirling engines. American Control Conference, pp. 1533 _ 1538.

Rossler, E. (2001). The U-Boat: The Evolution and Technical History of German Submarines.

Stirling, D. (2017). Stirling Engine Type. Tarihinde adresinden erişildi <https://diystirlingengine.com/>

STM ThinkTech. (2021). Yeni nesil denizaltılarda enerji kaynakları ve batarya sistemleri.

Sutton, H. I. (2016). World survey of AIP submarines. İçinde Covert Shores: The Story of Naval Special Forces Missions and Minisubs (2nd baskı). Tarihinde adresinden erişildi [http://www.hisutton.com/World survey of AIP submarines.html](http://www.hisutton.com/World%20survey%20of%20AIP%20submarines.html)

Sutton, H. I. (2020). AIP Submarines Will Increase The Lethality Of The Indian Navy. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.forbes.com/sites/hisutton/2020/07/22/aip-submarines-will-increase-the-lethality-of-the-indian-navy/?sh=44d4742141c7>

ThyssenKrupp. (2020). HDW Fuel Cell AIP System – proven power, simply silent. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.thyssenkrupp-marinesystems.com/en/products-services/innovations/hdw-fuel-cell-aip-system>

Tihonov, E., Bazykin, V., & Mukhanov, N. (2019). Opportunity of external combustion engines usage in forestry complex. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 316(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012072>

Urieli. (1977). A Computer Simulation of Stirling Engine. University of the Witwatersrand.

Urieli and Berchowit. (1984). Stirling cycle engine analysis. (Modern energy studies).

Watch, D. (2012). Tomorrow's Submarines: the Non-Nuclear Option. Tarihinde adresinden erişildi [https://argee.net/DefenseWatch/Tomorrows Submarine Fleet--The Non-nuclear Option.htm](https://argee.net/DefenseWatch/Tomorrows%20Submarine%20Fleet--The%20Non-nuclear%20Option.htm)

Wikipedia. (2011). Stirling Engine. Tarihinde adresinden erişildi https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine

Xuanzun, L. (2021). China develops world's most powerful Stirling engine. Tarihinde adresinden erişildi <http://www.globaltimes.cn/page/202112/1243157.shtml>

Zhu, S., Yu, G., Jongmin, O., Xu, T., Wu, Z., Dai, W., & Luo, E. (2018). Modeling and experimental investigation of a free-piston Stirling engine-based micro-combined heat and power system. Applied Energy, 226(May), 522–533. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.122>

Eklemeli İmalat Yöntemiyle Tekne İnşaatında Dolgu Yoğunluğu ve Örüntüsünün Mukavemet Üzerindeki Bileşik Etkisi

Ayberk Sözen¹, Gökdeniz Neşer²

^{1,2} Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi,
İnciraltı, Balçova, İzmir, Türkiye

¹ (Sorumlu yazar), ayberk.sozen@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9657-5567

² gokdeniz.neser@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9218-0181

ÖZET

Prototip ve ürün üretim hızı, tasarımcılara sağladığı form geliştirme özgürlüğü, görece düşük kapasitedeki üretim ihtiyaçları için rekabetçi maliyeti, iyi kaliteye hızlı ulaşım olanaklarıyla, bilgisayar destekli tasarım ve üç boyutlu yazıcı teknolojisi temelindeki eklemeli imalat yöntemi, denizcilik endüstrisini de kapsayacak şekilde yaygın bir ilgi görmektedir. Bu ilginin temel kanıtı, eklemeli imalat yöntemine ilişkin araştırma, geliştirme etkinlikleri ve bilimsel yayın sayılarındaki ciddi artıştır. Esnek tasarımların sıklıkla güncellenmesiyle rekabetçiliği sürdürülebilir kılınabilecek küçük tekne endüstrisinin anılan avantajları nedeniyle eklemeli imalat yöntemine yönelmesi kaçınılmazdır. Eklemeli imalat yöntemi, teknelerin tasarım ve üretim sürecini verimli kılmakla birlikte, bu yöntemden iyi sonuç alabilmek onun bileşenleri üzerinde uygulamayla elde edilmiş deneyimlere dayanan verileri gereksinir. Bu çalışma kapsamında eklemeli imalat yönteminin önemli bileşenlerinden dolgu yoğunluğu ve örüntüsünün nihai ürünün temel mekanik özelliklerinden çekme mukavemeti üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Üç boyutlu yazım teknolojileri temelinde yaygın olarak kullanılan polimerlerden polilaktik asitin (PLA) 13 farklı basım örüntüsü ve %10, 25, 50, 75 ve 100 olmak üzere beş farklı dolgu yoğunluğundan oluşan deney matrisi uyarınca çekme deneyleri Dokuz Eylül Üniversitesi (DEÜ) Kompozit Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Sonuçlar, mekanik niteliklerin üzerinde durulan parametrelere çok duyarlı olduğu, "kübik" örüntünün incelenen yoğunluklarda genel olarak en iyi mekanik niteliklere ulaşmakta etkin olduğunu göstermiştir. Bu örüntü ve %25 yoğunluktan yararlanılarak 1/5 ölçeğinde bir yelkenli tekne gövdesi PLA polimer kullanılarak eklemeli imalat yöntemiyle DEÜ Deniz Bilimleri ve Teknolojileri Eklemeli imalat Laboratuvarı'nda üretilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tekne üretiminde eklemeli imalat yöntemi, polilaktik asit (PLA), yazım örüntüsü, dolgu yoğunluğu.

Makale geçmişi: Geliş 17/05/2022 – Kabul 21/06/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1117813>

The Effects of Infill Density and Pattern on the Strength of Marine Small Craft Building by Additive Manufacturing Method

Ayberk Sözen¹, Gökdeniz Neşer²

^{1,2} Dokuz Eylül University Institute of Marine Sciences and Technology,
İnciralti, Balçova, İzmir, Türkiye

¹ (Corresponding author), ayberk.sozen@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9657-5567

² gokdeniz.neser@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9218-0181

ABSTRACT

The additive manufacturing method based on computer-aided design and three-dimensional printing technology, its speed, design freedom provided for the designers, the cost-effectiveness and competitive for relatively low-capacity production needs, the possibilities of achieving good quality; has gained a popularity with the industries, including the maritime sector. The main proof of this interest is the significant increase in the number of research and development activities and scientific publications on this topic. Due to above mentioned advantages, it is inevitable for the small-marine craft industry, whose competitiveness can be made sustainable by frequently updating flexible designs, to adopt their technology to the additive manufacturing method. While it makes the design and manufacturing process of boats efficient, for getting more effective results; it requires past driven data approach on practical experience. In this study, the effect of infill density and pattern, which are important parameters of the additive manufacturing method, on the tensile strength of the final product's basic mechanical properties was investigated experimentally. Tensile tests with 13 different printing patterns and 5 different infill densities of polylactic acid (PLA), one of the polymers widely used based on three-dimensional printing technologies, and a test matrix consisting of five different filling densities as 10%, 25%, 50%, 75% and 100%, were performed in Dokuz Eylül University's (DEU) Composite Laboratory. The results showed that the mechanical properties were very sensitive to these parameters, and the cubic pattern was generally effective in achieving the best mechanical properties at the investigated densities. Using this pattern and 25% density, sailboat hull with a scale of 1/5 was produced in DEU Institute of Marine Sciences and Technologies Additive Manufacturing Laboratory, using PLA polymer by additive manufacturing.

Keywords: Additive manufacturing method in marine small craft building, polylactic acid (PLA), printing infill pattern, printing infill density.

Article history: Received 17/05/2022 – Accepted 21/06/2022

1. Giriş

Modelden kalıba, oradan da üretime giden süreci oldukça kısaltan, tasarımcılara form geliştirmekle özgürlük alanı açan, özellikle düşük kapasitelerdeki üretim için rekabetçi, maliyet-etkin çözümlere ulaşmada yardımcı olan, istenilen ürün kalitesine ulaşmada güçlük yaşanmayan eklemeli imalat yöntemi uygulamaları hemen her endüstri dalı gibi denizcilik endüstrisinin de gerek üretim gerekse araştırma ve geliştirme etkinlikleri bağlamında ilgi odağındadır (Garmulewicz vd., 2018; Khoo vd., 2015).

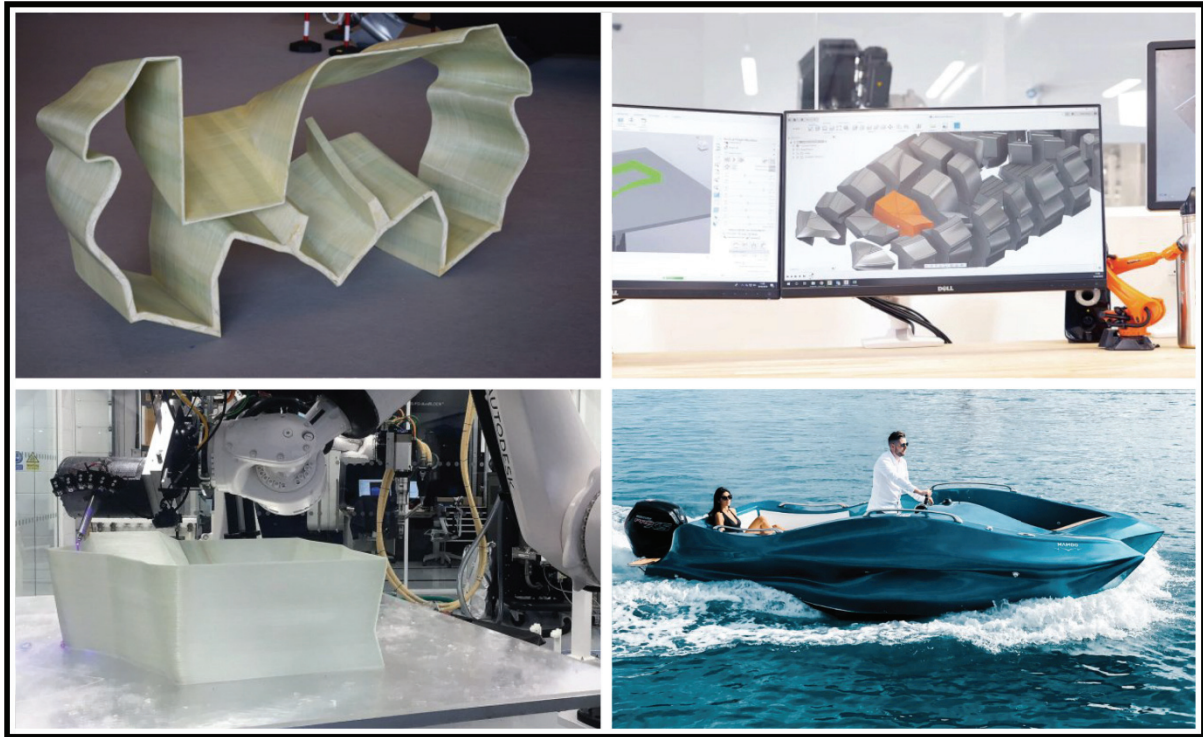
1980'lerde ilk örnek uygulamalara rastlanmaktaysa da özellikle son on yıldır, yazıcıların, dolayısıyla yazılabilen ürünlerin boyutlarının büyümesi ve teknoloji üreticilerinin artışıyla yaşanan rekabet nedeniyle ilk yatırım maliyetlerinin düşmeye başlamasıyla bu imalat yöntemiyle tekne üretimi ilgi çekici, hatta alışlagelmiş yöntemlerle karşılaştırıldığında rekabetçi bir konuma gelmiştir (Wohlers ve Gornet, 2016; Strickland ve Strickland, 2016). Yalnız tekne gövdesi üretimi değil, pervane gibi özel malzeme içeriğine sahip, yaygın olarak yararlanılan termo plastiklerden ve onların kompozitlerinden çok daha karmaşık bir teknoloji ve süreci gerektiren tekne bileşenleri için de çözümler sunan bu imalat yöntemi akıllı, işlevsel, hafızalı malzemeler gibi dördüncü boyut olarak zamanın da içerildiği üretimler için olanaklar sunmaktadır (Taş vd., 2019; Kumar vd., 2021; Momeni vd., 2017; Sharma ve Srinivas, 2020; Wang vd., 2020).

Tekne üretimi uygulamalarına ilk örnek olarak, Maine Üniversitesi İleri Kompozit Malzemeler Merkezi'nde 72 saat gibi rekor bir sürede ve bir bütün olarak üretilen, polimer kompozit temelli 7,64 metre tam-boyundaki tekneyi anmak gerekecektir (Şekil 1). Bu tekne, eklemeli imalat yönteminde zorlukla ulaşılan "uygun yüzey pürüzlülüğü" anlamında da başarılı bir uygulama olarak görülmelidir.



Şekil 1. Maine Üniversitesi İleri Kompozit Malzemeler Merkezi'nde üç boyutlu yazıcı ile üretilen tekne, (İleri Kompozit Malzemeler Merkezi, 2019)

Teknenin kendini, modelini veya kalıbını üretmek için uyumlu altyapının belirleyici unsuru olan yazıcının bir bütün olarak üretime uygunluğu beklense de bir üretimin maliyetlerini oldukça yükseltecek böyle bir yatırım yerine, teknenin bölümler halinde üretilmesi seçeneği de söz konusudur. Modüler yaklaşım, üretim sırasında meydana gelebilecek hataların azaltılması / sınırlandırılması olanağı da daha esnek ve güvenilir bir üretime de yardımcı olacaktır. Çok parçalı üretimde, modüllerin birleştirilmesi tasarımcının çözmesi gereken bir problem olarak ortaya çıkacaktır. Bu problem mekanik, termal ve/veya kimyasal birleştirme yöntemleriyle çözülebileceği gibi, çözüme farklı kaplama malzemelerinin özgün uygulamalarıyla daha yaratıcı yaklaşımlar geliştirilerek de yaklaşılabilir. Modüler üretime örnek olarak ise MOI Composite firmasının alışılmış yöntemlerle üretilmeyecek oldukça radikal bir formdaki günlük gezi teknesi verilebilir (Şekil 2). Bu tasarımın üretimi eklemeli imalat yöntemiyle mümkün olmuştur ve modüler bir şekilde üretilen parçalar elyaf ve reçine ile kaplanarak birleştirilebilmiştir. Süreçte, iskeleti üretmek ve kurmak kolay olsa da yüzeyin iyileştirilmesi için oldukça uzun süreli ve maliyetli bir yüzey işlemi gerekmiştir.



Şekil 2. Modüler olarak eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş bir günlük gezi teknesi, (MOI Composite, 2020)

Eklemeli imalat yöntemi büyük endüstriyel uygulamaların yanı sıra,

- Kolay ulaşılabilirlik niteliğiyle, genellikle hobi amaçlı amatör çalışmalarda, polimer bazlı malzemeler kullanmak suretiyle gittikçe yaygınlaşmaktadır. Örneğin bu yöntemin denizcilik kültürünün vazgeçilmez bir parçası olan ve el becerisi gerektiren gemi maketçiliğine, parça ve bir bütün olarak ürününün üretimini kolaylaştırıcı katkıları bu geleneğin gençler tarafından sevilmesi ve yaygınlaşması anlamında önemsenmelidir. Amatörce uygulamaya bir diğer örnek ise, yetişkinlerin katıldığı “bir metre sınıfı” uzaktan kumandalı yelkenli veya motor-bot formundaki tekne yarışları için veya yine uzaktan kumandalı teknelerle yapılan amatör balıkçılık faaliyetleri için tekne üretimidir. Ekleme imalat yöntemi, oldukça ilgi çeken bu boyut ve nitelikteki teknelerin üretiminin maliyetlerini düşürerek desteklemektedir.

- Gemilerin havuz deneyleri için model üretiminde de eklemeli imalat yöntemi gerek hız gerek yüksek duyarlılık ve gerekse azaltılabilen malzeme miktarı ile yararlanılacak bir seçenek olarak görülebilir.
- İnsansız küçük deniz araçlarının (özellikle düşük derinliklere dalış yapabilen veya su yüzeyinde hareket eden) yapısal elemanları veya bir bütün olarak üretimi için eklemeli imalat yöntemi yine polimer esaslı malzemeler temelinde oldukça kullanışlıdır. Son yıllarda yaygınlaşan teknoloji festivalleri de sualtı robotları, uzaktan kumandalı görüntüleme cihazları, insansız yüzen araçların tasarım ve üretimini eklemeli imalat yöntemi sayesinde yaygınlaştırmış ve bu olanağın mühendislik öğretimine katkısı da dikkate değer boyutlara ulaşmıştır.

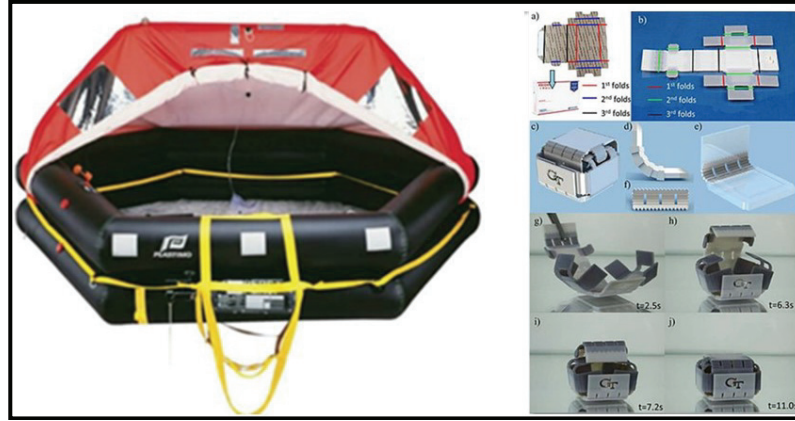
Eklemeli imalat yöntemlerinin denizcilikteki uygulama alanları bağlamında önemli bir potansiyel, karmaşık geometriye sahip metalik yapısal elemanların hızlı ve düşük maliyetli olarak üretilebilmesidir. Örneğin pervane tasarımı ve üretimi yetkinlik gerektiren, maliyetli ve uzun süren bir süreçtir ki pervane üretiminin eklemeli imalat yöntemiyle gerçekleştirilmesinde bir ilk, Damen Tersanesi'nin RAMLAB (Rotterdam Additive Manufacturing LAB) laboratuvarının Autodesk yazılım firmasıyla ortaklaşa başardığı ve Bureau Veritas tarafından onaylı metal pervanedir. Üretilen pervane (Şekil 3) yoğun bir son işlem görmüştür ki buna rağmen üretim süresi konvansiyonel yöntemle nazaran oldukça kısalmıştır. Bu deneysel bir çalışma olduğu için maliyet değerlendirmesi yapmak çok gerçekçi olmasa da metal parçaların eklemeli imalatla üretilip, sertifikalandırılabilceğini göstermesi açısından çok önemli bir çaba olarak değerlendirilmelidir. Benzer şekilde vana, impeller, gemi dümeni, yeke gibi donanımların ve/veya bunların elemanlarının metal hammaddelerden üretilmesi gerçekçi bir yaklaşımdır.



Şekil 3. Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen gemi pervanesi, (RAMLAB, 2017)

Eklemeli imalat yönteminde akıllı malzemelerden yararlanma, sürece dördüncü bir boyut katmaktadır ki denizcilik endüstrisinde bundan yararlanmak son derece etkin çözümlere ulaşmakta faydalı olacaktır. Güneş ışığına bağlı olarak kendiliğinden kararın camlar, ısıyla renk değışebilen ısıya maruz malzemeler, operatörleri uyararak için karanlıkta kendiliğinden ışık yayan malzemeler, vb. malzemelerden uygun modifikasyonlarla eklemeli imalatla yararlanılabilecektir. Son yıllarda akıllı malzemeler ile ilgili en büyük gelişmelerden birisi hafıza şekilli olanlarıdır. Bu uygulamalarda malzemeye dıştan gelen nem/su, sıcaklık, güneş ışığı gibi uyaranlar malzemenin tepki vermesine ve şekil değıştirmesine neden olmaktadır. Eklemeli imalatın bu teknoloji ile birleştirilmesi sonucu ortaya çıkan yazım olanağına dört boyutlu yazım (4D printing) denmektedir. Şekil hafızalı malzemelerin denizcilik endüstrisinde kullanılabileceği alanlara örnek olarak can salları üretimi verilebilir. Zira kütlesi 40 kg civarında olan 8-

10 kişilik can sallarının tehlike anında suya atılması, küçük teknelerde insanların fiziksel gücüne dayanmaktadır ki bu durum denizci havalarda oldukça zor ve zaman zaman imkansızlaşır. Salın ağırlığının büyük bileşenlerinden olan ve otomatik olarak aktive olmama riski de yüksek olan şişirme tüpünün ortadan kaldırılmasına yardımcı olacak akıllı malzemelerle ve eklemeli imalat ile üretilmiş bir can salı ciddi bir seçenektir (Şekil 4). Bu tasarımda şişirme tüpünden tamamen vazgeçilirse bile tüp ve şişirme mekanizması küçültülerek can salı hafifletilebilecektir.



Şekil 4. Akıllı malzemelerin denizcilik endüstrisinde kullanımı ile ilgili bir örnek, (Shie et al., 2019)

Küresel anlamda konuyla ilgili yapılan araştırmalar, kullanılan üretim malzemesi temelinde başta termo plastikler ve onların kompozitleri (%28,2) olmak üzere, biyo-malzemesi (%19,8) ve çeşitli metaller (%13,5) odaklıdır ki uygulama alanı temelinde ise tıp (%18,9), inşaat (%3,5) ve otomotiv (%2,2) endüstrisi ön plandadır. Bu bağlamda, denizcilik endüstrisine ilişkin araştırmalar %0,4'lük küçük bir paya sahiptir (Güngör., 2020). Sertifikasyona özen gösteren denizcilik endüstrisinde, bu anlamda eklemeli imalat alanındaki eksikliklerin giderilmesinin ardından bu yönetime dayalı üretimin ivmeleneceği beklentisi vardır. Bununla birlikte eklemeli imalatın sertifikasyonunun, geleneksel üretim yöntemlerindeki gibi malzemenin yalnız kullanımını değil imalata paralel olarak üretimi de içeren süreç nedeniyle farklı yetkinlikleri de içeren karmaşık bir yapıda olması da beklenmelidir (Bekker vd., 2017).

Ürünün bilgisayar destekli olarak tasarlanmasının üretimin bir parçası olduğu eklemeli imalatta vektörel olarak veya bir ağ yapısı içinde modellenen ürünün, 1987'den beri geçerli bir şekilde kartezyen koordinat sistemine sahip üçgenel bir bilgisayar diliyle yani Standart Üçgen Dili (Standard Triangle Language; STL) (Zhou vd., 2015) yazıcıya tanıtılmasıyla başlayan bu süreç, yazıcı üreticisinin sağladığı veya tercihen açık kaynak kodlu bir yazılım ile sıcaklık, baskı hızı, tabla sıcaklığı ve filament çapı gibi kritik üretim parametrelerinin eklenmesiyle yaratılan ve düşük seviye bir dil olan, 1950'li yıllarda sayısal kontrollü üretim tezgâhları (CNC)'ler için geliştirilmiş olan G-code tabanlı bir veri dosyası oluşturulmasıyla devam edecektir. Ardında, bir hafıza kartı veya bir data kablosu yardımıyla üç-boyutlu yazıcıya okutulan bu dosya ve satırlar halinde yazıcı tarafından okunarak işlenir (Delgado vd., 2018).

Katı bazlı, akışkan ve toz temelli olmak üzere üç farklı malzemedan yararlanılarak, bağlayıcı püskürtme (blinder jetting), doğrudan enerji biriktirme (direct energy deposition), toz yataklı kaynaştırma (powder bed fusion), plaka katmanlama (sheet lamination), hazne polimerizasyonu (vat polymerization), materyal püskürtmesi (material jetting) ve materyal ekstrüzyonu (material extrusion) olmak üzere yedi farklı teknik ile (Colorado vd., 2020) uygulanan eklemeli imalat yönteminde maliyet etkin seçenek olarak termo plastik malzeme ile ekstrüzyon kombinezonu ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada da termo plastik polimerler ve onların kompozitleri tabanlı, ekstrüze edilmiş anılan malzemedan yararlanan eriyik filamanla imalattan (fused filament fabrication, FFF) yararlanılmıştır ki bu teknik literatürde de

en sık rastlanılanıdır (Mohamed vd., 2015) ve viskoz termo plastik malzemenin ısıtılmış bir uç aracılığıyla platform üzerine veya önceden basılmış katmanlar üzerine katman katman biriktirilmesini içerir (le Duigou vd., 2020).

2. Üç Boyutlu Yazım İyileştirmesi İçin Deneysel Yaklaşım

Eklemeli imalatta performansın iyileştirilmesi için baskı parametrelerinden biri olan malzeme dolgu yoğunluğu ve tekrarlayan yazım geometrisi olarak tanımlanabilecek yazım örüntüsü üreticinin sürecin herhangi bir aşamasında yeniden belirleyebileceği, yönlendirebileceği araçlardandır. Sadece bu iki parametreyle yapılacak optimizasyon dahi beklenen mekanik özelliklerde, daha hafif veya tasarımcı-yönlü ürünlere varmak için yeterli olabilecektir. Bu yaklaşım gerek polimer esaslı gerekse de metalik malzemeler için geçerlidir. Bununla birlikte, polimer malzemelerde mekanik özelliklerin ürün hacminde dağılımının düzgünlüğüne (izotropi) de anılan parametreler hakkında karar verilirken ve özellikle ürünün işletme ömrü boyunca taşıyacağı yükler değerlendirilmek suretiyle özen gösterilmesi gereklidir.

Polimer esaslı malzemelere dayalı yazıcılar görece olarak düşük maliyetli ve kolay üretilebilir, erişilebilir olduğu için bunlardan yararlanılarak PLA ile yapılmış, optimizasyon çalışmalarına literatürde sıklıkla rastlanmaktadır.

Yararlanılacak örüntünün, mekanik özelliklere kritik ve doğrudan etkisi bulunmaktadır. Yapılan bir çalışmada (Lubombo ve Huneault, 2018) aynı dolgu yoğunluğuna sahip, farklı dolgu örüntüleri arasında çekme mukavemeti açısından iki kata yakın farkın olduğu görülmüştür. Bazı araştırmacılara göre ise yazım yoğunluğu ve çekme mukavemeti arasında doğrusal bir ilişki olsa da bu eğilim yazım örüntüsüne güçlü bir şekilde bağlı olarak değişmektedir (Pandzic vd., 2019). PETG (Polietilen Tereftalat Glikol) kullanılarak yapılan bir çalışmada ise, yazım örüntüsünün etkisinin malzemedan bağımsız olarak ele alınmasına rağmen, bu yaklaşımın çok doğru olamayacağı, zira yazım örüntüsüyle malzeme arasında göz ardı edilemeyecek bir ilişkinin olduğu; anılan çalışmanın PLA ile yapılmış eşdeğerine vurgu yapılarak ortaya atılmıştır. PETG'nin, bu çalışmada PLA'dan çok daha yüksek katmanlararası yapışmaya sahip olduğu da görülmüştür ve bu nitelik denizel uygulamalar için PETG'nin verimli olabileceğinin altı çizilmiştir (Srinivasan vd., 2020).

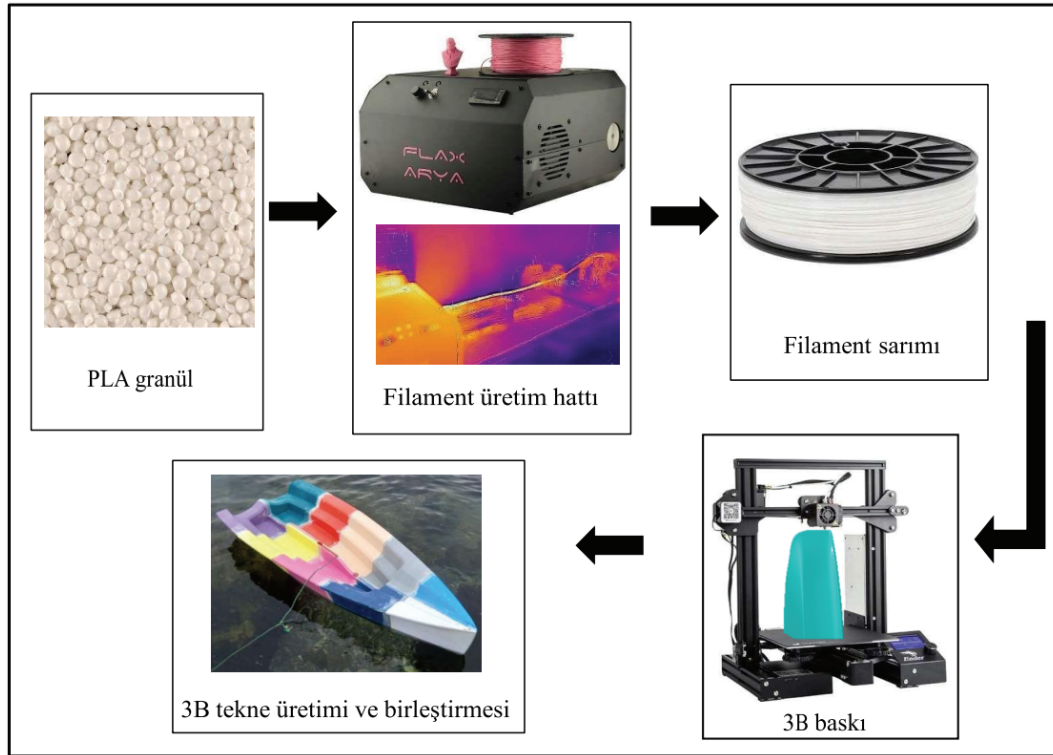
Ayrıca polimerlerin cam ve karbon elyafı gibi fiberlerle güçlendirilerek kompozit filamentler üretilmesi ve kullanılması da malzemeyi anizotropik hale getirdiği için yazım örüntüsünün seçimini değiştirebilmektedir (Ma vd., 2021). Bununla birlikte, oluşan bu kompozit çatlak ilerlemesine karşı oldukça duyarlıdır. Dekoratif amaçlı olarak üretilen PLA matrisli ahşap kompozit ile yapılan çalışmaların elektron mikroskop görüntülerinin değerlendirmesinde ise kompozit bileşenlerin ara yüzeylerinde iyileştirme yapılmadığı için yüksek miktarda boşluk bulunmuştur ki böyle bir oluşum ürün performansını olumsuz bir şekilde etkilemektedir (Kariz vd., 2018). Sonuç olarak eklemeli imalat yönteminde örüntünün etkisini inceleyen çalışmaların malzeme bağlamında tasarlanması önerilmektedir. Nitekim beton ile ilgili yapılan bir çalışmada, yazım örüntüsünün sadece polimerler için değil katmanlararası mukavemet çok iyi olsa da metaller gibi diğer malzemeler için de irdelenmesi ve tasarıma katılması gereken bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır (Heras vd., 2020). Ek olarak, her katmanda şaşırtmalı ve birbirinden farklı olarak ilerleyen üç boyutlu diye nitelenebilecek yazım örüntüsünün basma yüklerinde daha dayanıklı olduğu saptanmıştır (Aloyaydi vd., 2020).

2.1. Malzeme ve Yöntem

Dolgu yoğunluğunun ve yazım örüntüsünün tekne üretimi üzerindeki bileşik etkisinin irdelendiği bu deneysel çalışmada, standart bir yazıcıda kolaylıkla başvurulabilen ve ilgili pazardan temin edilebilen

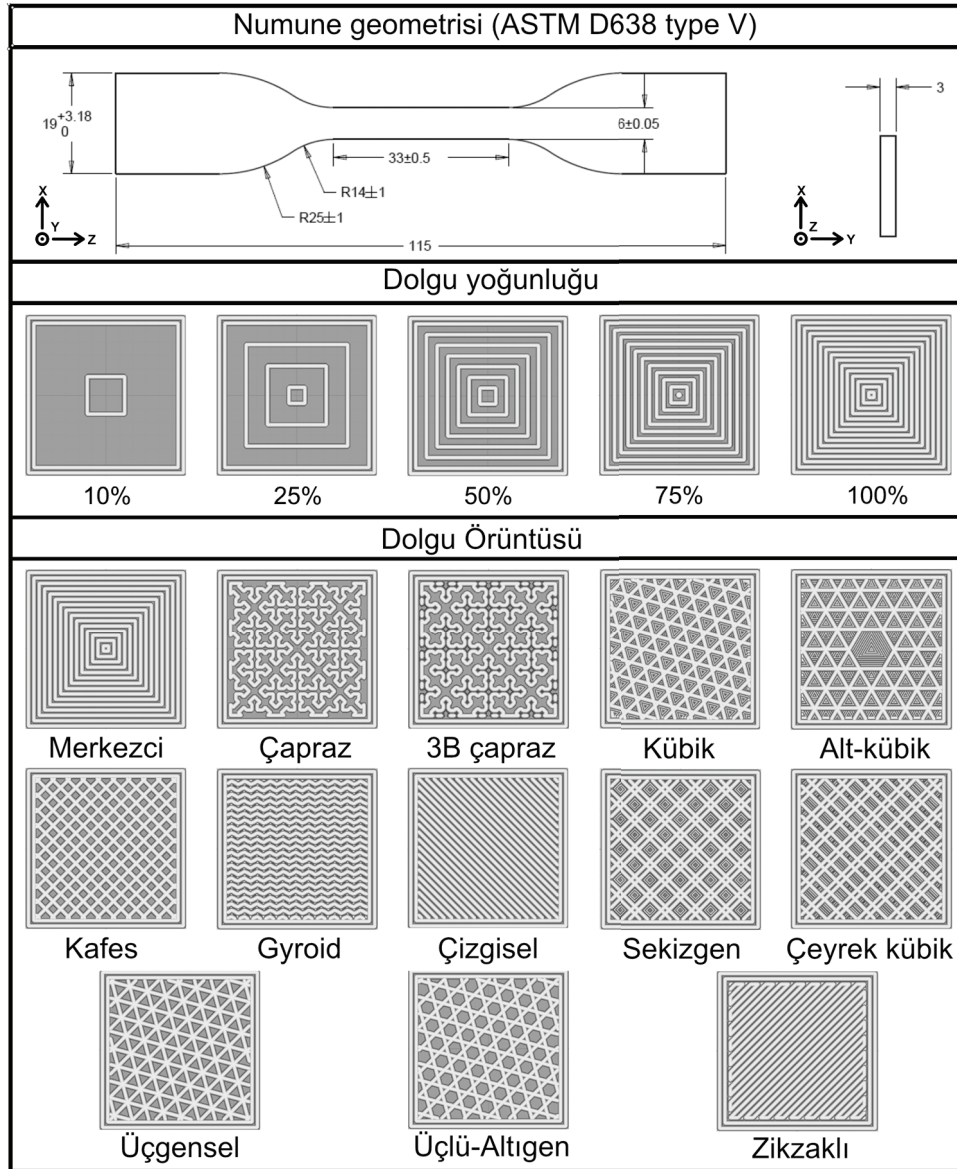
Bio-Flex firmasının F7510 polilaktik asit (PLA) ürünü kullanılmıştır. Bu malzemenin öz kütlesi $1,25 \text{ gr/cm}^3$, erime sıcaklığı 155°C ve akış indeksi 190°C 'de 2–4 g/10 dakikadır. Yalnız adı geçen malzeme değil, genel olarak, PLA biyo-bozunur bir malzeme olduğu ve organik olarak doğal süreçlerden elde edildiği için sürdürülebilir malzemeler arasında değerlendirilmektedir.

Granül PLA'dan filaman, üretimi ve tekne modüllerinin yazımı DEÜ Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü, eklemeli imalat laboratuvarında yapılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. DEÜ Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü Eklemeli İmalat Laboratuvarındaki yazım düzeneği

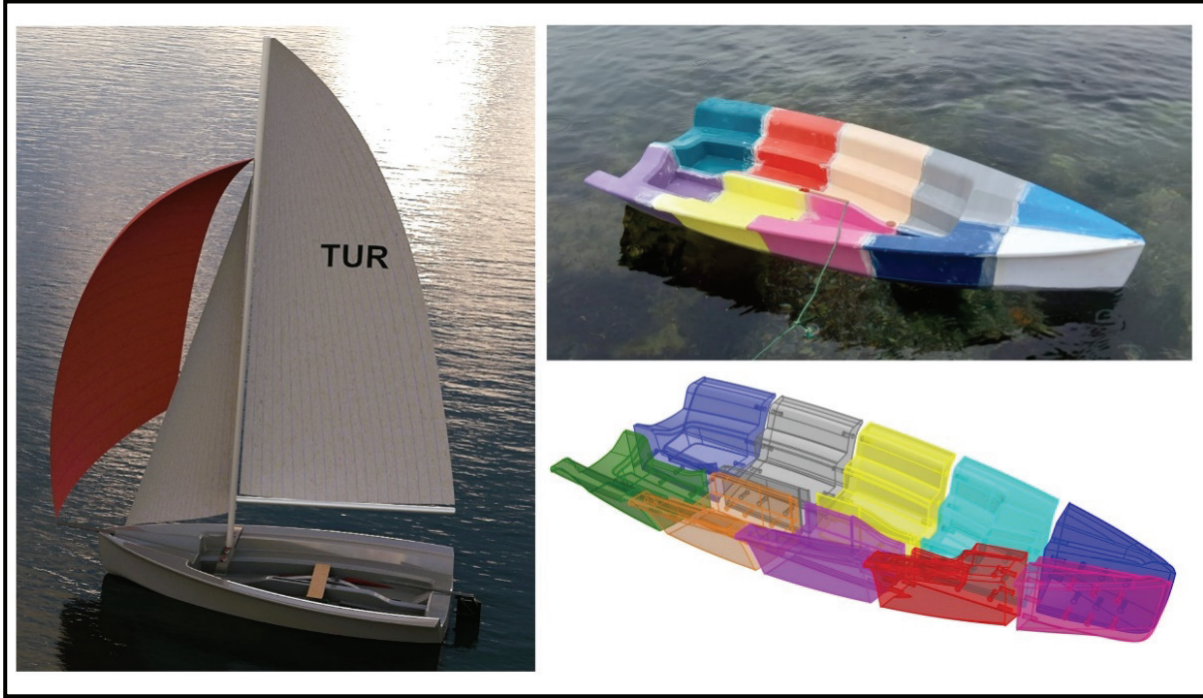
Çalışma kapsamında 13 farklı yazım örüntüsü ve %10, 25, 50, 75, 100 olmak üzere beş farklı doluluk oranıyla hazırlanan numuneler çekme testlerine Instron 1114 makinasında, 1 mm/dak çekme hızına tabi tutulmuştur (Şekil 6). Her bir mukavemet değeri üç numune testinin ortalaması alınarak belirlenmiştir. “Kübik, alt-kübik, sekizgen, çeyrek küp” gibi geometriler numune yüksekliği doğrultusunda her katmanda şaşırtmalı olarak işlenerek üç boyutlu bir kafes yapısı meydana getirmektedirler. “Zikzaklı, merkezci, ızgara, üçgensel” formlarında ise her katmanda birbirine zıt yönde olmak üzere iki boyutlu bir yapı oluşmaktadır. Yazım örüntülerinin oluşturulması ve programlanması Creality Slicer V4.8.2’de gerçekleştirilmiştir. Yazım sırasında materyal ekstrüzyonu yöntemlerinden birisi olan FFF tercih edilmiştir. Ürünler cr-200b yazıcısında 40 mm/sn baskı hızında 200°C derecede 0.4 mm nozzle ile, 50°C derecelik cam tablaya alınmıştır. Baskı sonrası ısıtma işlemi uygulanmamıştır.



Şekil 6. Numune geometrisi, dolgu yoğunluğu ve yazım örneği

Katmanların baskı yönünde, Şekil 6’da gösterildiği gibi Z eksenine doğrultusunda, yapılan çekme testleri (ASTM,2016) literatürle de uyum sağlamakla ürün üretimi için düşük yoğunluklarda “kübik” algoritmasının z eksenine doğrultusunda daha iyi mukavemet sonuçlarını sunduğu görülmektedir. Sonuç ürün olarak 5 metre tam boya sahip bir yelkenli tekne gövdesi, 1/5 ölçeğinde %25 doluluk oranında ölçeklenerek Şekil 7’deki gibi üretilmiştir. on farklı parçada üretilen tekne, mekanik ve kimyasal olarak birleştirilmiştir. Buradan elde edilecek sonuçların gerçek ölçekli üretim için yol göstermesi planlanmıştır. Yazım hızı 30 mm/sn, yazım sıcaklığı 200°C alınmış ve 50°C sıcaklığa sahip ısıtmalı tabla kullanılmıştır. Yazım süresi her bir parça için yaklaşık iki tam gün olup ve üretim bir ayda tamamlanmıştır.

Ardından denizel çevresel aşınmadan korumak amacıyla tekne prototipi ürün Termo plastik Poliüretan (TPU) ile kaplanmıştır. Her parçanın farklı renkte üretilmesinin sebebi modüler üretime vurgu yapmak içindir. Bağlantı parçaları sebebiyle tekne ağırlığı %5 oranında artmıştır.

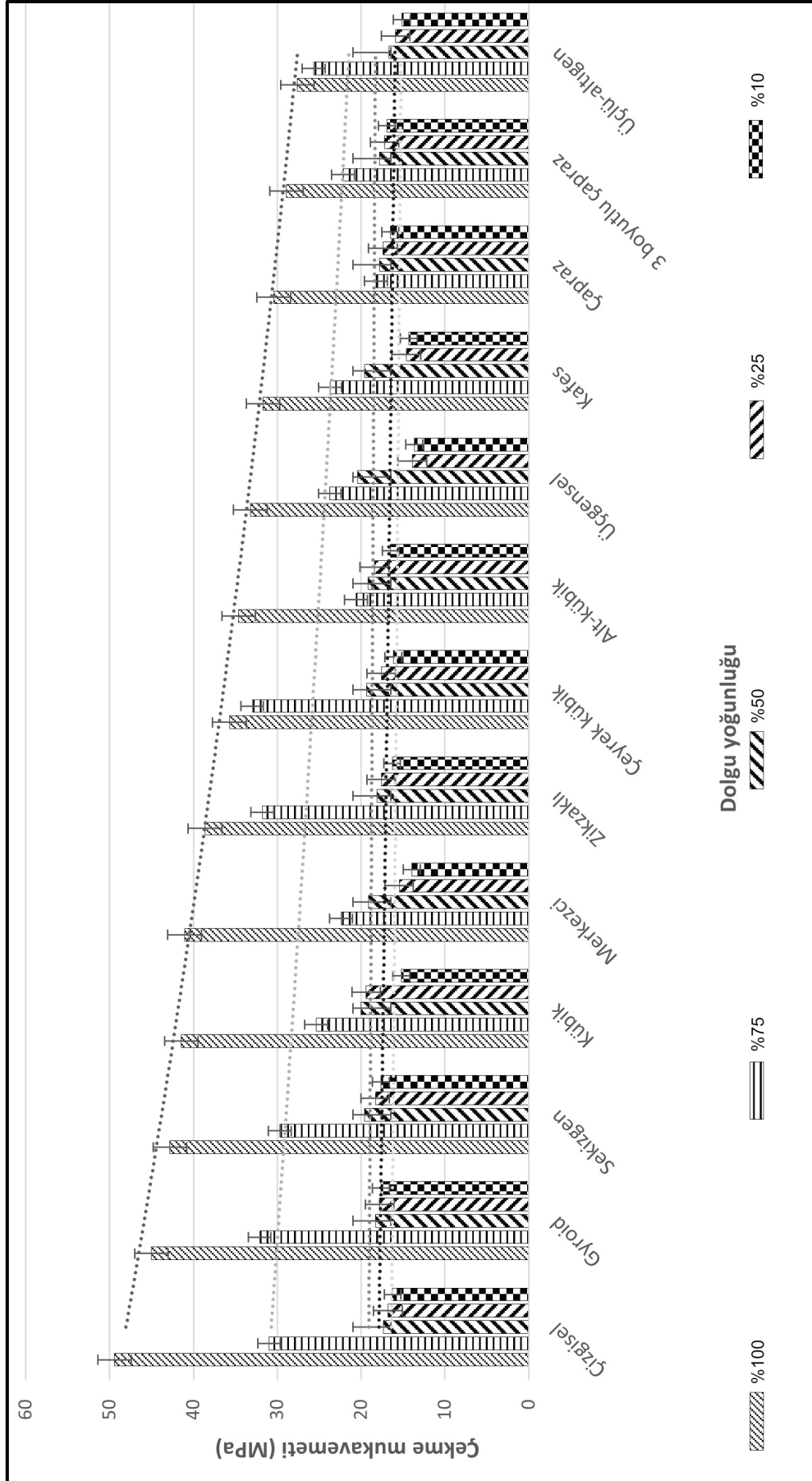


Şekil 7. Üzerinde çalışılan ve eklemeli imalatla 1/5 ölçekte gövdesi üretilen yelkenli tekne

2.2. Sonuçlar

Çekme testi sonuçları incelendiğinde %100 dolgu yoğunluğuna sahip olan parçalar en yüksek mukavemet değerlerine ulaşırken, yoğunluğu azaldıkça mukavemette hızlı ve dramatik bir düşüş görülmüştür. Bu düşüş eğrisi %50 yoğunluk oranından sonra sabitlenmiştir. Üç boyutlu yapıya sahip örüntüler %100 dolgu yoğunluğu oranlarında en yüksek değerlere ulaşamasa da iki boyutlu olanlar düşük yoğunluk oranlarında daha iyi performans sergilemektedir. 2 Boyutlu örüntülerin özellikle, düşük yoğunluklarda, katman basma yönünde, Z eksenine doğrultusunda katman yapışma problemi yaşadığı tespit edilmiştir. Örüntü türlerinin, dolgu yoğunluğu değişimlerine farklı tepki verdiği gözlenmiştir. %10 ve %25'lik dolgu yoğunluğu arasında ise çok düşük farklar bulunmaktadır. Bu yoğunluklar değerlendirilirken, küçük teknelerdeki dış ve iç cidarlara benzer duvar yapılarının yapıyı desteklediği göz ardı edilmemelidir.

Çekme testlerinden ve literatürden alınan sonuçlar ışığında eklemeli imalat yöntemiyle üretilen yelkenli modelinin deniz testleri başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir. Tekne deniz durumu 3'e kadar test edilmiş olup üzerine yine ölçekli olarak iki adet yetişkin ağırlığı yerleştirilmiştir. Direk bölgesindeki lokal mukavemet çalışılmamıştır. Çıplak gözle yapılan sorveyde herhangi bir çatlak veya katman ayrışmasına rastlanmamıştır. Su geçirmezlik, anılan kaplama sayesinde başarılı bir şekilde sağlanmıştır. Yapılan kaplamanın PLA'yı dış ortamlardan yalıtıp, yüzey pürüzlülüğünü azalttığı görülmüştür.



Şekil 8. Dolgu yoğunluğu ve örüntüsünün çekme mukavemetine etkisi

Yazım yoğunluğu ile çekme mukavemeti arasındaki ilişkinin, yazım örüntüsüne de oldukça bağlı olduğu görülmüştür. Farklı örüntüler, yoğunluk azaldıkça mukavemette farklı karakterlerde düşüş eğilimlerine yol açmıştır. Buradan ayrıca, yazım düzlemindeki performansın bu düzleme dik doğrultuda Z eksenine boyunca oldukça azaldığı katmanlar arası bağlanmanın sorunlar yaratmaya başladığı izlenmiştir. Bu durum, “kübik” veya “çapraz” gibi üç boyutlu dolgu örüntülerinin seçilmesinin yani ürünün yazım düzlemine dik doğrultudaki mukavemetine katkısından da anlaşılmaktadır. Dik doğrultudaki mukavemet, tüm yapıyı destekler niteliktedir.

Şekil 8’de görüldüğü gibi, %50 ile %10 doluluk oranına sahip numunelerde, örüntülere göre mukavemet değişimi bağlamında daha dar bir sınırdaki değişimler gözlenmiştir ki bu olgunun numune boyutundan kaynaklandığı açıktır. Yapıyı bir arada tutmak için, yazım sırasında dış, üst ve alt duvarların eklenmesi zorunluluğu görülmektedir. Numune boyutları çok büyük olmadığı için, belli bir doluluğun altında bu yapıyı artık bu destek elemanları temel olarak taşımakta ve dolgu parametrelerinin önemi azalmaktadır.

Benzer ağırlıklarda, farklı dolgu yoğunluklarına ve malzeme kalınlıklarına sahip gövde yapıları karşılaştırıldığında yazım süresi bağlamında ise tam doluluğa sahip ürünlerin yazım süresi %20 daha uzundur. Bu sebeple iç dolgu yoğunluğunu düşürüp, yapının kalınlığını arttırmak, üretim süresinden kazanç sağlamaktadır.

Yapılan saha testlerinden gözlemlendiği kadarıyla, PLA her ne kadar biyo-bozunur bir malzeme olsa da esnek bir plastik polimer ile kaplandığında, denizel çevresel etkilerden korunmakta ve dolayısıyla iyi bir ömür düzeyinde ulaşmaktadır. Su geçirmezlik böylelikle başarılı bir şekilde sağlanmıştır.

3. Değerlendirme

Yazım parametrelerinden yoğunluk ve örüntünün mekanik özelliklerin iyileştirilmesi bağlamında deneysel olarak incelendiği ve elde edilen sonuçlarla da bir örnek teknenin yazıldığı bu çalışmada, PLA temelinde eriyik filaman yönteminden yararlanılmıştır. Sonuçlar, karşılaştırmalı olarak sunulmuştur ki bu sonuçlardan tekne üretiminde gerekli yapısal dayanımı sağlamak için temelde iki yaklaşım olduğu görülmektedir: %100 dolgu yoğunluğuna sahip numuneler yüksek bir performans göstermişlerdir fakat yüksek dolgu yoğunluğu sebebiyle, ağırlıkları yüksektir. Bu yüzden, ya ince bir dış kabuk ile gövde üretimi tam dolu ürün veya daha hacimli ve %25 dolulukta ürün seçenekleri arasında karar verilebilir.

Eklemeli imalat yönteminin genel anlamda denizcilik endüstrisi için henüz başlangıç düzeyinde bir tanınırlığa ve temel düzeyde bir uygulanabilirliğe sahip olduğu açıktır. Yöntemin geleneksel metotlara göre birçok avantaj barındırmasına karşın, küçük deniz araçlarının gövde üretimi bağlamında halen bir boyut-maliyet doğru orantılı ilişkisinin çok etkin olduğu yani yazım boyutu veya tekne/parça boyutu büyüdükçe altyapı maliyetlerinin üstel olarak arttığı görülmektedir. Bununla birlikte modüler üretimlerde doğru birleştirme teknikleriyle; eşdeğerlerine nazaran bütünsel üretime göre yeteri kadar mukavemet ve hatta daha iyi hafiflikte sonuçlara varılabileceği bu çalışmayla ortaya konmaktadır.

Üretim sırasında meydana gelebilecek kalite risklerinin yazım parametrelerinin deneysel olarak iyileştirilmesiyle giderilebileceği görülmektedir. Bu çalışmadaki eklemeli imalat yöntemiyle tekne üretimi söz konusu olduğunda, ayrıca dış yüzey iyileştirme işlemlerinin gerekliliği vardır.

Eklemeli imalat yöntemi her üretim gereksinimine yanıt verme anlamında büyük bir potansiyel vaat etse de bu konuda denizcilik endüstrisi özelinde yapılmış araştırmalar oldukça sınırlıdır. Bu üretim bağlamında ise uzun dönemli yorulma davranışı ve hasar mekanizmaları ile ilgili araştırmalara ihtiyaç

duyulmaktadır. Özellikle eklemeli imalat ile üretilmiş tekne gövdelerinin çatlak ilerlemesine karşı daha duyarlı olduğunu belirtmek gerekir.

PETG ise çok iyi katman yapışması sağlaması sebebiyle iyi bir alternatif olarak gelecek çalışmalar için değerlendirilebilir. Ayrıca teknenin kaplanması direnci arttıran yüzey pürüzlülüğünü azaltmaktadır. Katmanlar arasında kalan boşluklar bu kaplama ile doldurulmaktadır. Bunun da bir maliyet getireceğini ve zaman gerektireceğini belirtmek gerekir.

Petrol bazlı polimerler kullanılarak yapının ömrü uzatılabilir fakat ABS, HDPE veya PETG ile çalışmanın PLA ile çalışmaya göre uzmanlık ve daha yüksek maliyetli kapalı kabinli bir yazıcı gerektirdiğini belirtmek gerekir. İş ve çevre güvenliği, açısından da petrol bazlı polimerler ile çalışırken zehirli gaz emisyonlarına önlem almak potansiyel üretimin vazgeçilmez unsuru olacaktır.

Referanslar

Aloyaydi, B., Sivasankaran, S., Mustafa, A. (2020). Investigation of infill-patterns on mechanical response of 3D printed polylactic-acid. *Polymer Testing*, 87. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106557>

American Society for Testing and Materials, (2016), Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM International, 82(C), 1–15., doi: 10.1520/D0638-14.1.

Bekker, M., Verlinden, C., Galimberti, G. (2017). Challenges In Assessing the Sustainability of Wire + Arc Additive Manufacturing for Large Structures., *Solid Freeform Fabrication Symposium*,

Colorado, H. A., Velásquez, G., Monteiro, N. (2020). Sustainability of additive manufacturing: the circular economy of materials and environmental perspectives. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 8221–8234. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.062>

Delgado, D., Clayton, P., O'Brien, W., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R., Salamone, S. (2018). Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review. *Automation in Construction*, 89, 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.031>

Duigou, A., Correa, D., Ueda, M., Matsuzaki, R., Castro, M. (2020). A review of 3D and 4D printing of natural fibre bio composites. In *Materials and Design*, 194, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108911>

Garmulewicz, A., Holweg, M., Veldhuis, H., Yang, A. (2018). Disruptive Technology as an Enabler of the Circular Economy: What Potential Does 3D Printing Hold? *California Management Review*, 60(3), 112–132. <https://doi.org/10.1177/0008125617752695>

Güngör, A., (2020). Türkiye’de Katmanlı İmalat ve Gemi İnşaatı Üzerine Etkileri. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, 218, 36 – 53.

Heras, D., Genedy, M., Reda Taha, M. M. (2020). Examining the significance of infill printing pattern on the anisotropy of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120559>

İleri Kompozit Malzemeler Merkezi, (2019). <https://composites.umaine.edu/3dirigo-the-worlds-largest-3d-printed-boat/> [Online] [Erişim 10.05.2022]

Kariz, M., Sernek, M., Obućina, M., Kuzman, K. (2018). Effect of wood content in FDM filament on properties of 3D printed parts. *Materials Today Communications*, 14, 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2017.12.016>

Khoo, X., Teoh, J., Liu, Y., Chua, C., Yang, S., An, J., Leong, K., Yeong, Y. (2015). 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 10(3), 103–122. <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1097054>

Kumar, R., Kumar, M., Chohan, S. (2021). The role of additive manufacturing for biomedical applications: A critical review. In *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 828–850. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.022>

Lubombo, C., Huneault, A. (2018). Effect of infill patterns on the mechanical performance of lightweight 3D-printed cellular PLA parts. *Materials Today Communications*, 17, 214–228. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.09.017>

Ma, Q., Rejab, M. R. M., Kumar, A. P., Fu, H., Kumar, N. M., Tang, J. (2021). Effect of infill pattern, density and material type of 3D printed cubic structure under quasi-static loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(19), 4254–4272. <https://doi.org/10.1177/0954406220971667>

Mohamed, A., Masood, H., Bhowmik, L. (2015). Optimization of fused deposition modelling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, 3(1), 42–53. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>

MOI Composite, (2020).

<https://www.polimi.it/en/articles/mambo-the-worlds-first-3d-printed-fiberglass-boat/> [Online] [Erişim 10.05.2022]

Momeni, M., Mehdi, N., Liu, X., Ni, J. (2017). A review of 4D printing. *Materials and Design*, 122, 42–79. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.068>

Pandzic, A., Hodzic, D., Milovanovic, A. (2019). Effect of infill type and density on tensile properties of pla material for fdm process., *Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 30(1), 545–554. <https://doi.org/10.2507/30th.daaam.proceedings.074>

Rotterdam Additive Manufacturing (RAMLAB), (2017). LAB <https://www.ramlab.com/updates/ramlab-unveils-worlds-first-class-approved-3d-printed-ships-propeller/> [Online] [Erişim 10.05.2022]

Sharma, K., Srinivas, G. (2020). Flying smart: Smart materials used in aviation industry. *Materials Today: Proceedings*, 27, 244–250. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.115>

Shie, M. Y., Shen, Y. F., Astuti, S. D., Lee, A. K. X., Lin, S. H., Dwijaksara, N. L. B., Chen, Y. W. (2019). Review of polymeric materials in 4D printing biomedical applications. In *Polymers*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/polym11111864>

Srinivasan, R., Nirmal Kumar, K., Jenish Ibrahim, A., Anandu, K., Gurudhevan, R. (2020). Impact of fused deposition process parameter (infill pattern) on the strength of PETG part. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1801–1805. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.777>

Strickland, J., Strickland, D. (2016). Applications of Additive Manufacturing in the Marine Industry. *Practical Design of Ships and Offshore Structures*, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29930.31685>



Taş, Ş. O., Şener, B. (2019). The Use of Additive Manufacturing in Maritime Industry. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 67(6). <http://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V67I6P209>

Wang, B., Zhang, Z., Pei, Z., Qiu, J., Wang, S. (2020). Current progress on the 3D printing of thermosets. *Advanced Composite Hybrid Materials*, 3, 462–472 <https://doi.org/10.1007/s42114-020-00183-z>
Wohlers, T., Gornet, T. (2016). History of Additive Manufacturing, *Wohlers Report*, 2-28.

Zhou, Y., Huang, W. M., Kang, S. F., Wu, X. L., Lu, H. B., Fu, J., Cui, H. (2015). From 3D to 4D printing: approaches and typical applications. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(10), 4281–4288. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0925-0>

Eklemeli İmalat Teknikleri ve Gemi İnşaatı Endüstrisindeki Potansiyeli

Ali Alıcıoğlu ¹, M. Erden Yıldızdağ ²

^{1,2} Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi,
Ayazaga Kampüsü, Maslak-Sarıyer, İstanbul, Türkiye

¹ alialicioglu@hotmail.com, ORCID: 0000-0002-4237-1454

² (sorumlu yazar), yildizdag@itu.edu.tr, 0000-0003-3041-133X

ÖZET

Eklemeli imalat teknikleri, geleneksel imalat yöntemlerinden olan aşındırılmalı ve şekil vermeli üretim yöntemlerinden farklı olarak yapı malzemesinin üst üste katmanlar şeklinde dizilmesiyle yapılan üretim şeklidir. Özellikle, son 20 yılda büyük gelişmeler yaşanan eklemeli imalat tipleri kendi içinde, International Organization for Standardization (ISO) ve American Society for Testing and Materials (ASTM) standartlarına göre, üretim şekli ve kullanılan malzemelere bağlı olarak yedi ana alt sınıfa ayrılmaktadır. Tüm bu yöntemlerin bilinen en karakteristik özelliği, kompleks geometriye sahip parçaların daha hızlı ve düşük maliyetlerle üretilebilmesidir. Üretime kattığı yenilikçi bakış açısına bağlı olarak, ürünlerin dizaynlarına uygulanacak topoloji optimizasyonu ile birlikte daha az bileşenli, daha karmaşık ve daha hafif parçaların aynı dayanımda üretilmesinin yolunu açmaktadır. Havacılık, sağlık ve otomotiv gibi sektörlerde yoğun şekilde kullanılan bu imalat yönteminden gemi inşaatı endüstrisinin de faydalanması kaçınılmazdır. Loydların ve tersanelerin işbirliği ile son 10 sen içerisinde yapılan önemli fizibilite çalışmaları bulunmakta, buna ek olarak çeşitli donanmalar ve araştırma kuruluşları tarafından aktif olarak kullanılmaktadır. Yapılan bu çalışmanın amacı eklemeli imalat tekniklerinin gemi inşaatı endüstrisindeki potansiyelini incelemektir. Bu inceleme yapılırken hem akademik hem de sanayi alanındaki potansiyeli; literatür araştırması, sanayi ve akademik alandan uzman görüşlerinin alınması ve akademik alan için yapılan fizibilite çalışmasıyla incelenmiştir. Akademik alanda araştırmalarda kullanılan pervaneler, gemi modelleri ve dümen yapılarının üretim potansiyeli incelenmiştir. Sanayi alanında kullanılan parçalar ise konstrüksiyon ve donatım parçaları olarak iki alt başlıkta incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda akademik alanda kullanılacak ürünlerin satın alınması yerine yazıcılarla üretilmesiyle daha düşük maliyetli ürünler elde edilebileceği görülmüştür. Sanayi alanında ise donatım parçaları ve bazı konstrüksiyon ürünlerinde kullanılmasının hız ve maliyet açısından avantaj sağlayabileceği gösterilmiştir. Son olarak, eklemeli imalat yöntemlerinin en temel sorunlarından olan sertifikalandırma konusuyla ilgili olarak çeşitli klas kuruluşları ve standartlardan genel hatlarıyla bahsedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, 3 boyutlu baskı, gemi inşaatı, deniz araçları , dolgu yoğunluğu.

Makale geçmişi: Geliş 23/05/2022 – Kabul 16/06/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1119936>

Additive Manufacturing Techniques and Their Potential in the Shipbuilding Industry

Ali Alicioğlu ¹, M. Erden Yıldızdağ ²

^{1,2} Istanbul Technical University Department of Naval Architecture and Marine Engineering,
Ayazaga Campus, Maslak-Sariyer, Istanbul, Türkiye

¹alialicioglu@hotmail.com, ORCID: 0000-0002-4237-1454

² (corresponding author), yildizdag@itu.edu.tr, 0000-0003-3041-133X

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) techniques, unlike traditional manufacturing methods with abrasion and shaping, are the production methods made by stacking the building material in layers on top of each other. In particular, additive manufacturing types, which have experienced great developments in the last 20 years, are divided into 7 main subclasses according to the International Organization for Standardization (ISO) and American Society for Testing and Materials (ASTM) standards, according to the production method and the materials used. The most characteristic feature of all these techniques is that parts with complex geometries can be produced faster and at low cost. Additive manufacturing paves the way for the production of complex and lighter parts with the same strength, together with topology optimization. It is inevitable that the shipbuilding industry also benefit from additive manufacturing, which is used extensively in fields such as aviation, health and automotive. There are important feasibility studies carried out in the last 10 years with the cooperation of Loyds and shipyards as AM is actively used by various navies and research institutions. The central theme of this study is to examine the potential of additive manufacturing techniques in the shipbuilding industry. An in-depth literature review is presented including expert opinions from industry and academia, and a feasibility study is presented. From the academic point of view, fabrication of propellers, ship models and rudder structures used in academic research is examined. It has been seen that low-cost products can be fabricated by 3D printers instead of purchasing products to be used in the academic research. On the other hand, parts used in the industry are examined under two sub-categories: construction and equipment parts. In shipbuilding industry, it has been found that the usage of AM in equipment parts and some construction products will provide advantages in terms of speed and cost. Finally, various classification societies and standards are mentioned in general terms regarding the certification issue, which is one of the most fundamental problems of additive manufacturing techniques.

Keywords: Additive manufacturing, 3D printing, shipbuilding, marine structures.

Article history: Received 23/05/2022 – Accepted 16/06/2022

1. Giriş

Üretim teknolojileri ve malzeme bilimi alanındaki gelişmeler tarih boyunca önemli dönüm noktalarının doğmasına neden olmuştur. Günümüz dünyasında hızla gelişmeye devam eden bu teknolojiler sayesinde öncesinde imkansız olarak görülen birçok buluş gerçekleştirilmiş ve insan hayatı kolaylaşmıştır.

Üretim teknikleri kendi içerisinde iki ana başlık altında incelenebilir. Bunlardan ilki geleneksel yöntemler ve diğeri de yenilikçi yöntemlerdir. Geleneksel yöntemlerle üretim şekil verme ve aşındırma yöntemlerini kapsarken, yenilikçi üretim eklemeli imalat yöntemlerini kapsamaktadır. Şekil verme ile üretim yönteminde malzemeye bir baskı uygulanarak istenilen şekle getirilebilir veya eriyik malzemenin kalıplara dökülmesi ile ürün oluşturulabilir. Bu yöntemin genel örnekleri dövme, haddeleme, ekstrüzyon, kesme, bükme ve toz metalurjisi ile üretimdir. Aşındırma ile imalatta ise malzemenin istenilen şekle kavuşması için belirli alet ve makineler yardımıyla parçalar kopartılmaktadır. Bu işlemler torna, freze, delme ve EDM (Elektro Erozyon) gibi tezgahlarda gerçekleştirilmektedir. Eklemeli imalat teknikleri ise geleneksel yöntemlerin tersi şekilde işleyerek üretilen parçanın bilgisayar destekli tasarım programlarında dizayn edilip, malzemenin katman katman eklenip, en sonunda nihai parçanın oluşturulduğu üretim şeklidir. Günümüzde, özellikle tıbbi alanda sıkça kullanılan bu teknoloji; havacılık ve uzay, otomotiv ve mimari gibi alanlarda da sıkça kullanılmaya başlanmıştır.

Sağladığı çeşitli avantajlardan dolayı dünya üzerinde en çok malzeme türünün ve çeşitli boyutlarda parçaların kullanıldığı, en büyük ticaret, ulaşım ve eğlence unsurlarından olan gemi ve deniz araçlarının üretiminde bu yöntemlerden faydalanılması kaçınılmazdır. Bu çalışma kapsamında eklemeli imalat yöntemlerinin gemi inşaatı endüstrisinin hem akademik hem de sanayi alanındaki potansiyeli araştırılmıştır. Akademik alandaki potansiyeli incelenirken, kendi içerisinde eğitim alanındaki faydaları ve bilimsel araştırmalardaki kullanımı olmak üzere iki ana başlık altında incelenmiştir. Sanayi alanındaki potansiyeli ise konstrüksiyon ve donatım parçalarının üretimi olarak iki ana başlık altında detaylı örnekleriyle birlikte incelenmiştir. Araştırma yapılırken bu konuda yapılan çalışmalar ve hem akademik hem de sanayi alanında çalışan kişilerin yorumlarından faydalanılmıştır. Araştırmanın niteliğinin artması için akademik alanda yapılan çalışmaya bir maliyet çalışması da dahil edilmiştir. Son olarak üretilen parçaların kullanıma uygun olması adına çeşitli klas kuruluşları ve standartlaştırma organizasyonlarının bu konuda yaptığı çalışmalardan bahsedilmiştir.

2. Eklemeli İmalat Teknikleri

Eklemeli imalat teknolojileri American Society for Testing and Materials (ASTM) tarafından yayınlanan F2792 – 12a nolu standarda göre “aşındırmaya dayalı üretim yöntemlerinin aksine, malzemelerin üç boyutlu model verilerine göre, genellikle üst üste katmanlar şeklinde birleştirilmesi ile parça üretimi süreci” olarak tanımlanmaktadır (ASTM F2792-12a, 2012). Eklemeli imalat terimi dışında; katmanlı imalat, üç boyutlu (3D ya da 3B) baskı ve serbest biçimli imalat gibi çeşitli terimler de kullanılmaktadır (Güngör, 2020).

2.1. Tarihçesi

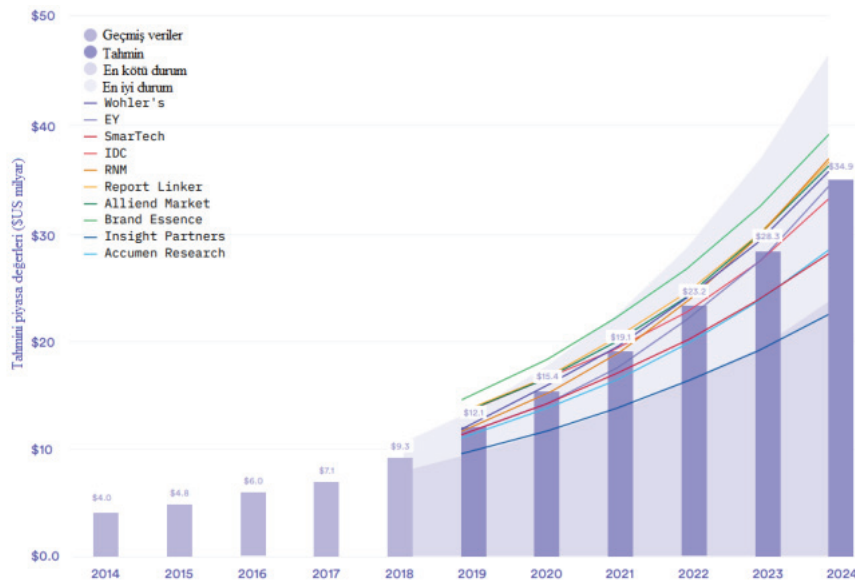
Modern eklemeli imalatın kökleri günümüzden 40 yıl öncesine dayansa da önceki topografik ve fotografik çalışmalar eklemeli imalata benzemekte ve neredeyse 150 yıl öncesine dayanmaktadır. Bu iki erken teknoloji katmanlı şekilde serbest biçimli bir yapı oluşturmaya yönelik “kes ve birleştir”

yaklaşımına dayanmaktadır (Bourella vd., 2009). Bir lazer ve fotopolimerler kullanılarak katı oluşturmaya yönelik ilk çalışma 1960'ların sonunda Battele Memorial Enstitüsü'nde gerçekleşmiştir. Sonrasında 1980'li yıllara kadar çeşitli kişiler ve şirketler tarafından bu alanda çalışmalar yapılmıştır ancak günümüzdeki kullanıma en yakın konsept (bilgisayarlar ve lazerler gibi) 1980'li yılların başında yakalanmıştır (Wholers ve Gornet, 2014; Gibson vd., 2015). 1984 yılında Charles Hull, Stereolitografi (SLA) yönteminin patentini almış ve sonrasında bunun üzerine bir şirket kurmuştur. Bu, Stereolitografi aparat makinasıyla, eklemeli imalat teknolojisini ticarileştiren ilk şirkettir (Gibson vd., 2015).

1984'ten günümüze devam eden süreç içerisinde farklı eklemeli imalat teknikleri ortaya çıkmış ve geliştirilmiştir. Günümüzde eklemeli imalat teknolojisi insan hayatının neredeyse her alanına nüfuz etmeyi başarmıştır. Jet motorlarının üretiminden medikal çalışmalara kadar oldukça geniş bir yelpazede kullanılan bu üretim tekniğinin kullanımının üretimde gittikçe daha fazla paya sahip olacağı öngörülmektedir.

2.2. Kullanım Yöntemleri ve Kullanılan Sektörler

Eklemeli imalat tekniklerinin, özellikle son 20 yıl içerisinde, kullanılabilen malzeme çeşitlerinin artması, yeni yöntemlerin ortaya çıkması ve sistemlerin veriminin ve güvenilirliğinin artması ile birlikte kullanımı yaygınlaşmıştır (Özer, 2020). On farklı piyasa analisti şirketi tarafından 2019 yılında yapılan araştırmaya göre, dünya genelinde önümüzdeki dört yıl boyunca eklemeli imalat pazarının büyük bir büyüme göstererek 2024 yılında yaklaşık 35 milyar doları bulacağı belirtilmiştir. Yapılan analizlerdeki en iyi ve en kötü durum arasındaki farkı oluşturan değişkenler; seri üretim için benimseme oranı, malzeme ve sistemlerdeki gelişmeler ve toplam maliyetlerdeki azalmadır. Ayrıca müşteri talepleri ve daha büyük ekonomik ortam gibi dış faktörleri de içermektedir (3D Hubs, 2020). Şekil 2'de verilen grafikte yapılan analizlere göre eklemeli imalatın geçmiş piyasa değerleri ve yakın gelecekteki tahmini piyasa değerleri gösterilmiştir.



Şekil 1. Eklemeli imalatın pazar payı (3D Hubs, 2020)

2.2.1. Kullanım yöntemleri

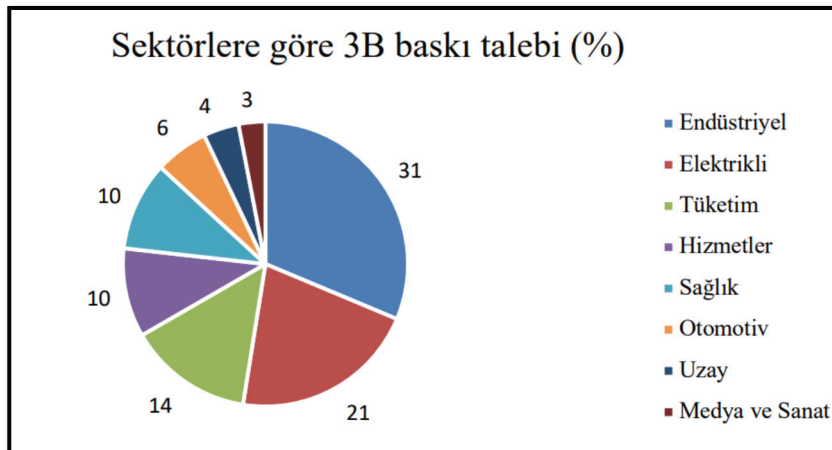
Eklemeli imalat teknolojileri, üç ana şekilde kullanılmaktadır: hızlı prototipleme (rapid prototyping), hızlı kalıp üretimi (rapid tooling) ve hızlı üretim (rapid production) (ISO, 2015). Hızlı prototipleme, dizayn edilen bir ürünün tasarım ve işlevsellik açısından test edilebilmesi için hızlı bir şekilde prototip üretmek için kullanılan eklemeli imalat yöntemidir (Güngör, 2020). Prototipler genellikle işlevselliği açısından sınırlı olduğundan ve bu nedenle dayanıklılık veya bitiş konusunda daha az talepte bulunduğundan, eklemeli imalatın ilk kullanım alanı olmuştur. Bu yöntem sayesinde ileride soruna neden olabilecek tasarım kusurları erken aşamalarda fark edilebilmektedir (Bergsma vd., 2016). Hızlı kalıp üretimi; seri üretilen nesnelerin üretiminde kullanılan, operasyonu veya süreci kolaylaştıran ürün veya araçların (kalıp gibi) hızlıca imal edilmesi için kullanılmaktadır (Güngör, 2020; Bergsma vd., 2016). En önemli fark, üretilen aletlerin genellikle 7 mutlak kalite taleplerinin olmamasıdır. Örneğin döküm işleminde kalıbın yeterli özellikleri göstermesi halinde ne şekilde üretildiği önemli değildir. Eklemeli imalatın yanı sıra, hızlı kalıp üretimi yöntemiyle alet üretimi aşındırma üretim tiplerine göre (CNC freze gibi) daha hızlı şekilde üretilebilir (ISO, 2015). Hızlı üretim yöntemi ise bilgisayar destekli tasarım ile oluşturulan parçaların üretimi anlamına gelmektedir. Bergsma vd. (2016), bahsedilen kullanım şekillerini üretilen ürünün önemine göre Tablo 1’de gösterilen şekilde genellemiştir.

Tablo 1. Eklemeli imalat kullanım şekilleri (Bergsma vd., 2016)

Kullanım \ Önem	Düşük: dizayn veya prototip için	Orta: güvenlik açısından kritik olmayan işlevsel parçalar	Yüksek: yüksek mühendislik ürünü güvenlik açısından kritik parçalar
Hızlı Prototipleme	X		
Hızlı Kalıp Üretimi	X	X	X
Hızlı Üretim		X	X

2.2.2. Kullanılan sektörler

Eklemeli imalat teknolojilerinin, yapılan çalışmalar ve artan malzeme çeşitliliği sayesinde dünya çapında medikal, otomotiv, uzay-havacılık, yapı sektörü ve gemi inşaatı gibi alanlarda kullanımı hızla artmaktadır. Çalışmanın bu kısmında gemi inşaatı sektörü haricindeki kullanım örnekleri gösterilecek ve gemi inşaatı endüstrisindeki uygulamaları sonraki bölümde paylaşılacaktır.



Şekil 2. Eklemeli imalatın pazar payı (3D Hubs, 2020)

Şekil 2’de verilen grafikte, profesyonel kullanıcıların temsili bir örneğine dayalı olarak çevrimiçi 3B baskı talebinin endüstriye göre dağılımını göstermektedir. Talebin %65’inden fazlası endüstriyel, elektrikli veya tüketim mallarının geliştirilmesinde çalışan profesyonel kullanıcılardan gelmektedir. Öte yandan havacılık, otomotiv ve sağlık endüstrilerindeki profesyoneller, geleneksel "çevrimdışı" tedarik zincirlerini kullanarak şirket içinde veya dış kaynak olarak parça üretmeyi tercih etmektedir (3D Hubs, 2020).

Yukarıda belirtilen sektörlerdeki kullanım örnekleri olarak; sağlık sektörü için yapay organ ve kemik üretimi, uzay ve havacılık sektörü için turbojet motor bileşenleri ve bazı yapısal parçaların üretimi verilebilir. Yakın bir örnek olarak TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş. (TEI), üretimini yaptığı TEI-TJ300 Turbojet motorunun parçalarının üretiminde eklemeli imalat teknolojilerinden faydalandığını belirtmiştir (TEI, n.d.). Otomotiv sektörü için yapısal kompozit bileşenler, motor vanaları ve turboşarj türbinlerinin üretimi yanında Kor firmasının ürettiği Ecologic Urbee modelinde olduğu gibi direkt olarak araba gövdesi üretimi sayılabilir (Özer, 2020). Şekil 3’te TEI tarafından eklemeli imalat ile üretilmiş turbojet motoru parçası gösterilmiştir.



Şekil 3. TEI-TJ300 Turbojet motoru parçası (TEI, n.d.)

Eklemeli imalat teknikleri, ana parça üretimi dışında kalıp üretiminde de kullanılmaktadır. Düşük sayıda yapılacak üretimler veya özel parçaların üretimi için en büyük maliyetlerden biri kalıp maliyetidir. Eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak düşük maliyetli, karmaşık yapı ve daha dayanıklı (kalıpla bütünlük soğutma kanallarının koyulmasıyla) kalıplar diğer üretim yöntemlerine göre daha hızlı şekilde üretilebilmektedir. Sahip olduğu bu avantajlar sayesinde son ürünün performansında artışa ve kalıpların daha uzun süreli kullanımına olanak sağlamaktadır.

2.3. Eklemeli İmalat Teknikleri

İlk ortaya çıktığı günden bugüne eklemeli imalat teknolojileri hızla gelişmiş ve birçok farklı yöntem ve birçok farklı malzeme kullanımı ortaya çıkmıştır. Bu çeşitlilik aynı zamanda bu yöntemlerin sınıflandırılmasını da zorlaştırmıştır. ASTM’nin 2012 yılında yayınladığı F2792-12a nolu standarda göre eklemeli imalat teknolojileri yedi ana başlığa ayrılmıştır. Tablo 2’de bu sınıflandırma gösterilmiş ve her yöntemin özelliklerinden kısaca bahsedilmiştir.

Tablo 2. Eklemeli imalat teknikleri ve özellikleri (Tofail vd., 2018)

ASTM Kategorisi	Temel Prensibi	Avantajları	Dezavantajları
Yapıştırıcı Püskürtme (Binder Jetting)	Sıvı bağlayıcı ince toz katmanlarına püskürtülür.	<ul style="list-style-type: none"> • Destek yoktur. • Özgün dizayn imkanı • Büyük üretim hacmi • Yüksek üretim hızı • Nispeten düşük maliyet 	<ul style="list-style-type: none"> • Sınırlı mekanik özellikler ve kırılma parçaları • Ek işlem gerektirebilir.
Yönlendirilmiş Enerjiyle Biriktirme (Directed Energy Deposition)	Odaklanmış termal enerji biriktirme sırasında malzemeleri eritir.	<ul style="list-style-type: none"> • Tane yapısında yüksek kontrol imkanı • Yüksek kalite parçalar • Tamirat uygulamalarında başarılıdır 	<ul style="list-style-type: none"> • Düşük yüzey kalitesi ve hız ayarı ihtiyacı • Sınırlı metal ve metal bazlı hibrit sayısı
Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion)	Malzeme bir nozul veya ağızdan dışarı itilir.	<ul style="list-style-type: none"> • Geniş kullanım • Düşük maliyet • Değişken ölçek 	<ul style="list-style-type: none"> • Dikey anizotropi • Kat kat yüzey
Malzeme Jeti (Material Jetting)	Yapı malzeme damlacıkları biriktirilir.	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek hassasiyet • Düşük atık • Çoklu malzemeli parçalar • Çoklu renk 	<ul style="list-style-type: none"> • Genelde destek malzemesi gerekir. • Ana olarak fotopolimer ve termo reçineler kullanılabilir.
Toz Yataklı Ergitme (Powder Bed Fusion)	Isı enerjisiyle toz yataktaki tozdan ufak bir nokta eritip birleştirilir.	<ul style="list-style-type: none"> • Nispeten ucuz • Geniş malzeme çeşidi 	<ul style="list-style-type: none"> • Nispeten yavaş üretim • Yapısal bütünlük eksikliği • Sınırlı boyutlar • Yüksek güç ihtiyacı
Tabaka Birleştirme (Sheet Lamination)	Malzeme tabakaları birleştirilir.	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek hız • Düşük maliyet • Kolay malzeme kullanımı 	<ul style="list-style-type: none"> • Yapısal bütünlük ve dayanım kullanılan yapışkana bağlıdır. • Sınırlı malzeme çeşidi • Ek işlem gerektirebilir
VAT Fotopolimerizasyonu (VAT Photopolymerization)	Haznedeki sıvı polimer ışıkla sertleşir.	<ul style="list-style-type: none"> • Büyük basım hacmi • Yüksek hassasiyet • Yüksek yüzey ve detay kalitesi 	<ul style="list-style-type: none"> • Sadece fotopolimerler kullanılabilir. • Düşük mekanik özellikler • Düşük üretim hızı

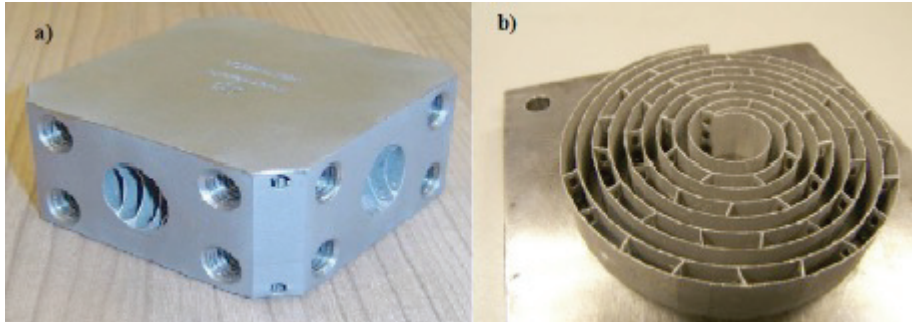
Tablo 2’de belirtilen yedi ana sınıf kendi içerisinde üretim teknolojisine bağlı olarak alt başlıklara ayrılabilir. Üretim boyutu tüm tiplerde değişiklik göstermekle birlikte en büyük üretim hacmini malzeme ekstrüzyonu yöntemi sağlamaktadır. Tüm bu yöntemlerde ortak olarak polimer

malzemeler kullanılmakta, buna ek olarak birçok yöntemde metal, seramik ve kompozit malzemeler de kullanılabilir.

2.4. Avantajları ve Geleneksel Yöntemlerle Karşılaştırılması

Her ne kadar pazardaki payı sürekli artış gösterse de eklemeli imalat teknolojilerinin sağladığı birçok avantaja rağmen geleneksel üretim yöntemleri günümüzde hala yoğun şekilde tercih edilmektedir. Bunun nedeni geleneksel üretimin özellikle seri üretim söz konusu olduğunda eklemeli imalat tekniklerine göre daha ucuz ve hızlı hizmet sunabilmesidir.

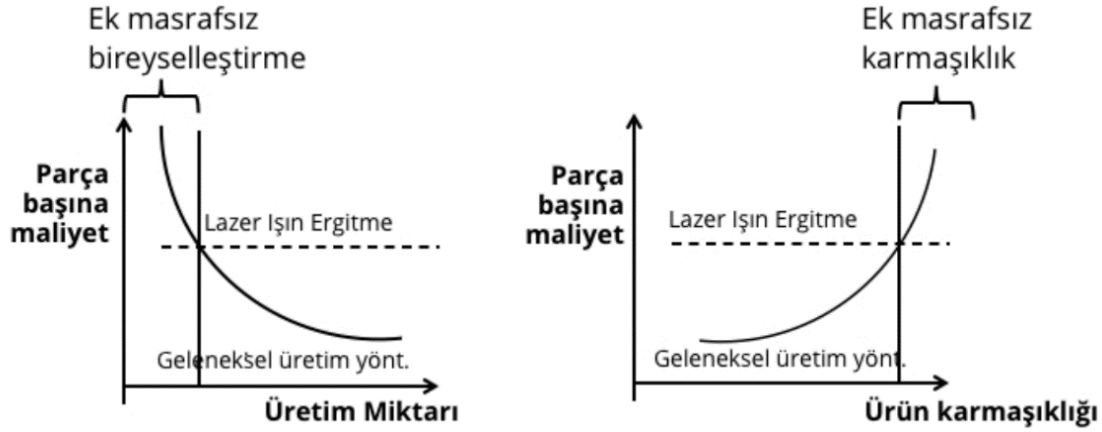
Eklemeli imalat ve aşındırma yöntemleri karşılaştırıldığı zaman aralarındaki en temel fark kullanılan malzeme miktarıdır. Aşındırma dayalı üretim yöntemlerinde de üç boyutlu dizayna göre CNC makinalarında otomatik olarak üretim yapılabilir ama basılacak parçalar için ortaya çıkan atık miktarı yüksektir ve buna bağlı olarak da maliyet artmaktadır (Gibson vd., 2015). Ek olarak eklemeli imalat yöntemleri depolama maliyetlerinde büyük düşüş oluşturmaktadır. Bunun sayesinde tedarik zincirlerinde de değişiklikler meydana gelmektedir. Eklemeli imalatın bir diğer avantajı parçaların istenilen karmaşıklıkta kolaylıkla basılabilir olmasıdır. Böylece daha optimize, bütünleşmiş ve çoklu malzemeden oluşan ürünlerin elde edilebilmesinin önü açılmıştır (Güngör, 2020). Şekil 4'te eklemeli imalat teknolojileri kullanılarak üretilmiş karmaşık parçalar gösterilmiştir.



Şekil 4. (a) Karmaşık iç kanallara sahip hidrolik prototipi (b) Konvansiyonel prosesler ile üretilmesi imkansız ITER için 316L vakum permeatörü prototipi (EPMA, 2019; METALMECANICA, 2014)

Geleneksel yöntemlerle yapıldığında yüksek üretim maliyetlerine neden olan prototip ve kalıp üretimi eklemeli imalat teknikleri sayesinde daha ucuza üretilmektedir. Son olarak eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak üretilen parçalar geleneksel yöntemlerle yapılan üretime göre çok daha hafif olabilmektedir. Airbus şirketi, A320 uçakları için lazer eritme teknolojisi kullanarak ürettiği braket parçasında aynı sağlamlığı ve performansı korurken yaklaşık %35 hafiflik (10 kg) sağlamayı başarmıştır (STM, 2016).

Eklemeli imalat teknolojilerinin bu tarz üstünlükleri olmasının yanında sahip olduğu dezavantajlar bulunmaktadır. Eklemeli imalat yöntemlerinde üretim maliyeti her parça için aynı miktarda olduğundan düşük parça ihtiyacı olan durumlar için daha uygundur. Geleneksel üretim yöntemlerinin uzun vadeli seri üretim için, eklemeli imalatın kısa üretimler veya sipariş üzerine üretimi daha uygundur (Güngör, 2020). Şekil 5'te iki üretim yöntemi için de parça sayısı ve maliyet arasındaki ilişkinin grafiği gösterilmiştir.



Şekil 5. Lazer ışını ergitme yönteminin geleneksel imalatla karşılaştırması (EPMA, 2019)

Eklemlerli imalat teknolojileri için bir diğer kısıt ise yazıcıların baskı boyutlarıdır. Malzeme ekstrüzyon ve tel ark ekleme yöntemi için geliştirilen büyük makineler olmasına rağmen diğer yöntemler için ulaşılabilen parça boyutları sınırlıdır. Son olarak mukavemet ve standartlaştırma problemleri eklemeli imalat teknolojilerinin karşılaştığı en büyük problemlerdendir. Her parçanın birebir aynı şekilde basılamaması veya makineden makineye özelliklerin değişiklik göstermesi bunu zorlaştırmaktadır. Ancak bu konuda ANSYS gibi çeşitli şirketler yazılımlar geliştirmekte ve ISO/ASTM gibi standart kuruluşların yanında sektörlere özel standart kuruluşları da çalışmalar yapmaktadır.

Önümüzdeki yıllarda iki yöntem tipinden birinin kaybolması yerine iki üretimin birlikte çalıştığı hibrit sistemler düşünülebilir ve böylece ihtiyaca göre seçim yapılarak maksimum verim alınabilir (Linke, 2017).

3. Gemi İnşaatı Endüstrisindeki Potansiyeli

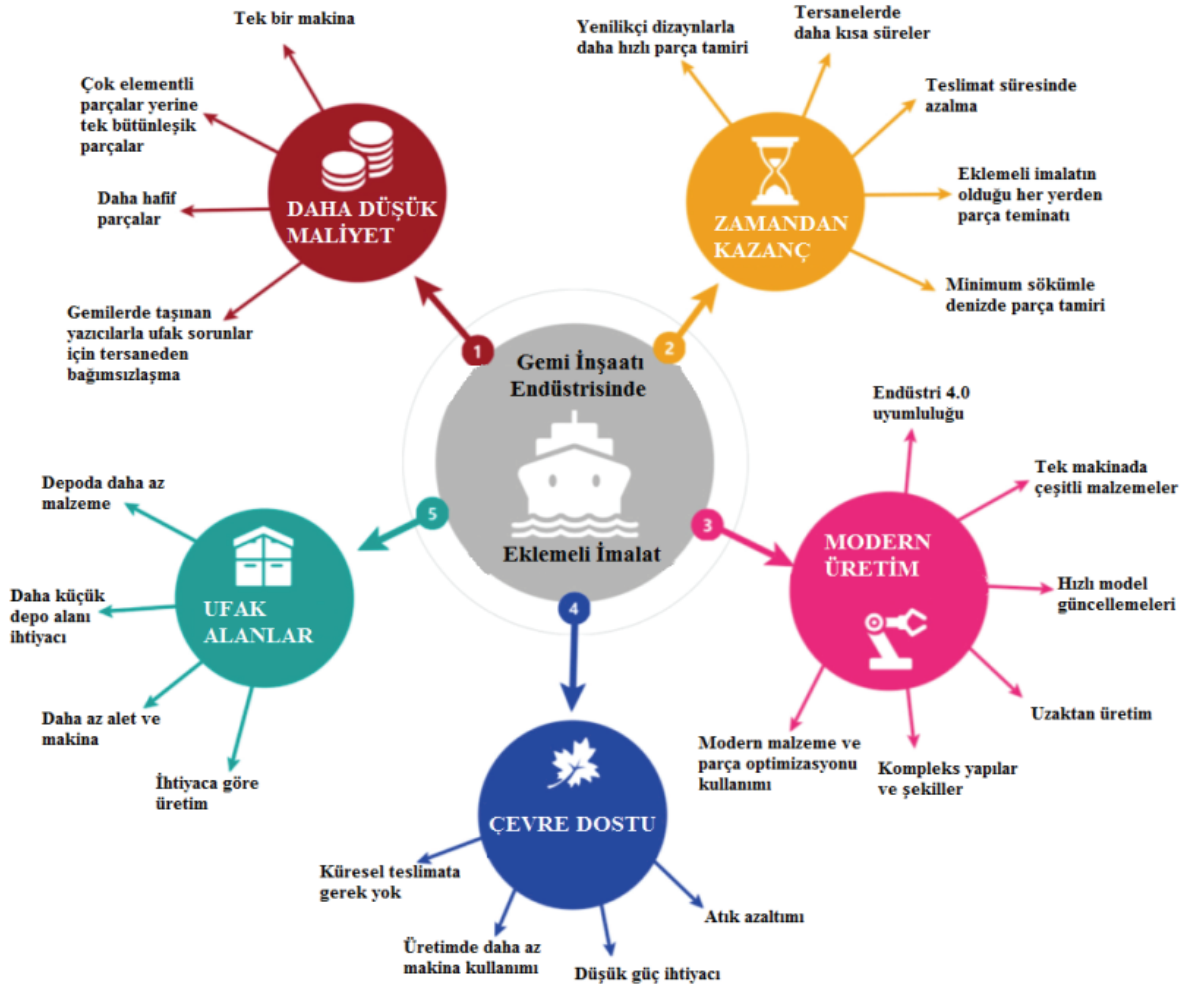
Eklemlerli imalat teknolojileri önceki bölümde örnekleriyle birlikte anlatıldığı üzere otomotiv, havacılık ve uzay endüstrileri gibi mühendisliğin ön planda olduğu sektörlerde günden güne artan bir kullanıma sahiptir. Gemi inşaatı endüstrisi günümüzde çeşitli alanlarda eklemeli imalat tekniklerinden faydalanmaktadır ancak bu kullanımlar genellikle maliyetinden dolayı henüz havacılık sektöründe olduğu kadar yaygın değildir. Eklemlerli imalatın gemi sevk sistemleri ve elemanlarında, sivil ve askeri gemi inşaatı, tasarımı ve malzeme tedariki açısından önemli etkileri olacağı öngörülmektedir. Ancak bunların sağlanabilmesi için teknik personelin eğitimi ve sertifikasyon konularında çalışmalar yapılması gerekmektedir (Güngör, 2020).

Ziółkowski ve Dyl (2020) tarafından yapılan çalışmada geleneksel yöntemlere kıyasla eklemeli imalat tekniklerinin gemi inşaatı endüstrisindeki avantajları; maliyet, zaman, depolama, üretim ve çevreye duyarlılık açısından beş ana başlıkta toplanmıştır. Maliyet açısından bakıldığında, tedarik zincirini kısaltması ve basitleştirmesi dolayısıyla birçok gider ortadan kalkacaktır. Buna ek olarak, eklemeli imalata uygun olarak dizayn edilen yeni parçalar sayesinde kullanılan elemanlar daha az hacim kaplayacak ve hafifletilebilecektir. Böylece, dizayn aşamasında alanlar daha verimli şekilde kullanılabilir. Son olarak, çok elemandan oluşan parçalar yekpare hale dönüştürülebilir ve böylece çeşitli işçilik giderleri aradan çıkartılacaktır.

Zaman açısından bakıldığında, tedarik zincirindeki kısalma ile birlikte daha kısa sürelerde gemilerin tamiri gerçekleştirilebilecektir. Bunun sayesinde gemi tersanede daha kısa süre duracak ve daha uzun süre seferde bulunabilecektir. Bir diğer ana başlık olan depolama ise her sektörde olduğu gibi gemi inşaatı sektörü için de önemli bir rol oynamaktadır. Daha küçük depo alanı ihtiyacı sayesinde hem

karada hem de gemilerde alanlar daha verimli kullanılabilir. Özellikle siparişe bağlı üretim sayesinde limanlarda yedek parçalar için ayrılan depo alanlarının azaltılması maliyet açısından da avantaj getirecektir.

Endüstri 4.0 kavramıyla üretimler artık uzaktan kontrol edilebilmekte ve gece gündüz fark etmeksizin yapılabilmektedir. Modern üretim anlayışının tıpkı otomotiv veya uzay-havacılık sektörlerinde olduğu gibi gemi inşaatı sektörü için kullanılması sayesinde artık modeller hızla güncellenebilecek, çeşitli üretimler aralıksız ve uzaktan yapılabilecek, parçaların optimizasyonu kolaylıkla sağlanabilecek ve kompleks yapılar kolaylıkla üretilebilecektir. Böylelikle daha verimli bir üretim yapılacaktır. Eklemeli imalat yöntemlerinde geleneksel metotlara göre daha az malzeme ihtiyacı olmasına rağmen parça başı daha fazla enerji ihtiyacı, özellikle yüksek sıcaklık gerektiren üretimlerde, vardır. Ancak, geleneksel üretimdeki parça başı enerji ihtiyacının büyük ölçüde üretim yapıldığı için düşük olduğunu göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Tekil bir üretim için eklemeli imalat yöntemleri hem enerji açısından hem de atık miktarı açısından daha verimli bir konumdadır. Buna ek olarak, üretimde daha az yağlayıcı madde veya daha az soğutucu kimyasal kullanımı ile doğaya daha duyarlı bir üretim gerçekleştirilmiş olacaktır. Ziolkowski ve Dyl (2020) yaptıkları çalışmadaki eklemeli imalatın gemi inşaatı endüstrisindeki avantajları Şekil 6'da verilen diyagramda paylaşılmıştır.



Şekil 6. Eklemeli imalatın gemi inşaatı endüstrisindeki avantajları (Ziolkowski ve Dyl, 2020)

Gemi inşaatı endüstrisi denildiğinde her ne kadar ilk olarak akla tersaneler gelse de aslında arkasında yoğun akademik çalışmalar barındıran bir sektördür. Akademik alanda yapılan çalışmalarda çeşitli

boyutlarda ve tiplerde modeller bulunmaktadır. Bu modellerin daha uygun maliyete üretilmesi ve proje gizliliğinin korunması eklemeli imalat ile sağlanabilir. Dolayısıyla çalışmanın bu kısmında eklemeli imalat yöntemlerinin gemi inşaatı endüstrisine yönelik potansiyeli hem akademik hem de sanayi açısından incelenecektir.

3.1. Akademik Alandaki Potansiyeli

Günümüzde eklemeli imalat teknolojileri akademik alanda hem deneysel çalışmalarda hem de eğitim amaçlı materyallerin üretiminde kullanılabilen ve bunun yanında çeşitli üniversiteler (MIT, Georgia Institute of Technology vb.) mühendislik eğitimlerinde bu alanla ilgili dersler de vermektedir.

Mühendislik eğitimlerinde derslerde kullanılan modellerin öğrenmeye büyük bir katkısı vardır. Motyl ve Filippi (2021) tarafından yapılan çalışmada eklemeli imalat teknolojilerinin tanıtılmasının, hem kişisel hazırlık açısından hem de farklı becerileri öğrenme ve geliştirme açısından genç mühendislerin hazırlanmasında önemli bir faydası olduğu belirtilmiştir. Yapılan başka bir çalışmada (Minetola vd., 2015); makina mühendisliği öğrencilerinden oluşan gruplara, verilen proje kapsamında, başlangıç seviyesi üç boyutlu yazıcılar kullanarak küçük ölçekli bisiklet üretmeleri istenmiş ve sonrasında uygulanan bu çalışma hakkında öğrencilerin görüşleri alınmıştır. Alınan sonuçlara göre öğrenciler motivasyon, anlama, ilgi ve eğitim konularında yüksek oranda pozitif geri bildirimler yapmışlardır, sadece takım çalışması konusunda bazı negatif dönüşleri olmuştur. Gemi mühendisliği lisans eğitiminde verilen “Gemi Yapı Elemanları” ve “Gemi Mukavemeti” gibi derslerde yapısal dizayndaki değişimlerin etkisinin görülmesi ve öğrencinin zihninde üç boyutlu yapıları canlandırabilmesi açısından katkı sağlayacaktır. Ek olarak “Gemi Yardımcı Makinaları”, “Gemi Makinaları” ve “Gemi Hidrodinamiği” gibi derslerde görsellik amaçlı kullanılmak üzere çeşitli pompaların, motor parçalarının veya pervane modellerinin üretimi yapılabilir.

Öğrenime katkısının yanında bilimsel araştırmalar için, üniversitelerin gemi inşaatı ile ilgili fakültelerinde bulunan gemi model deney, kavitasyon tüneli ve gemi mukavemeti laboratuvarlarında dizayn edilen gemilerin veya parçaların çeşitli hesaplamaları gerçekleştirilmektedir. Bu hesaplamalar gerçekleştirilirken parçaların veya gemilerin ölçekli şekilde üç boyutlu modelleri üretilmekte ve bunlar üzerinde gerekli testler yapılmaktadır. Oluşturulan bu modellerin eklemeli imalat ile üretilmesinin özellikle zaman ve maliyet açısından katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Dünya geneline bakıldığında mühendislik çalışmalarında eklemeli imalat teknolojileri deney laboratuvarlarında gittikçe artan bir kullanıma sahiptir. Gemi inşaatı açısından bakıldığında, çeşitli üniversiteler (Maine Üniversitesi vb.) ve araştırma kuruluşları (RAMLAB, CSIC) bu yöntemi kullanarak çeşitli alanlarda deneyler gerçekleştirmektedirler (Bergsma vd., 2016).

Üniversitelerin veya kuruluşların sahip olduğu deney havuzları ve kavitasyon tünellerinde açık su yapıları ile ilgili ölçümler ve analizler (sevk deneyleri, güç performans analizleri, denizcilik performans ölçümleri, pervane dizaynı vb.) yapılmaktadır. Yapılan bu çalışmalarda kullanılan modellerin üretilirken Uluslararası Çekme Tankları Konferansı (The International Towing Tank Conference, ITTC) tarafından belirtilen toleranslara göre üretilmesi gerekmektedir. İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi’nde gerçekleştirilen deneylerle ilgili yetkililerle görüşülmüş ve edinilen bilgilere göre deneylerde kullanılan modellerin sahip oldukları özellikler Tablo 3’te paylaşılmıştır.

Tablo 3. Deneylerde kullanılan modeller ve özellikleri

Model	Malzeme	Boyut
Gemi Modelleri	Ahşap	5 metre ve altı
Şaft – Braket Sistemleri	Plastik	90 cm ve altı
Dümen	Plastik	20 – 25 cm
Yalpa Finleri	Plastik	20 – 25 cm
Pervane	Metal	45 cm ve altı (çap)
Pod Geometrileri	Plastik	-
Kıç Kovanı	Plastik	-

Gemi modellerinin üretiminde fakültenin atölyesindeki 5 eksenli CNC tezgah kullanılmaktadır. Modeller üretilirken önce su hatlarına göre levhalar oluşturulmakta, sonrasında birbirlerine yapıştırılmakta ve böylece ham blok elde edilmektedir. Sonrasında bu katmanlar CNC frezeleme işlemine sokular ve çeşitli ek işlemlerle (zımpara, boya vb.) gemi modeli istenilen forma dönüştürülmektedir. Bu şekilde modeller 5 günde üretilebilmektedir (Danışman, 2016). Bu yöntem alternatif olarak fakülteye kurulabilecek bir malzeme ekstrüzyonu yöntemi yazıcı ile bu süre daha aşağılara çekilebilir.

Benzer bir çalışma olarak Maine Üniversitesi tarafından malzeme ekstrüzyonu yöntemi kullanılarak üretilen model bir tekne bulunmaktadır (3Dirigo, n.d.). Tekne üretimi model deneylerinden çok yatırım yapılan yazıcının yeteneklerini göstermek amacıyla olsa da önemli bir örnek teşkil etmektedir. Termoplastik malzemeden üretilen, 7.62 m boya ve 2.2 ton ağırlığa sahip olan tekne toplam 72 saat içerisinde üretilmiştir. Saatte 68 ile 227 kilogram arasında malzeme ekstrüde edebilen yazıcı, 30.5 m x 6.7 m x 3.0 m boyutlarında baskı kapasitesine ve ayrıca 5 eksenli CNC ile işleme yapabilme kapasitesine sahiptir (3Dirigo, n.d.). Ancak; yazıcının maliyetinin yüksek olmasından dolayı, geleneksel yöntemle üretimin maliyet açısından avantajı bulunmaktadır.

Tablo 3'te belirtilen modeller arasından pervane modelleri; pitch, çap, ağırlık, göbek ve çalıklık gibi özelliklerinden dolayı en karışık geometriye sahiptirler. Pervane modelleri fakülte tarafından dışarıda üretilmekte ve hazır olarak alınmaktadır. Yapılan fizibilite çalışmasında fakültede kullanılan örnek bir pervane modelinin dışarıdan alış fiyatı ve aynı modelin yazıcılarla üretilmesi arasındaki maliyet farklı incelenmiştir. Yazıcılarla birlikte üretim yapıldığındaki maliyetinin hesaplamasında 3Dörtgen ve Promakim firmalarından destek alınmıştır. Çalışmada tekniker maaşı ve sistem kurulum maliyeti hesaba katılmamıştır. Yapılan fizibilite çalışması Tablo 4'te paylaşılmıştır.

Tablo 4. Pervane özellikleri ve maliyetleri

Model	Malzeme	Boyut
Gemi Modelleri	Ahşap	5 metre ve altı
Şaft – Braket Sistemleri	Plastik	90 cm ve altı
Dümen	Plastik	20 – 25 cm
Yalpa Finleri	Plastik	20 – 25 cm
Pervane	Metal	45 cm ve altı (çap)
Pod Geometrileri	Plastik	-
Kıç Kovanı	Plastik	-

Sunulan model üretim maliyetlerinde yazıcı olarak malzeme ekstrüzyon yöntemine sahip yazıcılar kullanılmıştır. Kompozit malzeme kullanımında yazıcıların baskı kapasitesinin yeterli olmasından dolayı herhangi bir dizayn optimizasyonuna gerek duyulmamıştır. Ancak metal baskıda pervanenin ayrı parçalar halinde basılıp birleştirilmesi üzerine bir hesap yapılmıştır. Metal baskı ile ilgili verilen değer sadece basım maliyetini içermektedir, sinterleme maliyeti katılmamıştır. Onyx malzeme ile basılacak pervanelerde ekstra mukavemete ihtiyaç duyulursa karbonfiber veya fiberglass eklenebilmektedir.

Pervane modellerinin dışarıdan alınması durumunda 24.7 cm çapa sahip CiBrAl malzemedeki pervane 6 bin € + KDV'ye mal olmaktadır. Firmalar tarafından paylaşılan verilere göre kompozit baskı kapasiteli cihazlar 5 bin \$ ile 69 bin \$ arasındayken, metal baskı yapabilen yazıcılar set olarak (sinterleme seti dahil) 169 bin \$ ile 220 bin \$ arasındadır.

Deneylede kullanılmak üzere pervane modeli üretimi ile ilgili çeşitli çalışmalar mevcuttur. Liu vd. (2015) yaptıkları çalışmada metal ve plastik malzemelerden üretilmiş farklı pervaneleri kullanarak performans karşılaştırması yapmış ve sonuç olarak seçmeli lazer sinterleme yöntemi kullanılarak üretilen poliamid (nylon 12 benzeri) malzemenin %40 daha düşük performans gösterdiği bulunmuştur. Bunun sebebi ise poliamid malzemenin test sırasında yaşadığı bükülmedir. ITTC bu çalışmadan yola çıkarak modellerde hızlı prototipleme yöntemi ile üretilen nylon gibi malzemelerin kullanılmayacağını belirtmiştir. Ancak fiberle güçlendirilmiş plastiklerin kullanımına izin vermektedir (ITTC, 2017).

Metal pervane modeli üretimi için ayrıca Cilia vd. (2019) tarafından toz yataklı ergitme yöntemlerinden biri olan seçmeli malzeme ergitme sistemiyle üretilmiş bir pervanede kavitasyon testi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada doğruluğun kontrol edilebilmesi için aynı boyutlar ve özelliklerde bronz malzemedeki yapılmış pervane ile edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Basılmış olan pervane kanatlarının her birinde, özellikle önder kenarı ve arka kenarında, orijinal geometriyle farklılıklar (ITTC toleranslarını aşan) olduğu ayrıca pervanenin her kanadının yakınında önemli bir ısı deformasyonu olduğu tespit edilmiştir. Deney sonuçlarındaysa basılmış her kanadın önemli ölçüde farklı davranışlar gösterdiği ve bu farkın bıçak geometrisinin yerel kusurları (yanlış eğrilikler ve çok yüksek kalınlık gibi) ve bu kusurların kavitasyona karşı yarattığı tutarlılık eksikliğinden kaynaklandığı belirtilmiştir (Cilia vd., 2019). Deneyde kullanılan iki pervane kanadı Şekil 7'de gösterilmiştir.



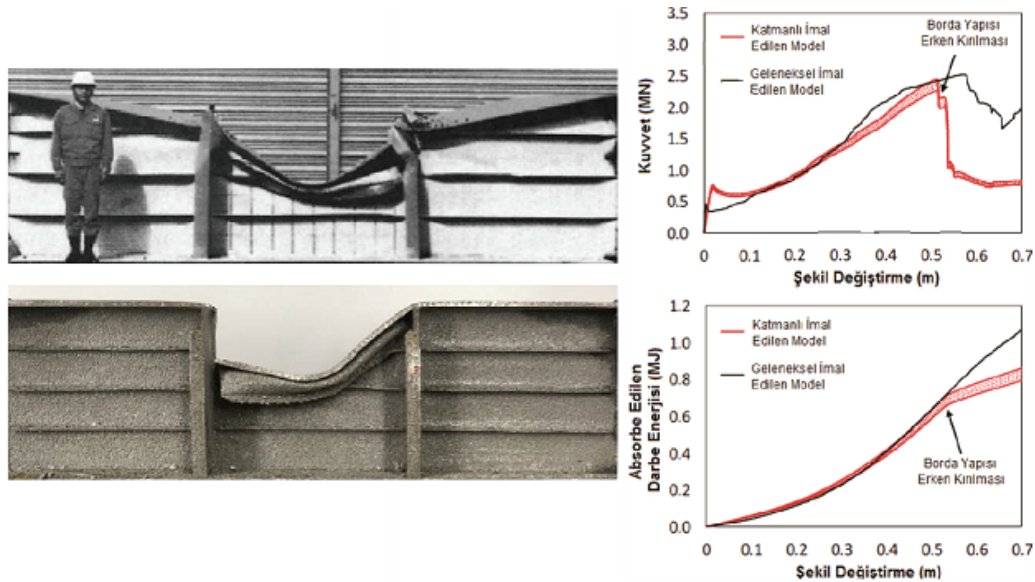
Şekil 7. Kavitasyon deneyinde kullanılan bronz kanat (sol) ve paslanmaz çelikten basılmış kanat (sağ) (Cilia vd., 2019)

Gemi modelleri ve pervaneler dışında kullanılan diğer deney modellerinin üretiminde plastik kullanıldığı ve dışarıdan alındığı belirtilmiştir. Dışarıdan alındığı zaman özellikle pod geometrileri gibi yapıların maliyetleri yüksek değerlere çıkabilmekte ve araştırma imkanlarını kısıtlamaktadır. ITTC

kurallarına göre takıntıların üretimi için belirlenen tolerans ± 0.2 mm olarak belirlenmiştir. Bu tolerans değeri malzeme ekstrüzyonu, toz yataklı ergitme sistemleri veya stereolitografi yazıcılarının baskı hassasiyetine uygun bir değerdir. Sonuç olarak, pervane ve gemi modelleri dışındaki ürünlerin yazıcı ile üretilmesinin hem zaman hem de maliyet açısından avantaj sağlayacağı görülmüştür. Pervanelerin sahip olduğu nispeten karmaşık geometrilerden dolayı üretiminde yaşanan sorunların çözümü üzerinde yapılacak çalışmalarla birlikte aşılabacağı düşünülmektedir.

Bunlara ek olarak, mukavemet analizleri ile ilgili deneylerde kullanılan modellerin üretimi için de eklemeli imalattan yararlanılabilir. Gemi mukavemeti laboratuvarlarında geminin yapısal elemanları tek tek veya birleştirilmiş olarak küçük ölçekli modeller halinde üretilerek, "Strain Gauge" ile gerilme ölçümleri, çekme-basma testleri ve üç noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmektedir. Yapılan bu deneylerde araldit, çelik ve kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

Örnek bir çalışma olarak Calle vd. (2019) mukavemet testini gerçekleştirmek üzere gemi bordası modelini iki farklı yöntemde üretmiştir. Büyük ölçekli üretilen model geleneksel yöntemler kullanılarak üretilirken, aynı yapının 1:40 ölçeğindeki modeli eklemeli imalat kullanılarak 316L paslanmaz çelikten üretilmiştir. Model ve gerçek boyutlu yapı arasında kırılma meydana gelmeden önceki yapısal tepkiler, özellikle toplam emilen enerji açısından iyi bir uyum gösterdiği belirtilmiştir (Güngör, 2020; Calle vd., 2019). Sonuç olarak gemi ve deniz yapılarının mukavemet analizinde kullanılacak modellerin üretimi için eklemeli imalatın avantajlı olduğu görülmüştür. Güngör (2020) yaptığı çalışmada mukavemet testlerinde kullanılmak üzere karmaşık ölçekli gemi modellerinin geleneksel yöntemlerle üretiminin masraflı ve zahmetli görüldüğünü belirtmiştir. Çalışmada kullanılan model ve elde edilen test sonuçları Şekil 8'de paylaşılmıştır.



3.1. Sanayi Alandaki Potansiyeli

Gemi inşaatı endüstrisi için, üretimi yapılan parçalar ve teçhizatlar, tersaneler veya tedarikçiler tarafından üretilmektedir. Üretimi yapılan bu ürünlerin birbirlerinden farklı üretim hacimleri ve üretim imkanları olduğu için konstrüksiyon ürünleri ve donatım ürünleri olarak iki ayrı başlık altında incelenecektir.

3.2.1. Konstrüksiyon elemanlarının üretimi

Gemi inşaatı için kullanılan konstrüksiyon elemanları genellikle büyük ölçekli ve seri olarak üretilen parçalardır. Yapılan geminin boyutuna bağlı olarak genellikle tersaneler tarafından siparişle alınmaktadır. Kompozit tekne üretiminde ise daha küçük tekneler inşa edildiği için kullanılan konstrüksiyon elemanları genellikle tersanenin kendi imkanları tarafından üretilmektedir. Kompozit tekne imalatında kullanılan kalıplarsa genellikle dışarıdan satın alınmaktadır.

Basit iç denizlerde kullanılan gemiler için metal işleme maliyeti 2,5 [€/kg] iken, toz yataklı ergitme sistemlerinin kg başına maliyeti yüzlerce € değerindedir (Bergsma vd., 2016). Ek olarak, metal eklemeli imalat ile üretilen parçaların boyutları da sınırlıdır. Dolayısıyla metal eklemeli imalat teknolojilerinin direkt olarak ticari gemilerin inşaatının yapımında kullanılan bu parçaları üretmesi şu an için kullanışlı görünmemektedir. Ancak bu üretim yönteminin sağladığı hafiflik, üretim hızı ve kendi imkanlarıyla üretebilme avantajları şimdilik küçük boyutlu tekne veya özel sualtı/suüstü araç üretiminde mümkün görülmektedir. Bu yenilikçi teknolojinin gelişmesi ile yakın gelecekte ticari gemilerin üretiminde de kullanılacağı öngörülebilir.

Askeri alanda ise ABD Donanması 20 yılı aşkın süredir bu teknolojinin üzerinde çalışmaktadır (Housel vd., 2015). Son olarak, ABD Donanması, büyük çelik dökümlerin teslim sürelerini azalttığı ve verimliliği arttırdığı için "MELD" katı hal eklemeli imalat sistemine 1,5 milyon \$ yatırım yapmıştır. Geliştirilen bu yeni teknoloji ile büyük parçaların her metal ile üretilebileceği belirtilmiştir.

Kompozit tekne konstrüksiyonlarında ise eklemeli imalat teknolojileri hem yapılan teknelerin kalıplarının üretimi hem de direkt olarak tekne yapısının üretiminde kullanılabilir. Sektörden çeşitli mühendislerle yapılan görüşmelerde ortak olarak, özellikle seri şekilde 24 metre altındaki tekne yapılarının ve maça üretimi için eklemeli imalat teknolojilerinin faydalı olacağı belirtilmiştir. Örnek olarak; yelkenli, gezinti tekneleri ve insansız deniz araçları gibi araçların üretimi yapılabilir. Kompozit tekne imalatında kullanılan kalıpların üretiminde de bu yenilikçi üretim yönteminden faydalanılabilir. Kompozit teknelerin imalatında çalışan mühendislerle yapılan görüşmelerde kalıp tedarik ettikleri firmaların bu teknolojiyi kullanmasıyla daha düşük maliyetlere kalıp imal edebilecekleri ve böylece dolaylı yoldan tersanelerin de bundan faydalanabileceği belirtilmiştir.

Eklemeli imalat teknolojileri kullanılarak üretilen kompozit teknelere örnek olarak dünyanın ilk üç boyutlu olarak basılmış fiberglas teknesi "MAMBO" verilebilir. Geleneksel üretim yöntemleriyle üretiminin imkansız olduğu belirtilen bot, 6,5 metre uzunluğa, yaklaşık 800 kilogram ağırlığa ve 26 knot sürat yapabilme yeteneğine sahiptir (MOI, n.d.).

Başka bir örnekte ABD Donanması deniz komandolarını taşımakta kullandığı yaklaşık 9,15 metre uzunluğundaki denizaltı yapısını eklemeli imalat teknolojisi kullanarak karbonfiber malzemeden üretmiştir. Geleneksel yöntemlerle üretim süresi 800 bin \$ olan ve üç ile beş ay arasında üretilen bu araç, eklemeli imalat teknolojileri ile 60 bin \$ maliyetle ve bir aydan kısa sürede üretilmiştir (Insider, 2017). Şekil 9'da üretilen denizaltı gösterilmiştir.



Şekil 9. ABD Donanması tarafında üretilen kompozit denizaltı (Insider, 2017)

3.2.2. Donatımların ve parçaların üretimi

Gemi donatımları çeşitli boyutlara, çeşitli özelliklere sahip ve çeşitli malzemelerden oluşan parçalardır. Pervane, dümen ve civadra gibi ana parçaların üretiminin dışında eklemeli imalatın gemi inşaatı endüstrisindeki potansiyeli incelenirken genellikle yedek parçaların üretimi alanında çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmalar yazının bu bölümünde farklı parçalar halinde paylaşılacaktır.

Pervanelerin veya pervanelerin üretildiği kalıpların eklemeli imalat teknikleri kullanılarak üretimi, üzerinde en çok çalışma yapılan alandır. Pervanelerin her gemiye ait özel bir geometriyle üretilmesi ve karmaşık bir yapısının olması eklemeli imalatın yapısıyla büyük ölçüde uyumaktadır. Pervanelerin üretimi adına en büyük çalışmaların başında Damen Tersaneleri Grubu, Bureau Veritas, Autodesk ve RAMLAB gibi şirketlerin ortak çalışmalarıyla üretilen dünyanın ilk klas onaylı 3 boyutlu basılmış pervanesi "WAAMPeller" gelmektedir. Tel ark eklemeli imalat ile üretilen pervanede; alüminyum, nikel ve bronz alaşımı kullanılmıştır (RAMLAB, 2017). Şekil 10'da üretilen pervane gösterilmiştir.



Şekil 10. WAAMPeller (RAMLAB, 2017)

Başka bir örnekte; Central Nantes ve Naval Group tarafından, tel ark eklemeli imalat kullanılarak dünyanın ilk boşluklu pervane kanadı üretilmiştir. Bu şekilde tüm pervanenin %40 oranında daha hafif olarak üretilebileceği belirtilmiştir (METAL AM, 2019). Duintjer vd. (2016) yaptıkları çalışmada DMG

Mori firmasının ürettiği yönlendirilmiş enerjiyle biriktirme sistemiyle çalışan yazıcıda örnek bir pervane üreterek geleneksel yöntemlerle karşılaştırmasını yapmışlardır. Üretilen pervane geleneksel yöntemlerle aynı maliyete sahip olmakla birlikte 4 haftada üretilmiştir. Ancak, çalışmada yapılacak güncellemelerle birlikte bu sürecin 1-2 haftaya düşebileceği de belirtilmiştir.








Pervanelerin dışında genellikle yat gibi görselliğin ön planda olduğu teknelerde civadraların veya çeşitli görsel heykellerin veya sembollerin üretimi için de eklemeli imalat teknolojileri kullanılmaktadır. Her yat için özel olarak üretilen ve genellikle karmaşık yapıya sahip olan bu ürünlerin eklemeli imalatla üretilmesi ile maliyet ve üretim hızı açısından fayda sağlanabilir. Örnek olarak, Lürssen firması tarafından eklemeli imalat kullanılarak 4,1 metre uzunluk ve 2 metre yüksekliğindeki jaguar görünümlü civadra sıvı polimer malzemenin lazerle sertleştirilmesiyle, tek parça olarak üretilmiştir (Megayatch News, 2015). Şekil 11’de bahsedilen civadra gösterilmiştir.



Şekil 11. Jaguar görünümlü civadra (Megayatch News, 2015)

Bu parçaların dışında gemilerde özellikle yedek parça olarak depolanan civata, flanş, menteşe ve diğer motor parçaları gibi ürünlerin üretimi hakkında farklı çalışmalar yapılmıştır. Gemilerde 3 boyutlu yazıcıların kullanımı uçlar, kelepçeler, aletler, tutamaklar ve benzeri basit ürünlerin dışında değiştirilmek üzere en yakın limana kadar dayanması gereken acil durum parçaları gibi parçaların üretilmesi dayanıklı malzemelerin (karbon fiber gibi) kullanılmasıyla sağlanabilir (Ziolkowski ve Dyl, 2020). 2019 yılında aralarında DNV-GL, Wartsila ve NAMIC gibi firmaların bulunduğu bir çalışmada Singapur limanlarında gemiler tarafından en çok sipariş edilen 100 parçanın eklemeli imalat teknikleri ile üretiminin kapsamlı bir çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışma sonunda belirlenen parçalar kendi aralarında klas sertifikalı üretimi uygun, klas sertifikasız üretimi uygun ve üretimi uygun olmayan olarak üç ana başlık altında toplanmıştır. Yapılan sınıflandırmadaki “klas sertifikalı üretimi mümkün” olan parçalar gemideki güvenlik açısından kritik olan bileşenleri (motor parçaları gibi); “klas sertifikasız üretimi mümkün” olan parçalar gemide güvenliğin kritik olmadığı bileşenleri; “üretimi mümkün olmayan” parçalar ise şekil ve malzeme tipi gibi nedenlerden dolayı üretimi mümkün olmayan bileşenleri temsil etmektedir (MPA Singapore, 2019). Çalışma sonunda üretimi gerçekleştirilmiş örnek parçalara ait özellikle, üretim süresi ve maliyetteki fark Tablo 5’te paylaşılmıştır.

Tablo 5. Üretilen parçalar ve özellikleri (MPA Singapore)

Parça İsmi	Orijinal Malzeme	Kullanılan Malzeme	Ei Üretim Süresi	Parça başına Ortalama Kazanç	Parça Görseli
Valf volanı	Döküm	Poliamid/ Naylon	19 saat	5,89 \$	
Frenji Tıkacı	Pirinç ve Kauçuk	Poliamid/Naylon + Termoplastik poliüretan	17 saat*	4,50 \$	
U Civata	Galvanizli çelik	Dayanıklı Reçine	2 saat	11,26 \$	
Kılavuz Çubuk	Düşük alaşimli Mn-V Çelik	Çelik	8 saat	1965,00 \$	
Kanatlı Somun	Pirinç	Karbonfiber Naylon	5 saat*	2,95 \$	
Boru Kapakları / Toz Kapakları	Pirinç / Çelik	Poliamid/ Naylon	3 saat	3,96\$	
Civata kapakları	Akilonitril Bütadien Stiren (ABS)	Poliamid/ Naylon	19 saat*	10,44 \$	

* En büyük parça için

Gemilerin seferdeyken yaşadıkları arızaları tersaneye gitmeden veya limana uğramadan kendi imkanlarıyla çözebilmesi maliyet açısından büyük bir kazanç olacaktır. Gemide bir 3B yazıcı uygulaması göz önüne alındığında, en makul olanı bir veya iki cihaz kullanmak, tercihen ucuz, olumsuz çevre koşullarına dayanıklı ve aynı zamanda çok yönlü olan malzeme ekstrüzyonu teknolojisiyle üretilecek fiberle güçlendirilmiş kompozit malzemelerle çalışmak gibi görünmektedir (Ziolkowski ve Dyl, 2020). Ancak bu yazıcıların, gemilerin çalışma koşulları ve stabil durumdayken bile sahip olduğu titreşimin baskıya etkisi incelenmeli ve mürettebata yazıcıların kullanımı hakkında detaylı bir eğitim verilmesi gereklidir.

Yapılan başka bir çalışmada ise gemi inşaatı endüstrisinde kullanılan yedek parçaların eklemeli imalat ile üretim potansiyeli hakkında 2015 yılında 26 Hollandalı denizcilik şirketi birleşerek ortak bir araştırma programı kurmuşlardır. Çalışmalarında pervane üretiminden civata üretimine kadar 30 farklı parça için değerlendirme yapıp 7 farklı parçanın detaylı analizini gerçekleştirmişlerdir (Duintjer vd., 2016). İncelenen parçalar şunlardır:

- Pervane
- Soğutmalı valf yuvası
- Ara halka
- Menteşe
- T-konnektör
- Mühür Jig
- Manifold

Çalışmada parçaların gerekli özelliklerine göre çeşitli eklemeli imalat yöntemleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda manifold haricindeki diğer tüm ürünlerin üretimi geleneksel yöntemlerle yapılan üretime göre aynı veya daha yüksek maliyetle üretilmiştir (Duintjer vd., 2016).

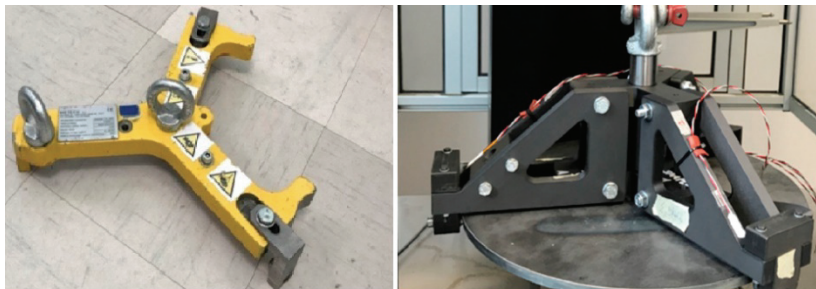
Amerika Birleşik Devletleri savunma sanayiinde dizel makina, gemi soğutma sistemlerinin hava giriş, egzoz ve turboşarjer muhafazası, alüminyum şase gibi ürünlerin üretiminde metal eklemeli imalat tekniklerinden faydalanmaktadır. 2019 yılında USS Harry S. Truman uçak gemisinin su tahliye sisteminde eklemeli imalat ile üretilmiş bir parça NAVSEA onayı alınarak kullanılmıştır. Böylece bu üretim yönteminin en büyük sorunlarından olan sertifikalandırma alanında önemli bir adım atılmıştır (Güngör, 2020). Şekil 12’de basımı yapılan parça gösterilmiştir.



Şekil 12. Gemide kullanımı NAVSEA tarafından onaylanan eklemeli imal edilmiş ilk parça (Güngör, 2020)

Eklemeli imalat teknolojileri gemilerdeki vinçlerde kullanılan kanca ve benzer parçaların üretiminde de kullanılmaktadır. Örnek olarak; Huisman Equipment için DNV-GL, Bureau Veritas ve ABS klaslarının işbirliği ile Tel Ark Eklemeli İmalat yöntemiyle üretilen kanca verilebilir. Aynı mukavemet değerlerine sahip ama daha hafif yapıp bir yapı oluşturmak için geleneksel yöntemlerle üretimi zor ve maliyetli olacak bir dizaynla kancanın içinde kanallar oluşturulmuştur (Ziolkowski ve Dyl, 2020).

Wärtsilä şirketi eklemeli imalatın uygulamaları ile yakından ilgilenmekte ve bu konuda çeşitli çalışmalar yapmaktadır. Şirketin hedefinde depolama maliyetini azaltmak için istek üzerine baskı yapacağı bir sistem kurmak vardır. Başka bir örnekte Wärtsilä şirketi 2019 yılında şu anda kullanımda olan aletin yerini alacak olan, silindir gömleği ile piston ve bağlantı mili taşıyabilen bir ürünün üretimini eklemeli imalat kullanarak gerçekleştirmiştir. Malzeme ekstrüzyonu yöntemiyle üretilen taşıyıcıda karbon fiber destekli malzeme kullanılmış ve böylece %75 oranında daha hafif bir taşıyıcı elde edilmiştir. Bureau Veritas ile birlikte yapılan dayanım testlerinden geçen taşıyıcı, eklemeli imalatla üretilmiş ve CE sertifikalı ilk taşıyıcı ürünü olmuştur (Ziolkowski ve Dyl, 2020). Şekil 13’te eskiden kullanılan ve yeni kullanılan parçalar birlikte gösterilmiştir.



Şekil 13. Eski kullanılan taşıyıcı (sol) ve yeni kullanılan taşıyıcı (sağ) (Ziolkowski ve Dyl, 2020)

4. Sonuçlar

Endüstri 4.0 kavramıyla birlikte, günümüzde üretim yöntemleri sürekli olarak bir evrim geçirmekte ve insan faktörü azaltılmaya çalışılmaktadır. Eklemeli imalat teknikleri henüz tam olarak otomasyonlaşmamış olsa da geleneksel üretim yöntemleri ile üretimi uzun ve maliyetli olan kompleks parçaları daha uygun maliyete ve daha hızlı şekilde üretebilmektedir. Bu özellikleri sayesinde yeni dizaynların ortaya çıkışını kolaylaştırmakta ve tasarımcılara özgürlük sunmaktadır. Ancak; baskı boyutları, üretimin tekrarlanabilirliği, bu alanda yetkin kişilerin azlığı, endüstriyel standartların oluşturulması ve yazıcıların maliyetleri gibi sahip olduğu çeşitli dezavantajlar da bulunmaktadır.

Havacılık ve uzay, otomotiv ve özellikle medikal alanlarda büyük bir kullanım oranına sahip olan eklemeli imalat teknolojileri gemi inşaatı endüstrisinde de çeşitli alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Akademik alanda özellikle mühendislik alanı eğitiminde öğrencilerin eğitim kalitesinin artırılması ve bilimsel araştırmalarda kullanılan modellerin üretilmesi için uygun ve hızlı çözümler sunmasıyla büyük bir avantaj sağlamaktadır. Özellikle bilimsel araştırmalar için kullanılan modellerin kurumlar tarafından dışarıdan satın alınması ve kurumun sahip olacağı yazıcı ile üretimi gerçekleştirmesi arasındaki maliyet farkı bunun iyi bir örneğidir. Sanayi alanında ise özellikle yedek parça üretimi ve askeri amaçlı üretimler için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Konstrüksiyon parçalarının üretiminde metal malzemeler için henüz geleneksel yöntemlere göre hala daha maliyetli olan eklemeli imalat, kompozit tekne ve deniz yapılarının üretiminde bu durumu tersine çevirmiş durumdadır. Özellikle 24 metre ve altındaki teknelerin seri üretimi için kullanılabilir bu yöntem ile daha hafif yapılar ve karmaşık geometriler kolaylıkla üretilmektedir. Donatım alanında ise civadra, pervane ve yedek parçalar için yapılan çalışmalara istinaden hem tersanelerin hem de seferdeki gemilerin dışa bağımlılığını azaltıp çeşitli kazançlar sağlayabileceği ve yan tedarikçilere de kalıp maliyeti gibi konularda aynı şekilde kazanç sağlayabileceği görülmüştür.

Klas kuruluşları ve çeşitli standartlaştırma organizasyonlarının da bu konuda yaptığı çalışmalarla, eklemeli imalat teknolojilerinin yakın gelecekte gemi inşaatı endüstrisinde önemli bir yere sahip olacağı görülmüştür.

Teşekkürler

Bu çalışmanın gerçekleşmesine tecrübe ve fikirleriyle katkıda bulunan Prof. Dr. Ömer Gören (İTÜ), Doç. Dr. Devrim Bülent Danışman (İTÜ), Prof. Dr. Mehmet Ali Baykal (Gedik Üniv.), Ahmet Emre Kurt (ARES), İlke Karamanop (Damen), Yavuz Kayıhan (STM), Şaban Karacaoğlan (3Dörtgen) ve Tolga Bolol'a (Promakin) teşekkür ederiz.

Referanslar

3D Hubs (2020). 3D printing trends 2020 Industry highlights and market trends. <https://www.hubs.com/blog/3d-printing-trends-2020/>

3Dirigo (n.d.). The World's Largest 3D Printed Boat. <https://composites.umaine.edu/3dirigo-the-worlds-largest-3d-printed-boat/> [Online] [Erişim 03.06.2021]

ASTM F2792-12a (2012). Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. ASTM International, West Conshohocken, PA.

Bergsma, J., Zalm, M. and Pruyn, J. (2016). 3D-Printing and the Maritime Construction Sector. Paper presented at High-performance marine vehicles (HIPER), October 17-19, Cortona, Italy.

Bourella, D. L., Beaman Jr., J., Leub, M. C., and Ros, D. W. (2009). A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead. US – TURKEY Workshop On Rapid Technologies, September 24, 2009.

Calle, M. A. G., Kujala, P., Salmi, M., and Mazzariol, L. M. (2019). ASIS web girder test: A miniature experiment. In Developments in the Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures. CRC Press.

Cilia, T., Bertetta, D., Gualeni, P. and Tani, G. (2019). Additive Manufacturing Application to a Ship Propeller Model for Experimental Activity in the Cavitation Tunnel. Journal of Ship Production and Design, 35(04), 364-373.

Danışman, D.B., (2016). Ata Nutku Model Deney Tankı Çekme Deneyleri İçin Model İmalat Süreci, GiDB|DERGi, Sayı 7.

Duintjer, J., Schardijn, J. and Wegener, V. (2016). Final Report Pilot Project 3D Printing of Marine Spares. <https://www.portofrotterdam.com/sites/default/files/report-3d-printing-marine-spares.pdf> [Online] [Erişim 05.06.2021].

EPMA (2019). Introduction To Additive Manufacturing Technology. <https://www.epma.com/epma-free-publications/product/introduction-to-additive-manufacturing-brochure> [Online] [Erişim: 20.05.2022].

Gibson I., Rosen, D. and Stucker, B. (2015). Additive manufacturing technologies 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing (2nd ed.). <http://10.1007/978-1-4939-2113-3>.

Güngör, A. (2020). Türkiye’de Katmanlı İmalat ve Gemi İnşaatı Üzerine Etkileri. GMO Journal of Ship and Marine Technology, 218, 36-53.

Housel, T. J., Mun, J., Ford, D. N. and Hom, S. (2015). Benchmarking Naval Shipbuilding with 3D Laser Scanning, Additive Manufacturing, and Collaborative Product Lifecycle Management. Acquisition Research Program Graduate School of Business & Public Policy Naval Postgraduate School.

Insider (2017). The Navy can now 3D-print submarines on the fly for SEALs <https://www.businessinsider.com/the-navy-can-now-3d-print-submarines-the-fly-seals-2017-7> [Online] [Erişim 05.06.2021].

ISO (2015). Standard Terminology for Additive Manufacturing—General Principles—Terminology. ISO/ASTM 52900-15; ISO/ASME International: Geneva, Switzerland.

ITTC (2017). Recommended Procedures and Guidelines. <https://www.ittc.info/media/7975/75-01-01-01.pdf>

Linke, R. (2017) Additive manufacturing, explained. <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/additive-manufacturing-explained> [Online] [Erişim 20.05.2022]

Liu, P., Bose, N., Frost, R., Macfarlane, G., Lilienthal, T., and Penesis, I. (2015). Model testing and performance comparison of plastic and metal tidal turbine rotors. Applied Ocean Research, 53, 116–124.

Megayatch News (2015). Lürssen's Kismet: Coolest Bowsprit
<https://megayachtnews.com/2015/02/kismet-coolest-bowsprit-ever/> [Online] [Erişim 05.06.2021]

METAL AM (2019). Metal Additive Manufacturing enables 'world's first' hollow propeller blade.
<https://www.metal-am.com/metal-additive-manufacturing-enables-worlds-first-hollow-propeller-blade/> [Online] [Erişim 05.06.2021].

METALMECANICA (2014). Technologies and applications in additive manufacturing of metallic materials.
<https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/118715-Tecnologias-y-aplicaciones-en-fabricacion-aditiva-de-materiales-metalicos.html> [Online] [Erişim 31.05.2021]

Minetola P., Iuliano L., Bassoli E. and Gatto A., (2015). Impact of additive manufacturing on engineering education - evidence from Italy, *Rapid Prototyping Journal*, 21 (5), 535–555.

MOI (n.d.), World's first 3D printed fiberglass boat. <https://www.moi.am/projects/mambo> [Online] [Erişim 05.06.2021]

Motyl, B. and Filippi, S. (2021). Trends in engineering education for additive manufacturing in the industry 4.0 era: a systematic literature review. *Int J Interact Des Manuf*, 15, 103–106.

MPA Singapore (2019). Additive Manufacturing for Marine Parts a Market Feasibility Study with Singapore Perspective. https://www.mpa.gov.sg/web/wcm/connect/www/99a3720f-abfc-4b079c9b-467220c1000a/Additive+Manufacturing+Market+Feasibility+Study_Public+Version.pdf?MOD=AJPERES&id=1572312102868 [Online] [Erişim 05.06.2021]

Özer, G. (2020). Eklemeli Üretim Teknolojileri Üzerine Bir Derleme . Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi , 9 (1) , 606-621.

RAMLAB (2017) RAMLAB unveils world's first class approved 3d printed ship's propeller
<https://www.ramlab.com/updates/ramlab-unveils-worlds-first-class-approved-3d-printed-ships-propeller/> [Online] [Erişim 05.06.2021]

STM (2016). Katmanlı İmalat Teknolojileri ve Havacılık Uygulamaları Sektör Değerlendirme Raporu.
https://thinktech.stm.com.tr/uploads/docs/1608890607_stm-sektor-raporu-katmanli-imalat-teknolojileri.pdf

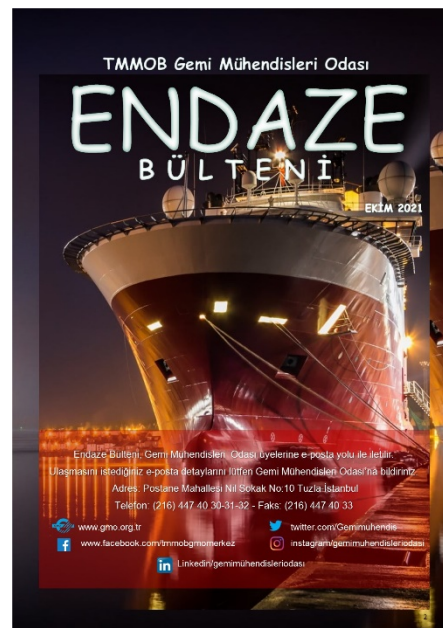
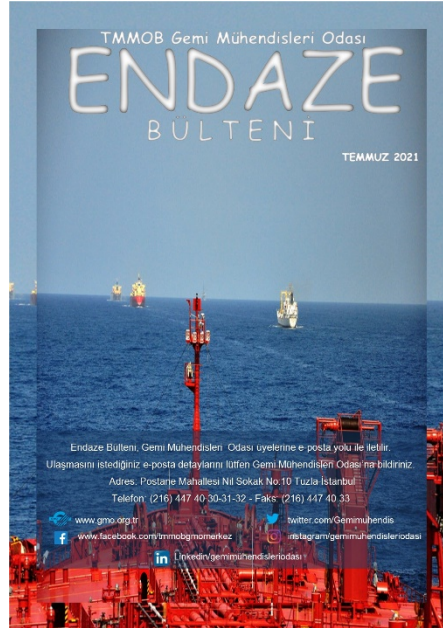
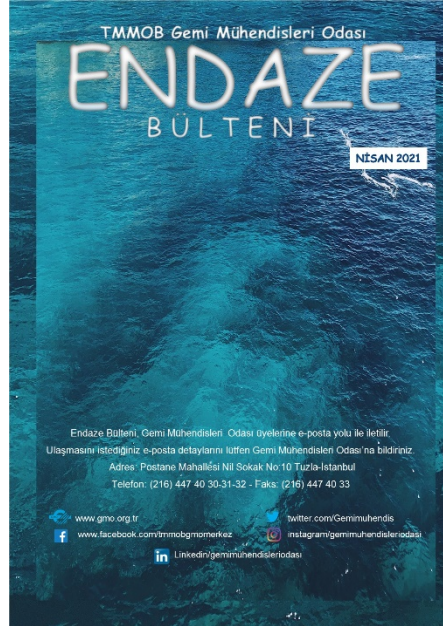
TEI (n.d.). Additive Manufacturing Technologies. <https://www.tei.com.tr/en/activity-areas/parts-and-module-manufacturing/additive-manufacturing> [Online] [Erişim 21.05.2021]

Tofail, S. A. M., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., and Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, 21(1), 22–37.

Wholers, T. and Gornet, T. (2014). History of additive manufacturing. *Wohlers report*, 24, 118.

Ziółkowski, M., and Dyl, T., (2020). Possible Applications of Additive Manufacturing Technologies in Shipbuilding: A Review. *Machines*, 8(4), 84.





TÜRKİYE'NİN TEKNOLOJİDE ÖNCÜ LİDER KLAS KURULUŞU

Bağımsız, Tarafsız, Güvenilir, Uzman

60
yıl



TÜRK LOYDU

#60YıldırGüvenle