

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

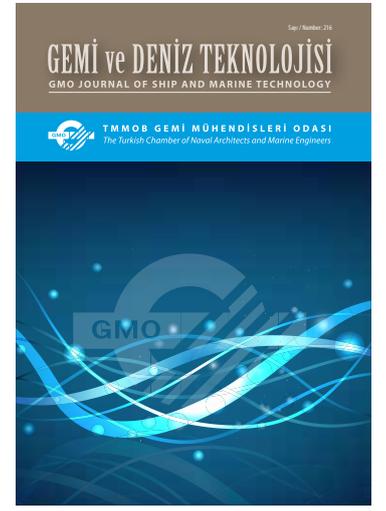
DENİZCİLİK VE KABOTAJ BAYRAMI KUTLU OLSUN!

"Zaferi, denizi kontrol altında tutan,
ihtiyacı olan şeyi, ihtiyacı olduğu
zaman, istediği yere ulaştırabilen ülke
kazanır."

K. Atatürk



TMMOB GEMİ MÜHENDİSLERİ ODASI



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

İmtiyaz Sahibi / Owner
Salih BOSTANCI

Baş Editör / Editor-in-Chief
Prof. Ahmet Dursun ALKAN PhD
Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey

Yardımcı Editörler / Associate Editor
Asst. Prof. Onur USTA PhD
National Defense University, Istanbul, Turkey
Asst. Prof. Dursun Murat SEKBAN PhD
Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey

Teknik Editörler / Technical Editors
Res. Asst. Abdullah TÜRK
Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey
Res. Asst. S. Aykut KORKMAZ
Dokuz Eylül University, 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
F: +90 216 447 40 33
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 : 219

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
F: +90 212 264 05 31
www.cenkler.com
ISSN: 1300-1973
E-ISSN: 2651-530X

Baskı Tarihi / Date of print : June 2021
Baskı Sayısı / Number of prints : 500



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.

Değerli Meslektaşlar ve Okurlar,

Bu sayımızda güzel haberleri sizlere iletmekten mutluluk duymaktayız. Ülkemizdeki akademik hakemli dergileri elektronik ortamda barındırma ve editörlük süreç yönetimi hizmeti sunan TÜBİTAK ULAKBİM DergiPark portalı, uluslararası rekabet sağlayıcı standartlar ve kriterler uygulayarak dergimizin niteliklerini geliştirici katkılar sunmaktadır. Gemi ve Deniz Teknolojisi dergimiz 2020 yılından bu yana TÜBİTAK ULAKBİM TR Dizin adlı tam metin veritabanına kabul edildi. Bu sayının hazırlıkları esnasında dergi kadromuz, Arş.Gör.S.Aykut KORKMAZ (DEÜ) ve Arş. Gör.Abdullah TÜRK (KTÜ) Teknik Editör, Yazım ve Dil Editörü olarak Doç.Dr.Yiğit Kemal DEMİREL (Strathclyde University, Glasgow, UK) katılmışlardır.

Dergimize olan makale taleplerinin artmış olmasının memnuniyetle karşılamakla birlikte makale yayını sürecinin sağlıklı ve zamanında işlemlerine azami ölüme yazarlarımızdan bazı katkılar beklemekteyiz. Hazırlayacağınız metinleri azami ölçüde dergi formatına uygun hazırlamanız, editör kurulumuz ve hakemlerden gelen yorumlara ve önerilere ne şekilde karşılık verdiğinizi açıklayıcı notlar ekleyerek metin düzenlemeleri yapmanız yayını sürecine verim ve hız kazandıracaktır. Toplu işbirliğimiz sonucu gerçekleşen dergi faaliyetimize yapacağınız katkılar adına şimdiden teşekkürlerimizi sunarız.

Bu sayımızda sizlere; Oğuzhan Kırıkbaş, Doç.Dr.Ömer Kemal KINACI ve Prof.Dr.Şakir BAL'ın incelediği su altı araçlarının manevra karakteristikleri, Doç.Dr.Derya GEÇİLİ tarafından 19. yüzyılın sonlarında Osmanlı Devleti'nde gemi boya ve kaplamaları, Arş.Gör.Sarih SARI ve Dr. Ali DOĞRUL tarafından deplasman tipi gemilerin sayısal analizlerinin gerçekleştirilmesi ve doğrulaması, Dr. Zeynep TAŞLIÇUKUR ÖZTÜRK ve Oğuzhan SEZER'in hazırladığı özel bir dövme işlemi sonrası Ti6Al4V alaşımının mikro yapısı ve aşınma özellikleri, Arş.Gör.Muhammet Yuşa CANSIZ ve Dr.Burak YILDIZ'ın satıhdaki bir denizaltının yalpa karakteristiklerini inceledikleri çalışmaların tam metinleri sunulmaktadır. Son makalede Dr. Ümit Güneş tarafından hazırlanan gemi ve deniz teknolojileri alanı ile ilgili yapılmış tüm bilimsel çalışmaların sağladıkları katkılarla ilgili istatistiksel bulguların yorumlandığı ilginç bir çalışma sunulmuştur.

GMO Gemi İnşaatı Kongresi olarak yapılagelen etkinlik 2016 yılında uluslararası kapsama alınmıştır. Bu yıl ikincisi düzenlenecek 2. Uluslararası Gemi ve Deniz Teknolojisi Kongresi (2nd International Congress on Ship and Marine Technology, GMO-SHIPMAR 2021, www.gmoshipmar.org) "Yeşil ve Akıllı Denizcilik Endüstrisi" temasında 16-17 Eylül 2021 tarihlerinde Yıldız Teknik Üniversitesi evsahipliğinde yüz yüze ve çevrimiçi ortamlarda İstanbul'da düzenlenecektir. Kongrede 70 dolayında bilimsel ve mesleki bildiriler sunulacak, ayrıca üniversiteler, teknoparklar, kamu kuruluşları, denizcilik endüstrisi ve uzmanların katılacağı özel oturumlar yer alacaktır.

Bir sonraki sayımız için bilimsel makale, teknik ve mesleki konuları içeren değerli yazılarınızı beklerken, atlatmaya çalıştığımız salgın ve çevre sorunlarının en kısa zamanda çözülmesini ümit eder sağlık ve güven dolu bir yıl geçirmenizi dileriz.

Dear Colleagues and Readers,

We are happy to convey the good news to you in this issue. TÜBİTAK - ULAKBİM (The Scientific and Technological Research Council of Turkey - Turkish Academic Network and Information Center) provides academic journals published in Turkey with online hosting services and an editorial workflow management system via DergiPark platform. DergiPark supports national academic journals to gain presence in accordance with international standards and criteria, and increase their visibility. Gemi ve Deniz Teknolojisi (GMO Journal of Ship and Marine Technology) has been accepted into the full-text database of TÜBİTAK ULAKBİM TR INDEX since 2020. During the preparations of this issue, Research Assistant S. Aykut KORKMAZ (Dokuz Eylül University, Izmir, Turkey) and Research Assistant Abdullah TÜRK (Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey) have joined our journal team as the Technical Editors, and Associate Professor Yiğit Kemal DEMİREL (University of Strathclyde, Glasgow, UK) has joined our journal team as the Language Editor.

While we welcome the increased demand for publishing articles in our journal, we expect authors' efforts to ensure that the article publication process works in a healthy and timely manner. The authors are kindly requested to prepare the texts according to the journal format to the maximum extent and edit their manuscripts by adding explanatory notes on how they responded to the comments and suggestions from our editorial board and referees. This will increase the efficiency and speed of the publication process. We would like to thank you in advance for your contributions to our journal publication activity, which is the result of our collective cooperation.

In this issue, full-text articles on maneuvering characteristics of underwater vehicles by Kırıkbaş O., Assoc.Prof.Kınacı Ö.K. and Prof.Bal Ş., ship paints and coatings during Ottoman State by Assoc.Prof. Geçili, verification and validation of numerical analysis of displacement type ships by Sarı S. and Dr.Doğrul A., the microstructure and wear properties of the Ti6Al4V alloy by Dr.Taşlıçukur Öztürk

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/

Z. and Sezer O., and examining the roll characteristics of a surfaced submarine by Cansız M.Y. and Dr. Yıldız B. are presented. The last article examines the publications in journals published in the field of Ocean Engineering from 1889 to May 2021 by noting the contributions of researchers, institutions and journals by Dr. Gunes U.

As announced earlier, the Turkish Chamber of Naval Architects and Marine Engineers (GMO) organizes the 2nd INTERNATIONAL CONGRESS ON SHIP AND MARINE TECHNOLOGY (GMO-SHIPMAR 2021, www.gmoshipmar.org) with the theme "Green and Intelligent Maritime Industry" -with the motto: Inspire, Innovate & Develop for the Benefit of Sea- which will be held on 16-17 September 2021, hosted by Yıldız Technical University, Besiktas, Istanbul. The congress covers all aspects related to the field of Naval Architecture, Ocean and Marine Engineering. The hybrid sessions will host scientific paper presentations, and special sessions will take place with the strong support of the maritime industry and research institutions.

While we are waiting for your valuable articles including scientific articles, technical and professional reports for our next issue, we hope that the epidemic and environmental problems we are trying to overcome will be resolved as soon as possible and wish you a year full of health and safety.

Saygılarımızla / Regards.

Prof.Dr.Ahmet Dursun ALKAN
Editor-in-Chief

Dr. D.Murat SEKBAN
Associate Editor

Dr. Onur USTA
Associate Editor

Res.Asst. S.Aykut KORKMAZ
Technical Editor

Res.Asst.Abdullah TÜRK
Technical Editor



The poster for the 2nd International Congress on Ship and Marine Technology (GMO-SHIPMAR 2021) features a blue sky background with a green leaf and a stylized ship hull. The text reads: "2nd INTERNATIONAL CONGRESS ON SHIP AND MARINE TECHNOLOGY 'Green and Intelligent Maritime Industry' Inspire, Innovate & Develop for the Benefit of Sea". The event is scheduled for 16-17 September in Istanbul. Logos of participating institutions like ITÜ, KTÜ, and others are shown at the bottom, along with the website WWW.GMO.ORG.TR and social media handles.

ALAN EDİTÖRLERİ / SECTION EDITORS

Naval Architecture

Prof. Alberto FRANCESCUTTO - University of Trieste, Trieste, Italy
Prof.Dr. Murat ÖZKÖK - Karadeniz Technical University, Istanbul, Turkey
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

Marine Engineering

Prof. Yasin ÜST - Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey
Assoc.Prof.Dr. Görkem KÖKKÜLÜNK - Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey
Asst.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
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
Dr. Ümit GÜNEŞ - Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey

YAZIM VE DİL EDİTÖRÜ / LANGUAGE EDITOR

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

Editörler 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-GL, 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 İNCECIK - Strathclyde University, UK
Prof. Dr. Rumen KISHEV - Varna Technical University, Varna, Bulgaria
Prof. Dr. Abdi KÜKNER - Istanbul, Turkey
Prof. Dr. Emin KORKUT - İstanbul Technical University, İstanbul, Turkey
Prof. Dr. Gökdeniz NEŞER - Dokuz Eylül University, İzmir, Turkey
Assoc.Prof. Dr. Ömer Kemal KINACI - İstanbul Technical University, İstanbul, 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. 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 - İstanbul Technical University, İstanbul, 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

- Su altı Araçlarının Manevra Karakteristiklerinin Değerlendirilmesi – I :
Manevra Analizlerinde Kullanılan Yaklaşımlar** 6
**Assessment of the Maneuvering Characteristics of Underwater Vehicles – I :
Approaches Used for Maneuvering Analysis**
Oğuzhan Kırıkbaş, Ömer Kemal Kınacı, Şakir Bal
(Araştırma Makalesi / Research Article)
- 19. Yüzyılın Sonlarında Osmanlı Devleti'nde Gemi Boya ve Kaplamaları** 59
Ship Paint and Coatings in Ottoman State in Late 19th Century
Derya Geçili
(Derleme Makalesi / Review Article)
- Deplasman Tipi Gemiler için Sayısal Analizlerin Gerçekleşmesi ve Doğrulaması** 77
Verification and Validation of Numerical Simulations of Displacement Type Vessels
Sarih Sarı, Ali Doğrul
(Araştırma Makalesi / Research Article)
- Bilyalı Dövme İşleminde Sonra Ti6Al4V Alaşımının Tribolojik Özellikleri** 96
Tribological Properties of Ti6Al4V Alloy After Shot Peening Process
Zeynep Taşlıçukur Öztürk, Oğuzhan Sezer
(Araştırma Makalesi / Research Article)
- Satıhtaki Bir Denizaltının Yalpa Salınım Hareketinin Matematiksel Modeli** 107
Mathematical Model of Roll Decay Motion for a Surfaced Submarine
Muhammet Yuşa CANSIZ, Burak YILDIZ
(Araştırma Makalesi / Research Article)
- Deniz Teknolojileri Mühendisliği Alanının Bibliyometrik Analizi** 124
Bibliometric Analysis for the Field of Ocean Engineering
Ümit Güneş
(Derleme Makalesi / Review Article)

Su altı Araçlarının Manevra Karakteristiklerinin Değerlendirilmesi-I: Manevra Analizlerinde Kullanılan Yaklaşımlar

Oğuzhan Kırıkbaş¹, Ömer Kemal Kınacı², Şakir Bal³

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

¹ (sorumlu yazar), kirikbas17@itu.edu.tr, ORCID: [0000-0002-2504-8727](https://orcid.org/0000-0002-2504-8727)

² kinacio@itu.edu.tr, [0000-0002-2956-9562](https://orcid.org/0000-0002-2956-9562)

³ sbal@itu.edu.tr, [0000-0001-8688-8482](https://orcid.org/0000-0001-8688-8482)

ÖZET

Su altı araçları dalmış, şnorkel ve satıh gibi birbirinden çok farklı operasyonel isterlere sahip çeşitli işletme modlarında kullanılabilirler. Dolayısı ile bu araçların hidrodinamik tasarımının birbiri ile çelişen özelliklerin bir arada sağlanmasını gerektiren bir optimizasyon problemi olarak ele alınması gereklidir. Hidrodinamik tasarım konusunun su altı araçları açısından belki de en kritik yönü manevra probleminin çözülmesidir. Düşey düzlemde sahip oldukları ilave serbestlik dereceleri ile birlikte karakteristik hızları ve akışkan özellikleri nedeniyle baskın viskoz etkilere maruz kalmaları bu problemi daha da zorlayıcı hale getirmektedir. Ayrıca karakteristik geometrik özellikleri (yelken gibi büyük bir takıntıya sahip olmaları gibi) nedeniyle ve/veya operasyon moduna bağlı olarak (şnorkel seyri gibi) oluşan düzlem dışı etkiler ve serbestlik dereceleri arası karşılıklı etkileşimler de probleminin karmaşıklık seviyesini artıran etkenlerdir. Genelde askeri amaçlar için tasarlanıp kullanılmaları nedeniyle su altı araçlarının her şart altında gizliklerini korumaları beklenir. Operasyonları sırasında hidrostatik basınca maruz kalmaları ise bu araçların çalışabilecekleri azami derinliğe bir sınırlandırma getirir. Serbest yüzeyi yarıp gizliliği ihlal etmeme ve ezilme derinliğinin altına inip aracın kaybına neden olmama zorunluluğu aracın manevra karakteristiklerinin yüksek doğrulukla tahminini gerektirir. Literatürde bu karmaşık problemi her bir operasyon modunda istenilen hassasiyet seviyesinde çözebilmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin geliştirilmesi jenerik geometriler, standart manevralar, hesaplama algoritmaları vb. gibi ikincil konularda da bir çok gelişmeyi beraberinde getirmiştir. Bu durum ise toplamda azımsanmayacak miktarda bir literatür oluşmasına sebep olmuştur. Bu çalışmanın amacı hâlihazırda mevcut literatürü sınıflandırmak, her bir kategorideki çalışmalar arasında ilişkileri ve kullanılan yöntemlerin zayıf ve güçlü taraflarını ortaya koymak ve bu yöntemlerle elde edilen önemli sonuçlara değinmektir. Kapsam dahilindeki materyal miktarı göz önüne alındığında; bunun tek bir başlık altında yapılması mümkün değildir. Bu durum sınıflandırmaya konu her bir ana başlığın ayrı bir çalışma halinde bir araya getirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Buna göre çalışmanın mevcut birinci bölümü; su altı araçlarının manevra probleminin çözümünde kullanılan yöntemlerin gruplandırılması ve ayrıca jenerik geometriler ve standart manevraların incelenmesine ayrılmıştır. Bu bölümde, dalmış durum şartları altındaki çalışmalar incelenmiştir. Aracın akışkan sınırlarına (serbest su yüzeyi gibi) yakınlığı nedeniyle oluşan sapmalar ise çalışmanın ikinci bölümünde değerlendirilmiştir. Son olarak, yakın zamanda literatürün ağırlıklı olarak hesaplamalı yöntemleri esas alacak şekilde gelişmesi nedeniyle, bu yaklaşımların kendi iç dinamiklerinin incelenmesi çalışmanın üçüncü bölümünde gerçekleştirilecektir.

Anahtar kelimeler: Su altı aracı, manevra, fiziksel yaklaşım, matematiksel yaklaşım, hidrodinamik katsayı, sistem tanımlama tekniği, manevra modeli, model deneyi, yarı-ampirik yöntem, standart manevra, HAD.

Makale geçmişi: Geliş 10/02/2021 – Kabul 25/06/2021

Assessment of the Maneuvering Characteristics of Underwater Vehicles-I: Approaches Used for Maneuvering Analysis

Oğuzhan Kırıkbaş¹, Ömer Kemal Kınacı², Şakir Bal³

^{1,2,3} Naval Architecture and Marine Engineering Department, İstanbul Technical University, İstanbul, TÜRKİYE

¹ (corresponding author), kirikbas17@itu.edu.tr, ORCID: [0000-0002-2504-8727](https://orcid.org/0000-0002-2504-8727)

² kinacio@itu.edu.tr, [0000-0002-2956-9562](https://orcid.org/0000-0002-2956-9562)

³ sbal@itu.edu.tr, [0000-0001-8688-8482](https://orcid.org/0000-0001-8688-8482)

ABSTRACT

Utilizing in various operating modes (such as submerged, snorkeling and surfaced) with diverse operational requirements; the hydrodynamic design of underwater vehicles must be considered as an optimization problem that enforces a balance between conflicting features. Possibly the most critical aspect of the hydrodynamic design process is the solution of maneuvering problem. Together with the additional degrees of freedom in the vertical plane and subjecting to dominant viscous effects due to characteristic velocities and fluid properties, makes the solution of the problem even more challenging. In addition, out-of-plane effects and interactions between degrees of freedom due to characteristic geometric features (existence of a relatively big appendage such as sail) and/or mode of operation (such as snorkeling) increase the level of complexity. Generally designed and used for military purposes, underwater vehicles are expected to maintain their stealth under all circumstances. Moreover, being exposed to hydrostatic pressure during their operations restricts the maximum diving depth. The requirements of not to broach (i.e., violate the stealthiness) and not to dive below the collapse depth (i.e., cause the loss of the vehicle) necessitate a high level of accuracy for the estimation of the maneuvering characteristics of the vehicle. In literature, various methods have been developed to solve this challenging problem at the desired level of accuracy for each operation mode of the vehicle. Development of these methods brought along improvements also in secondary subjects including generic geometries, standard maneuvers, calculation algorithms etc. and led to the formation of a substantial amount of literature. This study aims to classify currently subject and chronological wise scattered literature, reveal the relationships between studies in each category, clarify the weaknesses and strength of the methods used, and mention the significant results obtained using these methods. Considering the amount of material to be covered, it is not possible to achieve above described goals in a single study. This necessitates bringing together each topic as a separate section. Accordingly, the methods -grouped under the subtopics of physical and mathematical approaches- used in solving the maneuvering problem of underwater vehicles together with the generic geometries and standard maneuvers are formed the first section of the study. The assumption of submerged state used in the studies under this section requires examining the deviations caused by the fluid boundaries under a separate title, which constitutes the second section of the study. Finally, due to the recent progress in the literature on computational methods mainly, the formation of the

main topic in which the internal dynamics of these methods are examined is inevitable, which constitutes the third section of the study.

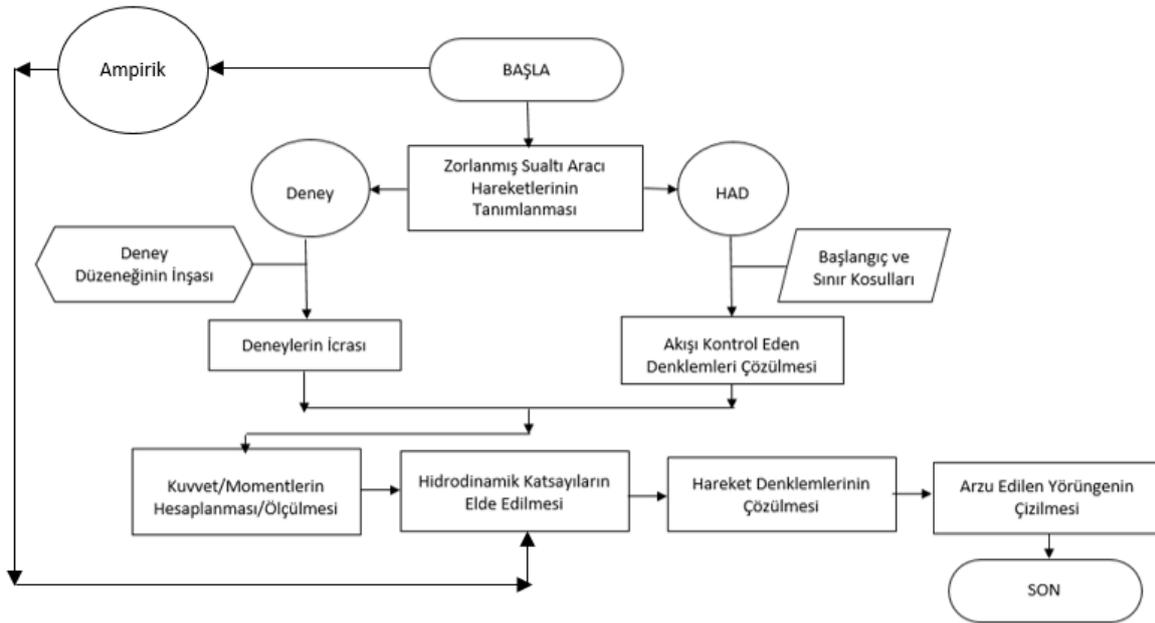
Keywords: Underwater vehicle, maneuvering, physics-based approach, mathematical based approach, hydrodynamic coefficient, system identification method, maneuvering model, model experiment, semi-empirical method, definite maneuvers, CFD.

Article history: Received 10/02/2021 – Accepted 25/06/2021

1. Giriş

En genel haliyle bir su altı aracının manevra probleminin çözümü; Newton'un birinci hareket yasasına göre eylemsizlik halinde olan aracın üzerindeki kuvvet dengesinin, kontrol yüzeyleri ve sevk sistemi vasıtası ile oluşturulacak dinamik kuvvetler ile geçici olarak bozulması anından başlayarak, aracın yeni ve istenilen bir doğrultu, pozisyon ve/veya hızda tekrar eylemsizlik durumuna geçmesine kadar Newton'un ikinci hareket yasasına tabi olarak yaptığı doğrusal ve dögüsel (açısal) (rotasyonel) hareketlerin tümünü kapsar. Bu çözüm, su altı aracının manevrası boyunca üzerine etkiyen kuvvet ve momentlerin bilinmesi halinde gerçekleştirilebilir. Bu kuvvet ve momentlerin büyüklüklerinin önceden bilinmesi su altı aracı için güvenli operasyon limitlerinin saptanmasına, belirli manevraların emniyetle icra edilip edilemeyeceğine karar verilmesine ve aracın manevra karakteristiklerinin iyileştirilebilmesi için izlenecek yöntemlerin belirlenmesine yardımcı olur.

Günümüzde su altı araçlarının operasyonel isterleri tasarımın erken aşamalarında manevra ve kontrol edilebilirlik karakteristiklerin yüksek doğrulukla tahmin edilerek olası tüm iyileştirmelerin yapılması konusunda giderek daha zorlayıcı olmaktadır. Bu karakteristiklerin tahmini ise ancak aracın hareketlerine kumanda eden katı cisim hareket denklemlerin çözümü ile anlaşılabilir. Denklem ifadelerinde yer alan kuvvet ve momentler manevra esnasında aracın etrafında oluşan akışı yöneten denklemlerin çözümü ile elde edilebilir.



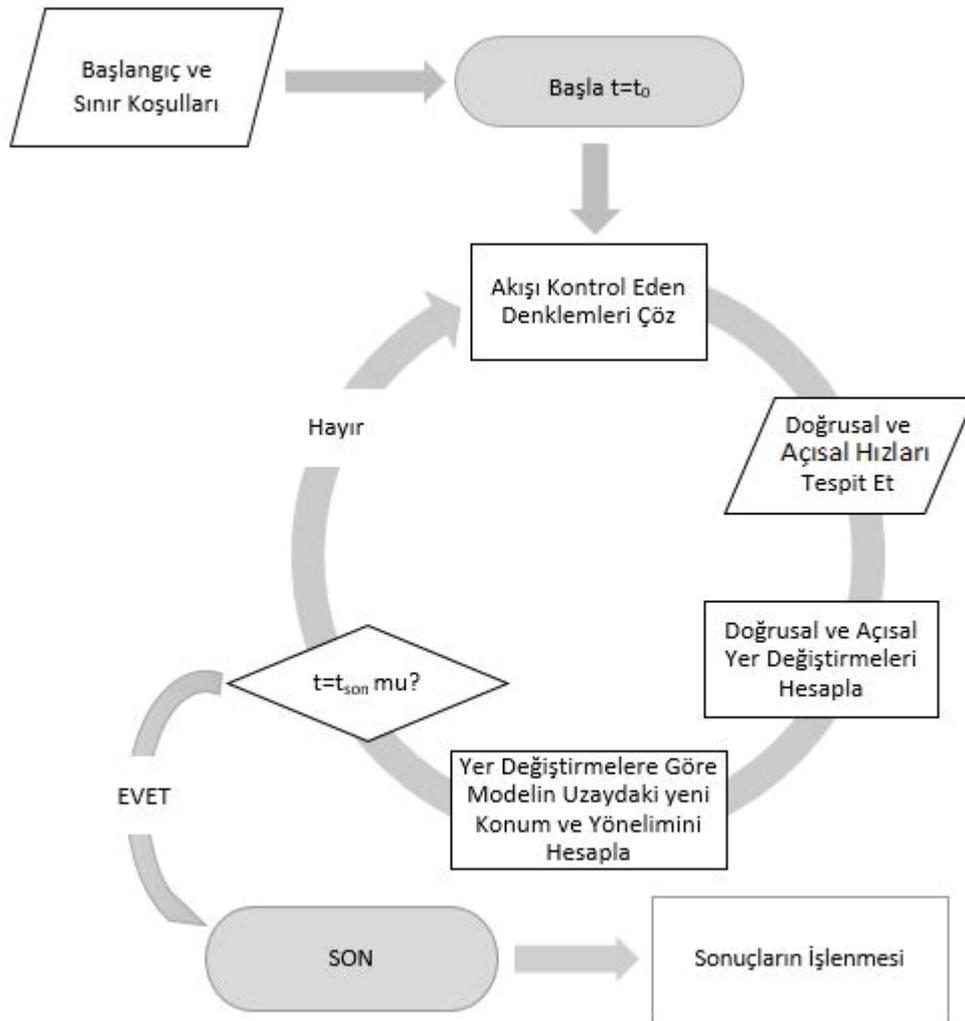
Şekil 1. Matematiksel (Dolaylı) yaklaşımlara ait akış şeması.

Bu konuda ilk akla gelen ve literatürdeki en yaygın yaklaşım görece büyük boyutlu bu problemi parçalarına ayırmak suretiyle çözmek; hareket denklemleri ile akışı yöneten denklemler arasında var olan karşılıklı etkileşimi kırarak her iki denklem takımının bağımsız olarak çözülmesini sağlayacak yöntemler geliştirmektir. Bu çalışma kapsamında bahse konu yaklaşımlar "Matematiksel (Dolaylı) Yaklaşımlar" başlığı altında toplanmışlardır. Matematiksel yaklaşımın genel işleyiş mantığı Şekil 1'de yer alan akış şemasında gösterilmiştir.

Bu yaklaşımların ortak özelliği bir hidrodinamik katsayı seti olarak modellenmiş olan hareket denklemlerindeki kuvvet ve moment ifadelerini çeşitli yöntemlerle (deneysel, nümerik, yarı-ampirik) belirlemek üzere geliştirilmiş olmalarıdır. Belirlenen hidrodinamik katsayılar daha sonra hareket

denklemlerindeki yerlerine konularak aracın yörüngesi tahmin edilir. Özet olarak bir su altı aracının manevra probleminin çözülmesi, o aracın manevra katsayılarının belirlenmesi problemine indirgenebilir.

Matematiksel yaklaşımın dışında kalan ve son yıllarda hesaplama altyapısı ile aynı paralelde gelişen fizik temelli hesaplamalı analizler ile otonom kontrol/kumanda sistemlerinin gelişimi ile yetkinliği artan serbest hareketli modeller ile yapılan deneyler ise bu çalışma kapsamında “Fiziksel (Doğrudan) Yaklaşım” başlığı altında bir araya getirilmişlerdir. Fiziksel yaklaşım; matematiksel yaklaşımda olduğu gibi, aracın hareket denklemlerinden matematiksel işlemlerle elde edilen bir manevra modelinin aracın hareket parametrelerinden her durumda bağımsız kabul edilen katsayılarını bulup bu katsayıları aracın herhangi bir hareketine ait yörüngesini tespit etmekte kullanmak yerine, matematiksel tüm ara işlem basamaklarını atlayarak akışın ve su altı aracının hareket denklemlerinin zaman boyutunda akuple edilmesi ve belirli kontrol ve sevk sistemi girdileri altında aracın yörüngesinin doğrudan tespit edilmesine dayanır. Fiziksel yaklaşımın genel işleyiş mantığı Şekil 2’de yer alan akış şemasında gösterilmiştir.



Şekil 2. Fiziksel (Doğrudan) yaklaşımlara ait akış şeması.

Bu iki tür çözüm yaklaşımının detaylarının yanında, literatürde her iki yaklaşım tarafından ortak olarak kullanılan jenerik su altı aracı geometrileri ve analiz sonuçlarının kıyaslanabilmesi için gerek model

gerekse de araç ölçeğinde icra edilebilen standart manevralara ilişkin bilgiler de bu çalışmanın kapsamına dahil edilmişlerdir.

2. Jenerik Su altı Aracı Geometrileri

Su altı araçlarının form optimizasyonu literatürde bu araçlara ilişkin geniş ölçüde ve uzun süreden beri incelenen konuların başında gelir. Gerek deneysel gerekse de hesaplamalı yöntemleri kullanan birçok araştırmacı bu konudaki literatürün gelişmesine katkı sağlamışlardır. Gertler (1950)'in çalışması bu alandaki literatürü oluşturan ilk çalışmalar arasında yer almakta olup yazar, incelenen geometriler (Seri 58) arasında asgari direnci veren geometriyi tespit etmek için deneyler yapmıştır. Bu alandaki bir diğer önemli çalışma (Myring, 1981) tarafından yapılmıştır. Myring parçalı bir fonksiyon kullanarak ifade ettiği aksel simetrik ve akışa uyumlandırılmış geometri ailesi üzerinde deneyler yapmıştır. Eliptik bir baş ve parabolik bir kış formunun kapattığı bir paralel gövde bölümü içeren bu geometri ailesi verilen bir L/D oranı için asgari direnci veren geometrinin tespitini amaçlamakta ve halen AUV gövde tasarımlarında (REMUS ve MAYA AUV) dikkate alınmaktadır.

Su altı araçları görev yaptıkları ortam şartları gereği görev sırasında ihtiyaç duydukları enerjiyi yanma havasına ihtiyaç duymaksızın kullanabilecekleri bir formda (batarya, yakıt hücresi, nükleer enerji vb.) depolamak zorundadırlar. Özellikle küçük ve orta ölçekli su altı araçlarının sahip olduğu sınırlı hacim bu araçların görevlerini yerine getirebilmeleri için depolayabilecekleri tahrik gücünü oldukça sınırlandırmakta bu durum ise söz konusu bu enerjinin en verimli şekilde kullanımı konusunda yukarıdaki örneklerde olduğu gibi araştırmacıları motive etmektedir. Ancak aracın hidrodinamik formunun optimizasyonu ile çelişen bir takım başka isterler de mevcuttur. Mukavim teknenin üretim kolaylığı ve genel yerleşim ile ilgili isterler su altı aracının hidrodinamik formunun optimum narinlik oranından (L/D) artış yönünde uzaklaşmasını ve su altı araçlarının sınıflarına özgü olacak şekilde standartlaşmasını zorunlu kılmıştır.

Her ne kadar sınıf bazında standartlaşmış olsa da bu araçlar çoğunlukla askeri amaçlar için tasarlandıklarından çoğu durumda geometrileri araştırmacıların kullanımına açık değildir. Bu problemi çözmek için dünya çapında pek çok kuruluş/enstitü araştırmacılara incelenecek su altı aracı sınıfının standart geometrik özelliklerini ana hatları ile yansıtan jenerik geometriler sağlayarak gerek bu geometriler temelinde şekillenen ve sonuçların kıyaslanabileceği bir literatür inşa etmeyi gerekse de araştırma sonuçlarını doğrudan gerçek denizaltı geometrilerinde kullanmayı hedeflemişlerdir. Bu jenerik su altı aracı formlarından literatürde sıklıkla kullanılanlara ait geometrik özelliklere aşağıda değinilmiştir.

2.1. DARPA Suboff

Jenerik bir nükleer saldırı sınıfı denizaltı (SSN) formu geliştirilmesini ve bu geometrinin takıntısız ve farklı takıntı kombinasyonlarına ait deneysel ve hesaplamalı analizlerinin yapılmasını içeren proje, bu yol ile su altı araçlarının HAD analizleri ile ilgilenen akademik camia için çalışmalarından elde ettikleri sonuçları kıyaslayabilecekleri bir forum oluşturmayı hedeflemiştir.

Proje kapsamında çekme tankı ve rüzgâr tüneline test edilmek üzere iki ayrı model (sırasıyla DTRC 5470 ve 5471) geliştirilmiş olup her iki model eş geometrilere sahiptirler. Modeller arasındaki fark sensör yerleşimlerinden kaynaklanmaktadır.

Parçalı bir fonksiyon ile ifade edilen aksel simetrik bir gövde, yelken ve yelken başlığından (sailcap) oluşan temel geometri ve bu geometriye eklenecek takıntı alternatiflerine ilişkin matematiksel ifadeler

(Groves et al., 1989) tarafından verilmiş olup proje kapsamında toplam üç farklı kıç kontrol yüzeyi ve iki farklı sujeti konfigürasyon alternatifi geliştirilmiştir. DARPA Suboff geometrilerine ait ana boyutlar Tablo 1’de, üç boyutlu modelin yandan görünüşü Şekil 3’te verilmiştir.

Tablo 1. DARPA Suboff formunun geometrik özellikleri (uzaklıklar baş dikmeden ölçülür).

Büyükük	Boyut	Birim	Büyükük	Boyut	Birim
Tam Boy (LOA)	4.356	m	Yelken Uzunluğu (L_c)	0.368	m
Baş Gövde Boyu (L_f)	1.016	m	Yelken Konumu (x)	0.924	m
Paralel Gövde Boyu (L_p)	2.229	m	Yelken Yüksekliği (h_c)	0.460	m
Kıç Gövde Boyu (L_A)	1.111	m	Kıç Kontrol Yüzeyleri Konumu	4.007	m
Azami Tekne Çapı (D_{max})	0.508	m	Ölçek Oranı (λ)	24	-



Şekil 3. DARPA Suboff AFF-8 konfigürasyonunun yandan görünüşü.

2.2. DRDC STR

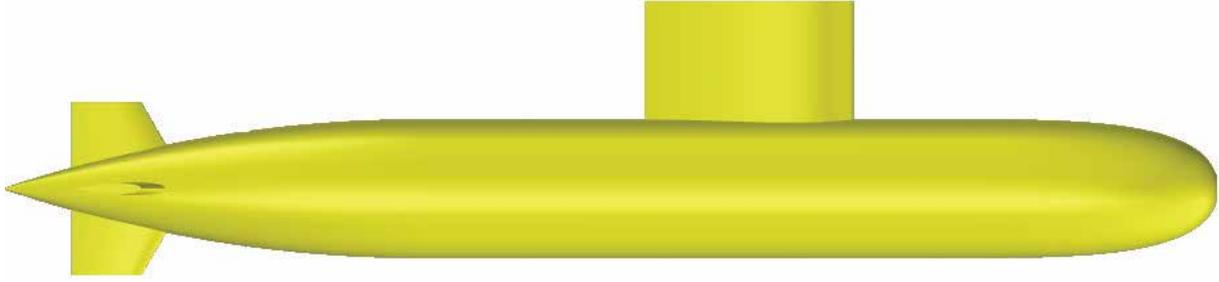
DRDC ve RNLN tarafından MARIN bünyesinde yapılacak testlerde kullanılmak üzere geliştirilen geometri daha eski referanslarda “Kanada-Hollanda Sistemik Serileri” olarak adlandırılmış, bu adlandırma daha sonra “Standart Denizaltı Modeli” veya kısaca “Standart Model” olarak değiştirilmiştir (Mackay, 2003). Bu serideki geometriler tekne, yelken ve “+” formundaki dört adet eş kontrol yüzeyinden oluşmaktadır. Bu takıntılarının farklı kombinasyonları için harf simgeleri belirlenmiş olup, “H” yalnızca tekneyi, “HS” tekne ve yelkeni, “HT” tekne ve kıç kontrol yüzeylerini ve “HST” ise tam donanımlı konfigürasyonu temsil etmektedir. Standart modele ait tekne çapı ile boyutsuzlaştırılmış ana boyutlar Tablo 2’de üç boyutlu modelin yandan görünüşü Şekil 4’te verilmiştir.

2.3. ONR BODY-1

ONR Body-1 geometrisi DTMB Body-1 veya DTMB Model #5484 olarak da bilinmekte olup, aksel simetrik bir gövdeye eklenen NACA profili kesitli bir yelken ve yine NACA profili kesitli dört eş kontrol yüzeyinden oluşan jenerik bir denizaltı geometrisidir (Fu et al., 2002). Bu model ONR ve DTMB tarafından manevra çalışmalarında kullanılmak amacıyla geliştirilmiştir (Mulvihill & Yang, 2007).

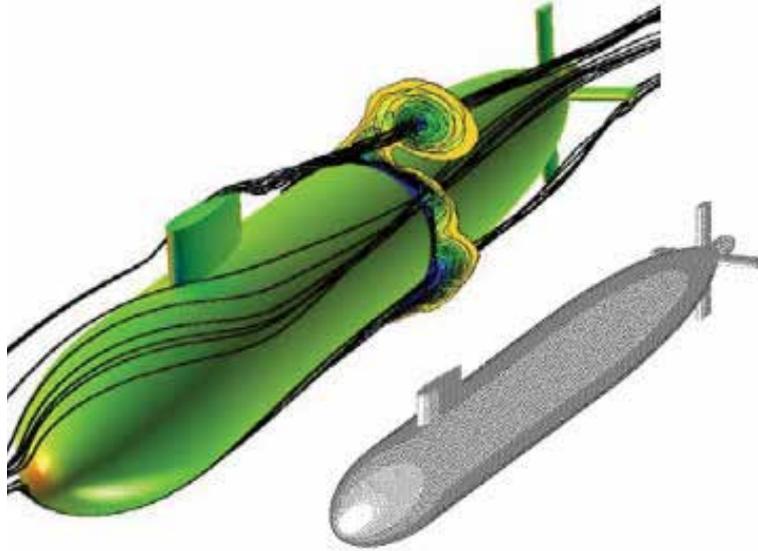
Tablo 2. Standart denizaltı modeline ait boyutsuzlaştırılmış ana boyutlar.

Büyükük	Boyut	Büyükük	Boyut
Tam Boy (LOA)	8.75D	Yelken Merkez Konumu (x)	3D
Baş Gövde Boyu (L_f)	1.75D	Yelken Yüksekliği (h_c)	6/7 D
Paralel Gövde Boyu (L_p)	4D	Yelken Kesiti	NACA 0020
Kıç Gövde Boyu (L_A)	3D	Kontrol Yüzeyleri Konumu (AP’den)	0.5D
Azami Tekne Çapı (D_{max})	D	Kontrol Yüzeyleri Kesiti	NACA 0015
Yelken Uzunluğu (L_c)	1.5D		



Şekil 4. Standart Denizaltı Model'inin yandan görünüşü.

ONR Body-1 geometrisine ait ana boyutlar Tablo 3'te üç boyutlu modelin yandan görünüşü Şekil 5'te verilmiştir.



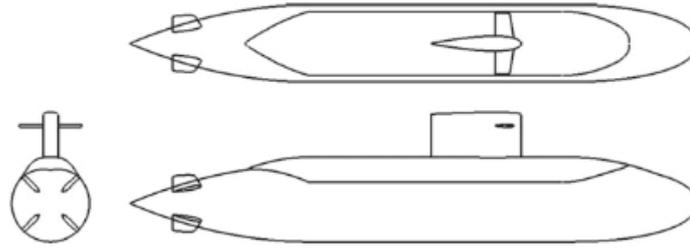
Şekil 5. ONR Body 1 geometrisinin görünüşü (Boger & Dreyer, 2006; Mulvihill & Yang, 2007).

Tablo 3. ONR Body-1 denizaltı modeline ait ana boyutlar.

Büyüklik	Boyut	Birim
Tam Boy (LOA)	5.1816	m
Azami Tekne Çapı (D_{max})	0.47244	m
Yelken Konumu (x/L)	0.2	-
Yelken Kesiti	NACA 0014	-
Yelken Eksen Oranı	0.27	-
Kontrol Yüzeyleri Kesiti	NACA 0018	-
Kontrol Yüzeyleri Eksen Oranı	0.27	-

2.4. Joubert BB1/BB2

BB1 geometrisi; Joubert tarafından Avustralya Savunma Bakanlığı'nın ihtiyacı için geliştirilen büyük ölçekli SSK sınıfı bir dizel-elektrik denizaltı konseptinden türetilmiş olup daha sonra birçok kuruluş tarafından kendi çalışmaları için standart bir geometri olarak kullanılmıştır (Renilson, 2018). Bu geometri Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. BB1 jenerik denizaltı modeli geometrisi (Renilson, 2018).

Joubert'in orijinal tasarımında yelken kesiti ve yelkende konuşlu baş ufki dümenlerin özellikleri belirtilmediğinden doğrultu stabilitesine sahip bir denizaltı geometrisi elde edebilmek için birkaç tasarım iterasyonuna ihtiyaç duyulmuştur. BB2 geometrisi BB1'in serbest hareketli model deneylerinde kullanılmak üzere ve doğrultu stabilitesini artıracak şekilde takıntı boyut ve konumlarının yukarıda bahsedilen iteratif yaklaşımla modifiye edilmesi yolu ile elde edilmiştir. Bu iteratif süreç; kış kontrol yüzeyi boyutlarının artırılması, kış kontrol yüzeylerinin sabit ve hareketli kısımlara ayrılması, yelken ve yelkende bulunan kontrol yüzeylerinin başa kaydırılması ve yelken kesitinin artırılması değişikliklerini kapsamaktadır (Carrica et al., 2016).

BB2 geometrisi tekne, form güverte (casing), yelken, kış kontrol yüzeyleri ve MARIN 7371R (Carrica et al., 2016) stok pervanesinden oluşmakta olup (Bettle, 2018), bu komponentlerin farklı kombinasyonlarına göre konfigürasyon kodlandırması yapılmaktadır. Buna göre "C1" tekne ve form güvertesi, "C2" bir önceki konfigürasyona ilave olarak yelkeni, "C3" C2'ye ilave olarak kış kontrol yüzeylerini, "C4" C3'e ilave olarak baş kontrol yüzeylerini ve nihai olarak "C4P" kodu C4'e ilave edilmiş stok pervaneyi tanımlamak için kullanılmaktadır.

Joubert BB2 geometrisine ait ana boyutlar Tablo 4'te, üç boyutlu modelin yandan görünüşü Şekil 7'de gösterilmiştir.

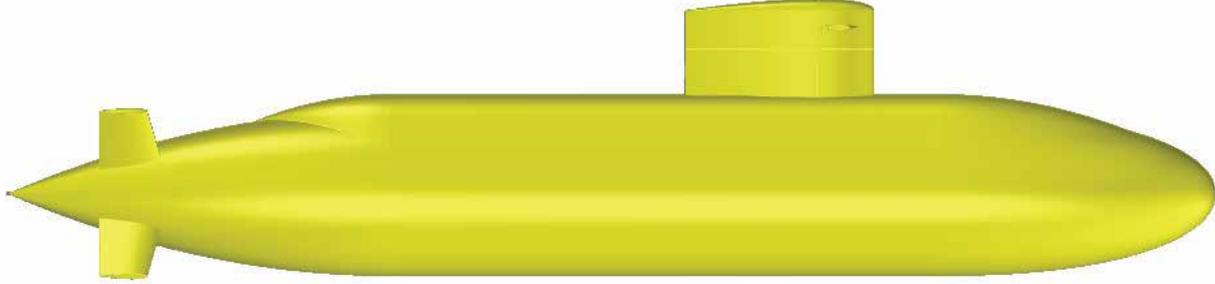
2.5. IHSS

Bu jenerik denizaltı serisi; özellikle modern denizaltı geometrilerinin hidrodinamik özelliklerinin incelenmesi için bir temel teşkil etmek üzere geliştirilmiştir. Seriyi oluşturan geometriler aksel simetrik bir tekne (eliptik baş formu, paralel gövde ve konik kış formu) ve NACA profili kesitli bir yelkenden oluşmakta olup bu geometriyi şekillendiren boyutsuz katsayılar 15 haneli tanımlama kodunu oluşturmak için kullanılmışlardır. Bu kodun ilk 7 hanesi teknenin sonraki 8 hanesi ise yelkenin geometrik özelliklerini tarif etmektedir (Mooresun, 2014).

Seriyi oluşturan geometriler için diğer jenerik geometrilere benzer şekilde bir kontrol yüzeyi konfigürasyonu tanımlaması yapılmamıştır. Bunun nedeni geometrinin mümkün olduğunca basit tutulmak istenmesi ve kontrol yüzeyleri için baz kabul edilebilecek bir konfigürasyonun olmayışdır. Kontrol yüzeylerinin yapısı ve konumu daha çok tasarımcının tercihlerine göre şekillendiğinden (örneğin baş ufki dümenlerin yelken veya baş tarafta konumlandırılması tercihi gibi) ve bahse konu parametrelerin aracın hidrodinamik özellikleri üzerinde çok güçlü etkisi olması sebebiyle standart seride yer almalarının fayda sağlamayacağı değerlendirilmiştir. Bu serideki denizaltı formlarını tanımlayan boyutsuz geometri Şekil 8'de gösterilmiştir.

Tablo 4. BB2 jenerik denizaltısının ana boyutları.

Büyükölç	Boyut	Birim
Dikmeler Arası Boy (LPP)	70.2	m
Genişlik (B)	9.6	m
Yükseklik	10.6	m
Tonaj	~4000	ton
Dolgunluk Oranı (C_D)	0.85	-


Şekil 7. BB2 jenerik denizaltı modelinin yandan görünüşü (MARIN).

3. Standart Manevralar

Manevra analizlerinin nihai amacı analizi yapılan geometrinin (model, prototip, üç boyutlu model) doğrudan (fiziksel yaklaşım) veya dolaylı (matematiksel yaklaşım) yoldan elde edilen yörüngesinden yola çıkarak su altı aracının aynı kontrol girdileri altındaki davranışını tahmin etmektir. Su altı aracı ölçeğinde (tam ölçekte) ancak deniz tecrübelerinde tespit edilebilecek bu davranış, analiz sonuçları ile doğrudan kıyas yapılmasına imkân vermeyen insan girdileri (kumanda gecikmesi, insan kaynaklı hatalar vb.) içerir. Bu girdilerin etkilerinin ölçeklendirilerek model deneylerinde dikkate alınmasının herhangi bir yolu yoktur (Burcher, 1972).

Bu problemi ortadan kaldırmak ve insan girdisini asgari seviyeye indirerek model-su altı aracı arasında doğrudan kıyaslanabilir verilere ulaşabilmek için su altı aracı ölçeğinde (tam ölçekte) de icra edilebilen standart manevralar (deniz tecrübelerinde) adı altında bir dizi manevra tanımlanmıştır. Bu manevralardan literatürde su altı araçlarının manevra özelliklerinin analizi için en sık kullanılanları (Renilson, 2018) tarafından tanımlanmış ve aşağıda listelenmiştir.

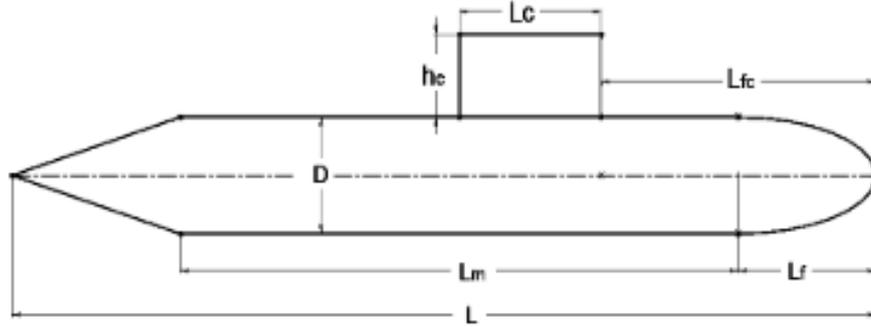
3.1. Dairesel dönüş manevrası

Bu manevra su altı araçlarının yatay düzlem manevra analizlerinde kullanılır. Belirli bir dümen açısı ve sabit itme kuvveti altında aracın zamandan bağımsız (ivmelenme etkileri olmaksızın) manevra özelliklerinin belirlenmesi için yapılır. Manevranın giriş safhasında doğrusal bir rotada istenilen sürat değerine çıkılır daha sonra su altı aracının amudi dümenleri istenilen açıya basılır ve yörüngenin zamandan bağımsız hale gelmesi beklenir. Son safhada yörüngenin belirli parametreleri (taktik çap, ilerleme, yanlama vb.) ölçülerek model ölçeğinde elde edilen parametreler ile (ölçek etkisi de dikkate alınarak) karşılaştırılır. Dairesel dönüş manevrasının şematik gösterimi Şekil 9'da verilmiştir.

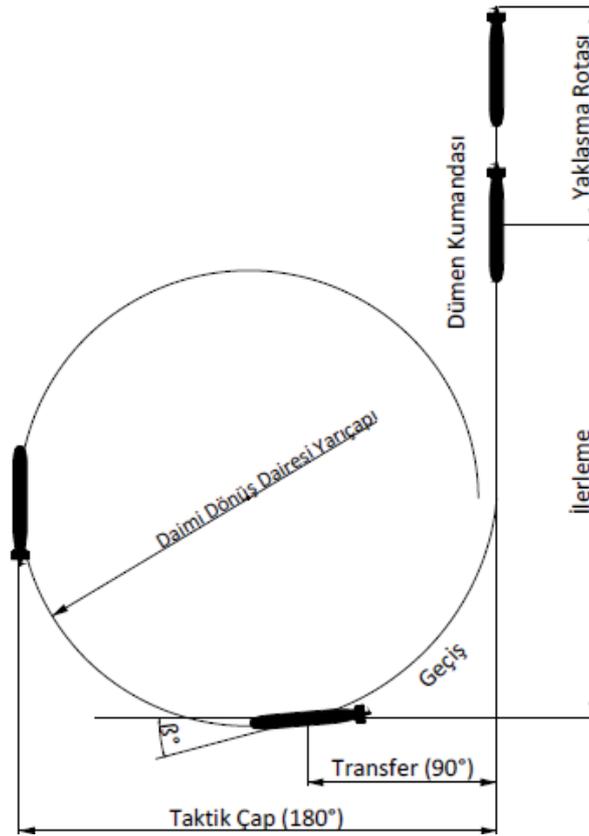
3.2. Kempf manevrası

Zig-zag veya overshoot manevrası olarak da bilinen bu manevra yatay veya düşey düzlemde icra edilebilir. Hangi düzlemde icra edileceğine göre ilgili kontrol yüzeyleri önceden belirlenmiş bir açıya

kadar basılır. Su altı aracının pruvası yine önceden belirlenmiş bir değere ulaştığında ise bu sefer ilgili kontrol yüzeyleri ters yöne ilk adımdaki açı değeri kadar basılarak bu döngü 5-6 kere tekrarlanır. Bu manevra için ölçülen en önemli parametre "overshoot" (sapma) miktarıdır. Sapma; kontrol yüzeylerinin ters yöne basılması sonrasında aracın dümenin önceki basılma yönüne kaç derece daha döneceğini gösteren bir parametredir. 20°/20° Kempf manevrası sırasında dümenin açılma konumunun zamana bağlı değişimi ile aracın yörüngesi Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 8. IHSS'de yer alan su altı aracı formlarını tanımlayan boyutsuz geometri (Mooresun, 2014).

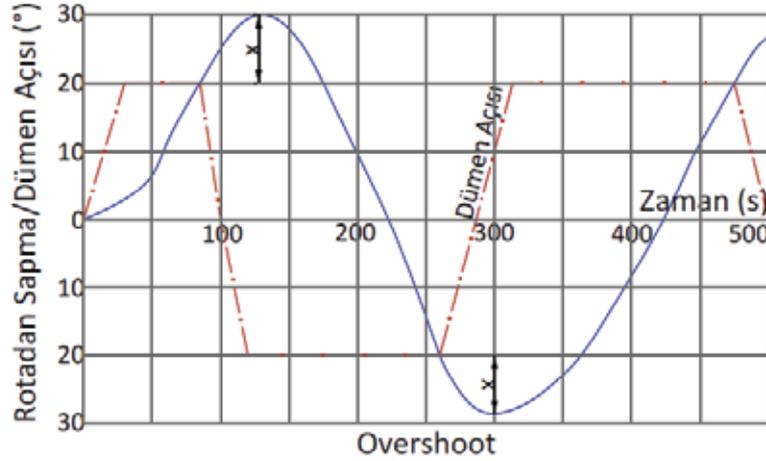


Şekil 9. Dairesel dönüş manevrasının şematik gösterimi.

3.3. Spiral testleri

Dieudonne manevrası olarak da bilinen bu manevra doğrultu stabilitesinin doğrudan belirlenebilmesi için yatay ve düşey düzlemde kullanılabilen bir test yöntemidir. Araç manevraya 10°-15° dümen açısı ile başlar. Daha sonra dümen açısı kademeli olarak 0° oradan da -10°-15° derece değiştirilir. Sonrasında aynı işlem başlangıç dümen açısına doğru tekrarlanır. Dümenin her bir kademesinde dümen açısı aracın dönüş hızı zamandan bağımsız hale gelene kadar sabit tutulur. Daha sonra dönüş hızının dümen açısına

bağlı değeri grafik üzerinde çizilir. Eğer su altı aracı doğrultu stabilitesinde sahipse sonuç eksenin 0 noktasından geçen tek değerli bir fonksiyondur. Aksi durumda grafikte iki değerli bir döngü (loop) bölgesi görülür. Bunun anlamı sancak dümen açısına rağmen geminin iskele tarafı dönmek istemesidir (hafıza etkisi).



Şekil 10. Kempf manevrasının şematik gösterimi.

3.4. Meanders manevrası

Bu manevra su altı aracının yunuslama yönündeki herhangi bir pertürbasyona maruz kalması durumunda etki ortadan kalktıktan sonra kararlı bir yörüngeye dönüp dönmediğini gözlemlemek için yapılır. Bu manevra su altı araçları için özellikle kritik olan düşey düzlem stabilitesinin durumunun doğrudan bir göstergesidir. Tipik bir Meanders manevrası sırasında kontrol yüzeylerinin açıları, derinlik ve baş-kıç vurma hareketindeki değişim Şekil 11'de gösterilmiştir.

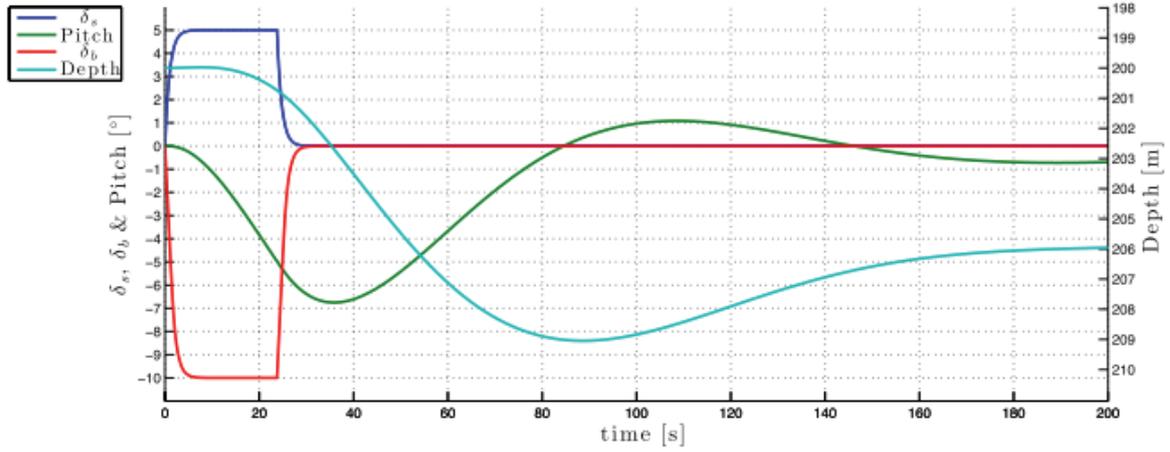
3.5. Max q manevrası:

Bu manevra su altı aracının serbest yüzey etrafındaki manevra karakteristiklerini belirlemek ve serbest yüzeyi yarma simülasyonları gerçekleştirmek için kullanılır. Su altı aracı derin suda belirlenen süratteki sevk noktasında doğrusal rotada ilerlerken baş ve kıç kontrol yüzeylerinin önceden belirlenen bir açıya basılması suretiyle araca baş yukarı hareketi yaptırılır ve kontrol yüzeylerinin bu oryantasyonunda aracın serbest yüzeyi yarması sağlanır. Max q manevrası yapan BB2 modeli Şekil 12'de gösterilmiştir.

3.6. Diğer manevralar

Su altı aracı ölçeğinde (tam ölçek) asgari insan girdisi ile icra edilebilen ve böylece matematiksel/fiziksel yaklaşımla elde edilen sonuçlarla doğrudan kıyaslama imkânına kavuşan yukarıdaki standart manevraların haricinde son yıllarda bazı zorlayıcı manevralar da (acil satıh, ufki dümen kilitlenmesi, yaralanma durumları vb.) su altı araçlarının operasyonel isterlerinin bu yönde genişlemesi nedeniyle araştırmacıların dikkatini çekmeye başlamıştır. Özellikle hesaplama imkanları ile aynı paralelde gelişen fizik temelli hesaplamalı analizler ve otonom kontrol/kumanda sistemlerinin gelişimi ile yetkinliği artan serbest hareketli modeller anılan manevraların da standart manevralarda olduğu gibi (her ne kadar bu manevraları araç ölçeğinde icra etmek zor ve riskli olsa da) analiz edilebilmelerine imkân tanımaktadır.

Standart manevraların yukarıda açıklanan doğrulama/gerçekleme rollerinin yanında, sistem tanımlama teknikleri perspektifinden bakıldığında kullanılan algoritmayı eğitmek için girdi olarak kullanıma işlevleri de mevcuttur. Bu konunun detayları bölüm 0'de açıklanmıştır.



Şekil 11. Meanders manevrası esnasında kontrol yüzeyi ve yunuslama açıları ile aracın derinlik değişimi geçmişi (Thune, 2015).



Şekil 12. Max "q" manevrası yapan serbest hareketli BB2 modeli (Overpelt et al., 2015).

4. Hareket Denklemleri ve Manevra Modelleri

Bu başlık altında su altı araçları için doğrusal ve doğrusal olmayan hareket denklemlerinin altı serbestlik derecesinde türetimi yapılmıştır. Bu denklemlerin literatürde su altı araçları için sıklıkla kullanılan manevra modelleri ile bağlantısına değinilerek söz konusu modellere ilişkin açıklamalara yer verilmiştir.

4.1. Hareket denklemlerinin türetilmesi

Fizikte herhangi bir dinamik sistemin hareketini yöneten denklemlerin türetimi Newton'un ikinci hareket yasasına göre araca etkiyen kuvvetlerin -Denklem (1)'de gösterildiği gibi- aracın reaksiyonuna eşitlenmesi suretiyle yapılır. Eşitliğin sol tarafında bulunan kuvvetler ise araca dışarıdan etkiyen kuvvetler olup; hidrodinamik, yerçekimi ve sephiye kuvvetlerinin toplamından oluşur. Bu kuvvetlerden yerçekimi ve sephiye kuvvetlerinin manevra modelinde ifade edilmesi hidrodinamik kuvvetlere kıyasla görece basittir.

$$\sum F_i = m \cdot a_i \quad (1)$$

Bu ifade doğrusal momentumun korunumunun bir sonucudur. Benzer şekilde açısal momentumun korunumu da bir su altı aracına etkiyen açısal momentlerin aracın seçilen doğrultudaki atalet momentinin (I) ve o doğrultu etrafındaki açısal ivmesinin (α) çarpımına eşit olmasını gerektirir.

$$\sum M_i = I_i \cdot \alpha_i \quad (2)$$

Su altı araçları için düşey yöndeki serbestlik derecelerinin de hesaplamalara dahil edilip altı serbestlik derecesinin tamamında hareket denklemlerinin türetilmesi gereklidir. Ayrıca literatürde var olan deneysel verilerden yararlanılabilmesi için hareket denklemleri bünye eksen takımında ifade edilmelidirler. Su altı araçlarının hareketini yöneten ve eşitliğin sağ tarafını oluşturan bu denklemler yukarıdaki ifadelerden Euler açıları kullanılarak yapılan bir seri rotasyon ile elde edilirler. Hareket denklemleri tüm serbestlik dereceleri için bünye eksen takımında aşağıdaki gibi ifade edilirler.

$$\begin{aligned} X &= m[\dot{u} - rv + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] \\ Y &= m[\dot{v} - wp + ur + x_G(qp + \dot{r}) - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p})] \\ Z &= m[\dot{w} - uq + vp + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p}) - z_G(p^2 + q^2)] \\ K &= I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - (\dot{r} + pq)I_{zx} + (r^2 + q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\ &\quad + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] \\ M &= I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yx} \\ &\quad - m[x_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{u} - vr + wq)] \\ N &= I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - (\dot{q} + rp)I_{yx} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rp - \dot{q})I_{zx} \\ &\quad + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] \end{aligned} \quad (3)$$

Burada X , Y ve Z teknenin doğrusal (ileri öteleme), yanal (yan öteleme) ve dikey (dalıp-çıkma) yönlerdeki kuvvetlerini K , M ve N ise teknenin sırasıyla yalpa, baş-kıç vurma ve savrulma hareketleri esnasında karşılaştıkları açısal momentleri temsil etmektedir. m hareket eden kütle (su altı aracının deplasmanı + ek su kütlesi); I_{xx} , I_{yy} ve I_{zz} teknenin sırasıyla x , y ve z doğrultularındaki atalet momentleridir. x_G , y_G ve z_G tekne ağırlık merkezinin koordinatlarını vermektedir. u , v ve w teknenin sırasıyla ileri öteleme, yan öteleme ve dalıp çıkma hızlarıdır. p , q ve r ise teknenin sırasıyla yalpa, baş-kıç vurma ve savrulma açısal hızlarıdır. (.) işareti ilgili parametrelerin zamana bağlı türevlerini vermektedir.

Su altı araçları, dalmış durumda operasyonları sırasında oluşabilecek hidrostatik etkileri (deniz suyunun yoğunluk değişimleri, yakıtın/ikmal malzemelerinin sarf edilmesi nedeniyle oluşan ağırlık ve trim değişimleri vb.) karşılayabilecek donanıma (tazmin ve ayar tankları vb.) sahip olmak zorundadır. Dolayısı ile ağırlık merkezlerinin konumlarının yüklenme durumlarından bağımsız olduğu iddia edilebilir. Ağırlık merkezinin sabit konumu dolayısı ile manevra analizlerinde bünye eksen takımının merkezi olarak seçilmesi Denklem (3)'te bu iki merkez arasındaki mesafeye bağlı terimlerin sıfır olmasına neden olur. Ayrıca su altı aracının katı bir cisim (statik basınç altında hacminin değişmediği) olduğu ve geometrisinin x-z düzlemine göre simetrik olduğu kabulleri hareket denklemlerinin Denklem (4)'te gösterildiği gibi sadeleşmesine neden olur.

$$\begin{aligned}
 X &= m[\dot{u} - rv + wq] \\
 Y &= m[\dot{v} - wp + ur] \\
 Z &= m[\dot{w} - uq + vp] \\
 K &= I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - (\dot{r} + pq)I_{zx} \\
 M &= I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + (p^2 - r^2)I_{zx} \\
 N &= I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + (rq - \dot{p})I_{zx}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Literatürde bu denklemler boyutsuz halleri ile kullanılırlar. Boyutsuzlaştırma işlemi (SNAME, 1950)'nin önerdiği şekilde yapılır. Buna göre kütle; $m' = \frac{m}{0,5\rho L^3}$, geometrik parametreler $x'_G = \frac{x_G}{L}$, hız ifadeleri; $u' = \frac{u}{U}$, ivme ifadeleri; $\dot{u}' = \frac{\dot{u}L}{U^2}$, kuvvet ifadeleri; $F' = \frac{F}{0,5\rho U^2 L^2}$ ve atalet momentleri ise $I' = \frac{I}{0,5\rho L^5}$ şeklinde boyutsuzlaştırılır. Hidrodinamik katsayılar, kuvvet ve momentlerin doğrusal/açısal hız bileşenleri, doğrusal hız bileşenlerinin çarpım ifadeleri ile doğrusal/açısal ivme bileşenlerine göre türevlerini ifade ettiklerinden boyutsuzlaştırılmaları bu türev ifadesine bağlı olarak yapılır. Örneğin doğrusal hız bileşenlerine göre birinci dereceden türev ifadeleri; $X'_u = \frac{x_u}{0,5\rho UL^2}$ ve $N'_u = \frac{N_u}{0,5\rho UL^3}$ şeklideyken açısal hız bileşenlerine göre birinci dereceden türev ifadeleri; $X'_p = \frac{x_p}{0,5\rho UL^3}$ ve $N'_p = \frac{N_p}{0,5\rho UL^4}$ şeklinde olur. Benzer şekilde doğrusal ivme bileşenlerine göre türev ifadeleri $X'_{\dot{u}} = \frac{x_{\dot{u}}}{0,5\rho L^3}$ ve $N'_{\dot{u}} = \frac{N_{\dot{u}}}{0,5\rho L^4}$ şeklindeyken açısal ivme bileşenlerine göre türev ifadeleri ise; $X'_{\dot{p}} = \frac{x_{\dot{p}}}{0,5\rho L^4}$ ve $N'_{\dot{p}} = \frac{N_{\dot{p}}}{0,5\rho L^5}$ şeklindedir.

4.1.1. Doğrusal hareket denklemleri

Yukarıdaki denklemler bağlı değişkenlerin çarpım ve üstel ifadelerini içerdiklerinden doğrusal değildirler. Denklemleri doğrusallaştırmanın ilk adımı aracın manevrası esnasında kararlı (equilibrium) durumundan küçük sapmalara (pertürbasyon) maruz kaldığı kabul edilir (Humphreys, 1976). Böylece aracın hareketinin kararlı durumu temsil eden bir ortalama (U_0 ve A_0) ve denge durumundan sapmaları temsil eden bir dinamik bileşenin (u_i ve α_i) toplamından oluştuğu söylenebilir. Bu varsayımın matematiksel ifadesi Denklem (5)'te gösterilmiştir.

$$U_i = U_{0i} + u_i ; \quad A_i = A_{0i} + \alpha_i \tag{5}$$

Bu denklemde U doğrusal A ise açısal hızları temsil etmektedir. Aracın ilerleme yönünde sabit hızda seyrettiği durumu kararlı durum olarak kabul edilirse yalnızca "x" eksenindeki doğrusal hareketin ortalama hız bileşeni (U_0) mevcut olur ($U=U_0+u$). Dolayısı ile Denklem (5) diğer bileşenler için aşağıdaki şekilde sadeleşir.

$$U_i = u_i ; \quad A_i = \alpha_i \tag{6}$$

Tüm bu ifadelerin Denklem (4)'te yerine yazılması ve yukarıda doğrusal olmadığı ifade edilen terimlerin ihmal edilmesi ile hareket denklemleri Denklem (7)'de gösterildiği gibi basitleştirilebilir.

$$\begin{aligned}
 X &= m\dot{u} \\
 Y &= m[\dot{v} + rU_0] \\
 Z &= m[\dot{w} - qU_0] \\
 K &= \dot{p}I_{xx} - \dot{r}I_{zz} \\
 M &= \dot{q}I_{yy} \\
 N &= \dot{r}I_{zz} + \dot{p}I_{xx}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Su altı aracına etkiyen hidrodinamik kuvvetler/momentler literatürde aracın akışkana göre göreceli hızının, ivmesinin, pozisyonunun ve kontrol yüzeylerinin açısız konumu gibi aracın durum değişkenlerinin ve bunların türevlerinin bir fonksiyonu olarak düşünülürler. Bu durum matematiksel olarak Denklem (8)'deki gibi ifade edilir. Burada $\delta_B, \delta_S, \delta_R$ sırasıyla baş ufki, kıç ufki ve amudi dümen açılarını tanımlamaktadır.

$$X = f(u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}, \delta_B, \delta_S, \delta_R) \tag{8}$$

Bu varsayımdan yola çıkarak hidrodinamik kuvvetler ile yukarıda sıralanan büyüklükler (su altı aracının durum değişkenleri) arasındaki ilişki matematiksel olarak su altı aracının kararlı durumunu baz alan Taylor serisi açılımı ile temsil edilir (Humphreys, 1976). Doğrusal hareket denklemleri bu ilişkiyi, Denklem (7)'nin Taylor serisine açılımının yalnızca birinci dereceden terimlerini kullanılarak Denklem (9)'da gösterildiği gibi açıklar. Boyutsuzlaştırma bölümü O'de anlatıldığı şekli ile (SNAME, 1950) referans alınarak yapılmıştır.

$$\begin{aligned}
 X'_u(u' - U'_0) + (m' - X'_u)\dot{u}' &= 0 \\
 -v'Y'_v + \dot{v}'(m' - Y'_v) - r'(Y'_r - m'U'_0) - \dot{r}'Y'_r &= 0 \\
 -w'Z'_w + \dot{w}'(m' - Z'_w) - q'(Z'_q + m'U'_0) - \dot{q}'Z'_q &= 0 \\
 -p'K'_p - \dot{p}'(K'_p - I'_{xx}) - r'K'_r - \dot{r}'(K'_r + I'_{zz}) &= 0 \\
 -q'M'_q - \dot{q}'(M'_q - I'_{yy}) &= 0 \\
 -p'N'_p - \dot{p}'(N'_p + I'_{zz}) - r'N'_r - \dot{r}'(N'_r - I'_{zz}) &= 0
 \end{aligned} \tag{9}$$

Hareket denklem takımı bu haliyle iki tür bilinmeyen içerir. Bunlardan ilki analitik, yarı ampirik, deneysel veya hesaplamalı yollardan birisi ile belirlenmesi gereken hidrodinamik katsayılardır. Hidrodinamik katsayıların bilinmesi durumunda denklem takımı bağlı değişkenler -doğrusal ve açısız hızlar ile ivmeler- ($u', v', w', p', q', r', \dot{u}', \dot{v}', \dot{w}', \dot{p}', \dot{q}', \dot{r}'$) için çözülmesi gereken bir diferansiyel denklem sistemi halini alır (Sukas et al., 2017).

4.1.2. Doğrusal olmayan hareket denklemleri

Yukarıda bahsedilen yöntemlerle görece kolay olarak elde edilebilen daha az sayıda katsayıya sahip olmaları doğrusal hareket denklemlerinin manevra analizlerinde kullanımını cazip hale getirebilir. Ancak bir su altı aracının hareketi çoğunlukla serbestlik dereceleri arasında güçlü bağılıklıkların olduğu doğrusal olmayan bir harekettir. Dolayısı ile doğrusal olmayan bu etkilerin de Denklem (4)'te verilen hareket denklemlerinde matematiksel olarak temsil edilmesi gereklidir. Bu işlem ise daha yüksek dereceden türev ifadelerini içeren Taylor serisi terimlerinin eşitliğin sol tarafına eklenmesi suretiyle yapılır ve böylece doğrusal olmayan hareket denklemleri elde edilir. Literatürde mevcut manevra

modelleri doğrusal olmayan hareket denklemlerinden türetilmiştir. Dolayısı ile manevra modelleri incelenmeden önce bu konuya değinilmesi gereklidir.

Doğrusal olmayan hareket denklemlerinden bir manevra modeli türetilmesi için seri açılımı neticesinde elde edilen sonsuz sayıda terimden belirli bir dereceden daha büyük dereceli olanların ihmal edilerek serinin sonlandırılması gereklidir. (Racine & Paterson, 2005). Doğrusal olmayan etkilerin Taylor serisinin hangi dereceye kadarki terimleri ile manevra modelinde temsil edileceği ise modelden beklenen hassasiyet ve doğruluk seviyesi ile model oluşturulurken yapılan temel varsayımlara bağlıdır. Literatürde kabul görmüş manevra modelleri 2. ve 3. dereceden türevlerle birlikte çapraz türev terimlerini de içerebilir (Zierke, 1997). Su altı araçları için yaygın olarak kullanılan manevra modellerinde ise aşağıdaki varsayımlara dayanarak ikinci dereceden daha büyük dereceli terimler ihmal edilmiştir (Racine & Paterson, 2005).

- Türbülanslı bir sınır tabakada yüzey kayma gerilmesi ve hız arasındaki ilişki ikinci dereceden olduğundan doğrusal hızlara bağlı daha büyük dereceli terimler ihmal edilir.
- Viskoz sönümlenme kuvvetleri birinci dereceden rotasyonel hızlar ile ilişkili olduğundan rotasyonel hızların karelerini içeren terimler ihmal edilir.
- Kaldırma kuvvetinin kontrol yüzeylerinde hıza bağlı olarak doğrusal (kanat teorisi), direncin ise hızın karesi ile değiştiği kabul edilir.

Ayrıca doğrusal/açısal ivmelenmeye bağlı birinci dereceden büyük tüm terimler ile tüm hız-ivme, ivme-ivme ve dümen açılarının bağlaşik terimlerinin tamamının sonuca olan etkilerinin ihmal edilebilir olduğu kabul edilmiştir. Bu varsayımlar altında herhangi bir serbestlik derecesinde cisme etkileyen kuvvet/momentin Taylor serisi açılımı Denklem (10)'da gösterildiği gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned}
 X = X_0 &+ (uX_u + vX_v + wX_w + pX_p + qX_q + rX_r) \\
 &+ \frac{1}{2}(u^2X_{uu} + v^2X_{vv} + w^2X_{ww} + p^2X_{pp} + q^2X_{qq} + r^2X_{rr}) \\
 &+ (\dot{u}X_{\dot{u}} + \dot{v}X_{\dot{v}} + \dot{w}X_{\dot{w}} + \dot{p}X_{\dot{p}} + \dot{q}X_{\dot{q}} + \dot{r}X_{\dot{r}}) \\
 &+ (uvX_{uv} + uwX_{uw} + upX_{up} + uqX_{uq} + urX_{ur} + vwX_{vw} \\
 &+ vpX_{vp} + vqX_{vq} + vrX_{vr} + wpX_{wp} + wqX_{wq} + wrX_{wr} + pqX_{pq} \\
 &+ prX_{pr}) + (X_{\delta_B}\delta_B + X_{\delta_S}\delta_S + X_{\delta_R}\delta_R + X_{\delta_B\delta_B}\delta_B^2 + X_{\delta_S\delta_S}\delta_S^2 \\
 &+ X_{\delta_R\delta_R}\delta_R^2 + X_{\delta_Bu}\delta_Bu + X_{\delta_Bv}\delta_Bv + X_{\delta_Bw}\delta_Bw + X_{\delta_Bp}\delta_Bp \\
 &+ X_{\delta_Bq}\delta_Bq + X_{\delta_Br}\delta_Br + X_{\delta_Su}\delta_Su + X_{\delta_Sv}\delta_Sv + X_{\delta_Sw}\delta_Sw \\
 &+ X_{\delta_Sp}\delta_Sp + X_{\delta_Sq}\delta_Sq + X_{\delta_Sr}\delta_Sr + X_{\delta_Ru}\delta_Ru + X_{\delta_Rv}\delta_Rv \\
 &+ X_{\delta_Rw}\delta_Rw + X_{\delta_Rp}\delta_Rp + X_{\delta_Rq}\delta_Rq + X_{\delta_Rr}\delta_Rr)
 \end{aligned} \quad (10)$$

4.2. Matematiksel modelleme

Doğrusal olmayan hareket denklemlerinde eşitliğin sol tarafındaki terimlerden benzer özellikte olanlar (ek su kütlesi terimleri, koryolis ve merkezci terimler, viskoz sönümlenme terimleri, kontrol yüzeyi terimleri vb.) Denklem (11)'de gösterildiği gibi gruplandırılabilir. Bu terim grupları doğrusal olmayan hareket denklemlerinden türetilen manevra modellerinde farklı kabuller altında farklı şekillerde temsil edilirler.

$$\begin{aligned}
 \{f\} &= \{f_H\} + \{f_c\} \\
 \{f_H\} &= \{f_I\} + \{f_R\}
 \end{aligned} \quad (11)$$

Burada $\{f_H\}$ hidrodinamik (ideal akış $\{f_I\}$ ve viskoz akış $\{f_R\}$ kaynaklı hidrodinamik etkilerin toplamı) ve $\{f_C\}$ de kontrol yüzeyi etkilerini temsil etmektedir. Akışın ideal kısmından kaynaklanan hidrodinamik etkiler ek su kütlesi, koryolis ve merkezci etkiler olarak adlandırılır. Bu etkilerden ek su kütlesi etkileri Denklem (10)'da ivmeye ($\dot{u}X_{\dot{u}}$ vb.) bağlı terimlerle, koryolis ve merkezci etkiler ise hızların bağlaşıklık terimleri (uvX_{uv} vb.) ile temsil edilirler. Bu terimlerin tensör notasyonunda topluca gösterimi Denklem (12)'de verilmiştir (Techet, 2005).

$$F_j = - \underbrace{\dot{U}_i m_{ij}}_{\text{Ek su kütlesi}} - \underbrace{\varepsilon_{jkl} U_i \Omega_k m_{li}}_{\text{Koryolis/Merkezcil}} \quad (12)$$

$$M_j = - \underbrace{\dot{U}_i m_{j+3,i}}_{\text{Ek su kütlesi}} - \underbrace{\varepsilon_{jkl} U_i \Omega_k m_{l+3,i} - \varepsilon_{jkl} U_k U_i m_{li}}_{\text{Koryolis/Merkezcil}}$$

Burada F ve M kuvvet ve momentleri, U ve Ω doğrusal ve açısal hızları, m ek su kütlesi matrisini temsil etmekte olup ε_{jkl} Levi-Civita sembolüdür. Ek su kütlesi matrisi $m_{6 \times 6}$ 'lık simetrik bir matris olması nedeniyle gerçekte belirlenmesi gereken 21 adet katsayı (ideal akış varsayımı ile) içerir. Ancak bu sayı geometrinin bir veya birden fazla eksene göre simetrik olması durumunda azalacaktır. (Imlay, 1961) x-z düzleminde simetriye sahip tipik bir su altı aracı geometrisine gösterdiği benzerliğe dikkat çekerek kanatçıklı küremsi cismin (finned spheroid) ek su kütlesi matrisinin aşağıdaki gibi sadeleşeceğini belirtmiştir.

$$m_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & Y_{\dot{p}} & 0 & Y_{\dot{r}} \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & Z_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & K_{\dot{v}} & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & K_{\dot{r}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & N_{\dot{v}} & 0 & N_{\dot{p}} & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Sadeleşmiş matris Denklem (12)'de yerine yazılırsa ilerleme yönündeki kuvvetin örnek olarak seçildiği Denklem (10)'daki seri açılımında $X_{\dot{u}}$ hariç diğer tüm ivmeye bağlı türevler ile vrX_{vr} , wqX_{wq} , prX_{pr} haricindeki tüm bağlaşıklık hız terimleri sıfıra eşit olur. Ayrıca q^2X_{qq} ve r^2X_{rr} de sıfırdan farklı diğer terimlerdir. Buna göre akışın ideal kısmından kaynaklanan ilerleme yönündeki hidrodinamik kuvvet bileşeni Denklem (14)'te verilmiştir.

$$\{f_I\}'_x = \dot{u}X_{\dot{u}}' + q^2X_{qq}' + r^2X_{rr}' + vrX_{vr}' + wqX_{wq}' + prX_{pr}' \quad (14)$$

Kontrol yüzeyi kuvvetlerinin manevra modelinde temsili ise yukarıda kontrol yüzeyleri üzerinde kaldırma kuvvetinin ve direncin hız ile ilişkisini tanımlayan varsayıma dayanılarak yapılır. Buna göre ilerleme yönünde kontrol yüzeylerinin yalnızca direnç bileşeni söz konusu olduğundan Denklem (10)'da yer alan kontrol yüzeyi açısına bağlı türevlerden yalnızca ikinci dereceden olanların sıfırdan farklı olduğu sonucuna varılabilir. İlerleme yönündeki kontrol yüzeyi kuvvetleri Denklem (15)'te verilmiştir.

$$\{f_C\}'_x = X_{\delta_B \delta_B}' \delta_B^2 + X_{\delta_S \delta_S}' \delta_S^2 + X_{\delta_R \delta_R}' \delta_R^2 \quad (15)$$

Manevra modellerinin matematiksel modelleme anlamında birbirlerinden en çok farklılaştıkları kuvvet bileşeninin akışın viskoz kısmından kaynaklanan kuvvet bileşeni $\{f_R\}$ olduğu söylenebilir. Bunun nedeni

viskoz bileşenin manevra modellerinde temsil edilmesinin görece zor ve tecrübeye (deneysel/hesaplamalı verilere) dayalı olmasıdır. İlerleme yönünde viskoz kuvvetler basitçe itme ve direnç kuvvetlerinin farkıdır ve hızın ikinci dereceden terimleri ile Denklem (16)'daki gibi modellenilebilir (Sen, 2000).

$$\{f_R\}_x' = (T' - R') = X_{uu}'u^2 + X_{vv}'v^2 + X_{ww}'w^2 \quad (16)$$

Sonuç olarak ilerleme yönündeki kuvvet modeli Denklem (17)'de gösterildiği gibi elde edilir.

$$X' = \dot{u}X_{\dot{u}}' + q^2X_{qq}' + r^2X_{rr}' + vrX_{vr}' + wqX_{wq}' + prX_{pr}' + X_{uu}'u^2 + X_{vv}'v^2 + X_{ww}'w^2 + X_{\delta_B\delta_B}'\delta_B^2 + X_{\delta_S\delta_S}'\delta_S^2 + X_{\delta_R\delta_R}'\delta_R^2 \quad (17)$$

İncelenen geometrinin simetri özellikleri ve modelden beklenen doğruluk/hassasiyet dikkate alınarak (Prestero, 2001), (McFarland & Whitcomb, 2013), (Coe, 2013) ve (Fossen, 2011) gibi birçok araştırmacı tarafından viskoz kuvvet/moment bileşeni farklı şekillerde modellenmiştir. Örneğin (Fossen, 2020) dikdörtgen prizması şeklindeki ROV'lar için serbestlik dereceleri arasında bağlaşıklık olmayan hareket varsayımıyla bu kuvvet bileşenini Denklem (18)'de gösterilen şekilde modellenmesini önermiştir.

$$\{f_R\} = \text{diag}([X_u + Y_v + Z_w + K_p + M_q + N_r])v + |v|^T \text{diag}([X_{u|u}| + Y_{v|v}| + Z_{w|w}| + K_{p|p}| + M_{q|q}| + N_{r|r}|])v \quad (18)$$

$$v = [u, v, w, p, q, r]$$

(Coe, 2013) ise x-z düzleminde simetriye sahip su altı araçları için Denklem (19)'da gösterilen daha genel bir viskoz kuvvet modeli önermiştir.

$$\{f_R\} = C_{vv^*} \dot{v} + C_{v|v|^*} \text{diag}(|v|)v \quad (19)$$

Burada C_{vv^*} ve $C_{v|v|^*}$ sırasıyla Denklem (20)'de verilmiştir.

$$C_{vv^*} = \begin{bmatrix} X_{uu} & X_{vv} & X_{ww} & X_{pp} & X_{qq} & X_{rr} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{uu} & Z_{vv} & Z_{ww} & Z_{pp} & Z_{qq} & Z_{rr} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{uu} & M_{vv} & M_{ww} & M_{pp} & M_{qq} & M_{rr} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C_{v|v|^*} = \begin{bmatrix} X_{u|u}| & X_{v|v}| & X_{w|w}| & X_{p|p}| & X_{q|q}| & X_{r|r}| \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{u|u}| & Z_{v|v}| & Z_{w|w}| & Z_{p|p}| & Z_{q|q}| & Z_{r|r}| \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{u|u}| & M_{v|v}| & M_{w|w}| & M_{p|p}| & M_{q|q}| & M_{r|r}| \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Denklem (19)'da hıza bağlı ikinci dereceden türevlerde daha gelişmiş manevra modellerinde (Gertler & Hagen, 1967) olduğu gibi mutlak değer ifadelerine yer verildiği görülmektedir. Bunun durum incelenen serbestlik derecesindeki kuvvet/moment ve hareket denklemlerindeki bağlı değişkenler arasındaki ilişki ile açıklanabilir. Kuvvet ve momentler bir bağlı değişkenin tek veya çift fonksiyonu olabilirler (SNAME, 1989). Mutlak değerli ifadelerinin kullanılmaması durumunda azami ikinci dereceden türev ifadelerini içeren manevra modellerinde (su altı araçları için kullanılanlarda olduğu gibi) bağlı değişkenlerin tek fonksiyonu olan kuvvet/momentlerin yalnızca Taylor serisinin doğrusal terimiyle temsil edilmeleri gerekir. Literatürde mevcut manevra modellerinin çoğu söz konusu

kuvvet/moment-bağlı değişken ilişkisi için de doğrusal olmayan etkileri daha yüksek dereceden Taylor serisi terimlerini modele dahil etmeksizin dikkate almak için bu yolu benimsemişlerdir.

4.3. Manevra modelleri

Manevra modeli; bir su altı aracına hareketi nedeniyle etkiyen kuvvet ve momentleri aracın geometrisinin ve akışkan özelliklerinin bir fonksiyonu olan bir seri katsayı vasıtası ile hesaplamaya yarayan matematik modeldir. Bu anlamda değerlendirildiğinde aşağıda verilen Morrison denkleminin en basit manevra modeli olduğu söylenebilir (Morrison & Yoerger, 1993).

$$F = (1 + C_M)mU + 0.5\rho AC_D U|U| \quad (21)$$

Burada;

C_M : Ek su kütlesi katsayısını,

C_D : Direnç katsayısını,

m : Cismin kütlesini,

U : Cismin hızını,

ρ : Akışkan yoğunluğunu,

A : Referans Alanı (Akışa karşı gösterilen kesit alanı),

Akışkan içerisinde yalnızca bir boyutta hareket serbestliğine sahip ivmelenen cisimlere etkiyen kuvveti hesaplamak için kullanılan bu yarı ampirik model deneysel/hesaplamalı/teorik yöntemler kullanılarak belirlenmesi gereken iki adet katsayıya (C_M ve C_D) sahiptir.

Cismin doğrusal ve açısal hareket serbestliğine sahip olduğu boyut sayısı arttıkça; bahse konu boyutlardaki hareketleri nedeniyle maruz kaldığı kuvvet ve momentleri ve bu boyutlar arası karşılıklı etkileşimi tanımlamak için daha fazla sayıda katsayı içeren daha karmaşık manevra modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Buna göre manevraları esnasında altı serbestlik derecesinin tamamında hareket edebilen su altı araçlarının maruz kaldıkları kuvvet ve momentleri hesaplamak için literatürdeki en karmaşık ve düzlemler (yatay ve düşey) arası karşılıklı etkileşimleri de barındıran manevra modellerine ihtiyaç vardır.

Bu modeller ise bölüm 0'de detayları anlatılan doğrusal olmayan hareket denklemlerinden türetilirler. Kuvvet ve momentlerin hız, ivme ve kontrol parametrelerine göre Taylor serisine açılmasına dayanan bu işlem neticesinde ortaya çıkan ifade sabit katsayılar ile çarpım halinde olduğundan matematik modeller katsayı tabanlı modeller olarak da adlandırılırlar. Literatürde su altı araçlarının manevra analizi için genel kabul görmüş modeller aşağıda sıralanmıştır.

4.3.1. Gertler ve Hagen (1967) modeli

DTMB bünyesinde su altı araçları ile yapılan analizler için bir standart oluşturmak amacıyla (Gertler & Hagen, 1967) tarafından geliştirilen standart denklemler (Humphreys, 1976)'in modelindeki doğrusallaştırma ve basitleştirmeleri içermediğinden (ikinci dereceden terimler de dahil edilmiştir.) yazarlar modelin standart olmayan keskin manevraların temsil edilmesi için de kullanılabileceğini ve modelin geçerliliğinin su altı aracının dalmış durumda ileri ve sıfır hızda karşılaşılabileceği tüm hareket modlarına genişletilebileceğini savunmuşlardır. Model geliştirilirken her bir kuvvet/moment bileşeninin nasıl modellendiğine ilişkin kullanılan kabuller ve deneysel veriler literatürde mevcut değildir. Dolayısı ile modelde yer alan terimlerin kuvvet bileşenlerinin hangisinden/hangilerinden kaynaklandığı açık değildir. Bu nedenle bölüm 0'de yapıldığı gibi modeli farklı kuvvet/moment bileşenlerinin etkilerinin ayrı ayrı incelendiği bir toplam olarak ifade etmek çok zordur (McCarter, 2014). Bu türden modeller literatürde toplu (lumped) model adlandırılır.

Her ne kadar model geliştirilirken incelenen manevralar esnasında kontrol yüzeylerinde yüzeyin kritik bir hücum açısından sonra kaldırma kuvvetinin kaybedilmesi (stall) olayı gözlemlenmese de modelin kontrol yüzeyi hareketleri için bu durumu da dikkate alan bir modül içermemesi yukarıdaki iddianın geçerliliğini zorlayıcı manevralar için sorgulanabilir hale getirmektedir. Bu husus bu türden manevraları analiz eden güncel çalışmalarda da vurgulanmıştır (Bettle, 2013). Bettle; Gertler ve Hagen'ın modelinin doğrusal olmayan ve karşılıklı etkileşimli terimleri de barındırması itibarı ile 18° kadar olan hücum/sürüklenme açılarında geçerli olduğunu ve yüksek derecede zamana bağlı manevraların bu katsayı tabanlı yarı kararlı (quasi-steady) modelin zayıf noktası olduğunu ifade etmiştir.

4.3.2. Feldman (1979) modeli

Uygulama kolaylığı ve literatürde elde edilen sonuçlarla kıyaslanabilirlik/tutarlılık açısından değerlendirildiğinde, literatürde en sık kullanılan model olan Gertler ve Hagen modelinin revize edilmesi ilgili değişikliğin önemli bir avantaj/gelişme sağlaması şartına bağlanmıştır (Gertler & Hagen, 1967). Hücum açısı arttıkça veya ani manevralar için su altı aracı etrafındaki akışın giderek artan oranda zamana bağlı hale geldiği bilinmektedir. Ancak yapısı gereği yarı kararlı olan katsayı tabanlı modellerin bu etkiyi analizlere yansıtması olanaksızdır.

(Feldman, 1979) -manevra esnasında ortaya çıkan düzlem dışı etkilerin de kaynağı olan- yelken etrafında oluşan at nalı girdabın, yüksek hücum açılarında su altı aracının rüzgaraltı kısmında oluşan çapraz akış ve takıntılar ile etkileşime girmesinin oluşturduğu zamana bağlı etkileri manevra modelinde temsil edebilmek ve modelin geçerliliğini artırabilmek için Gertler ve Hagen'ın modelini revize etmiştir. Ancak Feldman'ın önerdiği düzeltmelerin uygulamasının güç olması (Bettle, 2013) bu modelin literatürde Gertler ve Hagen modeli kadar uygulama alanı bulamamasına neden olmuştur (Bettle et al., 2009).

4.3.3. Watt (2007) manevra modeli:

Acil satha geliş manevrasını analiz ettiği çalışmasında (Watt, 2007) bu türden manevraların analizlerinde kullanılmak üzere bir de manevra modeli önermiştir. Watt'ın modeli temel olarak (Feldman, 1979) çalışmasına dayansa da ek su kütlesi terimleri için farklı bir hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca modele deneysel veriler kullanılarak türetilen ve hücum açısının bir fonksiyonu olan itki gücü alt modülü ile takıntı/pervane aktivasyonu için bir alt modül eklenmiştir. Bu modelin geliştirilmesindeki ana amaç diğer yarı kararlı manevra modelleri ile doğru bir şekilde modellenemeyen satha geliş esnasında su altı aracının yalpa serbestlik derecesindeki kararsızlık fenomenini analiz etmektir. Modelin geliştirilmesinin diğer bir amacı ise yüksek açılı manevraların daha doğru bir şekilde temsil edilmesine olanak sağlamaktır. Bunun yanında diğer kabul görmüş modellere kıyasla daha yeni bir model olması nedeniyle bu modelin henüz yeterince test edilmediği söylenebilir.

5. Manevra Problemine Matematiksel (Dolaylı) Yaklaşımlar

Bu başlık altında incelenen yöntemlerin tamamı rijit cisim hareket denklemlerinden matematiksel olarak elde edilen bir manevra modelinin katsayılarını hesaplamak üzere geliştirilmişlerdir. Bu yöntemler akışkan ile cismin hareket denklemleri arasında mevcut zaman boyutundaki karşılıklı etkileşimi dikkate almaksızın manevra analizi yapılmasına ve aracın yörüngesinin belirlenmesine izin verirler. Bu hususun analizlerin yapılması için gerekli kaynaklara olan ihtiyacı azaltması bu kategoride

çok çeşitli yöntemlerin geliştirilmesi sonucunu doğurmuştur. Su altı araçlarının manevra analizlerinde kullanılan bu yöntemler alt başlıklarda detaylandırılmıştır.

5.1. Deneysel yöntemler

Manevra problemine matematiksel yaklaşım yöntemlerinin deneysel ayağını kısıtlanmış model deney yöntemleri oluşturmaktadır. Bu yöntemler su altı aracının ölçekli bir modelinin bir hareket mekanizmasına bağlanması ve önceden belirlenmiş hareketleri yapmak için zorlanmasını esas alırlar. Zorlanmış hareket nedeniyle oluşan reaksiyon kuvvetleri ve bunlara bağlı momentlerin analizi ise tüm matematiksel yöntemlerinin ortak çıktısı olan hidrodinamik katsayıları verir. Kısıtlanmış model deney yöntemleri ile belirlenebilecek katsayıların sayısı ve niteliği (doğrusal, doğrusal olmayan, etkileşimli vb.) hareket mekanizmasının aşağıda sıralanan özelliklerine bağlıdır:

- Daimi/Dinamik
- Düzlemsel/Düzlem Dışı
- Serbestlik Derecesi Sayısı

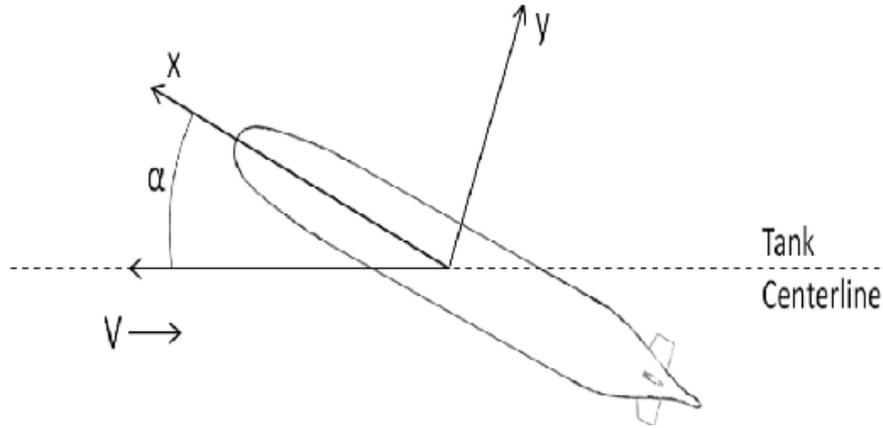
Su altı araçlarının manevra analizlerinde kullanılan kısıtlanmış model deney yöntemleri bu özelliklere göre Tablo 5'te sınıflandırılmış olup, her bir yöneme ilişkin detaylı açıklama alt başlıklarda verilmiştir.

Tablo 5. Kısıtlanmış model deneylerinin sınıflandırılması.

Test Yöntemi	Sınıflandırma			
	Düzlemsel-Düzlem Dışı	Daimi-Dinamik	Serbestlik Derecesi Sayısı	Tespit Edebileceği Katsayılar
Statik Sürüklenme Deneyleri	Düzlemsel	Daimi	1	• Statik Stabilite
Düzlemsel Hareket Mekanizması	Düzlemsel	Dinamik (Periyodik)	3	• Statik Stabilite • Rotasyonel • Ek su kütlesi
Döner Kol Mekanizması	Düzlemsel	Daimi	1	• Rotasyonel • Statik Stabilite (Dolaylı)
Deforme Model Deneyleri	Düzlemsel	Daimi	1	• Rotasyonel (doğrusal) • Statik Stabilite (Dolaylı)
Dinamik Dalma-Yunuslama-Yalpa Mekanizması	Düzlem Dışı	Dinamik (Rastgele)	3	• Dinamik etkiler
Konik Hareket Mekanizması	Düzlem Dışı	Dinamik (Periyodik)	3	• Yalpa hareketine bağlı katsayılar
MDTF	Düzlem Dışı	Dinamik (Rastgele)	6	• Tüm katsayılar

5.1.1. Statik sürüklenme deneyleri

Statik sürüklenme deneyleri bir su altı aracının statik stabilite türevleri olarak da bilinen doğrusal hız bileşenlerine bağlı hidrodinamik katsayılarının doğrudan tespit edilebilmesi için, modelin yatay ve düşey düzlemde bir hücum/sürüklenme açısına sahip olacak şekilde çekme arabasına bağlanması ve çekme işlemi sırasında doğrusal hızlara bağlı kuvvet ve moment verisinin kaydedilmesi aşamalarını içerir. Statik sürüklenme deneylerinin yapılışı Şekil 13'te şematik olarak gösterilmiştir.

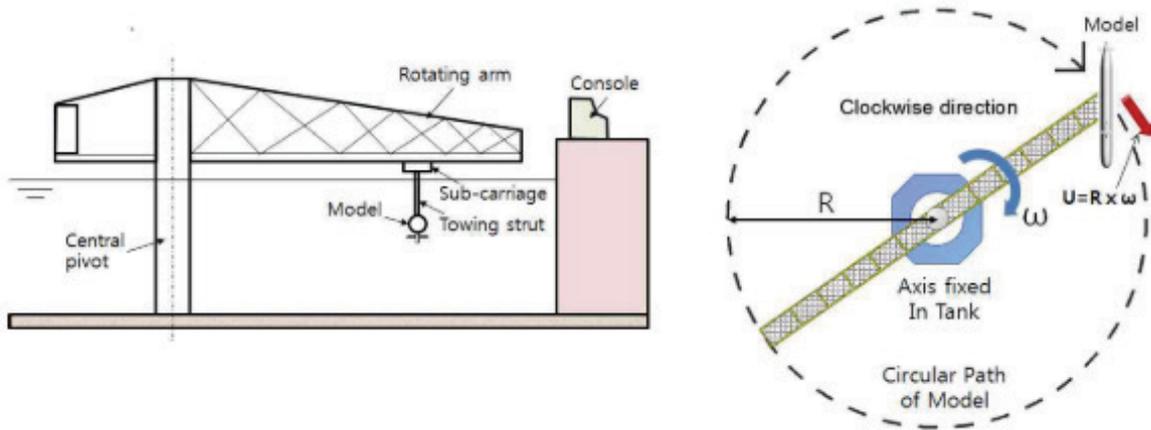


Şekil 13. Statik sürüklenme deneyleri (Can, 2014).

Çekme arabası dışında herhangi bir özel hareket sağlayan mekanizmaya ihtiyaç duymaması ve statik stabilite analizlerinin geliştirilen prototipin manevra karakteristiklerini doğrulamanın ilk fazı olması nedeniyle statik sürüklenme deneyleri su altı araçlarının deneysel manevra analizleri için en temel deney yöntemidir. Statik sürüklenme yöntemi zamandan bağımsız ve düzlemsel bir yöntemdir.

5.1.2. Döner kol mekanizması deneyleri

Bir başka düzlemsel ve zamandan bağımsız yöntem ise su altı araçlarını rotasyonel katsayılarının doğrudan elde edilmesine imkân sağlayan döner kol mekanizması tekniğidir. Bu teknikte modele mekanizma merkezindeki ekipman adacığında bulunan tahrik shaftı tarafından istenilen bir sabit açısal hız değeri ve değişik yarıçaplı dairesel yörüngelerde rotasyonel hareket yaptırılır. Model mekanizmaya istenilen açısal oryantasyonda bağlanarak kuvvet ve momentler yörünge yarıçapının bir fonksiyonu olacak şekilde kaydedilir (Goodman, 1960). Böylece statik sürüklenme deneylerinde kullanılan tüm parametre değişimlerine ilave olarak yörünge yarıçapı da değiştirilebilir (Burcher, 1972). Bu mekanizma ile doğrusal rotasyonel katsayıların yanı sıra doğrusal olmayanların da ölçülmesi mümkündür. Döner kol mekanizması Şekil 14'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 14. Döner kol mekanizmasının şematik gösterimi (Han et al., 2017).

Bu yöntemin önemi şu şekilde açıklanabilir; örneğin yanal öteleme kuvvetinin sürüklenme açısı ve dönme yarıçapına göre değişimi incelenirse herhangi bir sürüklenme açısı ve dönüş dairesi için kuvvetin değişiminin doğrusal olmadığı görülebilir. Bunun anlamı yalnızca doğrusal katsayıların söz konusu

kuvvet değerini hareket parametrelerinin tüm opsiyonları için temsil etmekte yetersiz olduğudur. Kuvvetin hareketin tüm varyasyonlarında doğru temsil edilebilmesi için daha yüksek mertebeden katsayılara ihtiyaç vardır.

Döner kol mekanizmasının en belirgin kısıtı testlerin mekanizmanın bir turuna yakın dönüşler için yapılması zorunluluğudur. Bunun nedeni modelin kendi iz bölgesinden geçmesini engelleyerek iz bölgesinin kuvvet ve moment ölçümlerine getireceği belirsizliklerin önüne geçmektir. Bir diğer kısıtlama ise tesisin fiziksel sınırları ile ilgilidir. Tesisin duvarlarının girişim etkisi olmaksızın -model boyutunun da bir fonksiyonu olarak- test yapılabilecek azami ve asgari test yarıçapları mevcuttur (Gertler & Hagen, 1967).

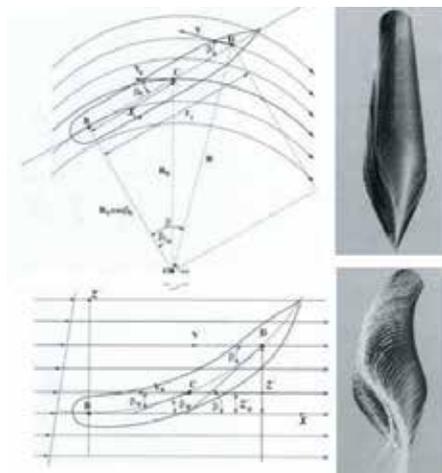
Rotasyonel katsayıların yanında dolaylı da olsa statik stabilite türevleri de döner kol mekanizması kullanılarak belirlenebilir. Bu işlem elde edilen datanın sonsuz dönme dairesi yarıçapına ekstrapolasyonu ile yapılır ve belirsizlik ve hatalara açıktır.

5.1.3. Deforme modeller ile yapılan deneyler

Su altı araçlarının zamandan bağımsız (daimi) dönüş manevrasının deneysel analizi için döner kol mekanizmasına bir diğer alternatif ise deforme edilmiş modellerin kullanımınıdır. Koordinat dönüşümü yöntemi kullanılarak döner kol deneylerindeki klasik model dairesel yörünge kombinasyonu ile model üzerinde oluşan yerel hücum açıları deforme model ve doğrusal yörünge kombinasyonu kullanarak elde etmeyi hedefleyen bu teknik aynı zamanda döner kol mekanizmasının;

- Modelin kendi izinden geçmemesi için yalnızca bir dönüş ile sınırlandırılması,
- Akışın görselleştirilmesindeki zorluklar

gibi kısıtlamalarının da aşılmasına imkan sağlamaktadır. Bu tekniğin Von Karman tarafından hava gemileri için kullanıldığı bilinmektedir. Tekniğin etkinliğini göstermek için (Gregory et al., 2004) bu deney tekniğini HAD ortamında simüle ederek analizler yapmış ve her iki tekniğinde birbirinin yerine kullanılabileceği sonucuna varmıştır. Sürekli dönme manevrası esnasında normal ve deforme model etrafında oluşan akış sahalarının karşılaştırılması Şekil 15'te verilmiştir.



Şekil 15. Sürekli dönme manevrası esnasında normal ve deforme model etrafında oluşan akış sahalarının karşılaştırması (Gregory et al., 2004).

5.1.4. Düzlemsel hareket mekanizması deneyleri

Manevra denklemlerinde su altı aracına etkiyen hidrodinamik kuvvetlerin bir ifadesi olarak yer alan ve aracın farklı hız/ivme bileşenlerinin bir fonksiyonu olan katsayı gruplarının tümünün tek bir deney düzeneği kullanılarak bir seferde ve doğrudan belirlenebilmesi deneysel analizler açısından arzu edilen bir durumdur (Goodman, 1960). Deneysel literatürde bu şekilde çok yönlü bir mekanizmaya olan ihtiyacı ekonomik olarak karşılamak üzere geliştirilen ve salınımlı deney tekniğine dayanan düzlemsel hareket mekanizması ilk defa DTMB'de denizaltı modellerini test etmek için kullanılmıştır.

Elektromekanik bir cihaz olan ve çekme tankı arabasına bağlanarak kullanılan düzlemsel hareket mekanizması bir modele çekme tankında önceden programlanmış sinüzoidal hareketleri yaptırmak üzere tasarlanmıştır (Millan & Thorburn, 2010). Söz konusu sinüzoidal hareketler modeli düzeneğe irtibatlayan iki çubuk tipi destek vasıtası ile bağlantı noktalarına uygulanan kuvvetlere tepki olarak oluşur ve düşey düzlemde modelin çekme arabası ile sabit bir hızda çekildiği doğrultu etrafında gerçekleşir. Bu sinüzoidal hareket destek çubuklarına hidrolik pistonlar vasıtası ile uygulanan kuvvetler arasındaki faz farkına göre yalın dalıp çıkma veya yalın yunuslama olabilir.

Salınımlı yörünge izlerken su altı aracı hem doğrusal hem de açısal ivmelenmeye maruz kaldığından doğrusal, rotasyonel ve ivmelenme etkilerinin tamamını hisseder. Bu açıdan değerlendirildiğinde doğrusal hareket mekanizması ivmeye bağlı türevleri verebilen deneysel mekanizmalarından biridir.

Yalın dalıp çıkma modunda su altı aracının pruvası daima çekme arabasının hareket yönündedir. Dolayısı ile testlerde yunuslama ve rotasyonel etkiler söz konusu değildir. Modelin her bir parçası yalın salınım halindedir ve yalnızca dalıp çıkma hızı ve ivmesi söz konusudur. Yalın yunuslama modunda ise hem model hem de pruva aynı frekansta salınım halindedir. Hareketin geometrisi pruvanın her zaman hareketin yörüngesine teğet olmasını sağlayacak şekilde seçilmiştir. Dolayısı ile model dalıp çıkma yönünde yer değiştirmeye (hız ve ivme) maruz kalmaz, sadece yunuslama hızı ve ivmesinin etkisi altındadır. Bu iki hareket modunun herhangi bir kombinasyonu da arzu edilirse modele yaptırılabilir. Düzlemsel hareket mekanizmasının hareket modları Şekil 16'da gösterilmiştir.

Yalın Dalıp Çıkma



Yalın Yunuslama



Şekil 16. Düzlemsel hareket mekanizmasının hareket modları (Can, 2014).

Hareketin sinüzoidal olması hareketin yarattığı kuvvetin de sinüzoidal olması sonucunu doğurur. Ancak aynı frekans değerine sahip olan hareket ve kuvvet arasında bir faz kayması oluşur. Bu nedenle ölçülen kuvvet hareket ile aynı fazda ve 90° faz farkı olan iki bileşene ayrılabilir. Düzlemsel hareket mekanizması bu iki kuvvet bileşenini ayrı ayrı ölçmek üzere tasarlanmıştır. Kuvvetin hareket ile aynı fazdaki bileşeni ivmeyi, 90° faz farkına sahip bileşeni ise hıza bağlılığın ifadesidir. Buradan yola çıkarak aynı çekme

arabası hızında farklı frekans (ω) ve genlik (a_0) değerlerinde bir seri test sonucunda ölçülen kuvvet bileşenlerinin hız ($a_0\omega$) ve ivmeye ($a_0\omega^2$) bağlı türevleri bulunabilir.

Bu iki salınımlı hareket modunda bulunan katsayıları ilave olarak statik sürüklenme testleri ile elde edilen statik katsayılar da dikkate alındığında hareket denklemleri tarafından yörüğe hesaplamak için gerekli olan tüm katsayılar bu mekanizma ile elde edilmiş olur. Ancak katsayıların belirlenmesi için deney datasının işlenmesinin gerekli olması ve bu sırada yapılan eş zamanlı denklem çözümü değişik katsayıların mertebeleri arasındaki büyük farklar nedeniyle hatalara sebep olabilir (Goodman, 1960).

Yöntemin bir diğer dezavantajı ise ekonomik olması için var olan çekme tankı imkânlarını kullanmak zorunda olması ile ilişkilidir. Mekanizmanın azami hareket genliği ve dolayısıyla frekansı çekme tankının -yan duvarları ile girişim etkisine neden olmayacak bir emniyet mesafesi bırakmak kaydı ile- yarı genişliği ile sınırlıdır. Bu durum hareketin genliğinin küçük olmasına, ortaya çıkan hareketin gerçekçi bir hareket olmamasına ve bu mekanizma kullanılarak yapılan analizlerin akışkan kuvvetlerinin teorik temellerine dayanmasına neden olur.

Düzlemsel hareket mekanizmasının düşük genlikli hareketi nedeniyle aracın gerçek manevra tepkisinden uzaklaşması, beraberinde gerçek manevra koşullarında (deniz tecrübeleri veya serbest hareketli model deneyleri) gözlemlenmeyen "Wagner" (hafıza) etkisinin oluşması sonucunu doğurur (Grim et al., 1976). Bu noktada ölçülen kuvvete ilişkin Wagner etkisinden bağımsızlık varsayımı ise kuvvetin $a_0\omega$ (hız) ve $a_0\omega^2$ (ivme)'nin doğrusal bir fonksiyonu (doğrunun eğimi ilgili değişkene bağlı hidrodinamik katsayıyı vermektedir.) olması anlamına gelir. Fakat gerçekte doğrusal olmayan bu ilişki nedeniyle aynı hız ve ivme değerlerini veren farklı frekans ve genlik değerleri için ölçülen kuvvet değeri ile farklı bir ilişki tespit edilebilir. Bunun anlamı düzlemsel hareket mekanizması ile ölçülen kuvvetlerin özellikle küçük genlikli (yüksek frekanslı) sinüzoidal hareketlerde mekanizmanın çalışma frekansına bağlı olarak değişmesi ve sağlıklı deney sonuçları üretilememesidir (Burcher, 1972). Bu soruna çözüm olarak (Booth, 1973) "salınımlı katsayılar" yaklaşımın önerildiğini ancak bu katsayıların da hafıza etkilerini dikkate almamaları sebebiyle literatürde genel kabul görmediklerini belirtmiştir.



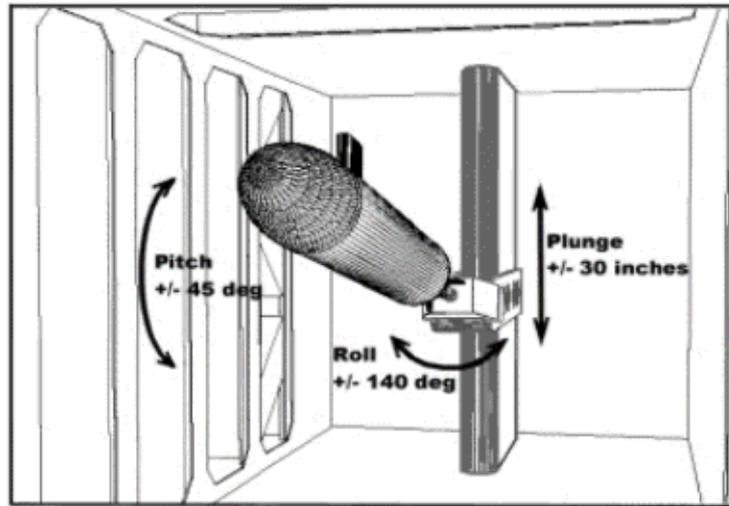
Şekil 17. Denizaltı modelinin düzlemsel hareket mekanizması kullanılarak test edilişi (Renilson, 2018).

Tüm bu etkilerin önüne geçmek için literatürde bu problemi ilk kez fark eden (Leeuwen, 1969) mekanizmanın frekansının mümkün olduğunca küçük, genliğinin ise bu küçük frekans değerinde ölçülebilecek seviyede kuvvet oluşumu için mümkün olduğunca yüksek seçilmesini önermiştir. Ayrıca yüksek genlikli hareket su altı aracının gerçek hareket tepkisini daha doğru simüle edebilir ve doğrusal olmayan etkilerin de deneysel analiz sonuçlarında temsil edilmesini sağlayarak sonuçların doğruluk seviyesini artırabilir. (Grim et al., 1976) böyle bir mekanizmanın varlığının zorlayıcı manevraları da analiz edebilecek daha iyi bir matematik modelin geliştirilebilmesi için bir ön şart olduğunu dile getirmişlerdir. Bir denizaltı modelinin DHM kullanılarak test edildiği Şekil 17'de gösterilmiştir.

5.1.5. DyPPiR mekanizması ile yapılan deneyler

Düzlemsel hareket mekanizması gibi dinamik yöntemler küçük genlikli sinüzoidal model hareketlerini esas aldıklarından aracın mevcut durumundan küçük sapmaları içeren manevraları yüksek doğrulukla temsil etmek için yeterli olsalar da yüksek sapma miktarına sahip manevralar için bu durum sorgulanabilir. Bir su altı aracının sahip olduğu hıza kıyasla oryantasyonunda yapacağı hızlı değişimleri içeren manevralar aynı koşullarda yapacağı yavaş değişimlerden akışkanlar mekaniği disiplininin ilgi alanı açısından tamamen farklı sonuçlara neden olur ve zamana bağlı dinamik akış fenomeninin ortaya çıkması ile sonuçlanır. Hücum açısının hızlı değişimi nedeniyle aerofoillerde görülen dinamik kaldırma kuvveti kaybı (dinamik stall) fenomeni bu duruma örnek teşkil eder (Ahn et al., 1989).

Bu dinamik etkilerin yeterince iyi anlaşılabilmesi için dinamik olarak hareket ettirilebilen modellerle rüzgâr tüneli testlerinin yapılmasına ihtiyaç vardır. Bu ihtiyaç literatürde ilk defa (Galloway & Osborn, 1985) tarafından dile getirilmiş olup, bahse konu işlevi yerine getiren bir mekanizma DyPPiR adıyla (Ahn et al., 1989). Virginia Politeknik Enstitüsünde bulunan rüzgâr tüneline kullanılmak üzere geliştirilmiştir. DyPPiR mekanizması Şekil 18'de şematik olarak gösterilmiştir.



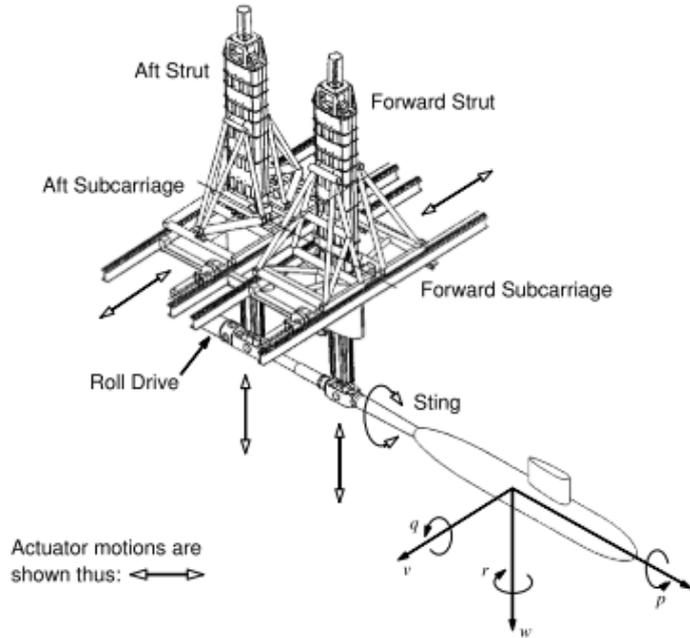
Şekil 18. DyPPiR mekanizmasının şematik gösterimi (Whitfield, 1999).

Mekanizmaya bağlanan modellere dalıp çıkma (1,5 m), yalpa (+-140°) ve yunuslama (+-45°) serbestlik derecelerinde hareketler yaptırmak mümkündür. DyPPiR mekanizması bu serbestlik dereceleri için verilen aralıklarda modele rastgele veya periyodik hareketler yaptırmaya yöntemlerini kullanarak zamana bağlı kuvvet ve moment ölçümü ile daha önce DHM gibi periyodik düzeneklerle çok sık yapılmayan zamana bağlı akışın görselleştirilmesi için kullanılmaktadır. Özellikle zamana bağlı hareket icra eden model yüzeyinde görülen çapraz akış ayrılması olayının doğasının anlaşılması ve zamandan bağımsız

durumdan farklarının ortaya konabilmesi açısından bu mekanizmanın kullanımı önemlidir. (Wetzel & Simpson, 1996) bu mekanizmayı kullanarak literatürde ilk defa kuvvet ve momentlerin büyüklükleri ile çapraz akış ayrılmasının zamana bağlı yerini doğru olarak ölçmeyi başarmışlardır.

5.1.6. MDTF mekanizması ile yapılan deneyler

Su altı aracı modellerine KHM ve DyPPiR gibi yalpa serbestlik derecesinde hareket yaptırabilen bir diğer deney düzeneği de MDTF'dir. Bu düzeneğe dalmış veya yarı dalmış bir modele yalın dalıp çıkma, yunuslama, yanal öteleme, savrulma, yalpa ve ilerleme hareketleri ile bu hareketlerin kombinasyonu olan herhangi bir hareketi kontrollü olarak yaptırabilir (Mackay et al., 2007). Düzeneğin büyük ölçekte model kullanımına izin vermesi gerek ölçek etkileri nedeniyle oluşacak hataları azaltırken gerekse de küçük insansız su altı araçlarının doğrudan test edilmesine imkân sağlar. Düzeneğe bağlanan modele yalpa hareketi iğne tipi destekle verilirken, ilerleme hareketi çekme arabası tarafından diğer serbestlik derecelerindeki hareketler ise çubuk tipi destekler tarafından verilir. MDTF mekanizmasının genel görünüşü Şekil 19'da verilmiştir.



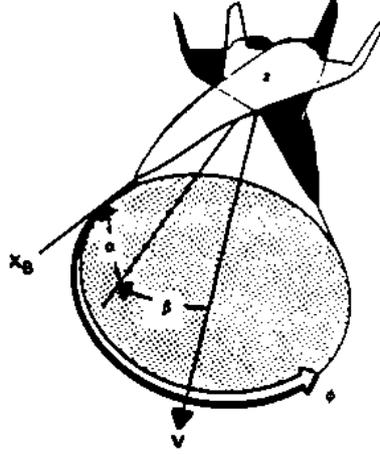
Şekil 19. MDTF mekanizmasının genel görünüşü (Mackay et al., 2007).

5.1.7. Konik hareket mekanizması ile yapılan deneyler

Bir su altı aracının akışkan içerisindeki hareketi altı serbestlik derecesinde de etkileşim halindedir. Döner kol ve düzlemsel hareket mekanizması gibi düzlemsel teknikler temel olarak; aracın manevra karakteristiklerinin yatay ve dikey düzlemler için manevranın doğasına aykırı bir biçimde söz konusu etkileşimleri yok sayarak ayrı ayrı analiz edilmesi yaklaşımına dayanırlar. Hareketin doğasındaki bu eksiklikler düzlemsel olmayan çapraz akış etkileri ve hareketin yalpa yönündeki bileşeni incelendiğinde anlaşılabilir. Su altı araçlarının gerçek operasyon şartlarındaki genel hareketinin düzlemsel olmayan doğasını analiz etmek için bu tekniklerin dışında tekniklere ihtiyaç vardır.

Konik hareketin (aracın ana ekseninin araca gelen akışın yön vektörüne göre daimi yalpa hareketi yapması durumu) su altı araçları gibi altı serbestlik derecesinin tümünde hareket edebilen araçların manevrasının düzlemsel olmayan doğasını temsil etmedeki üstünlüğünü dikkate alan (Johnson, 1989)

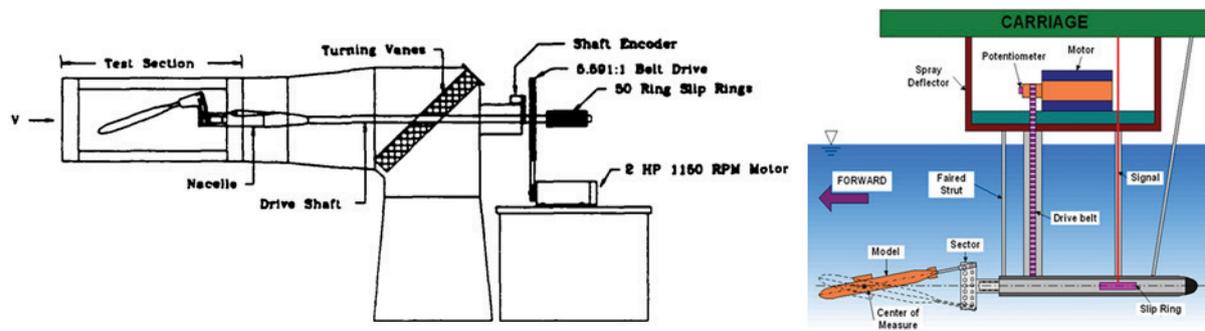
havacılık alanında uzun bir süredir kullanılmakta olan konik hareket mekanizmasını su altı araçlarının manevra karakteristiklerinin belirlenmesi için literatürde ilk defa kullanmıştır. Konik hareket Şekil 20’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 20. Konik Hareket (Johnson, 1989).

Su altı aracına manevrası sırasında etkiyen hidrodinamik kuvvetlerin katsayı tabanlı yöntemde analizi; manevra modelleri bölümünde anlatıldığı gibi bu kuvvetlerin aracın durum değişkenlerinin bir fonksiyonu olduğu varsayımına dayanmakta ve hareket denklemlerinin aracın bir denge durumu (sabit süratte ilerleme) etrafında Taylor serisine açılması işlemine dayanmaktadır. Bu seriye açma işlemi yalpa hareketine bağlı birçok hidrodinamik katsayı üretir. Düzlemsel harekete dayalı deneysel yöntemler ile tespiti olanak dışı olan bu katsayılar geçmişte genellikle ihmal edilmişlerdir.

Bu mekanizma kullanılarak su altı aracı modellerinin yalın yalpa ve eş zamanlı olarak yalpa-savrulma veya yalpa-yunuslama hareketlerini yapması sağlanarak manevra denklemlerinde yer alan yukarıdaki serbestlik derecesi çiftleri arasındaki etkileşime dayanan -ve daha önce ihmal edilen- terimlerin belirlenebilmesi için gerekli olan düzlemsel olmayan çapraz akış koşullarının yaratılması hedeflenmektedir. Bahse konu çapraz etkileşimli terimlerin varlığı ise altı serbestlik derecesine sahip genel hareketi tanımlamak için bir ön şarttır. Mekanizmanın kavitasyon tüneli ve çekme tankında kullanılan versiyonları Şekil 21’de gösterilmiştir.



Şekil 21. Konik hareket mekanizmasının çeşitli versiyonları (Johnson, 1989; Park et al., 2015).

Özellikle yelken gibi yatay düzlemde simetriyi bozan takıntıların varlığı nedeniyle yalpa hareketinin genliğinin bazı manevralar için çok yüksek mertebelere ulaşması ve su altı araçlarının düşük BG mesafesi nedeniyle küçük doğrultma momentlerine sahip olmaları (Park et al., 2015) bu manevralar

için yalpa serbestlik derecesinin de yan öteleme ve savrulma hareketleri ile birlikte analiz edilmesini zorunlu kılar. (Rhee et al., 2000) yelken yüksekliği için bir kriter belirlemeyi hedeflediği çalışmada bu yüksekliğin su altı aracının yatay düzlem asimetrisine kumanda etmesi sebebiyle aracın manevra karakteristikleri de dikkate alınarak belirlenmesi gerektiğini savunmuş ve bu işlemin ön şartı olan yalpa hareketinin deneysel analizini konik hareket mekanizması kullanarak yapmıştır.

5.2. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri

Manevra problemine matematiksel yaklaşım kapsamında kullanılan yöntemlerden bir diğeri de analizler için hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemlerini kullanmaktır. Hidrodinamik katsayıların HAD yöntemleri kullanılarak belirlenmesi işlemi temelde hareketi kısıtlanmış model deney mekanizmalarının su altı aracı modeline yaptırdıkları hareketin bilgisayar ortamında simüle edilmesi işleminden ibarettir. Bu işlemin herhangi bir ölçeklendirmeye ihtiyaç duymaksızın su altı aracının gerçek boyutta analiz edilmesine imkân tanınması ve deney mekanizmalarının girişim etkisi (destek çubuklarının etkisi vb.) gibi sınırlandırmaları ortadan kaldırması sebebi ile HAD yöntemleri giderek artan oranda model deneyleri yerine kullanılmaktadır. Ayrıca hesaplamalı analizlerde kullanılan türbülans modeli ve algoritmaların gelişimi ile hesaplama kapasitesindeki artışların son yıllarda bu analizlerin hata seviyelerini deneysel yöntemlerin belirsizlik seviyeleri mertebesine indirmesi de hesaplamalı analizlerin giderek artan oranda kullanılmasının bir diğer nedenidir.

Şekil 22’de dairesel dönüş manevrası için bir örneği gösterilen yöntemin esasını her ne kadar deneysel analizlerin taklit edilmesi oluştursa da hesaplamalı analizler kullanılan hesaplama algoritmaları, türbülans modelleri, sınır koşulları, ağ örgüsünün yapısı gibi birçok detay ve dolayısı ile farklı inceleme konuları içerirler. HAD yöntemlerinin su altı araçlarının manevra probleminde kullanılmaya başlandığı tarihten itibaren bu alanda oluşan geniş çaplı literatür bu çalışmanın genel akışını bozmamak ve hacmini makul bir seviyede tutmak açısından çalışmanın devamı niteliğinde olan ayrı bir bölüm kapsamında incelenecektir.

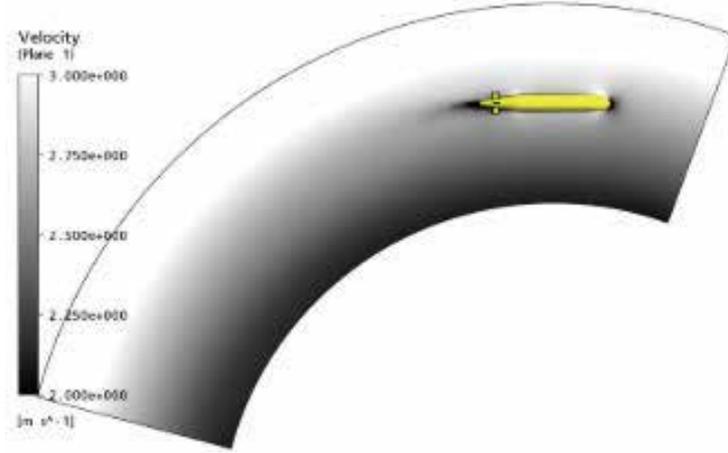
5.3. Ampirik yöntemler

Su altı araçlarının hidrodinamik katsayılarını belirlemek için kullanılan yöntemlerden biri de analitik-yarı ampirik (AYA) yöntemlerdir. Bu yöntemler tahmin tabanlı yöntemler olup; tasarımın erken aşamalarında aracın hidrodinamik özelliklerini tespit edebilmek (Jiang et al., 2013), kontrol yüzeylerinin geometrik özelliklerini ve konumlarını belirleyebilmek, kontrol stratejileri hakkında tasarımcıya fikir verebilmek (de Barros et al., 2008) ve bu tasarım aşamalarında sıklıkla yapılan hidrodinamik form değişikliklerinin etkilerini hızlı ve düşük maliyetle analiz edebilmek için kullanılmaları gereklidir.

Özellikle orta ve büyük ölçekli su altı araçları için bu yöntemlerin kullanımı genel kabul görmüş bir tasarım pratiğidir. AUV’ler gibi daha küçük ölçekli su altı araçlarının manevra analizleri daha çok prototipler ile yapılan deniz tecrübelerine dayansa da (Cardenas & de Barros, 2020) AYA yöntemlerinin bu araçların prototip geliştirme aşamalarında kullanımı gerek icra edecekleri farklı görevlere göre konfigürasyonları değiştirilebilen modern AUV’lerin her bir konfigürasyonu için deniz tecrübesi maliyetlerinin önüne geçmek, gerekse de öngörülemeyen etkenler nedeniyle prototipin deniz tecrübeleri esnasında kaybedilmesini engellemek için gereklidir (Nahon, 1996). Ayrıca bu yöntemlerin küçük su altı araçları gibi genellikle hidrodinamik açıdan formu optimize edilmiş geometriler için yüksek doğruluk derecesine sahip sonuçlar verdiği literatürde iyi bilinen bir konudur (Nahon, 1993, 1996).

Su altı araçlarının manevra analizlerinde yaygın olarak kullanılan AYA yöntemlerinin birçoğu havacılık disiplininden adapte edilmişlerdir (Jones et al., 2002). Başlangıçta hava gemileri ve uçak gövdeleri için

geliştirilen bu yöntemler daha sonra su altı araçlarına uygulanmışlardır. Hava ve su altı araçlarının içinde manevra yaptıkları akışkanın özellikleri ve bu araçların karakteristik hızlarındaki farklılıklar (yoğunluk, kinematik viskozite) her iki grup aracın Reynolds sayısının aynı mertebede olması sonucunu doğurmaktadır. Bu durum araç gruplarından birisi için geliştirilen yöntemlerin diğer gruptaki araçların manevra analizleri için kullanımına imkan sağlar (Nahon, 1993).



Şekil 22. Dairesel dönüş manevrasının HAD yöntemi ile sayısal benzetiminin yapılması (Phillips et al., 2016).

Ancak her iki grup araç arasındaki geometrik farklılıklar yöntemlerin su altı araçlarına uygulanmasını rutin ve basit bir işlem olmaktan çıkarmaktadır. (De Barros et al., 2006, 2008) AYA yöntemlerinin farklı geometrilere uygulanması için bir mühendislik öngörüsünün şart olduğunu savunmuşlardır.

Hava araçlarının su altı araçlarından farklı olarak silindirik formda bir gövdeye sahip olması ve su altı araçlarının küçük kontrol yüzeylerinin aksine bu silindirik gövde ile aynı mertebede boyutları olan kanat/kontrol yüzeylerine sahip olmaları kaldırma kuvvetinin asıl kaynağı olan geometri bileşeninin hava araçlarında kanatlar/kontrol yüzeyleri, su altı araçlarında ise araç gövdesi olması sonucunu doğurmaktadır. Ayrıca su altı araçlarında kontrol yüzeylerinin hava araçlarının aksine aracın boy doğrultusunda yayılmış olması da AYA yöntemlerinin uyarlanması konusunda problemlere neden olabilmektedir (Jones et al., 2002).

Su altı araçlarının karmaşık geometrisi ve her bir hidrodinamik katsayı grubunun (ek su kütlesi, statik vb. katsayılar) belirlenmesinde akışın farklı dinamiklerinin söz sahibi olması; literatürde bu problemlere yaklaşım yönteminin her bir geometri bileşeninin incelenen katsayı grubuna etkisinin o katsayı grubu için belirlenen yöntem ile hesaplanması ve sonuçların süperpozisyonuna dayanması sonucunu doğurmuştur. Bu yöntem literatürde bileşen inşa yöntemi (component build-up) olarak adlandırılmakta olup, bu alanın öncüsü Lamb'dır (Severholt, 2017). Lamb'ın elipsoitler için geliştirdiği ek su kütlesi hesaplama yöntemi geometriyi oluşturan bileşenlerin eşdeğer elipsoitlerinin hesaplanması yolu ile karmaşık geometrilere sahip su altı araçları için de kullanılabilir.

Bu yöntemin avantajı her bir geometri bileşeninin kendi iç simetrisinden faydalanarak hesaplama kaynaklarından tasarruf edilmesini sağlamak ve hesaplamaların yalnızca cismin referans durumu ve bu durumdan küçük sapmalar için geçerli olması problemini ortadan kaldırmasıdır (Severholt, 2017).

Su altı araçlarının kaldırma kuvveti yaratan yüzeylerinin gövdelerine göre oldukça küçük olması kaldırma yüzeyi ile gövde arasındaki etkileşimin baskın hale gelmesine yol açmaktadır (Nahon, 1993). Ayrıca büyük boyutlu takıntıların (yelken vb.) sebep olduğu viskoz etkileşimler su altı araçlarının

manevraları esnasında düzlem dışı kuvvetlere maruz kalmasına neden olmaktadır. Getirdiği hesaplama kolaylığının yanında bileşen inşa yöntemi, söz konusu etkileşimleri de analizlere yansıtacak ve ilave hesaplama yükü getirecek hesaplama rutinlerine ve/veya düzeltmelere sahip olmak zorundadır.

Ek su kütlesi terimlerini hesaplama konusunda yukarıda bahsedilen bileşen inşasına alternatif bir yöntem ise narin cisim sınıfına giren su altı araçları için dilim (strip) teorisini kullanmaktır. Bu yöntemde incelenen geometrinin birim uzunluğu başına düşen ek su kütlesi iki boyutlu geometriler için kullanılan yöntemlerle belirlenmekte ve daha sonra bu lokal büyüklükler cisim boyunca integre edilerek toplam ek su kütlesi hesaplanmaktadır. Her ne kadar görünüşte bu yöntemi kullanarak geometrik asimetrileri hesaplamalara dahil etmek mümkünmüş gibi gözükse de hesaplama sonuçlarının güvenilirliği narin cisim varsayımının geçerliliği ile sınırlı kalmaktadır.

(Watt, 1988) çalışmasında yukarıda açıklanan iki yaklaşımı kombine ederek ve geliştirdiği takıntı-gövde etkileşim modelini kullanarak ideal akış alanı içerisindeki bir su altı aracına ait ek su kütlesi terimlerini hesaplamıştır.

(Nahon, 1993) asıl olarak uçakların stabilite türevlerini elde etmek için (Finck & Hoak, 1978) tarafından geliştirilen USAF DATCOM yöntemini sıkıştırılamaz akışın özelliklerine göre basitleştirerek bir su altı aracının (ARCS AUV) stabilite türevlerini elde etmek için kullanmıştır. DATCOM yöntemi doğruluk analizleri rüzgâr tüneli test sonuçları ile karşılaştırmalı olarak yapılmış analitik ve ampirik yöntemlerin toplamı niteliğindedir. Bu yöntem yoğunluk, viskozite ve sıkıştırılabilirlik etkileri arasında bir ayrıma dayanmakta olup, bu etkilerin yöntem içerisinde ayrı ayrı değerlendirilmesi yöntemin gerek hava gerekse de su altı araçları için kullanılabilmesine imkân tanımaktadır.

Su altı araçlarının manevra karakteristiklerinin belirlenebilmesi için havacılık disiplininin devşirilen bir diğer yöntem ise "Roskam" yöntemidir. Bu yöntem uçaklar için stabilite türevlerini detaylı bir şekilde hesaplayabilmesi ile bilinmektedir. (Brayshaw, 1999) bu yöntemin detaylı bir analizini ve örneklerini göstermiştir (Jones et al., 2002).

Bileşen inşasına dayalı bir diğer yöntem olan UCL yöntemi ise diğer yöntemlerden farklı olarak doğrudan su altı araçları (tek pervaneli) için geliştirilmiştir. Her ne kadar bu yöntemin verdiği sonuçların güvenilirliği sorgulanabilir olsa da hidrodinamik form değişikliklerinin karşılaştırmalı analizi için kullanışlı bir yöntem olduğu kabul edilmektedir (Jones et al., 2002).

Ana akım yöntemler arasında sayılabilecek en son yöntem ise DSSP yöntemidir. Bu yöntem (Mackay, 2003) tarafından geliştirilmiş olup temelleri Allen ve Perkins ve Hooft'un çalışmalarına dayanmaktadır. Bu yöntemin 20°-30°'ye kadar hücum açılarında tatmin edici sonuçlar verdiği yazar tarafından raporlanmıştır. Ancak bu yöntemin de kendinden önce sayılanlarla birlikte en büyük eksikliği hidrodinamik katsayılardaki fiziksel kısıtları dikkate almamasıdır. Örneğin takıntılar için hücum açısının kritik değerinden sonra kaldırma kuvvetinin kaybı (stall) modelde dikkate alınmamıştır (Severholt, 2017).

Literatürde genel kabul görmüş yukarıdaki yöntemlerin haricinde torpidolara ait deney verilerine eğri uyurma yöntemi ile geliştirilmiş birçok AYA yöntemi mevcuttur. Yukarıda sayılan ana akım yöntemlerle birlikte tüm bu yöntemlerin ortak özelliği yalnızca belirli türde ve genelde konvansiyonel geometrilerde doğru sonuç vermeleridir. Oysaki bu yöntemlerden beklenen hesaplama prosedürlerinin rastgele geometrilerde uygulanabilir olmasıdır (Severholt, 2017).

Modern su altı araçlarının manevra özelliklerinin tespitinde güncel literatür yukarıda sayılan yöntemlerin ve yaklaşımların kombine edilerek kullanılması yöntemini benimsemektedir. (De Barros et al. 2006, 2008) MAYA AUV geometrisini analiz ettiği çalışmalarında eş değer elipsoit (ek su kütlesi katsayıları için) ve DATCOM (statik stabilite ve hıza bağlı katsayılar için) yaklaşımını birlikte kullanmıştır.

Analizler sonucunda hesaplanan dönüş dairesi çapı deniz tecrübeleri ve HAD sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Hesaplama maliyetleri ve doğruluk sevipleri arasındaki denge AYA yöntemlerinin kullanımını erken tasarım aşamaları için verimli kılsa da bu yöntemlerin neredeyse tamamı erken tasarım aşamalarında var olmayan su altı aracının geometrik detaylarını girdi olarak kullanmaktadır. Bu durum başlangıç geometrisinin seçilmesinde mühendislik öngörüsüne olan ihtiyacı artırmaktadır. (Brinati et al., 2013) geliştirdiği yöntemde model parametreleri; ve tekne ve takıntıların ana boyutlarının, form katsayılarının (narinlik oranı, prizmatik katsayı, LCB vb.) bir fonksiyonu olarak ifade edilmişler ve böylece üç boyutlu bir geometri olmaksızın modelin tasarımın ilk aşamalarından itibaren kullanımına imkan sağlamışlardır. Benzer bir yaklaşım (Severholt, 2017) tarafından geliştirilmekte olan bir AUV geometrisinin ek su kütlesi terimlerini hesaplamak için geliştirilmiştir.

Hesaplama prosedürleri temel olarak ideal akış varsayımına dayanan AYA yöntemleri manevra esnasında oluşan ve ideal akış kabulü ile irdelenemeyecek olan etkileri (genelde viskozitesin sebep olduğu) bir seri düzeltme prosedürü (deneye dayalı) ile hesaplamalarına yansıtırlar. Bu düzeltmelerin sayısındaki artış her ne kadar modelin yetkinliği ve doğruluğunu artırsa da hesaplama prosedürünü karmaşılaştırması ve geliştirme aşamasında deneysel veriye gereksinim duyması literatürde çoğu zaman ihmal edilmeleri sonucunu doğurmuştur. Örneğin DSSP yönteminin; hesaplamaların karmaşıklaşması pahasına, dönüş manevrası esnasında yelkenin yarattığı sirkülasyonun rüzgaraltı tarafta çapraz akış ile etkileşime girmesi (Magnus etkisi) nedeniyle su altı aracının maruz kaldığı düzlem dışı kuvvet ve momentleri bünyesinde bulunan sirkülasyon modeli ile etkin bir şekilde tahmin edebildiği (Mackay, 2004) tarafından gösterilmiştir.

AYA yöntemleri kullanarak su altı araçlarının hidrodinamik katsayılarının tahmine örnek olarak (Renilson, 2018)'un çalışması verilebilir. Bu çalışmada bileşen inşa yöntemi ve DARPA Suboff jenerik denizaltı geometrisinin değişik konfigürasyonları için hidrodinamik katsayılar Tablo 6'da gösterildiği gibi tahmin edilmiştir.

Tablo 6. DARPA Suboff jenerik denizaltısına ait hidrodinamik katsayılar.

Katsayılar [x 10 ⁻³]	Eksenel Simetrik Tekne	Takıntılar	Tekne		Tekne + Yelken		Tekne + Kontrol Y.	
			Tahmin	Deney	Tahmin	Deney	Tahmin	Deney
Y'_v	Z'_w	$S_a(C_{L\alpha} + C_D)/L^2$	-6.71	-5.95	-22.11	-23.01	-9.82	-10.49
N'_v	$-M'_w$	$l_{app}Y'_{v_{app}}/L$	-11.42	-12.8	-17.79	-15.53	-10.3	-11.25
Y'_r	0	$l_{app}Y'_{v_{app}}/L$	0	1.81	-6.37	-0.02	1.39	6.32
N'_r	0	$l_{app}^2Y'_{v_{app}}/L^2$	0	-1.60	-1.53	-2.38	-0.62	-3.06
$Y'_\dot{v}$	$-k_y m'$	$-m_{22}/0.5\rho L^3$	-17.20	-13.3	-17.54	-15.04	-17.32	-14.71
$N'_\dot{v}$	0	$l_{app}Y'_{\dot{v}}/L$	0	0.20	-0.08	0.01	0.05	0.42
Y'_r	0	$l_{app}Y'_{\dot{v}}/L$	0	0.06	-0.08	-0.20	0.05	0.47
N'_r	$-k_z I'_{zz}$	$l_{app}^2Y'_{\dot{v}}/L^2$	-3.49	-0.68	-3.51	-0.71	-3.51	-0.74
Z'_w	$[0.5(L/D) - 11] \times 10^{-3}$	$S_a(C_{L\alpha} + C_D)/L^2$	-6.71	-5.95	---	---	-9.82	-10.49
M'_w	$[-(L/D) + 20] \times 10^{-3}$	$-l_{app}Z'_{w_{app}}/L$	11.42	12.8	---	---	10.3	11.25
Z'_q	0	$l_{app}^2Z'_{w_{app}}/L^2$	0	1.81	---	---	1.39	6.32
M'_q	0	$l_{app}Z'_{w_{app}}/L$	0	-1.60	---	---	-0.62	-3.06
$Z'_\dot{w}$	$-k_z m'$	$-m_{33}/0.5\rho L^3$	-17.20	-13.3	---	---	-17.32	-14.71
$M'_\dot{w}$	0	$l_{app}Z'_{\dot{w}}/L$	0	-0.20	---	---	-0.05	0.42
Z'_q	0	$l_{app}Z'_{\dot{w}}/L$	0	0.06	---	---	0.05	0.47
M'_q	$-k_y I'_{yy}$	$l_{app}^2Z'_{\dot{w}}/L^2$	-3.49	-0.68	---	---	-3.51	-0.74

Eksenel simetrik tekne formu için k_x , k_y ve k_z sırasıyla x, y ve z eksenini yönündeki ek su kütlesi katsayıları olup tekne formunun eş değer elipsoidinin bulunması yöntemi hesaplanmıştır. I'_{yy} ve I'_{zz} ise y ve z eksenini yönündeki boyutsuz kütle atalet momenti katsayılarıdır ve yine eş değer elipsoide ait değerler hesaplamalarda kullanılmıştır. Eksenel simetri nedeniyle tekne için $k_y = k_z$ ve $I'_{yy} = I'_{zz}$ dir.

Tekne için Z'_w ve M'_w katsayılarını veren ifadeler (Praveen and Krishnankutty, 2013) ait deneysel veriye eğri uydurma yöntemi ile (Renilson, 2018) tarafından belirlenmiştir.

Takıntılar için ise $C_{L\alpha}$ ve C_D sırasıyla boyutsuz kaldırma kuvveti ve direnç katsayılarını, S_a takıntının kaldırma kuvveti oluşturduğu düzlemdeki kesit alanı, l_{app} ise takıntı ek su kütlesi merkezinin yatay konumunu ve L ise karakteristik boyu ifade etmektedir. Tablo 6'da takıntıların hidrodinamik katsayı ifadelerinde geçen ek su kütlesi terimleri (Dong, 1978) tarafından önerilen yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Hesaplamalarda ayrıca tekne-takını etkileşimleri de yine yarı-ampirik formüller kullanılarak dikkate alınmıştır.

5.4. Sistem/parametre tanımlama yöntemleri

Karmaşık dinamik sistemlerin dışarıdan gelen etkilere karşı sergileyecekleri davranışı belirlemede etkin olarak kullanılmaları, son yıllarda sistem/parametre tanımlama tekniklerinin su altı araçlarının manevra probleminin analiz edilmesinde diğer yöntemlere alternatif bir araç haline gelmelerini sağlamıştır. Sistem parametre tanımlama teknikleri başlığı altında toplanan bu çok çeşitli yöntemlerin ortak noktası; bilinen girdilere mevcut sistemin verdiği tepkilerin ölçülmesi ve bu bilginin ikisi arasındaki matematiksel ilişkinin tanımlanması için kullanılmasıdır (Tinker, 1982).

Bu tekniklerin en temel varsayımı yukarıda bahsedildiği gibi girdi ile dinamik sistemin tepkisi arasında belirli yapıya sahip bir matematiksel ilişkinin (modelin) varlığıdır (Ibrahim, 2000). Sistem dinamiklerini doğru ve tam olarak tanımlayan bir model biliniyorsa bu modelin bilinmeyen katsayıları sistemin bilinen girdilerle uyarılması ve oluşan tepkinin ölçülmesi yöntemi ile bulunabilir (Coxon, 1989).

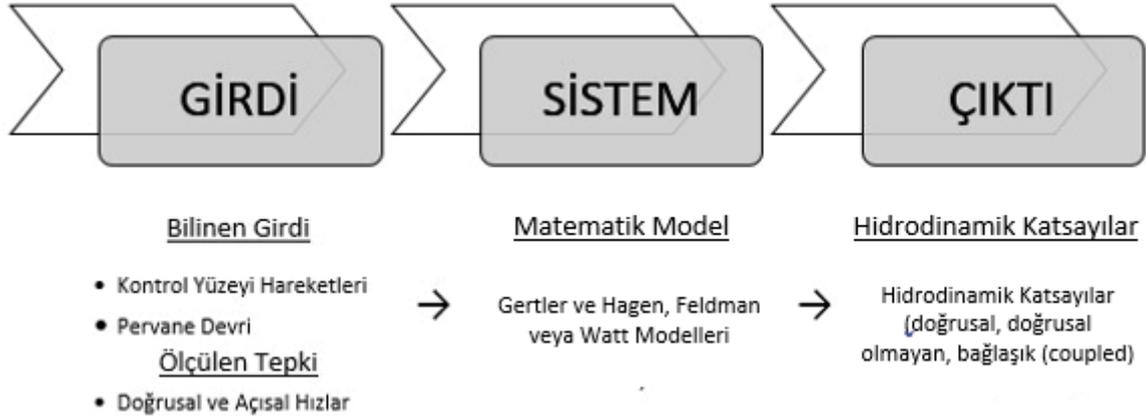
Su altı araçları özelinde bu girdiler kontrol yüzeyi hareketleri ve pervane devriyken; ölçülmesi gereken sistem tepkileri ise doğrusal ve açısız hızlardır (Tinker, 1982). Bu büyüklükler arasındaki ilişki ise matematiksel olarak (Gertler & Hagen, 1967), (Feldman, 1979) ve (Watt, 2007) tarafından geliştirilmiş olan manevra modelleridir.

Dinamik bir sistemde matematiksel araçlar ve fizik yasaları genelde bir matematik modelin bilinmeyen katsayılarını belirlemek için yeterli olsalar da su altı araçlarının manevrasını kontrol eden ve yukarıda örnekleri verilen karmaşık matematik modeller için birçok parametrenin/katsayının hidrodinamik teori ile hesaplanması mümkün değildir. Bu durum parametre tahmin yöntemlerini ile kullanılmak üzere deneysel çalışmaların yapılmasını (serbest hareketli model deneyleri) bir zorunluluk haline getirir. Sistem tanımlama tekniklerinin su altı araçları özelinde işleyişi Şekil 23'te gösterilmiştir.

Sistem tanımlama (ST) teknikleri çevrimiçi ve çevrimdışı yöntemler olarak iki ana kategoriye ayrılırlar. Çevrimdışı yöntemler tekrarlı yöntemler olup veri toplama ve değerlendirme fazı birbirinden bağımsızdır. Performansları genelde toplanan verinin çeşitlilik ve miktarına bağlıdır. Çevrimiçi yöntemlerde ise veri erişilebilir olduğu anda analiz edilir (Sabet et al., 2014). Literatürde su altı araçlarının manevra probleminin çözümünde kullanılan yöntemler genellikle birinci gruba ait yöntemlerdir (Sandman & Kelly, 1974).

Hem model hem de gemi ölçeğinde kullanılabilmelerinin yanında bu yöntemin başlıca avantajı birçok parametrenin aynı anda birkaç serbest hareketli model deney verisinin ve/veya deniz tecrübesi sonuçlarının analiz edilmesi ile elde edilebilmesi ve böylece diğer yöntemlere nazaran deneyler için

ayrılması gereken kaynakların önemli ölçüde azaltılabilmesidir (Tiano et al., 2007). ST tekniklerinin avantajları arasında sayılabilecek diğer hususlar şu şekildedir (Tinker, 1982);



Şekil 23. Sistem tanımlama tekniklerinin işleyişi.

- Model destek mekanizmasının girişim etkisinin ortadan kaldırılması (deneyler serbest hareketli model kullanılarak yapıldığından),
- PMM vb. periyodik hareket yapan deney düzeneklerinin izin verdiği daha yüksek frekanslardaki hareketin analizine imkân sağlaması (yüksek frekansta PMM sonuçlarının frekansa daha bağlı hale geldiği bilinmektedir.),
- ST tekniklerinin serbest hareketli model deneylerine dayanması, katsayıların gruplar halinde ölçümünü gerektiren ve dolayısı ile hata birikmesine açık kısıtlanmış model deneylerinin aksine icra edilen manevraların ve elde edilen sonuçların daha gerçekçi olması,
- Geometri değişikliği nedeniyle oluşan matematiksel model değişikliği ihtiyaçlarına HAD ve kısıtlanmış model deneylerinin aksine kolayca uyum sağlaması,
- Analitik yöntemler ile oldukça zor olan ve HAD analizleri ile yapılması durumunda hesaplama kaynaklarının aşırı kullanımını gerektirecek olan geometrik kusurlarda dahil olmak üzere çok farklı takıntı geometrilerinin ve bu geometrilerdeki değişikliklerin analizlerde dikkate alınabilmesi (Cardenas & de Barros, 2020),

Tekniğin dezavantajları ise şu şekilde sıralanabilir;

- Hesaplanan katsayıların fiziksel olarak doğruluğunun garanti edilememesi,
- Analiz edilen deney verisi aralığının dışında sonuç vermemesi,
- Sistemin/Hareketli Modelin/Prototipin inşa edilmiş olması zorunluluğu,
- Kullanılan deneysel verinin yeterince zengin ve temiz (GPS atlamaları vb. olmaması) olması zorunluluğu (Kim et al., 2008),
- Matematiksel model denklemlerindeki bilinmeyen sayısının ölçülebilen sistem tepkilerinin sayısından çok fazla (overparameterisation) olması neticesinde sonucun tekilliğinin sorgulanabilir duruma gelmesi (Coxon, 1989). (Matematik modele ait katsayıların üç ayrı durumu için (tamamen bilinmediği, kısmen bilindiği ve belirli bir hata miktarı ile tamamen bilindiği) yaptığı analizler sonucunda (Furlong et al., 2003) aynı yörüngeyi tahmin edebilen değişik katsayı setlerinin varlığını göstererek bu problemin varlığını ortaya koymuştur.)
- Sonucun tekilliği probleminin paralelinde iki katsayının ıraksaması durumunda bile bileşik etkilerin birbirini sönmemesi gibi problemlerin hatalara neden olması,

- Su altı aracının manevrası esnasında maruz kaldığı hidrodinamik kuvvet ve momentler büyük oranda aracın hızına bağlı olduklarından ST tekniklerinin matematik modelin katsayılarını ve dolayısı ile aracın yörüngesini doğru tahmin edebilmesi serbest hareketli model üzerinden yapılan hız ölçümlerinin hassasiyetine bağlı olması, başka bir deyişle güvenilir hız ölçümlerine model tanımlama aşamasından önce sahip olunması zorunluluğu (Hegrenæs et al., 2007), (Bu durumu destekleyen sonuçlara (Coxon, 1989) tarafından da ulaşılmıştır. Yazar ESSO OSAKA ve EXXON gemilerine ait gemi ölçeğindeki hız datasının, doğruluğu diğer yöntemlere göre nispeten yüksek olan doppler velocity log ile ölçülmesinin önem arz ettiğini savunmuştur.)

Tekniğin yukarıda sıralanan zayıf noktaları dikkate alındığında sonuçların validasyonu için ST teknikleri kullanılarak belirlenen katsayı setinin literatürde genel kabul gören aşağıdaki kriterleri sağlanması gereklidir.

- Katsayıların tamamının yaklaşık aynı zaman aralığında sabit bir değere yakınsaması,
- Belirgin katsayıların hidrodinamik açıdan tutarlı olması
- Bu katsayılar kullanılarak yapılan simülasyon sonuçlarının (yörünge) deniz tecrübelerinden elde edilen veri ile uyumluluğu,

Sistem tanımlama teknikleri ile bir su altı aracının manevra karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik literatürde bilinen ilk çalışma (Tinker et al., 1979) tarafından yapılmıştır. Daha sonraki bir çalışmada (Tinker, 1982) ise yazar keskin manevraların bu teknikler kullanılarak analiz edilmesi için daha fazla sayıda ve çeşitte serbest hareketli model deney senaryosu ve deney verisine ihtiyaç duyulacağı sonucuna varmıştır. Bu sonuçlara paralel olarak (Coxon, 1989) ST teknikleri ile elde edilen katsayı setinin doğruluğunun bu katsayı setinin belirlenmesinde kullanılan deneysel verinin türüne bağlı olduğunu, bu verinin toplanması için icra edilen manevranın cinsinin sonuçların kalitesini doğrudan etkilediğini iddia etmiştir. Buna göre yazar zig-zag manevralarının doğası gereği sabit olmayan durum değişkenleri ve sıfırdan farklı durum ivmelerini sağlaması ST teknikleri açısından bu manevra icra edilirken toplanan verinin diğer manevralara kıyasla daha üstün olması sonucunu doğurduğunu savunmuştur. Bu çalışmanın literatür açısından bir diğer önemi daha ise daha sonraki çalışmalarda (Seong et al., 2002; Hegrenæs et al., 2007; Luque et al., 2009 ve Belanger, 2019) ağırlıklı olarak kullanılacak olan EKF'nin gemi ölçeğinde kullanıldığı ilk çalışma olmasıdır.

STT analizlerinin doğruluk derecesine artırılması için bir başka gayret de (Dantas et al., 2013) tarafından gösterilmiştir. Bir AUV'nin devamlı dönüş ve zig-zag manevralarına ait deney verisini kullandığı çalışmada araştırmacılar doğrusal olmayan etkileri de analiz edebilmek üzere, tüm manevralar için dümen açısı aralığını dümenin kaldırma kuvvetinin kaybedildiği kritik açığı (stall açısı) da kapsayacak şekilde seçmişlerdir. (Sabet et al., 2014) ise benzer bir amaca dayandırdığı çalışmada EKF gibi lineer filtrelerin hareket denklemleri yüksek oranda doğrusal olmayan etkiler içeren su altı aracının manevra problemini çözmekte yetersiz kalacağını iddia etmiş EKF ve UKF'nin performans karşılaştırmasını yaparak doğrusal olmayan tekniklerin daha başarılı olduğu sonucuna varmıştır. Daha sonraki bir çalışmada (Sabet et al., 2018) yazarlar özellikle modelleme hatalarının kaynağı olarak gördükleri viskoz sönümlenme, kaldırma kuvveti gibi katsayıları da içerecek şekilde bir AUV için altı serbestlik dereceli bir dinamik model oluşturmuşlardır. Araştırmacılar bu modele ait katsayıları belirlemek için çeşitli filtreler (EKF, CKF ve TUKF) kullanarak daha önce doğrusal olmayan filtrelere ilişkin elde ettikleri sonuçları doğrulamışlardır.

Sistem parametrelerini daha yüksek doğrulukla tanımlamak için yapay sinir ağları (ANN)'nden faydalandığı çalışmada (İbrahim, 2000) sinir ağlarını eğitmek için MDTF'de icra edilen model deney

sonuçlarını kullanmıştır. Yazar çalışmasında modelin ivmelenme senaryolarını da içeren konvansiyonel olmayan manevraları da analiz etmiştir.

(Cardenas & de Barros, 2020) ise çalışmalarında STT ile elde edilen sonuçların başlangıç koşuluna bağlılığını analiz etmeyi amaçlamışlardır. Yazarlar başlangıç koşulu olarak Pirajuba AUV geometrisinin AYA yöntemlerle elde edilen katsayılarını kullandıkları çalışmalarında -literatürde daha önce elde edilen sonuçların aksine- EKF'nin yakınsama hızının başlangıç koşullarının bir fonksiyonu olduğu sonucuna varmışlardır.

ST teknikleri aynı zamanda kontrol ve kumanda sistemlerinin tasarımında temel rol oynamaktadır (Tiano et al., 2007). Bu tekniklerle tahmin edilen katsayılar yalnızca matematik modele girdi olarak değil ayrıca su altı aracının otomatik pilotuna kontrolör olarak da kullanılırlar (Seong et al., 2002). Kontrol sisteminin başarısı sistemi tanımlayan matematik modelin katsayılarının doğruluk seviyesi ile yakından ilintili olup (Luque et al., 2009) ST teknikleri ile kontrol problemi arasındaki ilişkinin detayı başka bir çalışmanın konusudur.

6. Manevra Problemine Fiziksel (Doğrudan) Yaklaşımlar

Su altı araçlarının manevra probleminin analizi için geliştirilen yaklaşımlardan ikincisi fiziksel yaklaşımlardır. Fiziksel yaklaşım başlığı altında toplanan;

- Doğrudan simülasyon yöntemleri
- Serbest hareketli model deneyleri

Yöntemlerinin ortak amacı aracın belirli kontrol ve sevk sistemi (dümen/kontrol yüzeyi hareketleri, pervane devrindeki değişiklikler) ve çevresel (akıntı vb.) girdilere verdiği tepkiyi (yörünge) herhangi bir matematiksel ara işlem basamağı kullanmadan doğrudan analiz etmektir. Su altı araçlarının manevra problemine fiziksel yaklaşımı benimseyen çalışmaların sayısı gerek hesaplama altyapısı gerekse de otonom kontrol/kumanda sistemlerindeki gelişmeler nedeniyle son yıllarda artış göstermektedir. Fiziksel yaklaşıma dahil olan her bir yönteme ilişkin detaylı açıklama alt başlıklarda verilmiştir.

6.1. Doğrudan simülasyon yöntemleri

Manevra yapan aracın yörüngesinin hesaplanabilmesi için aracın (rijit cisim) ve akışkanın hareket denklemlerinin (N-S) eş zamanlı olarak çözülmesini gerektiren bu yaklaşım özetle; her bir zaman adımı için akışkanın hareket denklemlerinin çözülmesi ile elde edilen aracın yüzeyindeki viskoz ve basınç gerilmelerinin yüzey boyunca integrasyonu, integrasyon sonucunda elde edilen hidrodinamik kuvvetlerle aracın hareket denklemlerinin çözümü, bu çözümden gelen yer değiştirme bilgisi ile aracın uzaydaki yerinin güncellenmesi ve akışkanın hareket denklemlerinin aracın bu yeni pozisyonunda/oryantasyonunda çözülebilmesi için kontrol hacminin yeniden ayrıklaştırılması adımlarından oluşur.

Son yıllarda otonom su altı araçlarının kullanım konseptinin birçok aracın birlikte ve etkileşimli olarak kullanımına yönelik değişmesi, küçük araçların (AUV) daha büyük su altı araçlarından (denizaltı) atılıp toplanmalarına olan ihtiyaçların ortaya çıkması paralelinde toplama mekanizmasının akış üzerindeki girişim etkilerinin analizlere dahil edilmesi (Hydroid, 2012; Yan & Wu, 2007) ve genel olarak daha keskin manevraların icra edilmesine yönelik ihtiyacın artması bu araçların otopilot algoritmalarını daha

hassas eğitmek üzere manevra analizlerinin doğruluk seviyesinin ve geçerlilik aralıklarının artırılması gerekliliğini doğurmuştur.

Manevra probleminin iki ayağını oluşturan denklem sistemlerinin zaman boyutunda akuple edilmiş olmaları, zamansal ayrıklaştırmada her bir zaman adımı için yapılan çözümün problemin fiziğine uygun ve doğru olması anlamına gelir (Bettle, 2013). Bu durum ise yukarıda ifade edildiği gibi son yıllarda su altı araçlarının kabiliyetleri arasında olması giderek artan oranda istenen zamana bağlı manevraların ve ayrıca yüksek sadakatle modellenmesine ihtiyaç duyulan diğer senaryoların doğru bir şekilde analiz edilebilmesi için gerek şarttır.

Fizik temelli yöntemlerin geliştirilmesinden önce de diğer yaklaşımlar ile analiz edilemeyen zamana bağlı etkilerin dikkate alınabilmesine yönelik gayretler bulunmaktadır. Manevra esnasında tekne ve takıntıların iz bölgesinde ve bu ikisinin birleşim noktalarında oluşan girdapların pozisyonunun ve şiddetinin su altı aracının geçmişteki hareketinin bir fonksiyonu olduğunu (hafıza etkisi) dikkate alan ve herhangi bir anda araca etkileyen kuvvet ve momentleri araç etrafındaki akışın (girdapların) yapısına göre analiz edilebilmesine imkan tanıyan bir yöntem öneren (Lloyd, 1983)'un çalışması buna örnek olarak gösterilebilir. Lloyd'un önerdiği bu yöntemde girdapların nerelerden kaynaklandığının ve bu girdapların şiddetlerinin hareketin bir fonksiyonu olarak bilinmesi gerekir. Bu işlem ise yarı-ampirik ve deneysel yöntemlere dayanmaktadır. Genellikle aksel simetrik tekne ve akışa uyumlandırılmış hatlar ve geçişleri olan takıntılara sahip su altı araçlarının sınır tabaka ayrılmasını tetikleyecek keskin hatlara sahip olmamaları, sınır tabaka ayrılması ve girdap başlangıç noktalarının bahse konu yöntemler ile tahminini (Bettle, 2013) ve dolayısı ile yöntemin kullanımını zorlaştırmaktadır.

Hesaplama altyapısının kapasitesindeki gelişmeler ile yakın zamanda mümkün hale gelen rotasyonel bir pervane ve hareketli kontrol yüzeylerine (ve kontrol yüzeyi boşluklarına) sahip bir model konfigürasyonu ile altı serbestlik dereceli analizler literatürde ilk defa (Zierke et al., 1997) tarafından yapılmış olup aracın ve akışın hareket denklemlerinin eş zamanlı olarak çözümünün "fizik temelli" yaklaşım olarak adlandırılması da bilindiği kadarıyla bu çalışmaya dayanmaktadır. Araştırmacıların bu yöntemi geliştirmelerindeki motivasyon;

- Katsayı tabanlı modellerin katsayılarının ölçümünde ve bu katsayılar arasındaki etkileşimin belirlenmesi süreçlerindeki belirsizliklerin giderilmesi,
- Katsayı tabanlı modellerin aracın zamana bağlı manevrasını yeterince iyi temsil edip edemeyeceği konusunun netleştirilmesi,
- Araç ölçeğinde analiz yapma imkânı kazanarak ölçek etkisinin getirdiği belirsizliklerin önüne geçilmesi,
- Ölçeklendirilemeyen veya ölçeklendirme yasaları henüz bilinmeyen zamana bağlı akış fenomenlerinin doğrudan su altı aracı ölçeğinde (tam ölçek) çalışabilme imkânı kazanılması,
- Deneysel analizlerin yapılabildiği rejim dışında sonuç elde edebilme imkanına sahip olunması,
- Sevk sistemini (pervane) analizlere dahil ederek araç-sevk sistemi arasındaki karşılıklı etkileşimlerin doğrudan analiz edilebilmesi,
- Deneysel analizlerde yapay olarak tetiklenen laminer-türbülans geçişinin zamana bağlı manevralar esnasında gelişecek akış olaylarının doğal seyrini değiştirmesinin önüne geçilmesidir.

Yukarıda sıralanan faktörlerden zamana bağlı manevraların yeterince iyi temsil edilip edilmediği sorunu yöntemin en temel motivasyonunu oluşturmaktadır. Özellikle viskoz etkiler nedeniyle oluşan sınır tabaka ayrılması ve buna paralel olarak girdapsı yapıların yüzeyi terk ederek takıntı/pervane vb. gibi

rüzgaraltı yapılarla girdikleri etkileşimler gibi olayların mekanizmaları arasında sıradan ve zamana bağlı manevralar arasında farklar mevcuttur. Sınır tabaka ayrılma gecikmesi, yelken etrafında oluşan at nalı girdapların rüzgaraltı tarafa doğru farklı difüzyon mekanizmalarına sahip olması gibi farklılıklar akışın hafıza etkisinden kaynaklanmaktadır (Wetzel & Simpson, 1996). Bu farklılıklar araç gövdesi ve takıntıları üzerindeki normal ve aksenal yöndeki gerilme dağılımlarında değişikliğe sebep olmaktadır. Bu değişiklik ise söz konusu büyüklüklerin yüzey boyunca integrasyonu ile elde edilen hidrodinamik kuvvet/momentlerin de değişimini beraberinde getirmekte ve manevra probleminin diğer yöntemlerin doğrudan ele alamayacağı bir şekilde değişmesine sebep olmaktadır (Zierke et al., 1997).

Ayrıca, su altı araçlarının sahip olduğu kontrol yüzeylerinin boyutunun gövdelerine kıyasla küçük olması manevra için ihtiyaç duyulan kuvvet/momentleri oluşturmak üzere kullanıldıklarında (açısal oryantasyonları değiştirildiğinde) baskın tekne-kontrol yüzeyi etkileşimleri oluşturmakta ve bu bölgedeki akışın yapısı ile kontrol yüzeyi geometrisinin (hydrofoil) direnç-kaldırma kuvveti (dolayısı ile stall) karakteristiğini güçlü bir şekilde etkilemekte ve düzlem dışı kuvvet/momentlerin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu durum ise aracın manevra özelliklerinin kararlı (steady) veya yarı kararlı (quasi-steady) yöntemlerle tahmin edilmesini yüksek/hücum sürüklenme açılı (dolayısı ile yüksek kontrol yüzeyi açılı) manevralar için oldukça zorlaştıran bir başka faktördür (Taylor et al., 1998).

Tüm bu etkilere ilave olarak fizik temelli yaklaşımın pervane geometrisinin ve rotasyonel hareketinin de doğrudan modellenmesine imkan tanınması (Kim et al., 2015) aracın takıntılar nedeniyle düzgün olmayan iz bölgesinde çalışan pervanenin itme ve tork değerlerinde değişiklikler ile bu iz bölgesinin sebep olduğu düzlem dışı kuvvetlerin (pervanenin araç üzerindeki konumu dikkate alındığında dolayısı ile çok büyük momentlerin) ve ayrıca pervane arkasındaki izin de analizlere dahil edilebilmesi anlamına gelecektir. Bu durum zamana bağlı manevralar için analizlerin doğruluk seviyesi ile manevra özelliklerinin tespitine yönelik gösterilen gayretlerin seviyesinin de artmasına sebep olacaktır.

Sonuç olarak tekne, hareketli takıntılar ve rotasyonel pervanenin sebep olduğu akış sahalarının etkileşimi çok karmaşık ve doğası gereği zamana bağlı bir akış sisteminin oluşmasına sebep olur (Taylor et al., 1998). Bu sistemin son yıllarda artan bir şekilde daha hızlı ve keskin manevralar yapması istenen su altı araçları için tatmin edici doğrulukta çözümü ise fizik temelli yaklaşımla mümkündür.

Bu yaklaşımın bir diğer avantajı ise yukarıda ifade edildiği gibi her bir zaman adımı için çözümün problemin fiziğine uygun olması nedeniyle çözüm sürecinde deneysel yöntemlerle elde edilebilecek olandan çok daha zengin bir datanın toplanabilecek olmasıdır.

Bunun yanında geometrideki küçük değişikliklerin belirli bir manevra üzerine etkisinin fizik temelli yöntemler ile analiz edilmesi katsayı temelli yöntemlere göre çok daha ekonomiktir (Pankajakshan et al., 2002). (Dubbioso et al., 2016)'nın Joubert BB2 geometrisinin "+" ve "x" dümen konfigürasyonlarına sahip versiyonlarını manevra performansları yönünden değerlendirdikleri çalışmaları buna örnek gösterilebilir. Katsayı tabanlı yöntemlerle analiz edilmeleri durumunda farklı manevra modellerinin kullanımı ile bu modellerdeki katsayıların belirlenebilmesi için bir seri analiz sonucuna ihtiyaç duyan bu karşılaştırmanın fizik temelli yöntemlerle yapılması çok daha ekonomiktir.

Fizik temelli analizler her ne kadar karmaşık manevraların yüksek doğrulukla simüle edilmesini sağlasa da manevra probleminin matematiksel kökenine ilişkin bir perspektif sunamazlar. Bu bağlamda bu türden analizlere ait veriden düzeltici yönde sonuç çıkarmak oldukça zordur (Taylor et al., 1998).

Akışkanın ve rijit cismin hareketini yöneten denklemlerin zaman boyutunda eş zamanlı çözülmesi her iki hareketin fiziğinin de analizlere yeterince yansıtılabilmesi için problemin içerdiği en küçük zaman ölçeğinin kullanımını zorunlu kılar. Rotasyonel bir pervanenin mevcut olduğu durumda bu zaman ölçeğini pervane akışı belirler. Pervanenin her bir dönüşünün yeterince yüksek çözünürlükte

ayrıklaştırılması zorunluluğu çok küçük zaman adımlarının (dt) kullanımı anlamına gelir (Venkatesan & Clark, 2007). Bu durum ise aracın (boy ölçeğinin kumanda ettiği) yörüngesinin tamamlanabilmesi için her iki denklem sistemi arasında başlangıçta anlatılan döngünün yüzlerce kez tekrarlanması anlamına gelecek ve hesaplama maliyetinin artmasına sebep olacaktır.

Bir pervane devri için gereken zamanın 36'ya bölüdüğü (Venkatesan & Clark, 2007)'in çalışmasının örnek alınması ve denizaltı pervaneleri için karakteristik rpm değerinin 150-200 devir/dakika aralığında olduğu gerçeğinden yola çıkarak fizik temelli analizler için gerekli olan azami “ dt ” değeri saniye cinsinden Denklem (22)'de gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$dt = \frac{60}{200} \cdot \frac{1}{36} = 0.00833 \text{ s.} \quad (22)$$

Fizik temelli analizlerin zaman adımına getirdiği bu kısıtlama manevra probleminin içerdiği çok geniş aralığa dağılmış (türbülanslı sınır tabaka kalınlığından su altı aracının boyuna kadar) uzunluk ölçekleri (Venkatesan & Clark, 2007) ile birlikte değerlendirildiğinde hesaplamalı analizlerinin (açık-explicit) stabilite kriterinin (CFL şartı) Denklem (23)'te gösterildiği gibi sağlanması çok küçük zaman adımlarının yanında çok yoğun ağ yapılarının da kullanılması anlamına gelir.

$$C = \alpha \cdot \frac{dt}{dx} \leq 1 \quad (23)$$

Bu durum ise çok uzun simülasyon süreleri ve dolayısı ile yüksek hesaplama maliyetleri anlamına gelir (Venkatesan & Clark, 2007). Ayrıca tam donanımlı, kendinden tahrikli ve hareket edebilen gerçekçi boşluklara sahip kontrol yüzeyleri olan su altı araçlarının geometrik karmaşıklığı (ve geometriyi oluşturan bileşenlerin birbirlerine göre rölatif hareketlerinin ağ yapısının elleçlenmesine getirdiği zorluklar) da bu maliyeti olumsuz yönde etkileyen hususlardandır.

Fizik temelli analizlerin hesaplama yükünü artıran bir diğer özelliği ise HAD algoritmalarına getirdikleri daha yüksek doğruluk seviyesi şartıdır. Buna göre zamana bağlı simülasyonlarda her bir zaman adımındaki hataların kümülatif olarak birikmesi ve sonucu zaman ilerledikçe fiziksel gerçeklikten uzaklaştırması nedeniyle algoritmaların doğruluk mertebeleri, laminer-türbülans geçişi, türbülans modeli ve ağ çözünürlüğü faktörlerine özellikle önem verilmelidir (Pankajakshan et al., 2002).

Fizik temelli yaklaşımla analiz edilebilecek en temel manevra problemi bir serbestlik derecesine sahip su altı aracının kendinden tahrikli sevk analizleridir. Bu manevra hesaplamalı analizlerde daha fazla serbestlik derecesi ile icra edilen diğer manevralar için başlangıç koşulu olarak kullanılması yönü ile ayrıca önemlidir.

Literatürde bu türden analizler hesaplama kaynakları ile ilgili kısıtlamalardan dolayı genelde pervanenin doğrudan modellenmesi yerine pervanenin yarattığı itme ve torkun radyal yönde dağılımını basitleştirilmiş pervane geometrisi (sonsuz kanatlı pervaneyi temsilen disk) üzerine dağıtılan momentum kaynakları vasıtası ile modellenmesine dayanmaktadır (Coe & Neu, 2011). Aktüatör disk modeli olarak adlandırılan bu yöntemle analizlerde daha büyük zaman adımları ve daha seyrek ağ örgüsü kullanmak mümkün olduğundan hesaplama için harcanan gayreti önemli ölçüde azaltmak mümkündür. Pervanenin doğrudan modellenmesi durumunda oluşturduğu akışın analizi için iz bölgesinin yüksek çözünürlükte ayrıklaştırılması ve bu ağın pervanenin rotasyonel hareketine göre zamana bağlı olarak deforme edilmesine olan ihtiyaç böylece ortadan kaldırılmış olur. Pervane kaynaklı etkileri basitleştirerek modellenmesini hedefleyen bu yaklaşımlar daha yüksek serbestlik dereceli

manevra analizlerinde de kullanıldığından bu çalışma kapsamında incelenmeye değer bulunmuştur. Ancak bu basitleştirmeler yapılırken göz önünde bulundurulması gereken bir diğer husus da pervanenin doğrudan modellenmesi ile elde edilen tekne-pervane etkileşimi ve iz bilgisinin kaybıdır. (Delen et al., 2017) ve (Sezen et al., 2018)'in takıntılı/takıntısız DARPA Suboff formları ile yaptıkları çalışmaları aktüatör disk modelinin su altı araçlarında kullanımının yakın zamanda literatüre girmiş örneklerindedir.

Bu probleme bir diğer yaklaşım ise pervane akışlarında etkinliği kanıtlanmış sınır eleman yöntemi (BEM)'ni esas alan pervane kodlarının HAD kodları ile akuple kullanılmasına yöneliktir. (Chase et al., 2013) çalışmalarında takıntılı ve takıntısız (bare hull) INSEAN E1619 pervanesine sahip DARPA Suboff geometrileri için farklı türbülans modellemesi teknikleri kullandığı HAD analizlerini BEM tabanlı bir pervane kodu ile pervane düzleminde hız bilgisi ile haberleşecek şekilde akuple ederek hesaplama kaynaklarının asgari seviyede kullanımını hedeflemiştir.

Nihai olarak pervane ve hareketinin doğrudan modellendiği çalışmalarda ise (Venkatesan & Clark, 2007; Sezen et al., 2018; Kim et al., 2015; Chase, 2012; Chase & Carrica, 2013) su altı aracının hareketinin “manevra” kategorisinde değerlendirilebilecek kısmı olan ivmelenme fazı analizlerin genelde sevk odaklı olması sebebiyle yapay bir şekilde (aracın ataletinin azaltılarak istenilen hızı çıkmasının çabuklaştırılması suretiyle hızlandırılmıştır. (Wu et al., 2020) ise çalışmasında aracın ivmelenme fazını da gerçekçi bir şekilde modellemiş ve bu fazın sabit hızlı fazdan yapısal olarak çok farklı olduğu sonucuna varmıştır.

Fizik temelli analizleri basitleştirmek için kullanılan bir diğer yöntem de kontrol yüzeyi hareketlerinden doğacak kuvvetlerin harici bir bünye kuvveti olarak modellenmesidir. Manevranın giriş safhasında kontrol yüzeylerinin açisal oryantasyonunda meydana gelen değişimler karşılığında ağ yapısının da deforme olması gerektireceğinden hesaplama kaynaklarının kullanımı oldukça maliyetlidir. Bu maliyetin karşılanmasının tercih edilmediği durumlarda bünye kuvvet modeli kullanılabilir ancak bu yöntemin kullanımı kontrol yüzeylerinin açisal oryantasyonundan kaynaklanan akışın zamana bağlı değişiminin etkilerinin (sınır tabaka ayrılması, ilave direnç vb.) analizlere yansıtılmaması ve akışa ait bir kısım bilginin kaybedilmesi anlamına gelir (Coe & Neu, 2011). (Venkatesan & Clark, 2007) ONR Body-1 geometrisi ile yatay düzlemde 10°/30° overshoot manevrasını çalıştıkları analizlerinde kontrol yüzeyi hareketleri olmaksızın deneysel veriler ile tutarlı sonuçlara ulaşmışlardır. Yazarlar ayrıca kış kontrol yüzeyi hareketlerini modellemenin analizlerin doğruluk seviyesini artıracığına değinmişlerdir.

Analizlerin akışa, dolayısı ile manevranın zamana bağlı doğasına ait veri kaybı olmaksızın yapılabilmesi pervaneye ve kontrol yüzeylerine ait geometri ve hareketlerin HAD ortamında doğrudan modellenmesi ile mümkündür. (Taylor et al., 1998) bu alandaki öncü çalışmasında DTMB P5168 pervanesine ile hareket ettirilebilir ve boşluklu kontrol yüzeylerine sahip AFF-8 geometrisi ile düz rotada bir başlangıç analizi yapmıştır.

(Pankajakshan et al., 2000, 2001) çalışmalarında (Taylor et al., 1998) çalışmasındaki geometriyi kullanarak sırasıyla 10° dümen açısının tetiklediği dönme manevrası ile baş ufki dümenler ile tetiklenen satha geliş manevrasını; daha sonraki bir çalışmaları ile de (Pankajakshan et al., 2002) ONR Body-1 geometrisinin biri düşey üçü yatay düzlemde olmak üzere 10° dümen açıları ile tetiklenen toplam dört adet Kempf (overshoot) manevrasını analiz etmişlerdir. Tüm bu çalışmalardan elde edilen genel sonuçlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Hareket ettirilebilir kontrol yüzeylerini içeren analiz senaryoları yüzey ile gövde arasındaki boşlukların da modellenmesini gerektireceğinden ağ sıklığı ve hücre sayısını ve dolayısı ile hesaplamaların karmaşıklığını artırmaktadırlar.
- Baş ufki dümenler ile icra edilen manevralarda pervane etkisi küçük olduğu için pervanenin bünye kuvveti olarak modellenmesi manevranın zamana bağlı gelişimi açısından ihmal edilebilir seviyede veri kaybına yol açmaktadır.

Her ne kadar doğası gereği zamana bağlı olsalar da viskoz etkilerin rol oynamadığı daha baskın akış fenomenleri içeren manevralarda fizik temelli bir yaklaşım kullanmanın katsayı tabanlı yöntemle kıyasla belirgin bir avantajı olmayabilir. Acil satır manevrası esnasında yalpa stabilitesinin kaybı fenomenini konu alan çalışmada (Bettle, 2013) bu doğrultuda bir sonuca ulaşılmıştır. Buna göre yelkenin varlığı (kaldırma kuvveti) nedeniyle oluşan yalpa stabilitesinin kaybı fenomeni akışı domine ettiğinden ve bu etki viskozite ile doğrudan ilintili olmadığından bu manevra için katsayı tabanlı yöntemlerin yetkinliği fizik temelli yöntemlerin seviyesine ulaşmaktadır.

Sonuç olarak fizik temelli yöntemler ihtiyaç duyulan güçlü hesaplama kaynaklarına erişimin olduğu, incelenen manevra problemi özelinde katsayılı yöntemlere kıyasla belirgin bir avantaj sağladığı veya sunduğu doğruluk seviyesine hesaplama kaynaklarının aşırı kullanımına rağmen ihtiyaç duyulduğu durumlarda kullanılmalıdır.

6.2. Serbest hareketli model deneyleri

Manevra probleminde fiziksel yaklaşımın deneysel ayağını serbest hareketli model deneyleri oluşturur. Bu yöntemde de amaç fiziksel yaklaşımın hesaplamalı analizler kısmında olduğu gibi su altı aracının/modelin belirli kontrol ve çevresel girdilere verdiği tepkiyi (yörünge) doğrudan analiz etmektir.

Serbest hareketli model deneylerinin yapılabilmesi için su altı aracının geometrik olarak benzerinin bir ölçek dahilinde ve sevk sistemi ile kontrol yüzeyleri de (hareket, boşluklar vb.) dikkate alınarak inşa edilmesi gerekir. Ayrıca inşa edilen bu modelin su altında yatay ve düşey düzlemlerde istenilen manevrayı yapmasını sağlayan bir kontrol sistemine de sahip olması gereklidir. Geçmişte kullanılan kontrol sistemlerinin (kablolu veya radyo kontrollü) insan girdisine ihtiyaç duyması ve su altındaki bir nesne ile elektronik ve görsel olarak haberleşmedeki teknik zorluklar bu deney yönteminin özellikle düşey düzlemde yeterince iyi performans sergileyememesine yol açmıştır (Burcher, 1972).

Son yıllarda otonom kontrol sistemlerinin etkinliklerinin istenilen düzeye ulaşması bu eksikliği gidererek model testi alanındaki gelişmelerin ağırlıklı olarak serbest hareketli model testi tekniği başlığında olmasına yol açmıştır (Overpelt, 2014).

Serbest hareketli model deneyleri de hesaplamalı fizik temelli analizlerde olduğu gibi matematiksel yaklaşımdaki karşılıklarına kıyasla daha az sayıda işlem basamağına ihtiyaç duyarlar ve dolayısı ile daha hızlı sonuç verirler. Serbest hareketli model deneylerinde matematiksel yaklaşımda ihtiyaç duyulan;

- Model tasarımı
- Test matrisinin belirlenmesi
- Testin icrası
- Test sonuçlarının analiz edilmesi
- Hidrodinamik katsayıların belirlenmesi
- Manevra simülasyonlarının yapılması

yukarıdaki işlem basamaklarından dördüncü ve beşincisine ihtiyaç duyulmaz. Ara basamakların atlanması bu basamaklardan kaynaklanan olası hata ve belirsizliklerin önüne geçer. Böylece yöntem su altı araçlarının manevra karakteristiklerinin eksiksiz bir resmini verir. Ancak yine ara basamakların atlanması nedeniyle bahse konu karakteristiklerin matematiksel olarak tanımlanmasına imkan vermezler (Quadvlieg & Overpelt, 2009). Bu yöntem ile deney sonuçlarından su altı aracı tasarımının manevra performansı açısından geliştirilmesi yönünde geri besleme almak çok zordur.

Serbest hareketli model deneyleri daha çok su altı aracının manevra edilebilirliği üzerine hızlı bir kaniya varmak, değişik tasarım opsiyonlarını kıyaslamak, otopilot mekanizmasının etkinliğini kontrol etmek ve geliştirilen manevra modellerinin doğrulanması için kullanılırlar (Overpelt, 2014). Ayrıca genelde matematiksel modellemenin geçerlilik aralığı dışında kalan zamana bağlı keskin manevraların analizi içinde bahse konu teknik kullanılabilir.

Bu tekniğin bir diğer dezavantajı ise rüzgâr, gelgit ve dalga karakteristiklerinin kontrol edilebildiği büyük su alanlarına ve karmaşık/pahalı sevk kontrol ve navigasyon sistemleri içeren modellere ihtiyaç duymasındır. Bu karmaşıklık seviyesi serbest hareketli bir modelde olması gereken sistemleri tanımlayan (Jun et al., 2009; Lee et al., 2013; Renilson, 2018) çalışmalarından daha iyi anlaşılabilir. Ayrıca araç ve model ölçeği arasındaki farklar nedeniyle dinamik olayların da (dümen ve pervane hareketleri) modelin zaman ölçülerine göre yeniden kurgulanması gereklidir. Geçmişte insan kontrol girdisi ile birlikte çevre şartlarının da model ölçeğinde yeniden oluşturulamaması pahalı tesis ve modele duyulan ihtiyaç ile birlikte serbest hareketli model tekniğinin kullanımını sınırlandıran başlıca faktörler olmuştur.

Günümüzde su altı araçlarından beklenen görevlerin bu araçların tasarım limitlerini giderek matematiksel yaklaşımın geçerlilik aralığı dışına çıkartması bahse konu araçların zorlayıcı manevralar sırasındaki davranışını analiz edebilmek için fiziksel yöntemlere ve dolayısıyla serbest hareketli model deneylerine daha fazla başvurulması sonucunu doğurmuştur. Bu deneyler aynı zamanda hesaplamalı fizik temelli analizler için de bir doğrulama/gerçekleme aracıdır. Örneğin (Overpelt et al., 2015)'in BB2 ve MARIN S7371R pervane geometrisi ile yaptığı ve Şekil 12'de bir örneği gösterilen deneyler (Carrica et al., 2016; Kim et al., 2018; Wang et al., 2019)'in fizik temelli hesaplamalı analizleri için bir metrik teşkil etmiştir.

7. Sonuç

Çalışma kapsamında su altı araçlarının manevra probleminin çözümü için kullanılan tüm yöntemler aracın yörüngesini hesaplamakta kullandıkları işlem basamaklarının sayısı ve içeriğine göre matematiksel ve fiziksel yaklaşımlar olarak iki ana kategoriye ayrılmıştır. Bu ana kategorilere ait alt başlıkların yanında çalışmanın bütünlüğünün sağlanabilmesi için literatürde kullanılan; jenerik su altı aracı geometrileri, manevra modelleri ve standart manevralara da değinilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar özetle;

- Genellikle askeri amaçlarla tasarlanmaları nedeniyle su altı aracı projeleri yüksek gizliliğe sahiptirler. Bu durum bu alanda yapılan çalışmaların bilimsel bir yayın haline getirilememesi sonucunu doğurmuştur. HAD tekniklerinin ve hesaplama altyapısının ancak son 10 yıllık süreçte bu araç formlarını tüm detayları ile analiz etme yetkinliği kazandığı gerçeği de dikkate alındığında araştırmacıların bu alana ilgisi geçmişte sınırlı kalmıştır. Gelişen hesaplama altyapısı ile gizlilik faktöründen etkilenmeksizin akademik seviyede ilginin bu alana çekilebilmesi için jenerik geometriler geliştirilmiştir. Bu geometriler başlangıçta nükleer tahrikli süratli denizaltıların geometrik özelliklerini taklit edecek şekilde (süratlerinden dolayı bu

platformların manevrası daha kritik olduğundan) oluşturulsa da zamanla diğer sınıf araçlar (konvansiyonel denizaltılar) için de geliştirilmişlerdir.

- Ölçekli model deneyleri ve hesaplamaların sonuçlarını, su altı aracı ölçeğinde (tam ölçekte) deniz tecrübelerinin sonuçları ile insan girdisinden etkilenmeksizin karşılaştırabilmek için her iki ölçekte de icra edilebilen standart manevralara ihtiyaç duyulmuştur. Bu manevralar her biri aracın farklı bir manevra karakteristiğini gösterecek şekilde geliştirilmişlerdir.
- Altı serbestlik derecesinin tamamında hareket edebilen su altı araçlarının matematiksel yaklaşım kullanılarak manevra analizlerinin yapılabilmesi için karmaşık manevra modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak bu modeller geliştirilirken yapılan kabuller nedeniyle zorlayıcı manevralar modelin geçerlilik aralığı dışında kalmakta ve model üzerinde düzeltme yapılması veya yeni bir model geliştirilmesi elzem olmaktadır.
- Feldman'ın modeli her ne kadar yelken etrafında oluşan at nalı girdabın rüzgaraltı etkileşimleri için sahip olduğu düzeltmeler nedeniyle zorlayıcı manevralar için daha doğru sonuç verse de uygulamasının zor olması Gertler & Hagen modelinin literatürde daha sıklıkla kullanılması sonucunu doğurmuştur.
- Matematiksel yaklaşım başlığı altında kullanılan deneysel yöntemler serbestlik derecesi sayısı, düzlemsel/düzlemsel olmama, devamlı/salınımlı/dinamik olma ve tespit edebileceği katsayı türleri bazında sınıflandırılabilir.
- Her bir deney mekanizmasının doğrudan tespit edebildiği katsayıların haricinde dolaylı olarak da tespit edebildiği bir veya birkaç katsayı grubu olabilir. Bunun yanında mekanizma tespit edebildiği tüm katsayıları dolaylı olarak tespit edebilir.
- Düzlemler arası etkileşimlerin de hesaplamalara yansıtılabilmesi için çapraz etkileşimli katsayıların tespit edilmesi gereklidir. Bunun deneysel yolla yapılması DHM, DKM vb. düzlemsel hareket mekanizmalarına ilave olarak KHM, MDTF gibi düzlem dışı etkileri de analiz edebilen mekanizmaların geliştirilmesine neden olmuştur. Benzer şekilde dinamik etkiler için de DyPPiR gibi mekanizmalar ortaya çıkmıştır.
- Ampirik yöntemler genelde tasarımın erken aşamalarında yapılan geometrik değişikliklerin aracın manevra performansı üzerine olan etkisinin karşılaştırılmalı gösterimi için kullanılan nispeten düşük doğruluk dereceli yöntemlerdir. Bu yöntemleri bir araya getiren ve tasarım otoritelerince kullanılan ticari/özel yazılımlar (Paramarine, DSSP vb.) mevcuttur. Bu yöntem ve yazılımlardan bir kısmı havacılık disiplininin devşirilip kullanılmaktadır.
- Bilinen girdilere mevcut sistemin verdiği tepkilerin ölçülmesi ve bu bilginin bu ikisi arasındaki matematiksel ilişkinin tanımlanması için kullanılması şeklindeki yaklaşımların geneli sistem tanımlama teknikleri olarak adlandırılır ve son yıllarda su altı araçlarının manevra ve kontrol analizlerinde kullanım sıklıkları artmaktadır.
- Manevra problemlerine fiziksel yaklaşımlar ise aracın ve akışkanın hareket denklemlerinin zaman boyutunda akuple edilerek simultane çözülmesine dayalı fizik temelli hesaplamalı analizler ve aracın yörüngesinin doğrudan belirlendiği serbest hareketli model deneylerinden oluşur.
- Fiziksel yaklaşımı oluşturan yöntemler herhangi bir matematiksel ara işlem basamağı içermediklerinden doğruluk dereceleri daha yüksektir. Ancak bu yöntemlerle yapılan analizler tam da bu nedenle aracın manevra karakteristiklerine ilişkin herhangi bir matematiksel perspektif sunmazlar. Dolayısı ile bu analizlerin sonuçlarından aracın manevra karakteristiklerini düzeltici yöne herhangi bir çıkarım yapmak çok zordur.
- Fizik temelli hesaplamalı yöntem ile yapılan analizler her bir zaman adımı için akışın fiziğini yansıtacak şekilde doğru sonuç verir. Bu doğruluk seviyesinin simülasyon süresince sağlanabilmesi için matematiksel yaklaşımda kullanılanlara göre doğruluk derecesi daha

yüksek algoritmalara ihtiyaç duyarlar. Bunun nedeni her bir zaman adımındaki hataların sonucu kümülatif olarak etkilemesidir.

- Son yıllarda hesaplama altyapısındaki gelişmeler ile otonom kontrol/kumanda sistemlerindeki ilerlemeler manevra problemine fiziksel yaklaşımı oluşturan yöntemlerin su altı araçlarının manevra analizlerinde kullanım sıklığını artırmışlardır.
- Hesaplama kapasitesinin geldiği noktada tek bir manevraya ait yörüngenin belirlenebilmesi için fizik temelli hesaplamalı analizler hidrodinamik katsayıların belirlenmesi için yapılan hesaplamalı analizlerden daha ekonomik hale gelmiştir. Ancak aracın manevra emniyet zarfının belirlenmesi gibi çok sayıda manevranın incelenmesi gereken durumlarda matematiksel yöntemlerin kullanımı zorunludur.

Yukarıda sunulan tüm analiz yöntemleri ve elde edilen sonuçlar aracın dalmış durumu için geliştirilmiş olup, akışkan sınırlarına yakınlığın neden olduğu sapmalar bu çalışmanın ikinci bölümünü oluşturan ayrı bir başlık altında incelenmiştir. Ayrıca bu çalışmanın hacmini kabul edilebilir seviyede tutmak için matematiksel yaklaşımın bir ayağını oluşturan ve HAD analizlerini esas alan hesaplamalı yöntemlerin iç dinamikleri her iki bölümden bağımsız olarak incelenmiş ve çalışmanın üçüncü bölümünü oluşturmuştur.

8. Referanslar

Ahn, S., Choi K.-Y., & Simpson R. (1989). The design and development of a dynamic plunge-pitch-roll model mount. In 27th Aerospace Sciences Meeting. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/doi:10.2514/6.1989-48>

Barros, E. de, Pascoal, A., & Sa, E. de. (2006). Progress Towards a Method for Predicting AUV Derivatives. Proc. IFAC Manoeuvring Control Marine Crafts.

Belanger, F. (2019). System Identification of Submarine Motion Dynamics [Presentation]. Mari-Tech Conference, Ottawa, Canada.

Bettle, M. (2013). Unsteady Computational Fluid Dynamics Simulations of Six Degrees-of-Freedom Submarine Manoeuvres (Doctoral dissertation, University of New Brunswick, Canada). Retrieved from <https://unbscholar.lib.unb.ca/islandora/object/unbscholar%3A9381>

Bettle, M. C. (2018). Baseline Predictions of BB2 Submarine Hydrodynamics for the NATO AVT-301 Collaborative Exercise (Report No. DRDC-RDDC-2017-R200). Defence Research and Development Canada. Retrieved from https://cradpdf.drdc-rddc.gc.ca/PDFS/unc298/p806272_A1b.pdf

Bettle, M. C., Gerber, A. G., & Watt, G. D. (2009). Unsteady Analysis of the Six DOF Motion of a Buoyantly Rising Submarine. *Computers and Fluids*, 38(9), 1833–1849. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2009.04.003>

Boger, D., & Dreyer, J. (2006). Prediction of Hydrodynamic Forces and Moments for Underwater Vehicles Using Overset Grids. In 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2006-1148>

Booth, T. B. (1973). Oscillatory Testing of Ship Models. *Journal of Sound and Vibration*, 28(4), 687–698. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(73\)80143-9](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(73)80143-9)

Brayshaw, I. (1999). Hydrodynamic Coefficients of Underwater Vehicles [Student Report]. Aeronautical and Maritime Research Laboratories, DSTO.

Brinati, H., de Conti, M., Szajn bok, M., & Domiciano, V. (2013). First principles applied to submersible maneuvering. In *Developments in Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources*. <https://doi.org/10.1201/b15813-13>

Burcher, R. K. (1972). Paper 9. Model Testing. *Journal Mechanical Engineering Science*, 14(7), 62–69. https://doi.org/10.1243/JMES_JOUR_1972_014_064_02

Can, M. (2014). Numerical Simulation of Hydrodynamic Planar Motion (Master's thesis, Middle Eastern Technical University, Ankara, Turkey). Retrieved from <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12617938/index.pdf>

Cardenas, P., & de Barros, E. A. (2020). Estimation of AUV Hydrodynamic Coefficients Using Analytical and System Identification Approaches. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 45(4), 1157-1176. <https://doi.org/10.1109/JOE.2019.2930421>

Carrica, P. M., Kerkvliet, M., Quadvlieg, F., & Martin, J. E. (2016). CFD Simulations and Experiments of a Maneuvering Generic Submarine and Prognosis for Simulation of Near Surface Operation. In *Proceedings of the 31st Symposium on Naval Hydrodynamics* (pp. 11–16). Monterey, CA.

Chase, N. (2012). Simulations of the DARPA Suboff submarine including self-propulsion with the E1619 propeller (Master's thesis, University of Iowa, Iowa City, IA). <https://doi.org/10.17077/etd.ypvf3i4w>

Chase, N., & Carrica, P. M. (2013). Submarine Propeller Computations and Application to Self-Propulsion of DARPA Suboff. *Ocean Engineering*, 60, 68–80. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.12.029>

Chase, N., Michael, T., & Carrica, P. M. (2013). Overset Simulation of a Submarine and Propeller in Towed, Self-Propelled and Maneuvering Conditions. *International Shipbuilding Progress*, 60(1), 171–205. <https://doi.org/10.3233/ISP-130088>

Coe, R. G., & Neu, W. L. (2011). Vehicle Control in a CFD Environment. In *Proceedings of the 2011 Grand Challenges on Modeling and Simulation Conference* (pp. 370–374). Vista, CA: Society for Modeling & Simulation International.

Coe, R. G. (2013). Improved underwater vehicle control and maneuvering analysis with computational fluid dynamics simulations (Doctoral dissertation, Virginia Tech, Blacksburg, VA). Retrieved from <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/23777>

Coxon, P. J. (1989). System Identification of Submarine Hydrodynamic Coefficients from Simple Full Scale Trials (Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA). Retrieved from <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/14129/23881420-MIT.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Dantas, J. L. D., Caetano, W. S., Vale, R. T. S., & de Barros, E. A. (2013). Analysis of identification methods applied to free model tests of the Pirajuba AUV. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(33), 185–190. <https://doi.org/10.3182/20130918-4-JP-3022.00051>

De Barros, E. A., Pascoal, A., & De Sa, E. (2008). Investigation of a Method for Predicting AUV Derivatives. *Ocean Engineering*, 35(16), 1627–1636. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.08.008>

Delen, C., Sezen, S., & Bal, S. (2017). Computational Investigation of Self Propulsion Performance of DARPA SUBOFF Vehicle. *TAMAP Journal of Engineering*, 2017.

- Dong P.G. (1978). Effective mass and damping of submerged structures (Report No. UCRL-5234). University of California, Lawrence Livermore Laboratory, 2, CA.
- Dubbioso, G., Broglia, R., & Zaghi, S. (2017). CFD Analysis of Turning Abilities of a Submarine Model. *Ocean Engineering*, 129, 459–479. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.10.046>
- Feldman, J. (1979). DTNSRDC Revised Standard Submarine Equations of Motions (Report No. DTNSRDC/SPD-0393-09). David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a071804.pdf>
- Finck, R. D., & Hoak, D. E. (1978). USAF Stability and Control DATCOM (Report No. AFWAL-TR-83-3048). Flight Dynamics Laboratory, OH.
- Fossen, T. I. (2011). *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. John Wiley & Sons.
- Fu, T. C., Atsavapranee, P., & Hess, D. E. (2002). PIV Measurements of Cross-Flow Velocity Field Around a Turning Submarine Model (ONR Body-1) Part 1. Experimental Setup (Report No. NSWCCD-50-TR 2002/019). Carderock Division, Naval Surface Warfare Center. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a401545.pdf>
- Furlong, M. E., Hearn, G. E., Veres, S. M., & Rogers, E. (2003). Nonlinear system identification tools applied to the modelling of submarine dynamics. *IFAC Proceedings Volumes*, 36(4), 49–54. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)36656-9](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)36656-9)
- Gallaway, C. R., & Osborn, R. F. (1985). Aerodynamics Perspective of Supermaneuverability. In 3rd Applied Aerodynamics Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/doi:10.2514/6.1985-4068>.
- Gertler, M. (1950). Resistance Experiments On A Systematic Series Of Streamlined Bodies Of Revolution-For Application to the Design Of High-Speed Submarines (Report No. C-297). David Taylor Model Basin. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a800144.pdf>
- Gertler, M., & Hagen, G. R. (1967). *Standart Equations of Motion For Submarine Simulation*. Washington D.C.
- Goodman, A. (1960). *Experimental Techniques and Methods of Analysis Used in Submerged Body Research*.
- Gregory, P. A., Joubert, P. N., & Chong, M. S. (2004). Flow Over a Body of Revolution in a Steady Turn (Report No. DSTO-TR-1591). Defence Science and Technology Organization, Australia. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a429701.pdf>
- Grim, O., Oltmann, P., Sharma, S. D., & Wolf, K. (1976). CPMC-A Novel Facility for Planar Motion Testing of Ship Models. In 11th Symposium on Naval Hydrodynamics. London, UK.
- Groves, N. C., Huang, T. T., & Chang, M. S. (1989). Geometric characteristics of DARPA suboff models (DTRC Model Nos 5470 and 5471) (Report No. DTRC/SHD-1298-01). Ship Hydromechanics Department, David Taylor Research Center. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a210642.pdf>
- Han, J. H., Jeong, J. H., Lee S. B., Jang, K. Y., & Lee, S. K. (2017). Dynamic Stability Analysis of a Submarine by Changing Conning Tower Position and Control Planes. *Journal of navigation and port research*, 41(6), 389–394.
- Hegrenæs, Ø., Hallingstad, O., & Jalving, B. (2007). Comparison of mathematical models for the HUGIN

4500 AUV based on experimental data. In International Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies (pp. 558–567). IEEE. <https://doi.org/10.1109/UT.2007.370776>

Humphreys, D. E. (1976). Development of Equations of Motion and Transfer Functions for Underwater Vehicles (NCSL 287-76). Naval Coastal Systems Laboratory. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA033882.pdf>

Hydroid, a K. C. (2012). Underwater Mobile Docking of Autonomous Underwater Vehicles. In OCEANS. Hampton, VA. doi: 10.1109/OCEANS.2012.6405109.

Ibrahim, M. (2000). A Method for Analysis of the MDTF Data Using Neural Networks (Master's thesis, Memorial University of Newfoundland, Canada). Retrieved from https://research.library.mun.ca/1666/3/Ibrahim_Mohamed.pdf

Imlay, F. H. (1961). The Complete Expressions for Added Mass of a Rigid Body Moving in an Ideal Fluid (Report No. 1528). David Taylor Model Basin. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/263966.pdf>

Jiang, J., Shi, Y., & Pan, G. (2013). Computation of Hydrodynamic Coefficients of Portable Autonomous Underwater Vehicle. In APCOM & ISCM. Singapore.

Johnson, D. C. (1989). A Coning Motion Apparatus for Hydrodynamic Model Testing in a Non-Planar Cross-Flow (Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA) Retrieved from <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/40552>

Jones, D. A., Clarke, D. B., Brayshaw, I. . B., Barillon, J. L., & Anderson, B. (2002). The Calculation of Hydrodynamic Coefficients for Underwater Vehicles (Report No. DSTO-TR-1329). Defence Science and Technology Organization, Australia. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a414448.pdf>

Jun, B. H., Park, J. Y., Lee, F. Y., Lee, P. M., Lee, C. M., Kim, K., ... Oh, J. H. (2009). Development of the AUV "ISiMI" and a free running test in an Ocean Engineering Basin. *Ocean Engineering*, 36(1), 2–14. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.07.009>

Kim, H., Ranmuthugala, D., Leong, Z. Q., & Chin, C. (2018). Six-DOF Simulations of an Underwater Vehicle Undergoing Straight Line and Steady Turning Manoeuvres. *Ocean Engineering*, 150, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.12.048>

Kim, H., Leong, Z. Q., Ranmuthugala, D., Chin, C., & Forrest, A. (2015). Free Running Simulation of an Autonomous Underwater Vehicle Undergoing a Straight Line Manoeuvre via Computational Fluid Dynamics. In PACIFIC 2015 International Maritime Conference. Sydney, Australia.

Kim, J., Kim, K., Choi, H. S., Seong, W., & Lee, K.-Y. (2002). Estimation of Hydrodynamic Coefficients for an AUV Using Nonlinear Observers. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 27(4), 830-840. <https://doi.org/10.1109/JOE.2002.805098>

Kim, K., Turnock, S. R., Ando, J., Becchi, P., Minchev, A., Semionicheva, E. Y., ... Korkut, E. (2008). The Maneuvering Committee: final report and recommendations to the 25th ITTC. *Proceedings of 25th ITTC, I*, 143–208.

Lee, G. M., Park, J. Y., Kim, B., Baek, H., Park, S., Shim, H., ... Jeong, H. S. (2013). Development of an autonomous underwater vehicle ISiMI6000 for deep-sea observation. *Indian Journal of Marine*

Sciences, 42(8), 1034–1041.

Leeuwen, G. van. (1969). Some problems concerning the design of a horizontal oscillator (Report No. 225). Shipbuilding Laboratory, Technological University Delft

Lloyd, A. (1983). Progress towards a rational method of predicting submarine manoeuvres. In Royal Institution of Naval Architects symposium on naval submarines. London

Luque, J. C. C., Donha, D. C., & de Barros, E. A. (2009). AUV parameter identification. IFAC Proceedings Volumes, 42(18), 72–77. <https://doi.org/10.3182/20090916-3-BR-3001.0062>

Mackay, M. (2003). The Standard Submarine Model: A Survey of Static Hydrodynamic Experiments and Semiempirical Predictions (Report No. TR 2003-079). Defence Research & Development Canada. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.666.6710&rep=rep1&type=pdf>

Mackay, M., Williams, C. D., & Derradji-Aouat, A. (2007). Recent Model Submarine Experiments with the MDTF. In 8th Canadian Marine Hydromechanics and Structures Conference. St. John's NL, Canada.

Mackay, M. (2004). A Review of Submarine Out-of-Plane Normal Force and Pitching Moment (Report No. TM 2004-135). Defence Research & Development Canada. Retrieved from <https://cradpdf.drdc-rddc.gc.ca/PDFS/unc62/p522701.pdf>

McCarter, B. R. (2014). Experimental evaluation of viscous hydrodynamic force models for autonomous underwater vehicles (Mater's thesis, Virginia Tech, Blacksburg, VA) Retrieved from https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/50445/McCarter_BR_T_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y

McFarland, C. J., & Whitcomb, L. L. (2013). Comparative experimental evaluation of a new adaptive identifier for underwater vehicles. In 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (pp. 4614-4620). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6631233>

Millan, D., & Thorburn, P. (2010). A Planar Motion Mechanism (PMM) for Ocean Engineering Studies. In NECEC 2010: 18th Newfoundland Electrical and Computer Engineering Conference, St. John's, NL, Canada.

Moonesun, M. (2014). Introduction of Iranian hydrodynamic series of submarines (IHSS). Journal of Taiwan Society of Naval Architects and Marine Engineers. 33(3). 155-162.

Morrison, A. T., & Yoerger, D. R. (1993). Determination of the hydrodynamic parameters of an underwater vehicle during small scale, nonuniform, 1-dimensional translation. In Proceedings of OCEANS '93 (pp. II277-II282 vol.2). <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1993.326105>

Mulvihill, L. P., & Yang, C. I. (2007). Numerical Simulation of Flow Over Fully Appended ONR body-1 with Overset Grid Scheme. In NSH 2007 - 9th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics. Ann Arbor, MI.

Myring, D. F. (1981). A Theoretical Study of the Effects of Body Shape and Mach Number on the Drag of Bodies of Revolution in Subcritical Axisymmetric Flow (Report No. 81005). Royal Aircraft Establishment. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA107999.pdf>

Nahon, M. (1993). Determination of Undersea Vehicle Hydrodynamic Derivatives Using the USAF Datcom. In OCEANS (pp. II283-II288 vol.2). <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1993.326107>

Nahon, M. (1996). A Simplified Dynamics Model for Autonomous Underwater Vehicles. In Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology (pp. 373–379). <https://doi.org/10.1109/AUV.1996.532437>

Overpelt, B. (2014). Innovation in the Hydrodynamic Support for Design of Submarines. In 12th International Naval Engineering Conference and Exhibition (INEC). Amsterdam, Netherlands.

Overpelt, B., Nienhuis, B., & Anderson, B. (2015). Free Running Manoeuvring Model Tests On A Modern Generic SSK Class Submarine (BB2). In Pacific International Maritime Conference.

Pankajakshan, R., Remotigue, M. G., Taylor, L. K., Jiang, M., Briley, W. R., & Whitfield, D. L. (2002). Validation of Control Surface Induced Submarine Maneuvering Simulations Using UNCLE. In 24th Symposium on Naval Hydrodynamics (pp. 624–639). Fukuoka, Japan: The National Academies Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.17226/10834>

Pankajakshan, R., Taylor, L. K., Jiang, M., Remotigue, M. G., Briley, W. R., & Whitfield, D. L. (2000). Parallel Simulations for Control-Surface Induced Submarine Maneuvers. In 38th Aerospace Sciences Meeting Conference and Exhibit (p. 962).. Reno, NV. <https://doi.org/https://doi.org/10.2514/6.2000-962>

Pankajakshan, R., Taylor, L. K., Sheng, C., Jiang, M., Briley, W. R., & Whitfield, D. L. (2001). Parallel Efficiency in Implicit Multiblock, Multigrid Simulations with Application to Submarine Maneuvering. In 39th Aerospace Sciences Meeting Conference and Exhibit (p. 1093). Reno, NV. <https://doi.org/https://doi.org/10.2514/6.2001-1093>

Park, J.-Y., Kim, N., Rhee, K.-P., Yoon, H. K., Kim, C., Jung, C., ... Lee, S. (2015). Study on Coning Motion Test for Submerged Body. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(6), 436–444. <https://doi.org/10.5574/ksoe.2015.29.6.436>

Phillips, A., Furlong, M., & Turnock, S. R. (2016). The use of Computational Fluid Dynamics to Determine the Dynamic Stability of an Autonomous Underwater Vehicle, Paper presented at the 10th Numerical Towing Tank Symposium (NuTTS'07), Hamburg, Germany September 23-25, 2007.

Praveen PC, Krishnankutty P. (2013). Study on the effect of body length on the hydrodynamic performance of an axi-symmetric underwater vehicle. *Indian J Geo-Mar Sci* 42(8):1013–1022

Prestero, T. (2001). Development of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle. In *OCEANS* (pp. 450-455 vol.1), Honolulu, HI. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2001.968766>

Quadvlieg, B., & Overpelt, F. (2009). Free Running Model Tests Shed Light on the Elusive World of the Submarine (Report No. 95). MARIN. Retrived from <https://www.marin.nl/publications/free-running-model-tests-shed-light-on-the-elusive-world-of-the-submarine>

Racine, B. J., & Paterson, E. G. (2005). CFD-Based Method for Simulation of Marine-Vehicle Maneuvering. In 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit (p. 4904). Toronto, Canada. <https://doi.org/https://doi.org/10.2514/6.2005-4904>

Renilson, Martin. (2018). "Submarine Hydrodynamics (2nd ed.)". Springer. <https://doi.org/10.3723/ut.33.137>

Sabet, M. T., Daniali, H. M., Fathi, A., & Alizadeh, E. (2018). Identification of an Autonomous Underwater Vehicle Hydrodynamic Model Using the Extended, Cubature, and Transformed Unscented Kalman Filter. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 43(2), 457–467. <https://doi.org/10.1109/JOE.2017.2694470>

Sabet, M. T., Sarhadi, P., & Zarini, M. (2014). Extended and Unscented Kalman filters for parameter estimation of an autonomous underwater vehicle. *Ocean Engineering*, 91, 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.09.013>

Sandman, B. E., & Kelly, J. G. (1974). Systems Identification: Application To Underwater Vehicle Dynamics. *Journal of Hydronautics*, 8(3), 94–99. <https://doi.org/10.2514/3.62985>

Sen, D. A Study on Sensitivity of Maneuverability Performance on the Hydrodynamic Coefficients for Submerged Bodies. *Journal of Ship Research* 44(03), 186–196.
doi: <https://doi.org/10.5957/jsr.2000.44.3.186>

Severholt, J. (2017). Generic 6-DOF Added Mass Formulation for Arbitrary Underwater Vehicles based on Existing Semi-Empirical Methods (Master's thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden). Retrieved from <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1127931/FULLTEXT01.pdf>

Sezen, S., Dogrul, A., Delen, C., & Bal, S. (2018). Investigation of Self-Propulsion of DARPA Suboff by RANS Method. *Ocean Engineering*, 150, 258–271. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.12.051>

Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME). (1950). Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid (Technical Research Bulletin No. 1-5) SNAME. Retrieved from <https://www.itk.ntnu.no/fag/TTK4190/papers/Sname%201950.PDF>

Society of Naval Architecture and Marine Engineers (SNAME), (1989). "Principles of Naval Architecture Vol III", SNAME.

Sukas, Ö.F., Kınacı, Ö. K., & Bal, Ş., (2017). Gemilerin Manevra Performans Tahminleri için Genel Bir Değerlendirme-I. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, vol.23, 37-75.

Taylor, L., Pankajakshan, R., Jiang, M., Sheng, C., Briley, W., Whitfield, D., ... Al, E. (1998). Large-Scale Simulations for Maneuvering Submarines and Propulsors. In 29th AIAA, Plasmadynamics and Lasers Conference. Albuquerque, NM. <https://doi.org/doi:10.2514/6.1998-2930>

Techet, A.H. (2005). Hydrodynamics Lecture Notes, MIT. Retrieved from <https://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-016-hydrodynamics-13-012-fall-2005/download-course-materials/>

Thune, S. (2015). Simulation of Submarine Manoeuvring (Master's thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden). Retrieved from <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-185028>

Tiano, A., Sutton, R., Lozowicki, A., & Naeem, W. (2007). Observer Kalman filter identification of an autonomous underwater vehicle. *Control Engineering Practice*, 15(6), 727–739. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2006.08.004>

Tinker, S. J. (1982). Identification of submarine dynamics from free model tests. In Admiralty Marine Technology Establishment, UK, Proceedings of the DRG Seminar on Advanced Hydrodynamic Testing Facilities, Session 3, Paper 16, The Netherlands. Paper: P1982-1 Proceedings.

Tinker, S. J., Bowman, A. R., & Booth, T. B. (1979). Identifying Submersible Dynamics from Free Model Experiments. *Royal Institution of Naval Architects Supplementary Papers*, 121, 191–196.

Venkatesan, G., & Clark, W. B. (2007). Submarine Maneuvering Simulations of ONR Body 1. In 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (pp. 697–705). San Diego, CA: ASME. <https://doi.org/https://doi.org/10.1115/OMAE2007-29516>

Wang, Y., Liu, J., Liu, T., Jiang, Z., Tang, Y., & Huang, C. (2019). A Numerical and Experimental Study on the Hull-Propeller Interaction of A Long Range Autonomous Underwater Vehicle. *China Ocean Engineering*, 33(5), 573–582. <https://doi.org/10.1007/s13344-019-0055-z>

Watt, G. (1988). Estimates for the Added Mass of a Multi-Component Deeply Submerged Vehicle (Report No.88/213). Defence Research and Development Canada. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a203234.pdf>

Watt, G. D. (2007). Modelling and Simulating Unsteady Six Degrees-of-Freedom Submarine Rising Maneuvers (Report No. 2007-008). Defence Research and Development Canada. Retrieved from <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.466.3653&rep=rep1&type=pdf>

Wetzel, T. G., & Simpson, R. L. (1996). Unsteady Flow Over a 6: 1 Prolate Spheroid (Report No. VPI-AOE-232). Advanced Research Project Agency. Retrieved from https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/28502/LD5655.V856_1996.W489.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Whitfield, C. C. (1999). Steady and Unsteady Force and Moment Data on a DARPA2 (Master's thesis, Virginia Tech, Blacksburg, VA). Retrieved from <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/34333/thesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Wu, L., Li, Y., Liu, K., Sun, X., Wang, S., Ai, X., ... Feng, X. (2020). Hydrodynamic Performance of AUV Free Running Pushed by a Rotating Propeller with Physics-Based Simulations. *Ships and Offshore Structures*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/17445302.2020.1786237>

Yan, K. C., & Wu, L. H. (2007). A Survey on the key technologies for underwater AUV docking. *Robot*, 29(3), 267–273.

Zierke, W. C. (1997). A Physics-Based Means of Computing the Flow Around a Maneuvering Underwater Vehicle (Report No. TR 97-002). Applied Research Laboratory. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a322316.pdf>

19. Yüzyılın Sonlarında Osmanlı Devleti'nde Gemi Boya ve Kaplamaları

Derya Geçili

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Atatürk İlke ve İnkılap Tarihi Bölümü, Niğde, Türkiye

dgecili@ohu.edu.tr, ORCID: [0000-0002-1579-9578](https://orcid.org/0000-0002-1579-9578)

ÖZET

Gemilerin yüzeyini aşınma ve çürümelerden, su altı kesimini ise deniz canlılarının yerleşiminden (Fouling) korumak için çeşitli yöntemler uygulandı. Bunlar arasında özellikle deniz boyaları ve kaplamaları denilen malzemeler büyük önem taşıyordu. Osmanlı Devleti, denizcilikteki yetersizliklerini on sekizinci yüzyılda fark etmeye başlamıştı. Denizcilikte Batı ile rekabet edebilmek için Avrupa'daki gelişmeleri takip etmek gerekiyordu. Bu hedef doğrultusunda modern gemiler kullanılmaya başlamıştı. Bir süre sonra gemilerin dış tabakalarında meydana gelen pürüzler, hızı dahi etkilemişti. Gemilerin hem ömrünü uzatmak hem de görünümünü bozmamak için boya kaplamalarına dikkat edilmiştir. Gemiciler için boya rehberleri yayınlanarak gemilerin hem iyi görünmeleri ve hem de bakımlarının yapılmasına çalışılmıştır. Bu çalışmada, 19. yüzyıl sonlarında gemi boya kaplama malzemeleri ile Osmanlı Devleti'nde boyaların gemi direnci üzerinde etkisinin fark edilmesi üzerine yapılan çalışmalar anlatılmıştır.

Anahtar kelimeler: Boya, Kaplama, Gemi, Osmanlı Devleti

Makale geçmişi: Geliş 21/02/2021 – Kabul 27/06/2021

Ship Paint and Coatings in Ottoman State in Late 19th Century

Derya Geçili

Niğde Ömer Halisdemir University, Department of Atatürk Principles and History of Revolution, Niğde, Turkey

dgeçili@ohu.edu.tr, ORCID: [0000-0002-1579-9578](https://orcid.org/0000-0002-1579-9578)

ABSTRACT

Several methods were applied in the past to protect the surfaces of ships from corrosion and decay, and their underwater parts from fouling. Among these, materials that are called marine paints and coatings have great importance. The Ottoman State started to realize its inadequacy in maritime in 18th Century. It was necessary to follow the developments in Europe to compete with the Western World in shipping. Modern ships were used for this purpose. After some time, the roughness that occurred in the outer layers of the ships in time affected even the speed of ships. Paint coatings were considered to extend the life of ships and not to disrupt their appearances. Painting Guides were published for seafarers to make ships look well and to maintain them. In the present study, ship paint coating materials at the end of 19th century, and the studies conducted on the effects of paints on ship resistance in Ottoman State were discussed.

Keywords: Paint, Coating, Ship, Ottoman State.

Article history: Received 21/02/2021 – Accepted 27/06/2021

1. Giriş

Boya, herhangi bir nesneye renk vermek veya korumak amacıyla uygulanan kaplamadır. Bazı boyalar birtakım yerlerde doğal halde oluşur ve buralardan kazılıp çıkarılır, bazıları da boyacılıkta doğalları kadar iş görsün diye farklı özlerin, belirli oranlarda kimyasal işleme tabi tutulmaları veya birbirlerine karıştırılmaları sonucunda oluşturulur. (Vitrivius, 2019) Bitki veya toprak bazlı boyar maddelerin mağara duvarlarının renklendirilmesinde kullanılmasıyla, insanoğlu 25.000 yıl önce renk ve boya algısıyla tanıştı. Mağaralarda yaşayan insanlar, duvarlara avladıkları hayvanların şekillerini çizip renklendirdi. Palaeolitik sanatçılar tarafından kullanılan boyanın ana pigmentleri demir ve mangan oksitlere dayanırdı. Bunlar çoğu mağara resminde bulunan üç temel rengi yani siyah, kırmızı ve sarıyı sağlardı. Mısırlılar daha sonra boya yapma sanatını geliştirdi. Mavi, lapis, lazuli gibileri başta olmak üzere geniş bir renk yelpazesi ortaya çıktı. Sanayi devriminin boya endüstrisinin gelişmesinde büyük etkisi oldu. Demir-çeliğin, mühendislikte artan kullanımı ile paslanma ve korozyonu geciktirecek veya önleyecek maddelere ihtiyaç duyuldu. Bu ihtiyaçları karşılamak için kurşun ve çinko bazlı boyalar geliştirildi. Ketten tohumu yağı içinde dağılmış kırmızı kurşuna dayalı en basit boyalardan birinin, yapısal çelik için muhtemelen en iyi korozyon önleyici astarlardan biri olduğu fark edildi. On sekizinci yüzyıldan itibaren bilimsel keşiflerdeki hızlanma boyaların gelişimi üzerinde artan bir etkiye sahip oldu (Lambourne and Strivens, 1999).

On sekizinci yüzyılın sonlarından itibaren gemiler, demir ve çelikten inşa edilmeye başlandı. Yelkenler, buharlı makineler ve kürekler ise pervaneler olarak değiştirildi. Binlerce yıldır insanlar ister ticaret, seyahat, ister savaşmak ya da keşfetmek olsun, gemilerle okyanuslarda geziniyordu. Gemilerde boyasız demir ve sac levhalar, su ile havanın rutubetinden paslandıklarında ve raspa olduklarında inceliyorlardı. Boyasız tahtalar da aynı suretle birkaç sene zarfında çürürlerdi. Gemilerde demiri, ahşabı çürümekten muhafaza etmek, karınlarında organik kirlenmeyi önlemek ve insan sağlığı ve deniz çevresi üzerinde olumsuz etkileri azaltmak amacıyla boyamaları yapıldı. (Gemi Boya Yönetmeliği, 2019) Boya, korozyondan korunmada ve geminin su altında kalan kısmında istenmeyen organizmaların birikmesini engellemede, gemi bünyesine uygulanması zorunlu bir sistem oldu. Sualtı ve su üstü gemilerin bölümlerinin korunması ve estetik görünümü için dayanıklı etkin boya kaplamaları kullanıldı. (Gemi Yapımı, 2011) Gemilerdeki aşınma ve kırılmayı önlemesi ve ömrünü uzatması sonucunda gemi boyaları ile ilgili yenilikler ve değişimler yapıldı. (Okay, 2004).

Osmanlı Devleti'nde gemilerin boyanmasının önemi fark edilerek nizamnameler hazırlanarak uygulamaya geçirildi. Gemilerin boyanması bazı kurallara tabi tutulmuş, böylece hem bakımları yapılmış hem de sağlık kurallarına riayet edilmişti. Bu çalışmada 20 Mart 1332 (2 Nisan 1916) tarihinde Bahriye Nezareti İkinci Dairesi Üçüncü Şubesi tarafından yayınlanan Gemicilerin Boya Rehberi risalesine göre Osmanlı Devleti'nde gemi boya kaplamalarında dikkat edilen konular anlatılmıştır.

2. Gemi Boya Kaplamalarına Başlanması

Denizin bilinen veya bilinmeyen bütün tehlikelerine rağmen su ile yolculuk daima kara ile olandan daha kolay ve ucuzdur. (Mahan, 2003) Denizde seyredilebilen gemi şeklindeki ilk aracın yaklaşık M.Ö 3000 yıllarında Mısırlılar tarafından yapıldığı söylenir. Bazı araştırmacılar ise ilk deniz yolu araçlarına Çin'de rastlanıldığını savunur. (Yıldız, 2008) On sekizinci yüzyılda denizcilik teknolojisinde birbiri ardına kapsamlı ve devrim niteliğinde gelişmeler yaşandı. Bu hızlı gelişmelere bağlı olarak yelkenle hareket eden gemilerin yerini ilk önce yandan çarklı, sonra uskurlu ve daha sonra ise buharlı gemiler almaya başladı. (Gencer, 1986) Buhar makinesinin gemilere uygulanmasından sonra denizcilikte ayrı bir safhaya geçilerek tüm denizler ve okyanuslar geçiş yolu haline geldi. (Gülen, 2001) Yelkenliler

döneminde, çok uzak görülen mesafelere artık kısa sürede ulaşmak mümkündü. Deniz teknolojisinde başlayan bu keşifler ve yenilikler, gemilerin bakımlarına verilen önemi de artırdı. (Olgaç, 1952)

Deniz canlılarının bir kısmı, yaşamlarına devam edebilmek için sert bir yüzeye tutunma ihtiyacı hissederler. Deniz taşımacılığında gövdeleri pürüzsüz ve temiz gemiler için kirlenme istenmeyen bir olaydır. İnsanlar, deniz taşımacılığının başladığı ilk günden beri boya teknolojileri kullanarak kirlenmeyi önlemek ve hafifletmek için çeşitli boya teknolojileri kullandılar. (Demirel, 2018) Bazı medeniyetler teknelerin altını balmumu, zift ve asfalt karışımı ile kaplarken, diğer bazı medeniyetler teknelerinin altını kurşun plakalar ile kapladılar. Yine ilk çağlarda kullanılan bir diğer karışım arsenik, kükürt ve yağ karışımıdır. Metal kaplamalar da teknelerin altında kullanılan bir yöntemdi. Romalılar ve Bizanslılar ise teknelerinin altını kurşun ile kaplardı. Diğer bazı medeniyetler ise teknelerinin altına hayvan postları veya hayvan kılları ile ziftin karışımı bir madde çekerlerdi. 18. yüzyıla kadar en yaygın kullanılan sistem ise kurşun kaplama oldu. Antifouling¹ özellikleri çok güçlü olmasa da kurşun kaplama ile ahşap kurtları önlenabiliyordu. Ancak kurşun kaplamanın teknenin demir aksamalarını korozyona uğratma gibi birçok büyük eksi yönü vardı. 1600'lü yıllarda kurşun kaplamalar yerini bakıra bıraktı. Özellikle İngiliz donanmasında 1600 ve 1700'lü yıllarda bakır kaplamalar yoğun olarak kullanıldı. 1700'lü yılların sonunda canlıların oluşumunu yavaşlatan esas etkenin bakırın deniz suyunda çözünmesi olduğu ortaya çıktı. 1800'lü yıllarda çelik ve sac teknelerin denizlerde yaygınlaşması ile bakırın antifouling etki amacıyla teknelerde kullanılması azaldı. Bunun en önemli nedeni bakırın demir tekne gövdelerinde korozyona yol açmasıydı. Çinko, kurşun, nikel, arsenik, galvanize demir, kalay-çinko alaşımları alternatif olarak denendi. Yine demir teknelerin altının metal olmayan malzemeler ile kaplanmasına (kauçuk, ahşap, kürk, mantar, ebonit, kâğıt, cam vs.) çalışıldı. Ancak yeterli verim alınamadı. Bu da antifouling etki yaratan karışımlara tekrar bir yönelme yarattı (Masmanacı, 2011).

1800'lü yıllarda çeşitli zehirli boya karışımları denendi. Bunlarda etken zehir olarak bakır oksit, arsenik, civa oksit çözücü olarak nafta benzer bağlayıcı için de shellac verniği, bitkisel yağlar ve zift gibi malzemeler kullanılırdı. Bu dönemdeki en önemli problem yapılan karışımların suya verilme-çözünme hızının kontrol edilememesiydi. Bu sorun rosin ile bakır bileşiklerinin karışımları olarak imal edilen zehirli boyalar ile kısmen çözüldü. Hem Avrupa'da hem de ABD'de farklı firmalar benzer yapıdaki zehirli boyalar için patent aldılar. Çok etkili olmayan ve pahalı olan bu zehirli boya tipleri bu dönemde yaygın olarak kullanılmaya başlandı. 1900'lü yılların başında ABD donanmasının öncülüğünde zehirli boya birleşimleri test edildi ve çinko oksit, çinko tozu ve bakır tozu içeren karışımların dokuz aya kadar koruma sağladığı görüldü. Bu karışımlara bakır oksit ve civa oksit türevleri eklendiğinde koruma süreleri 18 aya kadar çıkıyordu (Masmanacı, 2011).

3. Boya Çeşitleri

Boyacılıkta esas renkler, beyaz, siyah, kırmızı, mavi, yeşil ve sarıdır. Bunların açık sarı, koyu sarı, açık yeşil, koyu yeşil, gibi çeşitleri olduğu gibi cins bakımından da muhtelif türleri de vardır. Renkli tozlar ile pembesi, filizi, cevizi, gümüşü gibi renklerin yapılması mümkündür. Gerek boya ve gerekse macun için

¹ Fouling deniz taşıtlarının su içinde kalan yüzeyleri üzerine yapışarak büyüyen kabuklu alg, mikroorganizma gibi canlıların oluşturduğu tabakadır. Gemi üzerindeki çok az miktarlarda bile fouling, yakıt tüketiminde belirgin artışlara neden olabilir. Foulingin açtığı olumsuz etkileri önlemek amacıyla gemi yüzeylerinin su içerisinde kalan yerlerine antifouling içeren boyalar uygulanır. Amacı foulingin oluşmasını engellemek olan bu sistemler tanımları gereği organizmaları uzaklaştırır, öldürür ya da büyümelerini engeller. Dünyada yıllardan beri kullanılan çok çeşitli antifouling sistemler vardır. Eskiden gemilerde oluşan fouling kireç arsenik civa gibi maddeler kullanılarak önlenirdi. Daha sonra kimya endüstrisinin gelişmesiyle Antifouling amacıyla birtakım metalik bileşikler kullanılmaya başlanmıştı. Okay, Oya S. (2004). Antifouling İçeren Gemi Boyalarının Uluslararası Kurallar Çerçevesinde Kirletici Etkilerinin İncelenmesi. Gemi Mühendisliği ve Sanayimiz Sempozyumu, s. 169.

esas malzeme, renkli tozlar, üstübeç, petrol yağı ile bezir yağıdır. Bunlardan başka rengi ve boyayı hazırlamak için aşağıdaki gibi bazı malzemelere de ihtiyaç vardır.

Üstübeçler; kalay, kurşun, çinko, kaya ve İspanya üstübeci adıyla beş çeşittir. Kalay üstübeci, beyaz ve en etkili olup kurşun üstübeci dışında diğerlerinden daha ağırdır. Çinko üstübeci, kurşun üstübeci beyazlığında olup üstübeçlerin en hafifidir. Kurşun üstübeci, kalay üstübecinden bir miktar daha esmer, fakat daha ağırdır. İspanya üstübeci, kurşun üstübecinden bir miktar daha esmer ve topraktan doğrudan doğruya çıktığından kireç ve kil ağırlığındadır. Kaya üstübeci, üstübeçlerin en esmer renkli olup İspanya üstübeci ağırlığındadır. Kalay üstübeci, gayet temiz olması gereken işlerde; kurşun üstübeci, mobilyalarla mat olan ve renkli boyalarda; kaya üstübeci, macun işlerinde ve İspanya üstübeci ise macun işleri ile yaldızcılıkta kullanılır.

Renkli tozlar; el ile kontrol edilirken kumsuz olmalarına önem verilir. Bu tozların en önemlisi silikon olduğu için daha dikkatli bir muayeneden geçirilir. Aynı büyüklükte olacak şekilde kutulara konularak tartılan silikon tozlarından ağır olanı daha saftır. Su içerisinde muayenesinde yarım bardak suyun içerisine bir kaşık kadar silikon tozu koyup on dakika iyice karıştırıldıktan sonra saf hali tamamen bardağın dibine çöker ve suyu kırmızıya boyar.

Neft yağları; Amerikan, Eğriboz (ağrıboz), Bursa, Rus, Japon ve İngiliz neft yağları vardır. Neft yağları ile tahlil yapılabilir veya doğrudan muayene edilebilir. Doğrudan muayene için bir miktar avuca dökülüp ovalanırsa saf olan neftte çam kokusu hissedilir. Tahlil ile muayenesinde ise ölçünün muhafazasına neft dökülür, içerisine aletin dereceyi gösteren parçası konular. Amerikan nefti 75 ile 80, Eğriboz nefti² 80 ile 85, diğer neftler ise 85 ile 100 dereceyi gösterirler. 85'i geçen ağır boz neftiyle 100 dereceyi geçen diğer neftler saf değildir, yani karışıktır. Dahili işlerde daima Amerikan ve Eğriboz neftleri kullanılmalıdır, çünkü diğerleri koku yapar. Boyayı sulandırmak için kullanılan neft saf olursa çamdan yapıldığından boyaya yapışkanlık özelliği verir. Bundan dolayı boyanın uzun süre dayanmasına ve uçucu olduğu içinde boyanın kurumasına yardım eder. Fakat karışık olan neftler, her ne kadar boyayı sulandırsa da cilasını keserek direnmesine faydalı değildir, ayrıca gayet çabuk uçtuğu için boyayı kurutmamaktadır. Neftler mümkün olduğu kadar kapalı kaplar içinde ve ateşten uzak tutulmalıdır.

Bezir yağları; ham, İngiliz, beyaz ve yerli kaynatılmış bezirlerdir. Ağza alındığı zaman acılık hissi verir, avuçta ovalandığı zaman ise saf keten gibi kokar. Ham bezir, görünüşte zeytinyağına benzemektedir. İngiliz beziri, ham bezirin az kaynamış olup yoğunluğu zeytinyağından daha fazla ve rengi kırmızıya benzemektedir. Beyaz İngiliz beziri, koyu halde olup rengi zeytinyağından daha beyazdır. Yerli kaynatılmış bezir ise ham bezirin iyice kaynatılmış cinsi olup rengi zeytinyağı renginde ve yoğunluğu bal gibidir.

Vernikler; subrefin, pilatin, kristal ve bronz çeşitleri vardır. Kristal verniğinin rengi beyaz olup diğerleri bezir rengindedir. Kalitesi ve yeterliliği tecrübelerle kanıtlanmış ve bilinen fabrikaların ürünü olmasına dikkat edilmelidir. Bunların çok fazla benzerleri ile taklitleri vardır ve taklit olan vernikler, su ile havadan çatlar. Sandaloz³ adı verilen reçineye benzer bir madde kehribar tozu ve bezir yağıyla kaynatılarak yerli vernik imal edilmesi mümkün ise de özel yapılmış ocakları olmayan bir mahalde alevlenebilir ve tehlikeli durumlar ortaya çıkabilir (Gemicilerin Boya Rehberi, 1914).

Sikatif⁴; toz ve yağ olmak üzere iki çeşittir. Toz sikatif üstübeç, yağ, sikatif bezire benzer vernik gibi kapalı ve özel tenekeler içerisinde bulunur. Sikatif zorunlu olduğu zaman boyaları çabuk kurutmak için kullanılır, bir okka boyaya, on dirhem sikatif ilave edilebilir. Daha fazla konulursa boyaların cilasını

² Boyacılıkta kullanılan neft

³ Sandaloz ağacından elde edilen bir sakızdır.

⁴ Özellikle maden bileşiklerinden oluşan, katalitik özellikleri bulunan, çabuk kurumasını sağlamak için boya, yağlıboya ve verniğe az miktarda katılan madde.

bozar, mat ise çatlatır ve hatta boyayı kırılmış bir alçıya benzetir. Kamara ve sentene gibi manikalar⁵ vasıtasıyla ve hava cereyanı ile kurutulması mümkün yerlerin boyanmasında kullanılmamalıdır. Çünkü sikatifsiz⁶ ve hava ile kurutulmuş boyalar sikatifli boyalardan daha iyi olur.

Kristal; beyaz olduğu için geminin mobilyaları içinde beyaz ve açık renkli boyalar üzerine sürülür. Fakat dışarıda kullanıldığında pilatin rengi kadar dirençli olmamaktadır.

Pilatin (soğuk alt tonlu açık sarı); maun⁷ boyaların üzerine sürülür, küpeşte, kaporta ve botlarda kullanılır.

Subrefin; en son cila olarak, bronz ise sadece bronz yaldızında kullanılır.

Boya macunu; %25 iyi üstübeç, %50 kaba üstübeç, %18.75 kaynatılmış bezir, %6.25 petrol yağından oluşur. Kabın içerisinde iyi üstübeç petrol yağıyla iyice ıslatılır, sonra kaynamış bezir ile daha sonra kaba üstübeç yavaş yavaş dahil edilir. Kırmızı veya diğer renklerde macun yapmak için silikon, aşı veya herhangi bir renk tozlarını kaba üstübecin⁸ miktarında ilave edilir.

Cam macunu; %18.75 iyi üstübeç, %50 kaba üstübeç, %18.75 kaynatılmış bezir, %12.5 silikon tozundan oluşur. Bir sac levhanın üzerine kaba üstübeç dökülür, ortası çukur hale getirilir ve bu çukurun içerisine kaynatılmış bezir ilave edilir. Ardından içerisine iyi üstübeç ile silikon tozu katılır ve etrafında kalan kaba üstübeci yavaş yavaş ilave edilerek tamamıyla yedirilir.

Güverte macunu; %50 iyi üstübeci, %25 kaba üstübeci, %17.75 kaynatılmış bezir, %6.25 petrol yağından oluşur. Güverte macunu imali için kaba gibi olan üstübeçler, bir sac levha üzerinde iyice karıştırılıp ortası çukur hale getirilir. Bu çukurun içerisine kaynatılmış bezir⁹ ile petrol yağı dökülür ve üstübeç tamamen yedirilir. Güverte kalafat¹⁰ olduktan sonra ilk olarak armuzlara¹¹ ince kalem fırçasıyla bir astar boya, daha sonra ise güverte macunu sürülür.

Boyaların imalinde silikon¹² boya; %67.5 silikon tozu, %75 iyi üstübeç, %25 ham bezir kullanılır. Bu üç malzeme bir kap içerisinde karıştırılarak doğrudan yapılabilir. Silikon boya, demir ve sac aksama uygulanır, ahşap ve galvaniz aksamda kullanılamaz. Ancak silikon, diğer boyalardan daha faydalı değildir, hatta galvanize sürülürse zararlıdır. Çünkü silikon kurşundan yapıldığı için deniz suyunun ve havanın temasıyla bozulur, ayrıca bir galvanizlenme meydana getirir ve parlaklığının kaybolmasına neden olur (Gemicilerin Boya Rehberi, 1914).

Esas renkli boyalar; birinci kat boya, %50 iyi üstübeç, %18.75 kaynatılmış bezir, %31.25 petrol yağdır. İkinci kat boya (macun üzerine), %50 iyi üstübeç¹³, %25 kaynatılmış bezir¹⁴, %25 petrol yağından oluşur. Üçüncü kat boya, %37.5 iyi üstübeç, %37.5 kaynatılmış bezir, %25 petrol yağdır. Herhangi bir kat boya yapmak istenirse kap içerisinde üstübeç veya renkli tozu petrol yağıyla ıslatıp daha sonra kaynatılmış bezir yağı ilave ederek karıştırılır. Boyayı hazırladıktan sonra sancak bezi veya özel imal edilmiş ince tel

⁵ Gemilerde aşağı katlardaki kamaraları, ambarları, makine dairelerini havalandırabilmek için açılmış baca

⁶ Özellikle maden bileşiklerinden oluşan, katalitik özellikleri bulunan, çabuk kurumasını sağlamak için boya, yağlıboya ve verniğe az miktarda katılan madde.

⁷ Ahşap koruyucu ve renklendirici boya

⁸ Boyacılıkta kullanılan zehirli, bazik kurşun karbonat

⁹ Keten tohumundan elde edilen, boya, baskı mürekkebi, vernik ve benzeri türlü şeylerde kullanılabilen, çabuk kuruyan, altın sarısı ya da kahverengimsi bir yağ.

¹⁰ Geminin kaplama ve güverte döşeme tahtalarının aralarına üstübeç doldurduktan sonra ziftleyerek su geçirmez duruma getirme işi.

¹¹ Gemide güverte ve borda kaplama tahtalarının aralarındaki boşluk.

¹² Karbon yerine ardışık olarak dizilmiş silyum ve oksijen atomları bulunan polimerlerin ortak adıdır. Silikon sıvılar oldukça kararlı maddelerdir. Su, ısı ve yükseltgenlerin etkisiyle bozulmazlar.

¹³ Harici boyalarda kullanılan ve esas itibarıyla kurşun karbonat olan bir pigmenttir. Kurşun bileşikleri zehirli olduğundan üstübeç daha çok harici boyalarda kullanılır.

¹⁴ Keten tohumundan çıkarılan yağ, boya bezir yağı ile inceltilir.

bir elekten süzülmalıdır. Gümüş, beyazın içerisine siyah ve mavi; nohudi, beyazın içerisine Venedik sarısı; pembe, beyazın içerisine kırmızı; eflatun, beyazın içerisine kırmızı ve mavi; turuncu, beyazın içerisine kırmızı ve kanarya sarısı; tirşe¹⁵, beyazın içerisine yeşil; filizi için ise beyazın içerisine yeşil ve kanarya sarısı ilave edilmelidir. Gümüş rengini yapmak için bir kaba beyaz boya konulduktan sonra ufak kaplarda bir parça daha az siyah ve mavi boyalar istenilen renge ulaşıncaya kadar azar azar ilave edilir. Bazı genel renkler, tecrübelerle anlaşıldığı üzere daima tekdüze olmaktadır. Mesela donanmanın dış aksamının boyanmasında kullanılan gümüşü boya, beyazın içine %30 mavi ve %0.50 siyah ilavesiyle yapıldığından çok iyidir.

Kahverengi; Venedik sarısından yapılan sarı boya içerisine siyah ilave edilir. Fakat umre tozu var ise tek renk boyalar gibi doğrudan doğruya yapılabilir ve çoğunlukla kahverengi umreden imal olunur.

Maun (ahşap kırmızısı); Venedik sarısından yapılan sarı içerisine aşından yapılan kırmızı ile umreden yapılan kahverengi boyanın karıştırılmasıyla elde edilir. Böylece boyaları birbirine karıştırarak birçok renklerin imal edilmesi mümkün olduğu gibi yukarıda anlatılan maun ve kahverengi gibi boyaların doğrudan tozlarından yapılabilir.

Cevizi; patlağın içerisinde bir miktar petrol yağı, bezir ile aşı tozu karıştırılır, ardından bir miktar siyah boya azar azar (uygun rengi buluncaya kadar) ilave edilir.

Kutu boyalar; çeşitli fabrikaların her çeşit renkte boyaları bulunmaktadır. Bunlardan ripolin, enamel ve emaye adıyla satılanların çok iyi oldukları tecrübe ile anlaşılmıştır. Kutu boyaları, pahalı olduklarından birinci veya ikinci kat boyanın üzerine sürülerek çoğunlukla dâhili işlerde kullanılabilir. Bu boyalar, parlak olup çabuk kurumaktadır. Kutu boyaların ağzı açık bırakılırsa hemen katılaşır. Böyle durumda boyalar, iyi petrol yağıyla sulandırılabilir, ancak parlaklıkları ortadan kaybolur. Boyalar, sıcak su dolu bir kap içerisine doldurularak kullanılırlarsa katılaşmaz ve bu durumda içerisine petrol yağı konulması zorunlu olmadığından parlaklığını muhafaza edilebilir. Kutu boyaları iyi ve parlak olduklarından çoğunlukla kamara veya diğer dâhili işler ile mobilyalarda kullanılır. Az veya çok yaldızlanması gereken mobilyalarda boya çabuk kuruyup, leke üzerine yapıştırılan yaldız boyaya yapışmadığından mobilyaların tekrar boyanmasına ihtiyaç yoktur.

Tüp boyalar; Şimdiye kadar cins ve çeşitleri beyan edilen toz boyalarla kutu boyalarından başka tablolarla duvarlarda yapılan yağlı boya manzaralarında kullanılan ve kurşun tüpler içerisinde satılan muhtelif renk ve cinsten yağlı boyalar vardır.

4. Gemilerin Boyanması

Geminin dışarıdaki sac aksamı tamamen boyanacak ise bordalar, bacalar veya diğer buna benzer yerler iyice raspa ettirilip üzerine silikon sürülür. Daha sonra güverteye eski bir branda serilip görevlilerin her birinin boyasının sulu diğerinin koyu olmamasına dikkat edilir. Mümkün ise boyalar, bir büyük bidon içinde doldurularak kullanılmalıdır. Boya için ayrılan görevliler, ikişer ikişer gruplara ayrılarak çift kişilik badana yapılmalıdır. Bu iki görevli bir yerden başlayıp biri sağa biri sola doğru hareket ederek diğer gruplarla birleşmelidir. Bu konuda görevlilerin kullandıkları fırçaların da önemli bir etkisi olup aynı boyda uzun kıllı fırçalar kullanılmalıdır. Gemi nakkaşına boyası biten görevlilere hemen boya vermesi ve boyanın daima karıştırıldığını kontrol etmesi istenmelidir. Çünkü boyanın içerisindeki üstübeç veya renkli toz, patlağın¹⁶ dibine çöktüğünden boya yağsız kalır.

¹⁵ Yeşil ile mavi arası

¹⁶ Deniz adamları terminolojisinde bidon, kova gibi çok su taşımaya yarayan malzemeler

Dubalar veya kompozayt gemiler, ister yeni isterse raspa olunmuş eski tahtadan olsun önce bir astar boya sürülmelidir. Boya kuruduktan sonra armuzların arası geniş çitalarla sıkıştırılıp içerisine biraz kireç konularak katılaştırılmış macun kullanılmalıdır. Macun iyice kuruduktan sonra ikinci veya üçüncü kat boyalar sürülmelidir. Bazı mahaller, lostra edilecekse geminin iç aksamı, sodalı ve sabunlu su ile iyice temizlendikten sonra boyanmalıdır. Şayet boyanın bazı yerleri dökülüp yenilenmesi gerekiyorsa önce raspa edilmeli ve daha sonra silikon boyanmalıdır. Sentene ve ambar gibi hava almayan mahallerin havalandırılmasına önem verilmelidir. Aksi halde hem boyalar kurumaz ve hem de nakkaşın hayatı, boya kokusundan tehlikeye girer. Hava almayan mahaller, neftsiz, vernikli ve ham bezirli boylarla boyanmalıdır. Çünkü bu gibi boyların kokusu az olduğundan tehlikesi de biraz daha azdır. Geminin kamara veya buna benzer diğer iç ahşap mahalleri daha önce boyanmışsa ve yapılacak iş bir lostradan ibaret ise öncelikle sodalı ve sabunlu su ile temizlenmelidir. Daha sonra çatlakları macunlanmalı ve bir veya iki kat boyanmalıdır. Sadece daha önce hiç boyanmamış ise ilk önce astarı çekilip macunlanmalıdır. Macun tamamıyla kuruduktan sonra zımparalanmalı, iki veya ihtiyaca göre üç kat boyanmalıdır. İkinci veya üçüncü boyları sürerken boyanın iyi bir şekilde kuruduğuna dikkat edilmelidir. Birinci üzerine, ikinci katı veya ikinci üzerine, üçüncü katı sürmeden önce el ile muayeneden geçirilmelidir. Boya ne tamamen kurumuş ve ne de yaş olmalıdır, yani boya ele çıkmamalı, fakat bir az yapışkanlığı da bulunmalıdır. Böylece sürülen boylar birbirini tutarak dirençli olabilir. İyice kuruyan boyanın üzerine diğer bir kat sürülürse ayrı bir tabaka teşkil eder. Bunun sonucunda doğal olarak dirençsiz bir şekilde kabarıp, sonra da dökülür.

Filikaların su hattından aşağı olan kısımları raspa olunarak temizlenmelidir. Raspa olan mahaller iyice kuruduktan sonra raspanın kabarttığı taşlar zımpara kâğıdıyla düzeltilmeli ve daha sonra astarı çekilmelidir. Delik ve çatlakları kapatmak üzere macunu sürülmeli ve kuruduktan sonra düz bir takoza zımpara kâğıdı sarılarak iyice zımparalanmalıdır. El ile sürülen zımpara düzgün olmadığından bazı mahalleri çukurlaşır. Deniz suyuna karşı koyabilmesi için filikalara sürülecek boylar kaynatılmış bir bezle sürülmelidir. Baca, sitim boruları, kazan önleri ve diğer hararete maruz kalan yerlerin boyanması için uygun olan rengin dağılımı gaz yağı içerisinde yapılmalıdır. Daha sonra %25 değerinde İngiliz beziri ilave edilmelidir. Böylece yapılan boya, karıştırılarak badana yapar gibi iki kat sürülmelidir. Hararete dayanıklı olduğundan makinelerin bulunduğu yerlere galvaniz yapılabilir.

Suya dayanıklı olduğundan direk, küpeşte, karpota gibi yerler ispiroto cilasası ile verniklenir veya bezir yağıyla yağlanır. Eğer ağaç yenilenmiş veya raspa olunmuş ise zımparalandıktan ve çatlaklara ağacın renginde sürülen macun kuruyup tekrar cilalandıktan sonra bezirlenmeli ve renklendirilmelidir. Renklendirilecek mahal daha önce boyanmış ise potas, kostit soda, amonyak gibi hammaddelerle temizlenmelidir. Kostit soda, bir miktar sıcak su ile karıştırılmalı ve eski bir fırça veya bir değnek ucuna bir bez parçası sarıp ağacın üzerine sürülmelidir. Beş dakika sonra da güverte fırçası ve bol su ile yıkanmalıdır. Böylece eski yağlar tamamen çıkar ve ağacın zarafetine zarar verilmemiş olur, sadece potas veya kostit sodaya el sürülmemesine dikkat edilmelidir. Yukarıda açıklandığı gibi temizlenen ağacın üzerine bir kat İngiliz beziri ile vernik kullanılmalıdır. Eğer ağacın rengini koyulaştırmak gerekirse İngiliz bezirinin içerisine yağın rengini kızartacak kadar maun tozundan ilave edilebilir, fakat bu toz kesinlikle verniğin içerisine karıştırılmamalıdır, çünkü verniğin cilasasını bozup dayanıklılığını azaltabilir (Gemicilerin Boya Rehberi, 1914).

5. Boyalı Mahallerin Temizlenmesi

Gemilerin bordaları, kamaraları ve diğer boyalı mahalleri, biraz soda veya garp sabunu konulmuş ılık su ile silinmeli, daha sonra soğuk ve tatlı su ile tekrar yıkanıp kurutulmalıdır. Bu temizlik için bez veya sünger kullanılmalıdır. Kaynar ve çok fazla sodalı su ile yıkanır ise boya yumuşayarak bozulur ve sodalı

suyun kiri dahi boyaya nüfuz ederek lekelenir. Filikalar, sürekli su içinde bulduklarından su hatlarından aşağı kısımlarında su lekesi olur veya yosun tutar. Yosun veya lekelerin yok edilmesi için branda parçasını veya bir bezi ıslatıp ince kuma batırarak lekeli mahalleri hafif hafif silmek gerekir. Böylece yosunlar çıkar ve pomza taşıyla cilalanmış gibi parlar. Sadece çok sert bir şekilde yapılırsa boya bozulabilir.

Havuzun suyu tahliye edilirken zırlı boyanın üzerindeki yosunlar, midyeler, sert borda fırçası veya buna benzer bir vasıta ile dökülüp gemi temizlenmelidir. Hava ile temas eden boya katılaşır kuruyacağından ve sallarla patalyalar¹⁷ yerine özellikle iskelelere ihtiyaç duyulacağından havuzun tahliyesinden sonra karinanın temizlenmesi çoğunlukla zordur. Karina temizlendikten sonra her tarafı muayeneden geçirilerek duruma göre kısmen veya tamamen raspa edilir, tel fırça ile fırçalanarak gerekli yerleri de tamir edilir. Daha sonra demir macunu sürülür. Macun kurduktan sonra birinci kat zehirli boya ve daha sonra ise ikinci kat zehirli boya (omurgadan su hattına kadar) kullanılır. İkinci kat zehirli boya soğuk ve sıcak olmak üzere iki çeşidi olmaktadır. Soğuk sürülen zehirli boya, likit yağ ve bulunmadığı takdirde ise petrol veya benzin ile sulandırılarak kullanılmalıdır. Sıcak zehirli boya, ateşten başka bir şeyle yumuşamazlar ve mutlaka su içerisinde kaynatılıp sıcak bir şekilde sürülmelerine ihtiyaç vardır. Bunun için iç içe iki kazan kullanılır, büyük kazanın içine su ve suyun içerisine küçük kazan konularak burada boya eritilir. Böylece kaynatılan boyalar, nakkaşlar tarafından özel yapılmış mangallı patlarda sıcak bir şekilde sürülür. Bu cins boyalar, doğrudan tek kazan içinde kaynatılabilir de ateşe temas etmeden kaynayanlar daha güvenli olur. Ancak sıcak bir şekilde sürülmeleri zorunludur, ılık veya soğuk olarak kullanılan boya, gemi hızla seyrederken dökülmeye başlar. Sıcak zehirli boyalar, havadan ve güneşten dahi etkilenerek dayanıklılığını kaybettiklerinden yukarıda anlatılan usule göre bir taraftan boya sürülürken bir taraftan da havuza su konulmalıdır. Sadece havuzun doldurulmasına daha zaman varsa kesinlikle boya sürülmemelidir. Sıcak zehirli boya, soğuklara göre daha fazla dayanıklıdır. Soğuk zehirli boya, 14 ay dayandıkları halde sıcaklar 24 ay ve daha fazla dayanırlar. Ancak sıcak ve soğuk zehirli boyalar, masrafları yönünden çok farklıdır. Bir okka (1000 gr) soğuk boya 5 metrelik sahaya boyamaya yeterli olduğu halde sıcak boya sadece bir metre yeri boyayabilir. Her sene havuza giren gemilerin soğuk zehirli boya boyanması daha uygundur.

Havuza girmeyip şamandıradaki bulunan ve su hattının boyanması gereken bir gemi ise mümkün olduğu kadar bir tarafa yatırılıp ortaya çıkan kısımlar süpürge ile temizlenmelidir. Bu konu için kesinlikle sert fırça veya bu gibi temizlik malzemeleri kullanılmamalıdır. Çünkü ikinci kat zehirli boya su içerisinde yumuşak durduklarından sert bir madde ile temizlenirse bozulurlar. Bu temizlik tamamlandıktan sonra su hattı boyu çekilmeli ve ondan sonra su hattı rengi sürülmelidir. Eğer bordalar boyanacak ise su hattı rengi bordalar boyandıktan sonra kullanılmalıdır. Daha önce sürülürse bordalar boyanırken akar ve ikinci defa boyanmasına ihtiyaç duyulur. Faça adı verilen suya ve havaya dayanabilen su hattı boyalarının her rengi yoktur. Kaynatılmış bezirle yapılmış yerli su hattı boyaları, mümkün mertebe durgun havalarda sürülüp kurutulursa dirençli olur (Gemicilerin Boya Rehberi, 1914).

6. Gemilere Maun ve Yıldız Yapmak (Yaldızcılık)

Gemiler için acur, diş, budak, meşe, kel ağacı ve diğer benzer ağaçlar tradisyon sarısı, tradisyon kırmızısı, tradisyon siyahı, gülbahar ve provendic gibi altı çeşit maun tozları kullanılır. Boyanacak mahale yapılacak maunun rengine göre önce mat olarak bir veya iki kat beyaz, açık nohudi gibi renklere

¹⁷ Genellikle savaş gemilerinde kullanılan, bir, iki ya da üç çift küreği bulunan ve her bir çift küreği bir kişice çekilen bir hizmet sandalı

boyanır. Eğer yağlı ise İngiliz bezinin içerisine maun tozu ve maun tozunun dörtte biri nispetinde kaba üstüviç konur ve karıştırıldıktan sonra daha önce sürülen ve iyice kurumuş olan boyanın üzerine kısmen görünmek üzere sürülür. Bu konu için sert ve kısa kıllı fırça kullanılmalıdır. Daha sonra boya kurumadan özel çelik taraklar ile hafifçe taranarak sivri uçlu lastikle de damarlar yapılmalıdır. Eğer sulu maun yapılacak ise bir tasın içerisine yeterli miktarda sirke koyup uygun olan renge göre maun tozunu karıştırmalıdır. Daha önce sürülen nohudi veya herhangi renkteki boyanın üzeri sulu sünger ile silinip tarak fırçasıyla sirkeli maun boya sürülmelidir. Daha sonra ince kalem fırçası ve sirkeli maun boyası ile ağaç damarları resmedilmelidir. Gerek yağlı ve gerekse sulu maun boya kurduktan sonra üzerine vernik sürülüp kuruması beklenmelidir.

Altın yıldızlar, Osmanlı ve Fransız olmak üzere iki çeşittir. Bunlardan başka bronz yıldızları adıyla muhtelif renkte yıldızlar vardır. Osmanlı altın yıldızı en iyisi olup 22 ayardır. Bir paketi 20 deste ve her bir destesi 10 yaprak olmak üzere iki yüz varaktır. Her bir yaprağın 6 cm genişliği ve 12 cm uzunluğu olup rengi beyaza yakın sarıdır. Fransız altın yıldızı ise 12 ayar olup bir paketi 20 ve her bir destesi 25 yaprak olmak üzere 500 varaktır. Her bir yaprak 8, 5 cm genişliğinde ve 8, 5 cm uzunluğunda olup rengi kırmızı sarıdır. Ayrıca yeşili ve kırmızısı da vardır. Osmanlı ve Fransız yıldızları hemen hemen aynı fiyatta satılmıştır. Osmanlı yıldızlarının bir tufesi 1, 44 ve Fransız yıldızları da 3, 6125 metre mesaha ölçüsünde bir yerde kullanılabilir. Yıldızların taklidi yapıldığı için külçe altın gibi ayarına bakılmalıdır, ihtisas sahipleri sahtelerini renklerinden dahi ayırt edebilir. Su ile havaya karşı direnebilmelerinden dolayı harici işlerde Osmanlı, daha ucuz olacağı için kamara ve salon gibi yerlerde ise Fransız altın yıldızları kullanılır. Yıldız yapılırken rüzgârdan uçarak ve oymaların çukurlarına dolarak kaybolduğu için yıldızlanacak yerin ölçüsüne dikkat edilmelidir.

Lifli yıldız; yıldızlanacak olan madde eski ise temizlendikten ve astar boya sürüldükten ve çatlakları macunlandıktan sonra kaynatılmış bezleri boya ile iki kat boyanmalı ve daha sonra yıldızlanmalıdır. Eğer tahta yeni ise yine aynı suretle önce boyanmalıdır. Boya iyice kurduktan sonra lika (eskiden mürekkep) tabir olunan (verniğe benzer bir çeşit yağdır) maddenin içerisine bir miktar kanarya sarısı tozu karıştırılıp yıldızlanacak oymanın üzerine boya sürer gibi kullanılmalıdır. Bu sırada tahtaların boyanmasında olduğu gibi likanın tavını beklemek gerekir. Böylece tavında sürülen yıldız parlak olur. Lika tamamıyla kurduktan sonra sürülen yıldızlar dökülür ve yaş iken tamamıyla kuruyan likanın yapışkanlık hususunu kaybettiği ve yaş olan likanın dahi ele yapıştığı görülür. Lika normal bir havada 24 saatte, rutubetli havada daha geç ve güneşli ile rüzgârlı havada ise daha erken kurur. Likayı daha çabuk kurutmak için içerisine bir miktar vernik, daha geç kurutmak için de bir miktar kaynatılmış bezir ilave edilmelidir. Likanın tavi geldikten sonra yıldız ve rikalarını açıp oymanın üzerine hafifçe yapıştırmalı ve yıldız fırçasıyla üzerine vurarak çukur mahallerine gidip yapışması sağlanmalıdır. Böylece oyma varaklandıktan sonra yıldız fırçasının sert cinsiyle süpürülmeli ve toplanan tozlar dahi oymanın çukur mahallerinde açık kalan yerlerine doldurulmalıdır. Eğer yıldızlamak işi dışarıda yapılıyor ise hafif rüzgârlar ile altın varaklarının uçarak telef olabileceği unutulmamalıdır.

Mazgallı yıldız; tahta, alçı ve mukavvadan (diğer adı karton piyerdir) yapılan aynalar, resim çerçeveleri ve diğer mobilyalarda ve bütün dâhili işlerde kullanılan parlak mazgallı yıldız için önce bir okka suyun içine elli dirhem kadar İspanya üstüviç konulur ve kaynatılır. Daha sıcak iken oymanın üzerine boya sürer gibi birkaç kat sürüp kurutulur. Ardından zımpara kâğıdı ve (mazgal otu) tabir edilen kamış ile iyice temizlenir. Bu iş tamamlandıktan sonra lambazi adı verilen çamur su ile karıştırıp boya haline getirildikten sonra oymanın her tarafına yumuşak bir fırça ile dikkatlice sürülüp kurutulur. Daha sonra fırça ile ispiroto sürülür ve ispiroto kurumadan altın yıldız varakaları yapıştırılır. Varak yapıştırma işi sona erince yıldız fırçasıyla her tarafı süpürülür ve yıldızın üzerine parlaklık vermek için çıkıntılı yerlerine gazgalla kemiği adı verilen kemik ile cilalanır. Böylece çukur olan mahaller mat olarak kalmaktadır. Yıldızları tamir etmek için de bozuk mahallerin yıldızları ispiroto ile temizlenip lambazi sürülür,

kurutulur ve ispirto ile aynı şekilde varaklar yapıştırılır. Tutkal, alçı ve ispirto sudan etkilendiklerinden dolayı mazgalı yıldızlar harici işlerde kullanılamaz.

Bronz yıldızlar; beyaz, sarı, altın rengi, yeşil ve kırmızı olmak üzere çeşitli renkleri vardır. Bronzların taklitleri de olmaktadır. Bronz (galvaniz) yıldızları yapmak için bir miktar vernik ile bronz (galvaniz) tozu karıştırılır. Bu karışım daha koyu yapılırsa çok hızlı donar. Bu karışım için bronz verniği bulunamaz ise yerine sikatif de ilave edilebilir. Bronz yıldızları varda, metafora gibi önemli yerleri muhafaza etmek üzere boya yerine kullanılır.

Cam üzerine yıldız yapmak; Camın büyüklüğüne göre bir kâğıt kesilip üzerine yazı veya çiçek gibi arzu edilen resimler çizilir. Bu çizgilerin üzerlerinden dikiş iğnesiyle kâğıt iğnelenerek tamamen delinir. Daha sonra salaşpur bezinin içine bir avuç kadar iyi üstüviç tozu koyarak top gibi yapılır ve kâğıt tekrar camın üzerine getirilerek resim çizilmelidir. Kâğıt kaldırıldığı zaman şeklin cam üzerine resmedildiği görülür. Bir çay bardağının içerisine sıcak su ve suyun içerisine de bardağın ağız genişliğinde jelatin tutkalı doldurulur. İyice erittikten sonra samur tüylü kalem fırçasıyla camı çıkarılan yere sürülür ve tutkal kurumadan altın varaklar yapıştırılır. Varak yapıştırıldıktan sonra kâğıt camın üzerine tekrar tatbik edip üstüviçli topu sürmelidir. Bu defa beyaz tozları yıldızın üzerine çıkar. Sarı yıldız renginde vernikli bir boya ile çizgilerin arasını dikkatlice boyamalıdır. Boya sürülüp tamamlandıktan sonra kenarlarda gayri muntazam ve taşkın olarak yapışan yıldızları ispirto ile temizlemelidir. Cam üzerine yıldız yaparken kâğıdın markalarına iyi dikkat olunursa düzgün olur ve cam dış taraftan parlak ve iç taraftan dahi sarı boya ile tersine yazılmış yazı veya tersine yapılmış resim halinde görünür.

Oyma yapmak; bir oymayı, düz tarafı alta gelmek üzere bir tahtanın üzerine çivilemeli ve etrafına birkaç santim daha yüksek olmak üzere bir çerçeve yapılmalıdır. Daha sonra oymanın yüz tarafına bir veya iki kat ham bezir sürülüp bir tava içerisinden kaynatılan tutkalı çerçeve içerisine dökülmelidir. Tutkal tuttuktan sonra çerçeveyi söküp donmuş tutkalı dikkatlice oymanın üzerinden kaldırmalıdır. Böylece tutkala oymanın şekli çıkararak uygun olan kalıp elde edilmiş olur, ayrıca bu kalıplar alçıdan da yapılabilir. Böylece kalıp elde edildikten sonra ham bezir, tutkal, kaba kâğıt, İspanyol üstübeci, kaba üstübeç karıştırılarak yumuşak bir macun yapılır. Kalıbın içi neft ile yağlanıp hazırlanan macun ilk olarak el ile bastıra bastıra yerleştirilir. Macun, kalıbın içinden donmadan çıkarılıp yerine yerleştirilir.

İşaret yapmak; işaret önce bir kâğıt üzerine kurşun kalemle çizilmeli ve çizgiler dikiş iğnesiyle düzgün bir şekilde iğnelenmelidir. Kâğıt, işaretlenecek yere konulup üzerine toz tüpü sürüldükten sonra işaret bu zemin üzerine geçirilmeli ve daha sonra boyanmalıdır. Toz tüpü zemin beyaz veya açık renkte ise siyah, zemin siyah ve koyu renk ise açık renkte olmalıdır. Eğer numara veya yazı gibi kolay şeylerin resmi ise kâğıdının üzerine çizilip keskin uçlu bir çakı ile oyulmalı, daha sonra kâğıdı uygun yere koyup içerisi büyük fırça ile boyanmalıdır. İşaret yapılırken fırçayı boyaya az batırmağa dikkat edilmelidir. Adi ince kâğıt oyulmaz ve oyulsa da çabuk yırtılır, fakat kara kalem resim kâğıdı kullanılırsa boyandıkça kâğıt muşamba haline gelerek uzun zaman kullanılır (Gemicilerin Boya Rehberi, 1914).

7. Nakkaşın Fırçaları ve Sağlığının Muhafazası

Tersane-i Amirede halatçı, urgancı, marangoz, nakkaş, demirci, kalafatçı ve halatçı gibi zanaatkarlar vardı. Bu zanaatkarlardan nakkaş, eski Türk dilinde resim yapan, ressam anlamındadır. Nakkaş, Tersane-i Amire'de inşa ve bakımlarda gemilerin boyanmasından sorumludur. Geminin boyanması sırasında fırçalar uzun saplı demirli yassı tarak, kara kalem, pasata fırçaları adıyla birkaç adetti. Fırçalar, genellikle domuz kılından, bazen de samur ve kurt tüyünden imal edilir. Bir fırçanın kılları yapılırken başka malzemeler kullanılmaz ve uzun olurlar. Nakkaşlar, iyi bir fırçaya sahip olabilmek için hayvan kılını ve tüyünü satın alarak kendileri imal ederler. Bir kıyye kıldan beş veya altı fırça yapılabilir. Domuz

tüyünden olan fırçalar, kullanılmadan önce sicim ile boğumlu olup beş santim kadar da uç bırakılır. Böylece, ağzı düzgün olur ve boyayı dağıtarak iyi bir şekilde sürülebilir. Bu fırçalar, zamanla kısılır ve kıaldıktan sonra boğumu kesilerek yine uygun bir boy verilebilir. Resim ve yıldız işlerinde samur tüyünden, maun işlerinde kurt tüyünden ve boya işlerinde ise domuz kılından üretilen fırçalar kullanılmıştır. Domuz tüyünden yapılmış fırçalar kullanıldıktan sonra petrol veya gaz yağıyla temizlenip kurutulduktan sonra saplarından asılmalıdır. Şayet ertesi gün de kullanılacak ise yıkanmayarak içerisinde su bulunan bir tenekeye kılların uçları dibe temas etmemek üzere sapından asılı tutulmalıdır. Böylece asılan fırçalar üç dört gün yumuşak durabilir. Samur ve kurt tüyünden olan fırçalar, petrol, gaz ve sonradan sabun ile yıkanarak güveden de muhafaza edilebilir.

Hiç boya sürülmemiş veya sürülse de bozulmuş yerler tamamen raspa edilmelidir. Bunun için önce macun ve üzerine de iki kat boya kullanılır. Macun çekilirken boya kadar malzemeye ve işçiliğe de ihtiyaç vardır. Bir okka boya 10 metrelik alanı bir kat boyayacağından gemide 400 metrelik mahal için de 40 okka boyaya ihtiyaç vardır. Bir nakkaş, günlük asgari olarak 25 metre mahali bir kat boyayabileceğinden 25 metre bir mahalin dört kat boyanması için 4 ve 100 metre mahal için de 16 güne ihtiyaç duyulur. Bu süre boyanacak mahale göre değişiklikler gösterebilir. Elleri boya bulaşan herhangi bir kimse işini bitirdiği zaman veya petrol ile ellerinin boyasını çıkardıktan sonra kaba üstüviçe ellerini ovalayabilir. Böylece gaz ve petrolün cilde olan etkisini yok ettikten sonra sabun ile yıkanabilir. Eller iyice temizlenmeden yemek yenirse parmaklarından yemeğe nüfuz eden boya ve petrol kokusu ağızda acı ve ağrı meydana getirir. Boyama sırasında üstüviç, sülükon ve diğer zehirli boya tozlarının tenefüs edilmesi de tehlikelidir. Sentene, dabil botum gibi hava cereyan etmeyen yerlerde boya işlerinde çalışan görevlilerin her yarım saatte bir hava almaları gerekir. Kapalı mahallerde petrol yağının kokusu, mangal kömürünün yaptığı etkinin aynısını yaparak zehirleyebilir. Bundan dolayı havasız yerlerde petrol boyalar imal edilmemeli, sentene ve dabil botum gibi mahallerde kullanılan silikona petrol konulmamalıdır (Gemicilerin Boya Rehberi, 1914).

8. Boyalarla İlgili Bazı Değişiklikler

On sekizinci yüzyılda Osmanlı Devleti, bilim ve teknoloji yönünden geri kaldığını fark etti. Avrupa'yı yakalamak amacıyla gözler batıya çevrilerek yenilik hareketleri takip edilmeye başlandı. Bu yenilik hareketlerinin bir kısmı da boyacılık üzerine oldu. 1852 senesinde İtalya'da Sicilyalı mühendis Pirkonsiyo yeni bir boya icat etti. Osmanlı Devleti'nde bazı uzmanlar tarafından bu boyanın birkaç tane kâğıt ve tahta üzerine sürülmüş numuneleri üzerinde incelemeler yapılmasına karar verildi. Ancak boya hakkında kesin bilgiler olmadığından bu numunelerin alınması gereksiz masraflara neden olabiliyordu. Bu nedenle boya ile ilgili incelemeler yarıda bırakılarak numuneler talep edilmedi. (A.MKT.NZD, 67/54, 1852) 1893'te Amerika'nın Şikago ile diğer büyük şehirlerinde boya ve badana yapmak üzere yeni bir makine icat edildi. Bu makine sayesinde tulumba ile boya kullanıldı, böylece yirmi metre kadar bir mahal beş dakika içinde boyanabiliyordu. (HR.TO, 538/68, 1893) Bazı Amerikan gazetelerinde bu makine ile ilgili resimler ve açıklamalar yayınlandı. Osmanlı Devleti'nde bu gazetelerde makine hakkında yayınlanan resimler fark edilerek makinenin fiyatı ve kullanımı hakkında bilgiler talep edildi. Makine hakkında incelemelerden sonra satın alınmalarına karar verildi. (BEO, 213/15973, 1893) 1889 senesinde Rusya'da bir gazetede Yüzbaşı Çandır'ın geminin su altındaki kısmını boyamak için yeni yaptığı bir karışımdan bahsedildi. Şimdiye kadar Rus Donanmasında İngiliz boyası kullanılıyordu. Yüzbaşı Çandır'ın altı sene boyunca yaptığı çalışmalar ve tecrübeler sonunda sonuç veriyordu. Bunun üzerine Sivastopol'da hemen bir fabrika açıldı. Bu boya hakkında verilen iyi raporlar sonucunda Rus Donanmasında da kullanılmaya başladı. (Ceride-i Bahriye, 1889) 1889'da gemilerin karinesi ile şamandıraları için en uygun boya, Londra'da Laim sokağında üretilen Bitomastik idi. Bu boya Colour be

Seimar adı ile İstanbul'da Sadıkiye hanında 30 ve 31 numaralı binada Mösyö Jak Poumgartin tarafından üretilmeye başlandı (Ceride-i Bahriye, 1889).

Gemi boyalarının savaşın etkilerinden korunması hemen hemen bütün Avrupa devletlerinin üzerine düştüğü bir mesele olmuştu. Almanya Devleti Bahriye Dairesi tarafından açık denizlerde seyreden gemilerin düşman filosuna görülmeden yaşayabilmesini sağlayabilecek yeni bir boya ile ilgili tecrübeler yapıldı. Bu konuda Alman gazetelerinin verdikleri bilgilere göre; gökyüzü, deniz ve gemiden yakılan elektrik fenerlerinin rengi dikkate alınarak bütün savaş gemileri nohudi renkte boyanabilirdi. Bu renk ile boyanmış gemi, büyük deniz savaşı manevralarında düşman donanmasına çok fazla yaklaşabilirdi. Hatta gemi üzerinde düşmanın gözüne çarpacak bir şey bulundurmamak için bordaları ile güvertede duran diğer bütün parçalarda aynı renge boyanabilirdi (Ceride-i Bahriye, 1889).

9. Boya Satın Alınması için Yapılan Görüşmeler

1735 senesinde Osmanlı Devleti'nde yeni inşa edilmeye başlanan kalyonların sancak bezlerinin boyanmasına karar verildi. Boyacı esnafları ile görüşmeler yapılarak sancak bezlerinin kırmızıya boyanması için Yuvan Bey, Tersane-i Amire'de istihdam edildi. (AE. SMHD I, 23/1323, 1735) 1802'de ise Tersane-i Amire'de donanma kalyonlarının ve diğer gemilerin yıldızlanmaları için çalışmalara başlandı. Bu amaçla üç ay zarfında yağ, boya, bezir ve altın varak ile diğer malzemeler toplam 6.187 kuruşa satın alındı. Tersane-i Amire'de görev yapan ustalar oldukça uzun bir çalışmadan sonra kalyonlarla gemileri hazır hale getirdi. (C.BH, 108/5209, 1802) 1831'de Tersane-i Amire'ye bağlı Hasköy lengerhanesi ve kalyonlar için Konstantin'den siyah boya, funda kömürü ile İsveç ham demiri satın alındı. Bunlar için toplam 306 kuruş Tersane-i Amire hazinesinden ödendi. (C.BH, 115/5558, 1831) 1834 senesinde Osmanlı Donanması için boya, fırça ve parlaticı diğer malzemelerin satın alınmasına karar verildi. Bu masrafın ödenmesine dair konu muhasebe dairesine arz edildi. Boyacı Fransız Konam Bey ile görüşmeler sonucunda boya ve diğer malzemeler 17240,5 kuruşa satın alındı. Bu paranın Tersane-i Amire hazinesinden ödenmesine dair emir verilerek boyalar temin edildi. (C.BH, 43/2040, 1834) 1855'te Tersane-i Amirede boya ustaları ile görüşmeler yapılarak gemiler yeniden bakıma alındı. (İ.HR, 122/6100, 1855) Donanma kalyonları için satın alınan ve Tersane-i Amire mahzenine teslim edilen iyi siyah boyaların ücreti baş muhasebeye kaydedilerek hazineden ödendi. (AE. SMHD. H, 67/4798) 1835'te Osmanlı Donanma gemileri için 312 okka boya satın alındı. Bu boyaların her bir okkasına yirmişer kuruştan toplam 6.257 kuruş Tersane-i Amire hazinesinden karşılandı. Bu boyalar, Tersane-i Amire mahzenine teslim edilerek gemilerin bakımı tamamlandı. (C.BH, 76/3631, 1835) 1838'de Tersane-i Amire boyacılarından Usta Karabet, Büyükdere Çayırı ile Kıbrıs'ta sarı ve beyaz boya çıkarabileceğine dair arzuhal verildi. Böylece donanmanın ihtiyacı olan boyaları temin edebileceğini belirtiyordu. Bu konu üzerinde yapılan incelemeler sonucunda Usta Karabet'e ruhsat verildi. (Muhasebe, 122/74, 1838) 23 Mayıs 1845 tarihinde Karadeniz boğazının Rumeli tarafında Uskumru ve Bahçe karyelerine bir ve bir buçuk saat uzak mahallerle Azadlı Baruthanesi çevresindeki karyelerde sarı ile beyaz, Anadolu taraflarında ise kırmızı ve sarı boya madenleri bulunuyordu. Bu madenlerin çıkarılması için gerekli şartları taşıdıklarından ruhsatları verilerek işletilmelerine başlandı. Bu gibi madenlerin çıkarılması hem halk ve hem de devlet için faydalı olduğundan şirketlere destek olundu. (İ.DH, 104/5253, 1845) 1863'de Avrupa'dan getirilen uzmanlardan İtalyalı Nakkaş Çiruzsati ve Pasako boyacılık konusunda çalışmalar yapıyordu. İtalyalı nakkaşlar görevlerini tamamladıktan sonra 48.700 kuruşluk maaşlarının ödenmesini istedi. Nakkaşlar, İtalya'ya hemen gitmek istediklerinden bu paranın hızlı bir şekilde verilmesini talep etti. (HR.MKT, 458/81, 1863) 1863'te Boya ve nakkaş olarak Atina'dan getirilen İngiliz tebaası Charles Darbor ile mukavele yapıldı. (Muhasebe, 498/154, 1863) 1863 senesinde ise Wan Lenb tarafından boya imal etmek üzere imtiyazlı bir fabrika açılması hakkında bir talepname

gönderildi. (HR.MKT, 416/30, 1863) 1872’de İzmit Tersanesi için Londra’dan istenen boyacı ustalarına dair Londra sefiri Kostaki Bey’e yazı gönderildi. Kostaki Bey’in Londra’da yaptığı görüşmeler sonucunda, boyacı ustalar İzmit’e doğru yola çıkmışlardı. (ŞD, 95/60, 1874) 1873’te Maliye Nezareti tarafından boğaz içinde Sultaniye civarında bulunan arazide sarı boya madenine dair imtiyaz verilmesine karar verildi. Bu imtiyaz 20 sene boyunca Abdülfetih Efendi ile Sıvacı oğlu Artin ve Şebati oğlu Tekfur Beyler tarafından talep edildi. Bu başvurular üzerine Maden Nizamnamesi esas alınarak toprağın bulunduğu mahallerin bedeli ödendi ve sekiz sene boyunca boya madeni çıkarılmaya başlandı. (İ.MVL, 479/21732, 1873) Musul ve Bağdat gibi bazı vilayetlerde boya vergileri alınıp bazı vilayetlerden ise alınmıyordu. Bu nedenle boyaya ait tüm vergilerin kaldırılması talep edildi. Mamuratüllaziz gibi bazı vilayetlerde boyahanelerin de varidatı, belediye dairelerine ait olmak üzere boyacılar tarafından doğrudan idare ediliyordu. Bunun üzerine boya vergileri kaldırılıp boya gelirleri ile ilgili düzenlemeler yapıldı. (İ.HR, 17/69, 1882) Dıraç limanına yerleştirilen şamandıranın boyanmasına karar verildi. Bunun için boya ve diğer masrafların liman hasılatından ödenmesine dair 2 Mayıs 1892 tarihinde yazı gönderildi. Boya ve diğer malzemeler satın alınıp birisi iskeleden dört mil diğeri yedi mil mesafede bulunan şamandıralar hemen boyandı. Bu duruma hem Osmanlı hem de yabancı gemi kaptanları memnuniyetlerini bildirdiler. (Ceride-i Bahriye, 1892) 1892’de Fransız konsolosunun verdiği bilgilere göre Bursa’da kızılboya kökünün kullanılabileceği sular ve diğer malzemeler vardı. Bursa’da bir boya fabrikası inşası için izin verilmesi talep edildi. (Y.PRK.ASK, 84/76, 1892) Tersane-i Amire ile ticaret gemileri için boya imal eden nakkaşhanenin eski ve bakımsız olmasından dolayı zorluklar yaşanıyordu. Bunun üzerine ıslahat hareketlerine girilerek yeni bir nakkaşhane inşasına başlandı. Bu inşaat kısa süre içinde tamamlandı ve imalatın çok hızlı bir şekilde yerine getirilebilmesi için Avrupa’dan yeni sistem makine ile tezgâhlar hemen mahallerine yerleştirildi. Yeni nakkaşhane için denizcilerinde hazır buldukları sırada resmi bir açılış yapıldı. (Y.MTV, 120/108, 1895) 1895’te Mösyö Gaspar Mayer, yeni bir boya icat ettiğine dair ihtira beratı verilmesini talep etti. Bu amaçla boya hakkında layiha ve numuneler sunuldu. Osmanlı hükümeti tarafından bir komisyon bu numuneleri inceledi ve bunun yeni bir boya olmadığına karar verildi. Bu nedenle Mösyö Gaspar’a ihtira beratı verilmedi. (Y.A.HUS, 178/22, 1895) 23 Mayıs 1895 tarihinde bahriye mühimmat ambarıyla, nakkaşhane ve elbise deposunun çatıları ahşap olmasından dolayı zamanla köhneleşip tehlikeli bir hale geldi. Bu çatıların yeniden inşası için sunulan resim ile keşif defterinde gösterildiği gibi bunlar, 104.201 kuruş ile yeniden imal edilebilirdi. Bu masrafı aşmayacak şekilde bütçeye dâhil edilerek Tersane-i Amire memurlarının görüşmeleri ve imalat komisyonunun kararı üzerine şurayı bahriyeden gerekenlerin yapılmasına dair izin istendi. (İ.BH, 1/26, 1895)

1897’de Boya fabrikası müteahhidi Refael Efendinin iyi hizmetlerinden dolayı dördüncü rütbeden Osmanlı nişanı verilmesine dair ser askeriyeden irade-i seniyye gönderildi. Rafael Efendinin çalışmaları incelenerek Osmanlı nişanı verilmesi için tören düzenlenmesine karar verildi. (İ.TAL, 123/75, 1897) 1902 senesinde İstanbul’da otuz beş sene kara boya çıkarıp imal edilmesine dair imtiyaz verildi. Bunun içinde bir envaim şirketi açılmasına müsaade edildi. Bu boya sanayinin yapılması hakkında cemiyet azasından Faik Bey tarafından bir arzuhal sunuldu. Bu arzuhalde İstanbul ve çevresinde sanayi ve ticaretin ilerlemesine yardımcı olunması talep ediliyordu. Boya şirketinin imtiyaz süresi boyunca senelik 55 Osmanlı lirası vereceği mukavelede taahhüt edilerek gerekenlerin yapılması için izin istendi. (DH.MKT, 441/17, 1902) Nakkaşhane için Avrupa’dan 50 fiç 9.000 okka üstübeğin bedeli 23.000 kuruş olup gümrük resmi ise 1.840 kuruştı. (Muhasebe, 1783/132, 1900) 1905’te Tophane-i Amire fabrikası önünde bulunan marangozhane, merkez ve eşya ambarlarıyla nakkaşhane ve matbahnenin korkuluklarının tamire ihtiyacı olduğu görüldü. Ambarlarda bulunan eşyaların zarar görmemesine dair Ahmed Paşa tarafından yazı gönderildi. Bu yazıda ambarların tamirinin 30.783 kuruşa yapılmasının mümkün olduğu hakkında ebniye komisyonundan yazı ile keşif defteri verildi. Bu keşif defterine göre

tasarrufa riayet edilerek mümkün olduğu kadar az bir masraf yapıldı. (İ.TPH, 14/7, 1905) Tophane-i Amire'nin sahil tarafında bulunan marangozhane, kereste, merkez ile eşya ambarları, nakkaşhane ve matbahane nin keşifleri yapıldı. Bu incelemeler sonunda mecdi 19 kuruş hesabıyla 30.780 kuruşa boyanabileceklerine dair Nakkaş Halil Efendi tarafından bir arzihal gönderildi. (ŞD, 3053/4, 1908) Boyacı esnafından İspas oğlu Yova'nın Manastır ve Karabağ civarında bulunan Nazım Sultan ve zevci İbrahim Paşa Vakfında bulunan 4.160 metrelik bahçeye boya ve tulumba fabrikası inşa edilebilmesi için izin istendi. Bu talep üzerine evrak ve mazbata nezaret tarafından incelemeye alındı. (ŞD, 85/44, 1913) 1911'de Osmanlı Donanmasında gemilerin bakımları sırasında yeni boyalara ihtiyaç duyuldu. Osmanlı Devleti'nde Meclis-i Mebusan ve Meclis-i Ayan tarafından boyaların alımı kararname si kabul edilerek masraflarla ilgili Maliye Nezaretine tebligat yapıldı (BEO, 3852/288839, 1911).

10. Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmada Osmanlı Devleti'nde Gemi Boya Risalesine göre gemi boya kaplamalarında dikkat edilen konular ve yapılan çalışmalar anlatılmıştır. Bu inceleme, Başbakanlık Osmanlı Arşivi, Deniz Müzesi Arşivi ve risaleler esas alınarak hazırlanmıştır. Bunun için önce arşivlerde taramalar yapılmış ve Osmanlıca belgeler Türkçeye transkript edilmiştir. Arşiv belgeleri, Arapça, Farsça ve Türkçe kullanılarak yazıldığından Osmanlıca lügatler kullanılarak önce günümüz Türkçesine çevirileri yapılmış ve daha sonra yorumlanarak anlaşılabilir bir hale getirilmiştir.

On sekizinci yüzyılın sonlarından itibaren Avrupa'da gemiler demir ve çelikten inşa edilerek kömürle hareket etti. İnsanlar, demir ve çelikten yapılan bu gemilerle ticaret, seyahat, savaşmak veya keşfetmek amacıyla okyanuslarda gezinmeye başladı. Gemilerin bulunduğu ve çalıştığı çevre koşulları ile savaş, kaza gibi durumlar sonucunda malzemelerin paslanma, aşınma ve kırılma gibi zamanları oluyordu. Boyasız demir ve sac levhalar, sudan ve havanın rutubetinden paslandıklarında ve raspa olduklarında incelirdi. Boyasız tahtalar da aynı suretle birkaç sene zarfında çürürdü. Gemilerde küçük deniz canlıları, su hattı dümen kısımlarında daha fazla görünür ve gemi malzemelerinin çalışmasını engellerdi. Bu yüzden sık sık yıkamanın zor olmasından dolayı boya kaplamaları uygulandı. Boya, demiri ve ahşabı çürümekten muhafaza edebiliyordu. Boya, tahta ve sac aralarına toplanması muhtemel zararlı böcek ve maddelerden uzak tutarak insan sağlığını da koruyordu. Boyaların seçiminde ise uygulanacak yüzeyin malzemesine ve esnekliğine dikkat edildi.

Osmanlı Devleti'nde islahat çalışmaları sonucunda donanma ve denizciliğe önem verilerek gemilerin sayısı da zamanla artmaya başladı. Gemilerin boyanmasının önemi fark edilerek hem geminin ömrünü uzatmak hem de görünümünün bozulmaması için Avrupa'daki gelişmeler takip edildi. Gemilerin dış tabakalarındaki kirlenmeyi önlemek, insan sağlığı ve deniz çevresi üzerinde olumsuz etkileri azaltmak amacıyla boya kaplamalarına başlandı. Bir süre sonra gemilerin boyanmasında dikkat edilmesi gereken konularla ilgili talimatnameler ve rehberler yayınlandı. Bu rehberler ve talimatnameler ile gemi yüzeyi kirliliğinin deniz yolu taşımacılığı verimini doğrudan etkilediği fark edilerek boya kaplamalarına daha fazla önem verildi. Gemilerin bölümlerinin korunması ve estetik görünümü için özellikle dayanıklı etkin boyalar kullanılmasına çalışıldı. Osmanlı Devleti'nde gemilerin boya kaplamalarına dikkat edilerek hem deniz canlılarının gemi yüzeylerine yapışıp büyümesine engel olunmuş hem de pürüzlür düzeltilmişti. Gemilerin su altı yüzeyi temiz ve pürüzsüz hale getirilerek daha az yakıt yakmaları sağlanmıştı. Boyaların seçilmesi, yapılması ve uygulanmasında özellikle bu eserler esas alındı. Böylece geminin boyasının uzun süre kullanılması sağlanarak pas, kir ve diğer zararlı etkenlere de engel olunmuştu.

11. Kaynaklar

Başbakanlık Osmanlı Arşivi (BOA)

Ali Emiri Mahmud I (AE.SMHD.I), 23/1323, 7 8 1147, 67/4798, 16 Zilkade 1247 (17 Nisan 1832)

Babiali Evrak Odası (BEO), 213/15973, 19 Zilkade 1310 (4 Haziran 1893), 3852/288839, 29 Muharrem 1329 (30 Ocak 1911)

Cevdet-i Bahriye (C.BH), 43/2040, 8 Rebiülahir 1250 (14 Ağustos 1834), 108/5209, 29 Rebiülahir 1217 (27 Ekim 1802), 115/5558, 27 Zihicce 1246 (8 Haziran 1831), 76/3631, 16 Zikade 1250 (16 Mart 1835)

Dahiliye Mektubi (DH.MKT), 441/17-5, 1 Safer 1319 (20 Mayıs 1901)

Hariciye Mektubi (HR.MKT), 108/33, 24 Şaban 1271 (12 Mayıs 1855), 458/81, 18 Cemaziyelevvel 1280 (31 Ekim 1863), 416/30-9, 1279 (1862)

İrade Bahriye (İ.BH), 1/26, 7 Muharrem 1311 (21 Temmuz 1893)

İrade Tophane (İ.TPH), 14/7, 13 Safer 1323 (19 Nisan 1905)

İrade Meclis-i Mahsus (İ.MVL), 75/1460, 21 Rebiülevvel 1262 (19 Mart 1846), 479/21732, 9 Recep 1279 (19 Mart 1846)

İrade Taltifat (İ.TAL), 123/75, 19 Cemaziyelahir 1315 (15 Kasım 1897)

İrade Dahiliye (İ.DH), 104/5253, 14 Cemaziyelahir 1261 (20 Haziran 1845)

İrade Hariciye (İ.HR, 17/69), 27 Zilhicce 1299 (9 Kasım 1882)

Sadaret Mektubi Kalemi Nezaret ve Deavi Evrakı (A.MKT.NZD), 67/54, 18 Safer 1269 (1 Aralık 1852)

Şura-yı Devlet (ŞD), 95/60, 21 Cemaziyelahir 1291 (5 Ağustos 1874), 85/44, 26 Zilhicce 1331 (26 Kasım 1913), 3053/4, 6 Recep 1326 (4 Ağustos 1908)

Tercüme Odası (HR.TO), 538/68, 9 Cemaziyelevvel 1893, 407/18, 24 Cemaziyelahir 1846

Yıldız Mütenevvi Maruzat (Y.MTV), 120/108, 28 Zilkade 1312 (23 Mayıs 1895), 15/29, 18 Şevval 1301 (23 Mayıs 1895)

Yıldız Perakende Evrakı Askeri Maruzat (Y.PRK.ASK), 84/76, 10 Safer 1310 (3 Eylül 1892)

Yıldız Sadaret Hususi Maruzat Evrakı (Y.A.HUS), 178/22, 16 Recep 1301 (12 Mayıs 1884)

Zabtiye Nezareti (ZB), 361/117, 10 Cemaziyelahir 1318 (5 Ekim 1900)

Deniz Müzesi Arşivi (DMA)

Muhasebe, 122/74, 21 Şubat 1838

Muhasebe, 1783/132, 11 Haziran 1900

Muhasebe, 498/154, 24 Ekim 1863

Tersane, 495/c/84B, 16 Şubat 1890

Telif Eserler

Ceride-i Bahriye, Numara: 7 Muharrem 1307 (3 Eylül 1889)

Ceride-i Bahriye, Numara: 82, 25 Zilhacce 1309 (21 Temmuz 1892)

Ceride-i Bahriye, Numara: 123, 1306 (1889)

Ceride-i Bahriye, Numara: 78, 1306 (1889)

Demirel, Yiğit Kemal. (2018). Gemi Boyalarında Yeni Ufuklar. GMO Shipmar, 213, 37-53

Hüseyin Hüsnü, Gemicilerin Boya Rehberi. 1332 (1914). Bahriye Matbaası

Gencer, Ali İhsan. (1986). Türk Denizcilik Tarihi Araştırmaları. Türkiye Denizciler Sendikası Eğitim Dizisi 2, İstanbul

Gülen, Nejat. (2009). Deniz Gücünün Osmanlı Tarihi Üzerine Etkileri, İstanbul

Mahan, Alfred Thayer. (2003). Deniz Gücünün Tarih Üzerine Etkisi, Q Matris Yayınları, İstanbul

Masmanacı, Nihat Mustafa. (2011). Geçmişten geleceğe Zehirli Boya Sistemleri

Okay, Oya S. (2004). Antifouling İçeren Gemi Boyalarının Uluslararası Kurallar Çerçevesinde Kirletici Etkilerinin İncelenmesi, Gemi Mühendisliği ve Sanayimiz Sempozyumu, 1-5

Olgaç, Necmettin. (1952). Türk Denizciliğine Umumi Bir Bakış, Deniz Basımevi

R. Lambourne and T.A. Strivens (1999). Paint and Surface Coating, Theory and Practice, England

T.C. Milli Eğitim Bakanlığı. (2011). Gemi Yapımı, Tekne ve Yat Yüzey İşlemleri, Ankara

Yıldız, Arzu. (2008). Türkiye’de Tersanelerin Tarihi ve Gemi İnşa Sanayisinin Gelişimi. Mühendis ve Makine, 578 (49), 23-37

Vitruvius. (2019). Mimarlık Üzerine. Çeviri: Çiğdem Dürüşken. Alfa Yayınları, İstanbul

EKLER

Ek 1. BOA, DH.MKT, 2353/48.

Huzur-ı Ali Hazreti Sadaretpenahiye

Deniz polisi sandallarının tamirat ve telvinâtının komisyonca kararlaştırıldığı vechle birbirini üzerine ikişer yüz guruşa olmak üzere memûr-ı mahsûsa nezâreti altında icrâsı ve mûktezi eşya-yı mütenevvia için melfûf defterde muharrer fiyatlarla mübâyaaası zımında sekiz bin guruşun sarfına lüzûm görülenlerin mümkün mertebe tasarruf riyasetiyle tertib-î mahsûsa olan yedi bin beş yüz guruşu tecavüz ettirilmemek üzere tamirat ve mübayaata mübaşeret olunması için maslahata mebni polis müdüriyetine mezuniyet verildiğinden meblağı mezbûrun sarfı zımında mezuniyeti havi zabtiye nezâreti aliyesine alınan 30 Nisan 1316 tarih ve iki yüz numaralı tezkere melfufuyla takdim kılındı. İcâbının icrâsı menût müsaade-i aliye sadaretpenâhileri olbabda

BOA, Y.PRK.ASK, 90/34.

Talia Vapuru hümayununun görünen lüzum ve ihtiyaca mebni az bir zaman içinde havuza konularak altı tathir ve telvin ettirmek üzere Tersâne-i Amireye aldırılacağıın ârz ve ifadesine cüret kılındı. Olbabda emr-u fermân hazret-i min'el-emrindir. Bahriye Nazırı 23 Şevval 1310.

BOA, MV, 159/51.

Tezkere-i mezkûrede gönderildiği üzere Tersâne-i Amirenin bir numaralı havuz kıyağıyla Peleng-i Derya Torpidogeçerinin telvinine muktezi olub yalnız bir fabrika tarafından imal edilmesine binâen bi'l-münakaza tedariki mümkün olamayan otuz fuç zehirli boyasının oradan mübayaasıyla bedeli bulunan iki yüz liranın tertib-i mahsûsadan tesviyesi hususunun cevaben nezâreti müşarünileyhede tebliğ ve bedelat-ı muhasebat riyasetine malumat itası tezekkür kılındı.

Bahriye Nezaretinin 24 Ağustos 1327 tarihli tezkeresi okundu.

Ek 2. A.MKT.MHM, 763/38-1-7



Deplasman Tipi Gemiler için Sayısal Analizlerin Gerçekleşmesi ve Doğrulaması

Sarih Sarı¹, Ali Doğrul²

¹ Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

² Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Deniz Harp Okulu, Milli Savunma Üniversitesi, Tuzla, İstanbul, Türkiye

¹ (sorumlu yazar), sarih@yildiz.edu.tr, ORCID: [0000-0002-0665-5046](https://orcid.org/0000-0002-0665-5046)

² adogrul@dho.edu.tr, [0000-0003-3236-555X](https://orcid.org/0000-0003-3236-555X)

ÖZET

Gemilerde güç ihtiyacı ve yakıt tüketimini en aza indirmek çok önemlidir, bu sayede daha çevreci gemiler elde edilmiş olur. Bu hedef, gemilerin hidrodinamik performansının tahmin edilmesi ile elde edilebilir. Bu bağlamda, çeşitli araştırmacılar tarafından deneysel ve sayısal yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalar model deneylerine dayanırken sayısal yöntemler viskoz ve potansiyel akış kabullerine dayanmaktadır. Bu çalışmada çeşitli tipte gemiler sayısal olarak incelenerek hem gerçekleştirme hem de doğrulama adına kapsamlı bir veri setinin sunulması amaçlanmıştır. Sayısal yöntemin doğruluğunu ve hassasiyetini göstermek adına iki konteyner gemisi ve bir muharip suüstü gemisi için RANS denklemlerini çözen sayısal bir yaklaşım kullanılmıştır. Bu gemiler KRISO konteyner gemisi (KCS), Duisburg test gemisi (DTC) ve ONR (Office of Naval Research) tarafından geliştirilen teknedir. Bu gemiler etrafındaki akış incelenirken serbest yüzey etkileri hesaba katılmıştır. Akış analizleri sakin su koşullarında gerçekleştirilmiştir ve gemiler paralel batma ve trim hareketine karşı serbest bırakılmıştır. Belirsizlik çalışması için ITTC ve AIAA tarafından önerilen GCI yöntemi kullanılmıştır. Sık, orta ve seyrek olacak şekilde ağ boyutu ve zaman adımı açısından farklı analiz setleri kurgulanmıştır. Bu analiz setleri sabit bir iyileştirme oranıyla ($\sqrt{2}$) oluşturulmuştur. Belirsizlik amaçlı sayısal analizler her bir geminin dizayn Froude sayısında gerçekleştirilmiştir. Belirsizlik değerleri toplam direnç açısından elde edilmiştir. Bunu takiben, düşük ve orta hızları kapsayacak şekilde geniş bir Froude sayısı aralığında her bir model gemi için kapsamlı bir doğrulama çalışması yapılmıştır. Doğrulama, sayısal sonuçların erişilebilen deneysel sonuçlarla kıyaslanmasıyla yapılmıştır. Buna ek olarak, sonuçlar literatürde mevcut diğer sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Doğrulama, toplam direnç, paralel batma ve trim açısı parametreleri üzerinden yapılmıştır. Bu çalışma, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yönteminin gemi hidrodinamik performansını yeterli düzeyde tahmin edebildiğini göstermiştir. Bu sonuçlara göre karşılaştırma için deneysel veri eksikliğinde sayısal yöntem düşük belirsizlik değerleriyle güvenilirlerdir.

Anahtar kelimeler: Karşılaştırma, HAD, RANS, Toplam Direnç, Belirsizlik, Doğrulama.

Makale geçmişi: Geliş 24/04/2021 – Kabul 28/06/2021

Verification and Validation of Numerical Simulations of Displacement Type Vessels

Sarih Sari¹, Ali Dođrul²

¹Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey

²Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Turkish Naval Academy, National Defence University, Tuzla, Istanbul, Turkey

¹ (corresponding author) sarih@yildiz.edu.tr; ORCID: [0000-0002-0665-5046](https://orcid.org/0000-0002-0665-5046)

² adogrul@dho.edu.tr; ORCID: [0000-0003-3236-555X](https://orcid.org/0000-0003-3236-555X)

ABSTRACT

It is crucial to reduce the power need and fuel consumption of ships, thus eco-friendly ship design can be achieved. This goal can be achieved with the accurate prediction of the hydrodynamic performance of ships. In this manner, numerical and experimental methods are widely used by many researchers. Experimental studies are based on towing tank tests while the numerical methods are based on viscous and potential flow assumptions. In this study, it is aimed to investigate different types of ship models to provide a comprehensive data set. A numerical approach solving RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) equations was employed for two container ships and a naval surface combatant to show the precision and accuracy of the numerical method. These vessels are KRISO container ship (KCS), Duisburg test case (DTC) and ONR Tumblehome (ONRT) developed by the Office of Naval Research. The flow around these vessels was investigated by taking the free surface into account. The flow analyses were carried out in calm water conditions and the ships were set to be free to sinkage and trim. For the verification study, the GCI method, which is recommended by ITTC (International Towing Tank Conference) and AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics), was employed. Fine, medium and coarse cases were generated with different grid sizes and time step sizes. These cases were generated by using a constant refinement ratio ($\sqrt{2}$). The numerical analyses for the verification purpose were conducted at the design Froude number of each model ship. The uncertainty values were obtained for the total resistance. Following this, a comprehensive validation study was conducted for each ship model in a wide range of Froude numbers, covering low and moderate speeds. The validation was done by comparing the numerical results with the available experimental data. In addition to this, the results were compared with other existing numerical results in the literature. The validation was done in terms of total resistance, sinkage and trim parameters. This study showed that the computational fluid dynamics (CFD) method can sufficiently estimate the ship's hydrodynamic performance. Within these results, when there is a lack of experimental data for comparison, the numerical method is again reliable having low spatial and temporal uncertainty values.

Keywords: Benchmark, CFD, RANS, Total Resistance, Uncertainty, Validation.

Article history: Received 24/04/2021 – Accepted 28/06/2021

1. Introduction

The hydrodynamics of displacement type vessels is an essential field to study to obtain optimum hull forms. Within this aspect, the hydrodynamic performance of these vessels is studied by using several methods. The model experiments are conducted to measure the total resistance of the ship in the model scale. Computational methods are also widely used for the prediction of hydrodynamic performance of various ship types. These methods are the potential flow and viscous methods. The potential method is suitable to observe wave resistance and wave patterns while neglecting the viscous effects. On the other hand, RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) solvers based on the viscous flow are used by researchers. The flow field around the hull can be modeled considering viscous and free surface effects together.

Several researches were made to predict the total resistance and power of the ships. For this purpose, benchmark ship models were designed and tested in towing tanks around the world. These model experiments provide significant experimental data for validation purposes. The benchmark models are mostly displacement type ships and calm water resistance data of these models can be found easily in the open literature. Thus, several numerical and experimental studies focusing on validation and numerical prediction of ship hydrodynamics have been carried out. For this purpose, Korean Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO) have developed container and crude carrier type ships. KCS AND KVLCC2 (KRISO Very Large Crude Carrier) hulls were tested comprehensively in a towing tank and the flow field was observed in terms of various parameters. Total resistance, wake profiles along the hull and the nominal wakefields were obtained for various Froude numbers (Kim et al., 2001).

KCS and KVLCC2 hulls were analyzed for calm water resistance prediction in different scales (Can et al., 2020; Dogrul et al., 2020; Ozdemir et al., 2016; Pereira et al., 2017; S. Van et al., 2011; S. H. Van et al., 2006; Zhang, 2010). Besides, the self-propulsion performance of these models was also calculated by several studies (Carrica et al., 2011; Shen et al., 2015).

Another container vessel was designed in University of Duisburg-Essen to investigate the flow field and obtain detailed data in various topics such as calm water resistance and self-propulsion, seakeeping. Duisburg Test Case (DTC) model was first investigated to estimate total resistance and self-propulsion performance experimentally (Moctar et al., 2012). This model was mostly used for the prediction of hydrodynamic performance in confined and/or shallow water numerically (Kok et al., 2020; Terziev et al., 2018; Tezdogan et al., 2016). Also, a recent experimental study was conducted for the prediction of self-propulsion characteristics in a different model scale (Kinaci et al., 2020).

ONR Tumblehome designed by the Office of Naval Research is a pre-design form of Zumwalt class US destroyer. A comprehensive experimental study of ONRT was performed in calm water for both bare and appended hull forms (Cook, 2011). Another experimental study was conducted for the bare hull for additional Froude numbers to obtain calm water hydrodynamic parameters (C. Delen & Bal, 2019). A numerical study was carried out in different scales including the full scale to determine the resistance and self-propulsion characteristics of ONRT (C. Delen et al., 2020). Another numerical study was conducted to investigate the hydrodynamics of ONRT by captive model analyses (Guo et al., 2018).

In this study, three benchmark ships were investigated in model scale. These benchmark models were chosen as KCS, DTC and ONRT hulls. The numerical analyses were performed using the RANS method. Firstly, the numerical approach was verified using the GCI method through grid and time step for all ship models. The numerical uncertainty values of all three ship models were presented in terms of grid spacing and time step size. Following this, the numerical analyses were extended to several Froude numbers. The results were validated against various numerical and experimental studies through total

resistance coefficient, sinkage and trim values. The numerical results of KCS model were compared with the results of different experimental data. DTC model was compared in terms of total resistance because of the lack of experimental data of trim and sinkage. ONR Tumblehome model was analyzed and the results were compared with different experimental and numerical results. These numerical/experimental results belong to different solvers/towing tanks having different bias errors and cover different ranges of Froude numbers. The present study covers a wider range of Froude numbers for the ONRT hull. As a concluding remark, a comprehensive numerical data was provided to the literature for three types of ship hulls including the numerical verification in terms of spatial and temporal uncertainty.

2. Theoretical Background

Since the flow phenomenon investigated in this study is time-dependent, unsteady RANS approach was employed for the analyses. For the uncertainty assessment, the numerical uncertainty values were calculated both spatially and temporally. The numerical approach and the verification procedure were explained in the following sub-chapters. The total resistance was decomposed into its components and the frictional resistance was also compared with the empirical one calculated by ITTC 1957 formulation.

2.1 URANS Approach

A commercial CFD software solving unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (URANS) equations was used in the numerical analyses. The continuity equation and the momentum equations are the governing equations. The flow is considered incompressible and turbulent. The continuity equation can be given as:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

The mean momentum equation is given in tensor notation with Cartesian coordinates:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (2)$$

Here, ρ represents the density while U_i is the velocity vector and P stands for the pressure. The last two terms represent the viscous stress tensor and Reynolds stress tensor while ν is the kinematic viscosity.

A computational domain was created to simulate the flow around the ship model. The finite volume method (FVM) was used for the domain discretization and the governing equations were solved. A first-order temporal discretization and a second-order upwind convection scheme were applied in solving the momentum equations. SIMPLE type solution algorithm was employed.

The turbulence in the flow was modeled using the k- ϵ turbulence model which is very common in ship hydrodynamics applications (Tezdogan et al., 2015). The details about the turbulence model can be found in several references (Menter, 1994; Menter, 2009; Wilcox, 2008).

This study focuses on the flow around different ship models moving in calm water. For this reason, the free surface and the interaction between the air and water phases were modeled by utilizing the Volume of Fluid (VOF) method with the HRIC (High Resolutiin Interface Capturing) technique (Ferziger et al., 2020).

2.2 Numerical Method

The computational domain dimensions were chosen following the ITTC recommendations (ITTC, 2014a). Half of the ship was modeled to minimize the computing time because the ship models are designed axisymmetric. Since the free surface effects were taken into account, the inlet, top and bottom surfaces were defined as velocity inlet. The outlet was set to be pressure outlet. The side surfaces were defined as symmetry planes while the surface of the ship model was defined as no-slip wall. The computational domain was created in accordance with the ITTC recommendations (ITTC, 2014a). The computational domain dimensions are $2L_{PP}$ in the upstream and $3L_{PP}$ in the downstream direction. The width of the domain is $1.5L_{PP}$ while the domain is modeled with the half of the model. And the total height of the domain is $3L_{PP}$.

The computational domain was discretized with finite hexahedral elements using the trimmer mesh algorithm. Besides, local mesh refinements were made around the hull, wake region and free surface. The prism layer near the hull surface was modeled with caution to keep the wall y^+ values between 30 and 300. Figure 1 shows the grid structure applied on the computational domain and hull surfaces.

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \quad (3)$$

Here, y is the first cell size near the wall, u_τ is the frictional velocity and ν is the kinematic viscosity.

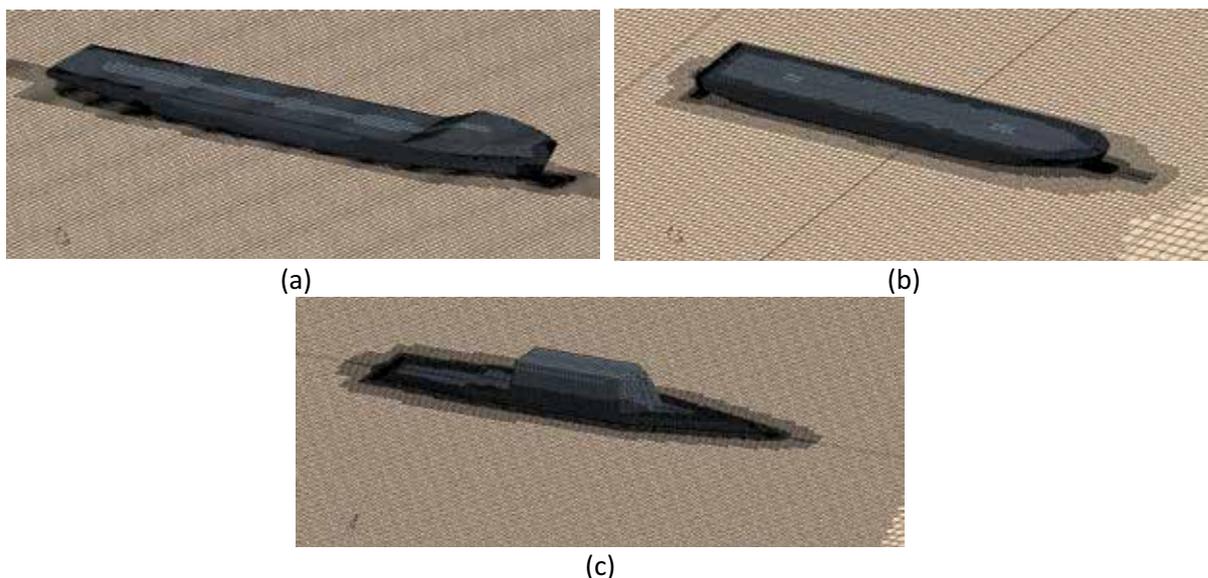


Figure 1. Grid structure applied for KCS (a), DTC (b) and ONRT (c).

2.3 Grid Convergence Index (GCI)

The uncertainty assessment was conducted using the GCI method through time step and grid sizes. GCI method which is based on Richardson extrapolation (Richardson, 1911) was first proposed by

Roache (Roache, 1998) and the revised procedure (Celik et al., 2008) is commonly used for uncertainty studies. Grid Convergence Index method is recommended by ITTC (ITTC, 2014b) and AIAA (Cosner et al., 2006) for the numerical uncertainty calculations. The details of the method can be found in the literature (Celik et al., 2008; Xing and Stern, 2010).

The numerical uncertainty was obtained by using three different cases of grid resolution and time step. Fine, medium and coarse analysis cases were generated using a refinement ratio of $\sqrt{2}$ that is also used by similar recent studies (Dogrul et al., 2020; Kahramanoglu et al., 2020; Sezen et al., 2018). The solution scalar in the calculation was chosen as the total resistance and the numerical uncertainty values were calculated at the design speed of each ship model. The uncertainty results can be found in the next chapter.

3. Ship Main Particulars

In this study, the well-known benchmark vessels were investigated numerically in model scale. These vessels are the KRISO container ship, Duisburg Test Case and ONR Tumblehome. The main particulars and 3-D views of each model were presented.

The main particulars of each ship in the model scale are given in Table 1. Figure 2 presents the 3-D views of the models. All three models have a bulbous bow and transom stern geometry. ONRT model has its superstructure however the aerodynamic effects were neglected in this study. The first two models are container ships while the last one is a surface combatant that is a pre-contract design of Zumwalt class destroyer (Cook, 2011).

Table 1. Main particulars of the benchmark ship models.

Main Particular	Symbol	KCS	DTC	ONRT
Scale	λ	31.60	59.407	48.935
Length	L (m)	7.3575	5.976	3.147
Beam waterline	B_{WL} (m)	1.0190	0.859	0.384
Draught	T (m)	0.3418	0.244	0.112
Displacement	Δ (m ³)	1.6489	0.827	0.0727
Wetted surface area	S (m ²)	9.5117	6.243	1.345
Block coefficient	C_B	0.651	0.661	0.535

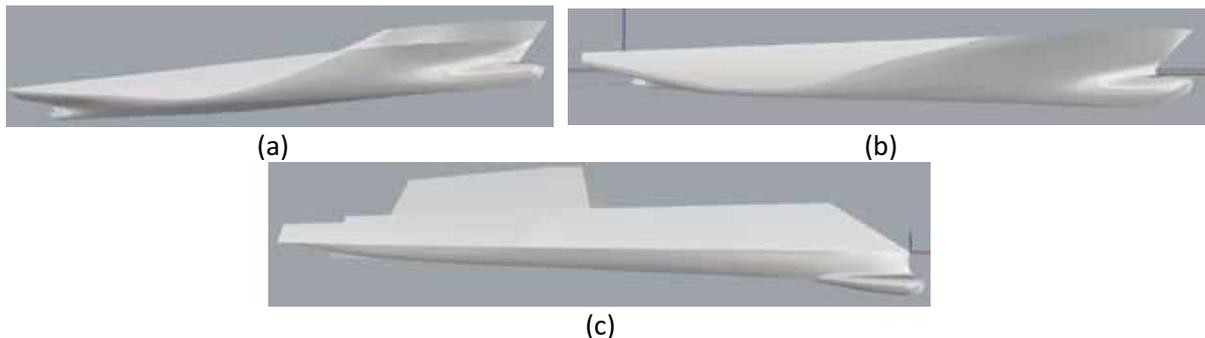


Figure 2. Perspective view of KCS (a), DTC (b) and ONRT (c).

4. Numerical Results

Numerical analyses were performed for three benchmark models at various speeds and the results were discussed in terms of total resistance, sinkage and trim. The numerical method was first verified with an appropriate method. Following this, the numerical study was extended to cover a wide range of ship speeds for a comprehensive validation purpose.

4.1. Verification Study

The uncertainty assessment was done in spatial and temporal manner using the GCI method. Fine, medium and coarse analysis cases were created by changing the grid size and time step size as recommended in several studies (Celik et al., 2008; Roache, 1998; Xing and Stern, 2010). The numerical uncertainties were calculated at the design Froude number of each ship model. As can be seen from Table 2 and 3, the uncertainty study was conducted with a tree-grid sensitivity. In spatial uncertainty, all three cases were fit for GCI method, however, KCS and DTC models showed oscillating convergence. In this manner, a finer mesh was adopted and the uncertainty value was calculated using an analysis set of four cases. Also, the temporal uncertainty for the KCS model was calculated with a two-grid sensitivity by using the fine and medium cases since the convergence condition (R) is higher than one (Roache, 1997). The spatial uncertainty study was carried out for fine, medium and coarse grid sizes at a fixed time step while the temporal uncertainty was calculated for fine, medium and coarse time step sizes at a fixed grid size (Eça et al., 2019).

Table 2. Verification study for spatial uncertainty.

Parameter	R_T (KCS)	R_T (DTC)	R_T (ONRT)
N_1	921097	1106898	1907969
N_2	527246	646240	1465159
N_3	348191	429861	973437
φ_1	85.8018	33.3128	3.6095
φ_2	85.3419	33.0741	3.6261
φ_3	87.9133	35.0722	3.8981
R	-0.1788	-0.1194	0.061
U_G (%)	1.230	2.640	0.038

According to the spatial uncertainty, the numerical approach has an oscillating convergence (Table 2) for three ship models since the convergence condition (R) is lower than zero (Stern et al., 2001). For oscillating convergence, the uncertainty values were calculated as described in the related references. The temporal uncertainty has a monotonic convergence trend excluding the KCS case as shown in Table 3. A two-grid GCI approach was employed in this case. In Table 2 and 3, N_i and Δt_i stand for the grid number and time step size for fine, medium and coarse cases. φ belongs to the scaler function for the relevant grid number or time step size. R is the convergence condition. U_G and U_T are the spatial and temporal uncertainty values, respectively.

Table 3. Verification study for temporal uncertainty.

Parameter	R_T (KCS)	R_T (DTC)	R_T (ONRT)
Δt_1	0.040	0.040	0.020
Δt_2	0.056	0.056	0.028
Δt_3	0.080	0.080	0.040
φ_1	85.8018	33.3128	3.6095
φ_2	86.1456	33.5116	3.6164
φ_3	86.4076	33.8449	3.6348
R	1.3122	0.5966	0.3753
U_T (%)	0.0120	1.1033	0.1433

The total uncertainty in the numerical analyses was calculated with the following equation while considering the iterative uncertainty (U_I) as zero (Larsson and Zou, 2014).

$$U_{SN} = \sqrt{U_G^2 + U_T^2 + U_I^2} \quad (4)$$

The total uncertainty was calculated as given in Table 4. The validation uncertainty U_V was not calculated due to the lack of experimental uncertainty data.

Table 4. Total uncertainty values.

Ship	U_{SN} (%)
KCS	1.230
DTC	2.861
ONRT	0.3772

Within the uncertainty assessment, the rest of the analyses for all ship models were conducted using the fine grid and fine time step size.

4.2 Validation Study

Following the verification study, a comprehensive validation study was conducted for all ship models by comparing the numerical results with the available experimental data. In the given figures, URANS stands for the present results. The numerical results were presented through Froude number.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (5)$$

Here, V is the ship velocity (m/s) while g is the gravitational acceleration (m/s^2) and L is the ship length (m).

The numerical results of KCS in the model scale were presented in Figure 3-4. Other results given in the figures are the experimental ones of several towing tanks located around the world (Japan, Korea, Denmark and USA). One may see that the numerical values were mostly satisfying when compared

with various experimental results (Hino et al., 2021; S. Van et al., 2011) in terms of total resistance, sinkage and trim. Here, the negative value of the sinkage means the ship goes downward while the negative trim value means that the ship is trimmed by the stern. Here, σ is the calculated or measured sinkage value and it is non-dimensionalized by the length of perpendiculars (L_{PP}).

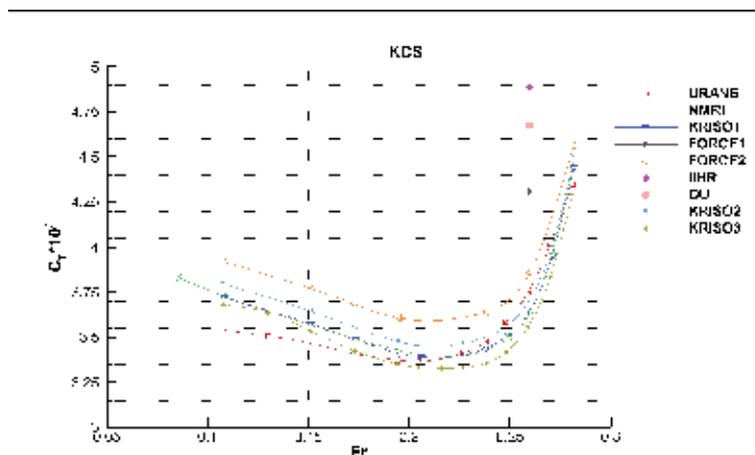


Figure 3. Comparison of total resistance coefficients for KCS.

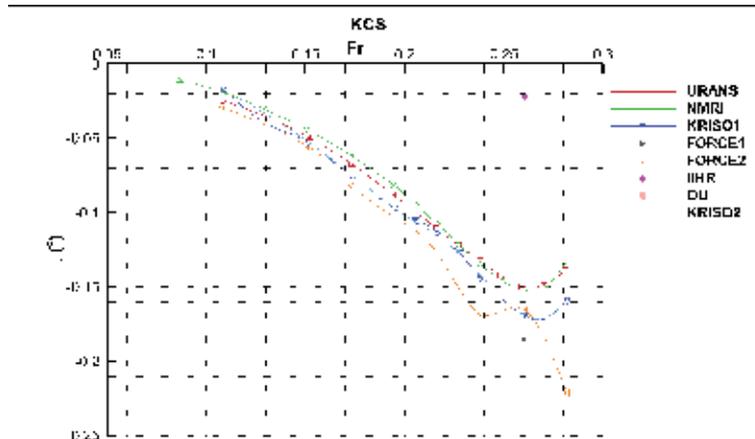
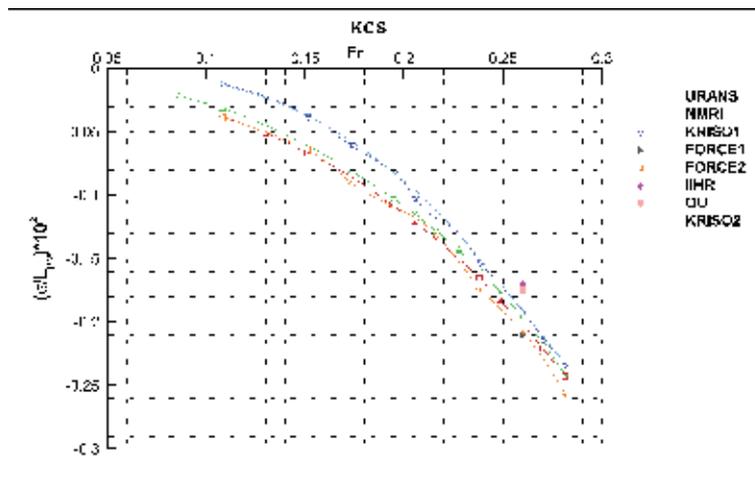


Figure 4. Comparison of sinkage (top) and trim (bottom) values for KCS.

Figure 5 shows the non-dimensional resistance coefficients of the resistance components. The decomposition of the total resistance was performed as described in the literature (Bertram, 2014). The decomposition of total resistance is given in Equation (6). Here, a comparison could be done through the frictional resistance coefficient and it is found that the numerical trend is similar to the one calculated with the ITTC friction line (ITTC, 1957). The average absolute error is about 2.8%. One may see that the residual resistance coefficient based on the pressure forces start to increase after $Fr=0.2$ that means the pressure forces start to be dominant.

$$C_T = C_F + C_R \quad (6)$$

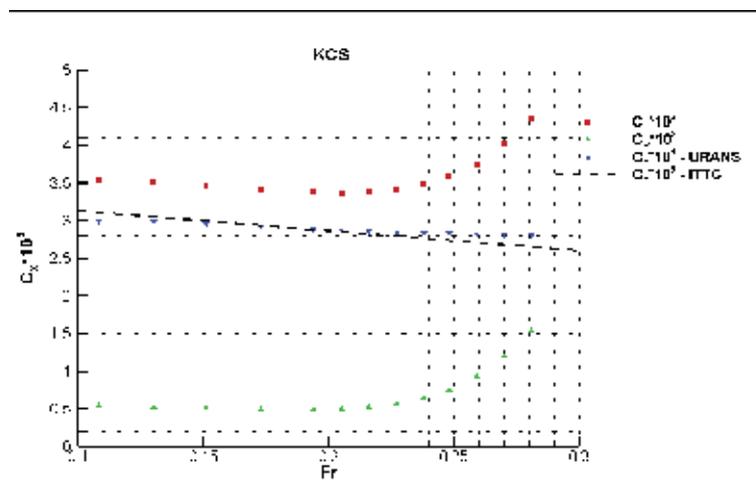
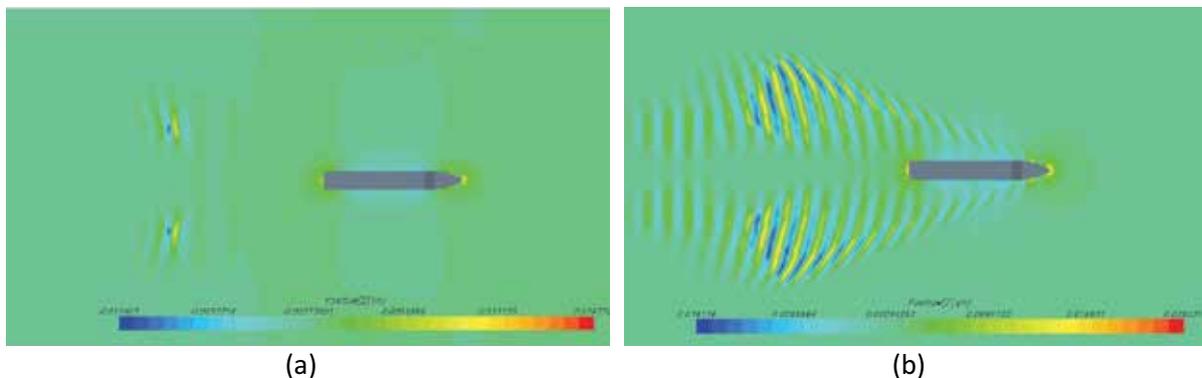
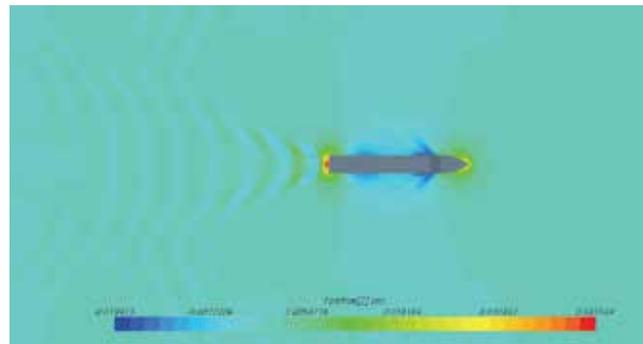


Figure 5. Non-dimensional coefficients of resistance components of KCS.

Figure 6 shows the wave patterns of KCS hull at different Froude numbers. At the lowest one, there is nearly no deformation on the free surface. At $Fr=0.151$, there are observable deformations while the wave length is too small due to the velocity. $Fr=0.205$ creates higher waves around the hull while the wave length is larger.





(c)

Figure 6. Wave patterns around KCS for $Fr=0.108$ (a), $Fr=0.151$ (b), $Fr=0.205$ (c).

The numerical results of DTC in model scale were compared with the experimental results (Moctar et al., 2012) through non-dimensional total resistance coefficient due to the lack of experimental sinkage and trim results. Figure 7 shows that the difference between numerical and experimental results becomes larger with the increase in Froude number. However, the average relative difference is about 3.4%. Figure 8 presents the trim and sinkage values at different Froude numbers.

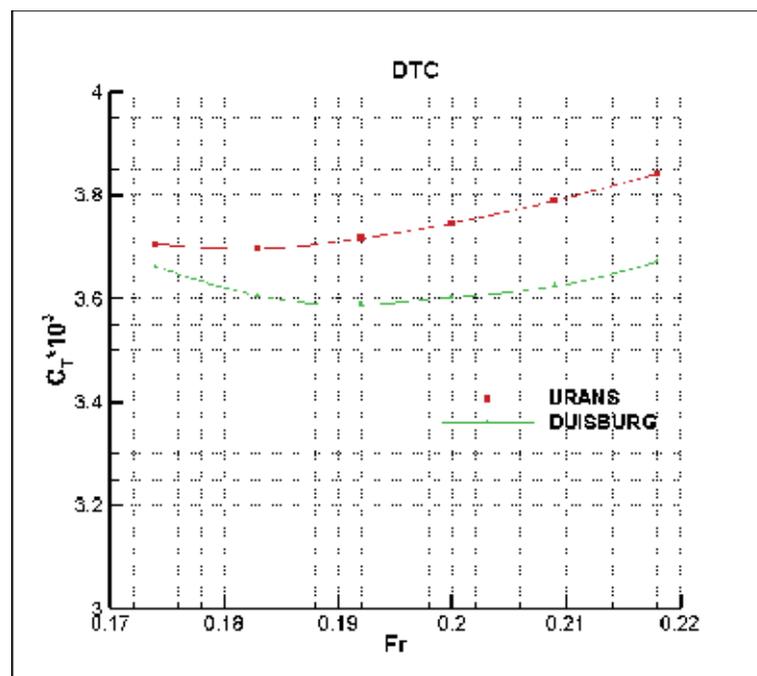


Figure 7. Comparison of total resistance coefficients for DTC.

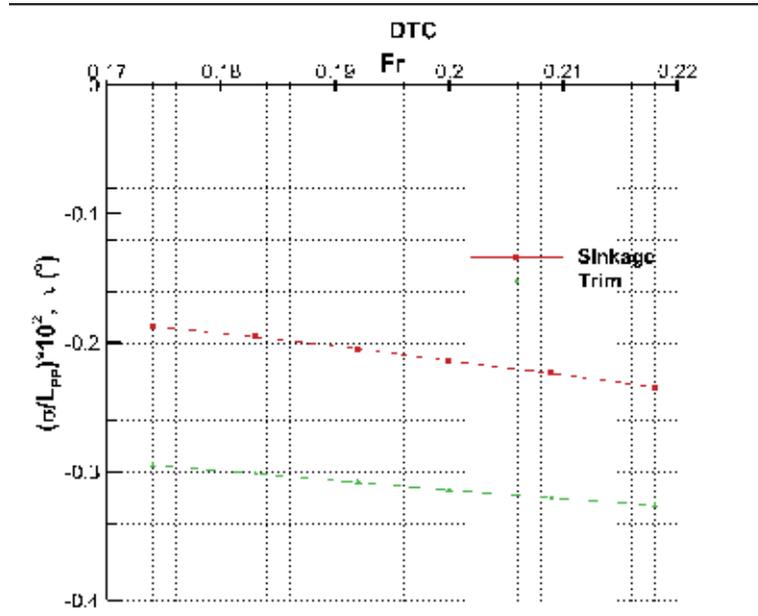


Figure 8. Sinkage and trim values of DTC.

Figure 9 gives the resistance components of DTC hull in the model scale. The frictional resistance coefficient is in good agreement with the ITTC friction line with an average absolute error of 4.2% approximately. It is observed that the CFD method overestimates the frictional resistance coefficient in the whole Froude number range. It may be due to the mesh structure inside the boundary layer, a denser prism layer yielding lower y^+ values may lead to more precise results. Figure 9 also shows that the residual resistance coefficient changes very little with the change in Froude number. That means the effect of the pressure forces changes slightly with the Froude number.

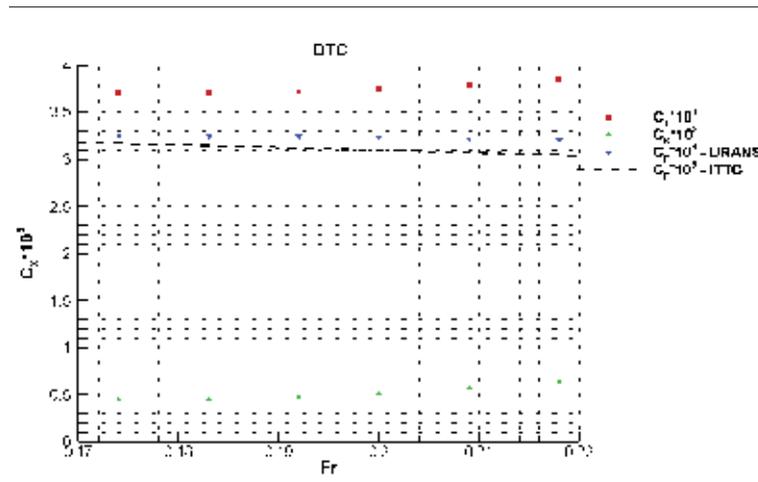


Figure 9. Non-dimensional coefficients of resistance components of DTC.

Figure 10 shows the wave patterns of DTC hull at different Froude numbers. One may see that the wave length increases with the increase in Froude number. The wave deformations are seen prominently.

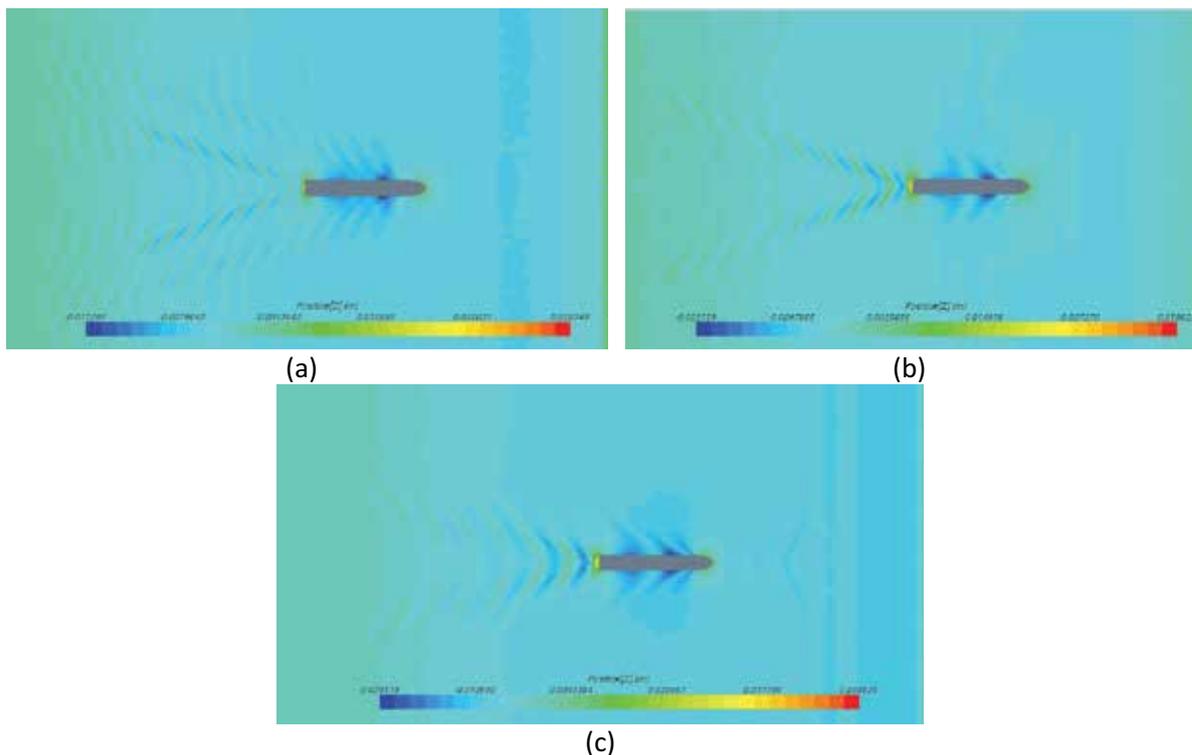


Figure 10. Wave patterns around DTC for $Fr=0.174$ (a), $Fr=0.200$ (b), $Fr=0.218$ (c).

Figure 11 and 12 show the comparison of the present results with other experimental and numerical results available in the literature (Cook, 2011; C. Delen and Bal, 2019) for ONRT. The numerical results show a good match, especially with the model experiments. The present results cover different Froude numbers in terms of total resistance coefficient, sinkage and trim. The relative difference for sinkage and trim becomes higher, however, the results show a similar trend with the other results.

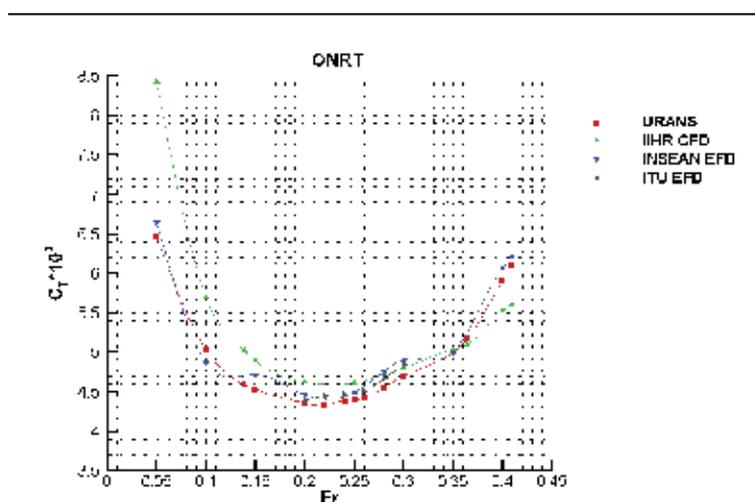


Figure11. Comparison of total resistance for ONRT.

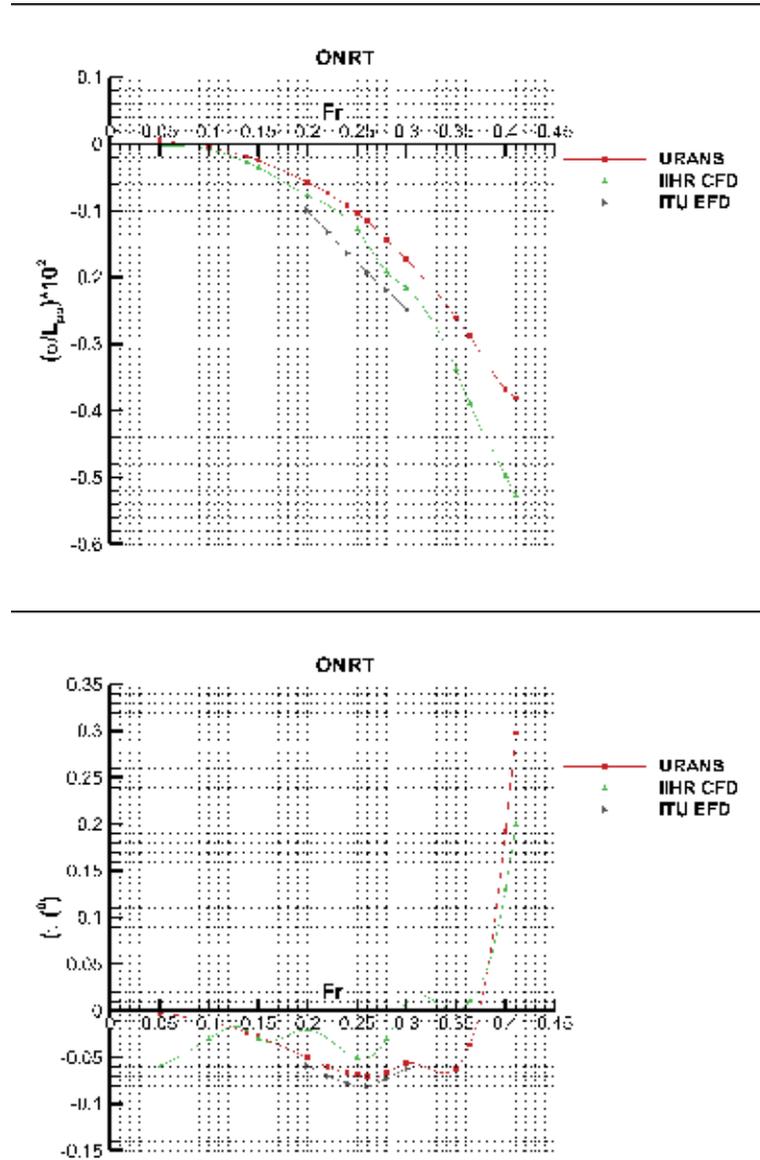


Figure 12. Comparison of sinkage (top) and trim (bottom) values for ONRT.

One may see the non-dimensional resistance coefficients of ONRT bare hull in Figure 13. The average absolute error between the numerical and empirical (ITTC) friction lines is about 2.9%. In addition to this, the trend of the residual resistance coefficient shows that the contribution of the pressure forces decreases with the Froude number until $Fr=0.2$. After, the trend shows a dramatic increase and finally the pressure forces become as dominant as the shear forces.

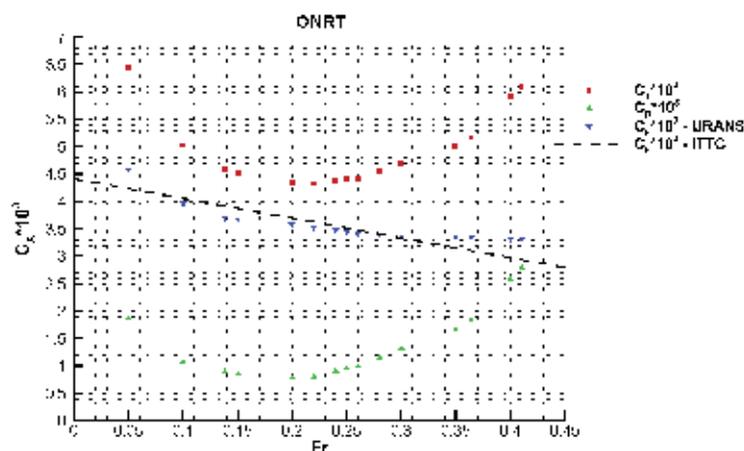


Figure 13. Non-dimensional coefficients of resistance components of ONRT.

Figure 14 shows the wave patterns of ONRT hull at different Froude numbers. Again, there is a correlation between the wave length and Froude number. However, the wave height decreases at $Fr=0.200$ that is also observed in Figure 13 through the residual resistance coefficient. At $Fr=0.250$, the deformations become higher in accordance with the increase in the residual resistance coefficient.

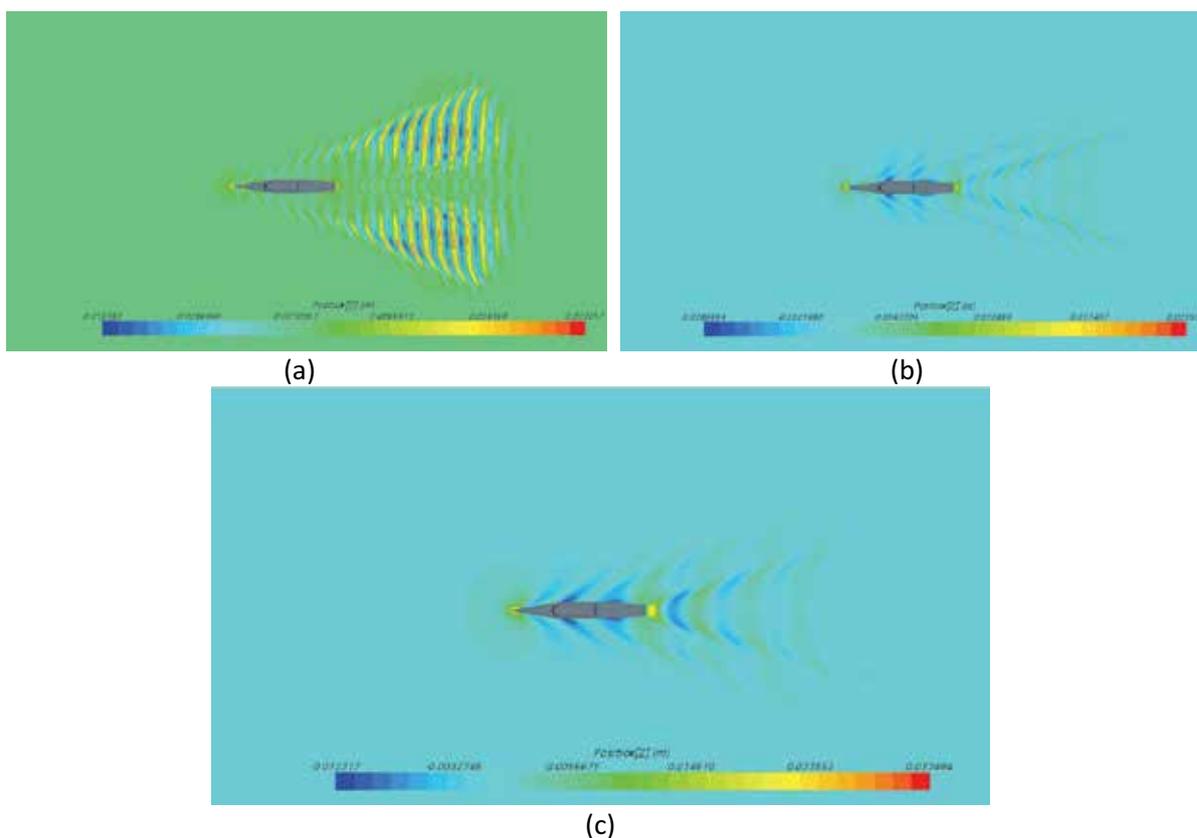


Figure 14. Wave patterns around ONRT for $Fr=0.150$ (a), $Fr=0.200$ (b), $Fr=0.250$ (c).

5. Conclusion

This study focuses on the numerical investigation of the flow around benchmark ship models. It is aimed to present comprehensive numerical results of three well-known benchmark vessels including

comparisons with the experimental results in the literature. Verification was done using the GCI method to obtain the spatial and temporal uncertainty values. The numerical uncertainties were below 3%. In especially ONRT case, the uncertainty values were found below 1%. Using the same refinement ratio for both spatial and temporal uncertainty, it is observed that the temporal analysis sets were more convenient for the GCI method except the KCS model.

A comprehensive validation study was conducted following the verification study. Validation for KCS was done through total resistance coefficient, sinkage and trim values. The results were in good agreement with the experiments especially after $Fr=0.2$, while for low Froude numbers there is a slight difference in total resistance coefficient. For trim and sinkage, the results were close to the experimental ones in the whole Froude number range. When it comes to DTC model, the validation was done only for the total resistance coefficient due to the lack of experimental data of sinkage and trim. The results showed deviance with the increase in Froude number. This might be caused by the difference in the residual resistance component since the frictional resistance follows the ITTC friction line. ONRT bare hull was validated with various experimental and numerical studies available in the literature. The total resistance coefficient results were in a similar trend with the experimental ones in the whole speed range while the other numerical study was quite far from the experiments in low Froude numbers. In addition to this, the trim values were found close to the experiments while the sinkage values followed a similar trend with the other numerical study.

It is concluded that the numerical method in the present study gives promising results with reasonable grid numbers and time step sizes with acceptable orders of uncertainty. The present study can be extended with the self-propulsion analyses and the validation can be done in terms of self-propulsion point and other propulsive parameters.

6. References

Bertram, V. (2014). *Practical Ship Hydrodynamics* (2nd edition). Elsevier Science.

Can, U., Delen, C., Bal, S. (2020). "Effective wake estimation of KCS hull at full-scale by GEOSIM method based on CFD". *Ocean Engineering*, 218, 108052. doi:10.1016/j.oceaneng.2020.108052.

Carrica, P. M., Fu, H., Stern, F. (2011). "Computations of self-propulsion free to sink and trim and of motions in head waves of the KRISO Container Ship (KCS) model". *Applied Ocean Research*, 33(4), 309–320. doi:10.1016/j.apor.2011.07.003.

Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Raad, P. E. (2008). "Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications". *Journal of Fluids Engineering*, 130(7), 078001. doi:10.1115/1.2960953.

Cook, S. S. (2011). Effects of headwinds on towing tank resistance and PMM tests for ONR Tumblehome [MSc Thesis, University of Iowa]. Available from Iowa Research Online. doi:10.17077/etd.9t68ik1e.

Cosner, R., Oberkampf, B., Rumsey, C., Rahaim, C., Shih, T. (2006). "AIAA Committee on Standards for Computational Fluid Dynamics: Status and Plans". In 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.2006-889.

Delen, C., Bal, S. (2019, September 9). "Uncertainty analysis of numerical and experimental resistance tests for ONR Tumblehome". International Maritime Association of the Mediterranean IMAM 2019, Varna, Bulgaria.

Delen, C., Can, U., Bal, S. (2020). "Prediction of Resistance and Self-Propulsion Characteristics of a Full-Scale Naval Ship by CFD-Based GEOSIM Method". *Journal of Ship Research*, 16. doi:10.5957/JOSR.03200022.

Dogrul, A., Song, S., Demirel, Y. K. (2020). "Scale effect on ship resistance components and form factor". *Ocean Engineering*, 209, 107428. doi:10.1016/j.oceaneng.2020.107428.

Eça, L., Vaz, G., Toxopeus, S. L., Hoekstra, M. (2019). "Numerical Errors in Unsteady Flow Simulations". *Journal of Verification, Validation and Uncertainty Quantification*, 4(021001). doi:10.1115/1.4043975.

Ferziger, J. H., Peric, M., Robert, L. (2020). *Computational Methods for Fluid Dynamics (4th Edition)*. Springer International Publishing.

Guo, H., Zou, Z., Liu, Y., Wang, F. (2018). "Investigation on hull-propeller-rudder interaction by RANS simulation of captive model tests for a twin-screw ship". *Ocean Engineering*, 162, 259–273. doi:10.1016/j.oceaneng.2018.05.035.

Hino, T., Stern, F., Larsson, L., Visonneau, M., Hirata, N., Kim, J. (Eds.). (2021). *Numerical Ship Hydrodynamics: An Assessment of the Tokyo 2015 Workshop*. Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-47572-7.

ITTC. (1957). Report of Resistance Committee. Proceedings of 8th ITTC, Madrid, Spain.

ITTC. (2014a). 7.5-03-02-03 Practical Guidelines for Ship CFD Applications. In ITTC - Recommended Procedures and Guidelines.

ITTC. (2014b). 7.5-03-01-01 Uncertainty Analysis in CFD, Verification and Validation Methodology and Procedures. In ITTC - Recommended Procedures and Guidelines.

Kahramanoglu, E., Cakici, F., Dogrul, A. (2020). "Numerical Prediction of the Vertical Responses of Planing Hulls in Regular Head Waves". *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(6), 455. doi:10.3390/jmse8060455.

Kim, W. J., Van, S. H., Kim, D. H. (2001). "Measurement of flows around modern commercial ship models". *Experiments in Fluids*, 31(5), 567–578. doi:10.1007/s003480100332.

Kinaci, O. K., Gokce, M. K., Delen, C. (2020). "Resistance experiments and self-propulsion estimations of Duisburg Test Case at 1/100 scale". *Ship Technology Research*, 67(2), 109–120. doi:10.1080/09377255.2020.1729454.

Kok, Z., Duffy, J., Chai, S., Jin, Y., Javanmardi, M. (2020). "Numerical investigation of scale effect in self-propelled container ship squat". *Applied Ocean Research*, 99, 102143. doi:10.1016/j.apor.2020.102143.

Larsson, L., Zou, L. (2014). "Evaluation of Resistance, Sinkage and Trim, Self Propulsion and Wave Pattern Predictions". In L. Larsson, F. Stern, & M. Visonneau (Eds.), *Numerical Ship Hydrodynamics* (pp. 17–64). Springer Netherlands. doi:10.1007/978-94-007-7189-5_2.

Menter, F. R. (1994). "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications". *AIAA Journal*, 32(8), 1598–1605. doi:10.2514/3.12149.

Menter, F. R. (2009). "Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective". *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 23(4), 305–316. doi:10.1080/10618560902773387.

Moctar, O. el, Shigunov, V., Zorn, T. (2012). "Duisburg Test Case: Post-Panamax Container Ship for Benchmarking". *Ship Technology Research*, 59(3), 50–64. doi:10.1179/str.2012.59.3.004.

Ozdemir, Y. H., Cosgun, T., Dogrul, A., Barlas, B. (2016). "A Numerical Application to Predict The Resistance and Wave Pattern of KRISO Container Ship". *Brodogradnja : Teorija i Praksa Brodogradnje i Pomorske Tehnike*, 67(2), 47–65. doi:10.21278/brod67204.

Pereira, F. S., Eça, L., Vaz, G. (2017). "Verification and Validation exercises for the flow around the KVLCC2 tanker at model and full-scale Reynolds numbers". *Ocean Engineering*, 129, 133–148. doi:10.1016/j.oceaneng.2016.11.005.

Richardson, L. F. (1911). "The Approximate Arithmetical Solution by Finite Differences of Physical Problems Involving Differential Equations, with an Application to the Stresses in a Masonry Dam". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 210, 307–357.

Roache, P. J. (1998). "Verification of Codes and Calculations". *AIAA Journal*, 36(5), 696–702. doi:10.2514/2.457.

Roache, P. J. (1997). "Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics". *Annual Review of Fluid Mechanics*, 29, 123–160. Scopus. doi:10.1146/annurev.fluid.29.1.123.

Sezen, S., Dogrul, A., Delen, C., Bal, S. (2018). "Investigation of self-propulsion of DARPA Suboff by RANS method". *Ocean Engineering*, 150, 258–271. doi:10.1016/j.oceaneng.2017.12.051.

Shen, Z., Wan, D., Carrica, P. M. (2015). "Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering". *Ocean Engineering*, 108, 287–306. doi:10.1016/j.oceaneng.2015.07.035.

Stern, F., Wilson, R. V., Coleman, H. W., Paterson, E. G. (2001). *Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations—Part 1: Methodology and Procedures*. *Journal of Fluids Engineering*, 123(4), 793–802. doi:10.1115/1.1412235.

Terziev, M., Tezdogan, T., Oguz, E., Gourlay, T., Demirel, Y. K., Incecik, A. (2018). "Numerical investigation of the behaviour and performance of ships advancing through restricted shallow waters". *Journal of Fluids and Structures*, 76, 185–215. doi:10.1016/j.jfluidstructs.2017.10.003.

Tezdogan, T., Demirel, Y. K., Kellett, P., Khorasanchi, M., Incecik, A., Turan, O. (2015). "Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behaviour and performance in head seas due to slow steaming". *Ocean Engineering*, 97, 186–206. doi:10.1016/j.oceaneng.2015.01.011.

Tezdogan, T., Incecik, A., Turan, O. (2016). "A numerical investigation of the squat and resistance of ships advancing through a canal using CFD". *Journal of Marine Science and Technology*, 1–16. doi:10.1007/s00773-015-0334-1.

Van, S., Ahn, H., Lee, Y., Kim, C., Hwang, S., Kim, J., Kim, K., Park, I. (2011). "Resistance characteristics and form factor evaluation for geosim models of KVLCC2 and KCS". *Proceeding of 2nd International Conference on Advanced Model Measurement Technology for EU Maritime Industry*, 282–293.

Van, S. H., Kim, W. J., Yoon, H. S., Lee, Y. Y., Park, I. R. (2006). "Flow measurement around a model ship with propeller and rudder". *Experiments in Fluids*, 40(4), 533–545. doi:10.1007/s00348-005-0093-6.

Wilcox, D. C. (2008). "Formulation of the k-w Turbulence Model Revisited". *AIAA Journal*, 46(11), 2823–

2838. doi:10.2514/1.36541.

Xing, T., Stern, F. (2010). "Factors of Safety for Richardson Extrapolation". *Journal of Fluids Engineering*, 132(061403). doi:10.1115/1.4001771.

Zhang, Z. (2010). "Verification and validation for RANS simulation of KCS container ship without/with propeller". *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 22(5, Supplement 1), 932–939. doi:10.1016/S1001-6058(10)60055-8.

Bilyalı Dövme İşleminden sonra Ti6Al4V Alaşımının Tribolojik Özellikleri

Zeynep Taşlıçukur Öztürk¹, Oğuzhan Sezer²

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Deniz Harp Okulu, Mili Savunma Üniversitesi, Tuzla, İstanbul, Türkiye

²Savunma Teknolojileri, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul Gedik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

^{1*}(sorumlu yazar), ztozturk@dho.edu.tr, ORCID: [0000-0002-8253-8159](https://orcid.org/0000-0002-8253-8159)

²ouzhnsezer@gmail.com, [0000-0002-5455-715X](https://orcid.org/0000-0002-5455-715X)

ÖZET

Bu makale, bilyalı dövme işlemi yapılan Ti6Al4V'nin mikroyapısını ve aşınma özelliklerini araştırmayı amaçlamaktadır. Bilyalı dövme işlemi, malzemelerin yüzey ve sürtünme özelliklerini iyileştirmek ve ayrıca Ti6Al4V alaşımının artık gerilme tabakasını iyileştirmek, mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanılmıştır. Bilyalı dövme öncesi ve sonrasında Ti6Al4V malzemede aşınma testi yapmak için disk üzerinde pim sisteminde tribometre kullanılmıştır. Bilyalı dövme işlemi yapılan Ti6Al4V alaşımının yüzey pürüzlülüğü, mikro yapısı, sertliği ve tribolojik özellikleri incelenerek değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Bilyalı Dövme, Ti6Al4V, aşınma, yüzey pürüzlülüğü.

Makale geçmişi: Geliş 20/05/2021 – Kabul 22/06/2021

Tribological Properties of Ti6Al4V Alloy After Shot Peening Process

Zeynep Taşlıçukur Öztürk¹, Oğuzhan Sezer²

¹ Mechanical Engineering Department, Turkish Naval Academy, National Defence University, Tuzla, Istanbul, Turkey

² Defence Technology, Institute of Graduate Education, Istanbul Gedik University, Istanbul, Turkey

^{1*}(corresponding author) ztozturk@dho.edu.tr, ORCID: [0000-0002-8253-8159](https://orcid.org/0000-0002-8253-8159)

²ouzhnsezer@gmail.com, [0000-0002-5455-715X](https://orcid.org/0000-0002-5455-715X)

ABSTRACT

This paper aims to investigate the microstructure and wear properties of Ti6Al4V induced by shot peening. Shot peening process has been used in order to improve the surface and frictional properties of materials, and also used to develop the compressive residual stress layer and enhance the mechanical properties of Ti6Al4V alloy. A pin on disc tribometer is used to carry out the wear test in Ti6Al4V material before and after shot peening. The effects of surface roughness, microstructure hardening induced by shot peening on the tribological properties of Ti6Al4V alloy are evaluated.

Keywords: Shot peening, Ti6Al4V, wear, surface roughness.

Article history: Received 20/05/2021 – Accepted 22/06/2021

1. Introduction

Titanium alloys have been widely used in aerospace, aviation, and navigation, chemical and petrochemical industries due to their superior properties. In the manufacture of aircraft engines, titanium alloy can significantly improve the weight ratio and the mechanism thrust efficiency of the engine (Yao et al. 2016; Sonntag et al. 2015; Liu and Li 2019; Yıldıran et al. 2015; Xie et al. 2016). However, the further development of titanium alloys is limited by their low hardness, poor abrasion resistance, and low fatigue strength, low thermal conductivity and high coefficient of friction (Chen et al. 2014; Costa et al. 2006).

The fatigue strength of titanium alloys can be increased by surface modifications or coatings. The shot peening process has been proven an effective approach to improve the surface performance of metallic components. Shot peening is a method to improve the fatigue strength of the metallic alloys (He et al. 2018; Kubler et al. 2019; Żebrowski et al. 2019; Azar et al. 2010; Kovacı et al. 2019). Surface modifications produced by the shot peening treatment are (a) roughening of the surface (b) an increased, near surface, strain hardening and (c) the development of a characteristic profile of residual stress (Azar et al. 2010). Shot-peening is used in many industrial applications, e.g. steam turbine blades, aircraft landing gear, springs, bearings, and other structural components (Marteau et al. 2015; Kumagai et al. 2014; Wiertel et al. 2017). During this process, a thin layer of cold plastic deformation near the surface is generated by bombarding the surface repeatedly with high velocity particles. By generating work hardening and introducing compressive residual stress into the material, the crack initiation and propagation are suppressed, which results in a fatigue performance improvement of the workpiece (Chen et al. 2018; Chen et al. 2019). For the conventional shot peening treatments, the magnitude of the compressive stress and work hardening capacity depend on the energy delivered by the shot as it impinges on the surface and the hardness and strain hardening properties of the material being treated (Fedoryszyn et al. 2009).

In this study, the effects of the controlled changing pressure in shot peening process on titanium alloy were discussed. The hardness, surface roughness test, Almen test, wear test of titanium alloy (Ti-4Al-6V) were performed as a result of shot peening process applied at three different pressure values and their microstructures were examined with scanning electron microscope.

2. Experimental Procedure

Specimens were cut in MAZAK FJV-250 CNC-3 axis machine and prepared according to the following parameters (Table 1) during milling process.

Table 1. Milling process parameters.

Cutting Tool	Cycle/minute	Progress mm/minute	Cutting Value (mm)
Ø10-40 mm	1200	1000	0.3 mm

The plate was cut into four equal pieces with Makino U53TJ wire erosion machine. Shot peening process was performed by the air blast machine (Sisson Lehmann MP1500 TI) using carbon steel shots (S230). Shot peening process parameters were summarized in Table 2. In order to assess the influence of shot peening intensity on the surface integrity, three different peening pressure were applied to the titanium alloy (Ti-4Al-6V).

Table 2. Shot peening process parameters.

Shot Peening Ball	S230 Steel Shot Per AMS 2431/2
Ball Hardness(HRC)	52-62
Number of Nozzles	1
Nozzle Size(mm)	9.5
Air Pressure(bar)	0.5-1-1.5

The Almen test was used to determine the shot peening process performance. Almen test verified and recorded the intensity before processing the first part, and also verified that shot peening machine was set-up and running according to the approved design parameters (Fedoryszyn et al. 2009). Almen test strips exist in three standard thickness designated as N for low, A for medium, and C for high intensity. The A strip with the thickness ± 0.025 mm was used. The Almen test (Mahr Federal Almen Gage) parameters were summarized in Table 3.

Table 3. Almen test parameters.

Application Time (sec)	Shot Peening Angle (°)	Shot Peening Pressure(bar)
20	90	0.5
20	90	1
20	90	1.5

Hardness of the samples was determined via Mitutoyo Hardness Testing Machine using diamond tip HRC/HR15N. The hardness tests were repeated three times to get the most accurate result. Surface roughness tests were performed by using Mahr Perthometer S2 PGK 120. A total of three measurements were made on each sample at different areas and average value with the standard deviation was reported. The surface topography was characterized by scanning electron microscope (SEM, JEOL JEM-700F).

The work specimen was undergone to wear test in ball on plate tribometer (UTS Tribometer T10/20) before and after shot peening process. 100Cr6 balls were used as the counterface material during dry sliding. Test parameters were given in Table 4.

Table 4. Wear test parameters.

Load (N)	2	5
Sliding Distance (m)	50	50
Velocity (mm/s)	20	20

3. Results and Discussion

The hardness measurement results of the shot peened Ti6Al4V and the reference Ti6Al4V samples were given in Figure 1. The effect of shot peening parameters on hardness values was evaluated. The maximum hardness value was obtained by the increase of the spray pressure. While the hardness value of the reference sample was 33.40 HRC, the hardness values of the samples shot peened with 0.5 bar, 1 bar, 1.5 bar were measured as 34.10 HRC, 34.30 HRC and 34.60 HRC, respectively. According to these results, it was seen that the increase in pressure together with the increase in hardness was effective.

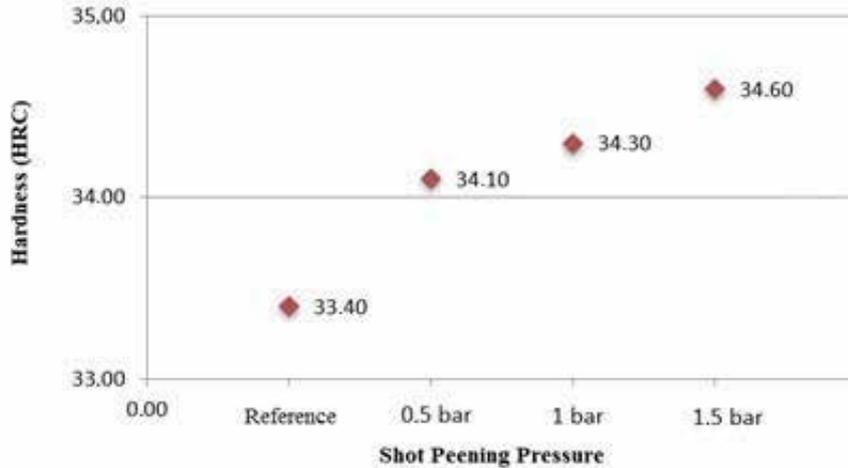


Figure 1. The diagram of hardness-shot peening pressure.

There is a relation between surface hardening and roughness induced by shot peening, pressure increase in course of shot peening process causes the increase of surface roughness (Żebrowski et al. 2019; Azar et al. 2010).

As a result of the surface roughness tests (Figure 2), it was observed that the surface roughness of the samples increased with the increase of the pressure in the shot peening process and the increase of the shot peening intensity in direct proportion. Since Ra value increased with increasing severity, deterioration was observed not only with the roughness measurement result but also after microstructural investigation. The surface roughness value Ra increased significantly after shot peening process, compared to the reference sample (Ra = 14.30 μm). Ra values were 18.50 μm , 28.30 μm , 45.30 μm respectively, in the samples shot peened with 0.5 bar, 1 bar, 1.5 bar pressure. Ra had a major effect on the fatigue performance. Rough surface profiles increased the local stress reported by Kumar, et al.

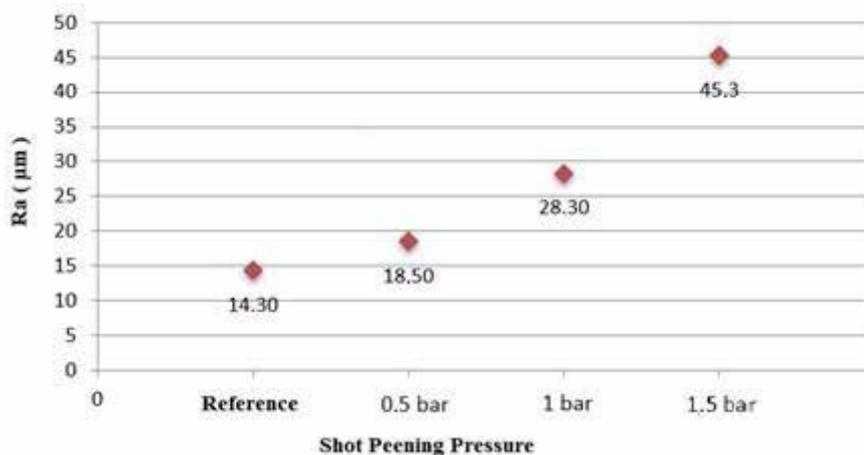


Figure 2. Correlation between the surface roughness and shot peening pressure.

The correlation between the arc height (Almen Intensity) and shot peening pressure were given in Figure 3. According to Almen Test, as the shot peening pressure increased, the arc height increased. It was observed that for a different peening pressure conditions, Almen intensity values increased. The arc height values increased as the pressure was increased from 0.5 to 1.5 bar. The peening

pressure showed a linear trend with the Almen intensity. The influence of shot peening pressure exhibited in the Almen curvature arc height may be correlated to the absorbed energy in the Almen strips employed (Kumar et al. 2019).



Figure 3. Correlation between the arc height and shot peening pressure.

The optical microscope images of the samples shot peened at different pressures (0.5;1;1.5 bar) were given in Figure 4. As the shot peening pressure increased, the intensity increased and also the deformation amount increased on the surfaces.

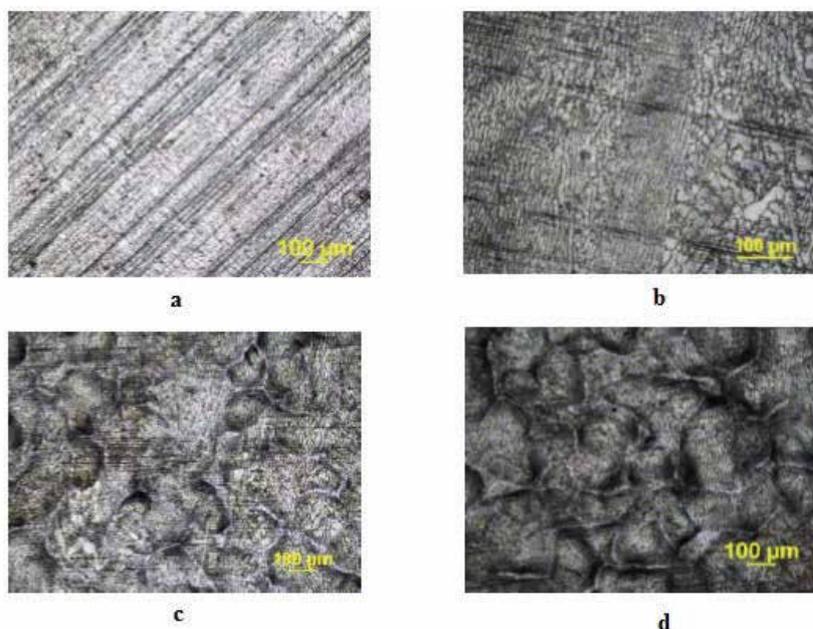


Figure 4. Optical microscope images of the samples shot peened at different pressure a) reference sample (untreated sample) b) 0.5 bar c) 1 bar d) 1.5 bar.

Morphological changes (Figure 5) on the sample surfaces and counter surfaces were analyzed via an optical microscope to explore wear scar widths, wear radius. When considering at the width of the wear scars, the widest scar was measured for the sample shot peened with 0.5 bar-worn under 5 N as 1733.04 µm. When looking the counter surfaces, wear diameter of the sample shot peened with 0.5 bar, worn under 5 N was 871.94 µm.

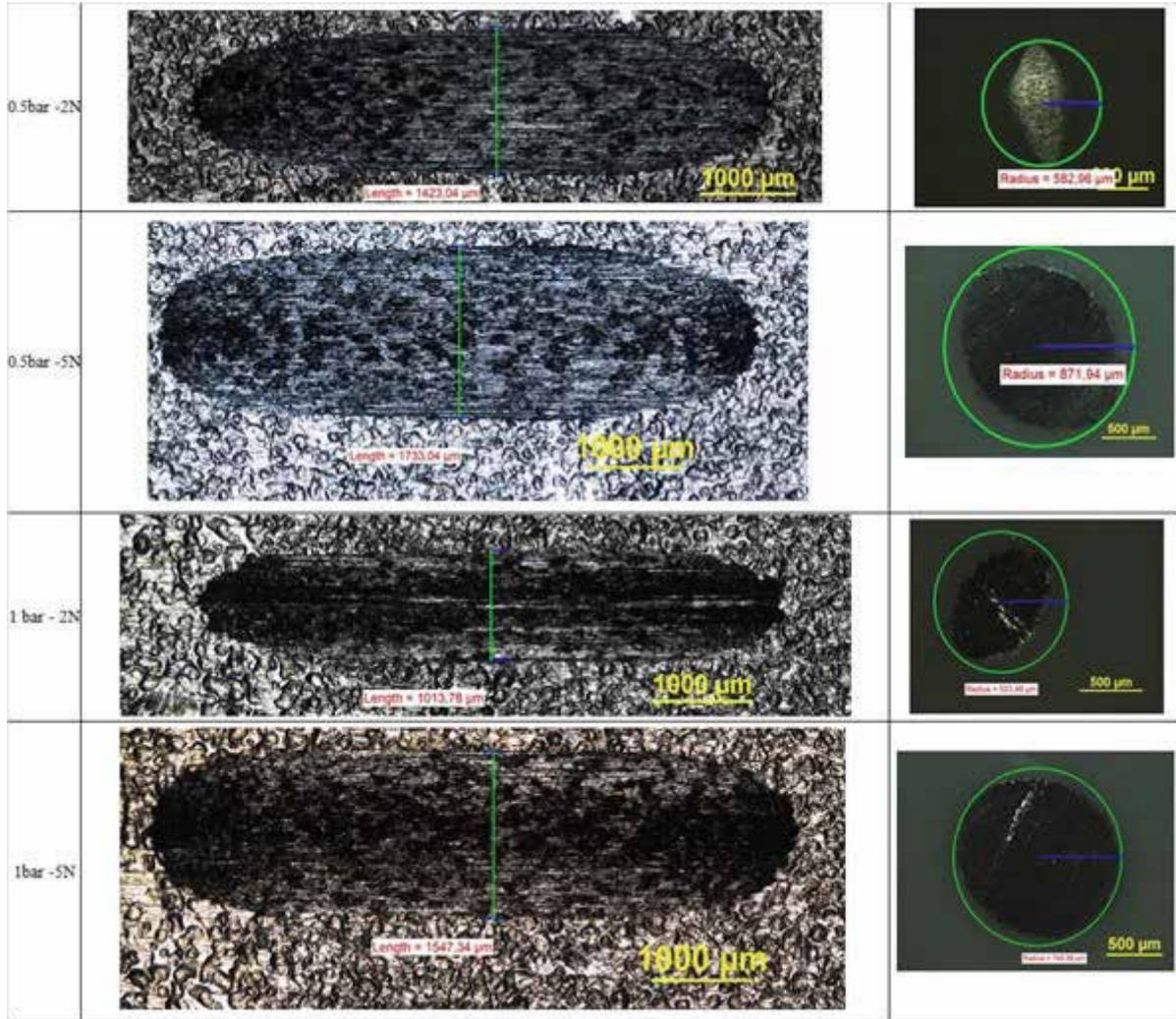


Figure 5. Optical microscope analysis of wear scars of the samples (with 0.5 bar-1 bar shot peening pressure), counter surfaces under 2 N-5 N load.

The friction force (2N and 5N) - sliding distance diagrams of reference Ti6Al4V and shot peened Ti6Al4V samples were given in Figure 6. The friction coefficient increased proportionally as the sliding distance of the applied force increased. The reference sample had low surface roughness, it had low surface hardness. A decrease in wear rates due to increasing surface hardness with shot peening treatments was observed. It was determined that wear rates were decreased by increasing shot peening pressure. It also increased the surface roughness values. Therefore, the effects of both hardness and surface roughness on surface resistance should be taken into consideration as reported by Kovacı, et al. The deterioration layers began to form on the surfaces. The graphics came out with variability because of the roughness that occurred on the surface after shot peening.

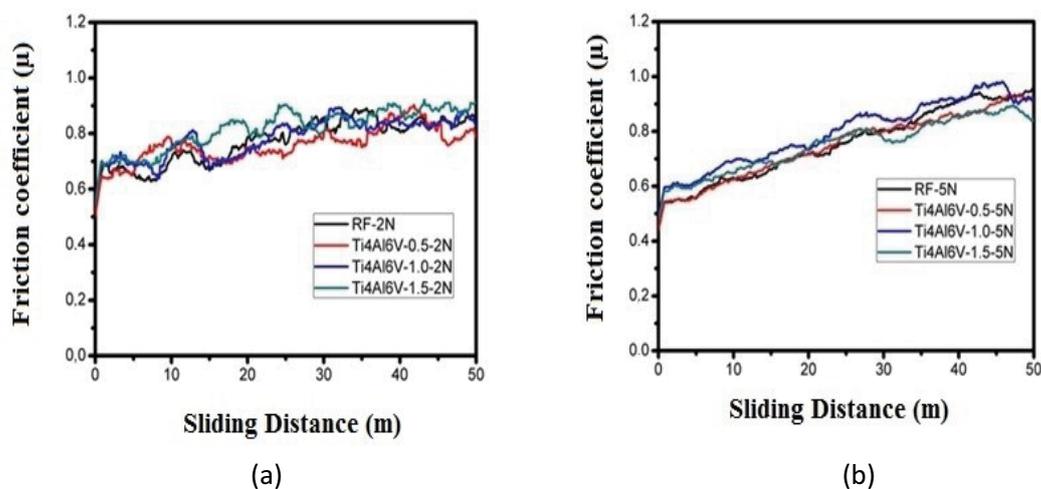


Figure 6. Correlation between the friction coefficient and sliding distance of the samples worn under a) 2 N b) 5 N load.

The microstructural changes (Figure 7 and Figure 8) could be seen with the increase of the shot peening pressure. The increase in pressure caused the formation of microcracks, also deep and large pits occurred. As the shot peening pressure increased, wear tracks were formed as large scratches (Figure 7c and 8c). The scratches caused high wear depth. Severe adhesive wear traces were seen in wear scar as also reported by Kovacı, et al.

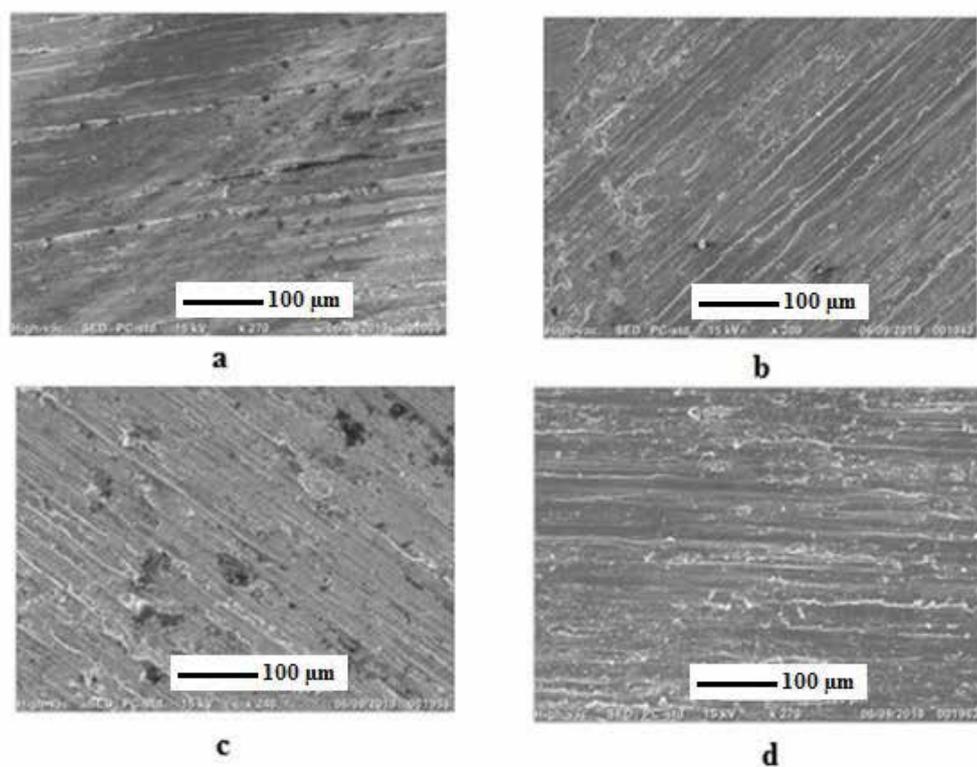


Figure 7. SEM photos of wear surfaces of the samples under 2 N, shot peened at different pressure a) reference sample (untreated sample) b) 0.5 bar c) 1 bar d) 1.5 bar.

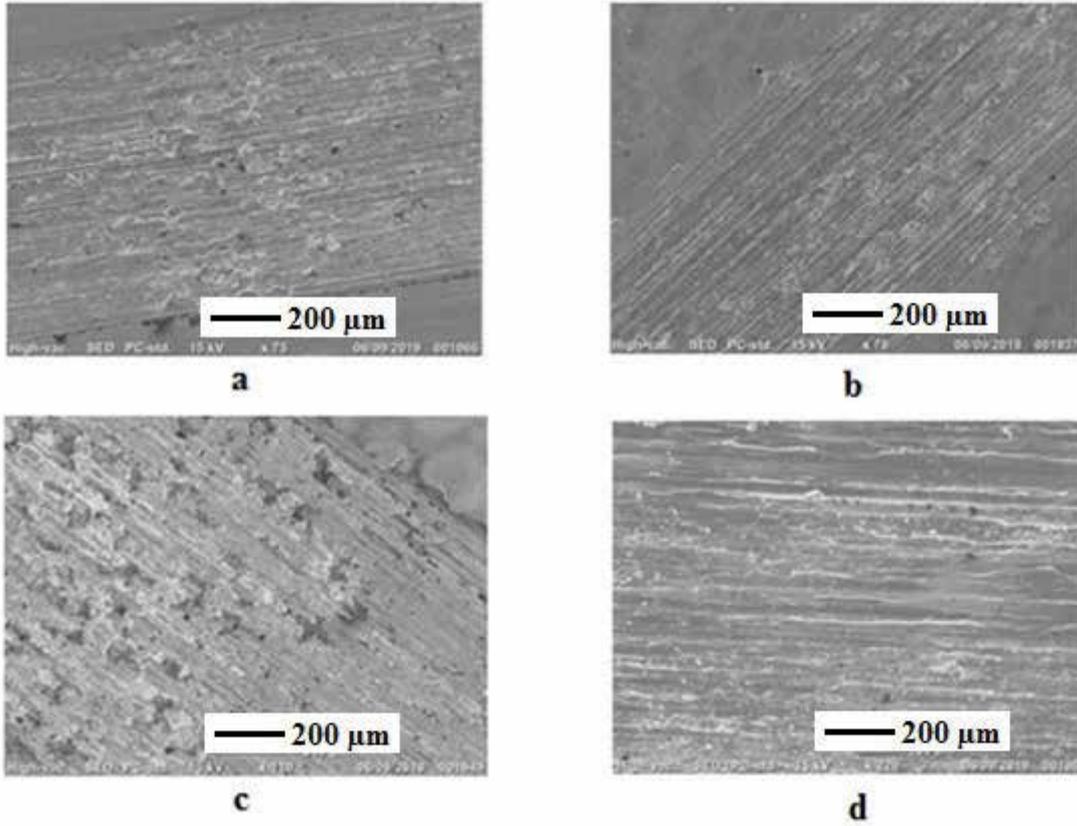


Figure 8. SEM photos of wear surfaces of the samples under 5 N, shot peened at different pressure a) reference sample (untreated sample) b) 0.5 bar c) 1 bar d) 1.5 bar.

4. Conclusions

In this study, the shot peening process was applied to Ti6Al4V alloy. Microstructural and hardness characterization of the samples were performed to investigate the effects of shot peening on the mechanical properties and microstructure of Ti6Al4V alloy. It had been shown that shot peening pressure played an important role in surface properties. It was seen that there was an increase in the surface roughness in the images taken as a result of different shot peening pressures. This situation had been associated with a more severe shot peening operation as a result of the increased pressure and the increase of kinetic energy of the balls. As the shot peening pressure increased, the microstructure changed severely. It had been observed that plastic deformations occurred on the surface after shot peening operations performed at high pressure. It was also understood from the microstructures that in the samples subjected to the wear test after the shot peening process, the current strength applied in the shot peening and the wear marks increased as the applied load increased. The increase in the values of the traces paralleled the surfaces deteriorated with the shot peening, and the radius values also increased. Shot peening increased the surface roughness values of titanium alloys and consequently, they increased friction coefficient values. And also, shot peening improved the wear resistance of the samples. The results presented in this study were expected to provide a resource for understanding the changes in microstructural and tribological properties that affect the wear behavior depending on the shot peening parameters of titanium alloys used in aviation.

5. References

- Azar, V., Hashemi, B., & Yazdi, M. R. (2010). The effect of shot peening on fatigue and corrosion behavior of 316L stainless steel in Ringer's solution. *Surface and Coatings Technology*, 204(21–22), 3546–3551.
- Chen, G., Yan, J., Tian, T., Zhang, X., Li, Z., & Zhou, W. (2014). Effect of wet shot peening on Ti-6Al-4V alloy treated by ceramic beads. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(3), 690–696.
- Chen, M., Liu, H., Wang, L., Xu, Z., Ji, V., & Jiang, C. (2018). Residual stress and microstructure evolutions of SAF 2507 duplex stainless steel after shot peening. *Applied Surface Science*, 459, 155–163.
- Chen, M., Jiang, C., Xu, Z., & Ji, V. (2019). Surface layer characteristics of SAF2507 duplex stainless steel treated by stress shot peening. *Applied Surface Science*, 481, 226–233.
- Costa, M. Y. P., Voorwald, H. J. C., Pigatin, W. L., Guimarães, V. A., & Cioffi, M. O. H. (2006). Evaluation of shot peening on the fatigue strength of anodized Ti-6Al-4V alloy. *Materials Research*, 9(1), 107–109.
- Fedoryszyn, A., Piosik, T., & Zyzak, P. (2009). Methodology of peening intensity evaluation basing on the Almen tests. *Archives of Foundry Engineering*, 9(4), 246–248.
- He, Y., Yoo, K.-B., Ma, H., & Shin, K. (2018). Study of the austenitic stainless steel with gradient structured surface fabricated via shot peening. *Materials Letters*, 215, 187–190.
- Kovaci, H., Bozkurt, Y. B., Yetim, A. F., Aslan, M., & Çelik, A. (2019). The effect of surface plastic deformation produced by shot peening on corrosion behavior of a low-alloy steel. *Surface and Coatings Technology*, 360, 78–86.
- Kubler, R. F., Berveiller, S., Bouscaud, D., Guiheux, R., Patoor, E., & Puydt, Q. (2019). Shot peening of TRIP780 steel: Experimental analysis and numerical simulation. *Journal of Materials Processing Technology*, 270, 182–194.
- Kumagai, M., Akita, K., Imafuku, M., & Ohya, S. (2014). Workhardening and the microstructural characteristics of shot-and laser-peened austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 608, 21–24.
- Kumar, R. K., SampathKumaran, P., Seetharamu, S., Kumar, S. A., Pramod, T., & Naveen, G. J. (2019). Investigation of shot peening effect on titanium alloy affecting surface residual stress and roughness for aerospace applications. *Procedia Structural Integrity*, 14, 134–141.
- Liu, Y. G., & Li, M. Q. (2019). Structure response characteristics and surface nanocrystallization mechanism of alpha phase in Ti-6Al-4V subjected to high energy shot peening. *Journal of Alloys and Compounds*, 773, 860–871.
- Marteau, J., & Bigerelle, M. (2015). Relation between surface hardening and roughness induced by ultrasonic shot peening. *Tribology International*, 83, 105–113.
- Sonntag, R., Reinders, J., Gibmeier, J., & Kretzer, J. P. (2015). Fatigue Performance of Medical Ti6Al4V Alloy after Mechanical Surface Treatments. *PLOS ONE*, 10(3), e0121963. Retrieved from <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121963>

Wiertel, M., Zaleski, K., Gorgol, M., Skoczylas, A., & Zaleski, R. (2017). Impact of Impulse Shot Peening Parameters on Properties of Stainless Steel Surface. *Acta Physica Polonica, A*, 132(5).

Xie, L., Wen, Y., Zhan, K., Wang, L., Jiang, C., & Ji, V. (2016). Characterization on surface mechanical properties of Ti-6Al-4V after shot peening. *Journal of Alloys and Compounds*, 666, 65-70.

Yao, C., Wu, D., Ma, L., Tan, L., Zhou, Z., & Zhang, J. (2016). Surface integrity evolution and fatigue evaluation after milling mode, shot-peening and polishing mode for TB6 titanium alloy. *Applied Surface Science*, 387, 1257-1264.

Yıldıran, Y., Avcu, E., & Sınmazçelik, T. (2015). Optimization of surface properties of shot peened Ti6Al4V alloy. *Acta Physica Polonica A*, 4(127), 984-986.

Żebrowski, R., Walczak, M., Klepka, T., & Pasierbiewicz, K. (2019). Effect of the shot peening on surface properties of Ti-6Al-4V alloy produced by means of DMLS technology. *Eksploatacja i Niezawodność*, 21.

Satıhtaki Bir Denizaltının Yalpa Salınım Hareketinin Matematiksel Modeli

Muhammet Yuşa Cansız¹, Burak Yıldız²

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

¹ myusa.cansiz@uab.gov.tr, ORCID: [0000-0002-8310-4731](https://orcid.org/0000-0002-8310-4731)
² (sorumlu yazar), buraky@yildiz.edu.tr, [0000-0002-0559-8772](https://orcid.org/0000-0002-0559-8772)

ÖZET

Bir denizaltı için yalpa hareketi diğer gemi hareketlerinin arasında en kritik olanıdır. Özellikle satıh durumunda, aşırı yalpa hareketi denizaltı mürettebatı ve ekipmanı için tehlikeli olabilir. Bu sebeple, aşırı genlikli yalpa hareketlerine maruz kalınmaması için dizayn aşamasında yalpa hareketinin analiz edilmesi gereklidir. Hareket genliklerini elde etmek için yalpa hareketinin matematiksel modeli kullanılabilir. Yalpa hareketinin matematiksel modelinin oluşturulmasında en önemli kısım yalpa sönümünün tahminidir. Yalpa sönümü deneysel, sayısal ve ampirik olarak elde edilebilir. Deneysel yöntemler pahalı ve zaman alıcı, ampirik ifadeler ise her gemi tipi için uygun değildir. Bu sebeple, son zamanlarda bilgisayar teknolojisindeki gelişiminde etkisiyle daha hızlı ve ucuz bir yöntem olan sayısal metotlar sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, satıhtaki bir denizaltının serbest yalpa hareketinin matematiksel modeli elde edilmiştir. Yalpa sönüm terimi denizaltının serbest yalpa salınım hareketinin ticari bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kodu ile sayısal olarak modellenmesi ile elde edilmiştir. Atalet ve doğrultma terimleri ise denizaltı geometrisi kullanılarak ampirik olarak hesaplanmıştır. Matematiksel model elde edilmiştir ve 20 derece serbest bırakma açısındaki denizaltı yalpa salınım hareketi sıfır hızda ve 5 kn, 7.5 kn ve 10 kn ileri hızda hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmış ve uyumlu sonuçlar gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: HAD, Matematiksel model, Yalpa sönümü, Yalpa Hareketi, Denizaltı

Makale geçmişi: Geliş 06/06/2021 – Kabul 24/06/2021

Mathematical Model of Roll Decay Motion for a Surfaced Submarine

Muhammet Yuşa Cansız¹, Burak Yıldız²

¹ Yildiz Technical University, Naval Architecture and Maritime Faculty, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, İstanbul, Turkey

² Yildiz Technical University, Naval Architecture and Maritime Faculty, Department of Marine Engineering Operations, İstanbul, Turkey

¹ myusa.cansiz@uab.gov.tr, ORCID: [0000-0002-8310-4731](https://orcid.org/0000-0002-8310-4731)

² (corresponding author), buraky@yildiz.edu.tr, [0000-0002-0559-8772](https://orcid.org/0000-0002-0559-8772)

ABSTRACT

Among all ship motions, the most critical one is the roll motion for a submarine. The excessive roll motion can be harmful to both ship's crew and equipment, especially in surfaced condition. For this reason, it is important to predict the roll motion during the design stage to overcome excessive roll amplitudes. A mathematical model of the roll motion can be used to predict the motion responses of a submarine. Estimation of the roll damping is the most critical part to develop the mathematical model for a better prediction of the roll motion. The roll damping can be obtained experimentally, numerically and empirically. Experimental methods are expensive and time-consuming and empirical methods cannot be applied for all ship types. For this reason, numerical methods are frequently used due to the development of computer technologies in recent years, being economical and fast. In this study, the mathematical model of roll decay motion for a submarine at surfaced condition was obtained. The roll damping term was obtained numerically by carrying out roll decay simulations using a commercial Computational Fluid Dynamic (CFD) code. The inertia and restoring terms were obtained empirically by using the submarine geometry. The mathematical model was obtained and the roll decay motion of the surfaced submarine was calculated with a 20 degrees initial roll angle at zero speed and 5 kn, 7.5 kn and 10 kn forward speeds. The results were compared with numerical results and a good agreement was observed.

Keywords: CFD, Mathematical Model, Roll Motion, Roll Damping, Submarine

Article history: Received 06/06/2021 – Accepted 24/06/2021

1. Introduction

Submarines are generally used for search, rescue, touristic and military purposes. Contrary to general opinion, submarines spend a significant time of their life cruising at the sea surface (Vogels, 2015). During surface cruising, submarines are highly affected by adverse weather conditions, and they are exposed to high roll angles. The excessive roll motion affects the equipment and personnel, therefore, predicting the roll motion of submarines during the design stage is necessary for safe operation. The prediction of roll motion can be achieved by carrying out physical model experiments or numerical simulations via CFD. The strip theory can be also used for the roll motion prediction, however not taking into account the viscosity will cause incorrect prediction.

For a more accurate roll motion prediction, the roll damping should be determined correctly. The roll damping can be calculated by carrying out roll decay tests or forced oscillation tests by using both experiments or numerical simulations. Besides, a semi-empirical formula developed by Ikeda can also be used for roll damping estimation. In the formula, Ikeda et al. (1978), (see also Himeno (1981)), divided roll damping into five components: friction, wave, eddy, naked hull lift and bilge keel damping and developed a formula for each component. However, the experiments take a long time, cost a lot of money and empirical methods ignore nonlinearities. On the other hand, numerical simulations with CFD is a cost-effective and faster method compared to experiments. It also captures the effects of viscosity, effective creation of vortices in the boundary layer, vortex shedding and turbulence which were usually not taken into account in the empirical methods. These advantages and the recent developments in CFD technology lead researchers to use numerical simulations for estimation of roll damping.

There are a lot of papers in the literature related to the prediction of ship roll motion by using experimental or numerical techniques. However, the roll motion of a surfaced submarine has not been studied by many researchers. There are a few papers in the literature that investigates the roll motion of a surfaced submarine. In one of these papers, Hedberg (2006) investigated how to simulate the roll motion of an Australian Collins Class submarine. The roll characteristics of the surfaced submarine, through both linear and nonlinear approach was studied. The effect of different sea states, adding appendages and varying the transverse metacentric height were examined. Thornhill and Hermanski (2008) carried out a set of CFD simulations and physical experiments on a 2D surfaced submarine section to determine the effects on roll motion of a closed versus free flooding casing. Letter (2009) investigated the roll motion experienced by a surfaced submarine in beam seas using CFD techniques and physical model scale experiments.

In this study, a mathematical model for the roll decay motion of a surfaced submarine was developed. The roll damping of the surfaced submarine was calculated by carrying out numerical roll decay simulations. After obtaining the roll damping coefficients, the other hydrodynamic and hydrostatic coefficients were obtained by using submarine geometry. Finally, the mathematical model was obtained and the roll decay motion of surfaced submarine was calculated at zero speed and various forward speeds. The results were compared to numerical simulations and a good agreement was found.

2. Roll motion

The 1-DOF (degrees of freedom) linear roll motion equation is shown in Equation 1. In the equation I_{44} , A_{44} , B_{44} , C_{44} refer to the mass inertia coefficient, added mass inertia coefficient, damping coefficient,

restoring coefficient, respectively. $\phi_4(t)$ is roll angle, $\dot{\phi}_4(t)$ is roll angular velocity and $\ddot{\phi}_4(t)$ is roll angular acceleration. Finally, M_{44} refers to the roll exciting moment in the roll motion equation.

$$(I_{44} + A_{44})\ddot{\phi}_4(t) + B_{44}\dot{\phi}_4(t) + C_{44}\phi_4(t) = M_{44} \quad (1)$$

For solving the equation, the hydrostatic and hydrodynamic term should be obtained. Calculation of mass inertia coefficient, I_{44} , is estimated with the help of the formula given in Equation 2.

$$I_{44} = k_4^2 M \quad (2)$$

$$k_4 = \frac{\sqrt{B^2 + D^2}}{2\sqrt{3}} \quad (3)$$

k_4 is the radius of gyration, M is the mass of the submarine, B is the width of the submarine and D is the depth of the submarine.

Added mass inertia coefficient for the submarine can be obtained by using the roll period formula. The roll period formula is shown in Equation 4.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_{44} + A_{44}}{C_{44}}} \quad (4)$$

T is the natural roll period, I_{44} is the mass inertia coefficient, A_{44} is added mass inertia coefficient and C_{44} is restoring coefficient.

The hydrostatic restoring moment is a moment caused by the geometry of the submarine. It is a moment caused by the effect of static buoyancy. The restoring term can be obtained by using Equation 5.

$$C_{44} = \rho g \nabla GM_0 \quad (5)$$

The damping coefficient can be calculated by using the roll decay test. To take nonlinearities into account, the roll damping is divided into linear and nonlinear term as it is shown in Equation 6. This roll damping model is named as a linear-plus-cubic model where B_1 is the linear damping term and B_3 is the nonlinear term.

The roll decay motion equation with nonlinear damping term is shown in Equation 6. The submarine is brought to a certain angle and released to free for the roll decay test, therefore, there is no excitation force. This means that the right part of the equation is zero.

$$(I_{44} + A_{44})\ddot{\phi} + B_1 \dot{\phi} + B_3 \dot{\phi}^3 + C_{44}\phi = 0 \quad (6)$$

After the submarine model is initially inclined and then released, the initial roll angle ϕ_0 and the other peaks of roll angles ϕ_j, ϕ_{j+1} etc. at each cycle are obtained from roll decay time history as shown in Figure 1. Using the measured roll amplitudes, the mean roll angles (ϕ_m) and roll decrements ($\Delta\phi$) are calculated. ϕ_m and $\Delta\phi$ are calculated as shown in Equation 7 and 8, respectively.

$$\phi_m = \frac{|\phi_j| + |\phi_{j+1}|}{2} \quad (7)$$

$$\Delta\phi = |\phi_j| - |\phi_{j+1}| \quad (8)$$

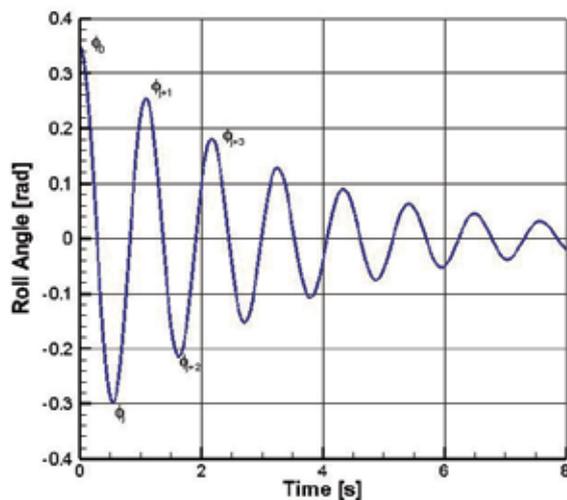


Figure 1. Typical roll decay time history

Thus, the roll extinction curve is obtained by plotting the roll decrements against the mean roll angles as it is shown in Figure 2 and the equation of the curve is obtained by fitting a cubic polynomial to the data as it is shown in Equation 9. Here, a and c are the extinction coefficients.

$$\Delta\phi = a\phi_m + c\phi_m^3 \quad (9)$$

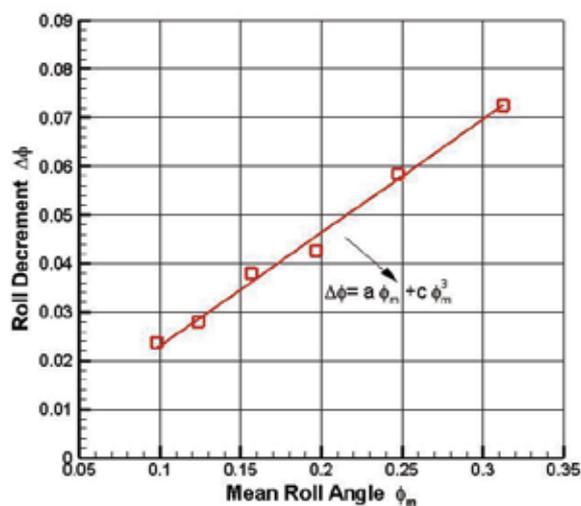


Figure 2. Roll extinction curve

In Equation 6, when both sides are divided by $(I_{44}+A_{44})$, the following equation is obtained.

$$\ddot{\phi}_4 + 2\alpha\dot{\phi}_4 + \gamma\phi_4^3 + \omega_n^2\phi_4 = 0 \quad (10)$$

In this equation, 2α and γ , c , ω_n show damping, stiffness and natural frequency respectively.

$$2\alpha = \frac{B_1}{(I_{44} + A_{44})} \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{B_3}{(I_{44} + A_{44})} \quad (12)$$

$$c = \frac{C_{44}}{(I_{44} + A_{44})} \quad (13)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{C_{44}}{(I_{44} + A_{44})}} \quad (14)$$

An equivalent damping coefficient term shown in Equation 15 was used by Himeno (1981) to find the nonlinear roll damping coefficients.

$$B_{eq} = B_1\dot{\phi} + \frac{3}{4}\omega_n^2\dot{\phi}^3 B_3 \quad (15)$$

Himeno proposed the relation between ϕ_m and $\Delta\phi$ as in Equation 16 (Himeno, 1981).

Finally, we can use the following expression for the roll decrement as a function of the mean roll amplitude (Himeno, 1981) to obtain the linear and nonlinear roll damping coefficients.

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{2} 2\alpha\phi_m + \frac{3\pi}{8}\omega_n\gamma\phi_m^3 \quad (16)$$

Using the extinction coefficients a and c , the regression coefficients α and γ are calculated. Finally, the linear damping coefficient, B_1 and nonlinear damping coefficient B_3 are calculated using the α and γ regression coefficients as follows.

$$\alpha = \frac{a\omega_n}{\pi} \quad (17)$$

$$\gamma = \frac{8c}{3\pi\omega_n} \quad (18)$$

$$B_1 = 2\alpha(I_{44} + A_{44}) \quad (19)$$

$$B_3 = \gamma(I_{44} + A_{44}) \quad (20)$$

The calculated roll damping coefficients for 0 kn, 5 kn, 7.5 kn and 10 kn speeds are shown in Table 3.

3. Submarine model

In this study, a submarine model was used for the investigation of the roll decay motion. The subject submarine is a swimmer delivery vehicle (SDV) known as CE4F which was designed for the Turkish Navy's elite special forces. The submarine is currently used for some research and development

projects at the Yildiz Technical University. Instead of rudders in +-configuration in the original model, rudders in x-configuration is applied in this study. Besides, the model without stabilizers were used for the calculations. The main particulars of the selected submarine are listed in Table 1. The 2D geometry including the dimensions of the full scale model is shown in Figure 3 and the 3D geometry in Figure 4.

Table 1. Main particulars of the submarine

Main Dimensions	Model Scale	Full Scale
Length	0.928 m	9.28 m
Breadth	0.14 m	1.4 m
Depth	0.14 m	1.4 m
Draft	0.12 m	1.2 m
Displacement	10.10 kg	10.10 ton
KG	0.0556 m	0.556 m
GM	0.0146 m	0.146 m
I_{44}	0.0329 kgm^2	3.29 tonm^2
A_{44}	$0.2358 \cdot I_{44} \text{ kgm}^2$	$0.2358 \cdot I_{44} \text{ tonm}^2$
C_{44}	$1.4827 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$	$14,46583 \text{ tonm}^2/\text{s}^2$

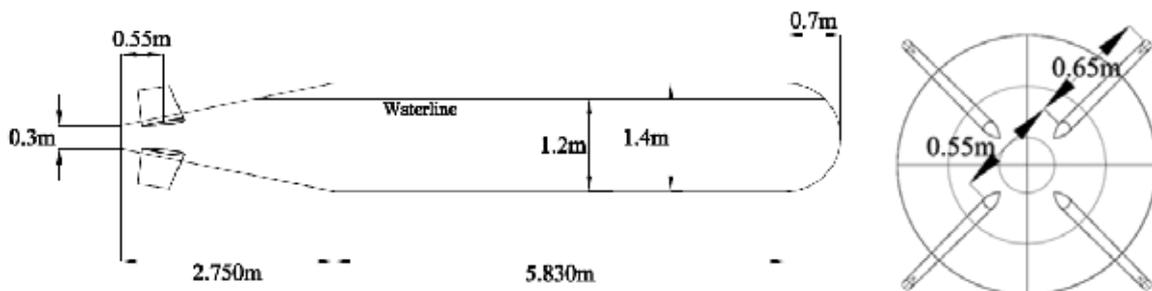


Figure 3. 2D view of the submarine (full scale)

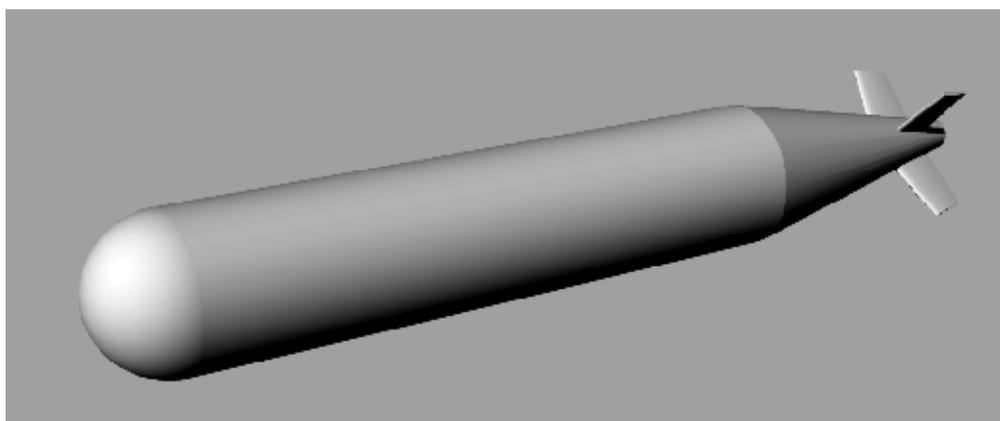


Figure 4. 3D view of the submarine

4. Numerical model

In this study, the roll motion of a submarine in surface condition was modelled. The submarine was subjected to a two-phase flow which was resolved by a numerical modelling technique. In order to solve the viscous flow around the submarine numerically, a commercial CFD software was used that discretizes the RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes) equations using the finite volume method and solves them iteratively.

The basic equations used to model the flow around a body in a viscous fluid are mass and momentum conservation equations. The flow around the submarine was considered incompressible, turbulent and time-dependent. The Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE) was used to resolve the pressure and velocity field. A suitable $k-\epsilon$ turbulence model was chosen to decrease the CPU-time compared to $k-\omega$ model, which requires higher CPU time (Tezdogan et al., 2015; Querard et al., 2008). It is also known that the effect of turbulence is small when calculating the roll motion of the hulls with round corners (Yu, 2008). The volume of fluid (VOF) method was used to solve the multiphase flows with the free surface at the air-water interface. Figure 5 shows the free surface and the separation of air and water phases.

The flow within the boundary layer has to be solved correctly for a better calculation of the boundary layer dynamics. Therefore, y^+ values on the hull surface should remain within the limits for the $k-\epsilon$ turbulence model. In this study, the y^+ values on the submarine surface were around 45 and that is considered to be suitable since it remains between the recommended ranges 30-300 for the selected turbulence model (CD-Adapco, 2014).

The roll motion of the submarine was defined by using the dynamic fluid body interaction (DFBI) module of the numerical software with the moving mesh technique. The submarine was set free to only roll motion.

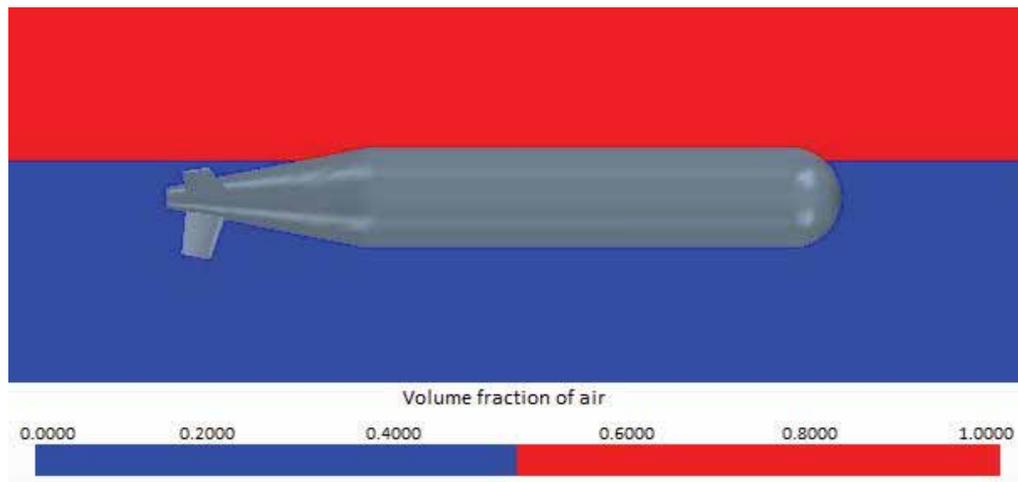


Figure 5. Volume fraction field of the numerical model

4.1. Mesh structure and boundary conditions

It is very important to determine the computational volume. In this study, no parametric study was conducted to determine the calculation volume, similar studies previously conducted in the literature and recommendations published by ITTC in 2011 were taken into account (Kahramanoglu et al., 2020; ITTC, 2011).

The main dimensions of the computational volume were given in Figure 6. The computational volume extends 3 L front of and 8 L behind, 3 L to the side, 3 L the under and 3 L the top of the boundaries of the overset region.

The left and right side of the computational volume was defined as velocity inlet and pressure outlet, respectively in Figure 7. The other surfaces were also defined as velocity inlet. The submarine surface was selected as a wall. The size of the domain is large enough, therefore no reflection was observed

from the boundaries. In addition, a velocity value equal to the ship velocity was defined only in the minus x-direction.

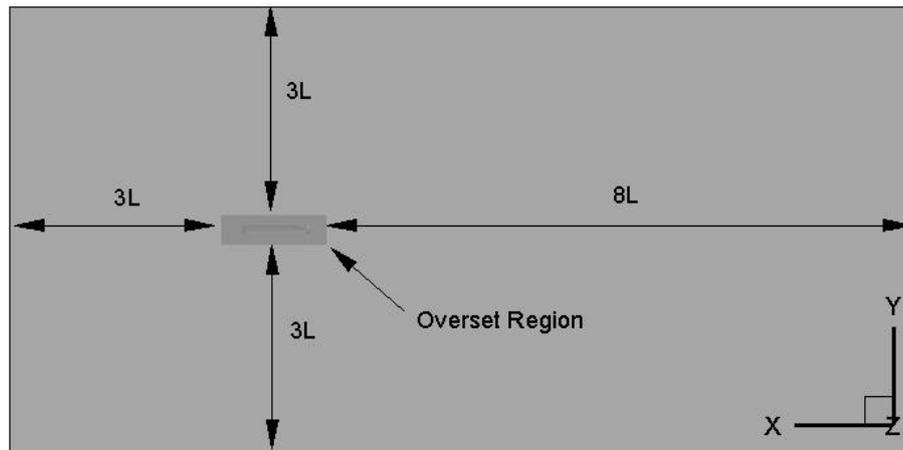


Figure 6. Size of the computational volume

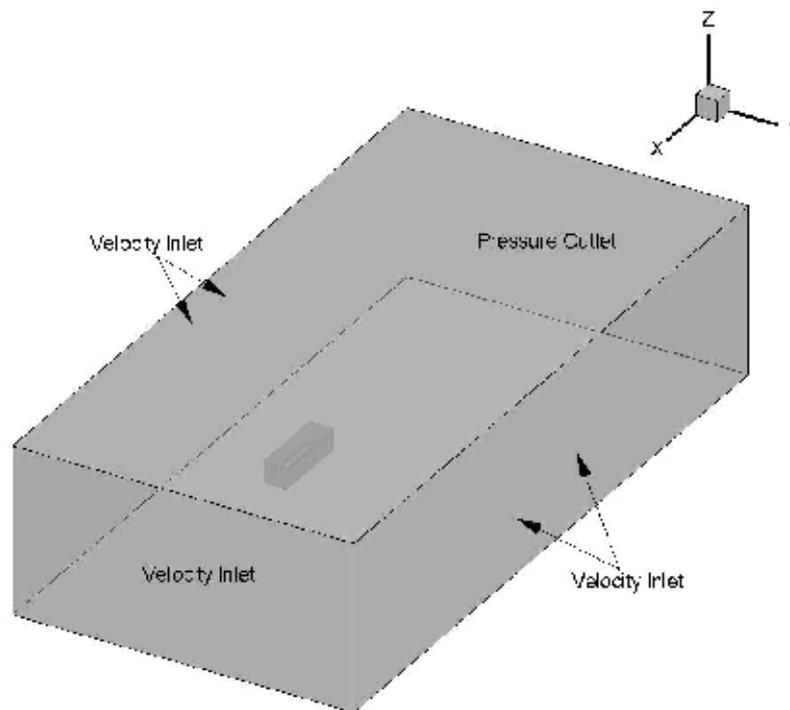


Figure 7. Boundary conditions of the computational volume

The computational volume was decomposed by the finite volume method using hexahedral mesh. Overset mesh technique was used which was shown to be able to calculate the horizontal and vertical motion of the ship with high accuracy in previous studies (Cakici et al., 2017; Cakici et al., 2018; Yildiz et al., 2017; Yildiz et al., 2019). Due to the mesh motion synchronized with the body, the overset mesh has great capability compared to rigid and deforming mesh techniques (Cakici et al., 2017). The overset mesh technique requires two different regions; the background and overset regions are shown in Figure 6. The overset mesh region was defined as a small rectangle surrounding the submarine. The grid system around the hull in the overset region was allowed to move freely. Three overlap zones were defined between the overset and background region. The data is transferred between the

overset and the background via the overset boundaries. Based on numerical experience, a much higher resolution is needed near the hull to capture the boundary layer. A hexahedral fine grid in the near wall boundary layer was applied and the cell sizes were gradually increased starting from the boundary layer to the outer boundaries. Finally, the total mesh number is equal to 1,396,366. The total number of cells used in the background region is 1,225,142 since it is 171,224 in the overset region. Figure 8-11 shows the generated mesh around the submarine.

ITTC recommends the time step not greater than at least %1 of each period for the release test. With this recommendation, the time step of the analysis was chosen as 0,005 seconds (ITTC, 2011).

The numerical simulations were performed with an 18 cores workstation that has 128 GB RAM capacity. Each simulation run required 12 hours to simulate 7 seconds roll decay motion.

More details about the numerical simulations and sensitivity analysis for the grid and time step can be found in Cansiz, 2020.

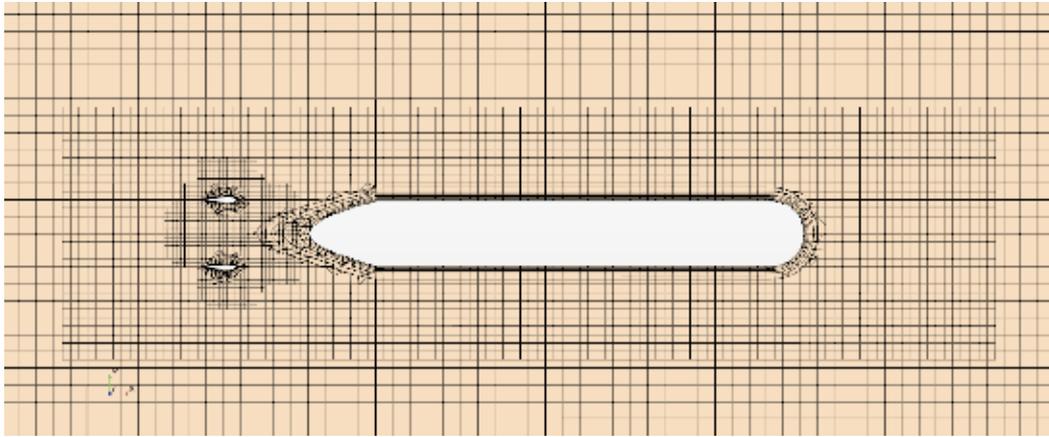


Figure 8. The mesh structure around the submarine (profile view)

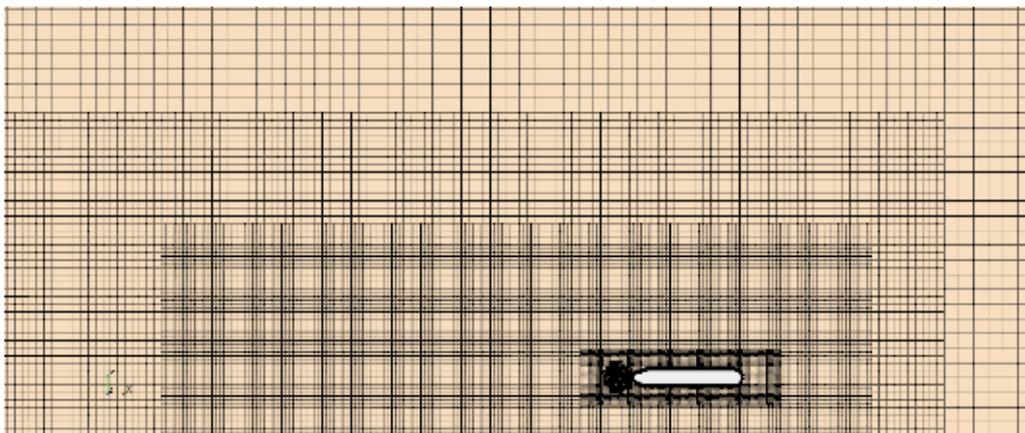


Figure 9. The overlap zones of the mesh structure

5. Numerical calculation for roll damping via roll decay curve

The roll decay time histories obtained with CFD is shown in Figure 12. The roll decay simulations were carried out at zero speed and 5 kn, 7.5 kn and 10 kn forward speeds. The roll extinction curve for zero speed condition is shown in Figure 13. The fitted cubic polynomial is also shown in Figure 13. The other roll extinction curves with varying forward speeds are given in Appendix A. The obtained extinction coefficients (a and c values) to find the linear and nonlinear damping coefficients is shown in Table 2.

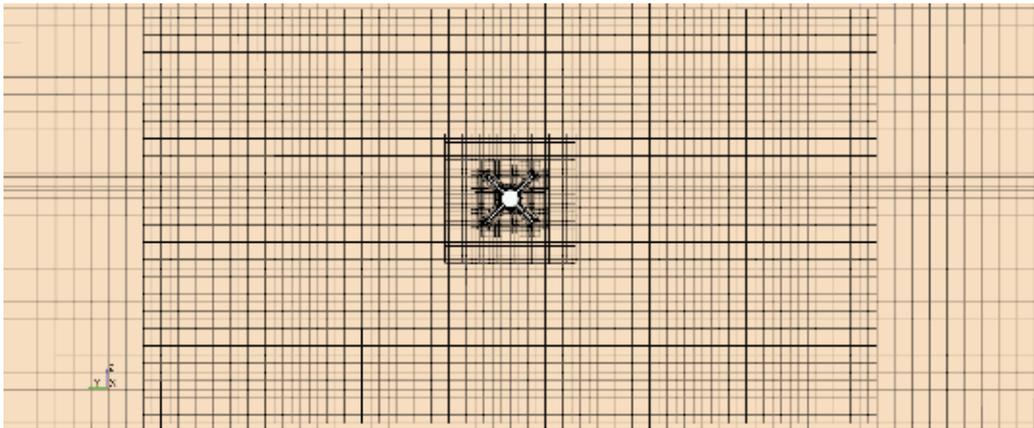


Figure 10. The mesh structure around the submarine (back view)

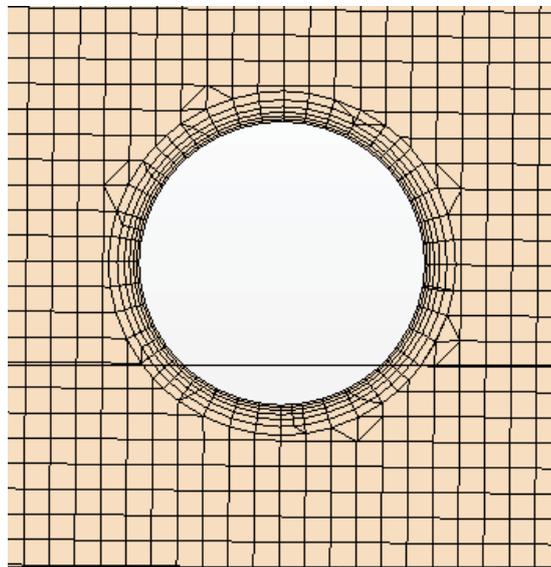


Figure 11. The prism layer around the boundary layer of the submarine (front view)

Table 2. The extinction coefficients for 0 kn, 5 kn, 7.5 kn and 10 kn

Velocity [kn]	a	c
0	0.1820	-0.21600
5	0.3095	-0.47890
7.5	0.3265	-0.63480
10	0.2310	0.01173

Table 3. The roll damping coefficients for 0 kn, 5 kn, 7.5 kn and 10 kn

Velocity [kn]	B_1 [tm^2/s^2]	B_3 [tm^2/s^2]
0	0.889883503	-0.397022612
5	1.513290901	-0.880250597
7.5	0.050334075	-0.003678283
10	0.035611551	6.79683E-05

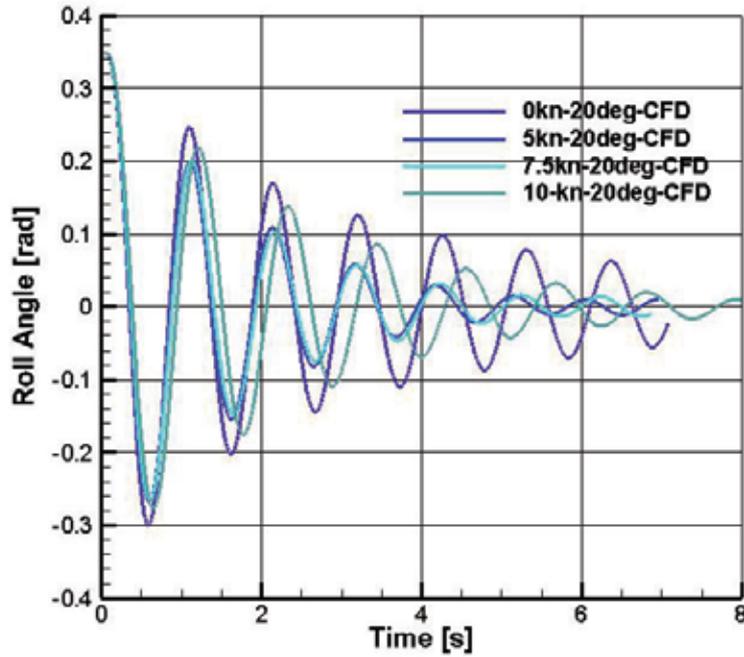


Figure 12. Roll decay time histories for all speeds

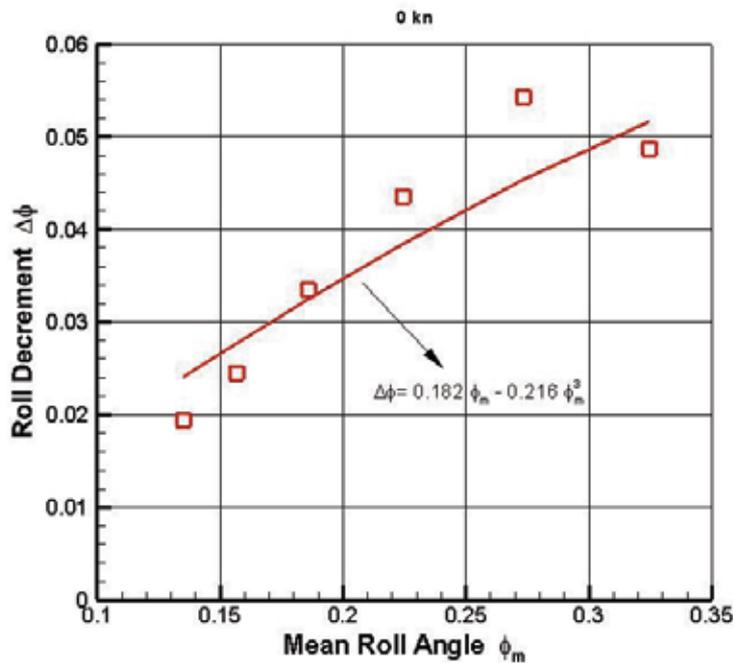


Figure 13. Roll extinction curve for 0kn

The natural roll periods were calculated by using the roll decay time histories for all speeds. The natural roll period was obtained as 1.055 s by averaging all the natural roll periods. Finally, A_{44} was calculated by using the natural roll period.

6. Mathematical model of roll decay motion

After calculating all the coefficients in the roll decay motion equation, the mathematical model for the roll decay motion of the surfaced submarine was obtained. The mathematical model was used to

obtain the roll decay time histories at zero speed and various forward speeds with an initial release angle. The mathematical model was solved using the Euler method and the results were compared with CFD results. The compared results are given in Figure 14-17. As it can be seen from the figures, there is a good agreement between the roll decay time histories.

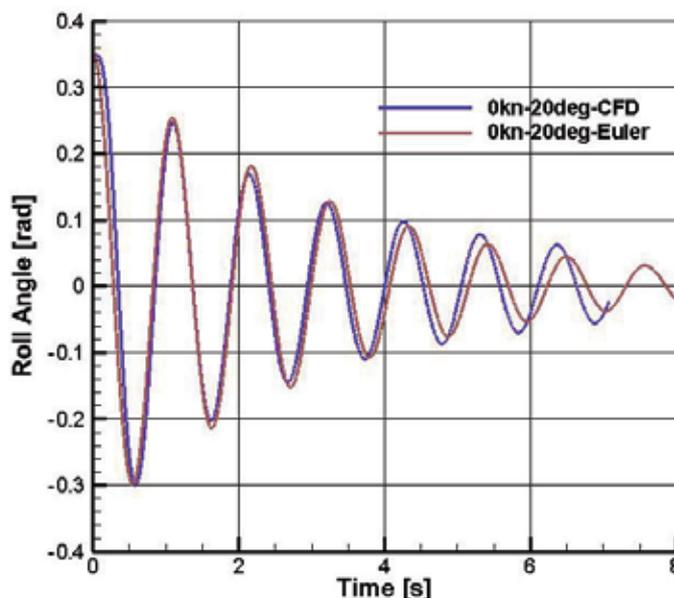


Figure 14. Comparison between CFD and Euler code for 0kn

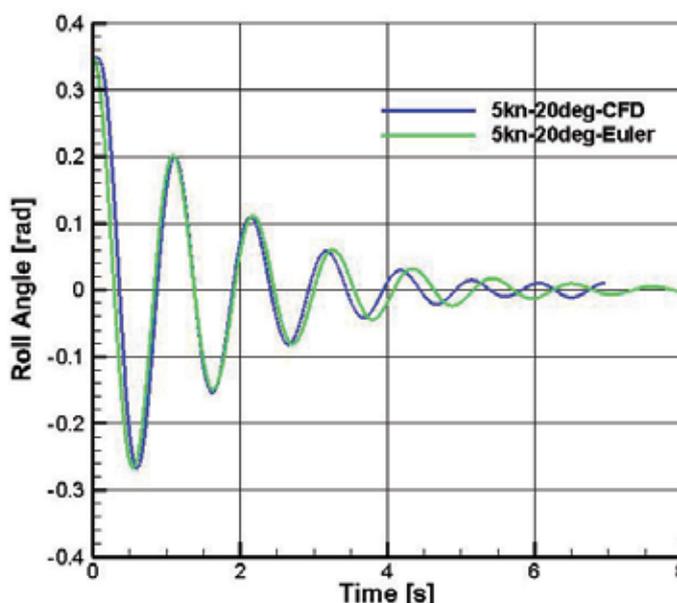


Figure 15. Comparison between CFD and Euler code for 5kn

The roll decay results of the mathematical model for 0 kn, 5 kn and 7.5 kn, especially until the third cycle, were the same as CFD results. After the third cycle, the results started to show discrepancies related to change in roll period at CFD results. The reason why the roll period changes after some time is still an unsolved problem for CFD simulations. The same problem has been observed when comparing the numerical and experimental results by other researchers (Gokce and Kinaci, 2018). Unlike the roll period, the peaks of the roll decay motion were found compatible for all speeds. The results of the mathematical model and CFD simulations showed discrepancies starting from the first

cycle. There is a phase difference observed between the results. The reason for this situation will be investigated in future work.

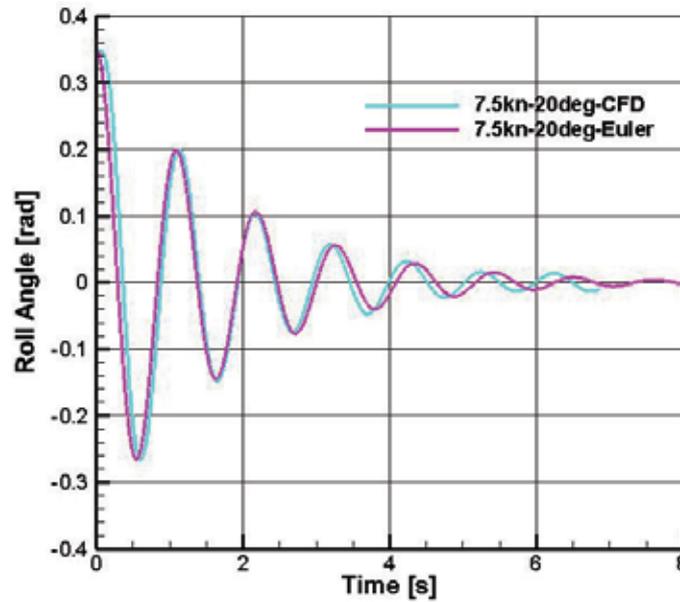


Figure 16. Comparison between CFD and Euler code 7.5kn

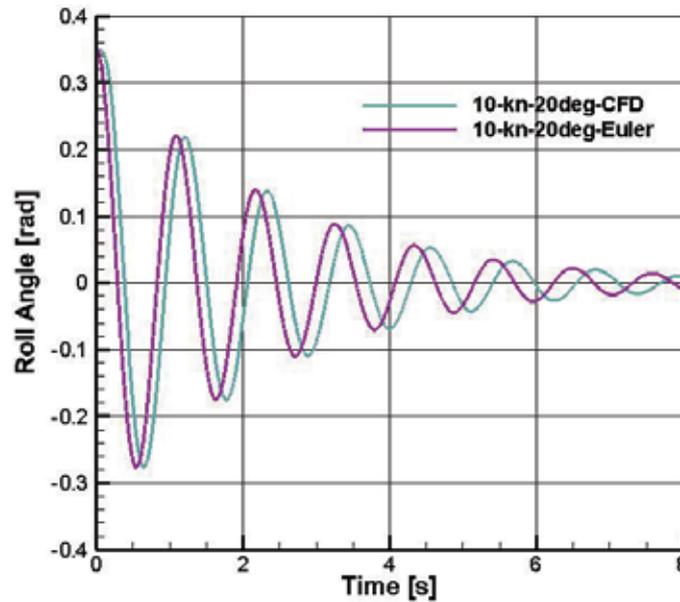


Figure 17. Comparison between CFD and Euler code 10kn

7. Conclusion

Submarines can stay extended periods on the sea surface related to operational requirements. Unlike surface ships, they can be more vulnerable to roll motions due to hull design. Extreme roll motion is dangerous for the submarine's crew and equipment. Therefore, the roll motion of submarines under surfaced condition should be investigated during the design phase. In this study, the roll decay motion of a surfaced submarine was investigated and the following outcomes were found.

- 1) The roll damping of the surfaced submarine was calculated by carrying out roll decay tests via CFD at zero speed and different forwards speeds. The roll damping increased with the effect

of increased speed until a critical speed which is 7.5 kn for the subject submarine. After critical speed, the roll damping started to decrease.

- 2) After calculating all the coefficients in the roll decay motion equation, the mathematical model was obtained and it was solved using the Euler method to get the roll decay time histories at different speeds.
- 3) The results were compatible with the CFD results, especially until the third cycle. The peaks of the roll angle were captured well with the mathematical model, however, the roll period showed some discrepancies. The roll period changed in CFD simulations after the third cycle which was constant in the mathematical model.

The obtained mathematical model results showed compatible results with the numerical results, therefore, the roll decay time histories and roll damping coefficients at various speeds can be calculated by solving the obtained mathematical model.

8. References

Cansiz, Y. (2020). Mathematical modelling of submarine roll motion. Master Thesis, Yildiz Technical University, Turkey

Cakici, F., Kahramanoglu, E., & Alkan, A. D. (2017). Numerical prediction of vertical ship motions and added resistance. *International Journal of Maritime Engineering*, 159(A4). <https://doi.org/10.3940/rina.ijme.2017.a4.450>

Cakici, F., Kahramanoglu, E., Duman, S., & Alkan, A. D. (2018). A new URANS based approach on the prediction of vertical motions of a surface combatant in head waves. *Ocean Engineering*, 162, 21-33. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.05.020>

CD-Adapco. User guide STAR-CCM Version 9.0.2. 2014.

Gokce, M.K., Kinaci, O.K. (2018). Numerical simulations of free roll decay of DTMB 5415. *Ocean Engineering*, 159, 539-551

Hedberg, S. (2006). Investigation of submarine roll behaviour. Masters Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Sweden

Himeno, Y. (1981). Prediction of ship roll damping-state of the art. U. Michigan Dept. of Naval Arch. and Marine Engineering, Report 239

Ikeda, Y., Himeno, Y., Tanaka, N. (1978). A prediction method for ship roll damping. Report of the department of naval architecture, University of Osaka Prefecture, No. 00405

ITTC. (2011). Recommended Procedures and Guidelines-Practical Guidelines for Ship CFD Applications

Kahramanoglu, E., Yıldız, B., Çakıcı, F., & Yilmaz, H. (2020). Numerical roll damping prediction of a planing hull. *Ships and Offshore Structures*, 1-10. <https://doi.org/10.1080/17445302.2020.1730088>

Letter, Brendan. (2009). Numerical and experimental roll response and decay of a surfaced submarine. Bachelor Thesis, University of Tasmania, Australia

Querard, A.B.G., Temarel, P., Turnock, S.R., 2008. Influence of viscous effects on the hydrodynamics of ship-like sections undergoing symmetric and anti-symmetric motions, using RANS. In: Proceedings of the ASME27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), Estoril, Portugal, pp. 1-10

Tezdogan, T., Demirel, Y.K., Kellett, P., Khorasanchi, M., Incecik, A., Turan, O., 2015. Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behaviour and performance in head seas due to slow steaming. *Ocean. Eng.* 186–206.

Thornhill, E., Hermanski, G. (2008). Numerical and experimental analysis of surfaced submarine roll decay behaviour. *Journal of Ocean Technology*, 3(1), 91-100

Yildiz, B., Kahramanoglu, E., Cakici, F., & Katayama, T. (2017). Numerical and experimental prediction of roll damping for a high-speed planing hull. *The 11th High Speed Marine Vehicles Symposium*, Naples, Italy

Yıldız, B., Şener, B., Yurtseven, A., & Katayama, T. (2019). Numerical and experimental calculation of roll amplitude effect on roll damping. *Brodogradnja*, 70(2), 1-15. <https://doi.org/10.21278/brod70201>

Yu, Yi-Hsiang. (2008) Prediction of flows around ship-shaped hull sections in roll using an unsteady Navier–Stokes solver. Ph.D. Thesis, The University of Texas at Austin, USA

Vogels, R.H. (2015). On the roll damping of surfaced submarines. Masters Thesis, Delft University of Technology, Holland

APPENDIX A

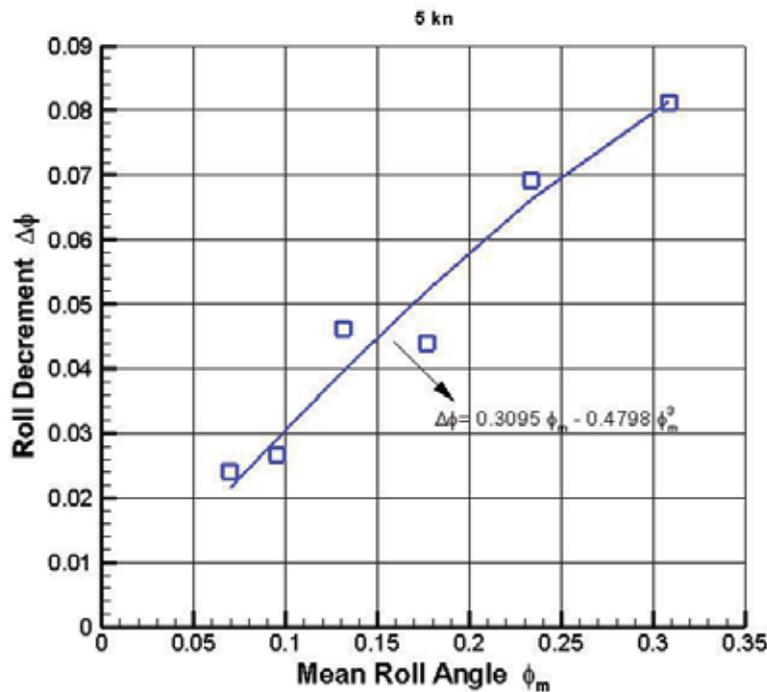


Figure 18. Roll extinction curve for 5kn

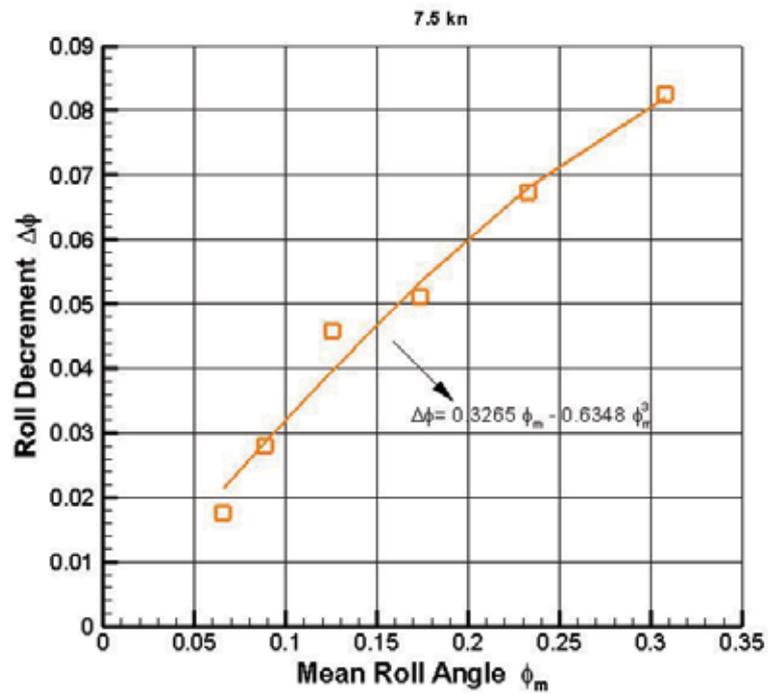


Figure 19. Roll extinction curve for 7.5kn

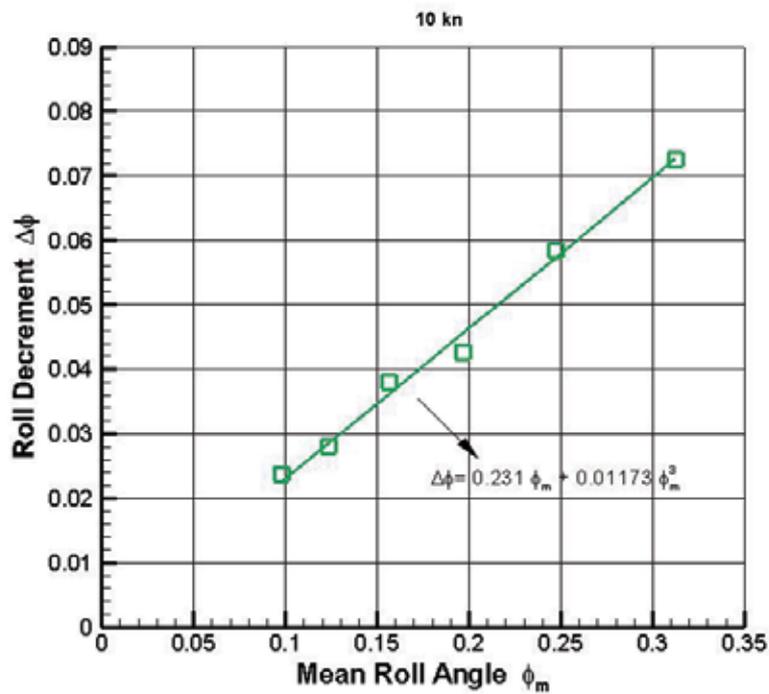


Figure 20. Roll extinction curve for 10kn

Deniz Teknolojileri Mühendisliği Alanının Bibliyometrik Analizi

Umit Gunes

Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye

ugunes@yildiz.edu.tr, ORCID: [0000-0001-6942-6403](https://orcid.org/0000-0001-6942-6403)

ÖZET

Bu çalışma, 1989-2021 Mayıs döneminde Ocean Engineering alanında yayın yapan dergilerdeki yayınları; araştırmacıların, kurumların ve dergilerin bu alana katkılarını zamanla değişimlerini dikkate alarak incelemektedir. Çalışma kapsamında Scopus veri tabanı kullanılarak toplam 292,755 adet Ocean Engineering alanı ya da bu alanla ilişkili alanlardaki yayınlar kapsamlı bir bibliyometrik yaklaşım ile analiz edilmiştir. Çalışmada analizler yayınların year, author(s), subject area, document type, keywords, affiliations, funding sponsor(s), country, source type, language, and citations of the publications bilgileri kullanılarak yapılmıştır. En fazla yayını 14,959 adet yayın ile Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference source yaparken, 1,298 adet yayın ile C. Guedes Soares yazarı yapmıştır. Ayrıca yazarların ve dergilerin Ocean Engineering alanında yayınladıkları yayınların makale başına aldıkları ortalama atıf değerleri de gösterilmiştir. Yayın başına en fazla atıf alan yazar 17.24 oranı ile Torgeir Moan olurken 33.24 oranı ile Coastal Engineering dergisi olduğu görülmüştür. Ayrıca bu alandaki yayınlarda en sık kullanılan 160 anahtar kelimeler de analiz edilmiş olup bu anahtar kelimeler 11 ana grupta tasnif edilmiştir. Bu alanda en fazla çalışılan konu 26% oranı ile Naval Architecture olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Bibliyometrik Analiz, Deniz Teknolojileri Mühendisliği, Gemi İnşaatı, Gemi Makineleri Mühendisliği, Nümerik Analiz, oşinografi, Off-shore Teknolojileri, Kıyı Mühendisliği, Çevre Mühendisliği, Enerji

Makale geçmişi: Geliş 08/06/2021 – Kabul 18/06/2021

Bibliometric Analysis for the Field of Ocean Engineering

Umit Gunes

Yildiz Technical University, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Besiktas, Istanbul,
Turkey

ugunes@yildiz.edu.tr, ORCID: [0000-0001-6942-6403](https://orcid.org/0000-0001-6942-6403)

ABSTRACT

This study examines the publications in journals published in the field of Ocean Engineering from 1889 to May 2021 by noting the contributions of researchers, institutions and journals to this field as well as the changes over time. A total of 292,755 publications in the field of Ocean Engineering and related fields have been analyzed in the study through a comprehensive bibliometric approach using the Scopus database. The analyses were performed using information such as the publications' year, author(s), subject area, document type, keywords, affiliations, funding sponsor(s), country, source type, language, and citations. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference is the most productive source with 14,959 publications. In addition, C. Guedes Soares is the most productive author in this field as an author with 1,298 publications. Also, the average number of citations per article for the articles authors and journals have made in the field of Ocean Engineering are also shown. Torgeir Moan is seen to receive the greatest number of citations per article at 17.24, while the most-cited journal is Coastal Engineering with a rate of 33.24. 160 of the most commonly used keywords in the publications in this field have also been analyzed and classified into 11 main group. The most studied topic in this field is seen to be Naval Architecture at a rate of 26%.

Keywords: Bibliometric Analysis, Ocean Engineering, Naval Architecture, Marine Engineering, Numerical Methods, Oceanography, Offshore Technologies, Coastal Engineering, Environment Science, Energy

Article history: Received 08/06/2021 – Accepted 18/06/2021

1. Introduction

Covering more than 70% of the Earth's surface, oceans feed not just all human civilization but also all life on Earth. Alongside the sustainable development of humanity, activities such as international politics, economics, military, science, and technology appear to be more connected by moving on to studies performed on the oceans. The water-food-energy nexus, the driving mechanism for water resource variation, the environmental impact of water usage, and the integration of footprint indicators strongly support the development of water-resource research and have become popular in recent years (Zhang et al., 2017). Ocean engineering plays a vital role as a comprehensive technological science aimed at the exploitation, conservation, and recovery of marine resources (Z.-M. Sun & Hua, 2015).

With the changing world and increase in accumulated knowledge, processing information using the old methods in ocean engineering is much more difficult. Studies have begun using artificial intelligence-based systems that mimic the human decision-making process to deal with these problems in the maritime sector with its huge network size and planning issues. This transformation has reshaped the maritime sector while also providing new opportunities to increase its productivity, efficiency and sustainability (Munim et al., 2020). Artificial intelligence (AI) has created a model of common applications and technologies that can be used collaboratively as a supportive component. The successful implementation of analytical applications and AI applications is expected to play a role in important steps such as increasing maritime efficiency, safety, security, and effectiveness of environmental protection while reducing the relevant administrative burden. An example can be given in the difficulties that standardizing and harmonizing the obtained data will form for such a diverse and common industry, especially in light of increasing growth (Meyers et al., 2021).

The intensification of studies being performed alongside the daily increase in maritime trade have given rise to pollution and dangers. These dangers are called marine geohazards. International collaborations should be performed to expand and improve early warning systems against these predictable and unpredictable geohazards and to better understand and monitor related processes (Camargo et al., 2019). The formation and lack of prevention of geohazards also negatively impacts the presence of natural resources on Earth. Despite the efforts made to mitigate the negative impacts by applying advanced technologies and implementing appropriate resource management policies, the sustainable use of natural resources has yet to be achieved, and the path has opened to the depletion of natural resources and their related environmental emissions. More than half of the studies in the subject categories of environmental sciences and ecology, engineering, and water resources have been performed for managing water resources and increasing environmental and ecologically sustainable development (Zhang et al., 2017). Natural resource accounting has critical importance in promoting sustainable natural resource management (Zhong et al., 2016).

Environmental emissions have significant effect on Ocean Engineering studies. One of example of environmental emissions is the increase in pollution forming at estuaries. The widespread effects of the eutrophication of estuarine waters can be said to have become a global phenomenon, and larger studies will take place on estuary pollution in the future (J. Sun et al., 2012).

Human activities cause a variety of impacts involving large amounts of plastic being dumped into marine ecosystems. This situation can threaten the health and integrity of the ecosystem and reduces the ability to provide the goods and services upon which human well-being depends (Pauna et al., 2019). The microplastic pollution found in the marine environment belongs to areas of developing research. Studies performed on the impacts on marine ecosystems and humans explain how

microplastics were gradually noticed in marine environments and what difficulties are faced in this field (Wu et al., 2021).

The analyses of these studies and measures taken against pollution are quite important in terms of the impacts on microorganisms living in water. With an estimated 30,000 to 1,000,000 different species, microalgae constitute a large group of microorganisms that have been extensively examined for their ecological functions in marine and freshwater environments as well as possible uses for food, produce, cosmetics, biofuels, nanomaterials, and drugs (Rumin et al., 2020).

Bibliometric studies have been increasing these days to form more standard information by increasing and digitalizing databases. The production of the standard data needed for data analyses has also developed accordingly. Bibliometric studies are produced in a specific field, analyze the relevant field using published metadata, and present the report on the relevant field. The developments and changes in a field can be seen thanks to bibliometric studies. The current study will examine the publications in the literature on Ocean Engineering using the method of bibliometric analysis. Although serious studies have been performed in this field (Meyers et al., 2021; Z.-M. Sun & Hua, 2015), no comprehensive study such as this is seen to have been published yet.

2. Methods

The most important element required for bibliometric analysis studies is the data to be analyzed; they must have high accuracy and be classified and standardized. Although many academic databases exist today, Web of Science (WoS) and Scopus are among the most important and useful platforms. Scopus contains more inclusive results than WoS and offers the keywords occurring in publications and the information WoS provides. Scopus has been chosen in this study because it provides a source of high-quality bibliometric data (Baas et al., 2020).

This study searches all publications in the field of Ocean Engineering since 1989 to the present and published in Scopus. While making queries within the scope of the study, the All Science Journal Classification (ASJC) feature in which Scopus classifies journals has been used in place of keywords representing the field of Ocean Engineering. Scopus gives an ASJC code to each journal within the scope of its publication area. While querying, 2212 has been entered as the ASJC code in the SUBJTERMS field (What Is the Complete List of Scopus Subject Areas and All Science Journal Classification Codes (ASJC)? - Scopus: Access and Use Support Center, 2020). As of May 20, 2021, 292,755 publications were found published as a result of this query; the list of these publications being analyzed can be accessed from the file prepared within the scope of this study at (Gunes, 2021).

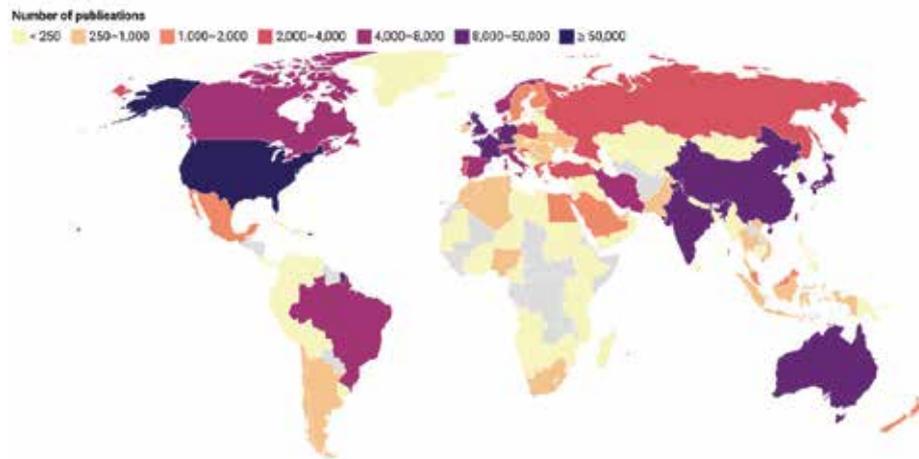
Analyses have been done using the program OriginLab with respect to the values for year, author(s), subject area, document type, keywords, affiliations, funding sponsor(s), country, source type, language, and citations of the publications. Data have been standardized as much as possible while performing the analyses. For example, authors who are found with different names in Scopus have been combined under one author. Another example is that keywords similar to one another have been grouped in order to achieve more generalizable results. Studies published in journals within the scope of Ocean Engineering have been analyzed over time using the number of publications, number of citations, number of citations/number of publications, h-index, CiteScore, SCImago, Journal Rank (SJR), and Source Normalized Impact per Paper (SNIP) (Measuring a Journals Impact, 2021; Toom, 2018)

The sum of values in some analyses is greater than 100%. This is due to the relevant article being evaluated separately for different properties. For example, if an article is related to two fields, this

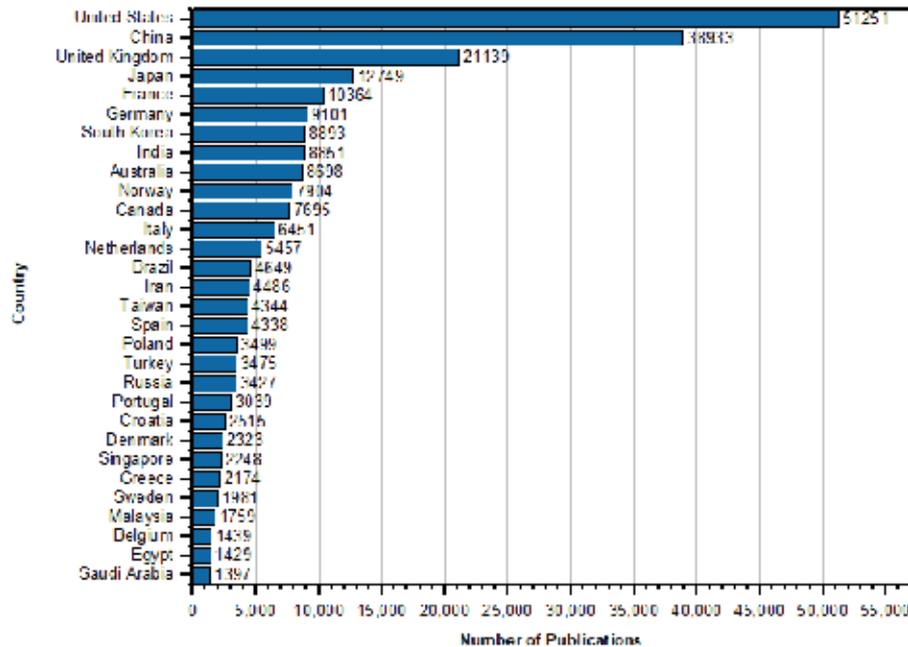
article is included in both fields for the analysis. Likewise, because each article uses various keywords, each article is evaluated separately under the relevant keyword analysis.

3. Results and Discussion

A total of 295,275 articles in the field of Ocean Engineering were published between 1889 and May 2021 according to SCOPUS. When examining these studies in terms of Country/Territory, five countries are seen to have published more than 10,000 publications.



(a)



(b)

Figure 1. Distribution of publications with respect to country in the field of ocean engineering from 1970 to 2021.

Of these, 17.5% (51,251) were made by authors from the USA, followed by China with 13.3% (38,933) and the UK in third at 7% (21,139). Figure 1a shows the publications produced by countries between 1970-2021 under 7 groups: 250, 250-1,000, 1,000-2,000, 2,000-4,000, 4,000-8,000, 8,000-50,000, and

over 50,000. Figure 1b provides the publication information from the 30 countries that published the most in this field. The other two countries in the top five are Japan at 4.4% (12,749) and France at 3.5% (10,364). These are followed by Germany, South Korea, India, Australia, Norway, Canada, Italy, Netherlands, Brazil, Iran, Taiwan, Spain, Poland, Turkey, Russia, and Portugal, respectively.

Table 1 provides information about the top 30 authors who've published the most in the field of ocean engineering. When examining these authors, C. Guedes Soares with 1,298 publications is seen to have published the most. Jeremy Beckman is second with 515 publications, followed by Torgeir Moan with 313. When looking at the most-cited authors in the field of ocean engineering, C. Guedes Soares is seen to come in first with 17,174 citations, Torgeir Moan in second with 5,913, and Jeom Kee Paik in third with 3,972. The authors with the highest h-index value who have publications in the field of ocean engineering in order are C. Guedes Soares with an h-index of 59, Torgeir Moan with an h-index of 37, and Jeom Kee Paik with an h-index of 33. The h-index values here are only in regard to publications in the field of engineering. When considering all publications, C. Guedes Soares is seen to have an h-index of 74.571 with a total of 1,946 total publications and 30,177 citations, Torgeir Moan to have an h-index of 49 with a total of 74,571 publications and 10,136 citations, and Jeom Kee Paik to have an h-index of 44 with a total of 370 publications and 6,530 citations.

When calculating authors' number of publications and citations in this field and their average number of citations per paper, Torgeir Moan comes in first with 17.24, Bin Teng is second with 16.73, Jeom Kee Paik is third with 16.35, Moohyun Kim is fourth with 16.09, and Atilla Incecik is fifth with 15.43.

Figure 2 shows the publishing language for the publications in the field of ocean engineering. When examining these publications, the publishing languages in order are seen as English at 93% (271,786) followed by French (7,261), Chinese (4,985), and German (4,446) each at 2%. The other publication languages in order of frequency are Croatian, Korean, Turkish, Serbian, Japanese, Spanish, Slovenian, Russian, Bosnian, and Portuguese.

Figure 3 shows the types of publications published in the field of ocean engineering. When examining these publications, 65.7% are found to be articles (192,444), 26.8% to be conference papers (78,358), 2.8% to be notes (8,118), 1.7% to be reviews (5,058), and 0.9% to be editorials (2,602). Editorials are typically identified as editor's opinions, introductions, lead-in articles, forwards, or prefaces and are usually located prior to the table of contents. After editorials are also found short surveys (2,065) at 0.7%, letters (1,032) at 0.4%, and book chapters (931) at 0.3%.

Figure 4 shows the number of publications per year in the field of ocean engineering. The number of annual publications is seen to have increased exponentially over time. Publications in the field in the years 1995-1998, 2007, 2010, and 2016 are seen to have increased more than the previous increase trend.

Figure 5 shows the increase in the number of annual citations appearing in publications in this field. When examining the average citations per publication ratio, this ratio is seen to have continuously increased over the years. This ratio, which was 0.12 in 1970, was 3.09 in 2000, 6.5 in 2010, 10.14 in 2015, 14.70 in 2018, and 18.02 in 2020.

Table 2 shows the 160 most-used keywords in publications in the fields of ocean engineering as well as how many keywords were used in total for the various categories of ocean engineering. The 10 most frequently used keywords in publications in order are Offshore Oil Well Production (n = 17,593) at 6.01%, Ships (n = 12,442) at 4.25%, Arctic Engineering (n = 11,555) at 3.95%, Computer Simulation (n = 11,458) at 3.91%, Mathematical Models (n = 10,206) at 3.49%, Finite Element Method (n = 9,768) at

3.34%, Water Waves (n = 9,683) 3.31%, Hydrodynamics (n = 9,268) at 3.17%, Oceanography (n = 8,980) at 3.07%, Offshore Structures (n = 8,896) at 3.04 %, and Offshore Technology (n = 8,468) at 2.89%.

Figure 6 gathers the 160 most frequently used keywords under 11 categories. Many keywords actually fall under more than one category. This study groups the keywords under the closest relevant category.

Table 1. The Most Productive Authors and their Scores in the Field of Ocean Engineering from 1970 to 2021.

Authors	Number of Publications	Number of Citations	Document h-index	Average Citations per paper
C. Guedes Soares	1,298	17,174	59	13.23
Jeremy Beckman	515	27	2	0.05
Torgeir Moan	343	5,913	37	17.24
Jeom Kee Paik	243	3,972	33	16.35
Elaine Maslin	231	11	1	0.05
Decheng Wan	225	1,172	17	5.21
Moohyun Kim	217	3,492	32	16.09
Dag Myrhaug	211	2,114	24	10.02
Gene Kliewer	209	10	2	0.05
Yordan Garbatov	193	2,071	24	10.73
David Tinsley	183	4	1	0.02
Dong-Sheng Jeng	182	2,679	32	14.72
Judy Maksoud	181	10	2	0.06
Bruce A. Beaubouef	180	1	1	0.01
Nick Terdre	179	20	2	0.11
Ove Tobias Gudmestad	173	822	14	4.75
Weicheng Cui	171	1,270	15	7.43
William Furlow	169	22	2	0.13
Hocine Oumeraci	162	1,745	21	10.77
William C. Vantuono	161	9	2	0.06
Christophe Bouchet	157	1	1	0.01
Bin Teng	154	2,576	30	16.73
Tamaki Ura	153	1,204	18	7.87
B. J. Leira	150	881	17	5.87
Jennifer Pallanich	150	8	2	0.05
Yong Bai	147	1,036	17	7.05
Sayoung Hong	147	1,135	17	7.72
Atilla Incecik	146	2,253	26	15.43
Yonghwan Kim	144	1,906	22	13.24
Menglan Duan	142	916	17	6.45

Figure 7 shows the classification of publications in the field of ocean engineering according to SCOPUS Subject Area. All publications (N = 292,970) in this field fall under the category of engineering. Publications also involve the other SCOPUS Subject Areas of Environmental Science (n = 81,823) at 27.9%, Earth and Planetary Sciences (n = 77,681) at 26.5%, Energy (n = 72,186) at 24.7%, Mathematics (n = 20,67) at 7.1%, Agricultural and Biological Sciences (n = 14,392) at 4.9%, Social Sciences (n =

12,329) at 4.2%, Chemical Engineering (n = 11,721) at 4.0%, Computer Science (n = 8,116) at 2.8%, and Physics and Astronomy (n = 5,754) at 2.0%.

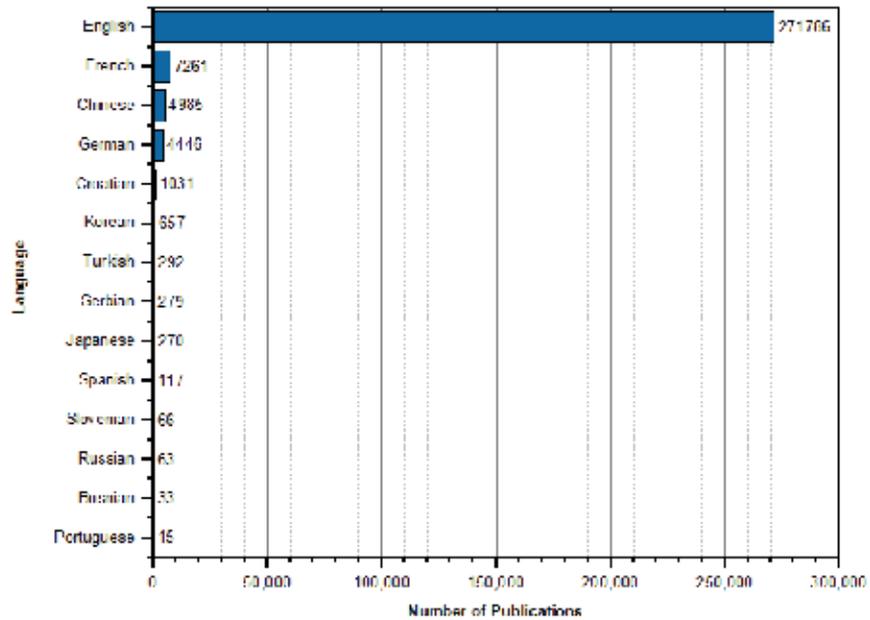


Figure 2. Distribution of publications with respect to language in the field of ocean engineering from 1970 to 2021.

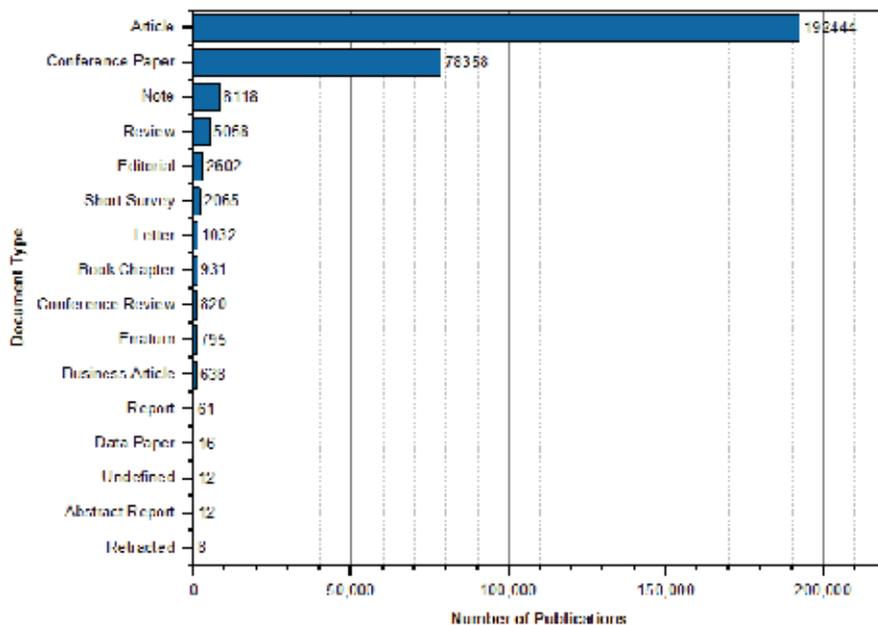


Figure 3. Types of publications in the field of ocean engineering from 1970 to 2021.

Figure 8 provides the number of authors in the publications in the field of ocean engineering. Of the publications, 21.9% (63,892) have single authors, followed respectively by 20.8% (60,597) with two authors, 18.8% (54,912) with three authors, 12.8% (37,498) with four authors, 11.1% (32,280) with five authors, and 14.7% (42,821) with more than five authors.

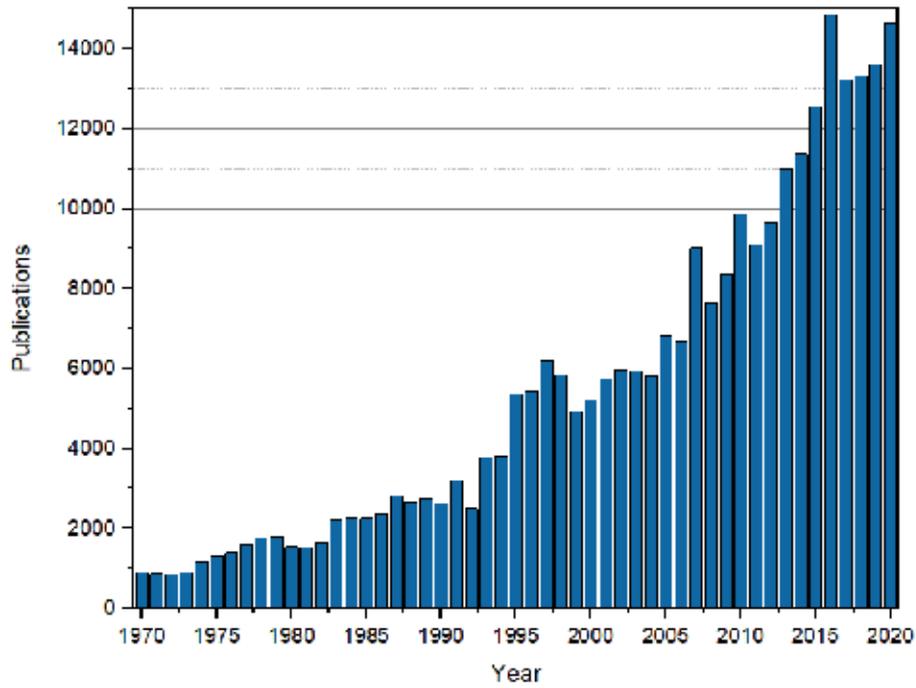


Figure 4. Timeline of publications in the field of ocean engineering from 1970 to 2021.

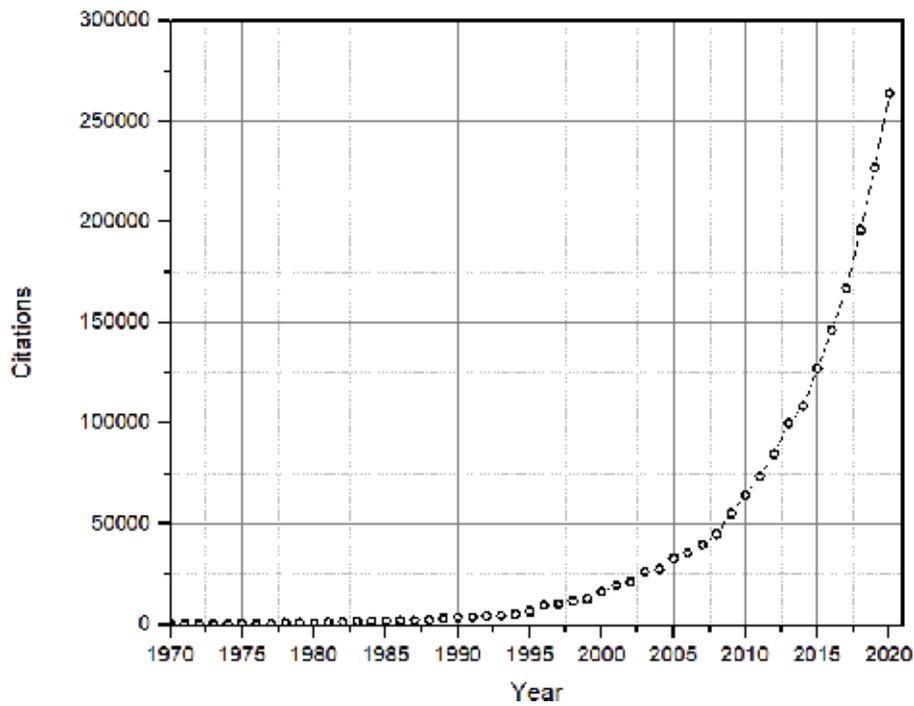


Figure 5. Timeline of the number of citations in the field of ocean engineering from 1970 to 2021.

Table 3 provides information about the 30 most published sources in this field. In order beginning with the most publications published, Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference ranks first with 14,959 publications, Desalination and Water Treatment ranks second with

Table 2. Distribution of the Top 160 Keywords in the Field of Ocean Engineering.

Naval Architecture	125,690	Hydrodynamics	72,182	Offshore Technologies	56,366
Ships	12,442	Water Waves	9,683	Offshore Oil Well Production	17,593
Design	5,977	Hydrodynamics	9,268	Offshore Structures	8,896
Shipbuilding	4,665	Dynamic Response	3,243	Offshore Technology	8,468
Hulls	4,434	Fluid Dynamics	2,996	Offshore Oil Wells	3,221
Mooring	4,178	Damping	2,955	Pipelines	2,821
Structural Design	4,145	Dynamics	2,872	Piles	2,524
Deformation	3,526	Ship Propulsion	2,872	Production Platforms	2,340
Ship Design	3,430	Equations Of Motion	2,820	Offshore Engineering	2,132
Underwater Acoustics	3,430	Nonlinear Equations	2,600	Offshore Structure	1,787
Structural Analysis	3,390	Navier Stokes Equations	2,588	Offshore Pipelines	1,772
Vessel	3,304	Vortex Flow	2,534	Offshore Oil Fields	1,681
Time Domain Analysis	3,204	Reynolds Number	2,357	Infill Drilling	1,586
Fatigue Of Materials	2,776	Fluid Structure Interaction	2,337	Drilling Platforms	1,545
Uncertainty Analysis	2,604	Cylinders	2,331	Coastal Engineering	28,220
Plates	2,501	Degrees of Freedom	2,299	Coastal Engineering	7,250
Velocity	2,487	Wave Propagation	2,281	Coastal Zones	3,674
Loading	2,485	Stability	2,228	Sediment Transport	2,901
Sailing Vessels	2,353	Drag	2,184	Soils	2,876
Probability	2,337	Friction	2,088	Breakwaters	2,580
Autonomous Underwater Vehicles	2,314	Wave-structure Interaction	1,713	Beaches	2,533
Vibrations	2,296	Turbulence	1,667	Ports And Harbors	2,449
Stiffness	2,287	Ship Motion	1,576	Sand	2,040
Performance Assessment	2,237	Water Depth	1,573	Floods	1,917
Costs	2,129	Loads	1,565	Environmental Science	27,344
Reliability	2,100	Corrosion	1,552	Water Treatment	3,010
Decision Making	1,994	Numerical Methods	75,273	Water Quality	2,391
Submersibles	1,974	Computer Simulation	11,458	Seawater	2,275
Cracks	1,952	Mathematical Models	10,206	Sediments	2,227
Stress Analysis	1,906	Finite Element Method	9,768	Erosion	2,148
Modeling	1,900	Numerical Model	6,942	Wastewater Treatment	2,126
Buckling	1,892	Numerical Methods	6,832	Wastewater	2,092
Parameter Estimation	1,839	Computational Fluid Dynamics	5,608	Concentration	2,077
Sonar	1,839	Numerical Models	4,182	Environmental Impact	1,986
Stochastic Systems	1,795	Algorithms	3,454	Aqueous Solution	1,964
Maintenance	1,737	Algorithm	2,231	Membrane	1,879
Three Dimensional	1,732	Numerical Simulation	2,161	Pollutant Removal	1,617
Sensitivity Analysis	1,731	Boundary Conditions	2,104	Desalination	1,552
Welding	1,709	Numerical Results	1,866	Energy	23,457
Monte Carlo Methods	1,701	Boundary Element Method	1,856	Ocean Currents	5,932
Shipyards	1,665	Numerical Analysis	1,794	Adsorption	3,695
Welds	1,664	Computer Software	1,605	Marine Risers	3,606
Geometry	1,653	Computational Methods	1,604	Wave Energy Conversion	3,007
Tanks	1,643	Differential Equations	1,602	Gas Industry	2,004
Installation	1,600	Oceanography	31,415	Water Wave Effects	1,777
Frequency Domain Analysis	1,595	Oceanography	8,980	Water Levels	1,742
Reliability Analysis	1,578	Forecasting	3,436	Reaction Kinetics	1,694
Naval Architecture	1,560	Navigation	3,046	Marine Engineering	18,140
Arctic Engineering	15,844	Storms	2,585	Marine Engineering	3,903
Arctic Engineering	11,555	Atlantic Ocean	2,371	Diesel Engines	1,653
Ice	2,436	Remote Sensing	2,167	Optimization	5,521
Sea Ice	1,853	Climate Change	2,065	Experimental Study	3,285
Ocean Engineering	11,792	Monitoring	1,864	Cost Effectiveness	2,114
Ocean Engineering	6,723	Seismology	1,699	Experiments	1,664
Risk Assessment	3,417	Rivers	1,623		
Accident Prevention	1,652	North Sea	1,579		

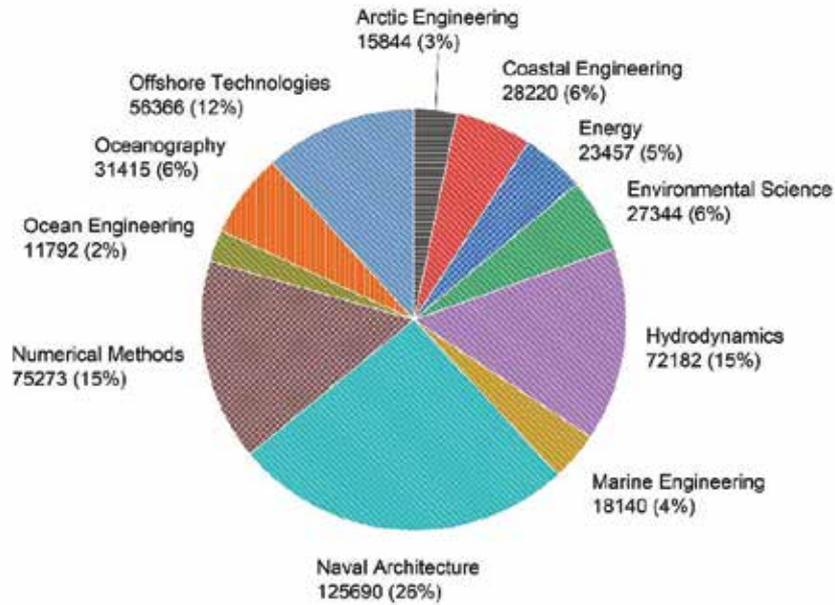


Figure 6. Distribution of keywords in the core research areas of ocean engineering.

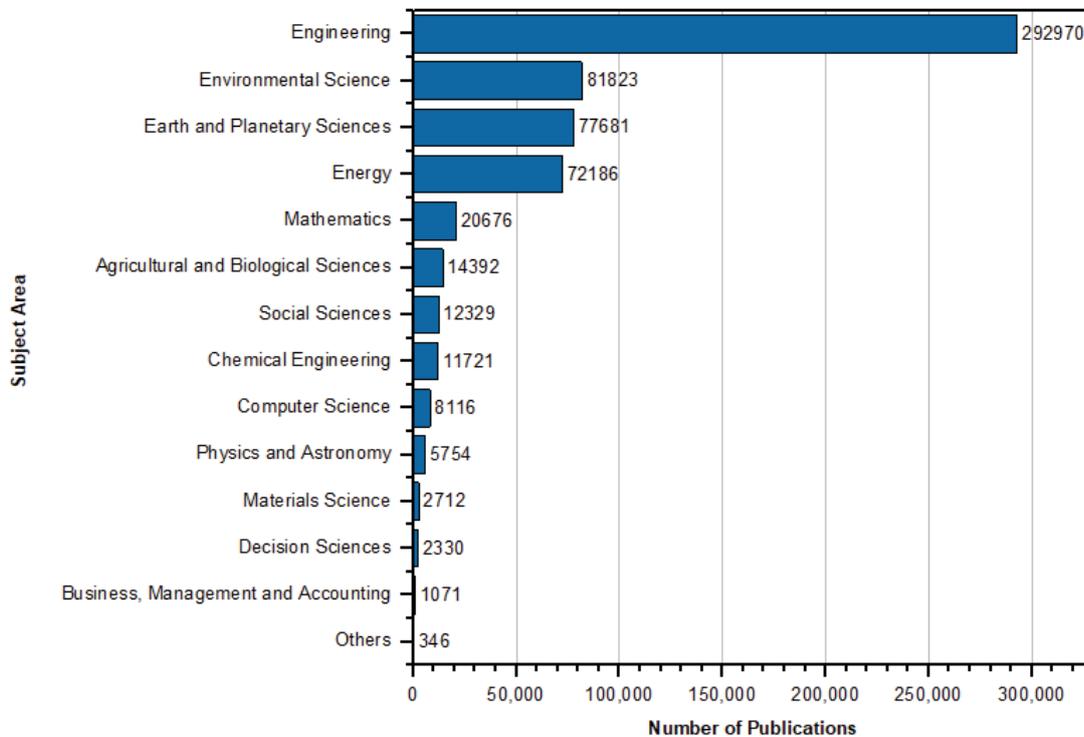


Figure 7. Distribution of ocean engineering publications by Scopus Subject Area.

14,814 publications, Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering ranks third with 14,194 publications, Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference ranks fourth with 11,895 publications, Geological Society Special Publication Book Series

comes in fifth with 10,200 publications, and the journal Ocean Engineering comes in sixth with 8,970 publications.

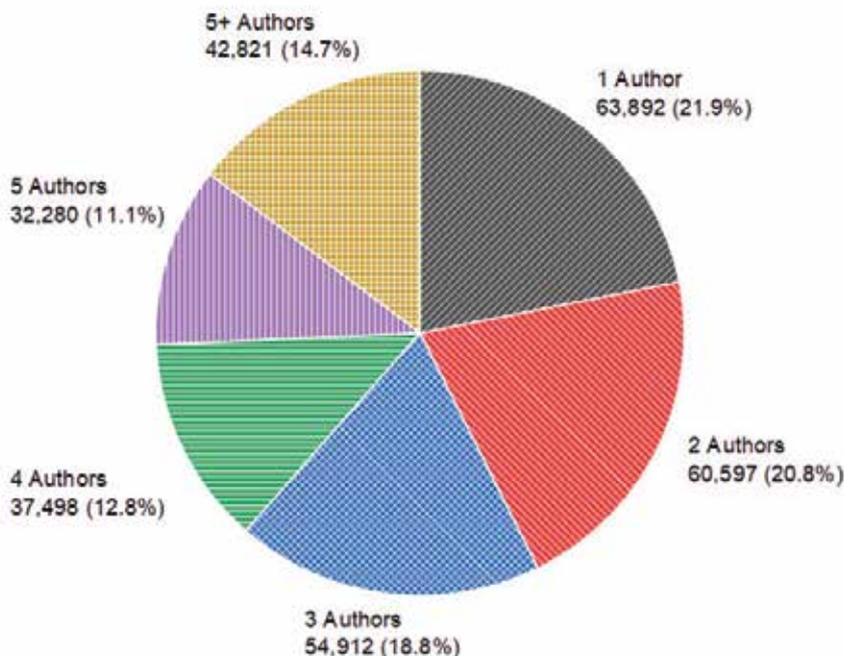


Figure 8. Percentages for the number of authors per publication in the field of ocean engineering.

When analyzed in terms of total number of citations, Geological Society Special Publication is first with 240,568 citations, Nonlinear Dynamics is second with 178,400 citations, Ocean Engineering is third with 139,030 citations, International Journal of Impact Engineering is fourth with 127,918 citations, and the Journal of Atmospheric and Oceanic Technology is fifth with 112,540 citations.

When examining the total number of received citations with respect to number of articles published, the top 10 sources in order are Coastal Engineering with 33.24, International Journal of Impact Engineering with 30.75, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology with 28.60, IEEE Journal of Oceanic Engineering with 27.31, Geological Society Special Publication with 23.59, Computational Mechanics with 23.41, Nonlinear Dynamics with 21.09, Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering with 17.88, Applied Ocean Research with 15.98, and Ocean Engineering with 15.50.

Table 4 provides information on the 30 most impactful publications in the field of ocean engineering. Coming first among these publications and published in 1989 is the article "Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes" with 12,222 citations. Published in 1998, the article "A New Meshless Local Petrov-Galerkin (MLPG) Approach in Computational Mechanics" comes in second with 2,093 citations. While the article "Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides" published in 2002 received 2,038 citations, the 1998 article "The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package" received 1,781 citations. In fifth place with 1,701 citations is the article "Generalizing the Finite Element Method: Diffuse Approximation and Diffuse Elements" published in 1992.

Table 3. The Top 30 Most Productive Sources in the Field of Ocean Engineering from 1970 to 2021.

Source Title	Type	ISSN	CiteScore	SJR	SNIP	Number of Publications	Number of Citations	Citations/ Publications
Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference	Proceeding	-	0.6	0.211	0.347	14,959	41,368	2.765
Desalination and Water Treatment	Journal	1944-3994	2.7	0.327	0.476	14,814	92,116	6.218
Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering	Proceeding	-	0.8	0.282	0.486	14,194	48,763	3.435
Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference	Proceeding	0160-3663	0.5	0.202	0.526	11,895	34,776	2.924
Geological Society Special Publication	Book Series	0305-8719	4.7	0.701	0.811	10,200	240,568	23.585
Ocean Engineering	Journal	0029-8018	4.8	1.281	2.210	8,970	139,030	15.499
Nonlinear Dynamics	Journal	0924-090X	8.7	1.394	1.728	8,459	178,400	21.090
Offshore	Journal	0030-0608	0.0	0.100	0.000	6,501	1,134	0.174
Hydrotechnical Construction	Journal	0018-8220	-	-	-	6,022	1,026	0.170
Proceedings of the Coastal Engineering Conference	Proceeding	-	-	-	-	5,064	17,978	3.550
Journal of the American Society for Naval Engineers	Journal	0028-1425	-	0.149	0.491	4,833	1,068	0.221
International Journal of Impact Engineering	Journal	0734-743X	6.9	1.671	2.405	4,160	127,918	30.750
Journal of Navigation	Journal	0373-4633	3.7	0.544	1.438	4,069	22,071	5.424
Journal of Atmospheric and Oceanic Technology	Journal	2296-7745	4.4	1.420	1.164	3,935	112,540	28.600
Frontiers in Marine Science	Journal	0739-0572	4.2	0.940	1.110	3,909	29,800	7.623
Computational Mechanics	Journal	0178-7675	5.2	1.612	1.381	3,852	90,161	23.406
Soil Mechanics and Foundation Engineering	Journal	0038-0741	0.9	0.284	0.795	3,722	3,010	0.809
Naval Architect	Trade Journal	0306-0209	0.1	0.106	0.126	3,187	1,231	0.386
Naval Engineers Journal	Journal	0028-1425	-	0.149	0.149	3,013	5,609	1.862
Sea Technology	Trade Journal	0093-3651	0.1	0.105	0.000	2,972	4,452	1.498
Coastal Engineering	Journal	0378-3839	7.2	1.820	2.179	2,813	93,510	33.242
IEEE Journal of Oceanic Engineering	Journal	0364-9059	5.9	0.808	2.071	2,804	76,575	27.309
Journal of Ship Mechanics	Journal	1007-7294	0.4	0.230	0.454	2,781	7,045	2.533
Applied Ocean Research	Journal	1187	4.2	1.288	2.144	2,711	43,316	15.978
Offshore Engineer	Trade Journal	0305-876X	0.0	0.100	0.000	2,616	159	0.061
Journal of Marine Science and Engineering	Journal	2077-1312	1.8	0.544	1.134	2,351	6,865	2.920
Motor Ship	Trade Journal	0027-2000	0.0	0.100	-	2,296	86	0.037
Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering	Journal	0733-950X	3.6	0.799	1.429	2,071	37,029	17.880
Coastal Zone Proceedings of the Symposium on Coastal and Ocean Management	Proceeding	-	-	-	-	2,012	1,798	0.894
International Journal of Earth Sciences and Engineering	Journal	0974-5904	0.2	0.103	0.065	1,974	1,699	0.861

Table 4. The Top 30 Most-Cited Publications in the Field of Ocean Engineering from 1970 to 2021.

Publication Year	Document Title	Authors	Journal Title	Total Citations
1989	Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes	Sun S.-S., McDonough W.F.	Geological Society Special Publication	12,222
1998	A new Meshless Local Petrov-Galerkin (MLPG) approach in computational mechanics	Atluri S.N., Zhu T.	Computational Mechanics	2,093
2002	Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides	Egbert G.D., Erofeeva S.Y.	Journal of Atmospheric and Oceanic Technology	2,038
1998	The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package	Kummerow C., Barnes W., Kozu T., Shiue J., Simpson J.	Journal of Atmospheric and Oceanic Technology	1,781
1992	Generalizing the finite element method: Diffuse approximation and diffuse elements	Nayroles B., Touzot G., Villon P.	Computational Mechanics	1,701
2002	A predictor-corrector approach for the numerical solution of fractional differential equations	Diethelm K., Ford N.J., Freed A.D.	Nonlinear Dynamics	1,447
2008	Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: A tutorial	Stedmon C.A., Bro R.	Limnology and Oceanography: Methods	1,436
2001	Estimation of small failure probabilities in high dimensions by subset simulation	Au S.-K., Beck J.L.	Probabilistic Engineering Mechanics	1,291
2009	Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms	Winker D.M., Vaughan M.A., Omar A., Hu Y., Powell K.A., Liu Z., Hunt W.H., Young S.A.	Journal of Atmospheric and Oceanic Technology	1,231
1999	Review of fish swimming modes for aquatic locomotion	Sfakiotakis M., Lane D.M., Davies J.B.C.	IEEE Journal of Oceanic Engineering	1,176
1977	Rapid Method for Source Rock Characterization and for Determination of Their Petroleum Potential and Degree of Evolution	Espitalie J., Laporte J.L., Madec M., Marquis F., Leplat P., Paulet J., Boutefeu A.	Rev Inst Fr Pet	1,144
2004	Development and validation of a three-dimensional morphological model	Lesser G.R., Roelvink J.A., van Kester J.A.T.M., Stelling G.S.	Coastal Engineering	1,106
1991	Stable Adaptive Teleoperation	Niemeyer G., Slotine J.-J.E.	IEEE Journal of Oceanic Engineering	1,093
2003	An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: Application to coastal ocean and estuaries	Chen C., Liu H., Beardsley R.C.	Journal of Atmospheric and Oceanic Technology	1,014
1983	Sonar Tracking of Multiple Targets Using Joint Probabilistic Data Association	Fortmann T.E., Bar-Shalom Y., Scheffe M.	IEEE Journal of Oceanic Engineering	948
1993	Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation	Nwogu O.	Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering	935
1997	Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data	Vickers D., Mahrt L.	Journal of Atmospheric and Oceanic Technology	915
2012	An overview of the global historical climatology network-daily database	Menne M.J., Durre I., Vose R.S., Gleason B.E., Houston T.G.	Journal of Atmospheric and Oceanic Technology	829
2000	What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas?	Patino Douce A.E.	Geological Society Special Publication	810
1999	Tethyan sutures of northern Turkey	Okay A.I., Tuysuz O.	Geological Society Special Publication	808

Table 5 gives information about the 30 institutions that have published the most in this field. While Shanghai Jiao Tong University is first with 3,098 publications, Norwegian University of Science and Technology is second with 2,935. Dalian University of Technology is third with 2,736 publications, Ministry of Education of the People's Republic of China is fourth with 2,643, Ocean University of China is fifth with 2,423, Chinese Academy of Sciences is sixth with 2,387, and Harbin Engineering University is seventh with 2,080.

Table 5. The Top 30 Most Productive Institutions in the Field of Ocean Engineering from 1970 to 2021.

Affiliation	Country	Number of Publications
Shanghai Jiao Tong University	China	3,098
Norwegian University of Science and Technology	Norway	2,935
Dalian University of Technology	China	2,736
Ministry of Education China	China	2,643
Ocean University of China	China	2,423
Chinese Academy of Sciences	China	2,387
Harbin Engineering University	China	2,080
Delft University of Technology	Netherlands	1,890
Instituto Superior Técnico	Portugal	1,783
University of Lisbon	Portugal	1,682
Dalian Maritime University	China	1,629
The University of Tokyo	Japan	1,612
French National Center for Scientific Research (CNRS)	France	1,562
Texas A&M University	USA	1,504
DNV GL®	Norway	1,424
Korea Institute of Ocean Science & Technology	South Korea	1,356
Zhejiang University	China	1,234
The University of Western Australia	Australia	1,218
National Oceanic and Atmospheric Administration	USA	1,215
Equinor ASA	Norway	1,197
Hohai University	China	1,193
Wuhan University of Technology	China	1,152
Tianjin University	China	1,150
China Ship Scientific Research Center	China	1,149
Seoul National University	South Korea	1,144
National Taiwan Ocean University	Taiwan	1,143
Universidade Federal do Rio de Janeiro	Brazil	1,101
National University of Singapore	Singapore	1,090
State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering	China	1,089
Petrobras	Brazil	1,072

Table 6 provides information about the top 30 institutions supporting publications in the field of ocean engineering. While the National Natural Science Foundation of China is in first place by supporting 14,028 publications, the Ministry of Education of the People’s Republic of China is in second place by supporting 2,846 publications. While the European Commission takes third with its support for 2,767 publications, the Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China comes in fourth with its support for 2,425 publications. The Fundamental Research Funds for the Central Universities is fifth with its support of 2,301 publications, and the U.S. Department of Defense is in sixth with its support of 2,149 publications.

Table 6. The Top 30 Funding Sponsor Institutions in the Field of Ocean Engineering from 1970 to 2021.

Funding Sponsor	Number of Publications
National Natural Science Foundation of China	14,028
Ministry of Education of the People's Republic of China	2,846
European Commission	2,767
National Science Foundation	2,718
Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China	2,425
Fundamental Research Funds for the Central Universities	2,301
U.S. Department of Defense	2,149
Ministry of Finance	2,017
Office of Naval Research	1,688
U.S. Navy	1,573
National Key Research and Development Program of China	1,437
UK Research and Innovation	1,432
Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology	1,097
National Research Foundation of Korea	1,067
Engineering and Physical Sciences Research Council	1,056
Japan Society for the Promotion of Science	989
China Postdoctoral Science Foundation	879
China Scholarship Council	806
Australian Research Council	797
Norges Forskningsråd	792
Seventh Framework Programme	785
U.S. Department of Energy	783
Government of Canada	773
Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada	765
National Oceanic and Atmospheric Administration	724
National Basic Research Program of China	722
Natural Environment Research Council	693
U.S. Department of Commerce	664
Fundação para a Ciência e a Tecnologia	658
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico	656

3. Conclusions

The field of Ocean Engineering has had great importance throughout human history. Humanity has had freedom of movement and the opportunity to perform commerce thanks to the developments in this field. The field of Ocean Engineering has been in direct interactions with fields such as Naval Architecture, Marine Engineering, Numerical Methods, Oceanography, Offshore Technologies, Coastal Engineering, Environmental Science, and Energy. Developments in this field have also led to developments in many other fields.

Thanks to bibliometric analyses, which studies have been published in the field of Ocean Engineering, which authors, institutions, and countries have been the most active on this area can be seen over the years. Additionally, impact values have been determined by showing the average number of citations per author and per source for those published in journals in this field. The institutions that contributed with the most publications in this field both in terms of the number of publications as well as funding sponsors is also shown.

Thanks to this study, general results related to this field have been presented, as well as a numerical summary of the field for researchers. Researchers who wish to work on these issues will be able to easily access information about which direction studies have been evolving, which keywords are prominent, which institutions and countries have been more active, and most importantly which institutions provide funding sponsors.

4. Acknowledgement

I would like to present my thanks to Dr. Ali Dogrul, Dr. Ahmet Dursun Alkan, Veysi Başhan, Ibrahim Ozsarı, and Dr. Asım Sinan Karakurt for their contributions to the development of this study.

5. References

Baas, J., Schotten, M., Plume, A., Côté, G., & Karimi, R. (2020). Scopus as a curated, high-quality bibliometric data source for academic research in quantitative science studies. 10. https://doi.org/10.1162/qss_a_00019

Camargo, J. M. R., Silva, M. V. B., Júnior, A. V. F., & Araújo, T. C. M. (2019). Marine Geohazards: A Bibliometric-Based Review. *Geosciences*, 9(2), 100. <https://doi.org/10.3390/geosciences9020100>

Gunes, U. (2021, May 2). Bibliometric Data. Google Drive. <https://bit.ly/3gDKhFx>

Measuring a journals impact. (2021). <https://www.elsevier.com/authors/tools-and-resources/measuring-a-journals-impact>

Meyers, S. D., Azevedo, L., & Luther, M. E. (2021). A Scopus-based bibliometric study of maritime research involving the Automatic Identification System. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 10, 100387. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100387>

Munim, Z. H., Dushenko, M., Jimenez, V. J., Shakil, M. H., & Imset, M. (2020). Big data and artificial intelligence in the maritime industry: A bibliometric review and future research directions. *Maritime Policy & Management*, 47(5), 577–597. <https://doi.org/10.1080/03088839.2020.1788731>

Pauna, V. H., Buonocore, E., Renzi, M., Russo, G. F., & Franzese, P. P. (2019). The issue of microplastics in marine ecosystems: A bibliometric network analysis. *Marine Pollution Bulletin*, 149, 110612. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110612>

Rumin, J., Nicolau, E., Gonçalves de Oliveira Junior, R., Fuentes-Grünwald, C., Flynn, K. J., & Picot, L. (2020). A Bibliometric Analysis of Microalgae Research in the World, Europe, and the European Atlantic Area. *Marine Drugs*, 18(2), 79. <https://doi.org/10.3390/md18020079>

Sun, J., Wang, M.-H., & Ho, Y.-S. (2012). A historical review and bibliometric analysis of research on estuary pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 64(1), 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.10.034>

Sun, Z.-M., & Hua, W.-N. (2015). A comparative study of Ocean Engineering research between China and the world. *Scientometrics*, 105(1), 51–63. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1670-y>

Toom, K. (2018). Chapter 10—Indicators. In J. Andersen, K. Toom, S. Poli, & P. F. Miller (Eds.), *Research Management* (pp. 213–230). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805059-0.00010-9>

What is the complete list of Scopus Subject Areas and All Science Journal Classification Codes (ASJC)? - Scopus: Access and use Support Center. (2020, February 29). https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/15181/supporthub/scopus/

Wu, M., Jiang, Y., Kwong, R. W. M., Brar, S. K., Zhong, H., & Ji, R. (2021). How do humans recognize and face challenges of microplastic pollution in marine environments? A bibliometric analysis. *Environmental Pollution*, 280, 116959. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116959>

Zhang, Y., Huang, K., Yu, Y., & Yang, B. (2017). Mapping of water footprint research: A bibliometric analysis during 2006–2015. *Journal of Cleaner Production*, 149, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.067>

Zhong, S., Geng, Y., Liu, W., Gao, C., & Chen, W. (2016). A bibliometric review on natural resource accounting during 1995–2014. *Journal of Cleaner Production*, 139, 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.039>





27 EYLÜL 1538
PREVEZE DENİZ ZAFERİ VE
DENİZ KUVVETLERİ GÜNÜ
KUTLU OLSUN!



29 EKİM
CUMHURİYET BAYRAMI
Kutlu olsun!
Türkiye Cumhuriyeti
delebel payidar kalacaktır.

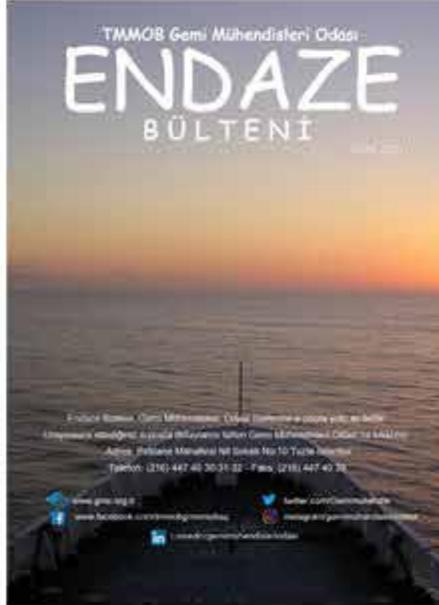


1881 - 1938

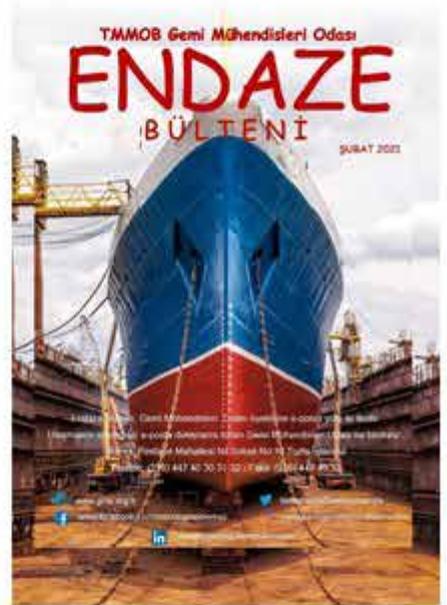
*Benim en büyük zevkim, millet için gün geçtikçe
devletler, milletler, Türkiye Cumhuriyeti
delebel payidar kalacaktır!*
K. Atatürk
Saygı ve Saygıya Değerdir.



66
KURULUŞ
YIL DÖNÜMÜ'MÜZ
Kutlu olsun!



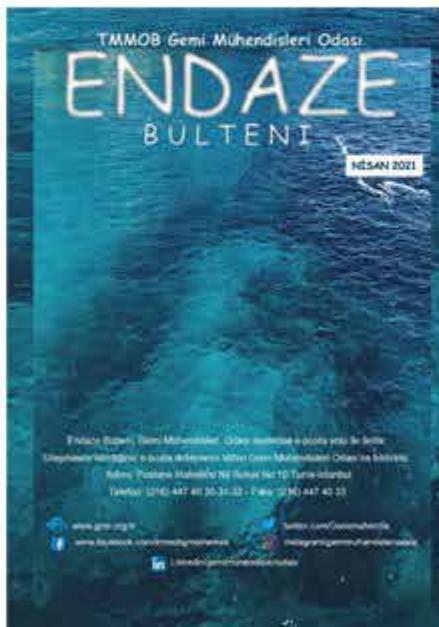
TMMOB Gemi Mühendisleri Odası
ENDAZE
BÜLTENİ



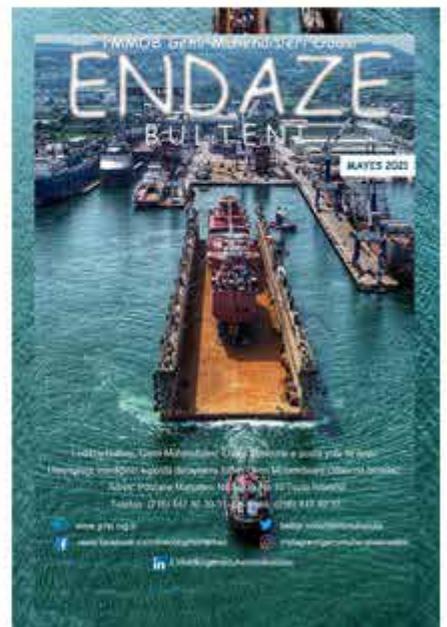
TMMOB Gemi Mühendisleri Odası
ENDAZE
BÜLTENİ



TMMOB Gemi Mühendisleri Odası
ENDAZE
BÜLTENİ



TMMOB Gemi Mühendisleri Odası
ENDAZE
BÜLTENİ



TMMOB Gemi Mühendisleri Odası
ENDAZE
BÜLTENİ



TÜRK LOYDU



**TÜRKİYE'NİN
TEKNOLOJİK
KLASLAMA VE
UYGUNLUK
DEĞERLENDİRME
KURULUŞU**

www.turkloydu.org