

# GEMİ ve DENİZ TEKNOLOJİSİ

GMO JOURNAL OF SHIP AND MARINE TECHNOLOGY



**TMMOB GEMİ MÜHENDİSLERİ ODASI**

*The Turkish Chamber of Naval Architects and Marine Engineers*





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

**İmtiyaz Sahibi / Owner**  
Ahmet UZUN

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

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

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

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

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

Res. Asst. S. Aykut KORKMAZ  
Dokuz Eylül University, Maritime Faculty, İzmir, Türkiye

**Yayın Sekreteri / Editorial Secretary**  
Hilal SAKARYA  
Müge Helin DEVİREN

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

**Yayın Türü / Publication Type / Sayı / Number**  
Sürelî Yayın (6 Aylık) / Periodical, 6 months  
Sayı / Number : 222

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



## Değerli Meslektaşlar ve Okurlar,

Bu sayımızda yer alan onüç ilgi çekici bilimsel makalede; tersanelerde yüksekte çalışma risklerinin karar destekli bir yaklaşımla incelenmesi, alternatif yakıtların çevre bağlamında getirdiği gelişmeler, deniz süngerinden ilham alınarak geliştirilmiş bir kafes sisteminin yapısal üstünlüğü, Covid-19 etkisi kapsamında erkene çekilen geri dönüşümlerinin çevresel etki hesaplaması, matematik modelleme desteği ile tekne ve makine sigortaları kapsamında risk analizi, sınır tabaka emme tekniği kullanılan bir kanat yapısı parametrelerinin aerodinamik performansa etkileri, Türk tersanelerinin Kovit-19 olumsuz etkilerine karşı aldığı tedbirler ve kriz yönetimi, balast tanklarında sediman birikimini azaltmak için geliştirilen pnömatik bir sistemin işletme parametrelerinin en iyileştirilmesi, bir baca gazı geri kazanım sisteminde özel bir termik yağ ve çok düşük kükürlü bir yakıt kullanılması ile hem yakıt maliyeti hem de SOx salımlarının azaltılması, akış sistemlerinin yapısı ile Yapısal Gelişim Teorisi ilişkisinin yük gemilerinin ana makine teknik değerleri ve ısı transferi özelinde incelenmesi,  $\gamma$  türbülans geçiş modelinin başarımlı değerlendirilmesi, balastsız gemi tasarımlarının derlendiği gemi tasarımında paradigma değişikliği, benzer boyuttaki dikdörtgen ve pahlı tankın aynı salınım frekansında yüzey deformasyonları ve basınçlar açısından karşılaştırılmasının sunulduğu çalışmalar yer almaktadır.

Bu sayımızda, Gemi Yat ve Hizmetleri İhracatçıları Birliği'nin (GYHİB) geleneksel hale gelen ve 2022 yılında onbirinci defa düzenlediği Ulusal Gemi ve Yat Tasarım Yarışması'nın ödülleri, 14.12.2022 günü düzenlenen ödül töreninde sahipleriyle buluştu. "Yeni Nesil Koster Gemisi" konu kapsamında düzenlenen yarışmada derece alan tasarımlara bu sayımızın ilk sayfalarında gururla yer verdik.

Bilimsel makale, mesleki ve teknik konuları raporlayan yazılarınızın dergimize güç katacağını bildirir gelecek sayımızı altı ay sonra çıkaracağımızı bilgilerinize sunarız.

Yeni yılda sağlık ve mutluluklar dileriz.

## Dear Colleagues and Readers,

We are proud to publish the thirteen interesting scientific articles in this issue. These articles refer to the following concerns; examining the risks of working at height in shipyards with a decision-supported approach, the developments brought by alternative fuels in the context of the environment, the structural superiority of a cage system inspired by sea sponge, the environmental impact calculation of early recycling due to the Covid-19 pandemic, the mathematical modeling support within the scope of the risk analysis of hull and machinery insurances, the effects of a wing structure parameters using boundary layer suction technique on aerodynamic performance, crisis management and measures taken by Turkish shipyards against the adverse effects of Covid-19, optimization of the operating parameters of a pneumatic system developed to reduce sediment accumulation in ballast tanks, a waste heat recovery by using a special thermal oil and a very low sulfur fuel to reduce both the fuel cost and SOx emissions, the relationship between marine propulsion power and heat transfer with Constructal Law, performance evaluation of the  $\gamma$  turbulent transition model, the paradigm change in ship design in which ballastless ship designs are compiled, the comparison of a similar size rectangular and chamfered tank in terms of surface deformations and pressures at the same oscillation frequency are presented.

In this issue, the awards of the National Ship and Yacht Design Competition, which has become traditional and organized for the eleventh time in 2022 by the Ship, Yacht and Services Exporters' Association (GYHİB), met with the award winners at the ceremony held on 14.12.2022. In the first pages of this issue, we proudly featured the designs that won a degree in the competition organized within the scope of the "New Generation Coaster Ship".

We are looking forward your valuable submissions including scientific articles, professional and technical reports for our next issue that will be published within six months.

We wish you a happy and prosperous New Year.

Saygılarımızla / Regards.

Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN - Baş Editör / Editor-in-Chief

Dr. Onur USTA - Yardımcı Editör / Deputy Editor

Dr. Dursun Murat SEKBAN - Yardımcı Editör / Deputy Editor

Dr. Ali DOĞRUL - Yardımcı Editör / Deputy Editor

Arş. Gör. / Res. Asst. Abdullah TÜRK - Teknik Editör / Technical Editor

Arş. Gör. / Res. Asst. Aykut KORKMAZ - Teknik Editör / Technical Editor

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

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

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

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

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

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

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

[www.dergipark.org.tr/en/pub/gdt/](http://www.dergipark.org.tr/en/pub/gdt/)

## **ALAN EDİTÖRLERİ / SECTION EDITORS**

### **Naval Architecture**

Prof. Alberto FRANCESCUTTO - University of Trieste, Trieste, Italy  
Asst. Prof. Dr. Ziya SAYDAM - Piri Reis University, Istanbul, Türkiye  
Asst. Prof. Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KAFALI, İzmir Kâtip Çelebi University, İzmir, Türkiye

### **Marine Hydrodynamics**

Prof. Dr. Mehmet Ali BAYKAL - Gedik University, İstanbul, Türkiye  
Prof. Dr. Şakir BAL - İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye  
Dr. Öğr. Üyesi Emre KAHRAMANOĞLU, İzmir Kâtip Çelebi University, İzmir, Türkiye  
Dr. Ersegun Deniz GEDİKLİ - University of Hawaii at Manoa, Hawaii, USA

### **Marine Engineering**

Prof. Dr. Yasin ÜST - Yıldız Technical University, Istanbul, Türkiye  
Assoc. Prof. Dr. Görkem KÖKKÜLÜNK - Yıldız Technical University, Istanbul, Türkiye  
Assoc. Prof. Dr. Levent BİLGİLİ – Bandırma 17 Eylül Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye  
Asst. Prof. Dr. Mehmet ÖNAL, İzmir Kâtip Çelebi University, İzmir, Türkiye  
Dr. Öğr. Üyesi İbrahim ÖZSARI, Bursa Technical University, Bursa, Türkiye

### **Maritime Engineering**

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

### **Offshore and Ocean Technology**

Prof. Dr. İsmail Hakkı HELVACIOĞLU - İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye  
Assoc. Prof. Dr. Özgür Özgüç - İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye  
Assoc. Prof. Dr. Erinç DOBRUCALI, Bursa Technical University, Bursa, Türkiye  
Dr. İsmail BAŞARAN, ABS, London, UK

### **Marine Electronics**

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

### **Maritime Economics**

Prof. Dr. Oral ERDOĞAN - Piri Reis University, Istanbul, Turkey  
Asst. Prof. Dr. İsmail KURT, İzmir Kâtip Çelebi University, İzmir, Türkiye

### **Energy and Environment**

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

## **YAZIM VE DİL EDİTÖRÜ / LANGUAGE EDITOR**

Assoc. Prof. Dr. Aykut SAFA, Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye  
Asst. Prof. Dr. Naz YILMAZ – Bursa Technical University, Bursa, Türkiye  
Dr. Erdem AKTOSUN, İzmir Kâtip Çelebi University, İzmir, Türkiye

## EDİTÖRLER KURULU / EDITORIAL BOARD

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

## İÇİNDEKİLER / CONTENTS

<b>11th National Ship and Yacht Design Competition 2022</b>	7
<b>11. Gemi ve Yat Tasarımı Yarışması Ödül Töreni 2022</b>	
<b>4th International Naval Architecture and Maritime Symposium (INT-NAM 2023)</b>	24
<b>4. Uluslararası Gemi İnşaatı ve Denizcilik Sempozyumu</b>	
<b>Deniz Taşımacılığında Dekarbonizasyon Uygulamalarının Kaynak Temelli Görüş Bağlamında Alternatif Yakıtlar Açısından Değerlendirilmesi</b>	26
<b>Evaluation of Decarbonization Applications in Maritime Transportation in Terms of Alternative Fuels in the Context of Resource-Based View</b>	
<i>Murat Bayraktar, Umur Bucak, Hakan Demirel</i> (Araştırma Makalesi / Research Article)	
<b>γ Türbülans Geçiş Modelinin Kuvvet Katsayıları ve Geçiş Yer Tahmini Üzerindeki Etkisi</b>	44
<b>Effect of γ Transition Model on Force Coefficients and Transition Location Estimations</b>	
<i>Hediye Atik</i> (Araştırma Makalesi / Research Article)	
<b>Venus'ün Çiçek Sepeti Süngerinden Esinlenerek Tasarlanmış Bir Kafes Sistemin Yapısal Davranışının İncelenmesi</b>	64
<b>Investigating Mechanical Behavior of a Lattice Structure Inspired by Venus' Flower Basket</b>	
<i>Dinçer Öykünç, M. Erden Yıldızdağ</i> (Araştırma Makalesi / Research Article)	
<b>Gemi Tasarımında Paradigma Değişikliği: Balastsız Gemi</b>	76
<b>Paradigm Shift in Ship Design: Ballastless Ship</b>	
<i>Ceren Bilgin Güney</i> (Derleme / Review)	
<b>Covid-19 Nedeniyle Yolcu Gemilerinin Erken Geri Dönüşümünün Çevresel Sonuçlarının Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi</b>	97
<b>Life Cycle Assessment of the Environmental Consequences of the Premature Recycling of Cruise Ships due to Covid-19</b>	
<i>Mehmet Önal</i> (Araştırma Makalesi / Research Article)	
<b>Tersanelerde Yüksekte Çalışma Risklerinin AHP Tabanlı PROMETHEE ile Analiz Edilmesi</b>	107
<b>Analyzing The Risks of Working at Height in Shipyards with AHP-Based PROMETHEE</b>	
<i>Mehmet Arif Öztürk, Murat Yorulmaz</i> (Araştırma Makalesi / Research Article)	

- Tank Geometrisinin Çalkantı Kuvvetlerine Etkisi** 126  
**The Effect of Tank Geometry on Sloshing Forces**  
*Fatih Cüneyd Korkmaz*  
(Araştırma Makalesi / Research Article)
- Gemi Sevk Gücü ve Isı Transferinin Yapısal Gelişim Teorisi ile İlişkisi** 138  
**The Relationship Between Marine Propulsion Power and Heat Transfer with Constructal Law**  
*Ümit Güneş, Erdal Çetkin, Bahri Şahin*  
(Araştırma Makalesi / Research Article)
- Tekne ve Makine Sigortaları Kapsamında Türk Deniz Ticaret Filosunun Risk Analizi** 153  
**Risk Analysis of the Turkish Merchant Marine Fleet within the Scope of Hull and Machinery Insurance**  
*Kadir Emrah Erginer*  
(Araştırma Makalesi / Research Article)
- HAD Metodu ile Sınır Tabaka Emme Tekniği Kullanılan Rüzgar Destekli Sevk Sistemi Geliştirilmesi** 175  
**Development of a Wind-Assisted Propulsion System Using Boundary Layer Suction with CFD Method**  
*Gözde Nur Küçüksu, Ahmet Ziya Saydam*  
(Araştırma Makalesi / Research Article)
- Gemilerde Kullanılan Termik Yağ Sisteminin Performans Analizleri** 196  
**Performance Analyses of Marine Thermal Oil System**  
*Asım Sinan Karakurt, Burak Başaran, Engin Ziya Çubukçu*  
(Araştırma Makalesi / Research Article)
- Balast Tanklarında Sediman Birikimini Azaltacak Sistemin Optimizasyonuna Yönelik İstatistiksel Yaklaşımlar** 209  
**Statistical Approaches to Optimize the System to Reduce Sediment Accumulation in Ballast Tanks**  
*Ceren Bilgin Güney*  
(Araştırma Makalesi / Research Article)
- Kovid-19 Salgını Döneminde Türk Tersaneleri** 231  
**Turkish Shipyards During COVID-19 Pandemic**  
*Mehmet Tantan, Hatice Camgöz Akdağ, Mehtap Karahalli Özdemir*  
(Araştırma Makalesi / Research Article)



## 11th NATIONAL SHIP AND YACHT DESIGN COMPETITION 2022

11. GEMİ VE YAT TASARIMI YARIŞMASI ÖDÜL TÖRENİ 2022

14.12.2022

The awards of the 11th “National Ship and Yacht Design Competition”, which has become a tradition of the Turkish Ship, Yacht and Services Exporters' Association (GYHİB), has been given to the winners at the award ceremony.

The ceremony was attended by Deputy Chairman of the Türkiye Exporters Assembly Ahmet Güleç, Chairman of the GYHİB Board of Directors Cem Seven, the Chairman of the İMEAK Chamber of Shipping (İMEAK DTO) Tamer Kiran, the Chairman of the Assembly of the İMEAK DTO, Başaran Bayrak, the Chairman of the Turkish Shipbuilders' Association (GİSBİR) Murat Kiran, Yıldız Technical

University Rector Prof. Dr. Tamer Yılmaz, heads of maritime non-governmental organizations, exporters' associations, sector representatives and academicians attended.

In the opening speech of the award ceremony, GYHİB President Cem Seven stated that their goal with the competition is to instill innovation and design culture to the young people who are the future of the industry, and said: Our aim was to instill a culture of innovation and design in the students we saw, to bring our talented students to our sector and to provide motivation for them to move our sector higher in the future. Today, I would like to express with pleasure that almost all of our former competitors have found positions for themselves in the sector. For this very reason, our award ceremony night is a great opportunity for all our student friends to reveal their projects, themselves, their ideas, visions and dreams and to consult them with all the stakeholders of the sector.”

Tamer Kiran, Chairman of the İMEAK DTO, said, “We know that 'Electric Ferry Design', which was chosen as the subject of the competition in the past years, has added significant value to the sector in terms of responding to the current needs of our country. We saw the same contribution in the subject of 2021, 'Boats Under 12 meters'. I sincerely believe that this year's theme, 'Next Generation Coaster Ship', will also respond to an important need of the industry.” he said.

In the competition organized with the theme of "New Generation Coaster Ship" this year; Yıldız Technical University and Maltepe University students **Nedir Ymamov** and **Tunahan Sert** were selected for **the first place** with their project named “**Vaquita**”.

Yıldız Technical University students **Berfe Nur Kallenci**, **Faruk Berkin Gücüyeter**, **Kağan Esat Özlü** and **Mahircan Yıldız** won **the second place** with their project named “**METHTER**”.



Yıldız Technical University students **Ahmet İzzet Kurtuluş, Rahmi Murat Dural** and **Tufan Koftar** won **the third place** with their project named **“Free Willy”**

In addition to the projects that ranked in the top 3 this year, the Turk Loydu special award and the Turkish Chamber of Naval Architects and Marine Engineers (TMMOB GMO) special award were given to two projects. Istanbul Technical University and Maltepe University students **Derya Çelikel, Mehmet Akif Tarhan, Tuncer Sönmezoğlu** and **Erdoğan Kara** were awarded the **Türk Loydu Special Award** for their project named **“Aiolos”**; Yıldız Technical University students **Ozan Şahin** and **Hüseyin Deniz Güler** were deemed worthy of the **TMMOB GMO Special Award** with their project named **“Mediterranean Gull”**. A special award has been granted to the remaining competitor students by GİSBİR.

Prizes of TL 80.000 for the first place, TL 40.000 for the second and TL 20.000 for the third among the designers who ranked in the competition were awarded. In addition, Türk Loydu Special Award and GMO Special Award winners received monetary awards in the amount of TL 10.000.

The use of alternative fuels such as hydrogen, methanol, LNG, and electricity, as well as renewable energy sources such as solar and wind, provided the Turkish Maritime Industry with ideas for the future for more environmentally friendly ships.

At the end of the award ceremony, it was announced that the theme of the design competition, which will take place in **2023**, will be **“Catamaran Recreational Boat Design”**.

Gemi Yat ve Hizmetleri İhracatçıları Birliğinin (GYHİB) geleneksel hale gelen ve bu yıl 11.si düzenlenen Ulusal Gemi ve Yat Tasarım Yarışması'nın ödülleri, düzenlenen ödül töreninde sahipleriyle buluştu.

Yarışmanın ödül törenine, Türkiye İhracatçılar Meclisi Başkan Vekili Ahmet Güleç, GYHİB Yönetim Kurulu Başkanı Cem Seven, Deniz Ticaret Odası Meclis Başkanı Tamer Kıran, İMEAK Deniz Ticaret Odası Meclis Başkanı Başaran Bayrak, Türkiye Gemi İnşa Sanayicileri Birliği (GİSBİR) Yönetim Kurulu Başkanı Murat Kıran, Yıldız Teknik Üniversitesi Rektörü Prof. Dr. Tamer Yılmaz, denizcilik sivil toplum kuruluşlarının başkanları, ihracatçı birlikleri başkanları, sektör temsilcileri ile akademisyenler katıldı.

Ödül töreninin açılış konuşmasında Gemi, Yat ve Hizmetleri İhracatçıları Birliği Başkanı Cem Seven, yarışma ile hedeflerinin sektörün geleceği gençlere inovasyon ve tasarım kültürünü aşlamak olduğunu belirterek, “Gemi Yat ve Hizmetleri İhracatçıları Birliği olarak 2012 yılında Ulusal Gemi ve Yat Tasarım Yarışmalarına başlarken amacımız sektörümüzün geleceği olarak gördüğümüz öğrencilere inovasyon ve tasarım kültürünü aşlamak, yetenekli öğrenci arkadaşlarımızı sektörümüze kazandırmak ve ileride sektörümüzü daha yukarıya taşımaları için motivasyon sağlamaktı. Bugün eski yarışmacılarımızın hemen hepsinin sektörde kendilerine yer bulmuş olduklarını memnuniyetle ifade etmek isterim. Ödül töreni gecemiz de tam bu amaçla, tüm öğrenci arkadaşlarımızın projelerini, kendilerini, fikirlerini, vizyonlarını, hayallerini ortaya koymaları ve bunları sektörün tüm paydaşlarıyla istişare edebilmeleri için büyük bir fırsattır” dedi.

Deniz Ticaret Odası Meclis Başkanı Tamer Kıran, “Geçen yıllarda yarışma konusu olarak seçilen ‘Elektrikli Feribot Tasarımı’nın ülkemizin güncel ihtiyacına cevap verme açısından sektöre önemli değerler katmış olduğunu biliyoruz. Aynı katkıyı 2021’in konusu olan ‘12 Metre Altı Tekneler’de de gördük. Bu yılın konusu olan ‘Yeni Nesil Koster Gemisi’nin de sektörün önemli bir ihtiyacına yanıt vereceğine yürekten inanıyorum.” diye konuştu.

Yarışmanın jürisinde; Ahmet Uzun (Gemi Mühendisleri Odası), Cem Melikoğlu (Türk Loydu), Prof.Dr.Ahmet Dursun Alkan (Akademisyen-Tasarım), Prof.Dr.Ercan Köse (Akademisyen-Tasarım), Prof.Dr.İsmail Hakkı Helvacıoğlu (Akademisyen-Tasarım), Prof.Dr.Ali Can Takinacı (Akademisyen-Tasarım), Prof.Dr.Mustafa İnel (Akademisyen-Tasarım), Doç.Dr.Bekir Şener (Akademisyen-Tasarım), Dr. Öğretim Üyesi Mehmet Aziz Göksel (Akademisyen-Tasarım), Necdet Salgür (Sektör Temsilcisi), Haluk Suntay (Serbest Tasarımcı), H. Bülent Şener (Serbest Tasarımcı), Tanju Kalaycıoğlu (Serbest Tasarımcı), Yusuf Turhan Soyaslan (Serbest Tasarımcı) ve Ercüment Kafalı'nın (Yelkenli Gemide Eğitim Derneği – YGED, Tasarımcı) oluşturduğu 15 kişilik bir heyet yer aldı. Projeler inovasyon, sektöre katkısı, uygulanabilirlik, yerli katkı oranı, çevrecilik ve sunumun kalitesi kriterlerine göre değerlendirildi.

Bu yıl "Yeni Nesil Koster Gemisi" konusu ile düzenlenen yarışmada; **birinciliğe “Vaquita”** isimli projesi ile **Yıldız Teknik Üniversitesi** ile **Maltepe Üniversitesi** öğrencileri **Nedir Ymamov ve Tunahan Sert** seçildi.

**İkinciliğe “METHTER”** isimli projesi ile **Yıldız Teknik Üniversitesi** öğrencileri **Berfe Nur Kallenci, Faruk Berkin Gücüyeter, Kağan Esat Özlü ve Mahircan Yıldız** kazanırken, **üçüncülüğe “Free Willy”** isimli projesi ile **Yıldız Teknik Üniversitesi** öğrencileri **Ahmet İzzet Kurtuluş, Rahmi Murat Dural, Tufan Koftar** lâyük görüldü.

Bu yıl ilk 3 sırada yer alarak dereceye giren projelerin yanı sıra iki projeye de Türk Loydu özel ödülü ve Gemi Mühendisleri Odası özel ödülü verildi. **Türk Loydu Özel Ödülü**'ne "Aiolos" isimli projesi ile **İstanbul Teknik Üniversitesi** ile **Maltepe Üniversitesi** öğrencileri Derya Çelikel, Mehmet Akif Tarhan, Tuncer Sönmezoğlu, Erdiç Kara; Gemi Mühendisleri Odası (GMO) Özel Ödülü'ne "**Mediterranean Gull**" isimli projesi ile **Yıldız Teknik Üniversitesi** öğrencileri **Ozan Şahin, Hüseyin Deniz Güler** layık görüldü. Yarışmaya katılan diğer öğrenciler GİSBİR tarafından ödüllendirildi.

Yarışmada dereceye giren tasarımcılardan birinciye 80 bin TL, ikinciye 40 bin TL, üçüncüye 20 bin TL tutarında para ödülleri verildi. Ayrıca Türk Loydu Özel Ödülü ile GMO Özel Ödülü sahipleri ise 10 bin TL tutarındaki para ödülleri aldı.

Yarışmacıların projelerinde hidrojen, metanol, LNG, ve elektrik gibi alternatif yakıt kullanmaları, ayrıca güneş, rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanmaları Türk Denizcilik Sektörüne daha çevreci gemiler için gelecek adına fikirler sunmuştur.

Ödül töreninin sonunda, **2023** yılında gerçekleşecek tasarım yarışmasının konusunun "**Katamaran Gezi Teknesi Tasarımı**" olacağı duyuruldu.

(Kaynak/Source: <https://gyhib.org/tr/11-ulusal-gemi-ve-yat-tasarimi-yarismasi-odulleri-sahipleriyle-bulustu> )



Cem Seven, President/Başkan GYHİB



Ahmet Güleç Deputy Chairman of TIM /TİM Başkan Vekili



(Left/sol): Cem Seven, Tunahan Sert and Nedir Ymamov first prize winners, Ahmet Güleç, Tamer Yılmaz



Cem Seven, second prize winners Mahircan Yıldız, Kağan Esat Özlü, Berfe Nur Kallenci and Faruk Berkin Gücüyeter, and Tamer Kıran



(Left/sol): Cem Seven, third prize winners Tufan Koftar, Ahmet İzzet Kurtuluş and Rahmi Murat Dural, and Başaran Bayrak



(Left/sol): Cem Seven, Turk Loydu Special Prize winners Derya Çelikel, Mehmet Akif Tarhan, Erdiç Kara, Tuncer Sönmezoğlu, and

Cem Melikoğlu



(Left/sol): Cem Seven, GMO Special Prize Hüseyin Deniz Güler, and Ahmet Uzun



Jury members/Yarışma Jürisi: (left/sol) Cem Seven, Mehmet Aziz Göksel, Tanju Kalaycıoğlu, H. Bülent Şener, Cem Melikoğlu, Ahmet Uzun, Necdet Salgür, Ercan Köse, Ahmet Dursun Alkan, İsmail Hakkı Helvacıoğlu, Yusuf Turhan Soyaslan, Mustafa Insel, Ercüment Kafalı, Bekir Şener



**1st Winner Design / 1'ncilik Ödülü Alan Tasarım****Design name: Vaquita****Designer students: Tunahan Sert\* and Nedir Ymamov\*\***

\*Maltepe University, Faculty of Architecture and Design, Department of Nautical Design

\*\*Yıldız Technical University, Naval Architecture and Maritime Faculty, Department of Naval Architecture and Marine Engineering

**VAQUITA**

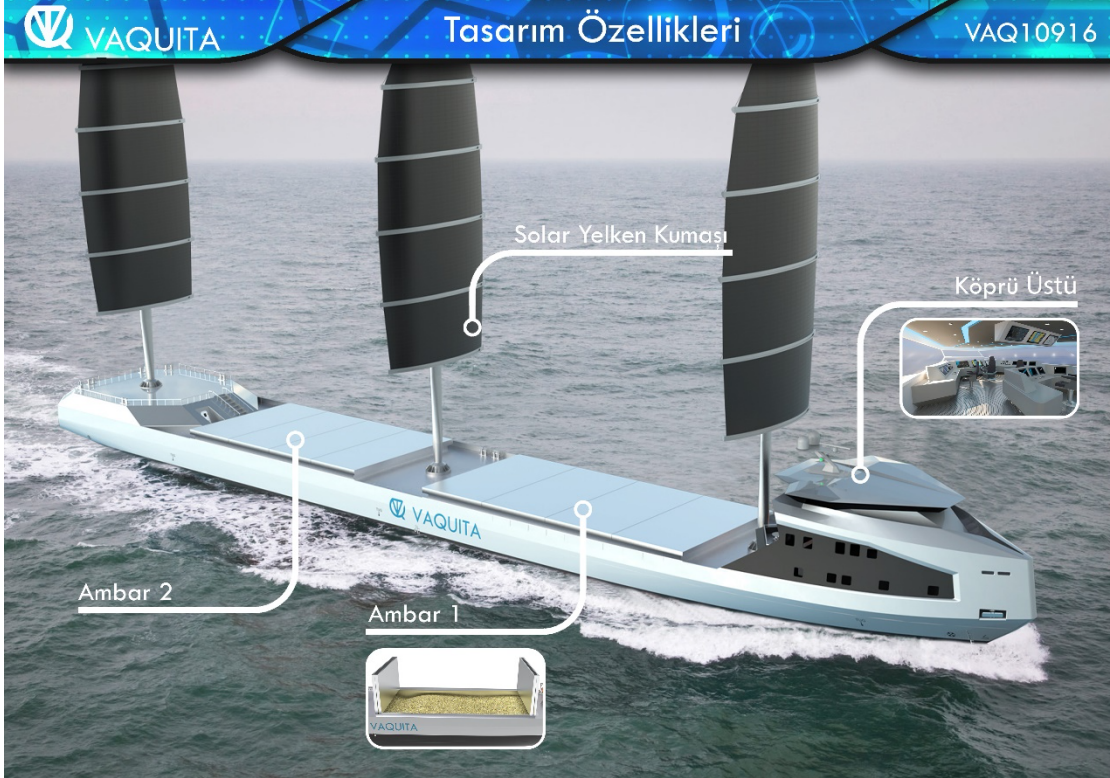
LOA: 108.58 m  
LBP: 103.95 m  
B: 15.53 m  
T: 5.00 m  
DWT: 4994  
GT: 2939

Air draft: 44.08 m  
Vseyir: 10 knots  
Vservis: 13 knots  
Menzil (13 knots): 2000 NM  
Ambar hacmi: 5000 m<sup>3</sup>

Tahrik sistemi: Hidrojen yakıt hücresi  
Elektrik motoru: 2x SIEMENS SIMOTICS HV C 800kW  
Pervane: 2x Wärtsilä WST-11  
Mürettebat: 9+1 kişi  
Klas kuruluşu: Türk Loydu

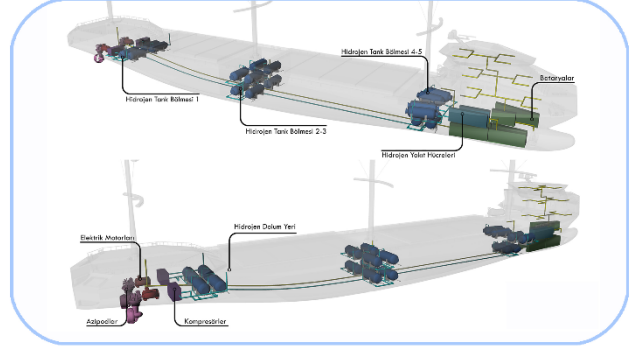
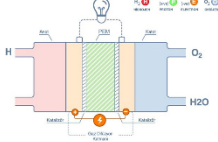
**VAQUITA**

Hidrojen yakıt hücreli, sıfır emisyonlu, düşük dirençli hidrodinamik ve aerodinamik yapıya sahip, yelkenli koster gemisi  
Üretimde kullanılacak malzemeler:  
Çelik, Alüminyum, Kompozit



### Hidrojen Yakıt Hücreli Tahrik Sistemi

Vaquita, bulunduğu hidrojen tankları ve yakıt hücreleri sayesinde elektrik üreterek sıfır emisyon ile seyir yapabilmektedir. Verimliliği içten yanmalı makinelere göre %30'a kadar fazla olup geminin sevk için kullanılan elektrik motorlarıyla beraber mekanik kayıpların da en aza indirilmesi sağlanmıştır.

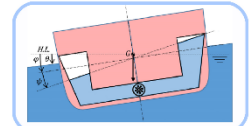
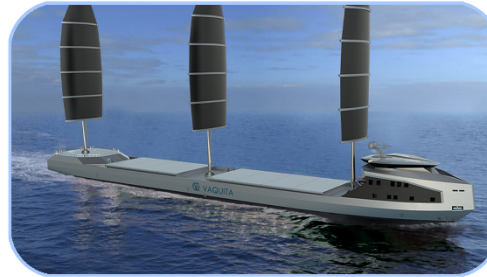


### Yeşil Hidrojen Üretim Tesisi

Hidrojen yakıt hücresi kullanımıyla emisyonun sıfıra indirildiği gözükse de hidrojen üretirken elektroliz için gerekli olan elektrik çoğunlukla fosil yakıtlar ile üretilmektedir (grı hidrojen). Hidrojen üretimi için yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan (yeşil hidrojen) tesisler kurularak CO2 salınımının önlenmesi amaçlanmıştır. Kurulan tesisler limanlar için gelir kaynağı yaratmakla beraber, hidrojene erişimin kolaylaşmasını ve maliyetinin zamanla düşmesini sağlayacaktır.

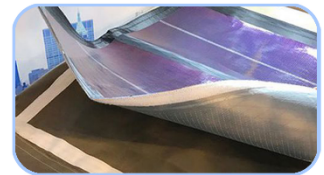
### Yelken

Vaquita'da verimliliği kanıtlanmış olan DynaRig yelken konsepti kullanılmıştır. Sensörler ve yazılım sayesinde yelkenlerin açısı ve yelken alanı otomatik olarak ayarlanmaktadır. Toplam 1050 m<sup>2</sup> yelken alanı ile yakıt tasarrufu yapılması amaçlanmıştır. Yelkenli seyir esnasında oluşacak olan meyili, seyir güvenliği ve konfor için, en aza indirmek amacıyla aktif ve pasif dengeleyici sistemler kullanılmıştır. Pasif sistem olarak yalpa önleyici balast sistemi kullanılmış olup aktif sistem olarak da fin stabilizer kullanılmıştır.



### Solar Kumaş

Yelken kumaşı olarak solar kumaş teknolojisini kullanılmış olup, elde edilen elektrik bataryalarda depolanarak ihtiyaç duyulduğunda kullanılabilir.





## 2nd Winner Design / 2'ncilik Ödülü Alan Tasarım

**Design name: METHTER**

**Designer students:** Berfe Nur Kallenci, Faruk Berkin Gücüyeter, Kağan Esat Özlü ve Mahircan Yıldız  
Yıldız Technical University, Naval Architecture and Maritime Faculty, Department of Naval Architecture and Marine Engineering

**METHTER**



METHTER

YENİ NESİL KOSTER GEMİSİ TASARIMI

MET14216

[İsim]

meTHter

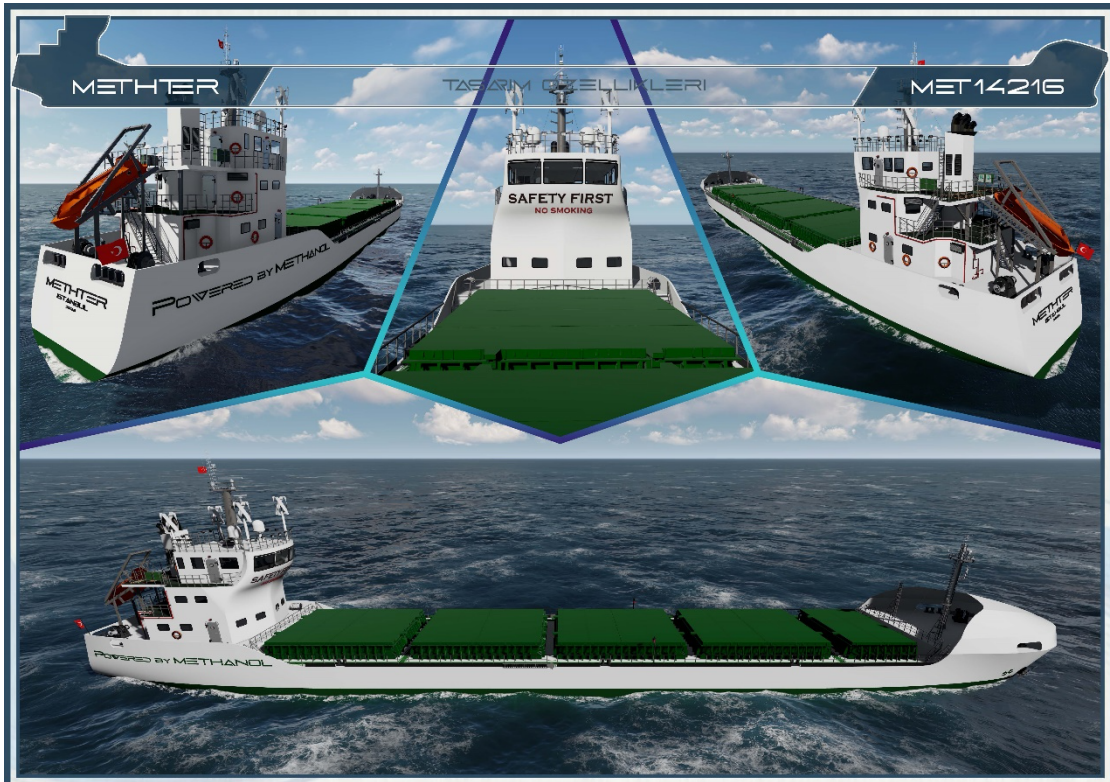
Metanol ve kosterin İngilizce karşılığı olan "Meth"anol ve Coas"ter" kelimelerinden türetilen koster adı.

LOA : 88 m  
B : 12,8 m  
T : 5,3 m  
Δ : 5000 ton  
V : 12,5 knot

DWT : 3750 ton  
Gros Tonaj : 2270 GT  
Ana Makine : Wärtsilä 6L32  
Ambar Kapasiteleri  
4 Adet 11.2x9.3x6.7  
1 Adet 5.6x9.3x6.7

Üretimde Kullanılacak Malzemeler  
Gemi İnşa Çeliği, Ahşap, Cam, Kompozit  
Üretimde Kullanılacak Teknikler  
Kaynak, Montaj, Talaşsız Şekillendirme,  
Vakum İnfüzyon

METHTER, sevk için yenilikçi ve çevreci metanol yakıtlı ana makine kullanırken, borda renkleri yeşil enerjiyi temsil etmesi üzerine bu renklerle donatılmış ve üst yapı dizaynında da havalimanları kontrol kulelerinden ilham alınmıştır.



METHTER

TASARIM ÖZELLİKLERİ

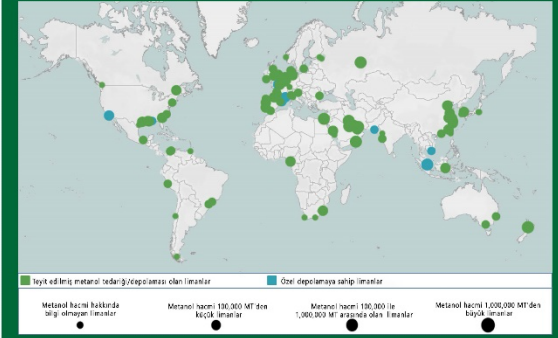
MET14216

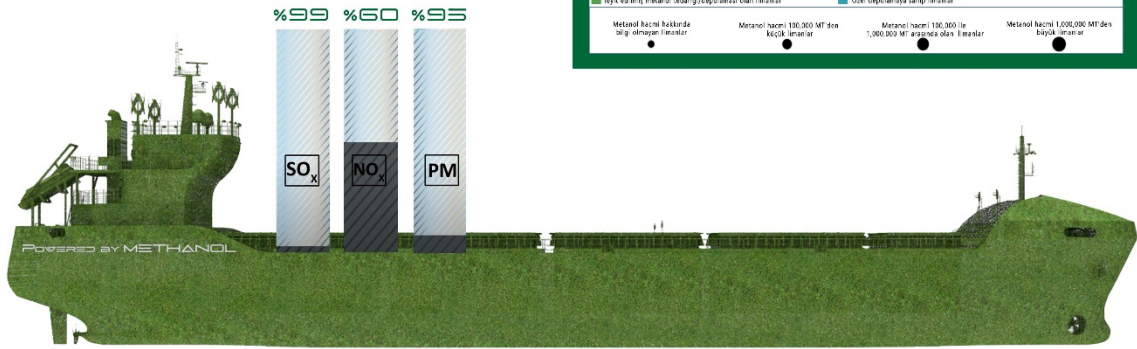


METHER
ALTERNATIF BİR YAKIT: METANOL
MET14216

- Metanol berrak ve biyolojik olarak suda hızla çözünebilen bir sıvıdır ve suya döküldüğünde veya sızma meydana geldiğinde geleneksel hidrokarbon yakıtlardan çok daha minimal ölçüde çevresel zarara neden olur.
- Kasım 2020'de IMO'nun metanolün güvenli bir gemi yakıtı olarak kullanılmasına ilişkin yönergeleri onaylamasıyla da doğrulanmıştır.
- Metan salınım riski bulunmamaktadır.
- Daha az CO2 salınımı olup, NOx salınımını %60 oranında, partikül madde salınımını ise %95 oranında azaltmaktadır.
- SOx salınımı neredeyse(%99) bulunmamaktadır.
- Geleneksel dizel ana makinelerin metanol dönüşümü diğer alternatif yakıtlara göre daha az masraf gerektirir.
- Halihazırda kullanılan MGO ile benzer yanma ve depolanma özelliklerine sahiptir.

### METANOL BULUNAN LIMANLAR





POWERS BY METHANOL

METHER
DIKEY RÜZGAR TÜRBİNİ (DERT)
MET14216

Gemi Adı	IMO	Kalkış Limanı	Varış Limanı	Ortalama Rüzgâr		Maksimum Rüzgâr	
				Hızı [Kn]	Hızı [Kn]	Hızı [Kn]	Hızı [Kn]
M/V-Safiye Ana	9319947	TARANTO (İTALYA)	DILISKELESİ (TÜRKİYE)	7.4	18		
AKAYLAR II	8913318	DILISKELESİ (TÜRKİYE)	CONSTANTA (ROMANYA)	9.8	19		
AKAYLAR II	8913318	GEMLIK (TÜRKİYE)	NOVOROSSISYK (RUSYA)	5.1	16.8		
OCEAN LEGEND	9083225	BARI (İTALYA)	TUZLA (TÜRKİYE)	7.1	18.6		
HARUN KONAN	9385427	NOVOROSSISYK (RUSYA)	NEMRUT (TÜRKİYE)	11.8	22		
HARUN KONAN	9385427	NEMRUT (TÜRKİYE)	HAIFA (İSRAİL)	11.1	23		
ASLI ELIF	9349021	LIVORNO (İTALYA)	NEMRUT (TÜRKİYE)	6.8	22.5		
ASLI ELIF	9349021	NEMRUT (TÜRKİYE)	RİNİA (ARNAVUTLUK)	8	19		
ASLI ELIF	9349021	RİNİA (ARNAVUTLUK)	YALOVA (TÜRKİYE)	16	26		
BEE	9506588	MİDİA (ROMANYA)	DERİNCE (TÜRKİYE)	13.9	20		
BEE	9506588	İSKENDERUN (TÜRKİYE)	SETUBAL (PORTEKİZ)	9.7	25		
Mustafa Yağcı	9314545	NEMRUT (TÜRKİYE)	ZEEBRUGGE (BELÇİKA)	10.2	31		

Rüzgâr türbini seçimi için benzer özellikteki gemilerin kullandığı rotalar araştırılmış ve gemilerin yolculuk süresince maruz kaldıkları ortalama maksimum rüzgâr hızları bulunmuştur. Seçilen gemilerden alınan sonuçlara göre Türkiye ve Avrupa limanları arası seferlerde gözlemlenen maksimum rüzgâr hızı 31 Knot'tır.

Model	GS-5KW
Güç	5000 W
Voltaj	120V-500V
Minimum Rüzgâr hızı	2.8m/s
Maksimum Rüzgâr hızı	50 m/s
Rotor Çapı	4 m
Kanat Malzemesi	FRP 73PCS
Kanat sayısı	3
Koruma Sertifikası	IP 54*
Kontrol Sistemi	Elektromanyetik
Çalışma Sıcaklığı	-40°C -- 50°C
Fiyat	8000 \$

- 1 Saatte Üretilen Toplam Enerji= 5 kWh
- 12 Saatte Üretilen Toplam Enerji= 192 kWh
- 1 Ayda Üretilen Toplam Enerji= 5760 kWh
- 5760 kWh Güç üretimi için Dizel Jeneratörün harcayacağı yakıt= 1.2 ton
- Ayda Yapılacak Yakıt Tasarrufu= 1000\$
- 1 Adet Rüzgâr türbininin amorti süresi 8 ay, tüm sistemin amorti süresi 32 ay olarak hesaplanmıştır.



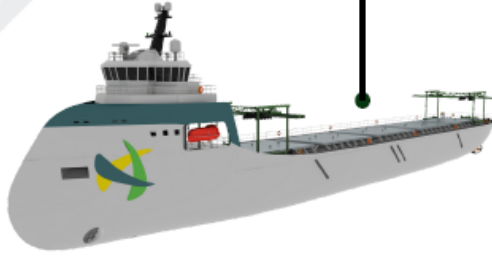
**3rd Winner Design / 3'ncülük Ödülü Alan Tasarım****Design name: Free Willy****Designer students:** Ahmet İzzet Kurtuluş, Rahmi Murat Dural, Tufan Koftar

Yıldız Technical University, Naval Architecture and Maritime Faculty, Department of Naval Architecture and Marine Engineering

**FREE WILLY**

# FREE WILLY

GFA18741



Yeni nesil koster gemisi **FREE WILLY**'nin kabuk tasarımında 'X-Bow' tasarımından esinlenilmiştir. Yenilikçi baş tasarımı geminin V tip bulb'a sahip gemilere kıyasla 2.6 kat daha az düşük dinamik basınca maruz kalmasını ve düşük dirençli seyir ederek emisyon oranlarında ciddi düşüşler kazanılmasını sağlamıştır.

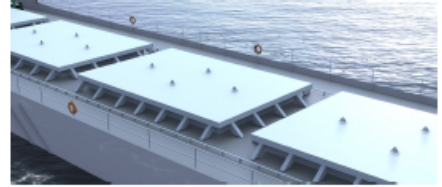
Küçük dalgalarda dalga delici özelliği olan form, Karadeniz gibi sert denizlerde ise baş kış vurma ve baş vurma (slamming) hareketlerini azaltıcı etki göstermektedir.



Hareket edebilen perdeler yüklerin boyut, miktar ve taşınması için gereken ambar hacmi ve yükleme işlemi bittikten sonra geminin stabilitesi göz önüne alınarak ambar içerisinde farklı postalara gemi eni hizasında koyularak daha efektif bir yük taşıma şansı vermektedir.

Ayrıca aynı şekilde gemi boyunca koyularak tweendeck görevi görmekte ve aynı amaca hizmet etmektedir.

Bu perdelerin hareketi gemide bulunan kreyinler tarafından yapıldığı için ek bir yardımcı kaynağa gerek duyulmamaktadır.



## KOMPOZİT AMBAR KAPAKLARI

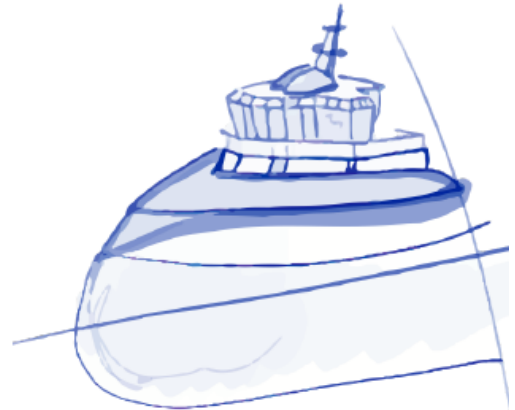
**FREE WILLY**'de kuru yük taşımak için sahip olunan ambar kapakları E- Glass kompozitten imal edilmektedir. Kompozit materyalden üretilen kapaklar ağırlık olarak çelik kapakçıklara göre yaklaşık %44 daha hafiftir ve bakım maliyeti daha azdır.



## GANTRY CRANE

Modern ticaret gemilerine uygulanmaya başlanan Gantry Crane türleri, yükleme/boşaltma hızı, kaldırma kapasiteleri ve kullanım rahatlığından dolayı **FREE WILLY**'de tercih edilmiştir.

Geminin air-draftını etkilemeden nehir ve dere gibi yerlerde bulunan köprülerden sorun olmadan fazladan bir balast boşaltma işlemine gerek olmadan geçiş yapabilme yetisine sahiptir.




**Türk Loydu Special Prize Winner Design / Türk Loydu Özel Ödülü Alan Tasarım**
**Design name: Aiolos**
**Designer students: Derya Çelikel\*, Mehmet Akif Tarhan\*, Erdinç Kara\*, Tuncer Sönmezoğlu\*\***


\* Istanbul Technical University, Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering, Department of Naval Architecture and Marine Engineering

\*\* Maltepe University, Faculty of Architecture and Design, Department of Nautical Design

**AIOLOS**



**AIOLOS**

**ALS14001**  
**POSTER 01: ANA TASARIM**




TEKNİK ÖZELLİKLER			
L <sub>OA</sub>	93.92	m	
L <sub>WL</sub>	91.40	m	
B	16.00	m	
T	6.00	m	
D	7.50	m	
V <sub>seyir</sub>	12.00	kn	
C <sub>B</sub>	0.81		
Müret.	14		
DWT	4999	t	
GT	2703	t	

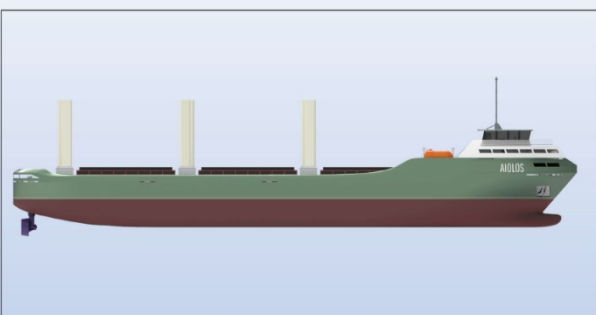
YENİ NESİL KOSTER GEMİSİ	
TASARIM ADI	AIOLOS
KONSEPT	Adını Rüzgar Tanrısı Aiolos'tan alan, Güneş ve Rüzgar Enerjisinden Azami Düzeyde Yararlanabilen, Elektrik Sevk Sistemine Sahip Düşük Emisyonlu, Aerodinamik ve Modern Forma Sahip Yeni Nesil Koster Gemisi.
MALZEMELER	Gemi İnşa Çeliği, Alüminyum, Alüminyum Petek Sandviç Panel


**AIOLOS**


**ALS14001**  
**POSTER 01: GÖRÜNÜŞLER**



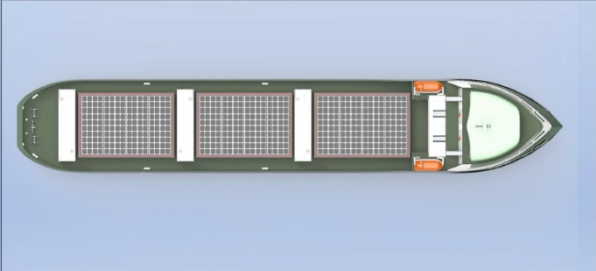
ÖN GÖRÜNÜŞ




PROFİL GÖRÜNÜŞ



ARKA GÖRÜNÜŞ




ÜST GÖRÜNÜŞ




**ALS14001**  
**POSTER 03: İNOVATİF ÖZELLİKLER**


### Marin-Tipi Esnek Güneş Panelleri


Deniz koşullarına dayanıklı ve üzerinde yürünebilir özellikte olması gerekliliği sebebiyle ambar kapaklarının üzerlerinde marin tipi, esnek güneş panelleri kullanılmıştır.





### Econowind Ventifoil Katı Yelkenler


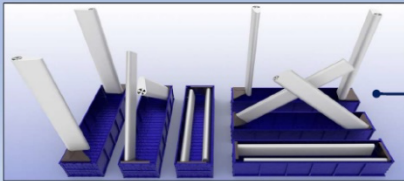
 **Geliştirilmiş Performans:** Kanada entegre edilmiş akıllı emiş sistemi, VentiFoil'in gücünü yüksek oranda artırır.


 **Otonom Yönlendirme:** VentiFoil® üniteleri, görünen rüzgara göre en uygun açıları bulmak için otomatik olarak döndürülebilir.

 **Yüksek Verimlilik:** Üretilen kuvvet doğrudan güverteye aktarılır. Gemilerin optimal hızını korumak için motor gücü azaltılabilir.

 **Ergonomik Katlanabilir Yapı:** Şiddetli ve elverişsiz rüzgar koşullarında veya limanlarda VentiFoil® üniteleri kolayca katlanabilir.

 **Kolay Kurulum:** Hidrolik, otomasyon ve havalandırma gibi tüm ekipmanlar flatrack ünitesine entegre edilmiştir.





**ALS14001**  
**POSTER 03: İNOVATİF ÖZELLİKLER**


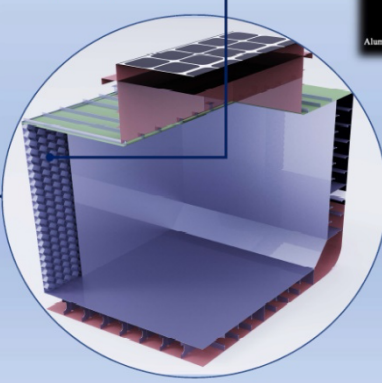
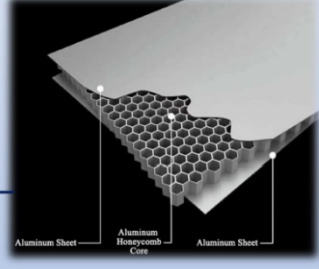
### Hibrit Malzeme Ambar Dizaynı

Ambar tasarımında, yan duvarlar geleneksel gemi inşa çeliği yerine son yıllarda gemi inşaa sanayide kullanımı oldukça artan, literatürde ambar kapaklarına uygulanması hususunda çeşitli senaryonun analiz edildiği bal peteği yapılı alüminyum sandviç paneller tercih edilmiştir.

Tercih edilen hibrit ambar tasarımı ile geleneksel yük taşıyan gemilere göre;

-  **Daha Hafif**
-  **Geri Dönüştürülebilir**

bir yapısal tasarıma ulaşılması amaçlanmıştır.

## GMO Special Prize Winner Design / GMO Özel Ödülü Alan Tasarım

**Design name: Mediterranean Gull**

**Designer students: Ozan Şahin, Hüseyin Deniz Güler**

Yıldız Technical University, Naval Architecture and Maritime Faculty, Department of Naval Architecture and Marine Engineering

**MEDITERRANEAN GULL**

**MEDITERRANEAN GULL**

**KL84860**



LOA: 87.67 m  
LWL: 79.95 m  
B: 14.588 m  
D: 7.50 m  
T: 5.55 m  
DWT: 4110  
GT: 2930.95

Deplasman: 5941 Ton  
Ana Makine Gücü: 1600 kw  
Kargo hacmi: 5423 m  
Konteyner Kapasitesi: 196 TEU  
Seyir Hızı: 10 kn  
Azami Hız: 12 kn

Tasarımın İsim Önerisi:

MEDITERRANEAN GULL ismi geminin çalıştırılması planlanan Akdeniz, Kuzey Avrupa ve Karadeniz havzalarında yaşayan akdeniz martısından gelmektedir.

Üretimde Kullanılacak Malzemeler:

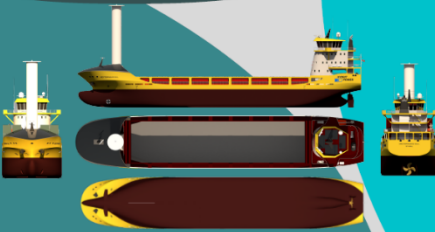
Çelik

Tasarımın Konsepti ve Temel İlkeleri:

Akdeniz, Kuzey Avrupa ve Karadeniz havzasında seyir yapabilen düşük draftlı bir gemi tasarlanmıştır. Enerji verimliliği ön plana alınarak düşük direnç değerlerine, aerodinamik kasara, yaşam mahaline ve alternatif çözümlere sahip bir gemi tasarlanarak yakıt tüketimi azaltılıp çevreye verilen zararın düşürülmesi hedeflenmiştir.

**MEDITERRANEAN GULL**

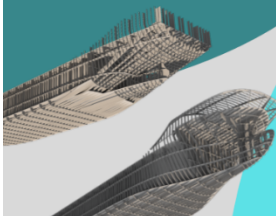
**TASARIM ÖZELLİKLERİ POSTERİ**  
**KL84860**



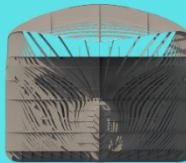
**GEMİ ANA BOYUTLARI**

LOA: 87.5 m  
LWL: 79.2 m  
B: 16 m  
D: 7 m  
T: 5.6 m  
DWT: 4950  
GT: 2995

DEPLASMAN: 5941 Ton  
Ana Makine Gücü: 1600 kw  
Kargo hacmi: 5697 m  
Konteyner Kapasitesi: 219 TEU



Gemi elemanları Türk Loydu kurallarına göre boyutlandırılmıştır ve 3D modellenmiştir.



Hareketli perdeler, tipik olarak, açık güverte katlarını ambar kapaklarına bağlanarak veya gemi veya kıyı vinçleri ile çalıştırılır. Bölmeler, manuel veya hidrolik olarak çalıştırılan pimlerle yerine kilitlenir. Kargo ambarı tasarımına bağlı olarak çeşitli yerlere yerleştirilebilirler.

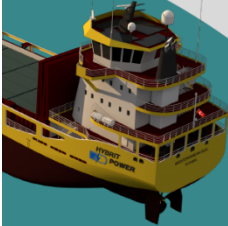
2 adet çoklu katlanır sistemli hidrolik ambar kapakları bulunmaktadır. Kapaklar 1 başa ve 1 kıçta katlanır. Güvertede yük taşıyacağı için kapak mukavemetleri artırılmıştır.

İkiz güverte kaldırılabilir ambar kapak panelleri, gemi veya kıyıda bulunan vinçlerle kaldırılabilir. Çıkarılabilir ve/veya katlanabilir konsollarla desteklenirler ve kargo ambarı tasarımına bağlı olarak çeşitli yükseklik konumlarında yerleştirilebilirler. Ayrıca kargoları ayırmak için bölme duvarı konumuna da yerleştirilebilirler. Kullanılmadığı zaman, ambarda veya açık güvertede istiflenebilirler.



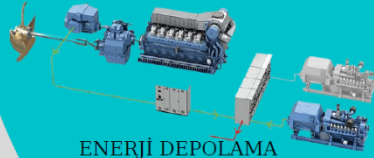
## MEDITERRANEAN GULL

## İNÖVATİF ÖZELLİKLER POSTERİ KLG84860




### GATE RUDDER

Geleneksel dümen sisteminin sürünmesini itme üreten bir düzenlemeyle değiştirilerek bir geminin yakıt tüketimini azaltır, mükemmel manevra kabiliyeti sağlar ve gürtülü ve titreşim izini iyileştirir. Yakıt tüketimini %5 veya daha fazla azaltır.




### ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ

Ana makinenin sabit güçte çalışmasını ve daha az yakıt tüketimi sağlar, daha az karbon salınımı olur ve maliyet düşer. Yüksek makine gücü gerektiren deniz şartlarında devreye girerek makinenin sabit güçte çalışmasını sağlar.



### ROTOR SAIL

Rüzgar koşulları uygun olduğunda, Rotor Sail ana motorların kısılmasına izin vererek yakıt tasarrufu sağlar ve emisyonları azaltırken hızı ve yolculuk süresini korumak için gereken gücü sağlar. Rotor Sail döndürmek için geminin alçak gerilim şebekesinden güç alan değişik bir elektrikli tahrik sistemi kullanılır.

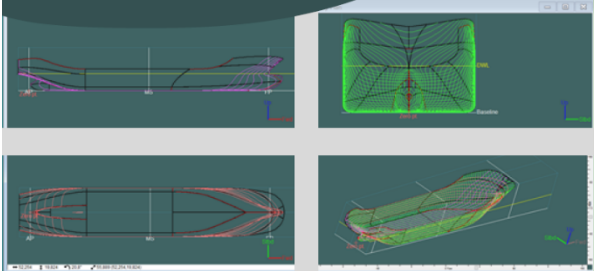



### WAVE FOIL

Wave foil, önemli ölçüde yakıt tasarrufu, dalgalı denizde daha konforlu bir deneyim sağlayan geri çekilebilir kanat sistemidir.

## MEDITERRANEAN GULL

## FORM TASARIMI POSTERİ KLG84860

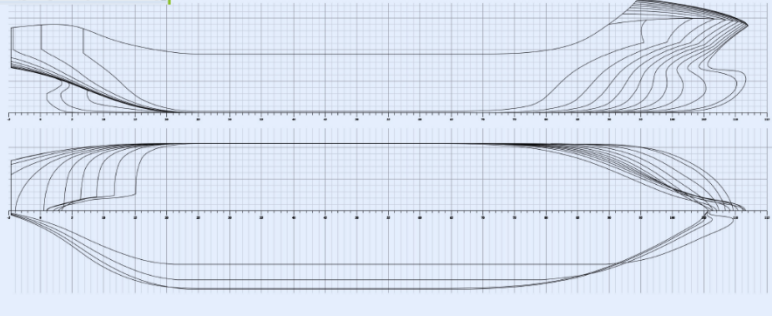




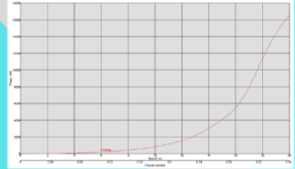
Genel Özellikler	Değer
Tenit No.	100
LBP	100
Geniçlik	100
Derinlik	100
Dişli	100
Bark No.	100
Denizaltı	100
Ara Makine	100
Genel No.	100
Kargo Hattı	100
Koruyucu Kapaklar	100

Maxsurf Resistance modülünde %55 verim ile yapılan son hesaplamalar sonucunda gemimizin 12 kn hızla gidebilmesi için gerekli güç 1568 kW çıkmıştır.

Speed (kn)	Friction LWP	Friction No. Völ.	Rotorsip Basınç (kN)	Rotorsip Gücü (kW)
1	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.000
6	0.000	0.000	0.000	0.000
7	0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.000	0.000	0.000	0.000
12	0.000	0.000	0.000	0.000
13	0.000	0.000	0.000	0.000
14	0.000	0.000	0.000	0.000
15	0.000	0.000	0.000	0.000
16	0.000	0.000	0.000	0.000
17	0.000	0.000	0.000	0.000
18	0.000	0.000	0.000	0.000
19	0.000	0.000	0.000	0.000
20	0.000	0.000	0.000	0.000
21	0.000	0.000	0.000	0.000
22	0.000	0.000	0.000	0.000
23	0.000	0.000	0.000	0.000
24	0.000	0.000	0.000	0.000
25	0.000	0.000	0.000	0.000
26	0.000	0.000	0.000	0.000
27	0.000	0.000	0.000	0.000
28	0.000	0.000	0.000	0.000
29	0.000	0.000	0.000	0.000
30	0.000	0.000	0.000	0.000
31	0.000	0.000	0.000	0.000
32	0.000	0.000	0.000	0.000
33	0.000	0.000	0.000	0.000
34	0.000	0.000	0.000	0.000
35	0.000	0.000	0.000	0.000
36	0.000	0.000	0.000	0.000
37	0.000	0.000	0.000	0.000



Yapılan hesaplar sonucunda Hyundai 8H21/32 model 900 rpm 60 hz 1600 kW dizel makinesi seçilmiştir.







## Call For Papers

4th International Naval Architecture and Maritime Symposium (INT-NAM 2023) will be held by Yıldız Technical University Naval Architecture and Maritime Faculty on October 11-13, 2023 in İstanbul, Türkiye.

Oceans cover three-quarters of the Earth's surface, contain 97% of the Earth's water, and represent 99% of the living space on the planet by volume. UN Sustainable Development Goal 14 addresses the conservation and sustainable use of the oceans, seas, and marine resources. The oceans drive global systems that make the Earth habitable for humankind. Our rainwater, drinking water, weather, climate, and coastlines as well as much of our food, and even the oxygen in the air we breathe are all ultimately provided and regulated by the sea, with over three billion people depending on marine and coastal biodiversity for their livelihoods.

The issues regarding safeguarding oceans for the future involve taking on great responsibilities that require huge efforts toward sustainable socioecological and technical innovation with the inherent support of nature-based solutions.

With the theme of "Sustainable Innovation & Nature-Based Solutions", INT-NAM 2023 brings together a broad spectrum of representatives of the maritime industry through the involvement of emerging innovative and technological enterprises, public bodies, civil society, academia, and stakeholders.

During the symposium, paper presentations and special sessions with keynote speakers will be held with strong support from representatives of maritime industry partners and researchers. To facilitate participants' mobility and participation, some of INT-NAM 2023's events will be a live-stream broadcast.

Please visit: [www.int-nam.com](http://www.int-nam.com)

**Important dates:**

Abstract Submission Deadline: February 1, 2023  
Notification of Abstract Review: February 28, 2023  
Full Paper Submission Deadline: April 30, 2023  
Notification of Full Paper Review: June 15, 2023  
Conference Date: October 11-13, 2023

**Main Topics:**

Alternative Fuels  
Data and Artificial Intelligence  
Decommissioning and Recycling  
Emission Control  
Energy Efficiency  
Green Technologies  
Maritime Human Factors  
Marine Renewable Energy  
Nature-based solutions  
Sustainable Innovations

**Other Topics:**

Advanced Materials  
Arctic Engineering  
Bunkering  
Computational Methods  
Marine Design and Safety  
Marine Electrical Equipments  
Marine Structures  
Multimodal Transportation  
Noise and Vibration  
Propulsion Systems  
Resistance and Propulsion  
Ship Construction  
Ship Design  
Ship Finance  
Ship Stability  
Small and Pleasure Crafts  
Underwater Technology and Acoustics  
Unmanned Vehicles  
The Water-Energy-Food Nexus

**4TH INTERNATIONAL NAVAL ARCHITECTURE AND MARITIME SYMPOSIUM ( INT-NAM 2023 )****TÜRK DENİZCİLİK ENDÜSTRİSİNİ KATILIMA DAVET EDER**

11-13 Ekim 2023 tarihlerinde 4'ncü kez düzenlenecek International Naval Architecture and Maritime Symposium ( INT-NAM 2023 ) etkinliği, sürdürülebilir yenilikçi ve tabiat dostu çözümlere ağırlık veren "Sustainable Innovation and Nature-based Solutions" teması ile YTÜ Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi tarafından düzenlenecektir. Sempozyum düzenleme kurulu, Birleşmiş Milletler'in Ocean 2022 konferansında ortaya konulan kritik çözüm faaliyetlerinden yola çıkarak belirlenmiş olan bu temayı öne çıkaracak yenilikçi proje ve fikirleri ile ülkemiz ve dünya Gemi ve Denizcilik Endüstrisi kişi ve kuruluşlarını etkin katılıma davet etmektedir.

Sempozyum sayfası: [www.int-nam.com](http://www.int-nam.com)

E-posta: [int-nam@yildiz.edu.tr](mailto:int-nam@yildiz.edu.tr)

**Sempozyum Konuları:****Ana konular:**

Sürdürülebilir Yenilikler  
Tabiat Dostu Çözümler  
Alternatif yakıtlar  
Emisyon kontrolü  
Veri ve Yapay Zeka  
Hizmetten Çıkarma ve Geri Dönüşüm  
Enerji verimliliği  
Yeşil Teknolojiler  
Denizde İnsan Faktörü  
Denizde Yenilenebilir Enerji

**Diğer konular:**

İleri Malzemeler  
Kutup Mühendisliği  
Yakıt İkmali  
Hesaplamalı Yöntemler  
Deniz Tasarımı ve Güvenliği  
Deniz Elektrik Teçhizatları  
Deniz Yapıları  
İnsansız Deniz Araçları  
Multimodal Taşımacılık  
Gürültü ve Titreşim  
Tahrik Sistemleri  
Direnç ve Tahrik  
Gemi İnşaatı  
Gemi Tasarımı  
Gemi Finansmanı  
Gemi Stabilitesi  
Gezinti Tekneleri  
Sualtı Teknolojisi ve Akustiği  
Su-Enerji-Gıda Bağı

# Deniz Taşımacılığında Dekarbonizasyon Uygulamalarının Kaynak Temelli Görüş Bağlamında Alternatif Yakıtlar Açısından Değerlendirilmesi

Murat Bayraktar<sup>1</sup>, Umur Bucak<sup>2</sup>, Hakan Demirel<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Bölümü, Denizcilik Fakültesi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak, Türkiye

<sup>2</sup> Denizcilik İşletmeleri Yönetimi Bölümü, Denizcilik Fakültesi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak, Türkiye

<sup>3</sup> Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Bölümü, Denizcilik Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup> bayraktarmurat@beun.edu.tr, 0000-0001-7252-4776

<sup>2</sup> (sorumlu yazar), bucak.umur@beun.edu.tr, ORCID: 0000-0001-5112-8133

<sup>3</sup> hdemirel@itu.edu.tr, 0000-0002-7579-7064

## ÖZET

Tonaj ve değer olarak küresel ticaretin taşınmasında en büyük paya sahip olan denizyolu taşımacılığında kaynaklanan emisyonların dünya toplamı içindeki payı günden güne artmaktadır. Uluslararası Denizcilik Örgütü, bu gidişatı engellemek adına gemilerden kaynaklı emisyonların azaltılmasına yönelik regülasyonlar yayınlamıştır. Bu regülasyonlara göre gemilerden kaynaklı çeşitli zararlı gazlara ait emisyon oranları yıllar içerisinde daha da azaltılacaktır. Bu çerçevede denizcilik işletmeleri arasında hali hazırda üst seviyede seyreden rekabet sahası genişleyecektir. Bu kapsamda işletmelerin kendi kaynaklarını geliştirerek rekabetçi avantaj yakalayabileceğini savunan kaynak temelli bakış açısı yakıt teknolojisinin gelişimine uyum açısından denizcilik işletmelerine rehber olabilecektir. Bu çalışmada IMO 2050 kuralları kapsamında karbonu sıfırlayan alternatif gemi yakıtları çeşitli yönlerden değerlendirilmiştir. Alternatif yakıtlar içerisinde doğalgaz, metanol, amonyak, dizel, hidrojen sıvı ve hidrojen ele alınmış, teknik, ekonomik, lojistik vb. özellikleri detaylandırılmıştır. Değerlendirme kapsamında alternatiflerin teknik, ekonomik, lojistik vs. açılardan güçlü ve zayıf yönleri ortaya konulmuştur. Bunun yanı sıra ilgili yakıtlar bazı teknik özellikler kapsamında TOPSIS yöntemi kullanılarak sıralanmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre Dizel yakıtın teknik açıdan gemiler için en iyi seçenek olduğu, bu yakıtı hidrojen ve doğalgazın izlediği ortaya konulmuştur. Hidrojenin teknik açıdan neredeyse dizel kadar etkili olması geleceğin karbonsuz yakıtının tespiti için önemli bir gelişme sunmaktadır. Bu bağlamda alternatif gemi yakıtları hem teknik özellikler hem de rekabetçi avantaj bağlamında ele alınarak teoriye katkı sağlanmıştır. Alternatif yakıtların kullanımı, tedariği, depolanması gibi konularda bilgi verilmesi ile uygulayıcılara bir bilişsel çerçeve sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Alternatif yakıtlar, denizyolu taşımacılığı, kaynak temelli görüş, dekarbonizasyon

**Makale geçmişi:** Geliş 25/03/2022 – Kabul 22/07/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1093206>

# Evaluation of Decarbonization Applications in Maritime Transportation in Terms of Alternative Fuels in the Context of Resource-Based View

Murat Bayraktar<sup>1</sup>, Umur Bucak<sup>2</sup>, Hakan Demirel<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Marine Engineering, Maritime Faculty, Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Maritime Business Administration, Maritime Faculty, Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye

<sup>3</sup>Department of Marine Engineering, Maritime Faculty, İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup> bayraktarmurat@beun.edu.tr, 0000-0001-7252-4776

<sup>2</sup> (corresponding author), bucak.umur@beun.edu.tr, ORCID: 0000-0001-5112-8133

<sup>3</sup> hdemirel@itu.edu.tr, 0000-0002-7579-7064

## ABSTRACT

The share of emissions originating from maritime transport, which has the largest share in the transportation of global trade in terms of tonnage and value, in the world total is increasing day by day. The International Maritime Organization has published regulations to reduce exhaust gas emissions from ships to prevent this trend. According to these regulations, the emission rates of various harmful gases originating from ships will be further reduced over the years. In this framework, currently, the intensely competitive field of the maritime transport market will expand. In this context, the resource-based view, which argued that businesses can gain a competitive advantage by developing their resources, can guide maritime enterprises in terms of adaptation to the development of fuel technology. In this study, alternative marine fuels that neutralize carbon within the scope of the IMO 2050 rules have been evaluated from various aspects. Among the alternative fuels, natural gas, methanol, ammonia, diesel, hydrogen liquid, and hydrogen were discussed and their features as technical, economic, logistics, etc. were detailed. Within the scope of the evaluation, the strengths and weaknesses of the alternatives were revealed from various perspectives. In addition, the related fuels are listed using the TOPSIS method within the scope of some technical specifications. According to the results of the study, it was revealed that diesel fuel is the best option for ships from a technical point of view, followed by hydrogen and natural gas. The fact that hydrogen is technically almost as effective as diesel offers an important advance for the detection of carbon-free ship fuel of the future. In this context, alternative ship fuels have been discussed in terms of both technical features and competitive advantage, contributing to the theory. A cognitive framework was presented to the practitioners by providing information on the use, supply, and storage of alternative fuels.

**Keywords:** Alternative fuels, maritime transportation, resource-based view, decarbonization

**Article history:** Received 25/03/2022 – Accepted 22/07/2022

## 1. Giriş

Deniz taşımacılığı dünya ticaretine konu olan yüklerin ulaştırmasında hem tonaj olarak hem de değer olarak en yüksek paya sahiptir. Öte yandan, deniz taşımacılığının yoğun olarak tercih edilmesi, dizel yakıt kullanarak taşımacılık faaliyetlerini gerçekleştirmesi sebebiyle çevresel bozulmalardaki sorumluluğunu artırmaktadır (Ren ve Lützen, 2017). Gemilerden kaynaklı CO<sub>2</sub> salınımlarının dünyadaki tüm CO<sub>2</sub> salınımları içindeki payı ortalama %2.6 olarak gerçekleşmektedir (Bucak vd., 2021: 22). Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) gemilerden kaynaklı zararlı gazların salınımının azaltılması konusunda yıllar içerisinde sıkılaştırılacak şekilde çeşitli kısıtlamalara gitmiştir. En önemli düzenlemelerden biri, gemilerden kaynaklanan hava kirliliğini önlemek için ilk kez 1997 yılında kabul edilen ve 2005 yılında uygulanan Gemilerden Kaynaklanan Kirliliğin Önlenmesine İlişkin Uluslararası Sözleşme (MARPOL) Ek VI'dır (IMO, 2006). MARPOL Ek VI'da yer alan ve 'IMO 2020' olarak bilinen en son revizyon ile gemi sahiplerine gemilerin yakıtındaki kükürt seviyesini %3,50'dan %0,5'e düşürmeleri veya %3.50'a kadar kükürt içeren yakıt kullanılıyorsa emisyon kontrol cihazlarını donatmalarını tavsiye edilmiştir. IMO, 2050 yılına kadar denizcilikten kaynaklanan toplam yıllık sera gazı salınımlarının 2008 yılına kıyasla en az %50'sini azaltmayı hedeflemektedir. Ayrıca kuruluş, 2008 yılına kıyasla 2030 yılına kadar en az %40 oranında ve 2050 yılına kadar %70 oranında CO<sub>2</sub> salınımlarını da düşürmeyi planlamaktadır (IMO, 2018).

Literatürde IMO yönetmeliklerine uygun gemilerde alternatif yakıt seçimi ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Andersson vd. (2020), hali hazırda ve gelecekte kullanılması muhtemel yakıt türlerini ekonomik, teknik, çevresel, güvenlik, etik, lojistik vb. açılardan değerlendirmiştir. Balcombe vd. (2019), deniz taşımacılığında kullanılan alternatif yakıtlar arasında yer alan Doğalgaz, Metanol, Biyoyakıtlar ve Elektrikçi avantaj ve dezavantajlarını ortaya koyarak incelemiştir. Bazı çalışmalarda bu alternatif yakıtlardan deniz taşımacılığında en çok tercih edilenleri farklı yetkinlikler kapsamında değerlendirilmiştir. Hansson ve ark. (2019), 2030 yılında kullanılması muhtemel deniz yakıtlarının performansını gözden geçirmiştir. Buna göre, çeşitli yakıt performans göstergeleri dikkate alınarak yapılan önceliklendirme analizi sonucunda, 2030 yılında Doğalgazın en çok tercih edilen gemi yakıtı olacağı öngörülmüştür. Benzer şekilde Gilbert vd. (2018), mevcut düzenlemeler çerçevesinde Doğalgazın en çok tercih edilecek yakıt olarak belirtmiştir. Kim vd. (2020) fiyat-performans analizi yapmış ve Doğalgazın bu noktada da rekabet avantajına sahip olduğunu ortaya koymuştur. Aksine Brahim vd. (2019), birçok çalışmada bahsedilen Doğalgazın rekabet avantajlarını eleştirmiş ve bu yakıt türünün kısa vadeli bir seçenek olabileceğini savunmuştur. Bouman vd. (2017) ve Noor vd. (2018), enerji performansında bir boşluk tespit ederken, biyoyakıtların azalan salınımlar açısından en yüksek etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Kesieme vd. (2019), denizcilik sektörü paydaşları tarafından geliştirilen etkin stratejiler sonucunda biyoyakıtların çok daha geniş bir kullanım yaygınlığına ulaşacağını öngörmüştür. Bazı araştırmalar gemilerin alternatif yakıtlarını sürdürülebilirlik perspektifinden değerlendirmiştir. Ren ve Liang (2017), Bulanık TOPSIS yöntemini kullanarak Hidrojenin Doğalgaz ve Metanolden daha sürdürülebilir bir yakıt olduğu sonucuna varmıştır. Farklı olarak Ren ve Lützen (2017), Bulanık AHP yöntemini kullanarak henüz deniz taşımacılığında kullanılmayan nükleer gücün en sürdürülebilir gemi yakıtı olabileceğini öngörmüştür. Bu çalışmada çeşitli gemi yakıtları teknik açıdan TOPSIS yöntemiyle sıralanmış, alternatif yakıtların gemi makinelerinde kullanımı ise lojistik, teknik, ekonomik gibi çeşitli açılardan değerlendirilmiştir. Çalışma hem var olan yakıtları teknik boyutta sıralaması ve hem de gelecekte yaygın bir şekilde kullanılması muhtemel alternatif yakıtları farklı boyutlarıyla ele alması açısından orijinal bir çalışmadır.

Bu çalışmanın amacı IMO düzenlemelerine uyum sağlayacak şekilde gelişecek gemi yakıt teknolojisini ele almak ve alternatif yakıtları çeşitli açılardan değerlendirmektir. Bu amaç doğrultusunda günümüzde

ortaya konulan alternatif yakıtlar teknik özellikleri açısından çok kriterli karar verme yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, çalışmanın ilerleyen bölümlerinde deniz taşımacılığı şirketlerinin kaynak temelli görüş çerçevesinde yakıt teknolojisi tercihi, rekabetçiliklerinin sürdürülebilmesi açısından tartışılmıştır. Daha sonra gemi yakıtı olarak kullanılan ve kullanılabilecek alternatifler teknik, ekonomik, vb. çeşitli açılardan analiz edilmiştir. Son olarak, deniz taşımacılığı şirketlerine gemi yakıtı tercihi noktasında bazı önerilerde bulunulmuştur.

## 2. Kaynak Temelli Görüş Bağlamında Denizcilikte Sürdürülebilirlik Uygulamaları

Deniz taşımacılığı firmaları arasındaki rekabet bir yandan oldukça şiddetli bir şekilde hissedilmekte bir yandan da rekabetin kapsamı ve dolayısıyla rekabet alanları her geçen gün genişlemektedir. Deniz taşımacılığı firmaları, yük bulmak konusunda rekabet ettikleri kadar yükün tedariki açısından en uygun rotaları kapsayacak şekilde liman ağı yapılanması, terminal yatırımları, yakalanan ölçek ekonomisinin faydasını maksimize edecek şekilde mega gemi siparişi, hatta nihai müşteriye doğrudan ulaşmak adına tedarik zinciri eş bütünleşmesi konularında birbirleriyle rekabet etmektedirler. Rekabetin sürdürülmesi ve rakiplere göre rekabetçi avantaj yakalamak adına stratejik yönetim yazınında iki temel görüş bulunmaktadır. Bunlardan biri rekabetçi stratejileri dış faktör paradigması çerçevesinde değerlendiren pozisyon okulu, bir diğeri ise ilgili stratejileri iç faktör paradigması çerçevesinde ele alan kaynak temelli görüştür (Özdemir ve Taşçı, 2020: 1019; Chakravarthy ve Doz, 1992: 6; Montgomery vd., 1989:192). Şirketlerin sürdürülebilir rekabet avantajı yakalamak için sahip oldukları iç dinamiklerine yönelmeleri gerektiğini savunan kaynak temelli görüşün temellerini Penrose (1959) oluşturmuştur. Daha sonra ilgili teoriye katkılar Ansoff (1965), Andrews (1971), Selznick (1975) ve Wernerfelt (1984) tarafından olmuştur (Bal, 2010: 269; Rangone, 1999: 233). Kaynak temelli görüş kapsamındaki kaynaklar, işletme tarafından kontrol edilen ve taklidi maddi veya manevi açıdan maliyetli olduğu için işletmelere rekabetçi avantaj sağlayan kaynaklardır (Karacaoğlu, 2006: 4). Bu çerçevede bakıldığında, denizcilik sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin rekabetçiliğini sürdürebilmeleri açısından ellerinde bulunan kaynakları sürekli iyileştirmeleri, sürekli değişen rekabet koşulları göz önünde bulundurulduğunda elzemdir. Örneğin özellikle 2008 finansal krizinin ardından piyasada taşınan yüklerin ton-mil mesafesi uzadığından ölçek ekonomisinden daha fazla yararlanabilmek için mega gemiler inşa ettirilmiş ve işletilmiştir. Bu süreçte mega sınıfı gemilere sahip olmak ve bu gemilerin işletilmesi (alyans vasıtasıyla gemi üzerindeki yerlerin ortaklaşa doldurulması, optimum rota planlaması vs.) önemli birer kaynak olarak ön plana çıkmıştır. Şu an gelinen noktada ise ana liman-tali liman (hub-and-spoke) sistemi kapsamında mega gemilerle çalışan büyük şirketler kendi arasında rekabet etmekte, daha kısa mesafelerde besleme (feeder) gemi çalıştıran şirketler hem kendi aralarında hem de büyük şirketlerle rekabet etmektedir.

Dünya ticaretinin tonaj olarak yaklaşık %85'i denizyolu ile taşınmaktadır. Bu durum bir yandan denizyolu taşımacılığının ekonomik sürdürülebilirliğine katkı yaparken, çevresel etkiler kapsamında denizyolu taşımacılığına yönelik odağı artırmaktadır. Boru hattı taşımacılığı haricindeki tüm taşıma modları içerisinde en çevreci taşıma modu olan denizyolu taşımacılığında kaynaklı CO<sub>2</sub> salınımlarının dünya CO<sub>2</sub> salınımları içindeki payı %2.6 seviyesindedir (Bucak vd., 2021: 22). Bu oranın azaltılması amacıyla birçok düzenleme bulunmaktadır. Büyük denizcilik şirketlerinin temsilcilerinden oluşan World Shipping Council, Clean Cargo Working Group, Trident Alliance vb. kuruluşlar, çevresel etkileri azaltmak için çalışmaktadırlar (Vejvar vd., 2020). Bu endişeler, IMO 2020, Balast Suyu Sözleşmesi (Tran vd., 2020), Enerji Verimliliği Tasarım İndeksi, Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı ve Balast Suyu Yönetim Sistemi (Yuen vd., 2017) gibi çeşitli düzenlemelerin sıklaştırılması veya uygulanması ile giderilmeye çalışılmaktadır. Son yıllarda denizcilik sektöründe geliştirilen ISO14000 Çevre Yönetim Sistemi,

ISO26000 Sosyal Sorumluluk Yönetim Sistemi, yavaş seyretme (slow steaming), sahil elektriği sağlama (cold ironing), biyosit içermeyen boya kullanımı ve yenilenebilir yakıt alternatifleri ile uyum gibi taktikler çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır (Yuen vd., 2017).

Sürdürülebilir denizcilik stratejilerinin başarılı olabilmesi için yeşil denizcilik ve sürdürülebilir denizcilik arasındaki belirsizliği ortadan kaldırmak ve salınımları azaltma hedefleri ile çevre yönetimini bütünleştirmek oldukça önemlidir (Wu vd., 2020). Salınımları azaltma hedefleri özellikle gemiler için oldukça önemli bir kaynak olan yakıt teknolojisinin geliştirilmesi ve alternatif yakıtların gemi yakıtı olarak kullanılabilmesi konularına odaklanmaktadır. Bu konu kaynak temelli görüş bağlamında denizcilik şirketlerinin gelecekteki rekabetçiliklerini oldukça derinden etkileyecek bir unsur olarak ön plana çıkmaktadır. Denizcilik şirketleri önümüzdeki on yıllarda bir yandan salınım kısıtlarına uyarak operasyonlarına devam etmeli bir yandan da kendi rekabetçiliklerini sürdürebilmeleri açısından en önemli iç unsurlardan (kaynaklardan) biri olan yakıt tedarikinin en optimum şekilde gerçekleştirilmesine çalışmalıdır. Önümüzdeki yıllarda denizcilik sektörünün en önemli rekabet konularından biri olacak olan 'dekarbonizasyon (karbondan kaçınma)'nın başarılması için şirketlerin kendi kaynaklarına odaklanmaları, piyasada bir konum elde etmekten ziyade en önemli kaynaklarından biri olan yakıt maliyetleri ve tedarikini rakiplerine göre daha etkili bir şekilde gerçekleştirmeleri oldukça önemli olacaktır. Bu bağlamda kaynak temelli görüş, şirketlere sürdürülebilir rekabetçi avantaj sağlayan kaynaklara odaklanmaktadır (Rangone, 1999). Denizcilik şirketlerinin dekarbonizasyon bağlamında sürdürülebilir bir rekabetçi avantaj yakalayabilmek için alternatif yakıtları, maliyet, erişilebilirlik, tedarik, ürün ömrü, yakıt kalitesi, depolama koşulları, sağladığı enerji gücü, üretim koşulları gibi teknik, lojistik ve ekonomik yönlerden ele almaları gerekmektedir. Bu bağlamda Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün 2030 ve 2050 yıllarında CO<sub>2</sub> ve GHG salım hedeflerini gerçekleştirmek adına gemilerde yakıt olarak sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), Amonyak, Hidrojen, Metanol ve Biyoyakıtlar ön plana çıkmaktadır. Buna karşın, alternatif yakıtlara ve bunlar üzerinde kullanılacak yeni teknolojilere geçilmesi için güvenilirlik, bilgi birikimi ve uluslararası düzenlemeleri karşılaması ve hususları en kritik noktaları oluşturmaktadır. Bu duruma ek olarak sürdürülebilir olması için üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve verimli operasyonların gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Konur vd., 2019).

### 3. Alternatif Yakıtların Gemi Makinelerinde Kullanılması

#### 3.1. LNG'nin yakıt olarak gemi makinelerinde kullanılması

Doğalgazın -159°C ve -162°C arasında soğutulması ile elde edilen Sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) kokusuz, berrak, renksiz, korozyona uğramayan ve toksik olmayan normal atmosfer basıncında kriyojenik bir sıvıdır (Bahadori, 2014; Mokhatab vd., 2013). Sıvı formda bulunan LNG patlayıcı bir yapıya sahip olmamakla birlikte sadece kapalı alanlarda %5 ila %15 aralığında yanıcı bir maddeyle birleştiğinde tutuşma olayı gerçekleşecektir. Diğer durumlarda zengin veya fakir karışım olacağından kaynaklı herhangi bir yanıcı ile birleşmesine rağmen tutuşma olmayacaktır (Bahadori, 2014). Dizel yakıtların yerine LNG yakıt kullanımı emisyonlar ve maliyet açısından önemli seviyede kazanım sağlayacaktır (Mokhatab vd., 2013). LNG yakıtla sevk edilecek gemiler için en önemli zorlukların başında tankların yerleştirilmesi için gereken yüksek hacimli bölgeler gerekmektedir. Çünkü LNG birim hacim başına geleneksel yakıtlara göre daha az enerji sağlamakta ayrıca tankların izolasyonları ve diğer ekipmanlar için ekstra çaba sarf etmek gerekmektedir (DNV, 2022). LNG artan yakıt talebini karşılamada, sürekli artan doğalgaz rezervlerinde göz önünde bulundurulduğunda, gelecek açısından önemli bir alternatif olarak kendisini güvence altına almaktadır (Tusiani ve Shearer, 2016). Son yıllık periyotlarda özellikle LNG ile sevk edilen gemilerin sayısının önemli artış yaşanmakta ve ayrıca yeni siparişler daha önceden

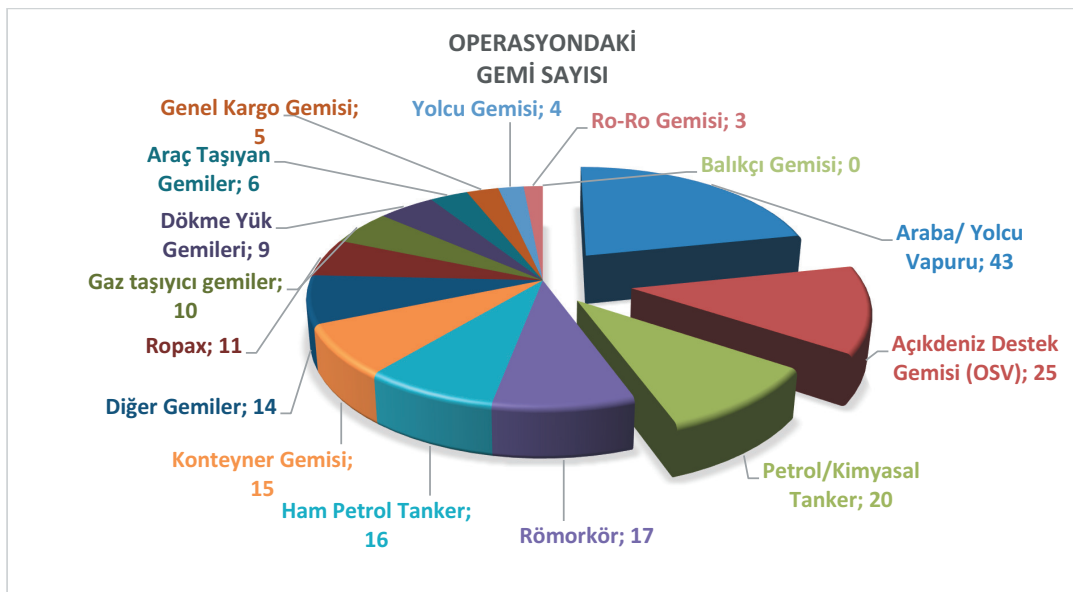
tahmin edilen seviyelerin üzerine çıkmaktadır. Yeni inşa gemiler ve sipariş edilen gemilerin yanı sıra, var olan gemiler üzerinde çeşitli modifikasyonlar “retrofitting” yapılarak LNG yakıtla sevk edilecek hale gelmektedir. LNG yakıtla sevk edilecek gemilerin sayısı ile ilgili detaylı bilgi Tablo 1’de ifade edilmektedir.

**Tablo 1.** Yıllar bazında LNG yakıtla sevk edilen, LNG yakıt kullanımına hazır ve LNG yakıtla sevk edilecek gemi siparişi sayısı

Yıl	Sevk Edilen Gemi Sayısı		LNG Yakıt Kullanımına Hazır Gemi S.		Sipariş Edilen Gemi Adedi	
	2020(Ekim)	2021(Mayıs)	2020(Ekim)	2021(Mayıs)	2020(Ekim)	2021(Mayıs)
2013	43	43	-	-	-	-
2014	53	53	-	-	-	-
2015	70	70	-	-	-	-
2016	88	89	34	34	-	-
2017	105	106	53	53	-	-
2018	130	131	80	80	-	-
2019	162	164	114	114	-	-
2020	173	191	126	118	57	-
2021	173	198	142	142	130	106

**Kaynak:** (DNV, 2021; DNV, 2022a; DNV, 2022b).

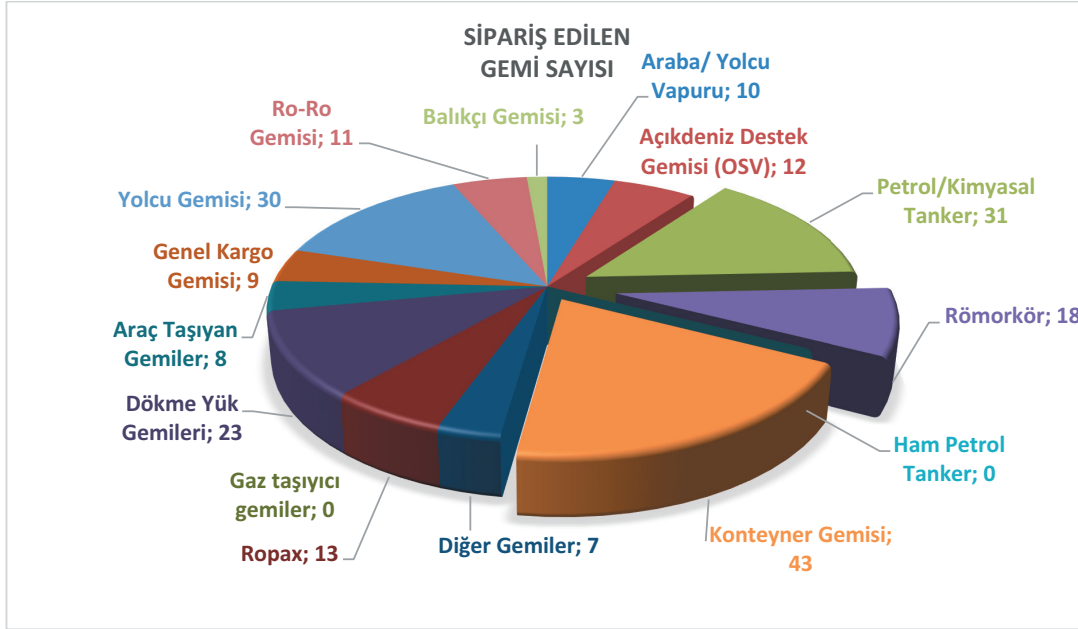
Tablo 2013-2021 yılları arasında LNG yakıt, LNG yakıt kullanımına hazır ve LNG yakıtla sevk edilecek gemi siparişi sayısı hakkında bilgi vermektedir. Düzenli olarak her yıl LNG yakıtla sevk edilen gemi sayısında artış yaşanmakta ve yeni sipariş edilen gemilerle birlikte artışını yıllar bazında koruyacaktır. 2021 Mayıs ayı itibarıyla 106 olan yeni gemi siparişi yıl sonunda toplamda 240’a ulaşmakta ve bu durum tüm yıllar arasında zirveyi oluşturmakla birlikte son 4 yılın toplamından fazlasını oluşturmaktadır (DNV, 2022; The Maritime Executive, 2022). 2021 Mayıs ayı itibarıyla operasyondaki gemi sayısı ve toplam gemi sayıları içindeki yüzdesi gemi tiplerine bağlı olarak detaylı bir biçimde Şekil 1’de ifade edilmektedir.



**Şekil 1.** Gemi türleri bazında LNG yakıtla sevk operasyondaki gemi sayısı ve oranı (DNV, 2022)



2021 Mayıs ayı itibariyle sipariş edilen gemi sayısı gemi tiplerine göre detaylı olarak Şekil 2’de ifade edilmektedir. Özellikle konteyner gemisi, ham petrol gemileri ve yolcu gemilerinin siparişindeki artış net bir şekilde görülmektedir.



**Şekil 2.** Gemi türleri bazında LNG yakıtla sevk edilecek sipariş edilen gemi sayısı ve oranı (DNV, 2022)

Sırasıyla LNG yakıtla işletilen gemiler en çok araba/yolcu vapuru, Açıkdeniz Destek Gemisi, Petrol/Kimyasal Tanker ve Römorkör olarak hizmet vermektedir. Özellikle vapurların belirli hatlarda çalışması, römorkörlerin tanımlanmış bölgelerde hizmet vermesi ve açık deniz destek gemilerinin üst yapıda LNG yakıt için uygun depolama alanların bulunması bu tip gemilerin sayısının artmasının önünü açmaktadır (Seddiek vd., 2015).

Gemi makinelerinde LNG'nin yakıt olarak kullanılması sonucunda partikül madde (PM) ve kükürt oksit ( $SO_x$ ) emisyonları neredeyse tamamı elemine edilmesiyle birlikte, azot oksit ( $NO_x$ ) emisyonları açısından da IMO sınırlanmalarını karşılama ve enerji verimliliği sağlama amacıyla EGR ve SCR teknolojileri kullanılarak %80 oranında indirgenme sağlanmaktadır (DNV, 2021; 2022). Sera gazları emisyonları açısından bakıldığında 2 stroklu ve 4 stroklu makinelerde sırasıyla %23 ve %14 oranında kazanım elde edilmektedir. Düşük veya yüksek basınçlı makine olmalarına göre değişmesine rağmen, 4 stroklu makinelerde metan kayması 2 stroklu makinelere göre daha yüksektir. LNG kimyasını %85 ila %95 oranlarında metan oluşturduğundan, sera gazları kapsamında  $CO_2$  çok daha fazla etkiye sahip olan metan ( $CH_4$ ) gazının yanma sonrasında oluşumun minimize etmek gerekir (DNV, 2021; 2022).

LNG yakıtla sevk edilecek gemilerde kullanılan sistemler dış etkenlerden en az etkilenecek şekilde segregasyon işlemi uygulanmaktadır. Herhangi bir sızıntı durumunda kriyojenik sıvılardan kaynaklı oluşabilecek olumsuzlukları ortadan kaldırmak için çift cidarlı yapıların seçilmektedir. Mükemmel bir görüntüleme ve sensör sistemiyle sızıntı durumlarına acil bir şekilde müdahale imkânı sağlamaktadır. Ayrıca tankların maksimum doldurma limitleri göz önünde bulundurulup ona göre ikmal işlemleri gerçekleştirilmektedir (DNV, 2021). 2022 yılı itibariyle 33 nokta LNG ikmal gerçekleştirilmekte ve gelecekte kurulması muhtemel bölgelerde bu sayının 75 olmasını hedeflenmektedir (SEA-LNG, 2022).

İstasyon ağlarının sayılarını artırana kadar operasyonel anlamda zorlukla karşılaşmamak adına çift

yakıtla sevk edilen makineler farklı gemi tiplerinde kullanılmaktadır. Buna karşın, ikmal alanlarına yakın bölgelerde hizmet eden vapur ve römorkör tipi gemilerde ikinci bir yakıt ihtiyacı duymadan işletilebilen LNG makineler kullanılmaktadır (Wartsila, 2021; MAN, 2022).

### 3.2. Amonyakın yakıt olarak gemi makinelerinde kullanılması

Günümüzde üretilen amonyakların çoğu fosil yakıt tabanlı hidrokarbonlardan üretilmektedir. Fosil yakıt tabanlı hidrokarbon dağılımında en yüksek payı %68 ile doğalgaz oluştururken, kalan kısmını %28 kömür ve %4 ham petrol olacak şekilde paylaşmaktadır. Amonyak farklı şekilde üretebilmekte fakat 2030 ile 2050 yıllarındaki sera gazları ve karbonsuzlaşma hedeflerini karşılama amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen yeşil amonyak daha ön plana çıkmaktadır. Küresel amonyağın %31'i Çin'de, %10'u Rusya'da, %8.9'u ABD'de ve %7.9'u Hindistan'da üretilmektedir. Bir asırdan fazladır en yaygın şekilde taşınan dökme yüklerden biri olan amonyak genellikle gübre olarak tarım alanında ve çeşitli kimyasal uygulamalarda kullanılmaktadır (Valera-Medina vd., 2018; DNV, 2022).

Depolama, taşıma ve dağıtım açısından diğer alternatif yakıtlara üstünlükleri bulunan amonyak, temiz alternatif yakıtların başında gelen hidrojenin yakıt olarak kullanılacağı sistemlerde önemli bir depolama kaynağı olarak kullanılabilir. Özellikle düşük basınçlarda sıvı formda bulunması ve içinde yüksek miktarda hidrojen bulunması, hidrojenin depolanma engelini ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca, düşük üretim maliyetleri ve yüksek enerji yoğunlukları bu yakıtları ön plana çıkarmaktadır (DNV, 2022; Valera-Medina vd, 2018). Amonyak renksiz bir gaz olmasına karşın, keskin ve boğucu bir kokuya sahip olması, toksik ve aşındırıcı özelliklerinin bulunması ve denizcilikte yakıt olarak kullanılması açısından fazla bir deneyime sahip olunmaması bu yakıtın kullanımındaki en büyük engelleri oluşturmaktadır (Cinti, 2014; Valera-Medina vd., 2018; DNV, 2022).

Amonyak yakıt olarak kazanlarda, türbinlerde, içten yanmalı makinelerde, yakıt pili sistemlerinde doğrudan ve dolaylı olarak kullanım potansiyeline sahip bir yapıdadır (Cinti, 2014). İlk aşamalarda daha çok geleneksel yakıtlarla birlikte karıştırılıp kullanılmakta; bu sayede yüksek basınç ve tutuşma sıcaklıkları gibi dezavantajlarının kolayca üstesinden gelinmektedir. Bu alanda yapılan uygulamalara göre %95'e kadar geleneksel yakıtlarla elde edilen karışımlarda makineler üzerinde başarılı çalışmalar ve veri seti elde edilmektedir (Dimitriou ve Javaid, 2020).

2024 yılının başlarında 2 stroklu amonyak yakıtla işletilecek makine üretimi planlanırken aynı zamanda gelecek yıllarda hali hazırda geleneksel yakıtlarla işletilen makineler üzerinde yapılacak işletmelerle birlikte amonyak kullanıma hazır hale getirilecektir (MAN, 2022). Amonyakın yakıt olarak kullanılması özellikle karbonsuzlaşma hedeflerini karşılamada önemli bir atılım olmasına karşın, yanma sonucu oluşacak NO<sub>x</sub> ve yanmamış amonyakların indirgenmesi üzerinde ek çalışmaların yapılması gerekmektedir (Dimitriou ve Javaid, 2020).

### 3.3. Hidrojenin yakıt olarak gemi makinelerinde kullanılması

Hidrojen yakıt olarak, gemi sahipleri ve gemi işletmecileri için hem CO, HC ve CO<sub>2</sub> içermeyen hem de uluslararası emisyon limitleri karşılayan içten yanmalı makinelerde yakıt pillerinde kullanımı sağlayan alternatif temiz bir yakıttır. Hidrojen üretim şekilleri elde edilen emisyon miktarlarına göre 4 farklı şekilde incelenmektedir. Kömürden üretim kahverengi; fosil yakıtlarda ve doğalgazdan üretim gri; karbon indirgeme stratejileri gri üretim yöntemine uygulanırsa mavi; güneş, rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından üretim gerçekleşirse yeşil olarak tanımlanmaktadır. Hidrojen elde etmede en büyük payı %75 ile gri hidrojen üretim metodu oluşturmakla birlikte, mavi ve yeşil hidrojen üretim metodlarının yüzdesi sırasıyla %23 ve %2'dir (Lamas, 2015; ABS, 2022).

Elektrik yükleri ve diğer potansiyel kıvılcım oluşturuç etmenler, hidrojenin yakıt olarak kullanılması sürecinde dikkate alınmalı ve bu konudaki belirlenmiş standartların takip edilmesi büyük olumsuzluklara sebep olmaması adına zorunluluk oluşturmaktadır. Özellikle sistem dizaynı sırasında tüm olasılıklar ve potansiyel tehlikeler göz önünde bulundurulmalı; havalandırma sistemleri ile birlikte yakıt tedarik hattının sürekli temizlenmesi gerekmektedir. Hidrojen yakıt olarak kullanıldığında karbon ve sülfür oluşumunu neredeyse tamamen ortadan kaldırmasının yanısıra, havadan daha hafif olduğu için herhangi bir sızıntı durumunda kirliliğe neden olmamaktadır. Özellikle, çok çeşitli kaynakları ve farklı üretim tekniklerinin hidrojen yakıtlar üzerinde kullanılmasıyla ileride artan talebi karşılama önemli bir potansiyel olacaktır (ABS, 2022).

İçten yanmalı makinelerde hidrojenin yakıt olarak kullanılması sonucu NO<sub>x</sub> oluşumu gözlenmesine rağmen, yakıt pillerinde kullanımında sadece su buharı oluşmakta, bu anlamda partikül maddeler, zararlı ve sera etkisi oluşturan gazlarının emisyonları sıfırlanmaktadır. Krijonejik sıcaklıklarda ve kapalı alanlarda depolanması çeşitli önlemlerin alınması gerektirmekte bu durumlar ek maliyet oluşturmaktadır. Ayrıca alternatif yakıtlara yeni yeni geçişlerin olduğu bu dönemlerde yakıtların kullanımı ile deneyim az olması, birim başına üretim maliyetlerin yüksek olması, düşük yoğunluk değeri ve dizel yakıtta %47, hidrojen yakıtta yaklaşık olarak %30 olan termal verimlilik, depolama ve güvenlik problemleri bu yakıt üzerindeki başlıca engelleri oluşturmaktadır. Özellikle düşük yoğunluk dizel yakıt tanklarının neredeyse iki katında daha fazla depolama alanına ihtiyaç duyulmasını sağlamak ve bu durum geminin kargo kapasitesini yani işletilmesi durumunda elde edilecek kar miktarını azaltmaktadır (Lamas, 2015; Seddiek vd., 2015; ABS, 2022).

RO/RO gemisinin sahip olduğu ana makinede hidrojen yakıtın kullanılması temel alınarak gerçekleştirilen analize göre daha düşük termal verimliliğin yanında, daha düşük MEP (ortalama efektif basınç) ve yakıt tüketim değerleri elde edilmektedir (Seddiek vd., 2015). 2021 yılının son çeyreğinde dünyanın ilk yakıt pili ile işletilen katamaran yolcu gemisi denize indirilmiştir. Yaklaşık 22 metre uzunluğundaki bu teknede yakıt pili olarak PEM tipi yakıt pilleri kullanılmaktadır. 2 gün boyunca sürekli işletilmeyi ve yüksek yükleri karşılama amaçlı 100kWh enerjiye sahip bataryalarla donatılmıştır. "Hydroville" adlı gemi 2017 yılında çift yakıtla sevk edilen makine ile donatılmış ve hidrojen-dizel yakıt ile işletilebilmektedir. Emisyonları elemine etmek amaçlı SCR sistemi kullanılmakta bu sayede gelecek hedeflerini karşılama önemli bir adım atılmaktadır. Daha uzun menzilli operasyonlar gerçekleştirmek amacıyla, hidrojenin depolanması için gerekli olan tank kapasitesi en çok üzerinde çalışması gereken noktaların başında gelmektedir.

2021 yılında denize indirilen "Hyro Bingo" adlı gemi 441kW güce sahip çift yakıtla sevk edilebilen iki adet ana makinesiyle 23 kn hızlara ulaşabilmesinin yanı sıra tam yüklü halinde 80 yolcu taşıma kapasitesine sahiptir. Hidrojen/dizel yakıt kombinasyonunda 120 km menzile sahip olmasının yanı sıra sadece dizel yakıtla 780 km menzile ulaşabilmektedir. Yüzer rüzgâr türbinlerine servis sağlayan Hydrocat toplamda 1498 kW güç çıkışı sağlayan CPP pervane sistemine sahip, 30 knots servis hızlarına ulaşan bununla birlikte 12.8 ton itme gücüne ve 25 metre uzunluğa sahiptir. "Hydrotug" ise dünyanın ilk hidrojen yakıtla sevk edilecek römorkörü olma özelliği taşıyacak ve Antwerp limanında hizmette bulunacaktır. Bu römorkörde 405.5 kg hidrojen depolama kapasitesinin yanında 2000 kW güç çıkışı sağlayan orta devirli çift yakıtla sevk edilebilen ana makinelere sahip olmaktadır. Ek olarak SCR ve partikül maddeler için filtre sistemi kurulmakta bu sayede uluslararası hedefleri karşılanmaktadır (Windcatworkboats, 2022; CMBTECH, 2022).

### 3.4. Metanolun yakıt olarak gemi makinelerinde kullanılması

Emniyetli yapısı, kurulu üretim ağı ve ekonomik oluşunun yanında üretim ve kullanım aşamasında oldukça düşük miktarlarda oluşan kükürt emisyonu; uluslararası sınırlamalarını karşılamada, metanolün gemi makinelerinde yakıt olarak kullanım potansiyelini artırmaktadır (Wang vd., 2020; Fridell vd., 2021). Düşük enerji yoğunluğu ve bu amaçla geleneksel yakıtlara göre daha fazla yer kaplaması kargo kapasitesini azaltmakta aynı zamanda ikmal aralıklarını artırmaktadır. Metanol yenilenebilir enerji kaynaklarından üretimi sağlandığında önemli ölçüde zararlı gazlarının emisyonlarını ortadan kaldırmaktadır (Methanex, 2021). Ortam koşullarında sıvı formda olan Metanolün ikmalı ve depolanması var olan sistemlerde küçük değişiklikler yapılarak gerçekleştirilebilmekte ve gaz halindeki yakıtlara kıyaslandığında karmaşık olmayan bir yapıya sahip olmaktadır (MAN, 2022). Yakıt olarak metanol kullanılması diğer bazı alternatif yakıtlar gibi egzoz gazı temizleme işlemlerine tabi tutulmadan oldukça düşük seviyelerde emisyon azalımı sağlamaktadır (Methanex, 2012)

Metanolün 100 yılı aşkı süredir deniz taşımacılığında var olması ve farklı alanlarda kullanılması, bu yakıtın gemi makinelerinde kullanılması önündeki risk faktörlerini karşılamada önemli bir deneyim sağlamaktadır. Ayrıca ağır yakıtlara ve denizcilikte kullanılan gaz yakıtlara göre suda yaşayan organizmalar açısından daha az tehlikeye sahiptir (Methanex, 2021; MAN, 2022) Suda hızlı çözünen ve biyo-bozunur özelliğe sahip, temiz renksiz bir sıvı olan metanol, petrol sızıntısına göre oluşturacağı tahribat oldukça düşük seviyelerdedir (Methanex, 2021).

Metanol genellikle doğalgazdan üretilmesine rağmen yenilenebilir kaynaklardan olan biyo-yakıtlardan, geri kazanılmış karbondioksitten elde edilmektedir. Karbondioksit ve hidrojenin sentezinden elde edilecek yeşil amonyak IMO 2030 ve 2050 hedeflerini karşılamada önemli bir potansiyeldir (Fridell vd., 2021; MAN, 2022). Konteyner gemilerinde, feribotlarda, balıkçı gemilerinde, yolcu gemilerinde ve ayrıca açık deniz uygulamalarında 4 stroklu makinelerde metanol yakıt kullanıma potansiyeline sahiptir (MAN, 2022). 4 stroklu makinelerde metanol yakıtın kullanımı üzerine alt yapı çalışmaları yapılmakta ve geliştirilecek modifikasyonlarla birlikte 2024 yılından sonra dönüşüm uygulamaları başlayacaktır (MAN, 2022). 2022 yılının ortasında ise 4 stroklu çift yakıt konseptli yüksek esnekliğe sahip makine pazarda yerini alması planlanmaktadır (MAN, 2022). Metanol ile ilgili en büyük engelleri yakıt ve enjeksiyon sistemlerindeki değişimler ile, yanma sürecinde geliştirilmesi gereken durumlar oluşturmaktadır (MAN, 2022). 4 stroklu makinelerden 2430 kW güç kışı sağlayan, 750 rpm devre sahip ve silindir çapı daha büyük olanlar üzerinde yapılan sayısal analizler temelinde ateşleme zamanında ve hava-yakıt karışımlarında yapılan optimizasyonlar sayesinde metanolün tek başına yakıt olarak kullanılması sonucu "Tier III" limitlerini karşılayacak şekilde sonuçlar elde edilmektedir. Hava-yakıt oranında hava miktarı arttıkça NO<sub>x</sub> emisyonlarında düzenli azalım sağlanırken, CO ve diğer hidro-karbonların değeri λ 2.4 değerinin üstüne çıkınca düzenli olarak artış göstermektedir. Benzer şekilde yanmamış metanol miktarında da yükselme gözlenmektedir (Leng vd., 2022). 2100 rpm devre ve 49 kW çıkış gücüne sahip makinede, düşük devirlerde (800 rpm) ve yüklerde (%10-25) metanolün yakıt olarak kullanılması sonucunda CO<sub>2</sub> emisyonları açısından MGO "marine gas oil" yakıtlara göre oldukça düşük değerlere ulaşılmaktadır. Bu duruma ek olarak 2 ila 3.4 g/kWh arasında değişen NO<sub>x</sub> Tier III sınırlamalarını elde ettikleri 0.3-1.4 g/kWh değişen değerlerle karşılamaktadırlar. Yanma sırasında oluşan, Kükürt ve partikül madde emisyonlarını tamamen ortadan kaldırdıkları için, emisyon kontrol bölgelerinde karşılaştıkları SO<sub>x</sub> ve PM sınırlamalarını da karşılamaktadır (Zincir vd., 2019).

Denizcilik alanında çevresel performansa yönelik çalışma yapmak adına doğalgazdan üretilen metanolün yakıt olarak kullanımı ön plana çıkmaktadır. Özellikle biyo-metanolün yakıt olarak kullanılması küresel ısınmayı azaltma açısından oldukça büyük bir potansiyele sahiptir. Özellikle karbonsuzlaşma çalışmaları göz önünde bulundurulduğunda ileride yenilenebilir enerji kaynaklarından

üretim ön plan çıkmaktadır (Brynnolf vd., 2014).

Çift yakılı gemi makinelerinde yakıt olarak metanol kullanımı vapurlar açısından değerlendirilmektedir. Partikül madde emisyonları açısından LNG yakıtın kullanımına benzer değerler edilirken, NO<sub>x</sub> emisyonları denizcilikte kullanılan gaz yakıtlara göre daha azdır. Genel anlamda değerlendirildiğinde hava kirleticiler ve sera gazları açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. NO<sub>x</sub> ölçümleri MGO ölçümlerine kıyasla daha az olmasına elde edilen değerler 13,3 ila 6,5 g/kWh arasında değişmektedir. Fakat bu değer makine devrine göre yaklaşık olarak %2,0 ila %3,4 arasında değişen Tier III limitlerinin üzerindedir. Bu değerlere ulaşmak için “*after-treatment system*” egzoz aşamasında emisyon azalımı sağlayan sistemlerin kullanılması gerekir (Fridell vd., 2021).

Methanol yakıt dizel yakıtla ortalama %54.1 karıştırılarak farklı yüklemelerde gemi makineleri üzerinde yapılan uygulamada, yanma sonucu oluşan emisyonları azaltmak amacıyla kullanılan dizel oksidasyon katalizörü ile neredeyse CO, HC ve metanol emisyonları ortadan kaldırılmakta, ayrıca CO, HC+NO<sub>x</sub>, PM için birim enerji başına sırasıyla 5, 5.8 ve 0.12 olan China II sınırlamalarını fazlasıyla karşılamakta ve oldukça düşük değerler elde etmektedir. Ayrıca metanolün yanma odasına enjeksiyon edilmesi sonucu artan termal verimlilik yakıt tüketiminin azalmasını sağlamaktadır. Buna karşın PM emisyonları konusunda artış meydana gelmektedir (Wang vd., 2020).

Tüm bilgilerin ışığında Tabloda denizcilikte kullanılan ve gelecekte muhtemel kullanılması gereken yakıtların kimyasal formülleri, depolama şekilleri, yoğunlukları, üst ve alt ısı değerleri, enerji yoğunlukları, depolama sıcaklıkları ve basınçları, kendiliğinden tutuşma sıcaklıkları, parlama noktası, kaynama ve donma noktası, oktan değerleri, tutuşma limitleri Tablo 2’de ifade edilmektedir.

**Tablo 2.** Alternatif yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri

	LNG	Amonyak	Hidrojen	Hidrojen	Metanol	Dizel
Kimyasal Formül	CH <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> OH	C <sub>10-15</sub> H <sub>20-28</sub>
Depolama Şekli	Sıvı	Sıvı	Sıkıştırılmış Gaz	Sıvılaştırılmış	Sıvı	Sıvı
Yoğunluk [kg/m <sup>3</sup> ]	420-480	602.8	17.5	71.1	786-796	838.8
Üst ısı değeri [Mj/kg]	55.18	22.5	141.91	140	18.18	38.623
Alt ısı değeri [Mj/kg]	49.40	18.6	119.98	120	15.96	35.73
Enerji Yoğunluğu [Gj/m <sup>3</sup> ]	21-24	13.6	2.101	8.539	11.4	36.403
Depolama sıcaklığı [K]	110.15	298	298	20	298	298
Depolama Basıncı [kPA]	101.3	1030	~24821	102	1030	101.3
Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı [K]	>752	924	844	844	~753	503
Parlama Noktası	85.37	240.15	~20.15	-	284.26-288.75	325.15
Oktan Değeri	>120	110	>130	>130	112	<20
Tutuşma Limitleri (%)	5-15	16-25	4-75	4-75	5.5-36.5	0.6-7.5

**Kaynak:** (EERE, 2001; Engineeringtoolbox, 2003; Mørch vd., 2011; Reiter ve Kong, 2011; Methanol Institute, 2016; Erdemir ve Dinçer, 2021; Elgas, 2022).

Dizel yakıt genellikle kimyasal formülleri (C<sub>10</sub>H<sub>20</sub>–C<sub>15</sub>H<sub>28</sub>) olan alifatik hidrokarbonlardan yaklaşık %75 ve yaklaşık %25 aromatik hidrokarbonlardan oluşmaktadır. Yakıtın kütle oranında karbon %14 oranında hidrojen oluşturmakta ve ham petrol kaynağına bağlı olarak belirli miktar kükürt oluşmaktadır (Huth ve Heilos, 2013). Literatürde de belirtildiği gibi, buna karşın alternatif yakıtlar özellikle kükürt ve karbon açısından önemli miktarda indirgeme sağlamakta ancak özellikle NO<sub>x</sub> emisyonlarındaki

sınırlamaları karşılaması için egzoz sonrası indirgenme sistemlerinin kurulumu önerilmektedir. Birim hacim açısından en yüksek enerji yoğunluğuna geleneksel dizel yakıt sahip olmasına karşın, birim ağırlık açısından en yüksek enerji yoğunluğuna hidrojen yakıt sahiptir. Alternatif yakıtların kendiliğinden tutuşma sıcaklıkları geleneksel yakıtlara göre daha yüksek seviyelerde olması sebebiyle, yanma olayının gerçekleştirmek adına dizel yakıt ile karıştırılmaktadır. Sıvılaştırılmış hidrojen ve LNG kriyojenik sıvılar olduğundan depolanma işlemi çok düşük sıcaklıklara indirgenme ile gerçekleşme, buna karşın etanol ve amonyak ortam koşullarda sıvı formda depolanabilme potansiyeline sahiptir. Bu sayede, kriyojenik durumdan kaynaklı prosedürlere ihtiyaç kalmadan ticarileştirme işlemi tamamlandıktan sonra gemilerde yakıt olarak kullanılabilme potansiyeline sahiptir. LNG yakıt ile amonyakın düşük tutuşma aralıkları herhangi bir yangın olayının gerçekleşme olasılığını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu sayede gemide emniyetli operasyonların uygulanması konusunda şüpheler giderilmektedir.

#### 4. Yöntem

Alternatif yakıtlarla birlikte geleneksel yakıtları kıyaslamak adına, fiziksel ve kimyasal özellikler TOPSIS yönteminde temel alınarak çok kriterli karar verme yöntemi uygulanmaktadır. TOPSIS (Techniques for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemi ilk olarak *Hwang and Yoon (1981)* tarafından çok kriterli karar verme problemlerinin çözümünde kullanılmıştır. Yöntemin teorik çerçevesinde en iyi alternatif, pozitif ideal çözüme en yakın, negatif ideal çözüme ise en uzak olandır. TOPSIS yönteminin uygulama adımları aşağıdaki gibi gösterilmiştir:

**Adım 1:** Karar matrisi 1. Denklem ile normalize edilir:

$$r_{ij} = \frac{w_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^J w_{ij}^2}}, j = 1,2,3, \dots, J, i = 1,2,3, \dots, n \quad (1)$$

**Adım 2:** Her bir alternatifin pozitif ideal çözüme (PIS  $d_i^+$ ) ve negative ideal çözüme (NIS  $d_i^-$ ) uzaklığı 2. Denklem ve 3. Denklem ile hesaplanmıştır:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, j = 1,2, \dots, J \quad (2)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1,2, \dots, J \quad (3)$$

**Adım 3:** İkinci adımdan sonra, her bir alternatifin Yakınlık Katsayısı ( $CC_i$ ) 4. Denklem aracılığıyla tespit edilmiştir:

$$CC_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}, i = 1,2, \dots, J \quad (4)$$

**Adım 4:** Alternatiflerin sıralaması Yakınlık Katsayılarının ( $CC_i$ ) karşılaştırılması ile belirlenmiştir.

##### 4.1. Alternatif Yakıtlar Üzerine Çok Kriterli Karar Verme Uygulaması

Literatür kısmında elde edilen alternatif yakıtlardan fiziksel ve kimyasal özelliklerinden ısı değeri, enerji yoğunluğu, depolama sıcaklığı, kendiliğinden tutuşma sıcaklığı, depolama basıncı ve oktan değeri temelinde en iyi alternatifi belirlemek için çok kriterli karar verme yöntemlerinden TOPSIS uygulanmıştır. Çalışma kapsamında alternatifleri sıralamak üzere ele alınan kriterler ağırlıklandırılmaksızın kullanılmıştır. Çalışmada ele alınan kriterler bazında alternatiflere ait değerler literatürden elde edilmiştir (Huth ve Heilos, 2013).

## 4.2. Bulgular

Çalışmada alternatif gemi yakıtları ele alınmış, olumlu ve olumsuz tarafları teknik, ekonomik, çevresel açıdan değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında alternatif yakıtların ısı değeri, enerji yoğunluğu, depolama sıcaklığı, kendiliğinden tutuşma sıcaklığı, depolama basıncı ve oktan değeri gibi teknik özellikleri incelenerek ilgili yakıtların sıralaması yapılmıştır. Yapılan sıralama Tablo 3'te gösterilmiştir.

**Tablo 3.** Alternatif Yakıtların Sıralaması

Alternatif	Si+	Si-	Puan	Derece
LNG	0.6003	0.6282	0.5114	3
Amonyak	0.7762	0.6560	0.4580	5
Hidrojen	1.2447	1.3149	0.5137	2
Hidrojen Sıvı	0.7688	0.7373	0.4895	4
Metanol	0.7985	0.6189	0.4367	6
Dizel	0.6256	0.8658	0.5805	1

Tablo 3'e göre Dizel yakıtın 0.5805 değeri ile ilgili kriterler baz alındığında en iyi seçenek olduğu sonucuna varılmıştır. Derecelendirmede Hidrojen yakıtının 0.5137 değeri ile Dizel yakıtın hemen ardından geldiği görülmektedir. Öte yandan bu çalışma ile Metanol yakıtının ilgili kriterler bazında en zayıf teknik özelliklere sahip olduğu gözler önüne serilmiştir.

## 5. Sonuç ve Tartışma

Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün 2008 yılına göre CO<sub>2</sub> emisyonlarını 2030 yılı itibarıyla %40, sera gazları ve CO<sub>2</sub> emisyonlarını ise 2050 yılı itibarıyla sırasıyla %50 ve %70 oranında azaltmayı hedeflediği bilinmektedir. Bu amaç, Avrupa Birliği'nin de 2030 yılında sera gazlarını 1990 yılına göre %55 oranında azaltma hedefiyle örtüşmektedir. Buna göre denizcilik sektöründe geleneksel yakıtlarla sevk edilen makinelerin hem yanma hem de yanma sonrasında oluşan emisyonlarını önlemek amacıyla yapılacak uygulamalar dışında, gemi sahipleri ve denizcilik işletmelerinin alternatif yakıtlara yöneldiği görülmektedir. Bu yakıtların başlıcalarını LNG, metanol, hidrojen, amonyak gibi yakıtlar oluşturmaktadır, her bir yakıtın kendi içinde diğerlerine göre üstünlükleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, geleceğin denizciliğinde en önemli rekabet sahalarından biri olan dekarbonizasyon kapsamında alternatif yakıt seçenekleri kaynak temelli görüş bağlamında değerlendirilmiştir.

Özellikle hidrojenin kimyasal açıdan karbon atomlarını içermemesi ve yanma sonucu oluşan egzoz ürünlerde herhangi bir indirgenme yöntemi uygulamadan limitleri ve hedefleri sağlaması önemli bir avantaj olarak öne çıkarken, depolama maliyetlerinin ve büyük ölçekli gemilerde kurulum maliyetlerinin fazla olması bu yakıtın kullanım alanını kısıtlamaktadır. Amonyak ise yakıt olarak depolanma açısından önemli kazanımları olmasına rağmen, yanma sonucu oluşan NO<sub>x</sub> indirgenmesi için ekstra çaba harcanması gerekmektedir. LNG'nin gemi makinelerinde yakıt olarak kullanıldığı uygulamalar diğer alternatif yakıtlara göre daha fazla olmasına karşın, yakıt tanklarının gemi içindeki yerleşimi önemli miktarda yük taşıma kapasitesini azaltmaktadır. Metanolün saf yakıt olarak kullanılması çalışmalarının halen devam etmesinin yanı sıra, çeşitli yakıtlarla karışım yapılarak gemi makinelerinde kullanımı da gerçekleştirilmektedir. LNG kullanımında önemli oranlarda bazı emisyonların azalmasına rağmen, PM emisyonlarında artış gözlenmektedir.

Çalışma kapsamında gemi yakıtları üzerine yapılan teknik değerlendirmede dizel yakıtın en iyi seçenek olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan değerlendirmeye göre dizel yakıtı hidrojen ve LNG yakıtları izlemiştir. Bu yakıtlar içerisinde hidrojenin sıfır karbon salınımına sahip olması ve en az diğerleri kadar iyi teknik özelliklere sahip olması geleceğin denizyolu taşımacılığında yaygın olarak kullanılan gemi yakıtı olabilme potansiyelini gözler önüne sermektedir. Hidrojen yakıtının çalışma kapsamında yapılan değerlendirmede çeşitli sorunları olmakla birlikte özellikle hidrojenin üretilmesi konusundaki sıkıntılar tartışmaya açıktır.

Alternatif yakıtlara geçişlerin gündeme geldiği bu dönemde hangi yakıt türünün denizcilik alanında daha fazla uygulanacağı, o yakıtlarla çevre, maliyet ve teknik açıdan gerçekleştirilecek başarılı performanslar belirleyecektir. Bu çalışma özellikle alternatif yakıtlar üzerine çalışacak akademisyenler, sektör paydaşları açısından önemli bir kaynak oluşturmaktadır ve yeni yapılacak çalışmalar ile karşılaştırma yapılma imkânı sağlamaktadır.

## Referanslar

ABS, (2021). Sustainability Whitepaper Hydrogen as Marine Fuel, <https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2021/06/ABS-hydrogen-as-marine-fuel.pdf> [Online] [Erişim 21.03.2022].

ABS, (2022). Hydrogen as Marine Fuel Whitepaper, <https://absinfo.eagle.org/acton/media/16130/hydrogen-as-marine-fuel-whitepaper> [Online] [Erişim 21.02.2022].

Advanced Motor Fuels, (2015). Ammonia, [https://www.iea-amf.org/content/fuel\\_information/ammonia](https://www.iea-amf.org/content/fuel_information/ammonia) [Online] [Erişim 21.03.2022].

Andersson, K., Brynolf, S., Hansson, J., & Grahn, M. (2020). Criteria and Decision Support for A Sustainable Choice of Alternative Marine Fuels. *Sustainability*, 12(9), 3623.

Bahadori, A. (2014). *Natural gas processing: technology and engineering design*. Gulf Professional Publishing.

Bal, Y. (2010). Rekabet Avantajı Yaratmada Kaynak Temelli Yaklaşım Bağlamında İnsan Kaynaklarının Rolü. *Sosyal Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 10(20), 267-278.

Balcombe, P., Brierley, J., Lewis, C., Skatvedt, L., Speirs, J., Hawkes, A., & Staffell, I. (2019). How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies. *Energy conversion and management*, 182, 72-88.

Bouman, E. A., Lindstad, E., Riialand, A. I., & Strømman, A. H. (2017). State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping—A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 408-421.

Brahim, B. T., Wiese, F., & Münster, M. (2019). Pathways to climate-neutral shipping: A Danish case study. *Energy*, 188, 116009.

Brynolf, S., Fridell, E., & Andersson, K. (2014). Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol. *Journal of cleaner production*, 74, 86-95.

Bucak, U., Arslan, T., Demirel, H., & Balın, A. (2021). Analysis of Strategies to Reduce Air Pollution from Vessels: A Case for the Strait of Istanbul. *Journal of ETA Maritime Science*, 9(1), 22-30.



Chakravarthy, Balaji; Doz, Yves (1992), "Strategy Process Research: Focusing on Corporate Self-Renewal", *Strategic Management Journal*, C. 13: 5-14.

Cinti, G., Desideri, U., Penchini, D., & Discepoli, G. (2014). Experimental analysis of SOFC fuelled by ammonia. *Fuel Cells*, 14(2), 221-230.

CMBTECH, (2022). Hydrotug <https://cmb.tech/divisions/marine/hydrotug> [Online] [Erişim 21.03.2022].

Dimitriou, P., & Javaid, R. (2020). A review of ammonia as a compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(11), 7098-7118.

DNV. (2021). LNG as ship fuel, <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/lng-as-marine-fuel/environmental-performance.html> [Online] [Erişim 21.01.2022].

DNV. (2022a). LNG as marine fuel, <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/lng-as-marine-fuel/technologies.html> [Online] [Erişim 21.02.2022].

DNV. (2022b). Ammonia has attracted wide interest as a source of zero emission fuel for shipping, <https://www.dnv.com/Publications/ammonia-as-a-marine-fuel-191385> [Online] [Erişim 21.02.2022].

Elgas. (2022). Energy Content of LNG - Energy Density of LNG, <http://lng.elgas.com.au/energy-content-lng> [Online] [Erişim 21.03.2022].

Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE). (2001). Hydrogenproperties, [https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech\\_validation/pdfs/fcm01r0.pdf](https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm01r0.pdf) [Online] [Erişim 21.03.2022].

Engineeringtoolbox. (2003). Fuels - Higher and Lower Calorific Values [www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d\\_169.html](http://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html) [Online] [Erişim 21.03.2022].

Erdemir, D., & Dincer, I. (2021). A perspective on the use of ammonia as a clean fuel: challenges and solutions. *International Journal of Energy Research*, 45(4), 4827-4834.

Fridell, E., Salberg, H., & Salo, K. (2021). Measurements of Emissions to Air from a Marine Engine Fueled by Methanol. *Journal of Marine Science and Application*, 20(1), 138-143.

Gilbert, P., Walsh, C., Traut, M., Kesime, U., Pazouki, K., & Murphy, A. (2018). Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels. *Journal of Cleaner Production*, 172, 855-866.

Hansson, J., Månsson, S., Brynolf, S., & Grahn, M. (2019). Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders. *Biomass and Bioenergy*, 126, 159-173.

Huth, M., & Heilos, A. (2013). Fuel flexibility in gas turbine systems: impact on burner design and performance. In *Modern Gas Turbine Systems* (pp. 635-684). Woodhead Publishing.

Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981), "Methods for multiple attribute decision making" In *Multiple attribute decision making*, pp. 58-191, Springer, Berlin, Heidelberg., [https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3)

International Labour Organization (ILO). (2022). Diesel Fuel, [https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_lang=en&p\\_card\\_id=1561&p\\_version=2](https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=en&p_card_id=1561&p_version=2) [Online] [Erişim 21.03.2022].

International Labour Organization (ILO). (2022). Diesel Fuel, [https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_lang=en&p\\_card\\_id=1561&p\\_version=2](https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=en&p_card_id=1561&p_version=2) [Online] [Erişim 21.03.2022].

IMO. (2018). "Note by the International Maritime Organization to the UNFCCC Talanoa Dialogue adoption of the initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships and existing IMO activity related to reducing GHG emissions in the shipping sector," London, UK: IMO Publishing.

Karacaoğlu, K. (2006). İşletmelerin rekabet üstünlüğü anlayışlarını etkileyen ögelerin endüstri temelli ve kaynak temelli bakış açısına göre belirlenmesi: Kayseri ilinde bir araştırma. Çukurova Üniversitesi İİBF Dergisi, 10(2), 1-22.

Kesieme, U., Pazouki, K., Murphy, A., & Chrysanthou, A. (2019). Biofuel as an alternative shipping fuel: technological, environmental and economic assessment. Sustainable Energy & Fuels, 3(4), 899-909.

Kim, H., Koo, K. Y., & Joung, T. H. (2020). A study on the necessity of integrated evaluation of alternative marine fuels. Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping, 4(2), 26-31.

Konur, O., Bayraktar, M., Pamik, M., Kuleyin, B., & Nuran, M. (2019). The energy efficiency gap in Turkish maritime transportation. Polish Maritime Research.

Lamas, M. I., Rodríguez, C. G., Telmo, J., & Rodríguez, J. D. (2015). Numerical analysis of emissions from marine engines using alternative fuels. Polish Maritime Research, (4), 48-52.

Leng Leng, X., Deng, Y., He, D., Wei, S., He, Z., Wang, Q., ... & Zhu, S. (2022). A preliminary numerical study on the use of methanol as a Mono-Fuel for a large bore marine engine. Fuel, 310, 122309.

MAN. (2022). Leading experts in dual-fuel solutions, <https://www.man-es.com/marine/products/megi-mega> [Online] [Erişim 21.02.2022].

MAN. (2022). Methanol for the maritime energy transition, <https://www.man-es.com/marine/strategic-expertise/future-fuels/methanol> [Online] [Erişim 21.02.2022].

MAN. (2022). Unlocking ammonia's potential for shipping, <https://www.man-es.com/discover/two-stroke-ammonia-engine> [Online] [Erişim 21.02.2022].

Methanex. (2021). Methanol as a Marine Fuel. [https://www.methanex.com/sites/default/files/methanex\\_brochure\\_marinefuel\\_final2\\_032521.pdf](https://www.methanex.com/sites/default/files/methanex_brochure_marinefuel_final2_032521.pdf). [Online] [Erişim 21.02.2022].

Methanol Institute. (2016). Physical Properties of Pure Methanol. <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2016/06/Physical-Properties-of-Pure-Methanol.pdf> [Online] [Erişim 21.03.2022].

Mokhatab, S., Mak, J. Y., Valappil, J., & Wood, D. A. (2013). Handbook of liquefied natural gas. Gulf Professional Publishing.

Montgomery, Cynthia; Wernerfelt, Birger; Balakrishnan, Srinivasan (1989), "Strategy Content and the Research Process: A Critique and Commentary", Strategic Management Journal, C. 10, S. 2: 189-197.

Mørch, C. S., Bjerre, A., Gøttrup, M. P., Sorenson, S. C., & Schramm, J. (2011). Ammonia/hydrogen mixtures in an SI-engine: Engine performance and analysis of a proposed fuel system. *fuel*, 90(2), 854-864.

Noor, C. M., Noor, M. M., & Mamat, R. (2018). Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review. renewable and sustainable energy reviews, 94, 127-142.

Özdemir, B. & Taşçı, D. (2020). Kaynak Temelli Görüş Ekseninde Örgütsel Kaynakların Rekabet Stratejileri Üzerindeki Etkisi: Türkiye'nin İlk 1000 Büyük Sanayi Kuruluşu'nda Bir Araştırma. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 15(3), 1019-1042.

Rangone, A. (1999). A resource-based approach to strategy analysis in small-medium sized enterprises. *Small business economics*, 12(3), 233-248.

Reiter, A. J., & Kong, S. C. (2011). Combustion and emissions characteristics of compression-ignition engine using dual ammonia-diesel fuel. *Fuel*, 90(1), 87-97.

Ren, J., & Liang, H. (2017). Measuring the sustainability of marine fuels: A fuzzy group multi-criteria decision making approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 54, 12-29.

Ren, J., & Lützen, M. (2017). Selection of sustainable alternative energy source for shipping: Multi-criteria decision making under incomplete information. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 1003-1019.

Roth, (2019). Safety data sheet. [https://www.carlroth.com/downloads/sdb/en/7/SDB\\_7918\\_GB\\_EN.pdf](https://www.carlroth.com/downloads/sdb/en/7/SDB_7918_GB_EN.pdf) [Online] [Erişim 21.03.2022].

Sarvan, F., Arıcı, E. D., Özen, J., Özdemir, B., & İçgen, E. T. (2003). On stratejik yönetim okulu: Biçimleşme okulunun bütünleştirici çerçevesi. *Akdeniz İİ BF Dergisi*, 6, 73-122.

SEA-LNG. (2022). LNG – A FUEL IN TRANSITION, <https://sea-lng.org/reports/sea-lng-2021-22-a-view-from-the-bridge/> [Online] [Erişim 21.02.2022].

Seddiek, I. S., Elgohary, M. M., & Ammar, N. R. (2015). The hydrogen-fuelled internal combustion engines for marine applications with a case study. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, 66(1), 23-38.

The Maritime Executive, (2022). Shipowners Ordered Record Number of LNG-Fueled Vessels in 2021, <https://www.maritime-executive.com/article/shipowners-ordered-record-number-of-lng-fueled-vessels-in-2021> [Online] [Erişim 21.02.2022].

Tran, T. M. T., Yuen, K. F., Li, K. X., Balci, G., & Ma, F. (2020). A theory-driven identification and ranking of the critical success factors of sustainable shipping management. *Journal of Cleaner Production*, 243, 1-14.

Tusiani, M. D., & Shearer, G. (2016). LNG: Fuel for a Changing World—A Nontechnical Guide. PennWell Books, LLC.

Valera-Medina, A., Xiao, H., Owen-Jones, M., David, W. I., & Bowen, P. J. (2018). Ammonia for power. *Progress in Energy and combustion science*, 69, 63-102.

Vejvar, M., Lai, K. H., & Lo, C. K. (2020). A citation network analysis of sustainability development in liner shipping management: a review of the literature and policy implications. *Maritime Policy & Management*, 47(1), 1-26.

Wang, H., Yao, A., Yao, C., Wang, B., Wu, T., & Chen, C. (2020). Investigation to meet China II emission legislation for marine diesel engine with diesel methanol compound combustion technology. *Journal of Environmental Sciences*, 96, 99-108.

Wartsila. (2021). Wärtsilä's LNG experience key to multi-engine order for new Italian ferry, <https://www.wartsila.com/media/news/13-07-2021-wartsila-s-lng-experience-key-to-multi-engine-order-for-new-italian-ferry-2947069> [Online] [Erişim 21.02.2022].

Wexler, P., Anderson, B. D., Gad, S. C., Hakkinen, P. B., Kamrin, M., De Peyster, A., ... & Shugart, L. R. (Eds.). (2005). *Encyclopedia of toxicology* (Vol. 1). Academic Press.

Windcatworkboats, (2022) Hydrocat MK3.5 H2, <https://www.windcatworkboats.com/portfolio/hydrocat-mk3-5-h2/> [Online] [Erişim 21.02.2022].

Wu, X., Zhang, L., & Luo, M. (2020). Discerning sustainability approaches in shipping. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 5169–5184.

Yuen, K. F., Wang, X., Wong, Y. D., & Zhou, Q. (2017). Antecedents and outcomes of sustainable shipping practices: The integration of stakeholder and behavioural theories. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 108, 18-35.

Zincir, B., Deniz, C., & Tunér, M. (2019). Investigation of environmental, operational and economic performance of methanol partially premixed combustion at slow speed operation of a marine engine. *Journal of Cleaner Production*, 235, 1006-1019.

# $\gamma$ Türbülans Geçiş Modelinin Kuvvet Katsayıları ve Geçiş Yer Tahmini Üzerindeki Etkisi

Hediye Atik

Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Atılım Üniversitesi, Ankara, Türkiye

hediye.atik@atilim.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5858-9132

## ÖZET

Bu çalışmada,  $\gamma$  türbülans geçiş modelinin (çapraz akış etkisinin dahil edildiği ve edilmediği versiyonları kullanılarak) 6:1 uzatılmış küresel geometri üzerinde düzensiz çözüm ağı kullanılarak  $6.5 \times 10^6$  Reynolds sayısında ve  $5^\circ$  hücum açısında başarımlı değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.  $\gamma$  türbülans geçiş modelinin performans değerlendirmesi halihazırda mevcut deneysel veri sonuçları kullanılarak yapılmış ve SST  $k-\omega$  türbülans modeli ve en popüler türbülans geçiş modeli olan  $\gamma - Re_\theta$  modeli sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Türbülans geçiş modelinin etkisi aksel kuvvet katsayısı, normal kuvvet katsayısı, yüzey basınç katsayısı ve yüzey sürtünme katsayısı kullanılarak gösterilmiştir. Aksel ve normal kuvvet katsayıları etrafındaki ayrıklaştırmadan kaynaklı belirsizlik bandı üç farklı çözüm ağıyla Grid Convergence Index (GCI) metodu kullanılarak elde edilmiştir.  $\gamma$  türbülans geçiş modeli, kuvvet katsayılarını akışın tamamıyla türbülanslı olması kabulüyle yapılan analizlere göre daha büyük GCI değerleriyle %58 daha az tahmin etmiştir. Söz konusu model yüzey basınç katsayılarında fazla değişiklik yaratmazken, yüzey sürtünme katsayılarında önemli farklılıklar görülmüştür. Akışın tümüyle türbülanslı olduğu kabulü ile yapılan analizlerde gövde üzerinde sürtünme katsayısında önemli değişiklikler görülmezken  $\gamma$  geçiş modeli, geometrinin üst yüzeyinde türbülans geçişine işaret eden önemli farklılıklar yakalamaktadır. Diğer yandan, deneysel sonuçların tersine, analizlerde geometrinin alt yüzeyinde türbülans geçişine dair hiçbir işaret görülmemektedir. Sonuç olarak,  $\gamma$  türbülans geçiş modeli türbülans geçiş bölgesi geometrisini tamamıyla doğru tahmin edememektedir. Bunun yanı sıra,  $\gamma$  türbülans geçiş modelinin,  $\gamma - Re_\theta$  türbülans geçiş modeline göre yüzey çözüm ağı büyüklüğüne daha hassas olduğu tespit edilmiştir. Bu geçiş modelinin bir diğer dezavantajı da çözümleme zamanıdır.  $\gamma$  türbülans geçiş modeli,  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modeline göre daha basit olmasına rağmen, kuvvet katsayılarında daha yavaş iterasyon yakınsama oranına sahip olması sebebiyle hesaplaması yaklaşık 3.8 kat daha fazla zaman almıştır. Çapraz akış etkisinin  $\gamma$  türbülans geçiş modeline dahil edilmesi, geçiş bölge geometrisini, geometrinin üst tarafında genişletse de alt tarafında halen türbülans geçişini oluşturmamaktadır. Bunun yanı sıra modelde kullanılan çapraz akış eklentisi çözümleme zamanını fazla değiştirmemiştir.

**Anahtar kelimeler:** laminar türbülans geçişi,  $\gamma$  geçiş modeli, ayrıklaştırma belirsizliği, grid convergence index, 6: 1 uzatılmış küresel geometri.

**Makale geçmişi:** Geliş 16/06/2022 – Kabul 09/09/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1131963>

# Effect of $\gamma$ Transition Model on Force Coefficients and Transition Location Estimations

Hediye Atik

Department of Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, Atılım University, Ankara, Türkiye

hediye.atik@atilim.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5858-9132

## ABSTRACT

This study aims to evaluate the performance of  $\gamma$  transition model (versions with and without crossflow instability extension) using unstructured mesh on 6:1 prolate spheroid at  $6.5 \times 10^6$  Reynolds number and  $5^\circ$  angle of attack. The performance of  $\gamma$  transition model is evaluated by an available experimental study and compared with the results of SST  $k-\omega$  turbulence model, and  $\gamma - Re_\theta$  transition model, which is the most popular transition model. The effect of transition model is shown with axial force, normal force, surface pressure and surface friction coefficients. The grid convergence index (GCI) study is performed with three different mesh levels for axial and normal force coefficients to find out the discretization uncertainty band around them. The  $\gamma$  transition model estimates force coefficients, approximately 58% less than fully turbulent results with higher GCI values. While transition models do not much change the surface pressure coefficients, the significant differences are seen in the surface friction coefficients. While there are not seen any dramatic changes in surface friction coefficients with fully turbulent analyses, this model captures drastic changes in the surface friction coefficients at the top surface which are sign of the transition locations. On the other hand, there is no sign of any transition phenomenon at the spheroid bottom, contrary to the observations of experimental measurements. Therefore, the  $\gamma$  transition model is not able to estimate the complete transition front geometry correctly. In addition,  $\gamma$  transition model is more sensitive to the surface mesh size with respect to  $\gamma - Re_\theta$  transition model. The solution time is another disadvantage of  $\gamma$  transition model. Even though the model has more simpler than the  $\gamma - Re_\theta$  transition model, the computation time took 3.8 times more, since the iteration convergence rate of force coefficients is slower than the convergence rate of  $\gamma - Re_\theta$  transition model solution. Eventhough including the crossflow extension into  $\gamma$  transition model enlarges the transition region on the top of the geometry, it does not still create transition at the bottom. In addition, crossflow extension does not change the solution time.

**Keywords:** laminar turbulent transition,  $\gamma$  transition model, discretization uncertainty error, grid convergence index, 6:1 prolate spheroid.

**Article history:** Received 16/06/2022 – Accepted 09/09/2022

## 1. Giriş

Türbülanslı akışa geçiş ve laminar akış kararsızlıkları akışkanlar mekaniği alanında çalışılan zorlu problemler arasında bulunmaktadır. Laminar akıştan türbülanslı akışa geçiş, sınır tabaka içerisinde önemli değişiklikler yaratmakta ve bu değişiklikler sürüklenme kuvveti katsayısı gibi aerodinamik ve hidrodinamik parametreleri etkileyerek zamana bağlı değişimlere sebep olmaktadır. Türbülanslı akışa geçişin önemli olduğu birçok mühendislik uygulaması bulunmaktadır. Uzun menzil yolculuk yapan sivil hava araçlarının tasarımında sürüklenme katsayısındaki küçük bir azaltma bile aracın işletim maliyetinde önemli fark yaratmaktadır. Su araçlarının hidrodinamik tasarımlarında da durum benzerdir. Bu sebeple akış geçiş olayının modellenmesi ve hassas tahmini, hava ve su aracı aerodinamik performans tahmininde kritik öneme sahiptir. Sayısal analizlerle yapılan bu tahminler aynı zamanda deneysel metodlarla yapılan tahminleri de etkilemektedir. Büyük boyutlu hava ve su araçlarının testleri test altyapılarının boyutlarından kaynaklı tam ölçekli modelleri ile test edilememektedir. Bu sebeple, küçük ölçekli modellerin akış benzerliğinin oluşturulması ile hidro/aerodinamik katsayılar elde edilirler. Akış benzerliğinin elde edilmesinde araç üzerinde laminar akıştan türbülanslı akışa geçişin olduğu yerlerin tahmin edilmesi önemli olmaktadır. Akış benzerliği, test edilen geometri üzerine farklı yüzey pürüzlülüğü yaratacak geçiş bandları yerleştirilmesi ile akışın beklenen yerde türbülanslı akışa geçmesi ile zorlanmaktadır. Bu sebeple, geçiş bölgesinin tahminindeki belirsizlik eksenel kuvvet katsayısında önemli fark yaratabilecektir.

Laminar akıştan türbülanslı akışa geçiş oldukça karışık bir olaydır çünkü akışta bu olayı tetikleyen birçok bozucu etki bulunmaktadır (Schlichting ve Gersten, 2000; Sengupta, 2012). Türbülanslı akışa geçiş farklı uygulamalarda farklı mekanizmalarla gerçekleştiğinden bu geçiş tahmini oldukça güçtür. Sayısal olarak direkt sayısal simülasyon (İng. direct numerical simulation (DNS)) yöntemi hiçbir türbülans modeli kullanımını gerektirmediğinden bu olayın tahmininde kullanılması için akla gelen ilk yöntemdir. Büyük ölçekli türbülans yapılarının çözümlendiği fakat küçük ölçekli yapıların modellendiği büyük girdap simülasyon (İng. Large eddy simulation (LES)) yöntemi de bu olayın tahmininde kullanılacak metodlar arasındadır. Fakat bu metodta da DNS yönteminde olduğu gibi duvara yakın bölgelerde türbülans modeli kullanımı yerine akış direkt olarak çözülmektedir. Bu sebeple, DNS ve LES metodları birçok pratik problemler için yüksek hesaplama maliyeti sebebiyle kullanılamamaktadır (Wauters ve Degroote, 2018). Bu sebeple, karışık geometriler etrafındaki türbülanslı (veya türbülansa geçişin olduğu) akışlar için kullanılan en genel geçer matematiksel model halen türbülans modeli ile tamamlanmış Reynolds-ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemleridir. RANS yönteminde akışın tümüyle türbülanslı olduğu varsayıldığından bu yöntem ile türbülans geçişinin olduğu Reynolds sayısı ve geçişin ne şekilde olduğu doğru bir şekilde tahmin edilememektedir. Eça ve Hoekstra (2008) RANS yöntemi ile düz plaka üzerindeki basit akışı farklı türbülans modeli ile çözümlenerek modeller arasındaki tahmin farklarını göstermiştir.

Açık kaynaklarda, RANS denklemleri ile birlikte kullanılan birçok geçiş modellerinin çalışıldığı görülmektedir. Bu yöntemlerin değerlendirildiği Pasquale vd. (2009), Boiko vd. (2015), ve Krumbein vd. (2015) tarafından yapılmış inceleme makaleleri bulunmaktadır. Kaynaklar incelendiğinde türbülanslı akışa geçiş tahmini için en çok kullanılan modelin Menter vd. (2006) ve Langtry ve Menter (2009) tarafından geliştirilmiş bölgesel korelasyon geçiş modeli (İng. local correlation transition method (LCTM)) olduğu görülmektedir. Bu makaleler içerisinde örnek olarak Grabe ve Krumbein (2013), Coder ve Maughmer (2014) makaleleri verilebilir.  $\gamma - Re_{\theta}$  geçiş modeli olarak adlandırılan bu modelde türbülans aralıklılık,  $\gamma$  (ing. intermittency) ve türbülans geçiş başlangıç kriter korelasyonu için taşınım denklemleri çözülmektedir (Langtry ve Menter, 2009). Bu model, sınır tabaka ayrılmasından, basınç değişiminden ve serbest akış türbülans yoğunluğundan kaynaklı türbülans geçiş olayının

benzetimlerinde kullanılmak üzere yaygın olarak kullanılan iki-denklemlilik Shear-Stress Transport (SST)  $k - \omega$  modeli (Menter, 1994) ile birleştirilmiştir.  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modeli birçok araştırma ve ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) (İng. computational fluid dynamics (CFD)) yazılımlarına entegre edilerek farklı sınaama durumları ile başarımlı incelenmiştir. Maritime Research Netherlands (MARIN) ve dünya genelinde bulunan birçok farklı organizasyon tarafından doğrulanmış olan REFRESCO (Vaz vd., 2009) yazılımı bu yazılımlar arasındadır. Lopes vd. (2021) üç farklı sınaama modeli ile  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modeli taşınlım denklemleri üzerinde ayrıklaştırma şeması etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışma, geçiş modelinin türbülans modeli ile birlikte kullanıldığında türbülans kinetik enerji ( $k$ ) ve özgün yayılım oranı ( $\omega$ ) için birinci dereceden ayrıklaştırma şemasının kullanılmasının sayısal doğrulukta önemli etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Alman Havacılık Merkezi (DLR) tarafından geliştirilen TAU yazılımı da geçiş tahmini yapabilme kabiliyetine sahiptir ve geçiş tahmini için yazılıma farklı metodlar entegre edilmiştir. Seyfert (2011) ve Seyfert ve Krumbein (2012, 2013), orjinal  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modelini diğer geçiş metodları ile karşılaştırmasını farklı geometri konfigürasyonları ile göstermiştir. Atik (2022),  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modelini 6:1 uzatılmış küremsi sınaama geometrisi kullanarak  $6.5 \times 10^6$  Reynolds sayısında yüzey çözüm ağından kaynaklı çözümlene sonuçlarındaki ayrıklaştırma belirsizlik tahminlerini gerçekleştirerek, modelin türbülans geçiş başarımlını deneysel veri ile karşılaştırmıştır. Çalışmada geometri üzerinde tespit edilen türbülans geçiş bölge geometrisinin deneysel sonuçlarla farklılık gösterdiği, özellikle basınç tarafında türbülans geçişinin yakalanmadığı görülmüştür.

Açık kaynaklarda bulunan bulunan çalışmalar incelendiğinde LCTM konseptinin endüstriyel HAD simülasyonlarında türbülans geçişinin dahil edilmesinde kullanılacak en esnek yöntem olduğu değerlendirilmektedir (Menter vd., 2015). Birçok farklı çalışma grupları,  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modelini değiştirerek modelin kapsamını genişletmiştir (Seyfert ve Krumbein, 2012, Dassler vd. 2012). Coder ve Maughmer (2012), sınır tabaka içerisindeki basınç değişim etkisini dahil etmek amacıyla yeni bir parametre tanımlamıştır. Bu tanımlamayla modelde önemli sadeleştirmeler gerçekleştirmek mümkün olmuştur. Fakat türbülans yoğunluğunun etkisi otomatik olarak dahil edilemediği için model kullanımı sadece dış akış ve özellikle de sabit dış akış türbülans seviyesinin olduğu durumlara sınırlanmıştır. Menter vd. (2015),  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modelinin sadeleştirilmiş versiyonu üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmanın amacı, geçiş modelindeki formülasyon sayısını tek denkleme düşürmek, orjinal  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modelini sadeleştirmek, özel uygulama alanları için ayarlanabilir anlamlı katsayılar kullanmak ve  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modelinin koordinat eksenine göre hareket etmeyen sabit duvar isterini ortadan kaldırmaktır. Bu yeni model, türbülans aralıklılık,  $\gamma$ , parametresi için taşınlım denklemini kullandığı için  $\gamma$  geçiş modeli olarak adlandırılmaktadır. Bu modelde de türbülans geçiş başlangıç kriteri kullanılmakla birlikte bu parametre cebirsel olarak hesaplanmaktadır.  $\gamma$  geçiş modeli SST  $k - \omega$  modeli ile birleştirilmiştir. Menter vd. (2015) çalışmasında, model formülasyonu, modelin kalibrasyonu ve validasyonu için kullanılan farklı akış durumlarındaki düz plaka akış çözümlene sonuçları sunulmuştur. NACA 0021 kesiti, Pratt&Whitney Pak-B düşük basınç türbin dizisi, T106 pal dizini gibi 2-boyutlu geometriler ile 3-boyutlu yüksek hızlı aksenal kompresör geometrileri de sınaama modeli olarak kullanılmıştır. Sınaama modeli ile yapılan sonuçlarda deneysel elde edilen basınç katsayıları kullanılmış, mevcut deneysel verilerle uyumlu sonuçlar elde edildiği raporlanmıştır. Fakat bu çalışmada modelin türbülans geçiş yer tahmin başarımlı deneysel veri ile karşılaştırılarak gösterilmemiştir.

### 1.1. Çalışmanın amacı

Bu çalışmanın amacı, en yaygın kullanılan  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modelinin sadeleştirilmesiyle elde edilerek daha avantajlı olduğu belirtilen  $\gamma$  geçiş modelinin SST  $k - \omega$  modeli ile birlikte kullanarak su ve hava araçları için türbülans geçiş olayı simülasyonlarındaki başarımlının değerlendirilmesidir. Bu



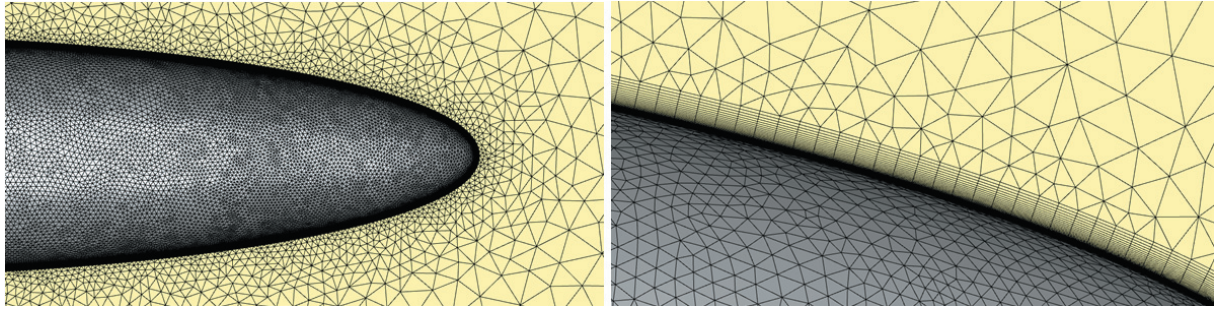
değerlendirme esnasında Atik (2022) çalışmasında kullanılan 6:1 uzatılmış küremsi (İng. spheroid) geometri kullanılmıştır. Bu geometri farklı akış olaylarının çalışılmasında yaygın olarak kullanılan oldukça basit bir geometri olmasının yanı sıra, su ve hava araçlarının gövdesini temsilen kullanılan bir geometridir. Meier vd. (1980), 6:1 küremsi geometri ile türbülans geçişini farklı akış koşullarında düşük hızlı rüzgar tüneline test etmiştir. Bu çalışmada,  $6.5 \times 10^6$  Reynolds sayısında  $5^\circ$  hücum açısında yapılan deneysel sonuçlar kullanılmıştır. Sayısal analizler ile karşılaştırmada kullanılan bu testlerle ilgili ayrıntılı bilgi Bölüm 2.3’de verilmiştir.  $\gamma$  geçiş modelinin avantajları arasında denklem sayısının azaltılarak sadeleştirilmesi belirtildiğinden modelin deneysel veri ile karşılaştırılmasının yanı sıra her iki modelin sonuçları çözümü süreleri açısından da değerlendirilmiştir.  $\gamma$  geçiş modelinin hidro/aerodinamik katsayılar üzerindeki etkisinin gösterilmesi amacıyla akışın tümüyle türbülanslı kabul edildiği ve  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modeli kullanılarak yapılan analizler (Atik, 2022) ile karşılaştırılması da gerçekleştirilmiştir.

Türbülans geçiş modellerinin kullanımı rutin HAD analizlerine göre daha küçük boyutta çözüm ağına ihtiyaç duymaktadır. Tüm HAD uygulamalarında olduğu gibi sayısal analizlerde belirsizlik analizlerinin yapılması hidro/aerodinamik katsayılardaki belirsizliklerin belirlenmesinde büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada model başarımlarının deneysel veri ile karşılaştırılması öncesinde çözüm ağı kaynaklı ayrıklaştırma belirsizliklerinin bulunması amaçlanmıştır. Her iki geçiş modeli için yüzey çözüm ağı etkisinin hidro/aerodinamik katsayılara olan etkisi gösterilmiştir. Ayrıklaştırmadan kaynaklı belirsizlik oranları Grid Convergence Index (GCI) metodu kullanılarak bulunmuştur (Celik v.d., 2008).

## 2. Yöntem

Çalışmada çözüm ağı boyutlarından kaynaklı belirsizliklerin ortaya konulması amacıyla ASME Fluids Engineering Division (Celik v.d., 2008) tarafından önerilen Richardson Extrapolation yöntemine dayalı GCI metodu uygulanmıştır. Bu yöntemde üç farklı eleman sayısına sahip çözüm ağı kullanılması tavsiye edilmiştir. Çözüm ağından kaynaklı farkların anlamlı olarak ortaya konulabilmesi için küçültme oranlarının 1.3 oranından küçük olmaması tavsiye edilmektedir. Çalışmada kullanılan üç çözüm ağının tavsiye edilen küçültme oranından az olmamasına dikkat edilmiştir.

Mühendislik uygulamalarında çoğunlukla karışık geometrilerin kullanılması ve bu sebeple düzensiz çözüm ağlarının tercih edilmesi sebebiyle bu çalışmada düzensiz çözüm ağı kullanılmıştır. Geometri üzerinde üçgen elemanlar kullanılarak üç farklı çözüm ağı, farklı yüzey eleman büyüklükleri ile elde edilmiştir. İlk çözüm ağında (düzey-1) en küçük yüzey eleman büyüklüğü 3 mm olarak kullanılmıştır. Bu büyüklük geometrinin ekseni boyunca yaklaşık olarak 600 elemana karşılık gelmektedir. İkinci çözüm ağında (düzey-2) yüzey eleman büyüklüğü iki kat arttırılmış, benzer şekilde üçüncü çözüm ağı (düzey-3) için eleman büyüklüğü tekrar iki kat arttırılmıştır. Şekil 1’de görüldüğü üzere yüzey üzerinde sınır tabakayı kapsayacak şekilde prizmatik elemanlar kullanılmıştır. Langtry ve Menter (2009) en büyük  $y^+$  değerini 1 civarı, laminar ve türbülanslı akışı doğru yakalayabilmek için duvar üzeri çözüm ağı genişleme oranını 1.1 olarak alınmasını tavsiye etmiştir. Çalışmada bu değerlerin aşılmamasına dikkat edilmiş ve yüzey çözüm ağı büyüklüğü etkisinin ortaya konulabilmesi için tüm üç farklı çözüm ağı için aynı prizmatik elemanlar kullanılmıştır. Çözüm ağı kaynaklı ayrıklaştırma belirsizliklerinin belirlenmesinde kullanılacak çözüm ağlarının özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Bu bilgilere göre düzey-1 ve düzey-2 arasındaki küçültme oranının ( $r_{21}$ ) 1.40 ve düzey-2 ve düzey-3 arasındaki küçültme oranının ( $r_{23}$ ) 1.45 olduğu görülmüştür.



Şekil 1. Yüzey çözüm ağı ve prizmatik elemanlar, düzey – 2 çözüm ağı.

Tablo 1. Kullanılan çözüm ağları ve özellikleri.

Çözüm Ağı	Yüzey Eleman Büyüklüğü (mm)	Prizmatik Ağ (Sınır Tabaka)			Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı
		İlk Eleman Kalınlığı (m)	Genişleme Oranı	Katman Sayısı (Kalınlık)		
Düzyey-1	3	$5 \times 10^{-6}$ ( $y^+ < 0.3$ )	1.1	56 (10.3 mm)	9,480,052	4,467,923
Düzyey-2	6				3,466,306	1,597,635
Düzyey-3	12				1,131,851	506,715

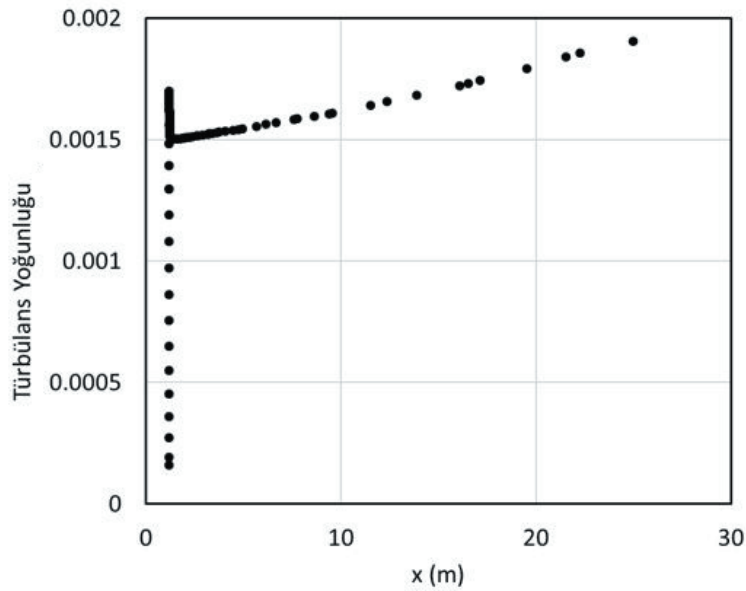
Türbülans geçiş bölgesinin yeri kuvvetli bir şekilde serbest akıştaki türbülans büyüklüklerine bağlıdır. Birçok çalışma (Charnay v.d., 1971, Hancock ve Brashaw, 1983, Meier v.d., 1986) serbest akıştaki türbülansın artmasıyla sınır tabaka kalınlığının ve bölgesel kesme gerilimlerinin arttığını göstermektedir. Meier v.d. (1980), 6:1 küresel model kullanarak benzer Reynolds sayılarında farklı rüzgar tünellerinde testler gerçekleştirmişlerdir. Farklı rüzgar tünellerinde ve farklı test odaları ile yapılan bu testlerde geometri üzerinde farklı türbülans geçiş yerleri elde edilmiştir. Bu sebeple, karşılaştırmada kullanılacak deneysel çalışma için belirtilen türbülans yoğunluğunun analizlerde de benzer şekilde kullanılması karşılaştırmada önemli olmaktadır. Serbest akışta benzer türbülans parametrelerinin elde edilebilmesi için uygun çözümleme hacmi ve sınır koşulları tanımlanmıştır. 6:1 küresel geometri dikdörtgen prizma içerisine yerleştirilmiş, hacmin üst ve alt sınırları geometriden 5 boy öteye yerleştirilmiştir. Giriş ve çıkış sınırları ise geometriden 10 boy uzaklığa yerleştirilmiştir. Sınır koşulu olarak türbülans yoğunluğu % 0.2 ve türbülans viskozite oranı 50 kullanılarak 6: 1 küresel yapının burnunda % 0.15 türbülans yoğunluğu elde edilmiştir. Böylece deneysel çalışmada (Kreplin v.d., 1980) belirtilen türbülans yoğunluğu aralığının ortalaması burun civarında elde edilmiştir. Şekil 2’de türbülans yoğunluğunun geometri eksenini boyunca giriş sınır yüzeyinden geometrinin burnuna kadar değişimi görülmektedir.

## 2.1. Sayısal yöntem

Bu çalışmada yapılan tüm hesaplamalar sonlu hacim metodu kullanan ANSYS Fluent yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Yazılım karışık geometriler etrafındaki sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akış problemlerini çözmektedir. Fluent yazılımı viskoz olmayan, laminar ve türbülanslı akışları çözebilme kabiliyetine sahiptir. Ayrıca yazılımda laminar-türbülans geçiş tahminleri için  $\gamma$ ,  $\gamma - Re_\theta$  ve  $k-k_l-w$  modelleri bulunmaktadır. Yazılım, basınç veya yoğunluk tabanlı çözücü seçimine izin vermektedir. Bu çalışmada basınç tabanlı birleşik algoritma kullanılmıştır. Basınç için ikinci dereceden ayrıklaştırma metodu seçilirken, momentum, türbülans kinetik enerji, özgül dağılım oranı, aralıklılık ve Reynolds momentum kalınlığı için ikinci derece akış yönünde (İng.upwind) ayrıklaştırma şeması kullanılmıştır.

Parametrelerin değişim ve türevlerinin hesaplanmasında hücreye dayalı en küçük kare (İng. least square cell based) metodu kullanılmıştır. Tüm analizler zamandan bağımsız gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada,  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modelinin laminar-türbülans geçişi konusunda çalışan geniş bir kullanıcı kesimi tarafından kabul görmesi ve birçok araştırma ve ticari yazılımlarda kullanılması sebebiyle bu model ile  $5^\circ$  hücum açısında elde edilen sonuçlar (Atik, 2022)  $\gamma$  geçiş modeli sonuçlarının karşılaştırmasında kullanılmıştır.  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modeli, serbest akış türbülans yoğunluğu, basınç değişimleri ve akış ayrılması olaylarına bağlı oluşan geçiş etkilerini içermektedir. Açık kaynaklarda bu modelin çapraz akış (İng. crossflow) kaynaklı kararsızlığını da dahil eden  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modelinin varyantı olsa da ANSYS Fluent yazılımında bu etki dahil edilmemiştir. Bu sebeple, çalışmada yazılım içerisinde çapraz akış kararsızlığının da dahil edilebildiği  $\gamma$  geçiş modeli de kullanılmıştır. Tüm model katsayılarında herhangi bir değişiklik yapılmamış, Langtry ve Menter (2009) ve Menter v.d. (2015) çalışmalarında belirtilen model katsayıları kullanılmıştır.



**Şekil 2.** Türbülans yoğunluğunun eksen boyunca girişten (sol) buruna (sağ) kadar değişimi.

Süreklilik denklemi için yakınsama kriteri  $10^{-6}$  olarak belirlenmiştir.  $5^\circ$  hücum açısında yapılan  $\gamma - Re_\theta$  ve  $\gamma$  geçiş modeli analizleri için bu kriter elde edilirken en büyük artık değer, türbülans kinetik enerji parametresinde olduğu gözlemlenmiştir. Süreklilik denklemi için artık değer  $10^{-6}$ 'ya düşerken,  $k$  artışının  $10^{-5}$ 'e düştüğü görülmüştür. Tanımlanan yakınsama kriterleri artık değerler için takip edilirken sürükleme ve normal kuvvet katsayılarının yakınsamaları yineleme süresince takip edilmiştir. Analizlerde kullanılan yineleme sayısı (bkz. Tablo 4), katsayılar da yakınsamının elde edilmesi ile belirlenmiştir.

## 2.2. Kullanılan modeller

Türbülans taşınımının çözümünde türbülans modellerini ifade eden bir dizi diferansiyel ve cebirsel denklemler çözülmektedir. Mühendislik uygulamalarında türbülans taşınımı en yaygın olarak Reynolds-ortamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri ile çözülmektedir. Bu çalışmada Shear-Stress Transport (SST)  $k-\omega$  türbülans modeli ile birleştirilmiş  $\gamma$  ve  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modeli sonuçları kullanılmıştır.

SST  $k-\omega$  türbülans modeli, duvar yakınında standart  $k-\omega$  modeli ile sınır tabaka dışındaki serbest akış bölgesinde  $k-\varepsilon$  modelini birleştirerek her iki modelin de avantajını kullanmaktadır. Böylece bu

kombinasyon, kesme tabakası dışındaki türbülans parametrelerinin çözüm üzerindeki güçlü hassasiyetinin önüne geçmektedir. Bunun birlikte, standart  $k-\omega$  türbülans modelindeki viskozite (İng. viscosity) formülasyonu türbülans kesme geriliminin (İng. shear stress) taşınımını da hesaba katmak amacıyla değiştirilmiştir. Sonuç olarak, bu özellikler  $SST k-\omega$  türbülans modelinin farklı akış tipleri için örneğin, ters basınç gradyeninin (İng. adverse pressure gradient) görüldüğü akışlar, kanat kesitleri ve ses geçiş şok dalgaları gibi akışlarda, daha güvenilir ve doğru sonuç vermesini sağlamaktadır.

Türbülans kinetik enerji,  $k$ , ve özgül yayılım oranı,  $\omega$ , için aşağıda verilen kısmi differansiyel denklemler kullanılmaktadır:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \tilde{P}_k - \tilde{D}_k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \alpha \frac{P_k}{\nu_t} + D_\omega + C d_\omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

Bu denklemlerde  $u$  hız vektörünü,  $\rho$  yoğunluğu,  $\mu$  dinamik akışmazlığı,  $\mu_t$  türbülans akışmazlığını,  $\tilde{P}_k$  ve  $\tilde{D}_k$  ise türbülans kinetik enerji denklemindeki orijinal yapım ve yıkım terimlerini aşağıda verildiği üzere ifade etmektedir:

$$\tilde{P}_k = \gamma_{eff} P_k \quad (3)$$

$$\tilde{D}_k = \min(\max(\gamma_{eff}, 0.1), 1.0) D_k \quad (4)$$

$$\gamma_{eff} = \min(\gamma, \gamma_{sep}) \quad (5)$$

$$\gamma_{sep} = \min \left( 2 \max \left( 0, \left( \frac{Re_\nu}{3.235 Re_{\theta c}} \right) - 1 \right) F_{reattach}, 2 \right) F_{\theta t} \quad (6)$$

$$F_{reattach} = \exp \left[ - \left( \frac{R_T}{20} \right)^4 \right] \quad (7)$$

$$Re_\nu = \frac{\rho y^2 S}{\mu} \quad (8)$$

$$R_T = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (9)$$

Bu denklemlerde,  $Re_{\theta c}$  sınır tabaka içerisinde aralıklılığın, ( $\gamma$ ) (İng. intermittency), ilk artmaya başladığı kritik Reynolds sayısını,  $y$  en yakın duvara olan uzaklığı,  $S$  gerilme-oranı büyüklüğünü ve  $F_{\theta t}$  kaynak terimin kullanılmamasını sağlayan birleştirme fonksiyonunu ifade etmektedir.  $C d_\omega$  ise, türbülans yayılım oranı,  $\varepsilon$ , denklemini özgül yayılım oranı,  $\omega$ , denklemine dönüştürülmesiyle oluşmaktadır.  $SST$  modelinin katsayıları  $k-\varepsilon$  model katsayılarının duvara yakın kısımlarda birleştirme fonksiyonu aracılığıyla  $k-\omega$  modeli katsayıları ile entegre edilmesiyle elde edilmektedir. Birleştirme fonksiyonu aşağıdaki denklemlerle tanımlanmıştır:

$$R_y = \frac{\rho y \sqrt{k}}{\mu} \quad (10)$$

$$F_3 = e^{-\left(\frac{R_y}{120}\right)^8} \quad (11)$$

$$F_1 = \max(F_{1\text{ orig}}, F_3) \quad (12)$$

$\gamma - Re_\theta$  geçiş modelindeki taşınım parametreleri aralıklılık ( $\gamma$ ) ve geçişin başlama kriteri olarak kullanılan Reynolds momentum-kalınlık sayısıdır ( $Re_{\theta t}$ ). Aralıklılık parametresi için kullanılan taşınım denklemi aşağıda verildiği gibidir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\gamma) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j \gamma) = P_\gamma - E_\gamma + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\gamma} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right] \quad (13)$$

$P_\gamma$  ve  $E_\gamma$  kaynak terimleri türbülans model değişkenlerine ve deneysel çalışmalarla elde edilmiş korelasyonların değişkenlerine kuvvetli bir şekilde bağlıdır. Bu terimler aşağıda verildiği gibi tanımlanmıştır:

$$P_\gamma = F_{length} c_{a1} \rho S [\gamma F_{onset}]^{0.5} (1 - c_{e1} \gamma) \quad (14)$$

$$E_\gamma = c_{a2} \rho \Gamma \gamma F_{turb} (c_{e2} \gamma - 1) \quad (15)$$

Bu denklemlerde görülen  $F_{length}$  geçiş bölgesinin uzunluğunu belirleyen korelasyon,  $F_{onset}$  ise geçişin başlangıç yeri ve  $\Gamma$  ise girdap (İng. vorticity) büyüklüğüdür.

$\gamma - Re_\theta$  geçiş modelinde kullanılan ikinci taşınım denklemi, Reynolds geçiş momentum kalınlığı sayısı ( $Re_{\theta t}$ ) için aşağıda verildiği şekilde kullanılmaktadır:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{R}e_{\theta t}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j \tilde{R}e_{\theta t}) = P_{\theta t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \sigma_{\theta t} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\gamma} \right) \frac{\partial \tilde{R}e_{\theta t}}{\partial x_j} \right] \quad (16)$$

Denklem 13 ve 16, Denklem 1 ve 2 ile birlikte hız, basınç, türbülans kinetik enerji, türbülans özgül yayılım oranı ve bölgesel geçiş durumlarını tanımlayan  $Re_{\theta t}$  and  $\gamma$  parametreleri için çözülür.  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modeli formülasyonunun ve katsayılarının tamamı Langry ve Menter (2019) çalışmasında verilmiştir.

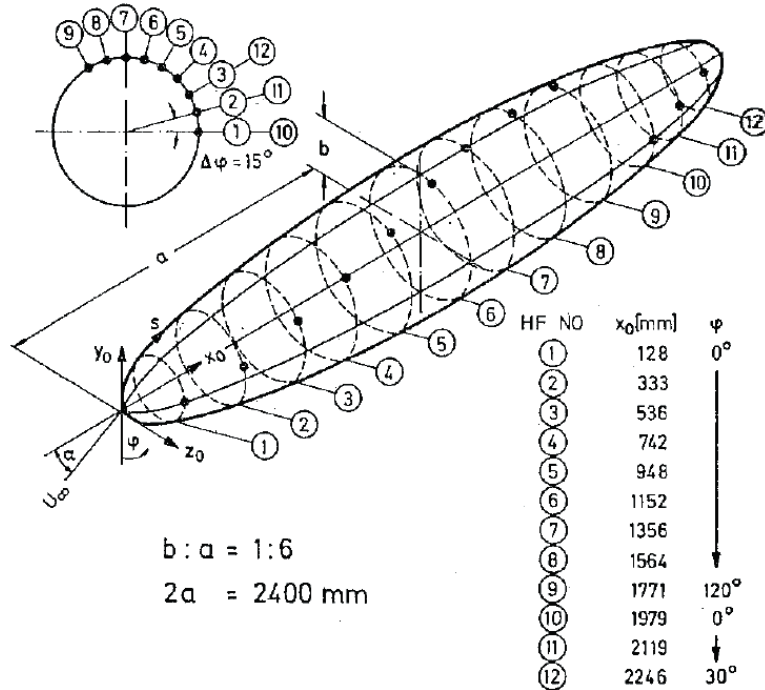
Tek denklemlerli  $\gamma$  geçiş modelinde aralıklılık ( $\gamma$ ) taşınım denklemi Denklem 13'te verildiği şekilde değiştirilmeden kullanılmaktadır. Fakat geçiş kaynak terimi olan  $P_\gamma$  aşağıda görüldüğü üzere değiştirilmiştir:

$$P_\gamma = F_{length} \rho S (1 - \gamma) F_{onset} \quad (17)$$

Diğer kaynak terim olan  $E_\gamma$  aynı şekilde kullanılmıştır. Bu geçiş modelinde temel farklılık geçiş başlangıç yeri ( $F_{onset}$ ) hesabında kullanılan kritik Reynolds sayısının ( $Re_{\theta_c}$ ) taşınım denklemi kullanılmadan cebirsel olarak bölgesel değişkenler ve türbülans kinetik enerji ( $k$ ) parametreleri ile hesaplanmasıdır. Böylece  $Re_{\theta_t}$  için çözülen ikinci taşınım denkleminde gerek kalmamaktadır.  $\gamma$  geçiş modelinde de SST  $k-\omega$  türbülans modeli ile birleştirilmesi  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modelinde olduğu gibi yapılmaktadır. Modelin tüm formülasyonu ve model katsayıları Menter vd. (2015) çalışmasında verilmiştir.

### 2.3. Doğrulamada kullanılan deneysel çalışma

Bu çalışmada, Kreplin v.d. (1985) tarafından 2.4 m boyunda 6:1 uzatılmış küremsi geometri ile laminar-türbülans geçişini incelemek amacıyla yapılan deneysel çalışma sonuçları, sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılmasında kullanılmıştır. Deneysel çalışma Alman Havacılık Merkezi'nde (DLR) bulunan 3m x 3m Düşük Hızlı Rüzgar Tüneli'nde  $1.5 \times 10^6 - 10 \times 10^6$  Reynolds sayısında  $5^\circ$  ila  $60^\circ$  hücum açısı aralığında gerçekleştirilmiştir. Tünel açık test odasına sahiptir ve atmosferik koşullarda çalışmaktadır. Kreplin v.d. (1985) test odası türbülans yoğunluğunun % 0.1 ila % 0.3 aralığında değiştiğini ve bu değer Reynolds sayısına ve test odası içerisindeki yere göre değişim gösterdiğini belirtmişlerdir. Test modeline Şekil 3'te görülen 12 farklı aksenal noktada yüzeye hizalı bir adet sıcak film ölçeri yerleştirilmiştir. Bu aksenal noktalarda modelin  $4^\circ$  veya  $4.8^\circ$  aralıklarla boylamsal ekseninde döndürülmesiyle duvar kesme gerilmeleri (İng. wall shear stresses) ölçülmüştür. Ölçümlerdeki belirsizlik bandı %20 tahmin edilmiş fakat yapılan kalibrasyonlara bağlı olarak ek hatalar olabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmada  $6.5 \times 10^6$  Reynolds sayısında  $5^\circ$  yapılan deney sonuçları türbülans geçiş modellerinin başarımlarını değerlendirme amacıyla kullanılmıştır.



Şekil 3. Sıcak film ölçeri yerleştirilmiş deney modeli (Kreplin v.d., 1985).

Karşılaştırma amacıyla kullanılacak deneysel ölçümler  $-5^\circ$  ila  $185^\circ$  aralığındaki çevresel açılarda  $4^\circ$  veya  $4.8^\circ$  aralıklarla on iki aksenal pozisyonda gerçekleştirilmiş ve sonuçlar tablo halinde sunulmuştur (Kreplin v.d., 1985). Tablolar incelendiğinde her bir aksenal pozisyondaki noktaların birbirine göre farklı çevresel açılarda ve farklı sayılarda olduğu görülmüştür. Ölçüm noktalarının düzensiz olmasının yanı

sıra, sayısal çalışmada düzensiz çözüm ağının kullanılması ve farklı çözüm ağı büyüklüklerinin olması sebebiyle tüm sonuçların birbiriyle aynı noktalarda karşılaştırılabilmesi için sonuçların belli noktalarda interpolasyon metoduyla elde edilmesi gerekmiştir. Sayısal analizlerde elde edilen yüzey parametreleri deneysel sonuçlarda olduğu gibi on iki eksenel pozisyon için ayıklanmıştır. Sonrasında parametreler, tüm eksenel pozisyonlarda 0° ila 180° çevresel açı aralığında 1° aralıkla üçüncü dereceden interpolasyon yöntemiyle hesaplanmıştır. Böylece hem deneysel hem sayısal sonuçlar için 181 x 12 veri seti elde edilmiştir.

### 3. Analiz Sonuçları ve Değerlendirmeler

#### 3.1. Ağdan bağımsızlık analizi

Atik (2022) tarafından  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modelinin incelemesinde kullanılan  $6.5 \times 10^6$  Reynolds sayısı ve  $5^\circ$  hücum açısında elde edilen sonuçlar  $\gamma$  geçiş modeli başarımlı değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Eksenel kuvvet katsayısı için yapılan GCI hesaplamaları Tablo 2’de ve normal kuvvet katsayısı için yapılan hesaplamalar Tablo 3’te sunulmuştur. Tablolarda  $k$ . düzey çözüm ağı için düğüm sayısı  $N_k$ ,  $k$ . düzey çözüm ağı için katsayı değerleri  $\phi_k$  ve çözüm ağı küçültme oranları  $r$  ile görülmektedir.

Farklı çözüm ağları ile elde edilen eksenel kuvvet katsayıları arasındaki farklar incelendiğinde SST  $k-\omega$  türbülans modeli ve  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modeli ile elde edilen sonuçların monotonik yakınsadığı ( $0 < \frac{\epsilon_{21}}{\epsilon_{32}} < 1$ ), fakat  $\gamma$  geçiş modeli ile elde edilen sonuçların monotonik ıraksadığı ( $\frac{\epsilon_{21}}{\epsilon_{32}} > 1$ ) görülmektedir (Phillips ve Roy, 2014). Gerçekleşen hassasiyet derecesi, çapraz akış etkisinin dahil edildiği  $\gamma$  geçiş modeli dışındaki tüm modeller için teorik değer olan 2’den büyük hesaplanmıştır ve bu durum sayısal sonuçların asimptotik davranmadığını göstermektedir. Fakat SST  $k-\omega$  türbülans modeliyle elde edilen tamamıyla türbülanslı akış analizlerinde göreceli hatalar ( $e_a^{21}$  ve  $e_{ext}^{21}$ ) ve GCI değerleri %1’in altında hesaplanmıştır. Bu kadar küçük farklar bu model için ağdan bağımsız sonuçlar elde edildiğini göstermektedir.

SST  $k-\omega$  türbülans modeliyle birlikte geçiş modellerinin kullanılması hata oranlarını ve çözüm etrafındaki belirsizlik bandı oranlarını arttırdığı görülmektedir. En yaygın kullanılan  $\gamma - Re_\theta$  modeli için en küçük yüzey eleman büyüklüğüne sahip düzey-1 çözüm ağı için belirsizlik bandı %5 görülürken düzey-2 çözüm ağı için belirsizlik bandı %12’ye artmaktadır. Tek denklemlili geçiş modeli olan  $\gamma$  geçiş modeliyle elde edilen sonuçlar incelendiğinde düzey-2 çözüm ağı için belirsizlik bandının yine %12 civarı olduğu fakat düzey-1 çözüm ağı ile elde edilen sonuç etrafındaki belirsizlik bandının %54’e arttığı görülmektedir. Üç farklı çözüm ağı ile elde edilen eksenel kuvvet katsayıları incelendiğinde düzey-3 ve düzey-2 çözüm ağları ile elde edilen sonuçların birbirlerine yakın olmalarına rağmen düzey-1 çözüm ağı ile oldukça farklı bir değer elde edilmesi bu sonuca sebep olmaktadır. Düzey-3 ve düzey-2 çözüm ağı ile elde edilen eksenel kuvvet katsayısı tamamıyla türbülanslı akış kabulü ile elde edilen sonuçlara yakın çıkarken düzey-1 ile elde edilen sonucun  $\gamma - Re_\theta$  modeli ile elde edilen sonuca yakın çıktığı görülmektedir. Düzey-1 ve 2 arasındaki büyük fark bu modelin sonuçlarının matematiksel olarak ıraksadığı sonucunu çıkarırsa da yüzey çözüm ağının bir kez daha küçültülerek yapılacak analiz sonuçlarının  $\gamma - Re_\theta$  modeline düzey-1 çözüm ağında olduğu gibi benzeyeceğini düşündürmektedir. İraksama durumu  $\gamma$  geçiş modelinin çalışmada kullanılan üç farklı düzey çözüm ağı ile hesaplanan belirsizlik hesabının sağlıklı olmadığına işaret etmektedir (Stern vd. 2001). Bu durumda yüzey çözüm ağının bir kez daha küçültülerek yakınsama durumunun kontrol edilerek GCI analizleri tekrar edilmesiyle belirsizlik bandlarının tekrar hesaplanması faydalı olacaktır. Fakat kullanılan bilgisayar altyapısının çözüm ağı büyüklüğünün artışı sebebiyle bu çözümleme yapılamamış Celik vd. (2008)

tavsiye ettiği gibi elde edilen sonuçlar olduğu gibi raporlanmıştır. Bunun yanı sıra,  $\gamma$  geçiş modeline çapraz akış etkisinin dahil edilmesiyle belirsizlik bandlarının daha da arttığı görülmektedir.

**Tablo 2.** Eksenel kuvvet katsayısı için GCI analiz sonuçları.

	$SST k-\omega$	$\gamma - Re_\theta$	$\gamma$	$\gamma$ (çapraz akış etkisi dahil)
N1	9,480,052	9,480,052	9,480,052	9,480,052
N2	3,466,306	3,466,306	3,466,306	3,466,306
N3	1,131,851	1,131,851	1,131,851	1,131,851
r21	1.398	1.398	1.398	1.398
r32	1.452	1.452	1.452	1.452
$\emptyset_1$	-7.38E-04	-3.14E-04	-3.67E-04	-4.05E-04
$\emptyset_2$	-7.42E-04	-3.32E-04	-6.35E-04	-6.25E-04
$\emptyset_3$	-7.55E-04	-4.50E-04	-7.54E-04	-7.59E-04
p	3.26	2.74	2.94	1.92
$\emptyset_{ext}^{21}$	-7.36E-04	-3.01E-04	-2.08E-04	-1.60E-04
$e_a^{21}$	0.5%	5.9%	73.1%	54.5%
$e_{ext}^{21}$	0.3%	4.1%	76.8%	152.6%
$GCI_{fine}^{21}$	0.3%	4.9%	54.3%	75.5%
$GCI_{fine}^{32}$	%1.0	%11.6	%11.7	%25.7

Normal kuvvet katsayısı için yapılan GCI hesaplamaları Tablo 3'te verilmiştir. Eksenel kuvvet katsayısında olduğu gibi  $SST k-\omega$  türbülans modeli ve  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modeli ile elde edilen sonuçlar monotonik olarak yakınsamış ve  $\gamma$  geçiş modeli ile elde edilen sonuçlar monotonik iraksamıştır. Gerçekleşen hassasiyet derecesi çapraz akış etkisinin dahil edildiği  $\gamma$  geçiş modeli sonucu dışındakiler için teorik değerden farklı bulunmuştur. Akışın tamamının türbülanslı kabul edildiği  $SST k-\omega$  türbülans modeli ile eksenel kuvvet katsayı değerlerinin etrafındaki belirsizlik bandının eksenel kuvvet katsayısına göre daha büyük bulunurken  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modeli için belirsizlik band değeri küçük bulunmuştur.  $\gamma$  geçiş modeli ile elde edilen normal kuvvet katsayı sonuçlarında da düzey-2 ve düzey-1 sonuçları arasında büyük fark görülmektedir. Sonuçlar,  $\gamma$  geçiş modelinin yüzey çözüm ağı eleman büyüklüğüne oldukça duyarlı olduğunu ve yeteri kadar küçük yüzey çözüm ağı kullanıldığında  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modeli ile elde edilen sonuçlara yaklaşıldığını göstermektedir.

Akışın tamamıyla türbülanslı kabul edildiği  $SST k-\omega$  türbülans modeli ile yapılan analizlerle elde edilen eksenel kuvvet katsayısı kullanılan tüm çözüm ağları ile birbirine yakın elde edilmiş ve düzey-2 ve düzey-1 etrafındaki belirsizlik bandı %1'in altında tahmin edilmiştir. Fakat normal kuvvet katsayı sonuçları incelendiğinde sonuçların çözüm ağı büyüklüğü azaldıkça halen değişim gösterdiği ve düzey-2 ve düzey-1 etrafındaki belirsizlik bandının artarak %10 üzerine çıktığı görülmektedir. Bu sonuçlar çözüm ağı büyüklüğü seçilirken sadece tek katsayı üzerinden değil, ilgilenilen tüm katsayı değişimlerinin gözönünde bulundurulması gerektiğini göstermektedir. Geçiş modelinin dahil edilmesi her iki kuvvet katsayısında önemli değişikliklere sebep olmuştur.  $\gamma - Re_\theta$  modeli ile elde edilen sonuçlar kullanıldığında geçiş modelinin dahil edilmesi kuvvet katsayılarında yaklaşık %58'lik bir azalışa sebep olmuştur.  $\gamma$  geçiş modelinin düzey-1 çözüm ağı ile elde edilen sonuçlarında benzer etki görüle



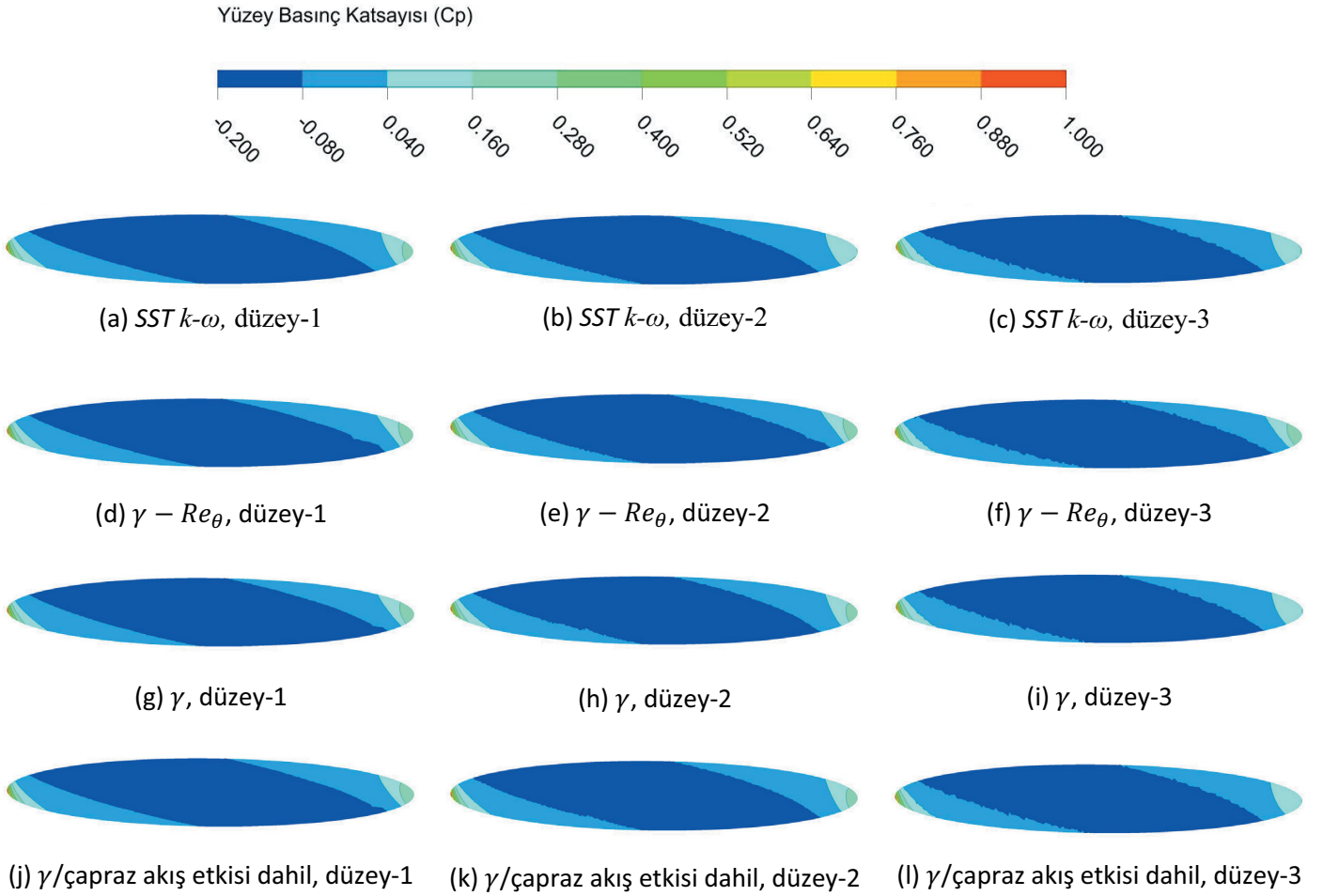
de düzey-2 ve düzey-3 çözüm ağı sonuçlarının SST k- $\omega$  türbülans modeli sonuçlarıyla benzer olması sebebiyle modelin çözüm ağı büyüklüğüne duyarlı olduğuna dikkat edilmelidir.

**Tablo 3.** Normal kuvvet katsayısı için GCI analiz sonuçları.

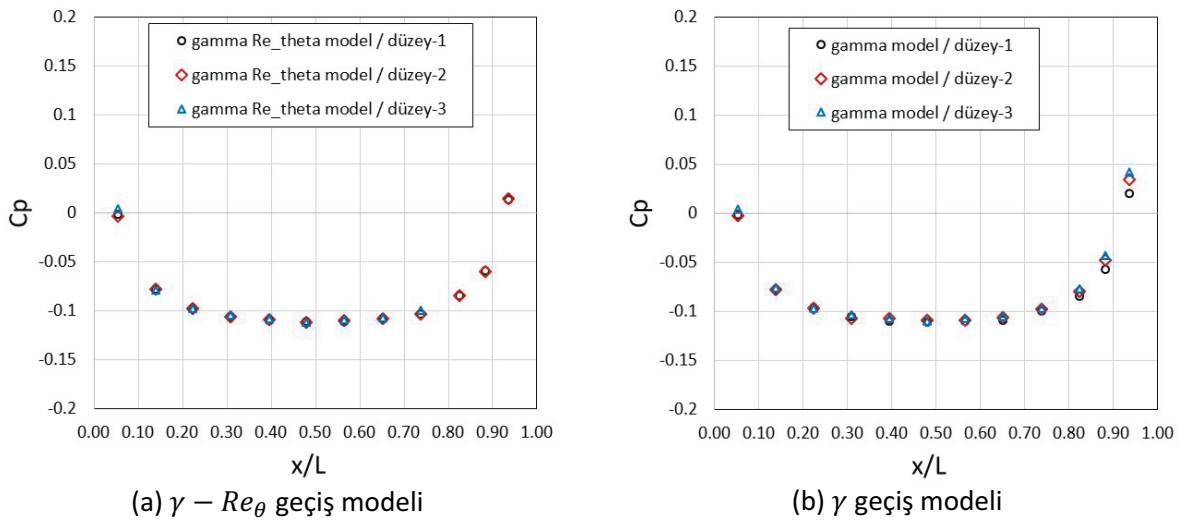
	SST k- $\omega$	$\gamma - Re_\theta$	$\gamma$	$\gamma$ (çapraz akış etkisi dahil)
N1	9,480,052	9,480,052	9,480,052	9,480,052
N2	3,466,306	3,466,306	3,466,306	3,466,306
N3	1,131,851	1,131,851	1,131,851	1,131,851
r21	1.398	1.398	1.398	1.398
r32	1.452	1.452	1.452	1.452
$\phi_1$	-5.151E-04	-2.152E-04	-2.331E-04	-2.579E-04
$\phi_2$	-5.305E-04	-2.176E-04	-5.275E-04	-5.247E-04
$\phi_3$	-5.567E-04	-2.309E-04	-5.729E-04	-5.688E-04
p	1.18	4.57	2.94	1.92
$\phi_{ext}^{21}$	-4.831E-04	-2.146E-04	-2.075E-04	-1.601E-04
$e_a^{21}$	%3.0	%1.1	%73.1	%54.5
$e_{ext}^{21}$	%6.6	%0.3	%76.8	%152.7
$GCI_{fine}^{21}$	%7.8	%0.4	%54.3	%75.5
$GCI_{fine}^{32}$	%11.2	%1.7	%11.7	%25.7

Yüzey basınç katsayı dağılımı tüm çözüm ağları ve modelleri için Şekil 4'te verilmiştir. Basınç dağılımları incelendiğinde görsel olarak dağılımların benzer olduğu görülmektedir. Bu sebeple basınç dağılımlarının karşılaştırılması farklı çevresel açılarda geometri eksenini boyunca grafiksel olarak değerlendirilmiştir. Şekil 5'te uzatılmış küresel geometrinin 90° çevresel açısına denk gelen yan yüzeyi boyunca basınç değişimi  $\gamma - Re_\theta$  ve  $\gamma$  geçiş modelleri için farklı ağ düzeyleri için verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde de basınç dağılımının farklı çözüm ağ büyüklükleri için benzer olduğu görülmektedir.  $\gamma$  modelinin diğer modellere göre geometrinin arka tarafında daha belirgin farklar yarattığı gözlenmektedir.

Tüm modellerin farklı çözüm ağları için yüzey sürtünme katsayı dağılımları Şekil 6'da verilmiştir. Modellerin çözüm ağı eleman büyüklüğüne bağlı sürtünme katsayı dağılımındaki farklılıkları basınç katsayı dağılım farklılıklarına göre daha belirgin olduğu görülmektedir. Geçiş modelinin kullanılmadığı SST k- $\omega$  türbülans modeli ile elde edilen sonuçlarda beklenildiği gibi gövde üzerinde türbülans geçiş bölgesi görülmemektedir.  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modelinin dahil edilmesiyle gövdenin üst tarafında geometri uzunluğunun yaklaşık %50'sinde türbülans geçişinin meydana geldiği görülmektedir. Fakat akışın geldiği basınç tarafına (alt) doğru geçişin arkaya kaydığı hatta tam altta geçişin oluşmadığı gözlemlenmektedir.  $\gamma$  modelinde ise düzey-1 çözüm ağı ile elde edilen sonuçlarda üst taraf geçiş bölgesi geometrinin burnuna daha yakın olsa da gövde çevresinde  $\gamma - Re_\theta$  modelinde olduğu gibi altta türbülans geçişinin olmadığı görülmüştür. Düzey-2 ve düzey-3 çözüm ağları için  $\gamma$  modelinde yüzey üzerindeki türbülans geçiş yerlerinin değiştiği, çözüm ağı büyüdükçe öne doğru kaydığı görülmektedir.  $\gamma$  modeline çapraz akış etkisinin dahil edilmesiyle geçiş yerlerinde farklılık görünse de benzer davranışlar elde edilmiştir.



Şekil 4. Yüzey basınç katsayı dağılımı.

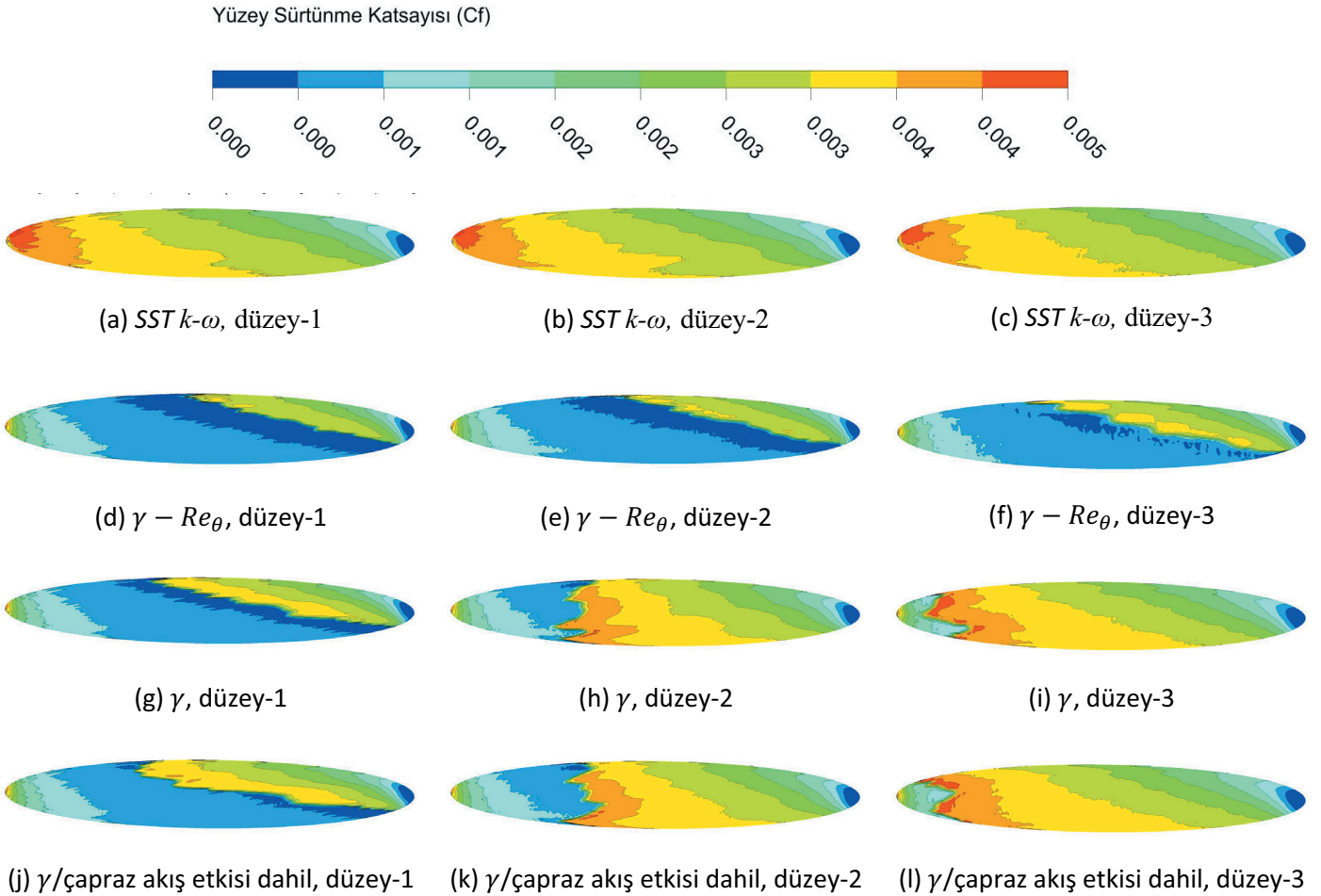


Şekil 5. Geometri eksenı boyunca yüzey basınç katsayı değışimi ( $\phi = 90^\circ$ ).

### 3.2. Laminar-türbülans geçiş yerinin tahmin başarısı

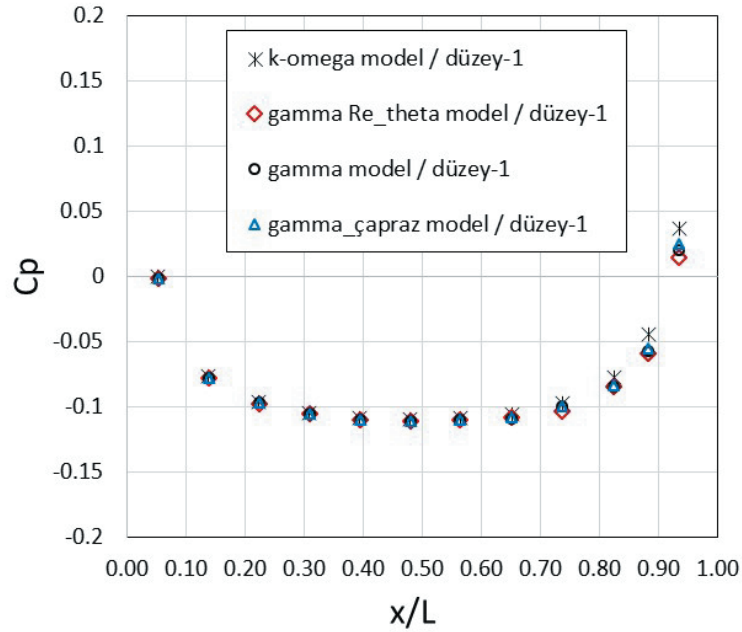
Modellerin çözüm ağı büyüklüğüne göre yüzey basınç katsayılarında önemli fark yaratmadığı görülmüştür. Benzer şekilde modeller arasındaki farklarda çok değişmemektedir. Örnek olması açısından tüm modeller ile elde edilen basınç dağılımları gövdenin yan yüzeyinde düzey-1 çözüm ağı sonuçları ile Şekil 7'de sunulmuştur. Modeller ile elde edilen basınç katsayı dağılımları

karşılaştırıldığında geçiş modellerinin birbirine yakın sonuçlar verdiği, geçiş modeli kullanılmayan SST  $k-\omega$  türbülans modeli çözümünün geometrinin arka tarafında farklılık yarattığı görülmüştür. Fakat yüzey sürtünme katsayılarında bu durum farklı gözlemlenmiştir.



**Şekil 6.** Farklı modeller ve çözüm ağları için yüzey sürtünme katsayı dağılımları.

Deney ve analiz sonuçları Bölüm 2.8’de tarif edilen interpolasyon yöntemiyle işlenerek Şekil 8’de sunulmuştur. Şekil 8(a)’da verilen deneysel sonuçlar incelendiğinde türbülans geçişinin 6:1 küresel geometrinin alt kısmında yaklaşık boyunun %50’sinde meydana geldiği üst tarafa doğru geçiş yerinin geometrinin burnuna doğru biraz yaklaştığı görülmektedir. Şekil 8(b)’de görülüşü üzere SST  $k-\omega$  türbülans modeli akışı tamamiyle türbülanslı kabul etmesi sebebiyle gövde üzerinde türbülans geçişi görülmemektedir.  $\gamma - Re_{\theta}$  geçiş modelinin dahil edilmesiyle geometrinin üst tarafında yaklaşık boyun %50’inde geçiş başlamış ve üstten alta inerken türbülans geçişinin arkaya hareket ettiği ve  $40^\circ$  çevresel açı sonrasında türbülans geçişinin olmadığı görülmektedir (bkz. Şekil 8(c)).  $\gamma$  modelinde de benzer davranış görülse de türbülans geçişinin üst tarafta burna yaklaştığı ve  $30^\circ$  çevresel açı sonrasında türbülans geçişinin oluşmadığı görülmektedir.  $\gamma$  modeline çapraz akış etkisi dahil edildiğinde ise türbülans geçiş bölgesinin özellikle ön tarafa doğru kaydığı görülmektedir. Deneysel veride geçiş bölgesinin çevre boyunca fazla değişmediği gözönüne alındığında çapraz akış etkisinin dahil edilmesiyle geçiş bölgesinin üst tarafta daha büyük bölgede sabit kaldığı bu yönüyle deneysel veriye benzediği söylenilebilir. Tüm gövde üzerindeki davranışa bakıldığında söz konusu türbülans geçiş modelleri deneysel veri ile elde edilen geçiş bölgesi geometrisini elde edememiştir.



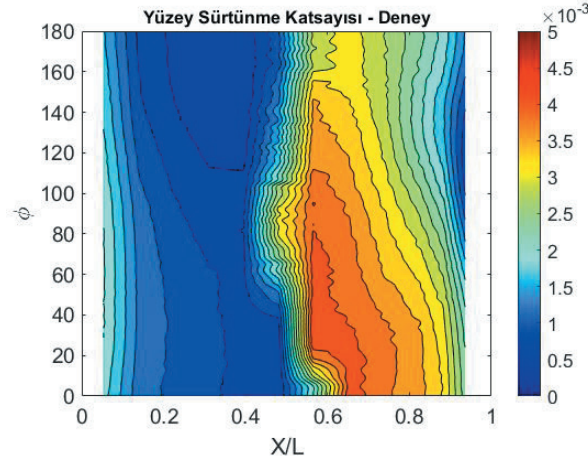
Şekil 7. Farklı modeller için geometri eksenini boyunca basınç katsayısı değişimi ( $\phi = 90^\circ$ )

### 3.3. Analiz zamanları

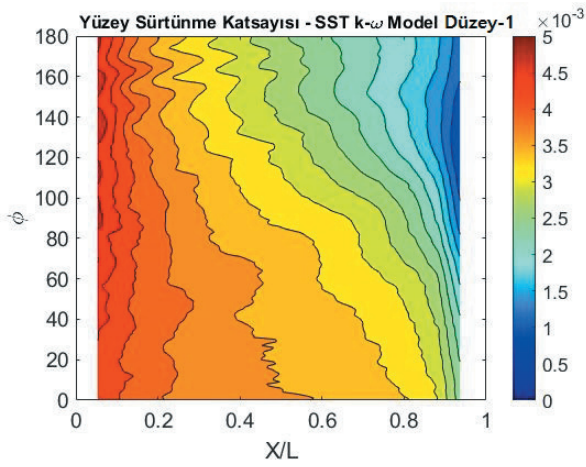
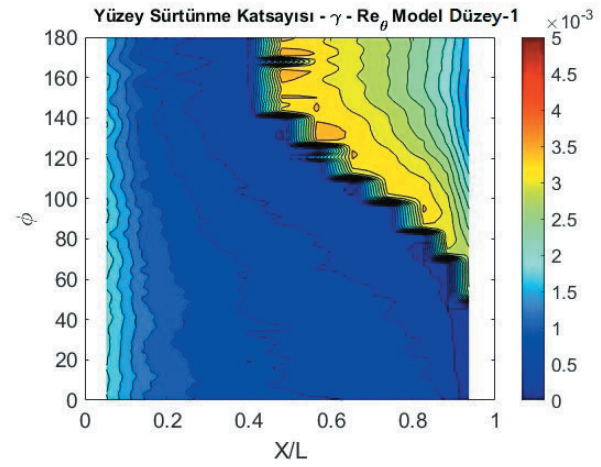
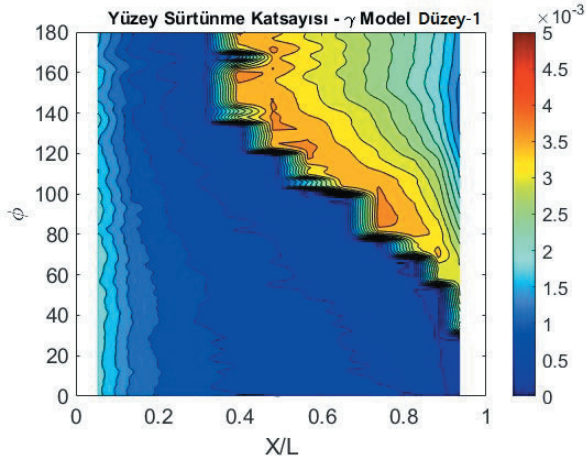
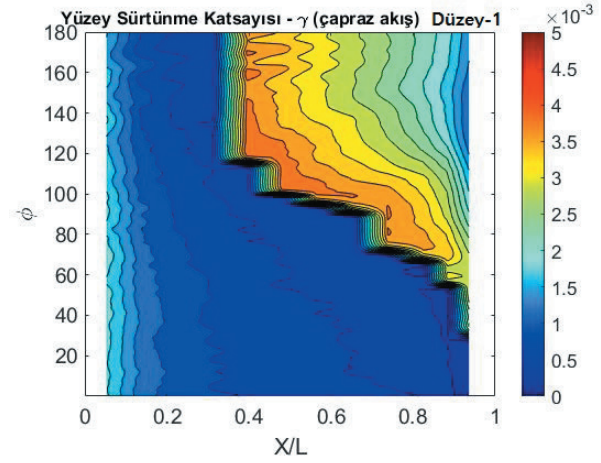
Akışın tamamıyla türbülanslı kabul edildiği SST  $k-\omega$  türbülans modeli ve türbülans geçiş modellerinin dahil edildiği analizler ile elde edilen kuvvet katsayıları incelendiğinde katsayı değerleri arasında önemli fark olduğu görülmektedir. Bu sebeple, türbülans geçişinin olduğu akış durumlarında türbülans geçiş modellerinin dahil edilmesi katsayıların daha hassas bulunmasına sağlayacaktır. Türbülans geçiş modellerinin başarımları incelendiğinde  $\gamma - Re_\theta$ , ve  $\gamma$  modelinin yeteri kadar küçük çözüm ağı elemanı kullanıldığında benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Kullanıcının bu modeller arasında seçim yapmasına yardım edecek diğer bir parametre de çözüm zamanı olacaktır. Menter vd. (2015),  $\gamma$  modelinin geliştirilmesindeki motivasyon sebeplerinden birini geçiş modelindeki formülasyon sayısını tek denkleme düşürmek olarak belirtmiştir. Bu sebeple; geçiş modellerinin başarımları, düzey-1 çözüm ağı ile yapılan analiz çözümleme süreleri açısından da değerlendirilmiştir.

Tüm çözümlerinde Bölüm 2.7’de belirtildiği gibi süreklilik denklemi artığı için yakınsama kriteri  $10^{-6}$  kullanılmıştır. Bu kriterin yanı sıra kuvvet katsayılarının iterasyonlar boyunca takibi gerçekleştirilmiştir. Çözümleme süresince yapılan takiplerde artıklar için istenilen yakınsama kriterine ulaşılmasına rağmen  $\gamma$  modelinde kuvvet katsayılarında yakınsamanın elde edilmediği görülmüştür. Bu sebeple, ön çözümler ile tüm modeller için yakınsamanın gerçekleştiği iterasyon sayısı bulunarak tekrar edilen ikinci analizlerde ise bu iterasyon sayısı için hesaplama zamanı tutulmuştur. 32 çekirdek sayısı ile gerçekleştirilen analizlerde elde edilen toplam analiz süreleri iterasyon sayısı ile birlikte Tablo 4’te sunulmuştur.

Tablo 4’teki sonuçlar incelendiğinde her ne kadar  $\gamma$  modelinde türbülans geçişi tek denkleme ifade ediliyor olsa da katsayı yakınsamasının yavaş olması sebebiyle daha fazla iterasyon sayısına ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. İterasyon sayısı ile orantılı olarak  $\gamma$  modeliyle, 3.8 kat süre artışıyla yakınsamış sonuç elde edilmiştir. Bu modele çapraz akış etkisinin dahil edilmesiyle süreklilik denklemi artık değerinin  $10^{-6}$  mertebesine inmediği görülmüştür. Kuvvet katsayılarındaki yakınsama ise benzer sürelerde elde edilmiştir.



(a) Deneysel veri


 (b) SST  $k-\omega$ 

 (c)  $\gamma - Re_{\theta}$ 

 (d)  $\gamma$ 

 (e)  $\gamma$  / çapraz akış etkisi dahil

Şekil 8. Yüzey sürtünme katsayılarının deneysel veri ile karşılaştırması.

Tablo 4. Geçiş modelleri toplam hesaplama zamanı.

Türbülans geçiş modeli	Yineleme sayısı	Süreklilik denklem artığı	Toplam analiz zamanı (32 çekirdek ile)
$\gamma - Re_{\theta}$	800	2.76E-07	14137.913 s – 3.9 saat
$\gamma$	3000	9.16E-07	53430.468 s – 14. 8 saat
$\gamma$ / çapraz akış dahil	3000	4.19E-05	51117.817 s – 14.2 saat

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada,  $\gamma$  türbülans geçiş modelinin düzensiz çözüm ağı kullanılarak 6:1 küremsi geometri üzerinde başarımlı değerlendirilmesi,  $6.5 \times 10^6$  Reynolds sayısında ve  $5^\circ$  hücum açısında yapılmıştır. Değerlendirmede geçiş modelinin kullanılmadığı SST  $k-\omega$  türbülans modeli, en popüler türbülans geçiş modeli olan  $\gamma - Re_\theta$  modeli ve deneysel elde edilmiş sonuçlar kullanılmıştır. Geçiş modelinin etkisi aksel kuvvet, yanal kuvvet, yüzey basınç ve sürtünme katsayıları kullanılarak gösterilmiştir. Ayrıca, elde edilen kuvvet katsayıları etrafındaki belirsizlik band tahmini GCI metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Geçiş modelinin dahil edilmediği SST  $k-\omega$  türbülans modeli ile elde edilen kuvvet katsayıları incelendiğinde aksel kuvvet katsayısı etrafındaki belirsizlik bandının normal kuvvet katsayısı etrafındaki belirsizlik bandına göre küçük olduğu görülmektedir. Sadece aksel kuvvet katsayısı etrafındaki belirsizlik bandı gözönüne alındığında çalışmada kullanılan en büyük elemana sahip düzey-3 çözüm ağının yeterli olabileceği görülmektedir. Fakat normal kuvvet katsayısı sonuçlarına bakıldığında düzey-3 çözüm ağı ile göreceli daha büyük belirsizlik bandı elde edilmiştir. Bu sebeple çözüm ağı büyüklüğü belirlenirken tek katsayıdan ziyade, ilgilenilen tüm katsayılar özellikle en yüksek doğruluğa ihtiyaç duyulan katsayılarla dikkat edilmelidir.

Türbülans geçiş modellerinin SST  $k-\omega$  türbülans modeli ile birlikte kullanılması çalışmada kullanılan analiz durumu için her iki kuvvet katsayısı değerlerinde %58 azalmaya sebep olmuştur. Bu farkların herhangi bir akışkan içerisinde hareket eden araçların performans tahminlerinde önemli farklar yaratacağı aşikardır. Gövde veya kaldırma yüzeyleri üzerinde oluşan laminar-türbülans geçişi, yüzeyler üzerinde geriye kaydıka sadece türbülans modeliyle elde edilen katsayı tahminlerinde daha büyük farklar olacağı gözönünde bulundurulmalıdır.

Geçiş modellerinin kullanılması yüzey basınç katsayılarında önemli bir değişiklik yaratmamıştır. Fakat yüzey sürtünme katsayısında önemli değişiklikler gözlemlenmiştir. Yüzey sürtünme katsayılarının ani değişimleri türbülans geçişine işaret etmesi sebebiyle yüzey üzerinde geçişin olduğu yerlerde de önemli farklılıklar görülmektedir. Geçiş bölgesi geometrisi, bir başka deyişle gövde üzerindeki türbülans geçiş yerleri hem çözüm ağına hem de modele göre farklılıklar göstermektedir. Fakat  $\gamma$  geçiş modelinin yüzey çözüm ağı büyüklüğüne duyarlılığının  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modeline göre fazla olduğu görülmektedir.  $\gamma$  geçiş modeli kullanıldığı durumda, yüzey çözüm ağı büyüdükçe türbülans geçiş yeri öne doğru kaymaktadır.  $\gamma$  geçiş modelinin  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modelinin sadeleştirilmesiyle elde edilmesi sebebiyle çözümleme süresi açısından avantajlı olacağı beklenirken analizler sonrasında çözümleme süresi açısından herhangi bir kazanım olmamıştır. İterasyonlar sırasında katsayılarıdaki yakınsama hızı  $\gamma - Re_\theta$  geçiş modeline göre oldukça düşük olmuştur.  $\gamma$  geçiş modelinin daha fazla iterasyon sayısına ihtiyaç duyması sebebiyle çözümleme süresi 3.8 kat artmıştır.

Deneysel olarak elde edilen yüzey sürtünme katsayıları ile söz konusu geçiş modelleri kullanılarak elde edilen yüzey sürtünme katsayıları karşılaştırıldığında modellerin 6:1 uzatılmış küremsi geometrinin üst yüzeyindeki türbülans geçiş yerini deneyle benzer bulmakla birlikte alt kısmında geçiş tahmin edemedikleri görülmektedir. Bu farklılık söz konusu geçiş modellerinin halen iyileştirmeye açık olduğunu göstermektedir. Geçiş model kullanıcılarının modelleri kullanmadan önce ilgilendikleri akış durumları için farklı geçiş model sonuçlarını karşılaştırmaları, mümkün olduğunca benzer geometri ve akış durumlarında elde edilmiş deneysel sonuçlarla başarımlarını karşılaştırmaları tavsiye olunur.

## 5. Kaynaklar

Atik, H. (2022). Estimation of Discretization Uncertainty using the  $\gamma$ -Re $\theta$  Transition Model for Transitional Flows on 6:1 Spheroid. *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 144, pp. 11501-1 – 12. DOI: 10.1115/1.4054740

Boiko, A. V., Kirilovskiy, S. V., Maslov, A. A., and Poplavskaya, T. V. (2015). Engineering Modelling of the Laminar-Turbulent Transition: Achievements and Problems (Review). *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, Vol. 56, No. 5, pp. 761–776. DOI: 10.1134/S002189441505003X.

Celik, I.B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H., and Raad, P. E. (2008). Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 130, pp. 078001-1 - 4.

Charnay, G., Comte-Bellot, G., Mathiew, J. (1971). Development of a Turbulent Boundary Layer on a Flat Plate in an External Turbulent Flow. AGARD CP93, Paper No. 27.

Coder, J., Maughmer, M. (2012, January). One-equation transition closure for eddy-viscosity turbulence models in CFD. In 50th AIAA aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition (p. 672).

Coder J.G., Maughmer M.D. (2014). Comparisons of Theoretical Methods for Predicting Airfoil Aerodynamic Characteristics. *Journal of Aircraft*, Vol. 51, No. 1, pp. 183-191. DOI: 10.2514/1.C032232.

Dassler, P., Kozulovic, D., & Fiala, A. (2012). An Approach for Modelling the Roughness-Induced Boundary Layer Transition using Transport Equations. In *Europ. Congress on Comp. Methods in Appl. Sciences and Engineering, ECCOMAS*.

Eca L., Hoekstra M. (2008). The Numerical Friction Line. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 13, No.4, pp. 328-345. DOI: 10.1007/s00773-008-0018-1.

Grabe, C., and Krumbein, A. (2013). Correlation-Based Transition Transport Modeling for Three-Dimensional Aerodynamic Configuration. *J. Aircr.*, 50(5), pp. 1533–1539. DOI: 10.2514/1.C032063.

Hancock, P. E., and Bradshaw, P. (1983). The Effect of Free Stream Turbulence Level in Turbulent Boundary Layers. *Journal of ASME Engineering*, Vol. 105, No. 3, pp. 284-289. DOI: 10.1115/1.3240989.

Kreplin, H. P., Vollmers, H., Meier, H. U. (1985). Wall Shear Stress Measurements on an Inclined Prolate Spheroid in the DFVLR 3m x 3m Low Speed Wind Tunnel, Gottingen. DFVLR-AVA, Report No. IB 222-84 A 33.

Krumbein, A., Krimmelbein, N., Grabe, C., and Shengyang, N., (2015). Development and Application of Transition Prediction Techniques in an Unstructured CFD Code. AIAA 2015-2476, AIAA Aviation 45th AIAA Fluid Dynamics Conference, Dallas, TX, 22-26 June 2015. DOI: 10.2514/6.2015-2476.

Langtry, R. B., and Menter, F. R. (2009). Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes. *AIAA Journal*, Vol. 47, No. 12, pp. 2894–2906. DOI: 10.2514/1.42362.

Lopes, R., Eca, L., Vaz, G., and Kerkvliet, M. (2021). Assessing Numerical Aspects of Transitional Flow Simulations Using the RANS Equations. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol. 135, No. 3, pp. 157-178. DOI: 10.1080/10618562.2020.1870962.

Meier, H. U., and Kreplin, H. P. (1980). Influence on Free-Stream Turbulence on the Boundary Layer Development. *AIAA Journal*, Vol. 18, No. 1, pp. 11-15. DOI:10.2514/3.50724.

Meier, H. U., Michel, U., and Kreplin, H.P. (1986). The Influence of Wind Tunnel Turbulence on the Boundary Layer Transition. DFVLR-AVA, Report No. IB 222-86 A 39.

Menter, F. R, Langtry, R. B., Likki, Y. B., Suzen, Y. B., Huang, P. G. and Volker, S. (2006). A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables: Part I — Model Formulation. *Journal of Turbomachinery*, 128(3), pp. 412-422. DOI: 10.1115/1.2184352.

Menter, F. R. (1994). Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.

Menter, F. R., Smirnov, P. E., Liu, T., Avancha, R. (2015). A One-Equation Local Correlation-Based Transition Model. *Flow, Turbulence and Combustion*, 95(4), 583-619. DOI: 10.1007/s10494-015-9622-4.

Pasquale, D. D., Rona, A., and Garrett, S. J. (2009). A Selective Review of CFD Transition Models. 39th AIAA Fluid Dynamics Conference, San Antonio, Texas, AIAA Paper 2009-3812. DOI: 10.2514/6.2009-3812.

Phillips, T. S., and Roy, C. J. (2014). Richardson Extrapolation-based Discretization Uncertainty Estimation for Computational Fluid Dynamics. *ASME Journal of Fluids Engineering* Vol. 136 No. 12, pp. 21401-1-10. DOI: 10.1115/1.4027353.

Schlichting, H., and Gersten, K., (2000). "Boundary-Layer Theory", 8th ed., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. ISBN: 3540662707

Sengupta, T. K., (2012). "Instabilities of Flows and Transition to Turbulence", CRC Press, Boca Raton. ISBN: 9780429066481.

Seyfert, C. (2011). Application of a Transition Transport Model to Industrially Relevant Aerodynamic Configurations. ODAS 2011 – 11th ONERA-DLR Aerospace Symposium, 8-10 February 2011, Toulouse, France, Conference Proceedings, pp. 1-8.

Seyfert, C., Krumbein, A. (2012, January). Correlation-Based Transition Transport Modeling For Three-Dimensional Aerodynamic Configurations. In 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, p. 448.

Seyfert, C., Krumbein, A. (2012). Evaluation of a Correlation-based Transition Model and Comparison with the  $e^N$ -Method. *Journal of Aircraft*, Vol. 49, No. 6, pp. 1765-1773. DOI: 10.2514/1.C031448.

Seyfert, C., and Krumbein, A. (2013). Comparison of a Local Correlation-Based Transition Model with a  $e^N$ -Method for Transition Prediction. *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics VIII*, Vol. 121, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 541-548. DOI: 10.1007/978-3-642-35680-3\_64.

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

Vaz, G., Jaouen, F., and Hoekstra, M. (2009). Free-Surface Viscous Flow Computations: Validation of URANS Code FreSCo. 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Vol. 43451, 2009, pp. 425–437. DOI: 10.1115/OMAE2009-79398.

Wauters, J., and Degroote, J. (2018). On the Study of Transitional Low-Reynolds Number Flows over Airfoils Operating at High Angles of Attack and Their Prediction Using Transitional Turbulence Models. *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 103, pp. 52–68. DOI: 10.1016/j.paerosci.2018.10.004.



# Venüs'ün Çiçek Sepeti Süngerinden Esinlenerek Tasarlanmış Bir Kafes Sistemin Yapısal Davranışının İncelenmesi

Dinçer Öykünç<sup>1</sup>, M. Erden Yıldızdağ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup>oykunc16@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8415-3378

<sup>2</sup>(sorumlu yazar), yildizdag@itu.edu.tr, 0000-0003-3041-133X

## ÖZET

Bu çalışmada Venüs'ün Çiçek Sepeti adlı deniz süngerinden esinlenilerek tasarlanmış bir kafes yapının mekanik davranışı incelenmiştir. İlk olarak canlının sahip olduğu silindirik iskelet ve iskeleti oluşturan yapısal elemanlar göz önüne alınarak tasarlanan kafes sistemin sonlu elemanlar modeli giriş elemanlar yardımıyla oluşturulmuştur. Tasarlanan yapının mekanik davranışı canlının yaşadığı ortam da göz önüne alınarak burkulma açısından incelenmiştir. Lineer burkulma analizleri yapının hem boyuna hem de çevresel yönde basınca maruz kaldığı kabul edilerek gerçekleştirilmiştir. Belirlenen ön dizayn değerleriyle hesaplanan kritik burkulma yükünü iyileştirmek için Tepki Yüzey Metodolojisi tabanlı bir algoritma ile geometrik parametreler optimize edilmiştir. Yapısal optimizasyon çalışmasıyla hacmin azaltılırken kritik burkulma yükünün arttırılabileceği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Biyomimetik, deniz süngeri, sonlu elemanlar metodu, Venüs'ün Çiçek Sepeti, lineer burkulma

**Makale geçmişi:** Geliş 04/08/2022 – Kabul 28/11/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1156139>

# Investigating Mechanical Behavior of a Lattice Structure Inspired by Venus' Flower Basket

Dinçer Öykünç<sup>1</sup>, M. Erden Yıldızdağ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup>oykunc16@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8415-3378

<sup>2</sup>(corresponding author), yildizdag@itu.edu.tr, 0000-0003-3041-133X

## ABSTRACT

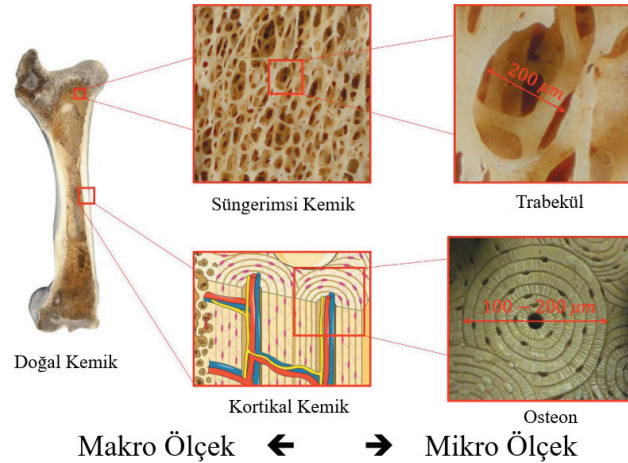
In this study, mechanical behavior of a lattice structure inspired by Venus' Flower Basket, a deep sea sponge, is investigated. To this end, the lattice structure is first designed considering the structural elements constituting the skeleton of the sponge. Then, a finite element model is generated by using beam elements. Critical buckling load of the preliminary design is determined by conducting linear buckling analysis (eigenvalue buckling analysis) assuming the structure is under pressure both in longitudinal and circumferential directions. Next, to improve the critical buckling load of the preliminary design, a surface response optimization-based algorithm is utilized to obtain optimum geometric parameters. It is shown that the critical buckling load can be improved while total volume of the structure is reduced with the adapted optimization algorithm.

**Keywords:** biomimetics, sea sponge, finite element method, Venus' Flower Basket, linear buckling

**Article history:** Received 04/08/2022 – Accepted 28/11/2022

## 1. Giriş

Doğa, insanlık tarihi boyunca örnek alınan bir alandır. Doğadan yararlanılarak aletler ve makineler yapılmakta; çözümün bulunamadığı, tıkanılan noktalarda doğaya başvurulmakta ve doğadan dersler çıkarılarak teknoloji ilerletilmektedir. Doğada bulunan sistemlerin davranışları oldukça ilgi çekicidir. Bu sistemlerin bütünsel davranışları (makro davranış) ihtiva ettikleri alt sistemlerin bir arada görevlerini (mikro davranış) yerine getirmesiyle oluşur. Doğada birçok farklı örneğini gözlemleyebileceğimiz bu yapılar, farklı uzunluk ölçeklerinde kendilerine has karakteristik özellikleri içerisinde barındıran hiyerarşik bir düzene sahiptir. Yapının davranışını, bu hiyerarşik düzeni oluşturan bileşenlerin birbirleriyle olan etkileşimi belirler. İlerleyen teknoloji ile birlikte bu karmaşık yapılar büyük bir ilgi görmektedir ve daha iyi anlaşılabilirlikleri için matematiksel modeller geliştirilmektedir. Geliştirilen matematiksel modeller ile doğal sistemlerin farklı koşullardaki davranışlarını ön görmenin yanında bu sistemlerden esinlenilerek geliştirilecek mühendislik tasarımlarının da daha iyi anlaşılması sağlanmaktadır. Bu matematiksel modeller geliştirilirken dikkat edilmesi gereken husus, hiyerarşik düzenin ön görülmesi zor davranıştır. Bu karmaşık yapılara verilebilecek en güzel örneklerden biri kemiğin yapısıdır. Şekil 1’de bir kemiğin sahip olduğu hiyerarşik düzen gösterilmiştir. Kemik dokunun belli bir etki altındaki tepkisini, farklı uzunluk ölçeğindeki çeşitli mikro yapıların etkileşimi meydana getirmektedir. Kemik yapısı gözlemlenerek ve analiz edilerek birçok alanda kullanılmıştır. Çok ölçekli yapısından yola çıkarak, bio-emilebilir yapay malzemeler üretilmiş ve bu da kemik aşılama işlemlerinde kullanılmıştır. Süngerimsi kemik dokusu göz önüne alınarak alüminyum köpük gibi hafif bir yapı elde edilmiştir (Yıldızdag vd., 2019).



**Şekil 1.** Kemiğin yapısı (Yıldızdag vd., 2019)

Mühendisliğin ana fikri, uygun amaca hizmet verecek optimum yapıyı oluşturmaktır. Bunu mükemmel şekilde başarmak mümkün değildir fakat mükemmel yakın başarmış olan doğal sistemlerin örnek alınması gereklidir. Hiyerarşik düzene sahip doğal sistemler, canlının oluşumundan günümüze kadar uğradığı doğal seçimler, mutasyonlar ve adaptasyonlarla birlikte görevlerini en optimum şekilde yerine getirebilecekleri koşullara evrilmişlerdir (Yıldızdag vd., 2019). Mühendislik dalları; doğayı gözlemleyerek ve örnek alarak, doğal sistemleri analiz ederek ve yapılan analizleri yorumlayarak aradığı optimum koşullara ulaşmaya çalışır. Doğadan ilham alınarak geliştirilen sentetik malzemelere verilebilecek en iyi örneklerden biri Geko kertenkelelerinden esinlenilerek geliştirilmiş eldivenlerdir (Şekil 2). Bu kertenkeleler, tavanda asılı kalabilme ve cam yüzeylerde rahat bir şekilde yürüyebilme özelliklerine sahiptir. Kertenkelenin bu özellikleri, ayaklarının altında bulunan tüylerden dolayıdır. Bu

tüyler kare şeklinde gruplar oluşturmaktadır ve oluşturdukları van der Waals kuvveti ile kertenkelenin yüzeye tutunabilmesini sağlamaktadır. Kertenkeleler ayaklarının açısını değiştirerek de bu kuvvetin dengesini ayarlayabilmektedir (Sevencan, 2020). Bu canlıdan yola çıkarak tasarlanan eldivene ait görsel Şekil 2’de verilmiştir.

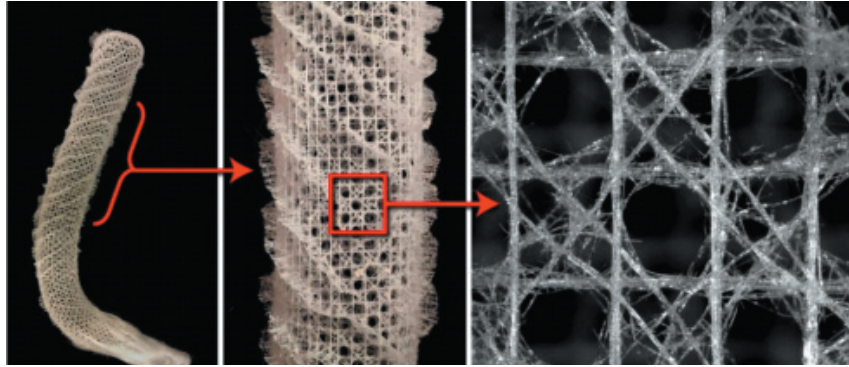


**Şekil 2.** Geko kertenkelesinden esinlenilerek geliştirilmiş eldiven

Doğadan esinlenilerek yeni ürünlerin tasarlanması günümüzde gelişen yeni üretim teknikleriyle birlikte fazlasıyla ilgi gören bir alandır. Biyonik terimi ilk kez 1960’lı yıllarda Jack E. Steele tarafından tanımlanmıştır. Steele biyoniği “doğadan baz alınan ve bazı fonksiyonlara sahip sistem bilimi” olarak belirtmiştir (Reisen vd., 2016). Biyomimetik tanımını ise ilk kez Amerikalı bir mühendis olan Otto Schmitt, yaptığı doktora çalışmasında ortaya çıkarmıştır. Schmitt, biyomimetliği biyoloji ve teknolojinin birleşimi olarak tanımlamıştır (Taşkan vd., 2022). Biyomimetik kelimesinin anlamı Yunancadan gelmektedir. Yunancada “bios (yaşam)” ve “mimesis (taklit etmek)” kelimelerinin birleşiminden oluşan bir terimdir. Farklı yerlerde İngilizce “biomimetics (biyomimetik)” kavramı yerine “biomimicry (biyomimikri)”, “biognosis (biyognoz)” ya da “biologically inspired design (biyolojik olarak ilham alan tasarım)” kavramları da kullanılmaktadır (Reisen vd., 2016). Genel anlamıyla bakılırsa, biyomimetik kavramı doğadan ilham alınarak yapılan çalışmalar için kullanılmaktadır. Bugünkü anlamıyla karşımıza ilk olarak Janine Benyus’un kitabında çıkmaktadır. Benyus biyomimetliği yeni bir bilim dalı olarak tanımlarken bu bilim dalının amacının insanoğlunun sorunlarını çözmeye doğayı örnek alma metodunu kullanmak olduğunu söylemiştir (Sevencan, 2020).

Bu çalışmada Venüs’ün Çiçek Sepeti (*Euplectella Aspergillum*) deniz süngerinden esinlenerek tasarlanmış bir kafes yapının mekanik davranışı sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir. Camsı süngerlerden, Hecactinellida grubuna ait olan Venüs’ün Çiçek Sepeti, diğer süngerlerle karşılaştırıldığında üstün mukavemet özelliklerine sahiptir. Aynı boyutlara sahip, silikadan yapılmış bir çubuk 190 MPa eğilme mukavemeti ve 0.7% uzama gösterirken Venüs’ün Çiçek Sepeti 850 MPa eğilme mukavemeti ve 2.5% uzama göstermektedir (Sarıkaya vd, 2001). Bu canlının iskelet sistemi oldukça karmaşıktır. Simetrik açık ve kapalı boşluklu hücresel bir yapısı vardır (Şekil 3). İskeletinde ince lifler, organik materyalleri oluşturan eş merkezli katmanlı silindirik yapı ve silis seramiği bulunur. Eş merkezli iç içe geçmiş silindirik yapıya spikül (spicule) denilir. Bu yapı amorf silikadan meydana gelmiştir. Bu katmanlar; protein, silikaten, kollajen gibi organik malzemelerden oluşur. Bu katmanlı yapı sayesinde; tokluk, mukavemet ve bükülme gibi mekanik özellikler bakımından sağlamdır. Meydana gelecek çatlama, katmanlı yapı nedeniyle ilerlemez ve bu da Venüs’ün Çiçek Sepeti’ne kırılmama özelliği kazandırır (Tavangarian vd., 2021). Bu tür deniz süngerlerinin sahip oldukları karmaşık iç yapıları sayesinde mekanik özellikleri açısından diğer sünger türlerine göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Sahip oldukları bu özellikler birçok farklı çalışmada irdelenmiş ve yeni mühendislik tasarımlarına ilham

verebileceği belirtilmiştir. Aizenberg vd. (2005) ve Weaver vd. (2007) süngerin sahip olduğu iskeleti ve bileşenlerinin mekanik özelliklerinin detaylı bir şekilde incelendiği ilk çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Moon vd. (2015) süngerin yapısını oluşturan spiküllerin mekanik davranışı için bir giriş modeli geliştirmiştir. Robson Brown vd. (2019) Venüs'ün Çiçek Sepeti'nden esinlenerek dizayn edilip eklemeli imalat teknikleri ile üretilebilecek yeni metalmalzemeleri deneysel ve sayısal olarak inceleyen literatürdeki ilk çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. Fernandes vd. (2021) Venüs'ün Çiçek Sepeti'nden esinlenerek dizayn ettikleri farklı geometrik özelliklere sahip kafes yapıların mekanik davranışını deneysel ve sayısal olarak çalışmışlardır. Morankar vd. (2022) sünger spiküllerinin çekme ve kırılma davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Sharma ve Hiramath (2022) Venüs'ün Çiçek Sepeti'nin sahip olduğu iskeletten faydalanarak dizayn edilebilecek malzemelerin enerji sönümlenme davranışını sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Sharma vd. (2022) Venüs'ün Çiçek Sepeti'nden esinlenerek tasarladıkları iki boyutlu mekanik metalmalzemeleri seçmeli lazer ergitme (SLM) yöntemi ile üretimini ve üretilen malzemelerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Süngerin mekanik davranışının yanında, Falcucci vd. (2021) derin denizlerde yaşadığı için yapının hidrodinamik davranışını sayısal olarak incelemiştir. Fernandes vd. (2021) süngerin davranışını geliştirdikleri bir bağlaık sonlu elemanlar-hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile sayısal olarak incelemiştir.



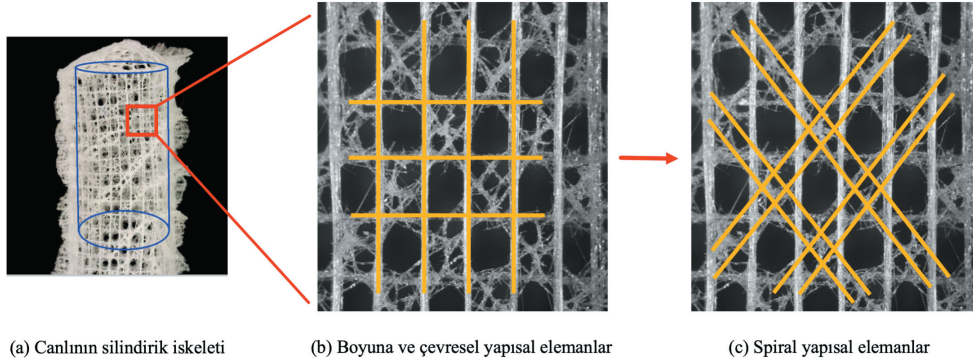
Şekil 3. Venüs'ün Çiçek Sepeti'nin iskeletinin yapısı

Literatürde Venüs'ün Çiçek Sepeti ile ilgili özellikle mekanik davranışının irdelendiği sayısal çalışmalara raslamaktayız fakat bunların bir çoğu yapının basit bir idealizasyonunun ele alındığı veya yapının kısıtlı bir bölgesinin ele alındığı çalışmalardan oluşmaktadır. Ayrıca canlının sahip olduğu yapıdan esinlenerek dizayn edilip üretilen farklı tipte iki boyutlu metalmalzemelerin mekanik davranışının incelendiği çalışmalara da fazlasıyla raslanmaktadır. Bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak süngerin bütün yapısal elemanlarını içerisinde barındıran bir kafes sistem dizayn edilmiş ve kafes sistemin mekanik davranışı burkulma açısından sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir. Tasarlanan yapının mekanik davranışı canlının yaşadığı ortam da göz önüne alınarak burkulma açısından incelenmiştir. Lineer burkulma analizleri yapının hem boyuna hem de çevresel yönde basınca maruz kaldığı kabul edilerek gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, belirlenen ön dizayn değerleriyle hesaplanan kritik burkulma yükünü iyileştirmek için Tepki Yüzey Metodolojisi tabanlı bir algoritma ile geometrik parametreler optimize edilmiştir. Yapısal optimizasyon çalışmasıyla hacmin azaltılırken kritik burkulma yükünün arttırılabileceği gösterilmiştir.

## 2. Biomimetik Tasarım ve Sonlu Elemanlar Modeli

Venüs'ün Çiçek Sepeti Şekil 4'te gösterildiği gibi bir silindire benzetilebilir. Canlıya daha yakından baktığımızda ise bu silindirik iskeleti oluşturan yapısal elemanları (spikülleri) dizilimlerine göre dörde

ayırabiliriz. Bunlardan üç tanesi silindirik iskeletin boyuna ve çevresel yapısal elemanlar ve bu yapısal elemanların kesişimleri boyunca uzanan spiral yapısal elemanlardır (Şekil 4).



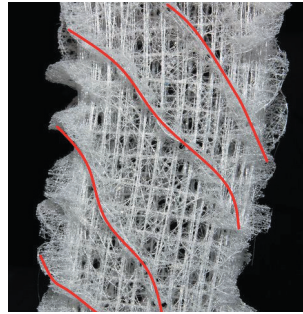
(a) Canlının silindirik iskeleti

(b) Boyuna ve çevresel yapısal elemanlar

(c) Spiral yapısal elemanlar

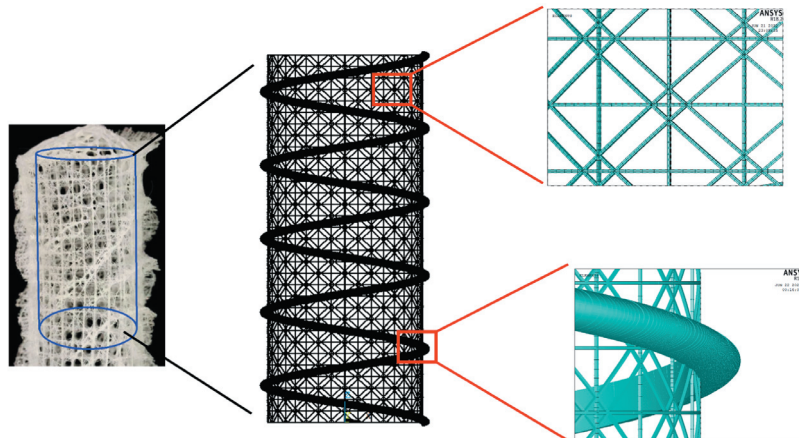
**Şekil 4.** Venüs'ün Çiçek Sepeti'nin silindirik iskeletini oluşturan boyuna, çevresel ve spiral yapısal elemanlar

İskeletin diğer yapısal elemanı ise silindirik gövdeyi saran dış spirallerdir. Bu dış spiraller Şekil 5'te gösterildiği gibi iskeleti oluşturan diğer yapısal elemanlara göre daha belirgindir ve süngerin gövdesini sarmaktadırlar.



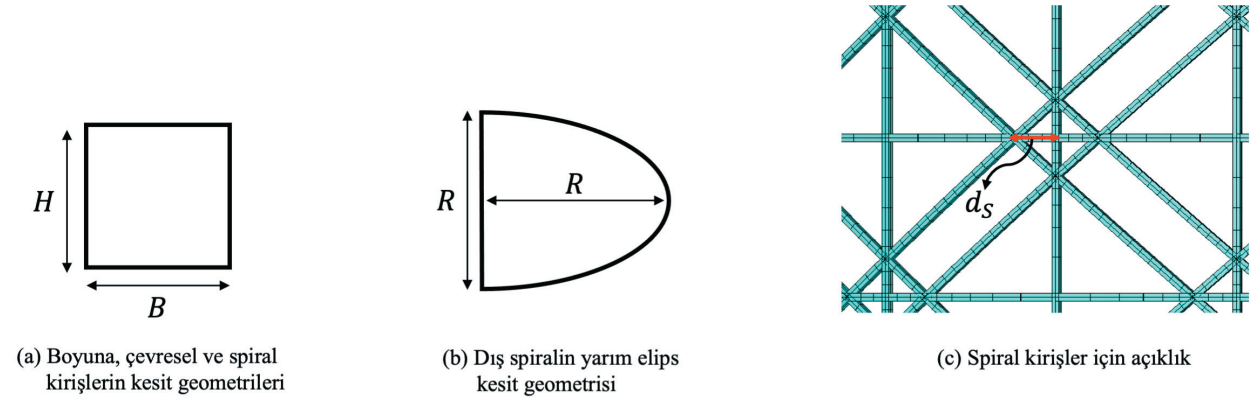
**Şekil 5.** Venüs'ün Çiçek Sepeti'nin silindirik iskeletini saran dış spiraller

Bu gözlemler yardımı ile Venüs'ün Çiçek Sepeti'nin sahip olduğu iskeletten esinlenilerek tasarlanan kafes sistemin ANSYS Mechanical APDL'de oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 6'da gösterilmiştir. Kafes yapının bütün yapısal elemanları BEAM 188 kiriş elemanları kullanılarak modellenmiştir.



**Şekil 6.** Biyomimetik kafes sistemin kiriş elemanlar ile oluşturulan sonlu elemanlar modeli

Şekil 6'da gösterilen sonlu eleman modelinde silindirik yapıyı oluşturan boyuna, çevresel ve spiral kirişler aynı kesit geometrisine sahip iken silindirik yapıyı saran dış spiralin kesit geometrisi yarım elips olarak modellenmiştir (Şekil 7(a) ve 7(b)). Ayrıca, Şekil 7(c)'de gösterildiği gibi spiral kirişlerin geçtiği konumları belirlemek için bir mesafe tanımlanmıştır. Önemli olarak, bu çalışma kapsamında daha basit bir geometriye sahip olmak adına silindirik iskeleti saran sadece bir adet dış spiral olduğu kabul edilmiştir.



**Şekil 7.** Kiriş elemanları için kullanılan kesit geometrileri ve spiral kirişler için açıklık

Dizayn edilen kafes yapının sonlu eleman modeli ANSYS Mechanical APDL içerisinde koşturulabilen bir kod yardımı ile oluşturulmuştur (<https://github.com/yildizdag/sponge> adresinden koda ulaşılabilir). Tablo 1'de kod içerisinde tanımlanan geometrik parametreler, tanımları ve ön dizayn değerleri verilmiştir. Oluşturulan parametrik kod ile farklı topolojiler, ilgili parametreleri değiştirerek hızlı bir şekilde analiz edilebilir. Ayrıca, bu çalışmada sistemi oluşturan yapısal elemanların lineer elastik, izotropik ve homojen bir malzemeden oluştuğu kabulü ile Elastisite modülü 91.9 GPa ve Poisson oranı 0.17 olarak alınmıştır.

**Tablo 1.** Geometrik parametreler, tanımları ve ön dizayn değerleri

Parametre	Tanım	Ön Dizayn Değeri
$L_S$	Silindirin boyu	60 mm
$R_S$	Silindirin yarıçapı	12.6 mm
$B$	Kesit genişliği	0.18 mm
$H$	Kesit yüksekliği	0.18 mm
$R$	Dış spiral kesit yarıçapı (yarım elips)	1.2 mm
$N_V$	Boyuna kiriş sayısı	36
$N_C$	Çevresel kiriş sayısı	33
$d_S$	Spiral kirişler için açıklık	1.05 mm
$N_L$	Dış spiralin döngü sayısı	5

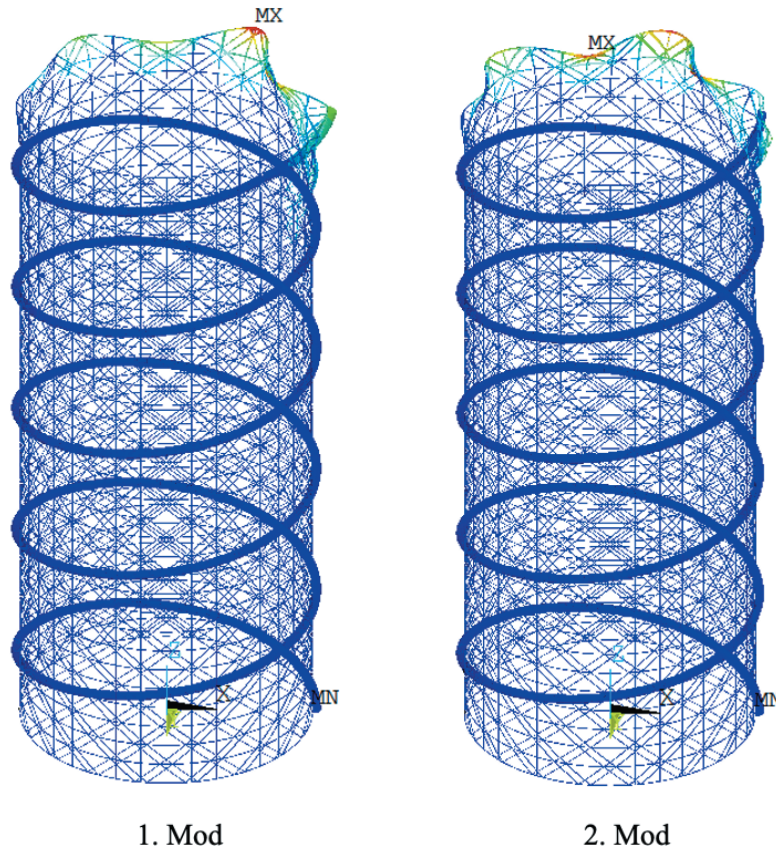
### 3. Sonlu Elemanlar Analizi ve Yapısal Optimizasyon

Dizayn edilen kafes yapının mekanik davranışı burkulma yönünden değerlendirilmiştir. Belirlenen geometrik parametreler optimize edilerek kritik burkulma yükü ön dizayn hacmi sabit tutularak iyileştirilmeye çalışılmıştır. Süngerin yaşadığı deniz ortamını da göz önüne alarak hem boyuna yönde hem çevresel yönde basınca maruz kaldığı, silindirin tabanının ise ankastre mesnet olduğu kabulü

yapılmıştır. Sayısal çalışmanın ilk kısmında, lineer burkulma analizi (eigenvalue buckling analysis) ön dizayn değerleri (Tablo 1) ile gerçekleştirilmiştir. Lineer burkulma analizinde aşağıdaki özdeğer probleminin çözümü elde edilir:

$$(\mathbf{K} + \lambda_i \mathbf{P})\mathbf{U}_i = 0. \quad (1)$$

Burada  $\mathbf{K}$  sistemin katılık matrisi ve  $\mathbf{P}$  sistemin ön gerilme matrisidir. Özdeğer probleminin çözümü ile yük çarpanları (özdeğerler)  $\lambda_i$  ve bunlara karşılık gelen burkulma modları (özvektörler)  $\mathbf{U}_i$  elde edilir. Genellikle  $\mathbf{P}$  matrisi bir birimlik yük (veya basınç) için hesaplanır, böylece elde edilen özdeğerler yapının burkulma yüklerine karşılık gelir. Elde edilen minimum  $\lambda_i$  değeri ise yapının kritik burkulma yükünü temsil eder. Bu yüzden elde edilen ilk burkulma modu analizlerin yorumlanmasında önemlidir. Sonlu elemanlar modeli oluşturulan kafes sistemin ilk iki burkulma moduna Şekil 8'de yer verilmiştir. Bu analiz sonucunda elde edilen kritik burkulma yükü 1. Mod için 3.1092 N olarak belirlenmiştir. Bu analiz sonucunda boyuna yönde uygulanan basınca bağlı burkulma gerçekleşeceği görülmüştür. Bu da aslında yapının boyuna yönde burkulma davranışının iyileştirilmesi gerektiği göstermektedir.

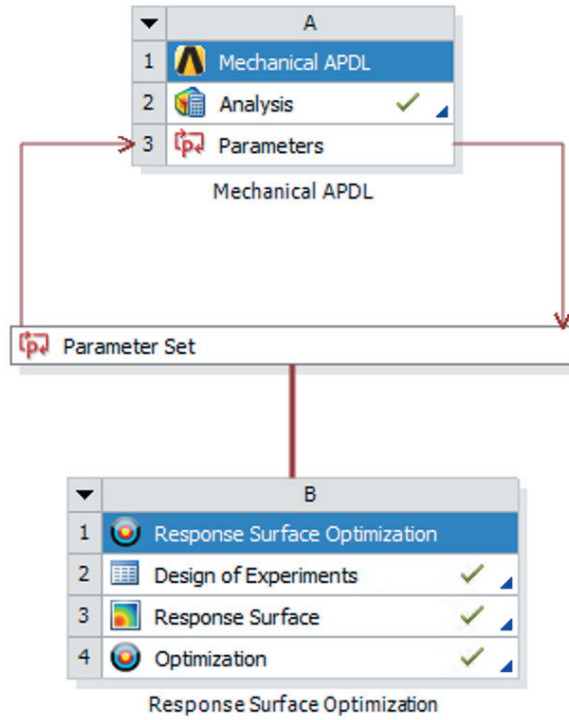


Şekil 8. Lineer burkulma analizi sonucu elde edilen ilk iki mod şekli

Sayısal çalışmanın ikinci kısmında, ANSYS Workbench Design Exploration modülünde bulunan Tepki Yüzey Metodolojisi tabanlı optimizasyon aracı kullanılmıştır. Tepki yüzeyi için hazırlanan kod, belirlenen parametrelerin (bağımsız değişkenler) farklı değerleri ile koşturulmuş ve sayısal bir deney seti oluşturulmuştur. Optimizasyon için ANSYS Workbench içerisinde Şekil 9'da gösterilen proje şeması oluşturulmuştur. Şemada gösterildiği gibi Mechanical APDL ile Response Surface Optimization



modülleri birleştirilmiştir. Mechanical APDL modülü ile oluşturulan kod koşutlanabilmekte ve belirlenen bağımsız değişkenler simülasyon sonuçlarıyla Response Surface Optimization modülüne aktarılabilir. Tepki yüzey metodolojisi problemin sahip olduğu değişkenlerin etkilerini araştırmak için kullanılan teknikleri ve bu değişkenlerin arzu edilen yanıtın elde edilmesi için kullanılan optimizasyon tekniklerini içermektedir.



**Şekil 9.** ANSYS Workbench’de oluşturulan proje şeması

Sayısal deney setinin oluşturulması için kullanılan parametreler ve limit değerlerine Tablo 2’de yer verilmiştir. Bu çalışmada kullandığımız sayısal deney seti gerçekleştirilen 1875 simülasyon ile oluşturulmuştur.

**Tablo 2.** Tepki yüzeyinin oluşturulması için kullanılan parametreler ve limit değerleri

Parametre	Minimum Değer	Maksimum Değer
$N_V$	32	40
$N_C$	29	37
$B$	0.162 mm	0.198 mm
$H$	0.162 mm	0.198 mm
$N_L$	3	6
$R$	1.08 mm	1.32 mm
$d_S$	0.945 mm	1.155 mm

Optimum değerlerin tespit edilmesi için amaç ve kısıt fonksiyonları, yapının hacmini ön dizayn hacmi ( $2.1771E-6 \text{ m}^3$ ) civarında tutup kritik burkulma yükünün maksimum olması şeklinde kurgulanmıştır. Yüzey tepki optimizasyonu modülü içerisinde tanımlanan amaç ve kısıt fonksiyonları Şekil 10’da gösterilmiştir. Kritik burkulma yükünün alt limiti 3.1 N olacak şekilde maksimize edilmesi ve toplam hacmin  $1.5E-6-2.2E-6 \text{ m}^3$  aralığında kalması amaçlanmıştır.

Name	Parameter	Objective		Constraint		
		Type	Target	Type	Lower Bound	Upper Bound
Kritik Yük	P10 - CRITICAL_LOAD	Maximize		Values >= Lower Bound	3.1	
Toplam Hacim	P11 - TOTVOL	Seek Target	0	Lower Bound <= Values <= Upper Bound	1.5E-06	2.2E-06

**Şekil 10.** Optimizasyon için belirlenen amaç ve kısıt fonksiyonları

Belirlenen amaç ve kısıtlarla elde edilen optimum geometrik parametreler ve bunlara karşılık gelen hacim ve kritik yüklere Tablo 3'te yer verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre birinci parametre setinin kullanılması durumunda hacimde %21.88'lik bir azaltım gerçekleşirken kritik burkulma yükü ön dizaynda elde edilen değere göre %27.58 artmıştır. İkinci parametre setinde ise hacimde %8.32'lik bir azaltım gerçekleşirken kritik burkulma yükü ön dizaynda elde edilen değere göre %29.12 artmıştır.

**Tablo 3.** Elde edilen optimum değerler ve bunlara karşılık gelen hacim ve kritik yük

No	$B$ (mm)	$H$ (mm)	$R$ (mm)	$N_V$	$N_C$	$d_s$ (mm)	$N_L$	Hacim (m <sup>3</sup> )	Kritik Yük (N)
1	0.18848	0.19735	1.1071	40	35	0.99187	4	1.7008E-6	4.2934
2	0.19453	0.19376	1.2269	40	37	0.97804	4	1.9967E-6	4.3779

Her iki parametre setine baktığımızda boyuna ve çevresel yöndeki kiriş sayıları artarken dış spiral döngü sayısının azaldığını gözleriz. Ayrıca kiriş kesit alanları artarken spiral kiriş açıklığı azalmıştır. Buradaki önemli bir gözlemimiz de yapının çevresel yöndeki basınca karşı dayanımı yüksek iken boyuna yöndeki basınca karşı zayıf olduğudur. Boyuna yöndeki basınca bağlı kritik burkulma yükünü arttırmak için kiriş sayısının ve kesit alanının artması gerekmektedir. Buna karşılık dış spiral döngü sayısının azaltılması toplam hacimde ciddi bir azaltım sağlamıştır.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada derin denizlerde yaşayan Venüs'ün Çiçek Sepeti adlı süngerin iskeletinden esinlenilerek dizayn edilen bir kafes sistemin mekanik davranışı incelenmiştir. İlk olarak canlının iskelet yapısını oluşturan yapısal elemanlar geometrik olarak idealize edilmiş ve kafes sistem tanımlanmıştır. Daha sonra yapının sonlu eleman modeli kiriş elemanlar (BEAM 188) kullanılarak ANSYS Mechanical APDL'de oluşturulmuştur. Sonlu eleman modeli program içerisinde koşturulabilen bir kod yardımıyla parametrik olarak tanımlanmıştır. Dizayn edilen yapının mekanik davranışı burkulma yönünden değerlendirilmiştir. Yapının ön dizayn geometrik değerleriyle elde edilen kritik burkulma yükünü iyileştirmek için ANSYS Workbench içerisinde yer alan Tepki Yüzey Metodolojisi tabanlı optimizasyon modülü kullanılarak yapının geometrik parametreleri optimize edilmeye çalışılmıştır. Optimizasyon çalışmasında amaç ve kısıt fonksiyonları hacmi ön dizayn değerine yakın tutarken kritik burkulma yükünü arttıracak şekilde tanımlanmıştır. Çalışmada elde edilen veriler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Ön dizayn değerleri ile gerçekleştirilen lineer burkulma analizinde burkulmanın boyuna yöndeki basınca bağlı oluşacağı gözlemlenmiştir.
- Tepki yüzey metodolojisi tabanlı optimizasyon ile yapının burkulma kapasitesinde iyileştirme sağlanırken ön dizayn hacmi %21.88 azaltılabilmektedir.
- Gerçekleştirilen optimizasyon sonucu geometrik parametrelerin boyuna yönde burkulmayı iyileştirmeyi sağlayacak şekilde artarken (boyuna kiriş sayısı, kiriş genişlik ve yüksekliği) hacim

azaltımının çevresel yönde burkulma dayanımı sağlayan yapısal elemanlar (dış spiral) ile sağlandığı gözlemlenmiştir.

Bu başlangıç çalışmasında yapının davranışı lineer burkulma analizleri ile sınırlı tutulmuştur. İleriki çalışmalarda yapının mekanik davranışı nonlineer burkulma analizleri ile daha kapsamlı bir şekilde ele alınmalıdır. Ayrıca ileriki çalışmalarda canlının sahip olduğu iskeletin geometrik idealizasyonu özellikle dış spiraller göz önüne alındığında daha farklı dizaynlar önerilebilir.

## Referanslar

Aizenberg, J., Weaver, J. C., Thanawala, M. S., Sundar, V. C., Morse, D. E., & Fratzl, P. (2005). Skeleton of *Euplectella* sp.: structural hierarchy from the nanoscale to the macroscale. *Science*, 309(5732), 275-278.

Chen, H., Jia, Z., & Li, L. (2022). Lightweight lattice-based skeleton of the sponge *Euplectella aspergillum*: On the multifunctional design. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 135, 105448.

Falcucci, G., Amati, G., Fanelli, P., Krastev, V. K., Polverino, G., Porfiri, M., & Succi, S. (2021). Extreme flow simulations reveal skeletal adaptations of deep-sea sponges. *Nature*, 595(7868), 537-541.

Fernandes, M. C., Aizenberg, J., Weaver, J. C., & Bertoldi, K. (2021). Mechanically robust lattices inspired by deep-sea glass sponges. *Nature Materials*, 20(2), 237-241.

Fernandes, M. C., Saadat, M., Cauchy-Dubois, P., Inamura, C., Sirota, T., Milliron, G., ... & Weaver, J. C. (2021). Mechanical and hydrodynamic analyses of helical strake-like ridges in a glass sponge. *Journal of the Royal Society Interface*, 18(182), 20210559.

Monn, M. A., Weaver, J. C., Zhang, T., Aizenberg, J., and Kesari, H. (2015). New functional insights into the internal architecture of the laminated anchor spicules of *Euplectella aspergillum*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(16), 4976-4981.

Morankar, S., Singaravelu, A. S. S., Niverty, S., Mistry, Y., Penick, C. A., Bhate, D., and Chawla, N. (2022). Tensile and fracture behavior of silica fibers from the Venus flower basket (*Euplectella aspergillum*). *International Journal of Solids and Structures*, 111622.

Reisen, K., Teschemacher, U., Niehues, M., and Reinhart, G. (2016). Biomimetics in production organization—a literature study and framework. *Journal of Bionic Engineering*, 13(2), 200-212.

Robson Brown, K., Bacheva, D., & Trask, R. S. (2019). The structural efficiency of the sea sponge *Euplectella aspergillum* skeleton: bio-inspiration for 3D printed architectures. *Journal of the Royal Society Interface*, 16(154), 20180965.

Sarikaya, M., Fong, H., Sunderland, N., Flinn, B. D., Mayer, G., Mescher, A., & Gaiño, E. (2001). Biomimetic model of a sponge-spicular optical fiber—mechanical properties and structure. *Journal of Materials Research*, 16(5), 1420-1428.

Sevencan, H. (2020). Tekstil ve giysi tasarımında biyomimetik uygulamaları. *Uluslararası Disiplinlerarası ve Kültürlerarası Sanat*, 5(10), 101-118.

Sharma, D., & Hiremath, S. S. (2022). Bio-inspired repeatable lattice structures for energy absorption: Experimental and finite element study. *Composite Structures*, 283, 115102.

Sharma, D., Hiremath, S. S., & Kenchappa, N. B. (2022). Bio-inspired Ti-6Al-4V mechanical metamaterials fabricated using selective laser melting process. *Materials Today Communications*, 104631.

Taşkan, M., Mutlu Avinç, G., & Arslan Selçuk, S. (2022). Canlıların su dengesi sağlama stratejileri ve biyo-bilgili yapı kabuğu tasarımı. *Online Journal of Art and Design*, 10(1).

Tavangarian, F., Sadeghzade, S., and Davami, K. (2021). A novel biomimetic design inspired by nested cylindrical structures of spicules. *Journal of Alloys and Compounds*, 864, 158197.

Weaver, J. C., Aizenberg, J., Fantner, G. E., Kisailus, D., Woesz, A., Allen, P., Fields, K., Porter, M. J., Zok, F. W., Hansma, P. K., Fratzl, P. & Morse, D. E. (2007). Hierarchical assembly of the siliceous skeletal lattice of the hexactinellid sponge *Euplectella aspergillum*. *Journal of structural biology*, 158(1), 93-106.

Yildizdag, M. E., Tran, C. A., Barchiesi, E., Spagnuolo, M., and Hild, F. (2019). A multi-disciplinary approach for mechanical metamaterial synthesis: A hierarchical modular multiscale cellular structure paradigm. In *State of the art and future trends in material modeling* (pp. 485-505). Springer, Cham.

# Gemi Tasarımında Paradigma Değişikliği: Balastsız Gemi

Ceren Bilgin Güney

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

bilgincer@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3445-8688

## ÖZET

Geleneksel gemi inşa yaklaşımının vazgeçilmez bir bileşeni olması nedeniyle gemiler her yıl, ticari ürünlerin yanı sıra milyarlarca ton balast suyu taşımaktadır. Bu taşıma esnasında dünyanın biyocoğrafik bölgeleri arasında yer değiştiren türler oldukça önemli ekolojik, ekonomik ve sağlık sorunlarının yaşanmasına neden olmaktadır.

Balast suyu, diğer kirleticilerin aksine, zararlarının zamanla artma potansiyeli nedeniyle gemi kökenli kirleticiler arasında en büyük öneme sahip kirletici olarak değerlendirilmektedir. Gerek 2017 tarihinde yürürlüğe giren IMO Gemilerin Balast Suyu ve Sedimanlarının Kontrolü ve Yönetimi Uluslararası Sözleşmesi gerekse 2012 yılında yürürlüğe giren ABD Mevzuatı (Final Rule), deşarj edilecek balast suyunda beher hacimde bulunabilecek organizmaları sınırlandıran standartlar getirmiştir. Mevcut uygulamada bu şartların sağlanması için gemilerin balast suyu arıtma sistemi ile donatılması gerekmektedir.

Verimliliği çeşitli faktörlere bağlı olan ancak kurulum ve işletim maliyeti milyon dolar mertebelerinde olan sistemler gemilere kurulsa da çevresel risklerin devam edeceğine, yasal yükümlüklerin karşılanamayabileceğine ve dolayısıyla gemi sahiplerinin yaptırımlarla karşılaşabileceğine dair endişeler devam etmektedir. Bu endişeler balast suyu arıtımı yerine uygulanabilecek daha farklı çözümler üretmeye yönelik çalışmalara hız kazandırmıştır. Gemilerin Standart balastlı gemi yaklaşımına alternatif yaklaşımlarla tasarlanarak inşa edilmesi 2000'li yıllardan beri farklı çözümler arayışları içerisinde yer almaktadır. Balastız ilk LNG tedarik gemisinin 2018'de denize indirilmesiyle gemi inşa sanayinde yeni bir rekabet alanı açılmıştır.

Bu çalışmada, balast suyunun vazgeçilmez olarak kabul edildiği mevcut gemi inşa anlayışında yaşanmakta olan paradigma değişikliğine dikkat çekilmekte; balastız gemi üretilmesi için yapılan araştırma ve geliştirme faaliyetleri ve de gelinecek mevcut durum özetlenmektedir.

**Anahtar kelimeler:** balastız gemi, balast suyu, istilacı türler, sıfır balastlı gemi

**Makale geçmişi:** Geliş 29/08/2022 – Kabul 03/12/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1168354>

# Paradigm Shift in Ship Design: Ballastless Ship

Ceren Bilgin Güney

Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering,  
İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye

bilgincer@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3445-8688

## ABSTRACT

As an indispensable component of the traditional shipbuilding approach, ships carry billions of tons of ballast water each year, as well as commercial products. Species translocated between the world's biogeographic regions during this transport cause important ecological, economic, and health problems.

Ballast water, unlike other pollutants, is considered to be the most important pollutant among ship-borne pollutants due to potential increase in its harm over time. Both the IMO International Convention on the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments, which entered into force in 2017, and the US Legislation (Final Rule), which entered into force in 2012, have introduced standards that limit the organisms that can be found in the ballast water to be discharged. In current practice, ships must be equipped with a ballast water treatment system to meet these standards.

Even if the systems, whose efficiency depends on various factors, but whose installation and operating costs are in the millions of dollars, are installed on ships, there are still concerns that environmental risks will continue, legal obligations may not be met, and therefore ship owners may face sanctions. These concerns have accelerated the efforts to produce different solutions that can be applied instead of ballast water treatment. The design and construction of ships with alternative approaches to the standard ballasted ship approach have been in search of different solutions since the 2000s. With the launch of the first non-ballast LNG bunkering ship in 2018, a new competitive field has been opened in the shipbuilding industry.

In this study, attention is drawn to the paradigm shift in the current understanding of shipbuilding, in which ballast water is considered indispensable; The research and development activities for the production of ballastless ships and the current situation are summarized.

**Keywords:** ballast-free ship, ballast water, invasive species, zero ballast ship

**Article history:** Received 29/08/2022 – Accepted 03/12/2022

## Kısaltmalar:

CFD: Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (*Computational Fluid Dynamics*)

DWT: Bir geminin ne kadar ağırlık taşıyabileceğinin bir ölçüsüdür (*deadweight tonnage*).

IMO: Uluslararası Denizcilik Örgütü (*International Maritime Organization*)

MIBS: Minimal balastlı gemi (*Minimal Ballast Water Ship*)

NOBS: Sıfır balastlı gemi (*Non-Ballast Water Ships*)

VLLC: 180-320 bin DWT arasındaki gemiler (*very large crude carrier*)

## 1.Giriş

Balast terimi boş geminin dengesini güvenilir hale getirmek, ya da pervaneden alınacak verimi maksimize etmek amacıyla pervanenin iyice suya gömülmesini sağlamak için gemiye alınan ağırlıkları tanımlamakta kullanılmaktadır. Ticari nedenlerle elbette gemilerin maksimum yük ve minimum balast ile seyahat etmesi tercih edilmektedir. Hatta balast kelimesi etimolojik olarak Orta Flemenkçe’de “nafile yük” anlamına gelmektedir (National Research Council 1996). Her ne kadar ticari olarak istenmese de geleneksel gemi inşa teknolojisinde, gemilerin güvenliği ve verimli seyri için vazgeçilmez olması nedeniyle, ticari ürünlerin yanı sıra, yılda yaklaşık olarak 12 milyar ton balast suyu gemilerle taşımaktadır (Bax et al. 2003). Ancak bu taşınım esnasında binlerce tür dünyanın biyocoğrafik bölgeleri arasında yer değiştirmekte, bu türlerden bazıları geldikleri ortamda yaşamlarını sürdürüp çoğalarak istilacı tür haline gelmektedir. Bu taşınım sonucunda oldukça önemli ekolojik, ekonomik ve insan ve toplum sağlığı sorunları yaşanabilmektedir (Bailey 2015; Lavoie, Smith, and Ruiz 1999; Lovell and Stone 2005; Ruiz et al. 1997; Takahashi et al. 2008). Balast suyu, yol açtığı biyolojik kirlenme nedeniyle, gemi kökenli kirleticiler arasında en büyük öneme sahip kirleticiler olarak değerlendirilmektedir (Arslan, Solmaz, and Usluer 2022).

Yabancı türlerin gemilerde balast ile taşındığına dair bulgular, kuru balastın kullanıldığı 17. yüzyılın başlarında Avrupa’dan Kuzey Amerika’ya yapılan seyahatlere kadar uzanmaktadır. Ancak özellikle 1970ler ve sonrasında balast suyunun türlerin taşınmasındaki rolünün fark edilmesiyle (Carlton 1979; Davidson and Simkanin 2012; Medcof 1975) dünyanın farklı coğrafyalarında bir çok çalışmayla problemin önemi ortaya konmuş; problemin boyutları anlaşılmıştır (Bailey 2015; Chu et al. 1997; Davidson and Simkanin 2012; Gollasch, Minchin, and David 2015; Gonçalves 2013; Grigorovich et al. 2003; Hallegraeff 2015; Hallegraeff and Bolch 1991; Lavoie et al. 1999; Occhipinti-Ambrogi and Savini 2003; Ojaveer et al. 2014; Wu et al. 2019).

Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) de 1990'larda bu konuyu gündemine almış, uzun yıllar süren çalışmaların ardından 03 Şubat 2004'te Gemilerin Balast Suyu ve Sedimanlarının Kontrolü ve Yönetimi Uluslararası Sözleşmesini imzaya açmıştır. Kısaca IMO Balast Suyu Sözleşmesi olarak anılan bu yasal düzenlemenin yürürlüğe girebilmesi için gereken şartların sağlanması ise 12 yıl sürmüştür (Bilgin Güney 2018), nihayetinde 8 Eylül 2017 tarihinde sözleşme yürürlüğe girmiştir. Balast suyu sözleşmesine taraf olan ülkelere kayıtlı olup, uluslararası seferlerde balast suyu alan ve kullanan tüm gemiler sözleşme kurallarına uymakla yükümlüdür (IMO 2004). Diğer taraftan istilacı yabancı türler yüzünden yıllık 120 milyar dolara varan büyük çevresel hasarlar ve kayıplar yaşayan ABD (Pimentel, Zuniga, and Morrison 2005), bu türlerin taşınmasında önemli bir vektör olan balast suyu ve sedimanı ile ilgili düzenlemeler için IMO Sözleşmesi’ne taraf olmamış, daha katı uygulamalar içerecek şekilde kendi mevzuatını (*Final Rule*) geliştirerek Haziran 2012 itibarıyla yürürlüğe sokmuştur. Bu mevzuat ABD ve Kanada Münhasır Ekonomik Bölgesi dışında balast suyu alan ABD sularında boşaltma yapan tüm gemiler için geçerlidir (Campara et al. 2019).

IMO'nun Balast Suyu Sözleşmesi ve de ABD sularında uygulanan mevzuat, dünya denizcilik sektöründe balast suyu yönetimi açısından en belirleyici iki yasal rejim olarak uygulanmaktadır. Bu iki rejim arasında bazı farklılıklar olsa da, her ikisi de nihayetinde gemilerin balast suyu deşarj standartlarına uymasını gerektirmektedir (Campara et al. 2019). Gerek IMO Balast Suyu Sözleşmesi gerekse ABD Mevzuatında belirtilen standartlar, deniz suyunda bulunacak organizmaları boyutlarına göre sınıflandırarak beher hacimde bulunabilecek maksimum organizma sayısını vermektedir. Bu standartların sağlanması için hâkim olan uygulama, gemilerin tabi olduğu yasal rejim tarafından belirtilen koşullarda onay almış bir balast suyu arıtma sistemiyle donatılması şeklindedir. Bu sistemlerin geliştirilmesi için yapılan çalışmalar, IMO Balast suyu sözleşmesi hız kazanmış ve geliştirilen sistemler 2007 yılından itibaren onaylanmaya başlamıştır (Gerhard et al. 2019).

IMO Sözleşmesinin uygulamasında eşgüdüm sağlanabilmesi için Temmuz 2005'ten Ekim 2008'e kadar 14 set Kılavuz geliştirilmiştir. Bu Kılavuzlardan bazıları, ilk onaylandıkları tarihten bu yana revize edilmiştir. Bu 14 set kılavuz arasında 8. sırada yer kısaca ve G8 olarak da bilinen Balast Suyu Yönetimi Sistemlerinin Onaylanmasına Dair Kılavuz (*Guidelines for approval of ballast water management systems (G8)*), IMO Balast suyu Sözleşmesinin uygulanmasının ana bileşeni olması nedeniyle tüm kılavuzlar arasında oldukça farklı bir öneme sahiptir. Bu Kılavuz 2016 yılında revize edilmiş, Nisan 2018'de 'Balast Suyu Yönetimi Sistemleri Onay Kodu' olarak, kılavuz olma niteliğinin ötesinde, zorunlu bir rejim haline getirilmiştir (MEPC 2018). Bu zorunlu onay rejiminin uygulama takvimine göre, 28 Ekim 2020'de veya sonrasında gemilere kurulan balast suyu yönetim sistemlerinin tamamının, 2016'da revize edilmiş G8 gerekliliklerine göre Tip Onayına sahip olması gerekmektedir. Ancak, 28 Ekim 2020'den önce gemilere kurulmuş olan sistemler için mevcut tip onayı geçerliliğini korumaktadır. IMO Tip Onayı almış olan sistemlerin listesi incelendiğinde eski G8 rehberine göre toplan 78 IMO Tip Onayı verilmişken revize edilmiş 2016 G8 kılavuzuna göre halihazırda 47 Tip Onayı verilmiş durumdadır, bu liste IMO tarafından en son aralık 2021'de revize edilmiştir (IMO 2021). Güncel durum IMO'nun resmî web sitesinden kontrol edilebilir.

Mevcut balast suyu arıtma sistemlerin çoğu istenilen standartlarda balast suyu dezenfeksiyonu sağlayabilmek amacıyla farklı teknolojilerin kombinasyonları şeklinde oluşturulmuş sistemlerdir. Sistemlerin verimlilikleri ise sitemde kullanılan teknolojilere bağlı olarak, suda mevcut olan organizmaların yanı sıra, suyun fiziksel ve kimyasal özelliklerinden (tuzluluğu, sıcaklığı, bulanıklığı, kirletici yükü vb) etkilenebilmektedir. Diğer taraftan oldukça yüksek maliyetli (Bilgin Güney 2017) olan bu sistemlerin etkileri, avantajları ve dezavantajları hakkında mevcut bilgiler çoğunlukla laboratuvar ölçekli çalışmalardan elde edilmektedir. Balast suyu arıtımının karmaşık yapısı nedeniyle, yöntemlerin gerçekçi koşullar altında kapsamlı bir şekilde test edilmesi gerekmektedir (Hess-Erga et al. 2019). Örneğin yakın zamanda yayınlanmış olan, balast suyu arıtım sistemleriyle donatılmış olan 29 geminin balast suyu örnekleriyle yapılmış olan kapsamlı bir çalışmada, bu örneklerin %48'inde, IMO Balast suyu Sözleşmesi ve ABD Mevzuatında boyutu 50 µm ve üstü olan organizmalar için belirlenmiş olan standartların aşıldığı tespit edilmiştir (Bailey et al. 2022). Bu çalışmada limit aşımının mevcut sistemlerden kaynaklanabileceği gibi, sisteminin gemi üzerinde kullanılması esnasında karşılaşılan problemlerden ve de uygulamada yapılan hatalardan da kaynaklanabileceği belirtilmektedir. Söz konusu çalışma, kurulum ve işletim maliyeti milyon dolar mertebelerinde olan sistemler gemilere kurulsa da çevresel risklerin devam edeceğine, yasal yükümlüklerin karşılanamayabileceğine ve dolayısıyla gemi sahiplerinin yaptırımlarla karşılaşabileceğine işaret etmektedir.

Gemilerin balast suyu arıtım sistemleriyle donatılması, her ne kadar hâkim uygulamada balast suyu yönetiminin zorunlu bir gereği gibi kabul edilse de aslında Balast Suyu Sözleşmesi B-3.7 yönetmeliğiyle, çevreye eşdeğer koruma sağladıklarının kabul edilmesi koşuluyla, balast suyu yönetimi için alternatif yöntemlerin geliştirilmesine ve onaylanmasına izin vermektedir. Bu kapsamda çeşitli yöntemler uzun



yıllardır değerlendirilmektedir Balast suyunun limanda arıtımı (Maglić, Zec, and Frančić 2015; Pereira and Brinati 2012; Satır and Doğan-Sağlamtimur 2014); gemilerde balast suyu olarak içilebilir/tatlı su kullanımı (Albert et al. 2017; Suban, Vidmar, and Perkovič 2010); standart balastlı gemi yaklaşımına alternatif yaklaşımlarla gemilerin tasarlanarak inşa edilmesi vb. bu değerlendirilen yöntemler arasında yer almaktadır (GESAMP 2011).

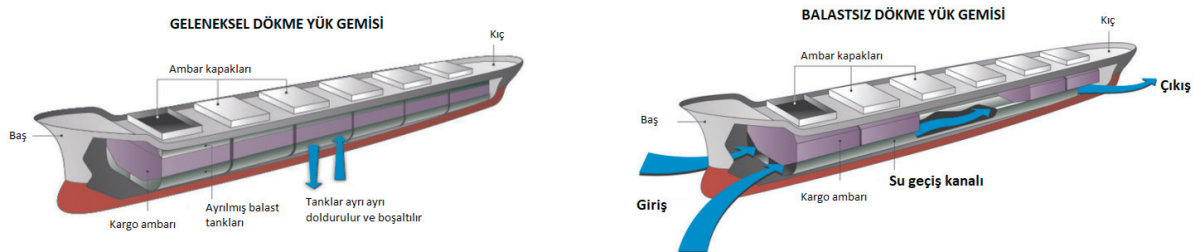
Gemi tasarımında yapısal değişikliklerle balast suyu ihtiyacını ortadan kaldırmak ya da minimize etmek için yapılan araştırma-geliştirme faaliyetleri 2000'lerin başından beri devam etmektedir. Gelinek noktanın belirlenmesi amacıyla söz konusu faaliyetler bu çalışmada kısaca özetlenmektedir. Söz konusu faaliyetler bu çalışmada 'Sephiye kontrolünü temel alan konseptler' ve 'Tekne formuna bağlı konseptler' iki ana başlık altında incelenmiştir.

## 2.Sephiye Kontrolünü Temel Alan Konseptler

### 2.1. Boyuna Kanallar: Ballast-Free / Değişken Sephiye

Orijinal ismiyle *Ballast-free* konsepti ABD Michigan Üniversitesinde Parsons ve ekibi tarafından ilk olarak 2001'de tasarlanmış ve 2004 yılında patent alınmıştır (US Patent #6694908 2004). Bu tasarımın orijinal isminde yer alan *Ballast-free* (yani balastsız) ibaresi aslında geminin tamamen balastsız olduğuna değil 'yabancı' balast suyu taşımadığına işaret etmektedir. Bu tasarımla önerilen sistem her zaman 'yerel' balast suyu taşınmasını sağlamaktadır.

Bilindiği gibi geleneksel gemi inşa yaklaşımında, güvenli ve verimli seyir koşullarının sağlanması için gemilerin tam yüklü olmadığı hallerde geminin ağırlığını artırmak için balast suyu kullanılmaktadır. Ancak Michigan Üniversitesindeki araştırmacılar problemi değişik bir bakış açısıyla ele alıp, balast koşulunda gerekli olan güvenli draftı sağlamak için yük eklemek yerine sephiyeyi değiştirmeye odaklanmış (Kotinis et al. 2004), deniz altı gemilerine benzer bir prensiple çalışacak bir Değişken Sephiyeli Dökme Yük Gemisi (*Variable Buoyancy Bulk Carrier*) tasarlamışlardır (Parsons and Kotinis 2011). Bu tasarımda geleneksel balast tanklarının yerini, geminin kargo bölümünün altında gemi boyunca uzunlamasına uzanan, yapısal balast kanalları almıştır (Şekil 1) ve bu kanallar, baş tarafta bir plenum ve kıç tarafta ikinci bir plenum ile denize bağlanmaktadır (Kotinis 2005). Balast durumu için gerekli draftı sağlamak amacıyla bu kanallar suyla doldurularak sephiye azaltılır. Geminin su içindeki hareketinden dolayı geminin baş bölgesi ile kıç bölgesi arasında oluşacak hidrodinamik basınç farkı sayesinde balast kanallarında yavaş bir akış indüklenir.



Şekil 1. Değişken Sephiyeli Gemi (Kotinis 2005)

Önerilen bu sistemin hayata geçirilmesi halinde seyir esnasında balast kanalları her zaman 'yerel' su ile dolu olacağından, yabancı türlerin farklı bölgelere taşınması mümkün olmayacaktır; balastlı seyir sonunda, kanallar denizden izole edilebilir ve ardından geleneksel balast pompaları kullanılarak boşaltılabilir (Kotinis 2005).

Bu konseptle ilgili gerçekleştirilen gerek model deneyleri, gerekse CFD hesaplamalarıyla, saatte en az bir kez balast hacmi devrini sağlamaya yetecek (yani kanalların her zaman ‘yerel deniz suyu’ içermesini sağlayacak) basınç farkının, baş plenum bölgesi ile kıç plenum bölgesi arasında mevcut olduğu; tam yüklü koşulda sıfır trimde yapılan hasarsız stabilite hesapları ise tasarımın IMO Stabilite Kriterlerinin sağlandığı gösterilmiştir (Kotinis et al. 2004; Parsons 2010). Ancak bu ilk çalışmalarda aynı zamanda dirençte %2,2 ve daha da önemlisi dirence bağlı olarak gerekli sevk gücünde %7,4'e kadar artış tespit edilmiştir. Sonrasında devam eden tasarım iyileştirme çalışmalarında, giriş ve çıkış yerleri iyi bir optimizasyonla belirlendiğinde gerekli sevk gücünde %1,7'lik azalma elde edilebileceği tespit edilerek, ekonomik açıdan da yüksek maliyetli balast suyu arıtım sistemlerine göre daha iyi bir alternatif olabileceği öne sürülmüştür (Kotinis and Parsons 2010; Parsons 2010). Bu tasarım ilk sunulduğunda ihtiyaç duyulan draft ve trim kontrollerinin mürettebat tarafından sağlanıp sağlanamayacağı hususunda sorgulamalarla karşılaşmış; ancak ilerleyen aşamalarda su akış kanallarının her bir ucuna kapalı trim kontrol sistemi ve balast doldurma/boşaltma hatlarının eklenmesiyle, değişken sephiye dökme yük gemisinin ihtiyaç duyulacak draft ve trimi sağlayabileceği de gösterilmiştir (Parsons and Kotinis 2011). Kotinis ve diğ. (2004) tarafından yeni inşa gemiler için geliştirilen bu balastsız gemi (*Ballast Free Ship*) yaklaşımı başka araştırmacılar tarafından da temel alınarak yeni çalışmalara esin kaynağı olmuştur (Afif et al. 2012; Godey, Misra, and Sha 2012, 2014; Kadir, Malik, and Ali 2022).

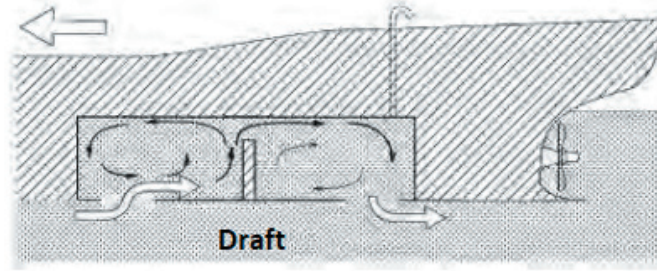
Godey ve diğ. (2012, 2014) geleneksel bir çift dip yapısına balast tankı yerine sephiye düşürmek için akışın gerçekleşeceği boyuna uzanan eliptik borular yerleştirmiş ve bu boruları başta ve sonda valflerle donatarak kontrol edilmesini sağlamıştır. Bu çalışmalarda aynı zamanda farklı kesitlere sahip boruların kullanımı da değerlendirilmiş, eliptik borular kullanılmasının ihtiyaç duyulacak balast kapasitesinde de düşüş sağladığı tespit edilmiştir. Afif ve diğ. (2012) ise mevcut LNG tanklarına da uygulanabilecek şekilde merkez hattının her iki yanına çift dip yüksekliğinde, boyuna tüneller yerleştirerek hibrit bir sistem önermiştir.

Kotinis ve diğ (2004) tarafından yapılan çalışmalarda, alınan suyun geminin kıç tarafındaki çıkış plenumundan dışarı akması nedeniyle, pervane etrafındaki akışta sınır tabakanın bozulmasına neden olduğu ve direncin büyük ölçüde bu nedenle arttığına dikkat çeken Kadir ve diğ. (2022), yaptıkları çalışmada çıkış plenumunda hava enjeksiyonuyla hava tabakası üretecek bir sistem önermiş, bu sayede su ile gövde yüzeyi arasındaki etkileşimi ve direnci azaltacak bir yağlama etkisiyle, balastsız gemi performansının artırılabilirliğini öne sürmüştür.

## 2.2. Sephiye Kontrol Kompartımanları

Yokohama Ulusal Üniversitesi tarafından geliştirilen bu tasarım Kotinis ve diğ (2004) tarafından boyuna kanallar kullanılarak önerilen sisteme benzer bir prensiple çalışmaktadır. Ancak bu tasarımda gemi boyunca uzanan kanallar kullanmak yerine, sephiye kontrol kompartımanlarının kullanılması önerilmektedir (Şekil 2). Bu sistemin yeni inşa gemilerin yanı sıra, mevcut gemilerin balast tanklarının sephiye kontrol kompartımanlarına dönüştürülmesiyle retrofit olarak da uygulanabileceği değerlendirilmektedir (GESAMP 2011; Godey et al. 2012). Bu tasarıma göre, yüksüz durumda yeterli draftı sağlamak önce bölmeler su ile doldurulur; normal seyir hızında, pompalara ihtiyaç duyulmadan bölmelere su giriş ve çıkışı sağlanarak bölmelerdeki su değiştirilir.

Bu konsept patent başvurusu yapılmış olmakla birlikte literatürde doğrudan bir bilgiye erişilememiştir. Sistemin teorik kaldığı geliştirmek için çalışmalar yapılmamış olduğu, 2011 yılında GEF-UNDP-IMO *GloBallast Partnerships Programme* Koordinasyon Birimi tarafından yayınlanmış olan raporda da belirtilmektedir (GESAMP 2011).



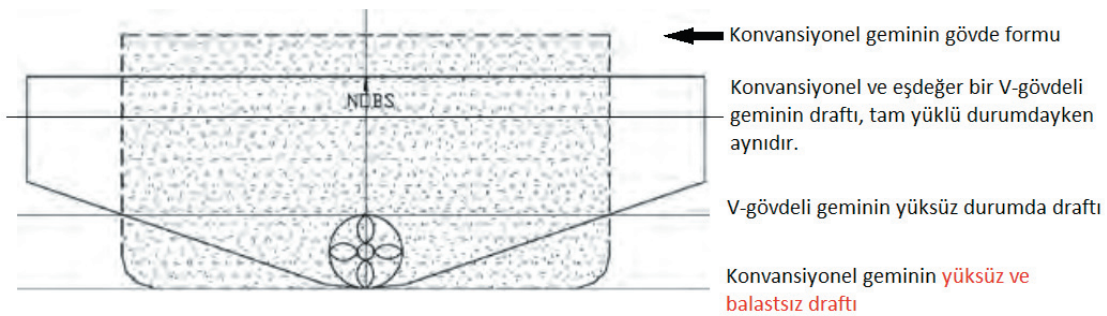
**Şekil 2.** Sephiye kontrol kompartımanları (GESAMP 2011)

### 3. Tekne Formuna Bağlı Konseptler

#### 3.1. V-Formunu Temel Alan Konseptler

Japonya Gemi İnşa Araştırma Merkezi (*Shipbuilding Research Centre of Japan (SRC)*), sıfır balastlı (ya da diğer bir deyişle balastsız) gemiler (*Non-Ballast Water Ships (NOBS)*) ile ilgili Ar-Ge faaliyetlerine 2001 yılında başlamış, özellikle 2003 sonrasında tankerler üzerine yoğunlaşmıştır (GESAMP 2011; Hong and Huabin 2018). Optimal gövde şekli ve sephiye dağılımı üzerine geliştirilen düşünceler V-formlu balastsız gemilerin çıkış kaynağı olmuştur (Şekil 3); V-gövde tipi konvansiyonel ticari gemilerinin düz dip yapısına göre oldukça farklı bir yapıdadır (GESAMP 2011).

Bu tasarımın en büyük özelliği, geminin alt kısmının gövdesinin daha narin olması ve geminin alt kısmının aşağı doğru çıkıntı yapan V şeklinde bir form oluşturmasıdır; bu form sephiye merkezinin yerini düşeyde değiştirdiği için, boşken geminin ağırlığını destekleyebilecek yeterli draft sağlanmaktadır (Elkady, Han, and Gao 2014a; Hong and Huabin 2018). V-gövde formunda uzunluk değiştirilmeden genişlik  $\sim$ %30 arttırıldığında, geleneksel tekneninkiyle eşdeğer bir deplasman, aynı tam yüklü draftta sağlanmaktadır (Elkady, Han, and Gao 2014b; Elkady et al. 2014a; GESAMP 2011).



**Şekil 3.** V-gövdenin draftı yüksüz durumda konvansiyonel tekneninkinden daha derin (GESAMP 2011)

Japonya Gemi İnşa Araştırma Merkezi SRC, V-gövde formunu bir Suezmax tankerivle bir VLCC gemi modeline uygulamış; teknik fizibilite, maliyet, güvenlik, sağlık ve çevresel yönleriyle değerlendirmiştir (GESAMP 2011). Her ne kadar V-gövdeli bu gemi tasarımı yüksüz durumda balastsız seyir yapabilme kabiliyetine sahip olsa da, her iki gemi için yapılan fizibilite çalışmalarına kötü hava koşulları için iki ayrı balast tankı eklemiştir. Bu nedenle bu tasarım Fırtına Balastı (*Stom Ballast*) olarak da adlandırılmaktadır.

V-gövdeli formun eğik dip yapısı gemiye yüksüz koşulda uygun draft sağladığı için aşırı dövünme, pervanede devir artışı, stabilite problemlerini engellenmektedir; aynı zamanda deplasmanın ve ıslak yüzeyin azalması dirençte ve geminin suda ilerlemesi için gerekli motor gücünde de büyük azalma

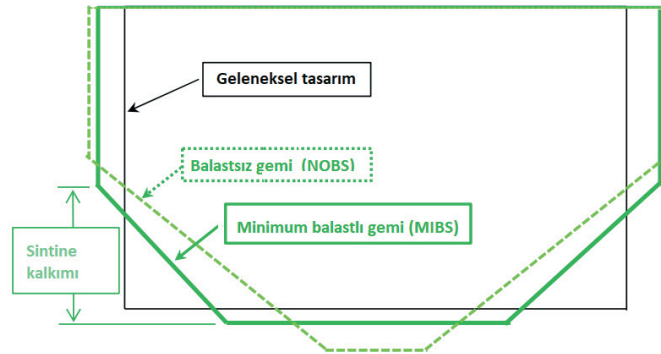
sağlar (Kashiro 2016). Ancak V-gövdeli tekne tam yüklü durumdayken genişlik ve ıslak yüzey alanında artış olacağından konvansiyonel bir gemiye kıyasla direnç artışına, dolayısıyla sevk verimindeki düşüşe ve de maliyet artışına neden olmaktadır. Gemi genişliği dışındaki ana boyutlar sabit tutulup sintine kalkım açısının değiştirilmesiyle elde edilen formlarla yapılan çalışmalar, toplam direncin açıyla beraber arttığını göstermektedir; özellikle yüksek hız koşullarında, genişliğin artışı nedeniyle su hattı giriş açısının artması, geminin dalga direncini daha da etkilemektedir (Elkady et al. 2014a, 2014b).

Islak yüzey alanındaki artışla birlikte artan dirençten kaynaklanan ek maliyet, farklı gemi tipleri için değerlendirildiğinde, V-formunun daha çok tankerler ve dökme yük gemileri için uygun olduğu görülmektedir; ancak yükleme ve boşaltma koşulları da değerlendirildiğinde dökme yükten daha ziyade tankerler için uygulanabilir olduğu anlaşılmaktadır (GESAMP 2011).

Bununla birlikte gemi genişliğinin artması, inşa aşamasında bir takım ek maliyetler getirecek (artan çelik ihtiyacı, çoğu tersanede kuru havuz ve bazı diğer yapılarda modifikasyon gereksinimi vb.), dar kanallarda manevra zorluğuna, yüklü durumda artan draftla birlikte limanlarda yanaşma problemlerine neden olabilecektir (GESAMP 2011).

### 3.1.1. Minimal Balastlı Gemi Konsepti-*Minimal Ballast Water Ship* (MIBS)

Minimal balastlı gemi formu, Japonya Gemi İnşa Araştırma Merkezi (*Shipbuilding Research Centre of Japan* (SRC)), tarafından orijinal NOBS konseptine dayanılarak geliştirilmiştir. Bu konseptin de konvansiyel gemiye göre öne çıkan özellikleri orta kesitte eğik bir dip yapısına (sintine kalkımına) ve daha düşük bir baş draftına (daha büyük bir trim) sahip olmasıdır. Diğer taraftan NOBS konseptine göre bu konseptte daha düşük bir sintine kalkımı ve daha geniş düz dip yapısı mevcuttur (Şekil 4) (Kashiro 2016).



Şekil 4. Balastsız (NOBS)/Minimum balastlı gemiler (MIBS) (Kashiro 2016)

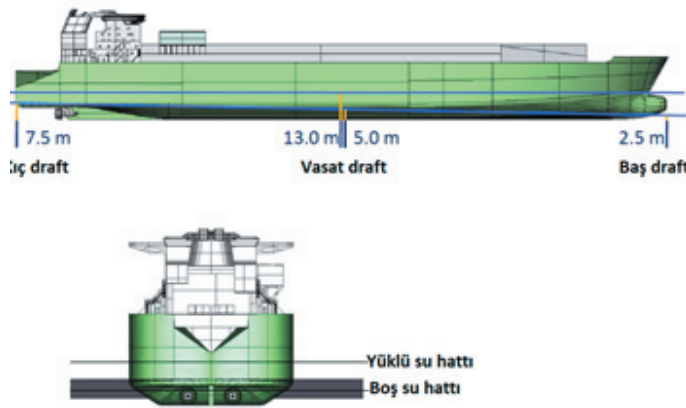
Minimal balastlı gemilerin (MIBS) formu yüksüz durumda aynı NOBS konsepti gibi benzer avantajlar sağlamaktadır. Diğer taraftan, konvansiyel gemiyle aynı ana boyutlarda ( $L$  gemi boyu,  $B$  gemi genişliği,  $d$  dizayn draftı) olup, böyle bir orta kesite sahip olan bir gemi tam yüklü durumda daha az deplasmana ve dolayısıyla daha düşük DWT'a tonaja sahip olacaktır. Kaybedilen DWT geri kazanılması için, bu temel boyutlardan bazılarını büyümesi gerekir (Kashiro 2016).

Namura Gemi İnşa, Oshima Gemi İnşa ve Japonya Gemi İnşa Araştırma Merkezi tarafından 2009-2012 yılları arasında tankerler ve dökme yük gemileri için MIBS geliştirmeye yönelik gerçekleştirilen ortak projede Harmonize Ortak Yapım Kuralları (*Harmonized Common Structural Rules* (HCSR)) dikkate alınarak gemilerin ana boyutları, gemi ortası kesit şekli, mukavemeti, yükleme durumu vb. hakkında birtakım çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar Japon Kara, Altyapı, Ulaştırma ve Turizm Bakanlığı

(MLIT), *The Nippon Foundation*, *Nippon Kaiji Kyokai* (ClassNK) ve *Japan Ship Technology Research Association* (JSTRA) tarafından sübvansede edilmiş veya desteklenmiştir. Çalışmada ana boyutların ( $L$ ,  $B$ ,  $d$ ), orta kesitte sintine kalkımının ve balast koşulunda baş draftın çeşitli kombinasyonları incelenmiş, çalışmaların detayları Kashiro (2016) tarafından yayınlanmıştır.

### 3.1.2. STX tasarımı LNG Gemisi: Improve

STX'in Fransa'daki Saint-Nazaire tersanesinde 2009 yılında AB tarafından finanse edilen IMPROVE projesi (EU FP6-IMPROVE) kapsamında geliştirilen bu tasarımla önerilen gemi standart bir Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (LNG) taşıyıcısı gibi çift cidarlıdır, 19.5 knot ile dünya çapında ticaret yapabilme yeteneğine sahiptir, kış kısmında konaklama mahalleri yer almaktadır ve ayrıca uygun koferdamlara sahip 5 adet membran kargo tankı bulundurmaktadır; ancak bu tasarım özellikle V-formuna dayalı tekne formu (Şekil 5) ve podlu sevk sistemi uyarlanmasıyla standart LNG gemilerinden farklılaşmaktadır (Claes and Guillaume-Combecave 2009). Dikeyler arası uzunluğu yaklaşık 303 m olan bu 220 000 m<sup>3</sup> kapasiteli LNG gemisinin 5 tankından 4'ü prizmatik geometriye sahiptir, V-formu olarak modifiye edilmiş olduğu için bu teknenin blok katsayısı ise standart gemiye göre daha düşüktür (Caprace, Bair, and Rigo 2010).



Şekil 5. STX tasarımı LNG gemisi (King 2010)

STX tasarımında gemi, ömrünün %90'ını balast kullanmadan seyir yapabilecek şekilde geliştirilmiştir ancak koşullara bağlı olarak, gemi ömrünün %10'unda balast kullanması gerekebilir (Caprace et al. 2010). Benzer kapasiteli standart bir LNG gemisi için 65.000 tondan fazla balast suyu ve çift dip boyunca uzanan balast tanklarına ihtiyaç duyulmaktadır, ancak bu tasarıma göre deniz suyu kullanılacak balast tanklarına sadece iki koşulda ihtiyaç duyulacağı öngörülmektedir (Claes and Guillaume-Combecave 2009):

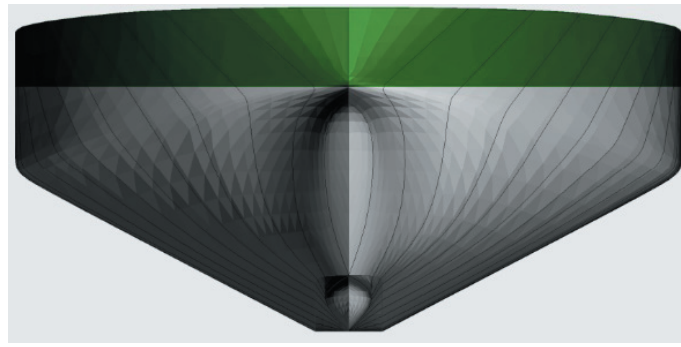
1. LNG yükleme/boşaltma işlemleri sırasında, yükleme kollarının erişimine uygun bir draftta ulaşmak için balast suyu gerekebilir ancak bu koşullarda kullanılmış olan balast suyu kalkıştan önce veya seyir başlangıcında terminale yakın bir bölgede deşarj edilebilir.
2. Seyir esnasında kötü hava koşulları ile karşılaşırsa kaptanın daha güvenli seyir için balast suyu alınmasına karar vermesi halinde gerekebilir.

Aynı ana boyutlara sahip geleneksel bir LNG taşıyıcısına kıyasla önerilen tasarımın pervane verimliliği biraz daha düşük olmasına rağmen, motorlar tarafından tüketilecek LNG tasarrufunun %0,56 ila %10 arasında olacağı hesaplanmıştır, bu ise günde 0,53 ila 9,5 ton gaza tekabül etmektedir; ayrıca, en karamsar hipotezde taşınacak balast suyu miktarının %80'den daha yüksek oranda azaltılacağı öngörülmektedir. (Caprace et al. 2010). Diğer taraftan, kimi terminalerin draft kısıtlaması nedeniyle

bu tasarımın 13 metrelik vasat draftı önemli bir dezavantaj olabileceğinden, daha küçük gemilere uyarlanması daha uygun olabilir; ayrıca küçük gemilerin rotalarının genellikle daha kısa olması sebebiyle balast operasyonları için harcanan zaman ve enerji küçük gemiler için daha büyük bir öneme sahiptir (Constantinescu, Rigo, and Guillaume-Combecave 2009).

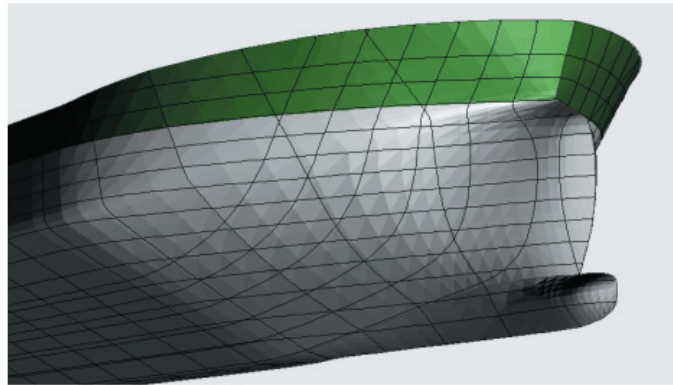
### 3.1.3. DNV Tasarımı Petrol Tankeri: *Equilibrium*

*Equilibrium*, Det Norske Veritas'taki (DNV) gemi mühensileri tarafından tasarlanan ve Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesi'nde (NTNU) bir yüksek lisans tezinde daha da geliştirilen, balastsız bir petrol tankeri konseptinin adıdır. Trapezoid şekilli gövdesi (Şekil 6) ve boyuna kargo tankları sayesinde *Equilibrium*, gerek taşıma sırasında gerekse yükleme ve boşaltma esnasında balast kullanmaz.



Şekil 6. Equilibrium'un önden görünüş resmi (King 2010)

*Equilibrium* tasarımının öne çıkan özelliklerinden bir tanesi iki yumruşalı oluşudur (Şekil 7). İki yumruşalı tasarımla hedeflenen ise yüklü durumda olduğu kadar yüksüz durumda da dalga direncinin düşürülmesidir. Bu ikinci balb aynı zamanda yüklü durumda başa tirimi engellemekte, baş tarafta ekta yumruşanın getireceği sephiyeye ihtiyaca ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 7. Equilibrium'un iki balblı baş formu (King 2010)

Burada incelenmiş olan çalışmada, yumruşaya henüz ideal şekli verilmemiştir, ancak tez çalışmasını gerçekleştirmiş olan King (2010) özellikle yüksüz durumda dövünmenin engellenmesi için alttaki yumruşanın formuna büyük önem verilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. King (2010) ayrıca yalpa hareketindeki ivmelere özel dikkat gösterilerek, geminin denizcilik yetenekleri üzerinde daha fazla analiz yapılması ihtiyacı olduğunu da belirtmektedir.

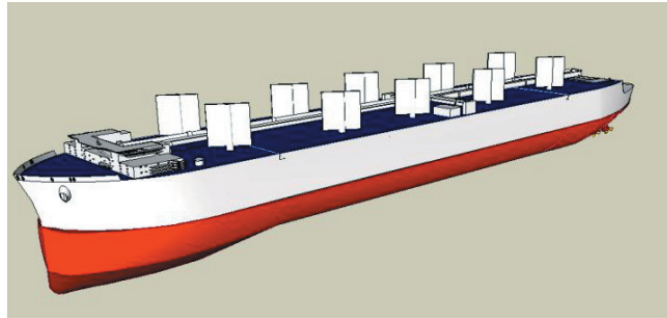
*Equilibrium*'un geleneksel tasarımlara göre en önemli avantajı kargosunu boşalttıktan sonra gerçekleşen balastsız dönüş ayaklarıyla yıllık bazda önemli bir yakıt ve CO<sub>2</sub> emisyonu tasarrufu sağlamasıdır; en önemli dezavantajı ise, Suezmax sınırlamalarından daha büyük olan *Equilibrium*'un kargo kapasitesinin geleneksel bir VLCC'den yaklaşık 60 000 ton daha düşük olmasıdır (King 2010).

Diğer taraftan 10 yıllık yaşam döngüsü maliyetlerinin aynı dönemde teslim edilen kargo miktarına bölünmesiyle elde edilen maliyet etkinlik endeksi, *Equilibrium*'un karlı bir tasarım olduğunu göstermektedir. Önerilen *Equilibrium* tasarımının, hem maliyet-fayda hem de çevresel etki açısından mevcut tankerlerle rekabet edebilecek kapasitede olduğu belirtilmektedir (King 2010).

### 3.2. Yuvarlatılmış Tekne Formu

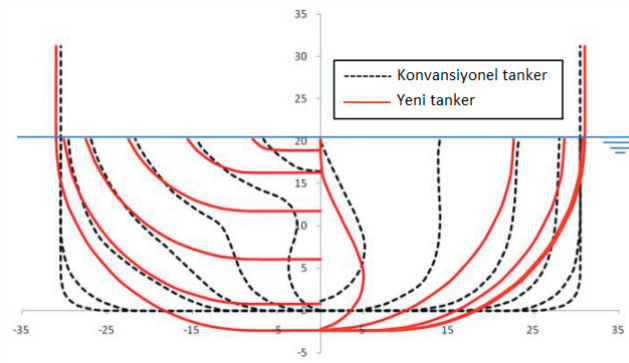
Bilindiği gibi konvansiyonel büyük tankerler ve dökme yük gemileri, daha büyük taşıma kapasitesi sağlamak için kare kesitli uzun paralel gövdelere sahiptir ancak kare kesit, sürtünme direncini artıran ıslak yüzeyin artmasına neden olduğu için daha yuvarlak kesitli paralel kısımlı gövdelere sahip balastsız gemi formu Japonya Osaka Prefecture Üniversitesi'nde geliştirilmiştir (He and Ikeda 2013; Momoki, Onishi, and Ikeda 2010; Tatsumi, Nihei, and Ikeda 2010),

Tatsumi ve diğ. (2010) tarafından enerji tasarruflu bir tanker geliştirmek üzere yapılan çalışmalarda viskoz direnci azaltmak için geminin yuvarlak hatlı ve aerodinamik bir gövde yapısına sahip olması ve de ıslak yüzey alanından kaynaklanacak direnci azaltmak için de geminin balastsız olması temel alınmıştır. Bu tasarımda balast suyu olmayan durumda bile pervane derinliğini korumak için derinliği değiştirilebilir podlu pervane kullanımı, rüzgar basıncı dahil hava direncini azaltmak için su yüzeyinin üzerinde aerodinamik şekil ve şiddetli rüzgarlarda sabit bir servis hızını korumak için yelken sistemi desteği önerilmektedir (Şekil 8 ) (Tatsumi et al. 2010).



**Şekil 8.** Enerji tasarruflu yuvarlatılmış hatlara sahip balastsız tanker (Tatsumi, Nihei, and Ikeda 2010)

Tatsumi ve diğ. (2010) tarafından yapılan çalışmada model gemi olarak 300.000 DWT konvansiyonel bir tanker seçilmiştir, yeni gövde formu (Şekil 9), model gemi ile aynı deplasman korunarak geliştirilmiş ve geminin direnç formu deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmalarda geliştirilen gövde şeklinin, tam yükte 0,08 ve hafif yüksüz durumda 0,1 olmak üzere, daha düşük form faktörlerine sahip olduğu tespit edilmiştir; geliştirilen formda ıslak yüzeydeki %6,1'lık düşüş direncin de aynı oranda azalmasına neden olmaktadır. Ancak baş kısmının, yay formunda olması nedeniyle, 0.1-0.15 arasındaki düşük Froude sayısı bölgesinde dahi model gemiye göre daha yüksek dirence neden olduğunu tespit edilmiş (Tatsumi et al. 2010); yumru başlı formda yuvarlatılmış hatlara sahip modellerle gerek deneysel gerek sayısal çalışmalara devam edilmiştir (He and Ikeda 2014; Van He, Nihei, and Ikeda 2012).



**Şekil 9.** Konvansiyonel tanker ve yuvarlatılmış hatlara sahip tankerin en kesitleri (Tatsumi et al. 2010)

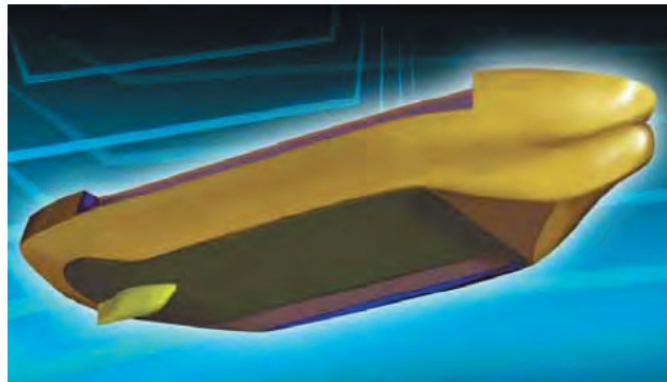
Şiddetli rüzgarlarda geminin hız kaybı üzerine yapılan çalışmalarda ise, konvansiyonel gemiye göre daha düşük dirence sahip olması nedeniyle modelin 20 m/s'lik yüksek rüzgarda bile servis hızını koruyabildiği ve konvansiyonel VLCC formu yerine önerdikleri formun uygulanması halinde Tokyo-Bahreyn arasında yapılacak balast koşulunda bir seyirde kullanılacak pervane gücünde %25'lik bir azalma sağlanacağını tespit edilmiştir (Momoki et al. 2010).

Diğer taraftan yuvarlak hatlara sahip paralel gövdeler, kare kesitli büyük tankerlere veya dökme yük gemilerine göre her ne kadar ıslak yüzey alanını (dolayısıyla sürtünmeyi) düşürse de, sahip oldukları yuvarlak kesitler nedeniyle yalpa performanslarının dikkatle araştırılması tavsiye edilmektedir (Miyake and Ikeda 2013).

### 3.3. Tekne Formuna Bağlı Diğer Konseptler

2011 yılında GEF-UNDP-IMO GloBallast Partnerships Programme Koordinasyon Birimi tarafından yayınlanmış olan raporda iki farklı tasarıma daha değinilmiştir (GESAMP 2011). Ancak bu tasarımlarla ilgili, belirtilen rapor dışında detaylı bilgi içeren yayınlara ulaşamamıştır. Bu nedenle bu iki tasarıma da burada kısaca yer verilecektir.

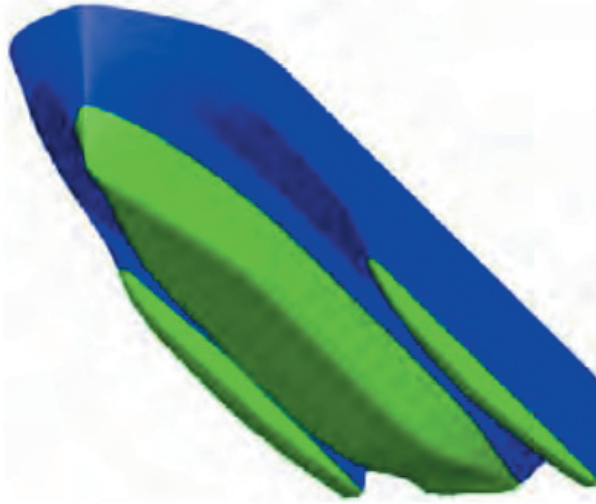
Bir geminin balast kullanmadan yüksüz seyir yaparken meyil yapması halinde, bu meyilli durumdan orjinal haline geri dönebilmesi uygun bir sephiye koşulunun sağlanmasına bağlıdır. Burada değinilecek her iki tasarımda bu koşulun sağlanabilmesi için geminin genişliği artırılarak, meyilli durumda ortaya çıkacak sephiye merkezinin konumunun, genişliği düşük bir gemiye kıyasla, geminin merkez hattının dışına doğru taşınması sağlanmaktadır.



**Şekil 10.** TU Delft tarafından tasarlanan sıfır balastlı monomaran gövde konsepti



Bu tasarımlardan ilki Delft Teknoloji Üniversitesi (*Delft University of Technology* (TU Delft)) tarafından bir katamaran formunun tek gövdeli tekne şeklinde adapte edilmesiyle geliştirilmiş olan 'monomaran' tekne (Şekil 10), ikincisi ise Det Norse Veritas (DNV) tarafından tasarlanan katedral tipi tekneye benzeyen üç gövdeli teknedir (Şekil 11).



**Şekil 11.** DNV tarafından tasarlanan sıfır balastlı katedral gövde konsepti

Yüksek inşa maliyetleri ve yüklü seyir halinde nispeten büyük ıslak yüzeylere sahip olmaları bu iki tekne tasarımının önemli dezavantajları olarak düşünülebilir. Her iki tasarımda geniş gövdeleri ve yüklü seyirlerde muhtemel yakıt maliyetleri nedeniyle dökme yük için uygun değiller ancak daha küçük 'yüksek hacimli' yük taşıyan gemiler için düşünülebilirler (GESAMP 2011).

Her ne kadar literatürde örneğine rastlanmasa da, yukarıda değinilen iki tasarım katamaran tekneleri akla getirmektedir. Ancak katamaranlar güverte alanını temel alan tasarım esasına sahiptir. Bu nedenle bu tip gemilerin daha çok yolcu taşımacılığı, araştırma gemisi gibi alanlarda kullanımı uygundur. Bu amaçla kullanıldığında tasarım doğaları gereği balast ihtiyaçları yoktur ya da çok düşüktür. Ancak yük taşıma açısından değerlendirildiğinde katamaran tipi gemilerin hacim esaslı yükler için uygun olmadığı görülmektedir. Bunun en önemli nedeni katamarandaki ikiz-teknelerin deplasmanının çok düşük olmasıdır. Bu tekneler, tekne içine yük alınması için uygun değildir. Güverte üzerine yapılacak yükleme ise ağırlık merkezini yukarı çekeceği için stabilitede önemli sorunlar yaratabilir. Diğer taraftan katamaran tipi gemilerin düşük açılarda ( $<5^\circ$ ) çok yüksek olan enine stabiliteleri, yalpa periyodunun çok düşük olmasına ve de dolayısıyla teknenin sert hareketler yapmasına neden olmaktadır. Bu durum katamaran teknelerin konteyner taşımacılığında kullanımını da güvenlik nedeniyle zorlaştırmaktadır. Çünkü teknenin sert hareketleri sonucunda konteynerlerin bağlama aparatlarına gelecek aşırı zorlamalar kazalara yol açabilir.

#### 4. Balastsız Seyirde Güncel Durum

Güney Kore, Ulsan merkezli *Hyundai Mipo* Tersanesi (*Hyundai Mipo Dockyard* (HMD)), bir Alman nakliye yönetim şirketi olan *Bernhard Schulte* için inşaatına 2017 yılında başladığı 7500 m<sup>3</sup> kapasiteli dünyanın en büyük LNG ikmal gemisini 2018 yılında teslim etmiştir (HMD 2018; SGMF 2018).

HMD'nin sintine kalkımlı V-formlu bir tekne olarak tasarladığı *Kairos* isimli bu geminin (Şekil 12) hasar dengesini koruyabilmesi ve de balast olmadan trim ve meyili kolayca kontrol edebilmesi için makine

dairesi ve güverte binası özel olarak baş tarafta doğru konumlandırılmış, ikiz azimut iticilere sahip sevk sistemi kullanılmıştır (LR 2018). Diğer taraftan, bildiği gibi balastsız gemilerin stabilitesini iyileştirmeye yardımcı olan sintine kalkımlı V-formun, aynı zamanda geminin hız performansını bozması da muhtemeldir. Bu nedenle HMD ağırlıklı olarak gövde formu optimizasyonuna odaklanmış ve model testleri ile de daha iyi performans gösterdiği onaylanan formunu geliştirerek ilk balastsız LNG ikmal gemisi olan *Kairos*'u inşa etmiştir (LR 2018).

*Kairos*'un piyasaya sürülmesinden sonra 2020 senesinde *Hyundai Mipo*, balastsız veya minimal balast konseptiyle 1.800 TEU feder konteyner tasarlamak üzere *Korea Maritime Transport* ve *Korean Register* ile bir Mutabakat Zaptı imzalamıştır.



**Şekil 12.** Balastsız çalışan LNG bunker gemisi *Kairos* (The Maritime Executive 2019)

Diğer taraftan Fransız şirket Gaztransport & Technigaz (GTT), ortağı *Hudong Zhonghua Shipbuilding Group Co. (HZ)* ile birlikte, balastsız gemi konseptiyle tasarlanmış *Shear-Water* LNG ikmal ve feeder gemisi (Şekil 13) için (LNGB&FV) için CCS, DNV ve BV'den Prensipten Onayı (*Approval in Principle (AIP)*) almış durumda. *Shear-Water*' konsepti, iki adet membran tankı bulunan, 18.700 m<sup>3</sup> kapasiteli V-gövde formuna sahip bir tekne olarak tasarlanmaktadır (GTT 2022).



**Şekil 13.** GTT'nin *Shear-Water* LNG gemisinin modeli (GTT 2022)

## 5.Sonuçlar ve Tartışma

Balast suyu probleminin ortaya konmasından sonra gündeme gelen gemilerin balastsız olarak inşa edilip edilemeyeceğine dair tartışmalar uzun yıllardır devam etmekte, bu konuda 20 yıldır çeşitli

konseptler geliştirilmektedir. Bu geliştirilen konseptlerde geminin güvenli seyri için ek yük alınması yerine sephiyede değişiklik yapabilecek sistemlere ve formlara yönelinmiştir.

Form değişikliğini temel alarak geliştirilen konseptler arasında yer alan yuvarlatılmış tekne formu ile ilgili çalışmalar, 'değişken sephiyeli sistem' ve V-gövde formuna dayalı sistemlere göre daha yenidir. Yapılmış olan bu çalışmalar, yuvarlatılmış çizgilere sahip teknenin direnci azalttığını ancak yumru baş kullanılması ve de stabilitenin detaylı bir şekilde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Balast suyu taşınımını ortadan kaldırmak ya da minimize etmek için önerilen konseptler arasında en farklı olanı tartışmasız Michigan Üniversitesi'nde geliştirilmiş olan Balastsız Gemi-Değişken Sephiye Sistemidir (*Ballast Free-Variable Buoyancy System*). Bu konsepti geliştirirken araştırmacılar konvansiyonel gemi inşa yaklaşımında bir anlayış değişikliğine giderek ağırlığı arttırmak yerine sephiyeyi değiştirecek bir sistem geliştirmişlerdir. Bu sistemde her ne kadar sephiyeyi değiştirmek için deniz suyu kullanılsa da, bu suyun, 'yerel' suyla sürekli olarak değiştirilmesi nedeniyle 'yabancı' deniz suyunun biyo-coğrafik bölgeler arasında taşınması engellenebilecektir. Öte taraftan konvansiyonel gemiye göre yüksek operasyon maliyetlerinin yanı sıra sephiye kanallarının bakım tutum maliyetleri de değerlendirilmelidir. Ayrıca araştırmacılar yaptıkları çalışmalarda baş ve kık bölgeler arasında kanallardaki suyu değiştirmeye yetecek basınç farkı bulunduğunu tespit etmiş olsalar da, bu giriş çıkış yerlerinin optimizasyonu çok büyük önem arz etmektedir, aksi takdirde kanala alınan su içerde hapsolabilir. Literatürde bu konseptin uygulandığı bir gemiye rastlanmamıştır, ancak son 10 yıllık literatür taramasında da bu konseptin araştırmacıların radarında olduğu görülmektedir.

V-gövde formuna dayalı balastsız (*non ballast*) veya minimal balastlı gemi konseptlerinde, geleneksel yaklaşımlarda kullanılan gemi formunun değiştirilmesi önerilmektedir. Bu konseptte göre geminin suyun içinde kalan kısmının daha narin olması ve de geminin alt kısmının aşağı doğru çıkıntı yapan bir form oluşturması önerilmektedir. Bu şekilde sephiye merkezinin yeri düşeyde değiştirilmekte ve aşağı doğru çekilmektedir. Ancak bu, bazı temel boyutların büyütülmesini de beraberinde getirmektedir. Geminin dolu draftının büyümesi nedeniyle derinlik sınırlaması olan bazı terminallerde ve de genişlikteki artış nedeniyle iskeleye yanaşmada çeşitli problemlerle karşılaşılabilir. Ayrıca gemi dolu haldeyken ıslak yüzeyin artmasından kaynaklanacak direnç artışı ve de gemi genişliğindeki artışın getireceği ek inşa maliyetleri değerlendirilmelidir. Diğer taraftan V-formunu temel alan gemilerde balast tankı kullanılmayacak olması (ya da minimuma indirilmesi), balast tanklarında yaşanan korozyon problemi ve bakım tutum masrafı ortadan kalkacak ya da minimuma indirilebilecektir. Bu form farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen konsept tasarımlarda kullanılmış, ancak sadece konsept tasarım olarak kalmamış, Hyundai Mipo Tersanesi (*Hyundai Mipo Dockyard (HMD)*) tarafında bir Alman nakliye yönetim şirketi olan *Bernhard Schulte* için inşa edilen *Kairos* isimli gemide uygulanmıştır. *Kairos* "Dünyanın ilk balastsız LNG ikmal gemisi" olarak lanse edilmiştir, bununla birlikte güncel literatürde *Kairos* dışında balastsız gemi olarak lanse edilmiş olan başka bir gemiye rastlanmamıştır. Diğer taraftan güncel literatürde yakın gelecekte balastız/minimal balastlı gemilerin inşa edileceğine dair anlaşmaların yapıldığı, klas kuruluşlarının bu gemilere prensip onayı verdiği görülmektedir.

Balast suyu problemi 1970'lerden beri güncelliğini korumaktadır. Bu süreçte başlangıçta bilim dünyası problemin boyutlarını ortaya koymuş, yaşanan büyük problemler ve ödenen bedellerin sonrasında problemin azaltılmasına yönelik yasal rejimler geliştirilmiş, bununla eş zamanlı olarak teknoloji geliştiriciler balast suyu arıtım sistemlerinin geliştirilmesine hız vermiştir. Gemi inşa sanayi ve mühendisleri ise ancak sözleşmenin yürürlüğe girmesinin ardından uygulayıcı olarak problemin çözüm aşamasına dahil olmuşlardır. Kurulum ve işletim maliyetleriyle milyonlar mertebesinde harcama gerektiren balast suyu arıtım sistemleri yoğun bir şekilde gemilere dahil edilmeye başlanmıştır. Bu

sistemlerin yabancı türlerin taşınmasında ne kadar etkili olacağı, önlemlere ihtiyaç duyulup duyulmayacağı ancak zamanla görülecektir.

Verimliliğin yanı sıra sitemlerin gemi üzerinde kaplayacağı hacim; sistem kapasitesinin yükleme/boşaltma süreçlerinde gemi ve limanla uyumlu olması; satın alma, işletim ve bakım tutum maliyetleri gibi birçok faktör değerlendirildiğinde, gemi inşa sektörünün uygulayıcı olmaktan ziyade proaktif bir şekilde çözüm üreteceği bir sürece gidildiği görülmektedir. Balastsız gemilerin tasarlanması, gemilerin balast suyu konusundaki düzenlemelerden muaf olmasını sağlayarak balast suyu arıtım sistemlerine yapılacak harcamaları ortadan kaldırırken, aynı zamanda balast tanklarına olan ihtiyacı da elimine ederek tanklarının bakım tutum maliyetlerinin de bertaraf edilmesini sağlayacaktır. Rota ve amaçları bakımından balastsız olarak inşa edilmesi mümkün olmayan gemilerse, minimum balast alacak şekilde inşa edilmesi hem sistem hem de balast tanklarıyla ilgili maliyetlerde önemli ölçüde düşüş sağlayacak, sistem seçiminde kapasite ve yer ile ilgili kısıtlayıcı faktörlerin etkisini en aza indirilecektir.

Elbette bu sektörün önündeki tek konu balast suyu ile ilgili kurallar değildir. Ancak özellikle 'sürdürülebilirlik' kavramının gelecek on yıl içinde mevcut teknoloji anlayışlarının hemen hemen tamamını değişikliğe zorlayacağı aşikardır. Ek maliyet olmadan, çevresel düzenlemelerin gereklerini karşılayabilecek gemilerin üretilmesine yönelik taleplerin artacağı yakın gelecekte, rekabet gücünün korunabilmesi için bu değişikliklere hızlı bir şekilde uyum sağlanması gerekmektedir.

Bu çalışmayla, balast suyunun vazgeçilmez olarak kabul edildiği mevcut gemi inşa anlayışında yaşanmakta olan paradigma değişikliğine dikkat çekilmekte; yakın ve orta vadede bu yönde yaşanacak talep ve ihtiyaca gerek tasarım gerek üretim gerekse denetim ve kontrol açısından hazırlıklı olunması gerektiğine işaret edilmektedir.

### Özetle:

1. Balastsız gemi için geliştirilen konseptlerde geminin güvenli seyirinin sağlanması için ek yük alınması yerine sephiyede değişiklik yapabilecek sistemlere ve formlara yönelinmiştir.
2. Balastsız Gemi-Değişken Sephiye Sistemi (*Ballast Free-Variable Buoyancy System*) tasarımında draftı sağlamak için yük eklemek yerine denizaltı prensibine benzer bir şekilde çalışacak sephiye kanalları kullanılmıştır. Bu tip bir tasarımda suyun kanallarda hapsolmemesi için baş ve kık plenum yerlerinin hassas bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir, ayrıca yüksek operasyon maliyetlerini ve sephiye kanallarının bakım tutum maliyetleri değerlendirilmelidir.
3. V-gövde formuna dayalı balastsız gemi (NOBS) ve minimal balastlı gemi (MIBS) konseptlerinde sephiye merkezi aşağıya doğru çekilmektedir. Ancak bu temel boyutların büyümesini beraberinde getirmektedir. Bu tip formlarda draft artışı derinlik sınırlaması olan bazı terminallerde; genişlik artışı ise iskeleye yansımadaki problemlere yol açabilir.
4. Yuvarlatılmış çizgilere sahip tekne formu direnci azaltmaktadır. Diğer taraftan bu tip gemilerde stabilitenin detaylı bir şekilde değerlendirilmesine ihtiyaç vardır.
5. V-gövde formu Hyundai Mipo Tersanesi tarafından inşa edilen ve "Dünyanın ilk balastsız LNG ikmal gemisi" olarak lanse edilen Kairos'da uygulanmıştır.

### Referanslar

Afif, Hairil, Norul Hidayah, Mohd Zamani Ahmad, Mohd Afifi, Abdul Mukti, Adi Maimun, Abd Malek, and Agoes Priyanto. 2012. "The Concept of Hybrid Ballast Free System." in The 6th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics-APHydro2012. Malaysia.

Albert, Ryan J., Edward Viveiros, Debra S. Falatko, and Mario N. Tamburri. 2017. "Feasibility of Potable Water Generators to Meet Vessel Numeric Ballast Water Discharge Limits." *Marine Pollution Bulletin* 120(1–2):82–89. doi: 10.1016/J.MARPOLBUL.2017.04.055.

Arslan, Osman, Murat Selçuk Solmaz, and Hasan Bora Usluer. 2022. "Determination of the Perception of Ship Management towards Environmental Pollution Caused by Routine Operations of Ships." *Aquatic Research* 5(1):39–52. doi: 10.3153/ar22005.

Bailey, Sarah A. 2015. "An Overview of Thirty Years of Research on Ballast Water as a Vector for Aquatic Invasive Species to Freshwater and Marine Environments." *Aquatic Ecosystem Health and Management* 18(3):261–68. doi: 10.1080/14634988.2015.1027129.

Bailey, Sarah A., Torben Brydges, Oscar Casas-Monroy, Jocelyn Kydd, R. Dallas Linley, Robin M. Rozon, and John A. Darling. 2022. "First Evaluation of Ballast Water Management Systems on Operational Ships for Minimizing Introductions of Nonindigenous Zooplankton." *Marine Pollution Bulletin* 182:113947. doi: 10.1016/J.MARPOLBUL.2022.113947.

Bax, Nicholas, Angela Williamson, Max Aguero, Exequiel Gonzalez, and Warren Geeves. 2003. "Marine Invasive Alien Species: A Threat to Global Biodiversity." *Marine Policy* 27(4):313–23. doi: 10.1016/S0308-597X(03)00041-1.

Bilgin Güney, Ceren. 2017. *BALAST SUYU ARITIM SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ*. İstanbul.

Bilgin Güney, Ceren. 2018. "IMO BALAST SUYU SÖZLEŞMESİ'NE GÖRE BALAST SUYU YÖNETİMİ VE GÜNCEL DEĞİŞİKLİKLER." *GİDB | DERGi* (12):21–36.

Campara, Leo, Vlado Francic, Lovro Maglic, and Nermin Hasanspahic. 2019. "Overview and Comparison of the IMO and the US Maritime Administration Ballast Water Management Regulations." *Journal of Marine Science and Engineering* 7(9).

Caprace, J. D., F. Bair, and P. Rigo. 2010. "Scantling Multi-Objective Optimisation of a LNG Carrier." *Marine Structures* 23(3):288–302. doi: 10.1016/J.MARSTRUC.2010.07.003.

Carlton, JAMES THEODORE. 1979. "History, Biogeography, and Ecology of the Introduced Marine and Estuarine Invertebrates of the Pacific Coast of North America." University of California.

Chu, K. H., P. E Tam, C. H. Fung, and Q. C. Chen. 1997. "A Biological Survey of Ballast Water in Container Ships Entering Hong Kong." *Hydrobiologia* 352:201–6. doi: 10.1023/A:1003067105577.

Claes, L., and J. L. Guillaume-Combecave. 2009. "An Innovative LNG Carrier." Pp. 87–89 in *EU FP6 project IMPROVE-Final Conference IMPROVE 2009, Conference Papers Vol 1*, edited by V. Žanić and J. Andrić. Zagreb.

Constantinescu, A., P. Rigo, and J. L. Guillaume-Combecave. 2009. "LNG Carrier – New Innovative Product." Pp. 96–99 in *EU FP6 project IMPROVE-Final Conference IMPROVE 2009, Conference Papers Vol 1*, edited by V. Žanić and J. Andrić. Zagreb.

Davidson, Ian C., and Christina Simkanin. 2012. "The Biology of Ballast Water 25 Years Later." *Biological Invasions* 14(1):9–13. doi: 10.1007/s10530-011-0056-1.

Elkady, Hesham, Duan Feng Han, and Liang Gao Gao. 2014a. "The Effect of Rise Angle of V-Hull Non Ballast Ship on Resistance Performance." *Applied Mechanics and Materials* 619:110–14. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.619.110.

Elkady, Hesham, Duan Feng Han, and Liang Gao Gao. 2014b. "The Resistance Performance Influences

Elkady, Hesham, Duan Feng Han, and Liang Gao Gao. 2014b. "The Resistance Performance Influences from Hull Line Variation of V-Shaped Non-Ballast Ship (NOBS)." *Advanced Materials Research* 936:2109–13. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.936.2109.

Gerhard, William A., Kim Lundgreen, Guillaume Drillet, Raphael Baumler, Henrik Holbech, and Claudia K. Gunsch. 2019. "Installation and Use of Ballast Water Treatment Systems – Implications for Compliance and Enforcement." *Ocean & Coastal Management* 181:104907. doi: 10.1016/J.OCECOAMAN.2019.104907.

GESAMP. 2011. *Establishing Equivalency in the Performance Testing and Compliance Monitoring of Emerging Alternative Ballast Water Management Systems: GloBallast Monographs No. 20*. London.

Godey, Avinash, S. C. Misra, and O. P. Sha. 2012. "Development Of A Ballast Free Ship Design." *International Journal of Innovative Research and Development* 1(10):567–81.

Godey, Avinash, S. C. Misra, and O. P. Sha. 2014. "CFD Analysis for a Ballast Free Ship Design." *Indian Journal of Geo-Marine Sciences* 43(11):2053–59.

Gollasch, Stephan, Dan Minchin, and Matej David. 2015. "The Transfer of Harmful Aquatic Organisms and Pathogens with Ballast Water and Their Impacts." Pp. 35–58 in *Global Maritime Transport and Ballast Water Management: Issues and Solutions*.

Gonçalves, Alex Augusto. 2013. "Bioinvasion Through Ballast Water : A Global Concern." *The Journal of Ocean Technology* 8(89):89–119.

Grigorovich, Igor A., Robert I. Colautti, Edward L. Mills, Kristen Holeck, Albert G. Ballert, and Hugh J. MacIsaac. 2003. "Ballast-Mediated Animal Introductions in the Laurentian Great Lakes: Retrospective and Prospective Analyses." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 60(6):740–56. doi: 10.1139/f03-053.

GTT. 2022. "GTT Receives an Approval in Principle from Bureau Veritas for 'Shear-Water', a New Concept for a Ballast-Free LNG Bunker & Feeder Vessel." *News*. Retrieved (<https://gtt.fr/news/gtt-receives-approval-principle-bureau-veritas-shear-water-new-concept-ballast-free-lng-bunker>).

Hallegraeff, Gustaaf M. 2015. "Transport of Harmful Marine Microalgae via Ship's Ballast Water: Management and Mitigation with Special Reference to the Arabian Gulf Region." *Aquatic Ecosystem Health and Management* 18(3):290–98. doi: 10.1080/14634988.2015.1027138.

Hallegraeff, Gustaaf M., and Christopher J. Bolch. 1991. "Transport of Toxic Dinoflagellate Cysts via Ships' Ballast Water." *Marine Pollution Bulletin* 22(1):27–30. doi: 10.1016/0025-326X(91)90441-T.

He, Ngo Van, and Yoshiho Ikeda. 2013. "Optimization of Bow Shape for a Non Ballast Water Ship." *Journal of Marine Science and Application* 12(3):251–60. doi: 10.1007/s11804-013-1196-8.

He, Ngo Van, and Yoshiho Ikeda. 2014. "Added Resistance Acting on Hull of a Non Ballast Water Ship." *Journal of Marine Science and Application* 13(1):11–22. doi: 10.1007/s11804-014-1225-2.

Van He, Ngo, Yasunori Nihei, and Y. Ikeda. 2012. "A Study on Application of a Commercial CFD Code to Reduce Resistance Acting on a Non Ballast Tanker ( Part 1 )." *Conference Proceedings, the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers* 14(Part 1):415–18.

Hess-Erga, Ole Kristian, Javier Moreno-Andrés, Øivind Enger, and Olav Vadstein. 2019. "Microorganisms in Ballast Water: Disinfection, Community Dynamics, and Implications for Management." *Science of The Total Environment* 657:704–16. doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2018.12.004.

HMD. 2018. "HMD Builds Ballast-Free Eco-Friendly Ship." *Press Releases*. Retrieved August 24, 2022 ([https://www.hmd.co.kr/english/ad/news\\_view.jsp?news\\_num=549&crp=3](https://www.hmd.co.kr/english/ad/news_view.jsp?news_num=549&crp=3)).

Hong, Wang, and Li Huabin. 2018. "Comment on Ballast Free Ship." *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)* 5(12):20–22. doi: 10.31873/ijeas.5.12.05.

IMO. 2004. *International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments*. International Maritime Organization.

IMO. 2021. "List of Type Approvals for Ballast Water Management Systems That Are in Accordance with the 2016 Guidelines (G8) or the BWMS Code (Resolution MEPC.279(70) or MEPC.300(72))." Retrieved (<https://www.imo.org/en>).

Kadir, Norul Hidayah, Adi Maimun Abdul Malik, and Arifah Ali. 2022. "Experimental of Ballast Free System with Air-Injected Pressure Bubbles in Reducing Ship Resistance." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 90(2):160–75. doi: 10.37934/arfmts.90.2.160175.

Kashiro, R. 2016. "Innovative Ship Design with Less Ballast Water and Less GHG TSCF 2016 Shipbuilders Meeting." Pp. 1–10 in *TSCF Shipbuilders Meeting*.

King, Tobias E. 2010. "EQUILIBRIUM – A BALLAST-FREE CRUDE OIL TANKER." Norwegian University of Science and Technology (NTNU).

Kotinis, M., and M. G. Parsons. 2010. "Hydrodynamics of the Ballast-Free Ship Revisited." *Journal of Ship Production and Design* 118(November 2010):451–64. doi: 10.5957/jspd.2010.26.4.301.

Kotinis, Miltiadis D. 2005. "DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF THE BALLAST-FREE SHIP CONCEPT." The University of Michigan.

Kotinis, Miltiadis, Michael G. Parsons, Thomas Lamb, and Ana Sirviente. 2004. "Development and Investigation of the Ballast-Free Ship Concept." *Transactions - Society of Naval Architects and Marine Engineers* 112:206–40.

Lavoie, D. M., L. D. Smith, and G. M. Ruiz. 1999. "The Potential for Intracoastal Transfer of Non-Indigenous Species in the Ballast Water of Ships." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 48(5):551–64. doi: 10.1006/ecss.1999.0467.

Lovell, Sabrina J., and Susan F. Stone. 2005. "The Economic Impacts of Aquatic Invasive Species : A Review of the Literature." *National Centre for Environmental Economics* 5(2).

LR. 2018. "Building the World's First Ballast-Free LNG Bunkering Vessel with HMD." *Lloyd's Register Latest News*. Retrieved (<https://www.lr.org/en/latest-news/building-the-worlds-first-ballast-free-lng-bunkering-vessel-with-hmd/>).

Maglić, Lovro, Damir Zec, and Vlado Frančić. 2015. "Effectiveness of a Barge-Based Ballast Water Treatment System for Multi-Terminal Ports." *Promet - Traffic&Transportation* 27(5):429–37.

Medcof, J. C. 1975. "Living Marine Animals in a Ships Ballast Water." *Proceedings National Shellfisheries Association* 65:11–12.

MEPC. 2018. *RESOLUTION MEPC.297(72) Amendments to The International Convention for The Control And Management of Ships' Ballast Water and Sediments- 2004*. Vol. 2.

Miyake, Tatsuya, and Yoshiho Ikeda. 2013. "A Study on Roll Damping of Bilge Keels for New Non-Ballast Ship with Rounder Cross Section." Pp. 23–26 in *Proceedings of the 13th International Ship Stability Workshop*.

Momoki, Tsutomu, Seiki Onishi, and Yoshiho Ikeda. 2010. "A Study on Ship Speed Loss of Non Ballast-Water Crude Oil Carrier in High Winds." Pp. 863–69 in *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*. Vol. 4.

National Research Council. 1996. *Stemming the Tide: Controlling Introductions of Nonindigenous Species by Ships' Ballast Water*. Washington, DC: The National Academies Press.

Occhipinti-Ambrogi, A., and D. Savini. 2003. "Biological Invasions as a Component of Global Change in Stressed Marine Ecosystems." *Marine Pollution Bulletin* 46(5):542–51. doi: 10.1016/S0025-326X(02)00363-6.

Ojaveer, Henn, Bella S. Galil, Stephan Gollasch, Agnese Marchini, Dan Minchin, Anna Occhipinti-Ambrogi, and Sergej Olenin. 2014. "Identifying the Top Issues of Marine Invasive Alien Species in Europe." *Management of Biological Invasions* 5(2):81–84. doi: 10.3391/mbi.2014.5.2.01.

Parsons, Michael G., and Miltiadis Kotinis. 2011. "Trim and Draft Control Capability of the Variable Buoyancy Ship." *Journal of Ship Production* 27(3):118–26. doi: 10.5957/jspd.2011.27.3.118.

Parsons, Micheal Parsons. 2010. "The Variable Buoyancy Ship: A Road to the Elimination of Ballast." in *Emerging Ballast Water Management Systems proceedings of the IMO-WMU research and development forum*, edited by N. Bellefontaine, F. Haag, O. Lindén, and J. Matheickal. Malmö, Sweden: WMU Publications.

Pereira, Newton Narciso, and Hernani Luiz Brinati. 2012. "Onshore Ballast Water Treatment: A Viable Option for Major Ports." *Marine Pollution Bulletin* 64(11):2296–2304. doi: 10.1016/J.MARPOLBUL.2012.07.026.

Pimentel, David, Rodolfo Zuniga, and Doug Morrison. 2005. "Update on the Environmental and Economic Costs Associated with Alien-Invasive Species in the United States." *Ecological Economics* 52(3):273–88. doi: 10.1016/J.ECOLECON.2004.10.002.

Ruiz, Gregory M., James T. Carlton, Edwin D. Grosholz, and Anson H. Hines. 1997. "Global Invasions of Marine and Estuarine Habitats by Non-Indigenous Species: Mechanisms, Extent, and Consequences." *American Zoologist* 37(6). doi: 10.1093/icb/37.6.621.

Satır, Tanzer, and Neslihan Doğan-Sağlamtimur. 2014. "ADAPTATION OF PORT WASTE RECEPTION FACILITIES TO BALLAST WATER TREATMENT SYSTEM: TURKISH PORT PERSPECTIVE." *Fresenius Environmental Bulletin* 23(11a):2895–98.

SGMF. 2018. "'Kairos' 7500m3 GSV Delivered to Bernhard Schulte." *Member Press Release*. Retrieved August 24, 2022 (<https://www.sgmf.info/posts/kairos-7500m3-gsv-delivered-to-bernhard-schulte>).

Suban, Valter, Vidmar Vidmar, and Marko Perkovič. 2010. "Ballast Water Replacement with Fresh Water – Why Not?" Pp. 53–76 in *Emerging Ballast Water Management Systems proceedings of the IMO-WMU research and development forum* *Management Systems*, edited by N. Bellefontaine, F. Haag, O. Linden, and J. Matheickal. Malmö.

Takahashi, C. K., N. G. G. S. Lourenço, T. F. Lopes, V. L. M. Rall, and C. a M. Lopes. 2008. "Ballast Water: A Review of the Impact on the World Public Health." *Journal of Venomous Animals and Toxins Including Tropical Diseases* 14(3):393–408. doi: 10.1590/S1678-91992008000300002.



Tatsumi, Takatoshi, Yasunori Nihei, and Yoshiho Ikeda. 2010. "Development of a New Energy Saving Tanker with Non-Ballastwater and Podded Propulsors Part. 1: Resistance of the Newly Proposed Ship." Pp. 821–24 in *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*. Vol. 4.

The Maritime Executive. 2019. "Interview: Delivering the Right Ballast Water Solution." *The Maritime Executive*. Retrieved July 24, 2022 (<https://maritime-executive.com/editorials/interview-delivering-the-right-ballast-water-solution>).

Wu, Huixian, Chen Shen, Qiong Wang, Richard B. Aronson, Chen Chen, and Junzeng Xue. 2019. "Survivorship Characteristics and Adaptive Mechanisms of Phytoplankton Assemblages in Ballast Water." *Journal of Oceanology and Limnology* 37(2):580–88. doi: 10.1007/s00343-019-7288-9.

# Covid-19 Nedeniyle Yolcu Gemilerinin Erken Geri Dönüşümünün Çevresel Sonuçlarının Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Mehmet Önal

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İzmir, Türkiye

mehmet.onal@ikc.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4596-8923

## ÖZET

Uçaklar, trenler ve otobüsler gibi ulaşım endüstrileri pandemi sırasında faaliyetlerine devam edebildi. Ancak kruvaziyer endüstrisinde işe dönüş koşulları daha karmaşıktı. Salgının bir sonucu olarak kruvaziyer turizm sektörü ekonomik bir sıkıntı dönemine girmiş ve bunu yoğun borçlanma ile aşmaya çalışmıştır. Bununla birlikte, birkaç şirket finansal varlıklarını sürdürmek için mevcut gemilerini satmaya karar verdi. Covid-19 süreci ile geri dönüşüme gönderilen kruvaziyer gemilerinin 10-15 yıl içerisinde geri dönüştürülmesi beklenirken, salgın nedeniyle geri dönüşüm tesislerinde kruvaziyer gemi geri dönüşümü arttı. Bu çalışma, Aliğa gemi geri dönüşüm tesislerine gönderilen yolcu gemilerinin, yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) kullanılarak Covid-19 etkisi kapsamında ortalama hizmet ömürleri dolmadan gerçekleştirilen geri dönüşümlerinin çevresel etki hesaplamasını göstermektedir. Çalışmanın sonuçları, küresel çevrenin Covid-19 salgını sonucunda kruvaziyer endüstrisinin dönüşümünden etkilendiğini kesin olarak göstermiştir. 10-15 yıl sonra geri dönüşüme gönderilmesi beklenen gemilerin çevresel etkilerinin günümüzde yaşanan etkileri belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** yaşam döngüsü değerlendirme, yolcu gemisi geri dönüşümü, covid-19, çevresel etki

**Makale geçmişi:** Geliş 19/09/2022 – Kabul 15/11/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1177101>

# Life Cycle Assessment of the Environmental Consequences of the Premature Recycling of Cruise Ships due to Covid-19

Mehmet Önal

Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, Faculty of Naval Architecture and Maritime, İzmir Katip Çelebi University, İzmir, Türkiye

mehmet.onal@ikc.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4596-8923

## ABSTRACT

Transportation industries such as airplanes, trains, and buses were able to resume operations during the pandemic. In the cruise industry, however, conditions for returning to work were more complex. As a result of the pandemic, the cruise tourism industry entered a period of economic difficulty and attempted to overcome it by borrowing heavily. Nonetheless, several companies decided to sell their existing ships to maintain their financial viability. Even though cruise ships sent for recycling via the Covid-19 process are expected to be recycled within 10 to 15 years, cruise ship recycling in recycling facilities has increased due to the epidemic. This study demonstrates the environmental impact calculation of cruise ships sent to Aliaga ship recycling facilities for disassembly before the end of their average service life under the Covid-19 effect using life cycle assessment (LCA). The results of the study demonstrated conclusively that the global environment had been affected by the transformation of the cruise industry as a result of the Covid-19 epidemic. The environmental effects of ships that must be sent for recycling after 10 to 15 years have to be experienced now.

**Keywords:** life cycle assessment, cruise ship recycling, covid-19, environmental impact

**Article history:** Received 19/09/2022 – Accepted 15/11/2022

## 1. Introduction

In 2020, when the coronavirus (Covid-19) epidemic afflicted the entire world, many sectors temporarily lost continuity. Positive and negative environmental impacts have resulted from international and national restrictions, changes in lifestyle, and policies intended to curb the virus's spread.

Tourism was one of the industries most affected by the epidemic (Zhang et al., 2021). Given that cruise tourism is a part of the international supply chain, it can be said that a significant portion of the tourism industry's impact is felt by cruise tourism. The cruise tourism industry, which entered a period of economic difficulty due to the pandemic, attempted to overcome this situation by borrowing heavily (Silva, 2021). However, some companies chose to sell their existing ships to ensure continued economic viability (Holland et al., 2021). Businesses that could not find a financial market for their ships during the pandemic also precipitated a global economic crisis and opted to recycle their vessels (ICS, 2021).

Even though cruise ships sent for recycling through the Covid-19 process are expected to be recycled within 10 to 15 years (Cruise Industry News, 2020), cruise ship recycling has increased in recycling facilities due to the epidemic.

This study demonstrates the environmental impact calculation of cruise ships sent to Aliaga ship recycling facilities for disassembly using life cycle assessment (LCA) before reaching the end of their average service life under the Covid-19 effect.

### 1.1. Cruise industry under the influence of Covid-19

The cruise industry, a part of the global supply chain, has previously been negatively affected by the Spanish, Asian, Hong Kong, H1N1, and SARS epidemics (Liu & Chang, 2020; Silva, 2021). Global health issues and developments have a direct impact on the cruise industry. The sector was negatively impacted by the terrorist attacks of September 11 (Goodrich J. N., 2002) and the economic crisis of 2008 (Carić & Mackelworth, 2014). Finally, the COVID-19 pandemic has been the industry's greatest challenge.

After the 'Diamond Princess' case, the COVID-19 outbreak began negatively affecting the cruise tourism industry (Liu & Chang, 2020). On February 4, the positive Covid-19 test of a passenger who left the Diamond Princess ship on January 25, 2020 was recorded as the first confirmed case. After reaching Yokohama, the ship was quarantined for fourteen days. On February 16, 2020, 355 passengers were diagnosed with Covid-19. On March 1, 2020, 712 individuals had been infected (Sözen et al., 2021).

The cruise industry has ceased operations more than a year after the pandemic, while other sectors have returned to profitability. This was because the conditions necessary for the cruise industry to continue operating were more stringent than those imposed on different modes of transportation, including airlines, trains, and buses (Da Silva, 2021).

Between March 2020 and February 2021, there were 3,519 confirmed cases of coronavirus, including passengers and crew, and 73 passenger deaths. The first outbreak occurred on Diamond Princess, with 712 infected passengers and 14 fatalities. In March, there were 132 deaths on the Grand Princess and 852 cases, of which 22 were fatal, on the Ruby Princess. After these incidents, cruises were altered or cancelled, ships were quarantined, in-port bans were enacted, and ports were closed, particularly in Southeast Asia, Europe, and the Caribbean.

Crew and passengers were sent home due to cruise cancellations. The shutdowns caused by COVID-19 have affected all countries that are a part of the cruise industry, which plays a vital role in many local economies (Cruise Mapper, 2021).

The cruise industry contributes significantly to creating jobs and economic opportunities for millions of people worldwide. According to 2019 data collected before the pandemic, approximately 30 million passengers travelled on cruise ships, and 1,166 thousand people worked in this industry. The cruise industry's total economic output was 155 billion dollars (CLIA, 2021).

In the cruise industry, one of the most significant and well-executed examples of corporate planning, some companies act with a three-year plan that includes the location of the ships, itineraries, pricing, and menu items. Between 2009 and 2019, the sector grew at a rate of 5.4% annually due to the sector's planning expertise (CLIA, 2020). This expansion generates substantial value for agencies, ports, and associated labor in the international supply chain.

During the pandemic, transportation industries such as airplanes, trains, and buses were able to resume operations. However, the cruise industry's conditions for returning to work were more complex. In this instance, the perception was that other transportation industries are essential for survival, whereas the cruise industry serves a recreational and vacation purpose. Sizeable luxury cruise ships carry significantly more passengers than the largest passenger-carrying aircraft, and most cruises are substantially longer. As crowded passenger populations reside in confined spaces, the personnel density is also extremely high. Passengers on cruise ships are typically middle-aged or elderly, with a higher susceptibility to common medical conditions and lower disease resistance (Liu & Chang, 2020).

Although other transportation sectors also serve leisure and vacation purposes, the decision to halt all cruises had a direct or indirect negative impact on every worker in the cruise industry. Given that the cruise industry is the primary source of revenue for some cities, cancellations of cruises are anticipated to have lasting economic effects.

The UN's World Tourism Organization (UNWTO) anticipated a %70-80 decline in industry levels for 2020 (compared to 2019) due to international travel restrictions. According to UNWTO, the sector's financial impact is between \$0.85 billion and \$1 billion (UNWTO, 2021b).

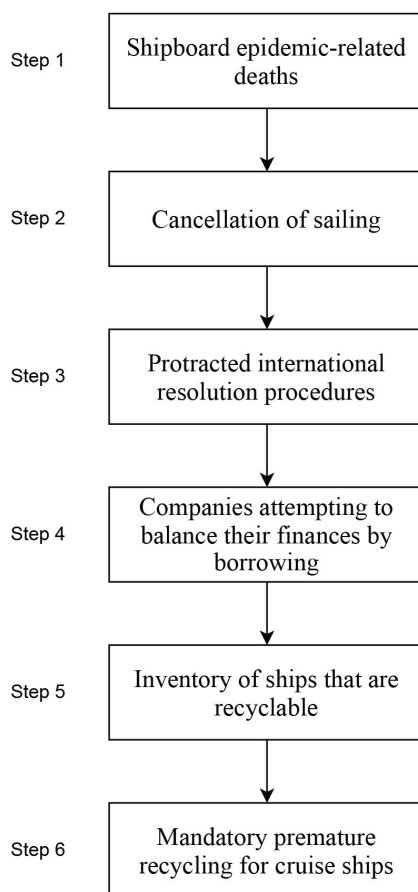
After the bans on the cruise industry, large corporations began the borrowing process: Carnival Cooperation (USD 3 billion), Royal Caribbean Group (USD 2.2 billion), and Norwegian Cruise Line Holdings (USD 1.55 billion) (Cruise Mapper, 2021).

In addition to the companies that were able to continue their operations by borrowing money from this dire financial situation, some companies faced the issue of idle ships. Following the cessation of operations, the companies analyzed the idle ship situation. This situational analysis includes a qualitative evaluation of the ship's facilities, equipment, and systems following an extended period of inactivity (DNV, 2021).

Because cruise ships are significantly more complex than commercial vessels, the cold storage requirements for this segment of ships are quite different. According to Olsen Cruise Lines, assessing economic risk is the most difficult task. It is challenging to balance minimizing costs during deployment and losses while continuing operations (DNV, 2021).

Recycling unused cruise ships is another way for companies to mitigate economic losses. Due to ship-specific factors, this option has become economically viable for some vessels. The cruise industry ceased operations in March 2020 and began recycling ships in the summer.

Cruise ships that have reached the end of their service life are recycled. The average lifespan of a cruise ship is between 35 and 40 years (Cruise Industry News, 2020). This is approximately 25 years for commercial ships. Some companies experiencing economic difficulties during the Covid-19 process chose to recycle their cruise ships before the end of their service lives. Figure 1 illustrates the respective recycling reasons for Cruise ships.



**Figure 1.** The cruise ship recycling path in the time of Covid-19 (step1 (Chen et al., 2020; Quintal et al., 2021), step2 (Choquet & Sam-Lefebvre, 2021; Holland et al., 2021; Renaud, 2020), step3 (Connell, 2021; Jordan et al., 2020; UNWTO, 2021a), step4 (Cruise Mapper, 2021), step5 (DNV, 2021), step6 (Gemisander, 2020))

After the average service life of cruise ships, they remain in service for an additional 10 to 15 years in secondary markets (Golden F., 2018). After their economic voyage, cruise ships can continue to serve by being transformed into floating hospitals in underserved nations. After all these procedures, the cruise ship will have the option to recycle. Due to the inability of the Covid-19 process to economically extend the service life of some cruise ships after their primary service period, they were sent for recycling in 2020 instead of 10 to 15 years later.

The cruise operators of EU nations struggled to cover their ships' personnel and other costs that could not sail and faced lawsuits. In response to this developing situation, the operators have rerouted their ships to EU-listed Aliaga recycling facilities. Table 1 lists the cruise ships recycled in Aliaga in 2020 and their construction years (Gemisander, 2020).

This study, which aims to determine the environmental impact of what occurred in the Cruise industry during the Covid-19 process, has revealed the environmental effects of the recycling process, which occurs in the Cruise industry before the average time and is required.

**Table 1.** Recycled Cruise Ships in 2020 at Aliaga (Gemisander, 2020)

Name	Construction Year
Sovereign	1990
Monarch	1991
Carnival Fantasy	1990
Carnival Inspiration	1993
Carnival Imagination	1995

## 2. Methodology

LCA was used in the study to determine the environmental impact of system inputs. LCA is utilized in the maritime sector. There have been studies conducted on shipbuilding (Önal, 2022a), operation/fuel consumption (Bilgili & Celebi, 2018), and recycling (Önal, 2022b). In this study, the life cycle assessment was utilized to determine the environmental impacts of the recycling operations of the relevant cruise ships.

LCA can be used to determine the environmental impacts of systems. It is possible to create alternative applications or scenarios that reduce environmental impacts. It is a technique used to identify and evaluate environmental effects. In this study, the environmental effects of cruise ship recycling are revealed. No comparison has been made between the obtained results. The study implemented the LCA method to assess the environmental impact of ship construction, operation, and recycling (Önal et al., 2021). Table 2 outlines the LCA phases and descriptions for cruise ships. By analyzing the inputs and outputs of a product or service system within a confined area, LCA allows observing the environmental results in different impact categories.

**Table 2.** Cruise Tourism LCA Impacts (Johnson, 2002)

Impacts	Explanation
Infrastructure	Ship construction, terminal facilities, general modifications, local construction
Operational	Use of energy and water, air quality pollution
Distribution	Supplying a cruise liner and requirements for transport
Use	Consumptions, use of chemicals, littering
Waste	Wastes from the ship (oils, garbage, sewage, plastics, hazardous substances)
Recycle	Ship recycling and transportation to steel mills

As a result of the effects of Covid-19, the recycling industry, like numerous other industries, entered a period of stagnation. With the recycling of passenger ships, the sector's stagnation has made way for mobility.

### 2.1. Goal and Scope

The study aims to determine the environmental effects of cruise ship recycling in the Aliaga region in 2020.

The LCA methodology reveals environmental implications to raise awareness within the ship recycling industry among decision-makers and stakeholders. This study centred on the metal removal processes of cruise ships, and the findings were presented by these procedures.

## 2.2. System Boundary and Inventory Analysis

O<sub>2</sub>, LPG, diesel fuel, and electricity consumption data during the recycling process were considered to calculate the environmental impacts of cruise ship recycling processes. The Aliaga Ship Recycling Industrialists' Association provided information on ships and recycling processes.

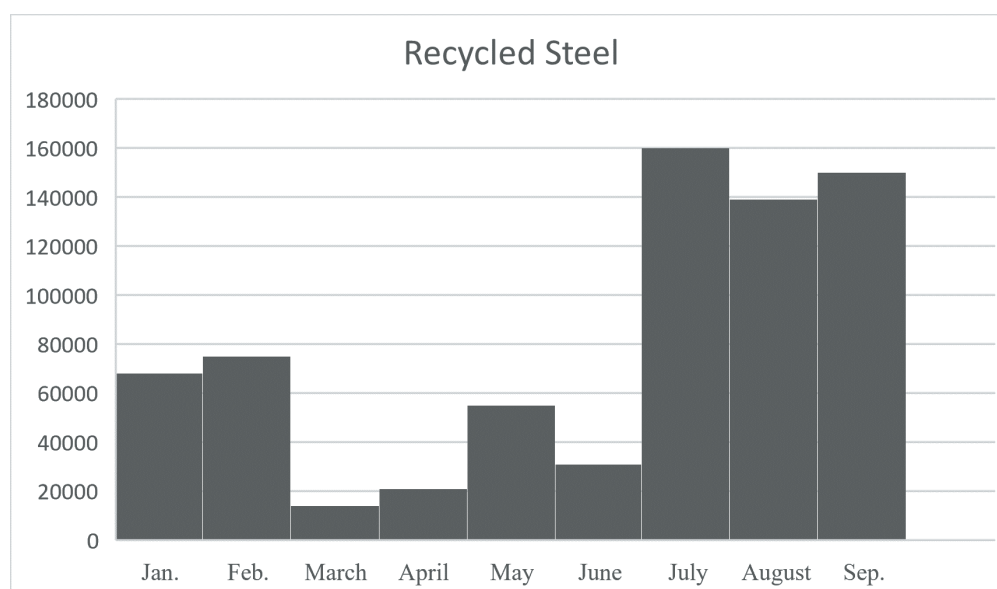
The recycling system inputs were evaluated by matching them to the Ecoinvent v3.01 database. The classification and characterization method used was CML-IA.

## 2.3. Impact Assessment Method

The study revealed the effect categories of abiotic depletion, abiotic depletion (fossil fuels), global warming potential, ozone depletion, human toxicity, freshwater aquatic ecotoxicity, marine aquatic ecotoxicity, terrestrial ecotoxicity, photochemical oxidation, acidification, and eutrophication.

Due to Covid-19, it is intended to reveal the environmental effects that occur during the recycling processes of ships sent for recycling before their average service life. In accordance with the obtained data and information from the literature, only the outcomes of the recycling data of the relevant ships were evaluated. There has been no comparison of environmental impact outcomes, such as one method versus another ship. The inventory of the study is categorized according to its environmental impact, and the resulting environmental burden is indicated.

The work in the Aliaga ship recycling area continued in 2020, albeit at a reduced rate, due to the pandemic. An intensive work process has begun with the arrival of cruise ships to Aliaga in June 2020. Figure 2 displays the tons of recycled steel in the Aliaga region by month in 2020.



**Figure 2.** Recycled steel tonnes at Aliaga ship recycling facilities Per Month in 2020



### 3. Results

During the pandemic, one sector's cessation has facilitated another's mobility. The cruise tourism and ship recycling industries both exhibit this result. Table 3 depicts the environmental impacts of the steel removal operations performed on recycled cruise ships in the Aliaga region.

Recycling of ships has occurred, as long-term docking of cruise ships has forced companies to consider ship recycling as a solution, albeit prematurely. Considering the average service life of cruise ships, the pandemic also accelerated the emergence of the environmental effects of the recycling process, which was believed to have occurred 10 to 15 years ago.

**Table 3.** Environmental impact categories of ship recycling phases for cruise ships

Impact category	Unit	Total
Abiotic depletion	kg Sb eq	0,85
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	$7,7 \times 10^7$
Global warming (GWP100a)	kg CO <sub>2</sub> eq	$2,7 \times 10^6$
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0,25
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	$5,5 \times 10^5$
Freshwater aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	$9,9 \times 10^4$
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	$1,84 \times 10^9$
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	$2,4 \times 10^3$
Photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	1075
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	$2,3 \times 10^4$
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> --- eq	1230

The study determined the environmental consequences of the early recycling of ships during the Covid-19 period. The environmental loads in the region were revealed by the obtained environmental impact results.

It indicates the carbon load, which has an effect on the category of global warming potential (GWP100a) as a result of the recycling processes of the ships sent for recycling as a result of the difficulties the cruise industry has encountered due to Covid-19. In regional carbon management and balancing calculations, this effect occurred earlier than expected and increased the regional carbon load.

### 4. Conclusion

The Covid-19 period has significantly affected health, the economy, and the environment. After this procedure may take years to eliminate the adverse global effects. It is believed that a separate effort should be made in each sector to return to normal the results resulting from the change in statistics that are usually considered. Even though cruise tourism has resumed with post-Covid-19 regulations, sector decision-makers should adopt different practices as new routines to avoid similar incidents in the future and compensate for losses.

The study's results clearly showed that our world had been environmentally affected by the change in the cruise industry due to the Covid-19 epidemic. The environmental impacts of the ships sent for recycling compulsorily after 10-15 years have to be experienced today. As a comparative factor, the ship recycling industry, which continues its activities with more environmentally friendly practices within the scope of sustainability activities, is anticipated to have lower environmental impacts for the same ships in the future if these ships can be recycled within the expected average timeframes.

## 5. Reference

- Bilgili, L., & Celebi, U. B. (2018). Developing a new green ship approach for flue gas emission estimation of bulk carriers. *Measurement*, 120(7), 121–127. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.002>
- Carić, H., & Mackelworth, P. (2014). Cruise tourism environmental impacts – The perspective from the Adriatic Sea. *Ocean & Coastal Management*, 102(2–3), 350–363. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.09.008>
- Chen, C.-M., Jyan, H.-W., Chien, S.-C., Jen, H.-H., Hsu, C.-Y., Lee, P.-C., Lee, C.-F., Yang, Y.-T., Chen, M.-Y., Chen, L.-S., Chen, H.-H., & Chan, C.-C. (2020). Containing COVID-19 Among 627,386 Persons in Contact With the Diamond Princess Cruise Ship Passengers Who Disembarked in Taiwan: Big Data Analytics. *Journal of Medical Internet Research*, 22(5), e19540. <https://doi.org/10.2196/19540>
- Choquet, A., & Sam-Lefebvre, A. (2021). Ports closed to cruise ships in the context of COVID-19: What choices are there for coastal states? *Annals of Tourism Research*, 86, 103066. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2020.103066>
- CLIA. (2020). STATE OF THE CRUISE 2020 INDUSTRY OUTLOOK. Cruise Lines International Association. <https://cruising.org/-/media/research-updates/research/state-of-the-cruise-industry.ashx>
- CLIA. (2021). 2021 State Of The Cruise Industry Outlook. Cruise Lines International Association. [https://cruising.org/-/media/research-updates/research/2021-state-of-the-cruise-industry\\_optimized.ashx](https://cruising.org/-/media/research-updates/research/2021-state-of-the-cruise-industry_optimized.ashx)
- Connell, J. (2021). COVID-19 and tourism in Pacific SIDS: lessons from Fiji, Vanuatu and Samoa? *The Round Table*, 110(1), 149–158. <https://doi.org/10.1080/00358533.2021.1875721>
- Cruise Industry News. (2020). Cruise Lines Eye 40-Year Service Life. <https://www.cruiseindustrynews.com/cruise-news/22139-cruise-lines-eye-40-year-service-life.html>
- Cruise Mapper. (2021). Coronavirus cruise ships and companies updates. <https://www.cruisemapper.com/coronavirus>
- Da Silva, A. L. R. (2021). An overview of the impact of COVID-19 on the cruise industry with considerations for Florida. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 10, 100391. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100391>
- DNV. (2021). Equipment Criticality Analysis supports successful recommissioning. <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/index.html>
- Gemisander. (2020). 2020 Ship Recycling Industrial Association Sector Report.
- Golden F. (2018). Where Do Old Cruise Ships Go to Die? *Bloomberg L.P.* <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-05-31/where-do-old-cruise-ships-go-to-die>
- Goodrich J. N. (2002). September 11, 2001 attack on America: a record of the immediate impacts and reactions in the USA travel and tourism industry. *Tourism Management*, 23, 573–580.
- Holland, J., Mazzarol, T., Soutar, G. N., Tapsall, S., & Elliott, W. A. (2021). Cruising through a pandemic: The impact of COVID-19 on intentions to cruise. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 9(3), 100328. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100328>

ICS. (2021). ICS Leadership Insights Live: Ship Recycling round-up. International Chamber of Shipping. <https://www.ics-shipping.org/news-item/ics-leadership-insights-live-ship-recycling-round-up/>

Johnson, D. (2002). Environmentally sustainable cruise tourism: a reality check. *Marine Policy*, 26(4), 261–270. [https://doi.org/10.1016/S0308-597X\(02\)00008-8](https://doi.org/10.1016/S0308-597X(02)00008-8)

Jordan, E. J., Vieira, J. C., Santos, C. M., & Huang, T.-Y. (2020). Do residents differentiate between the impacts of tourism, cruise tourism, and Airbnb tourism? *Journal of Sustainable Tourism*, 1–19. <https://doi.org/10.1080/09669582.2020.1833894>

Liu, X., & Chang, Y.-C. (2020). An emergency responding mechanism for cruise epidemic prevention-taking COVID-19 as an example. *Marine Policy*, 119, 104093. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104093>

Önal, M. (2022a). Evaluation of shipyard operation processes with cradle-to-gate life cycle assessment based on material consumption rates for an aluminum and steel yacht. *Ships and Offshore Structures*, 1–7. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2129920>

Önal, M. (2022b). Life Cycle Assessment Approach for the Ship Recycling Industry. *Proceedings of the International Scientific Conference SEA-CONF*, 227–232.

Önal, M., Neşer, G., & Gürsel, K. T. (2021). Environmental impacts of steel ship hulls building and recycling by life cycle assessment (LCA). *Ships and Offshore Structures*, 16(10), 1061–1066. <https://doi.org/10.1080/17445302.2020.1816706>

Quintal, V., Sung, B., & Lee, S. (2021). Is the coast clear? Trust, risk-reducing behaviours and anxiety toward cruise travel in the wake of COVID-19. *Current Issues in Tourism*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/13683500.2021.1880377>

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

Silva, A. L. R. d. (2021). An overview of the impact of COVID-19 on the cruise industry with considerations for Florida. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 10, 100391. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100391>

Sözen, A., Acar, B., & Neşer, G. (2021). Diamond Princess Kruvaziyer Gemisinde Covid-19 Salgın Yönetiminin Simülasyon Tabanlı İncelenmesi. *Istanbul Yeni Yuzyil Universitesi, Yeni Yuzyil Journal of Medical Sciences*, 2(2), 41–49. <https://doi.org/10.46629/JMS.2021.40>

UNWTO. (2021b). INTERNATIONAL TOURISM AND COVID-19. The World Tourism Organization. <https://www.unwto.org/international-tourism-and-covid-19>

UNWTO. (2021a). REPORT: TRAVEL RESTRICTIONS 3RD. The World Tourism Organization. <https://www.unwto.org/covid-19-travel-restrictions>

Zhang, H., Song, H., Wen, L., & Liu, C. (2021). Forecasting tourism recovery amid COVID-19. *Annals of Tourism Research*, 87(4), 103149. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2021.103149>

# Tersanelerde Yüksekte Çalışma Risklerinin AHP Tabanlı PROMETHEE ile Analiz Edilmesi

Mehmet Arif Öztürk<sup>1</sup>, Murat Yorulmaz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye  
<sup>2</sup> Denizcilik İşletmeleri Yönetimi Bölümü, Denizcilik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye

<sup>1</sup> (sorumlu yazar), marifozturk@hotmail.com, ORCID: 0000-0002-0410-1752

<sup>2</sup> murat.yorulmaz@kocaeli.edu.tr, 0000-0002-5736-9146

## ÖZET

Tersaneler gemi yapım, bakım-onarım, söküm faaliyetleri yapılan ve çok fazla sayıda çalışanın istihdam edildiği çalışma alanlarıdır. Bu durum deniz yolu taşımacılığı açısından üretimin sağlanması, istihdam sağlanması, savunma ihtiyacının karşılanması açısından ülke ekonomisine önemli katkı sağlamaktadır. Bunların yanı sıra tersaneler yürütülen farklı faaliyetler ve bu faaliyetlerin yürütülmesinde yardımcı olan çalışma yöntemleri (iskelede, merdivende çalışma, iş ekipmanları ile çalışma, vinçlerde çalışma vb.) açısından değerlendirildiğinde iş kazası yaşanma olasılığı yüksek olan alanlardır. Özellikle yüksekte çalışma işlerinde yaşanan kazalar ölümlerle sonuçlanabilmektedir. Kazaların önlenmesi risklerin incelenerek gerekli önlemlerin alınmasıyla mümkün olabilir. Bu kapsamda bu çalışmada, tersanelerde yüksekte çalışma risklerinin analiz edilmesi amaçlanmıştır. Yöntem olarak AHP tabanlı PROMETHEE yöntemi kullanılmıştır. İlk aşamada literatür araştırması ile yüksekte çalışma riskleri olarak yedi kriter; “çalışanın düşmesi, malzemenin düşmesi, elektrik çarpması, iskelenin/merdivenin devrilmesi/yıkılması, çarpma-çarpışma, statik hesaplama ve mühendislik yanlışlıkları ve meteorolojik koşullar” ve yüksekten düşme kazalarının önlenmesi için “denetim ve bakım, eğitim, kişisel koruyucu tedbirler ve toplu koruma yöntemleri” olarak dört alternatif belirlenmiştir. Kriterlerin ikili karşılaştırması ve alternatiflerin kriterlere göre ikili karşılaştırmasını yapmak amacıyla 1-9 karşılaştırma değerleri kullanılarak hazırlanan anket tersanede uzman olarak çalışan 5 kişi tarafından değerlendirilmiş ve veriler AHP ile işlem yapan Super Decision v2.1 programına girilerek kriter ağırlıkları belirlenmiştir. Bu değerlendirmeye göre çalışanın düşmesi kriterinin en yüksek risk olduğu sonucu çıkmıştır. Sonraki aşamada kriter ağırlıkları ve ikili karşılaştırma verileri Visual PROMETHEE programına girilerek alternatiflerin öncelik sırası belirlenmiştir. Bu değerlendirme sonucunda denetim ve bakım alternatif olarak ilk sırada çıkmıştır. Çalışanların düşmesini önleyici özellikle korkuluk, güvenlik ağı vb. toplu koruma yöntemlerinin uygulanmasına öncelik verilmesi ve denetim ve bakım faaliyetlerinin sürekli olarak yapılması riskleri ortadan kaldırarak kaza olasılığını düşürecektir. Bu çalışmada tersanelerde yüksekte çalışma riskleri, AHP tabanlı PROMETHEE yöntemleri ile analiz edilerek literatüre ve tersane sektörüne katkı sağlamıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Tersaneler, Yüksekte Çalışma, AHP, PROMETHEE

**Makale geçmişi:** Geliş 19/09/2022 – Kabul 25/11/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1177108>

# Analyzing The Risks of Working at Height in Shipyards with AHP-Based PROMETHEE

Mehmet Arif Öztürk<sup>1</sup>, Murat Yorulmaz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Occupational Health and Safety, Institute of Science, Kocaeli University, Kocaeli, Türkiye

<sup>2</sup> Department of Maritime Business Management, Faculty of Maritime, Kocaeli University, Kocaeli, Türkiye

<sup>1</sup> (corresponding author), marifozturk@hotmail.com, ORCID: 0000-0002-0410-1752

<sup>2</sup> murat.yorulmaz@kocaeli.edu.tr, 0000-0002-5736-9146

## ABSTRACT

Shipyards are work areas where shipbuilding, maintenance, repair and dismantling activities are carried out and a large number of employees are employed. This situation makes a significant contribution to the country's economy in terms of providing production, employment and meeting the defense needs in terms of maritime transport. In addition to these, when shipyards are evaluated in terms of the different activities carried out and the working methods that help in the execution of these activities (working on the pier, on the ladder, working with work equipment, working on cranes, etc.), they are areas with a high probability of occupational accidents. Accidents, especially in working at heights, can result in death. Preventing accidents can only be possible by examining the risks and taking the necessary precautions. In this context, in this study, it is aimed to analyze the risks of working at height in shipyards. AHP-based PROMETHEE method was used as the method. In the first stage, seven criteria as risks of working at height with literature research; "Inspection and maintenance, training, personal protective measures and collective protection methods for the prevention of "employee falling, material falling, electric shock, overturning/collapsing of scaffolding/ladder, crash-collision, static calculation and engineering errors and meteorological conditions" and fall from height accidents. Four alternatives have been identified. In order to make a pairwise comparison of the criteria and a pairwise comparison of the alternatives according to the criteria, the questionnaire prepared using 1-9 comparison values was evaluated by the experts working in the shipyard, and the criteria weights were determined by entering the data into the Super Decision v2.1 program that operates with AHP. According to this evaluation, it was concluded that the criterion of employee falling is the highest risk. In the next step, the criteria weights and pairwise comparison data were entered into the Visual PROMETHEE program and the priority order of the alternatives was determined. As a result of this evaluation, Inspection and Maintenance came first as an alternative. Especially guardrail, safety net etc. to prevent employees from falling. Giving priority to the implementation of collective protection methods and continuous inspection and maintenance activities will eliminate risks and reduce the probability of accidents. In this study, it is aimed to contribute to the literature and to shed light on similar studies by analyzing the risks of working at height in shipyards with the AHP-based PROMETHEE method.

**Keywords:** Shipyards, Working at Height, AHP, PROMETHEE.

**Article history:** Received 19/09/2022 – Accepted 25/11/2022

## 1. Giriş

Tersaneler yürütülen çalışmalar gemi yapımı, sökümü, bakım ve onarım, malzeme tedariki faaliyetlerinden oluşmaktadır. Tersaneler bu çalışmaların çeşitliliği ve istihdamın fazla oluşu dikkate alındığında kazaya neden olabilecek farklı birçok riski bünyesinde barındırmaktadır. Yaşanacak ölümlü veya yaralanmalı bir iş kazası işyerlerine ağır maliyetler çıkarabilmektedir (Tansoy, 2017).

Bütün iş kollarında çalışanların ölümü, yaralanması, kalıcı sakatlığı ile sonuçlanan iş kazaları meydana gelebilmektedir. Çok tehlikeli iş kolunda bulunduğu için kaza olasılığı tersanelerde de bulunmaktadır. Kazaları önlemeye yönelik yürütülecek ilk adım, yapılan işlerdeki riskleri belirleyip önleyici tedbirleri kaza yaşanmadan önce almak olmalıdır. İşin özelliğine, sektöre göre riskler belirlenerek bu riskler doğrultusunda önlemler alınmalıdır (Taylan, 2008).

Yapılan işler ve sektörel olarak bakıldığında tersanelerde; kaynak, boya, raspa, elektrik, kesme, montaj vb. çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar sırasında da erişimi ve malzeme taşınmasını/naklini sağlayacak çeşitli vinçler (mobil, teleskopik vb.), forkliftler, çeşitli tezgahlar (torna, freze vb.), iskeleler ve işin yapımına uygun makine ve ekipmanlar kullanılmaktadır (Yavuz, 2012). Gemi inşa faaliyetleri sırasında yapılan kaynak, iskelede çalışma, malzeme taşınması/nakli, makine ve tezgahların kullanımı, elektrik işleri vb. çalışmalar sırasında iş kazaları meydana gelmektedir. Bu nedenle kazaların önlenmesi için risklerin belirlenerek önleyici tedbirlerin alınması gerekmektedir (Özgül, 2014). Tersanelerde 2000-2013 yılları arasında yaşanan kazalar incelendiğinde ölümlü sonuçlanan kazaların nedenleri; yüksekte düşme, elektrik akımına maruz kalma, yangın ve patlama, cisim çarpması, sıkışma ve diğer olarak sıralanmaktadır (Barlas ve Çelebi, 2014).

Tersanelerde faaliyetlerin birlikte yürütülmesi, bu faaliyetler sırasında işe yardımcı ekipmanların kullanılması ve çalışan sayısının fazla olması durumları iş kazasına neden olacak riskleri ortaya çıkarmaktadır. Bütün bunların değerlendirilerek iş sağlığı ve güvenliği (İSG) çalışmalarının dikkatle yürütülmeli, bütün riskler tanımlanmalı ve önlemler alınarak kazaların önüne geçilmelidir. Özellikle de sonucu ciddi yaralanma ya da ölüm olan yüksekte çalışma işleri risklerinin belirlenmesi ve önlemlerin alınması önemlidir.

Bu çalışmada, tersanelerde yüksekte çalışma risklerinin belirlenmesi, analiz edilmesi, önem düzeylerinin sıralanması ve riskleri önleyecek alternatiflerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden AHP (Analytical Hierarchy Process) ve PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) yöntemleri tercih edilmiştir. Tersanelerle ilgili yapılan bazı çalışmalar; Bakacak (2007) çalışmada Çalışma Bakanlığı ve Sosyal Sigortalar Kurumu (Sosyal Güvenlik Kurumu) verilerinin incelenmesi şeklinde keşifsel veri toplama yöntemi kullanılarak gemi inşa ve onarım faaliyetlerinde meydana gelen kazaların analizi incelenmiştir. İzci (2015), çalışmada iş kazasına neden olabilecek tehlikeli durum ve davranışlar anketler yardımıyla belirlenmeye çalışılarak gemi inşa sanayinde iş kazaları ve analizi incelenmiştir. Tansoy (2017), çalışmada iş kazası istatistikleri araştırılarak ve örnek bir tersanede yaşanan kazaların kayıtları incelenerek tersanelerde iş kazalarının önlenmesinde alınması gereken tedbirler ve risk analizi yöntemleri incelenmiştir. Güler (2015), çalışmada 4 gemideki prosesler incelenerek kullanılan kimyasalların tehlike ve riskleri belirlenmiş ve Fine Kinney yöntemi ile risk değerlendirmesi yapılmıştır. Gündoğdu ve Seyfi-Shishavan (2021), çalışmada AHP ve VIKOR yöntemleri ile tersanelerdeki mesleki risklerin önceliklerine göre belirlenmesi incelenmiştir. Liu vd. (2021), çalışmada tersanelerde yaşanan kazalardaki insan faktörleri incelenmiştir. Caner Akın (2020), çalışmada AHP yöntemi ile tersanelerdeki tehlike ağırlıkları belirlendikten sonra L Tipi (5x5) risk değerlendirme matrisi kullanılarak risk değerlendirmesi yapılmıştır. Wulandari vd. (2018), çalışmada işyerine ait mevcut belgelerin (risk değerlendirmesi, çalışma talimatları vb.) analizi yapılarak tersanede gövde boyama işlemindeki riskler

ve risk değerlendirme yöntemi incelenmiştir. Zaman vd. (2019), çalışmada AHP yöntemi kullanılarak tersane işçilerinin iş kazasının bireysel ve işyeri faktörleri belirlenmesi incelenmiştir. Abd Rahman ve Daud (2021), çalışmada anket çalışması yapılarak tersane sektöründe kişisel koruyucu donanım uygunluğu bilinci incelenmiştir. Yılmaz vd. (2015), çalışmada bir tersanedeki iş kazası kayıtları incelenerek Türkiye'deki tersane kazalarının analizi yapılmıştır. Acuner ve Çebi (2016), çalışmada bulanık küme (fuzzy set) yöntemi ile risk olasılığı, şiddeti ve olay sıklığı bazında riskin büyüklüğü belirlenmeye çalışılmış ve tersanelerdeki iş kazalarında etkili risk önleyici model teklifi incelenmiştir. Yorulmaz ve Yanık (2021), çalışmalarında, AHP yöntemi ile denizcilik firmalarının kaptan adaylarının seçiminde öncelik vermesi gereken yönetici kriterlerini tespit etmeyi amaçlamıştır. Yorulmaz ve Öztürk (2022) ise çalışmalarında, AHP yöntemi kullanılarak tersanelerdeki iş kazası nedenleri önem düzeylerine göre belirlenmiştir.

Dolayısıyla tersanede yaşanan iş kazalarının incelenmesi ve bazı çalışma yöntemleri için risk değerlendirmesi şeklinde çalışmalar yapılmıştır. Ancak araştırmada ele alınan problem hiyerarşisi kapsamında AHP tabanlı PROMETHEE yöntemi kullanılarak tersanelerde yüksekte çalışma risklerinin AHP tabanlı PROMETHEE ile analiz edilmesi konusunda herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada tersanelerde yüksekte çalışma risklerinin AHP tabanlı PROMETHEE ile analizinin farklı bir bakış açısı ile değerlendirilmesi amaçlanarak bu yönüyle çalışmanın literatüre katkı yapması beklenmektedir.

## 2. Tersanelerde İş Süreçleri ve Yüksekte Çalışma

Tersanedeki çalışmalar süresince çok çeşitli makine ve ekipman kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları; kullanım amacına göre vinçler, ceraskal, forkliftler, çeşitli imalat tezgâhları, çeşitli testereler, matkaplar, presler, kaynak makineleri vb. olarak sıralanabilir. Bu ekipmanlar, makineler, cihazlar kullanım amacına ve yerine göre gemi üretimi, bakım-onarım faaliyetlerinin gerekli aşamalarında kullanılmaktadır.

Gemi üretimi sürecinde; sac malzemeye CNC tezgahlarında tasarıma uygun olarak yapılan kesim işlemlerini takiben presler yardımıyla istenilen şekil verilir. Tasarıma uygun olarak bloklar halinde montaj işlemi ile birleştirilir. Bu aşamada geminin boru sistemi montajı da yapılır. Oluşturulan bloklar kaldırma ekipmanları yardımıyla kızağa taşınarak kaynak işlemleri ile birleştirilir. Sonraki aşamada raspa ve boya işlemleri yapılır. Geminin teknik donanımı yerleştirildikten ve boya işlemleri tamamlandıktan sonra gemi kızaktan denize indirilir. Gemi donatımı işlemleri (makine ve boru sistemleri, elektrik tesisatı, izolasyon vb.) gemi denize indirildikten sonra tamamlanır. Tersanelerde imalat/üretim işleri dışında bakım onarım faaliyetleri de yapılmaktadır. Bu işlemler kapsamında; gemi sacı değişimi, periyodik bakım ve arıza onarımı faaliyetleri yapılmaktadır (Tansoy, 2017).

Gemi üretim süreci ve bakım onarım işlemleri sırasında risk yaratacak birçok çalışma yöntemi, ekipman, cihaz ve kimyasal madde kullanılmaktadır. Bunların neticesi olarak da çalışma alanı, ekipmanların neden olacağı riskler iş kazalarına neden olabilmektedir.

Tersanelerde yaşanan iş kazalarına bakıldığında kaza nedenleri; yüksekte düşme, elektrik çarpması, malzeme çarpması/düşmesi, patlama, sıkışma, diğerleri (boğulma, kalp krizi vb.) şeklinde olup özellikle yüksekte düşmeye bağlı kaza ve ölümler daha fazladır (Akyıldız ve Barlas, 2015).

Mevzuatımızda Yüksekte Çalışma **“seviye farkı bulunan ve düşme sonucu yaralanma ihtimalinin oluşabileceği her türlü alanda yapılan çalışma; yüksekte çalışma olarak kabul edilir.”** şeklinde belirtilmiştir (Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı [ÇSGB], 2013).

Tersanelerde iskelede çalışma (boya, raspa vb. işler), merdivende çalışma (montaj, platformlar arası iniş çıkış vb. işler), tekne ve havuzda çalışma, teleskopik vinçte çalışma (gemi yan kısımlarında yapılan boya, raspa vb. işler) işleri yüksekte çalışma işleri olarak değerlendirilir. Yüksekte yapılan çalışmalarda karşılaşılabilecek riskler genel olarak; çalışanın düşmesi, malzemenin düşmesi, elektrik çarpması, iskelenin/merdivenin devrilmesi/yıkılması, çarpma-çarpışma, statik hesaplama ve mühendislik yanlışlıkları ve meteorolojik koşullar olarak sıralanabilir (Çetinkaya, 2014). Görüldüğü üzere tersanelerde yürütülen çalışmalar sırasında özellikle çok çeşitli iş prosesleri ve çeşitli iş ekipmanları bulunmaktadır. Bu çalışmalar ve ekipmanların kullanılmasına bağlı olarak çeşitli risklerle karşılaşılması olasıyken ayrıca sağlanmakta olan çok sayıda personelinde aynı alanda bulunması tersanelerdeki risklerin daha da artmasına neden olabilmektedir.

### 3.Yöntem

Bu çalışmada, tersanelerde yüksekte çalışma risklerinin analiz edilmesinde kullanılacak ÇKKV yöntemi olan PROMETHEE yöntemine veri sağlanması amacıyla AHP yöntemi kullanılmıştır. PROMETHEE yöntemi diğer ÇKKV yöntemleri ile kıyaslandığında çok sayıda kriter için uygulanabilir basit bir yöntemdir (Dağdeviren ve Eraslan, 2008). PROMETHEE yöntemi alternatiflerin kısmi ve tam sıralamasını aynı anda sunarak her aşamaya müdahale edilmesine ve gözlem yapılmasına olanak sağlar. Verilerin sayısal ifadeler şeklinde olması avantaj sağlarken sayısal ifadelerle belirtilemeyen ve dilsel olarak ifade edilebilen kriter ve alternatifler dezavantajdır (Tuğrul, 2021).

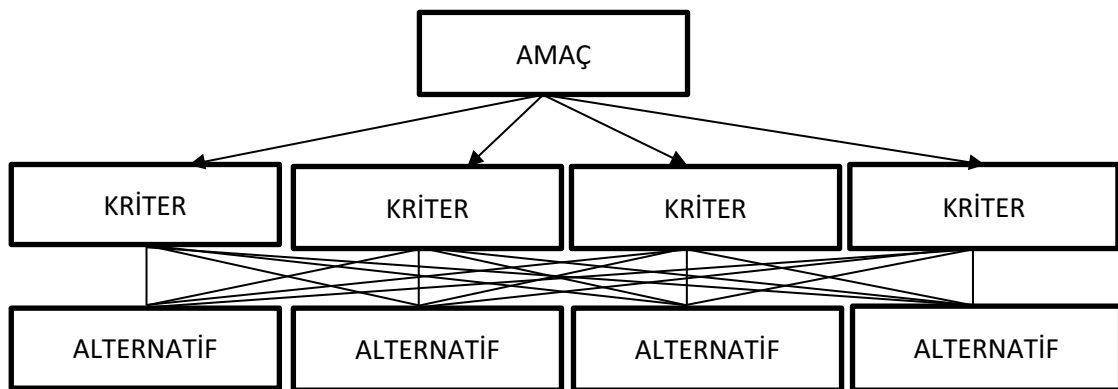
#### 3.1. Analitik hiyerarşi prosesi (AHP)

Analitik Hiyerarşi Prosesi Myers ve Alpert (1968) tarafından ortaya atılmış bir yöntemdir. Daha sonra Saaty tarafından geliştirilmiştir (Yaralıoğlu, 2001).

#### AHP Aşamaları

**Adım 1: Hiyerarşik Yapının Oluşturulması:** Problemin çözümüne yönelik amaç belirlenir. Bu amaca ulaşabilmek için kriterler ve alternatifler belirlenerek hiyerarşik yapı oluşturulur. Uzman görüşlerine başvurularak veya literatür araştırması doğrultusunda kriter ağırlıkları belirlenir (Caner Akın vd., 2020).

**Tablo 1.** AHP hiyerarşi modeli



**Adım 2: İkili Karşılaştırma Matrisinin Elde Edilmesi:** Kriterler kendi aralarında önem değerlendirilmesi yapılarak karşılaştırılır. Bu karşılaştırmada birbirlerine göre önem dereceleri belirlenmeye çalışılır (Caner vd., 2020).



**Tablo 2.** Karşılaştırmada kullanılan risk dereceleri (1-9 risk skalası) (Saaty, 1980; Özbek ve Erol, 2018)

Önem Derecesi	Sınıflama Problemleri	Sıralama Problemleri
1	Eşit riskli	İki faaliyet amaca eşit düzeyde katkıda bulunur
3	Birinin diğerine göre çok az riskli olması	Tecrübe ve yargı bir faaliyeti diğerine çok az derecede tercih ettirir
5	Kuvvetli derecede riskli	Tecrübe ve yargı bir faaliyeti diğerine kuvvetli bir şekilde tercih ettirir
7	Çok kuvvetli düzeyde riskli	Bir faaliyet güçlü bir şekilde tercih edilir ve baskınlığı uygulamada rahatlıkla görülür
9	Aşırı derecede riskli	Bir faaliyetin diğerine tercih edilmesine ilişkin kanıtlar çok büyük bir güvenilirliğe sahiptir
2,4,6,8	Ortalama riskli	Uzlaşma gerektiğinde kullanılmak üzere yukarıda listelenen yargılar arasına düşen değerler

**Adım 3: Matrisin Normalleştirilmesi:** Matrisin her sütun elemanının aynı sütunun toplam değerine bölünmesiyle yapılan işlemidir (Ediz vd., 2017).

**Adım 4: Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması:** Normalleştirme sonrasında her satır değeri toplanarak matris boyutuna bölünerek kriter ağırlıkları bulunur.

**Adım 5: Tutarlılığın Hesaplanması:** Bu aşamada değerlendirme sonuçlarının tutarlılığı hesaplanır. Sonuçların tutarlı olduğunu bu değer 0.1'den küçük olmasıyla anlarız. Bu durum sağlanmazsa değerlendirme tekrar gözden geçirilmelidir (Özdemir, 2020).

**Tablo 3.** Tutarlılık indeks değerleri (Rassal İndeks) (Bedir ve Eren, 2015)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57

**Adım 6: Nihai Önceliklere Göre Alternatiflerin Seçimi:** Değerlendirme sonuçlarına göre alternatifler arasında en uygun olanı tespit edilir (Tüminçin, 2016).

### 3.2. PROMETHEE

Bu çalışmada, tersanelerde yüksekte çalışma risklerinin analiz edilmesi için PROMETHEE yöntemi kullanılmıştır. ÇKKV yöntemi olan PROMETHEE, 1982 yılında Jean-Pierre Brans'ın çok kriterli öncelik belirleme amaçlı geliştirdiği bir yöntemdir (Kücü, 2007). PROMETHEE yöntemi ile alternatifler arasında kısmi ve tam sıralama yapılabilmektedir (Özguven Tayfun, 2015). Alternatifler tercih fonksiyonlarına göre değerlendirilir ve ikili karşılaştırma yapılarak kısmi ve tam öncelikleri belirlenir (Dağdeviren ve Eraslan, 2008).

PROMETHEE kullanılarak yapılmış çalışmalarda; Dağdeviren ve Eraslan (2008), çalışmada PROMETHEE yöntemi ile tedarikçi seçimi yapılmıştır. 6 kritere göre 5 alternatif tedarikçi değerlendirilmiştir. Şenkayas ve Hekimoğlu (2013), çalışmada tedarikçi seçimi probleminde PROMETHEE yöntemini kullanmışlardır. Yılmaz ve Dağdeviren (2010), çalışmada ekipman seçiminde PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE yöntemleri kullanılmış ve karşılaştırılmıştır. Ekipmanlar için 6 kriter belirlenmiş ve 11 alternatif belirlenerek değerlendirme yapılmıştır. Özguven Tayfun (2015), çalışmada perakendecilikte

müşterilerle iletişim yönteminin seçimi PROETHEE yöntemini kullanarak yapılmıştır. 4 kriter ve 6 alternatif üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Özdağoğlu (2013), çalışmada üretim işletmelerinde lazer kesme makinelerinin PROMETHEE yöntemi ile karşılaştırılması yapılmıştır. Mahbub vd. (2011), çalışmada iklim değişikliğinin kentsel yollardan uçucu organik bileşiklerin yıkanması üzerindeki etkilerini PROMETHEE ile değerlendirmiştir. Friend vd. (2011), Çin'in Pearl River Delta bölgesindeki uç bölgede havadaki ince parçacıkların bileşimini etkileyen etkenleri ve farklı alanlarda havanın ne kadar temiz olduğunu PROMETHEE yöntemi ile belirlemiştir. Bağcı ve Esmer (2016), çalışmada PROMETHEE yöntemi ile faktöring şirketi seçimi yapılmıştır. Bağcı ve Rençber (2014), çalışmada kamu bankaları ve halka açık özel bankaların PROMETHEE yöntemi ile karlılıklarının analizi yapılmıştır.

Bu çalışmada, tersanelerde yapılan yüksekte çalışma işlerinde oluşan riskler kriterler olarak belirlenmiştir. Riskleri ortadan kaldırmak için önlemler belirlenerek alternatifler oluşturulmuştur. Yüksekte çalışma işlerinde oluşacak risklerin öncelik sıralamasının belirlenmesi amacıyla kriterlerin ve alternatiflerin ikili olarak kıyaslanmasını sağlayacak şekilde anket oluşturulmuştur. Ankette kullanılan veriler literatür araştırması ile (Çetinkaya, 2014; İzci, 2015; Tansoy, 2017) elde edilerek Tablo 2'deki puanlama doğrultusunda ikili karşılaştırma şeklinde anket soruları haline getirilmiştir. Anketi İstanbul Tuzla bölgesi tersanelerinde iş güvenliği uzmanı olarak çalışan 5 kişi değerlendirmiştir. Anket; 26-55 yaş aralığında, ön lisans/lisans mezunu, 5-16 yıl iş güvenliği deneyimi olan A/B sınıfı İş Güvenliği Uzmanları tarafından değerlendirilmiştir. Anket Kocaeli Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Bilimleri Etik Kurulu'nun 06.06.2022 tarih ve 2022/13 no'lu toplantısında alınan 2 sıra sayılı kararı ve E-10017888-200-242541 sayılı onayı ile değerlendirmeye sunulmuştur.

#### **PROMETHEE Uygulama Adımları**

PROMETHEE yöntemi 7 adımdan oluşmaktadır.

**Adım 1:** Karar noktaları değerlendirmede kullanılacak kriterler tanımlanır. Kriterlerin önem ağırlıkları belirlenerek veri kümesi oluşturulur. Belirlenmiş olan alternatifler, alternatif özellikleri, bu özelliklerin önem ağırlıkları ve alternatiflerin bu özelliğe göre aldıkları değerlerle veri matrisi tablosu oluşturulur. Bu veri matrisinde;

$w = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$  ağırlıkları,

$c = \{f_1, f_2, \dots, f_k\}$  kriterleri ve

$A = \{a, b, c, \dots\}$  alternatifleri göstermektedir (Arslan, 2018).

**Tablo 4.** PROMETHEE veri matrisi (Eray, 2015).

Kriterler	A	B	C	...	w
$f_1$	$f_1(a)$	$f_1(b)$	$f_1(c)$	...	$(w_1)$
$f_2$	$f_2(a)$	$f_2(b)$	$f_2(c)$	...	$(w_2)$
...	...	...	...	...	...
$f_k$	$f_k(a)$	$f_k$	$f_k(c)$	...	$(w_k)$

**Adım 2:** Kriterler için tercih fonksiyonları tanımlanır.

#### **Tercih fonksiyonunda kullanılan parametreler;**

q: farksızlık değeri,

p: kesinlik değer eşliği,

s: p ve q arasındaki ara değer.

q farksızlık değeri, önemsiz görülebilecek değerlendirme faktörlerinin karar noktalarına göre en büyük fark değeri, p ise kesin tercih oluşturmak için yeterli görülecek en küçük farkı gösterir (Arslan, 2018).

**Tablo 5.** Tercih fonksiyonları (Brans ve Vincke 1985; Özdağoğlu, 2013).

Tip	Parametreler	Fonksiyon
Birincil Tip (Olağan)	-	$P(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}$
İkinci Tip (U Tipi)	l	$P(x) = \begin{cases} 0, & x \leq l \\ 1, & x > l \end{cases}$
Üçüncü Tip (V Tipi)	m	$P(x) = \begin{cases} x/m, & x \leq m \\ 1, & x > m \end{cases}$
Dördüncü Tip (Seviyeli)	q, p	$P(x) = \begin{cases} 0, & x \leq q \\ 1/2, & q \leq x \leq q + p \\ 1, & x > q + p \end{cases}$
Beşinci Tip (Doğrusal/Lineer)	s, r	$P(x) = \begin{cases} 0, & x \leq s \\ (x - s)/r, & s \leq x \leq s + r \\ 1, & x > s + r \end{cases}$
Altıncı Tip (Gaussian)	$\sigma$	$P(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1 - e^{-x^2 / 2\sigma^2}, & x \geq 0 \end{cases}$

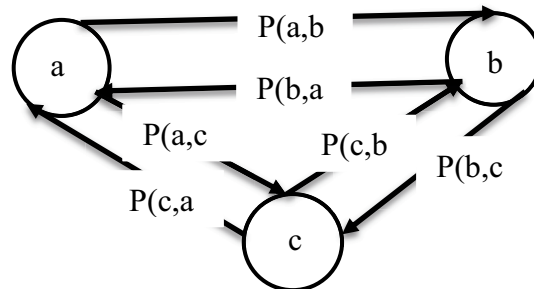
Buradaki x değeri değerlendirme faktörü açısından iki karar noktası değerleri arasındaki farktır.

Birinci Tip (Olağan) tercih fonksiyonu: Değerlendirme faktörü açısından herhangi bir tercih söz konusu değilse seçilecek tercih fonksiyonudur.

İkinci Tip (U Tipi) tercih fonksiyonu: Değerlendirme faktörü açısından belirlenen bir değer üstünde değere sahip karar noktalarından yana tercih kullanılmak isteniyorsa seçilecek tercih fonksiyonudur.

Üçüncü Tip (V Tipi) tercih fonksiyonu: Değerlendirme faktörü açısından ortalamanın üstünde değere sahip karar noktalarından yana tercih kullanılmak isteniyor ancak bu değer altındaki değerleri de ihmal edilmek istenmiyorsa seçilecek tercih fonksiyonudur.

**Tablo 6.** Ortak tercih fonksiyonlarının şematik gösterimi (Eray, 2015).



Dördüncü Tip (Seviyeli) tercih fonksiyonu: Bir değerlendirme faktörü açısından tercih belirli bir değer aralığına göre belirlenecekse seçilecek tercih fonksiyonudur.

**Beşinci Tip (Doğrusal/Linear) tercih fonksiyonu:** Bir değerlendirme faktörü açısından ortalamanın üstünde bir değere sahip karar noktalarından yana tercih kullanılacaksa seçilecek tercih fonksiyonudur.

**Altıncı Tip (Gaussian) tercih fonksiyonu:** Tercihle değerlendirme faktörü değerlerinin ortalamadan sapma değerleri belirleyici ise seçilecek tercih fonksiyonudur (Şenkayas ve Hekimoğlu 2013).

**Adım 3:** Tercih fonksiyonları ile alternatif çiftleri için ortak tercih fonksiyonları belirlenir.

**Adım 4:** Her bir alternatif çifti için tercih indeksleri belirlenir.

**Adım 5:** Alternatiflerin pozitif ve negatif üstünlükleri hesaplanır.

**Adım 6:** Kısmi öncelikler belirlenir.

**Adım 7:** Alternatifler için tam öncelikler hesaplanır.

#### 4. Bulgular

Bu çalışmada, tersanelerde yüksekte çalışma risklerinin AHP tabanlı PROMETHEE ile analiz edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan yüksekte çalışma riskleri literatürden (Çetinkaya, 2014; İzci, 2015; Tansoy, 2017) ve uzman görüşlerine başvurularak elde edilmiştir.

Tersanelerde yapılan iskelede çalışma, merdivende çalışma, tekne veya havuzda çalışmaya ve teleskopik vinçte çalışma işleri yüksekte yapılan işler olarak değerlendirilmektedir. Bu işlerin yapımı sırasında; çalışanın düşmesi, malzemenin düşmesi, elektrik çarpması, iskelenin/merdivenin devrilmesi/yıkılması, çarpma-çarpışma, statik hesaplama ve mühendislik yanlışlıkları, meteorolojik koşullar risk kriterleri için Çetinkaya (2014) çalışmasından faydalanılmıştır. İskelenin/merdivenin devrilmesi/yıkılması, elektrik çarpması, çarpma-çarpışma risk kriterleri için İzci (2015), elektrik çarpması, çalışanın düşmesi, iskelenin/merdivenin devrilmesi/yıkılması, malzeme düşmesi risk kriterleri için de Tansoy (2017) çalışmasından faydalanılmıştır.

Çalışma kapsamında tersanelerde yüksekte çalışma riskleri “*çalışanın düşmesi, malzemenin düşmesi, elektrik çarpması, iskelenin/merdivenin devrilmesi/yıkılması, çarpma-çarpışma, statik hesaplama ve mühendislik yanlışlıkları, meteorolojik koşullar*” olmak üzere yedi kriter belirlenmiştir.

Kriterlerin altında *denetim ve bakım, eğitim, kişisel koruyucu tedbirler ve toplu koruma yöntemleri* alternatifleri için değerlendirme yapılmıştır.

#### **Belirlenen kriterler şu şekildedir:**

**Çalışanın Düşmesi (ÇD):** İskele, merdiven, teleskopik vinç vb. yüksekte çalışma noktalarına erişim veya çalışma sırasında düşme,

**Malzemenin Düşmesi (MD):** İskele, merdiven, teleskopik vinç vb. yüksekte çalışma noktalarına erişim sırasında veya çalışırken kullanılacak malzeme, el aletleri vb. malzemenin düşmesi,

**Elektrik Çarpması (EÇ):** Elektrik işleri sırasında, iskelede çalışırken oluşacak kaçaklardan dolayı, iskele veya merdivende yapılan elektrik ark kaynağı çalışmasında oluşabilecek elektrik çarpmasını ve bunun sonucunda çalışanın yüksekte düşmesi,

**İskelenin/Merdivenin Devrilmesi/Yıkılması (İMDY):** İskelelin/merdivenin düzgün kurulmaması, iskele/merdivenin sabitlenmemesi, iskelenin uzman kişilerce kurulmaması, hareketli iskelelerin kendiliğinden hareketin önlenmemesi, kötü hava şartları vb. durumlardan dolayı iskelenin/merdivenin devrilmesi/yıkılması ve bunun sonucunda çalışanın yüksekte düşmesi,

**Çarpma-Çarpışma (ÇÇ):** Hareket halindeki veya sabit cisme çarpma ya da cisimle çarpışmayı,

**Statik Hesaplama ve Mühendislik Yanlılıkları (SHMY):** İskelenin kurulumunda ve kontrolünde yapılan hesaplama hataları,

**Meteorolojik Koşullar (MK):** Yüksekte çalışma şartlarını olumsuz etkileyecek rüzgâr, kar yağışı, don vb. kötü hava koşullarıdır.

Belirlenen Alternatifler şu şekildedir:

**Denetim ve Bakım (DB):** Denetim, çalışma şartlarının, çalışanların, saha koşullarının vb. uygunluklarının yerinde gözlemlenmesini ifade eder. Bakım, ekipman, malzeme, sistem vb. düzenli bakımlarının yapılmasını ifade eder

**Eğitim (E):** Çalışanların alması gereken iş sağlığı ve güvenliği, yüksekte çalışma, kişisel koruyucu kullanımı, iş ekipmanı kullanımı, iskelede çalışma, merdiven kullanımı vb. eğitimleri ifade eder.

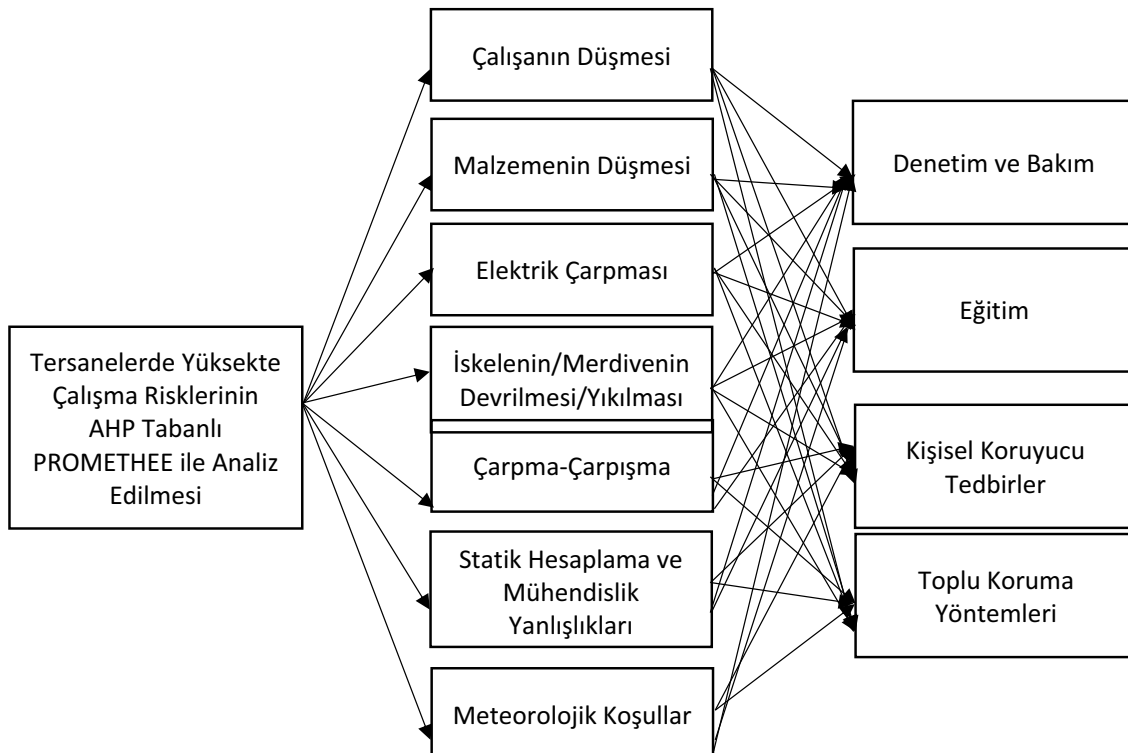
**Kişisel Koruyucu Tedbirler (KKT):** Emniyet kemeri, baret, eldiven, iş ayakkabısı vb. çalışanı bireysel olarak koruyacak tedbirleri ifade eder.

**Toplu Koruma Yöntemleri (TKY):** Korkuluk sistemleri, güvenlik ağı vb. koruma yöntemlerini ifade eder.

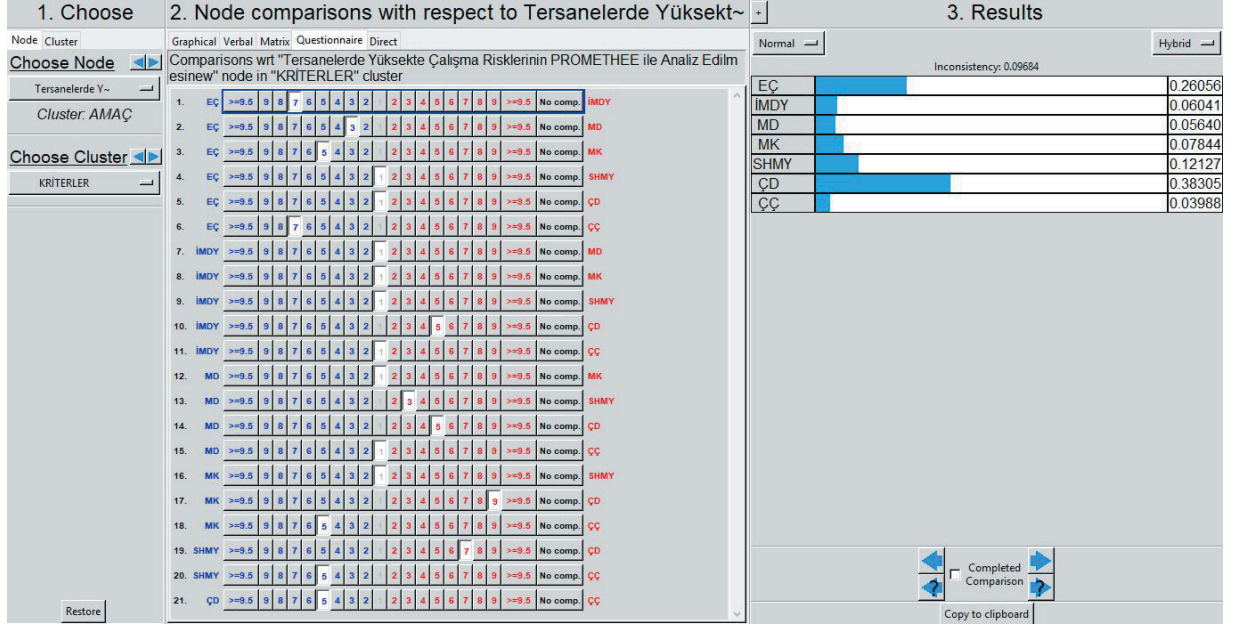
#### 4.1 AHP çözümü

Literatür incelemesi sonrası (Çetinkaya, 2014; İzci, 2015; Tansoy, 2017) elde edilen kriterlere göre oluşturulan hiyerarşik yapı Tablo 7’de gösterilmektedir. Tablo 7 incelendiğinde hiyerarşik yapının ilk aşaması olan amacın tersanelerde yüksekte çalışmada risklerinin AHP tabanlı PROMETHEE ile analiz edilmesi, daha sonraki kısımda ise yüksekte çalışma riskleri ve son kısımda da risklerin ortadan kaldırılması için belirlenmiş olan alternatifler yer almaktadır.

**Tablo 7.** Hiyerarşik yapı

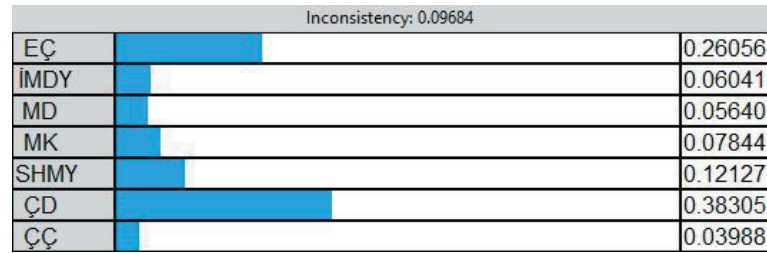


Kriterlerin birbirlerine göre risk derecelerinin belirlenmesinde Tablo 2’de gösterilen 1-9 karşılaştırma puanları kullanılarak anket hazırlanmış ve tersanede A/B sınıfı iş güvenliği uzmanı olarak çalışan, 36 yaş ortalaması olan ve 5, 6, 7, 11 ve 16 yıl işyeri tecrübesine sahip 5 kişinin değerlendirmesine göre belirlenmiştir. Ankete katılım sağlayanlara mail yoluyla ulaşılarak iletişim kurulmuştur. Hesaplamalar anket verilerinin AHP yöntemi ile işlem yapan Super Decisions 2.1 programına girilmesi ile yapılmıştır. Kriterlerin ve alternatiflerin Super Decisions 2.1 ile ikili karşılaştırması Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Kriterlerin ikili karşılaştırması

Uzman görüşleri sonucunda ortaya çıkan ikili karşılaştırma sonucu doğrultusunda kriterler arasında çalışanın düşmesi (ÇD) risk kriterinin yüksekte çalışma riskleri arasında en yüksek risk olduğu sonucu çıkmıştır. Karşılaştırma sonucuna göre çarpma-çarpışma (ÇÇ) riskinin ise en düşük risk olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 2’de görüldüğü gibi tutarlılık oranı 0.09684 şeklinde tespit edilmiştir.



Şekil 2. Kriterlerin ağırlık oranları ve tutarlılık oranı

Şekil 2 incelendiğinde; yüzdesel olarak %38.3 ile çalışanın düşmesi (ÇD) en yüksek orana sahip olan kriter olarak çıkmıştır. Malzeme düşmesinin de %3.99 ile en düşük orana sahip kriter olduğu ortaya çıkmıştır.

Alternatiflerin kriterlere göre ikili karşılaştırma sonucu Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8 incelendiğinde kriterlerin her bir alternatifin iki karşılaştırması sonucunda çalışanın düşmesi (ÇD) kriteri için 0.35005 oran ile toplu koruma yöntemleri (TKY) en yüksek orana sahip alternatif, 0.12315 oran ile denetim ve bakım (DB) en düşük orana sahip alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Malzeme düşmesi (MD) kriteri için 0.50441 oran ile toplu koruma yöntemleri (TKY) en yüksek orana

sahip alternatif, 0.07981 oran ile eğitim (E) en düşük orana sahip alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Elektrik çarpması (EÇ) kriteri için 0.38895 oran ile eğitim (E) en yüksek orana sahip alternatif, 0.12965 oran ile denetim ve bakım (DB) en düşük orana sahip alternatif olarak ortaya çıkmıştır. İskelenin/merdivenin devrilmesi/yıkılması (İMDY) kriteri için 0.33101 oran ile eğitim (E) en yüksek orana sahip alternatif, 0.18759 oran ile denetim ve bakım (DB) en düşük orana sahip alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Çarpma-çarpışma kriteri için 0.33101 oran ile kişisel koruyucu tedbirler (KKT) en yüksek orana sahip alternatif, 0.18759 oran ile denetim ve bakım (DB) en düşük orana sahip alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Statik hesaplama ve mühendislik yanlışlıkları kriteri için 0.53953 oran ile denetim ve bakım (DB) en yüksek orana sahip alternatif, 0.12049 oran ile eğitim (E) en düşük orana sahip alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Meteorolojik koşullar kriteri için 0.35005 oran ile kişisel koruyucu tedbirler (KKT) en yüksek orana sahip alternatif, 0.12315 oran ile denetim ve bakım (DB) en düşük orana sahip alternatif olarak ortaya çıkmıştır.

**Tablo 8.** Kriterler için alternatiflerin ikili karşılaştırması

Alternatifler Kriterler	Denetim ve Bakım	Eğitim	Kişisel Koruyucu Tedbirler	Toplu Koruma Yöntemleri
Çalışanın Düşmesi	0.12315	0.23452	0.29228	0.35005
Malzemenin Düşmesi	0.32019	0.07981	0.09558	0.50441
Elektrik Çarpması	0.12965	0.38895	0.30312	0.17829
İskelenin/Merdivenin Devrilmesi/Yıkılması	0.18759	0.33101	0.24070	0.24070
Çarpma-Çarpışma	0.18759	0.24070	0.33101	0.24070
Statik Hesaplama ve Mühendislik Yanlışlıkları	0.53953	0.12049	0.15017	0.18981
Meteorolojik Koşullar	0.12315	0.29228	0.35005	0.23452

Alternatiflerin ağırlık oranları Şekil 3'te verilmiştir.

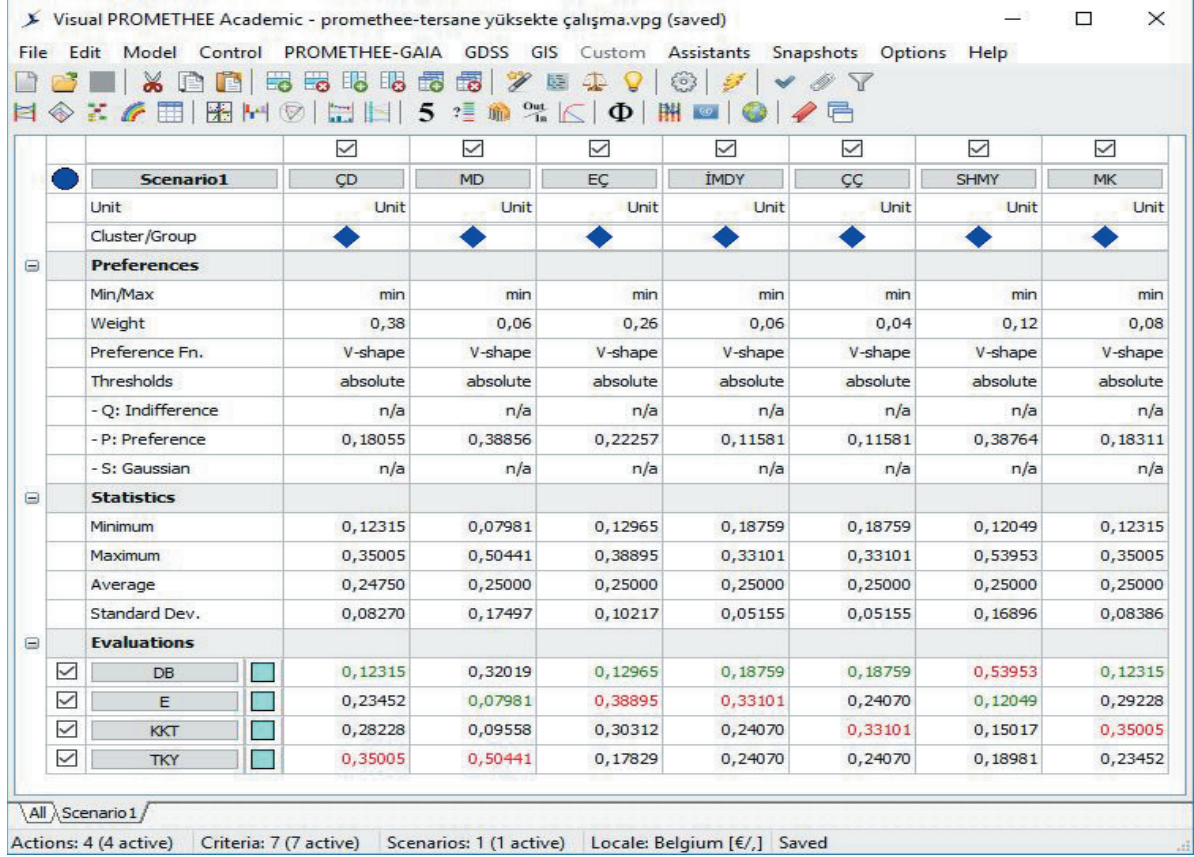
Name	Normalized by Cluster	Limiting
DB	0.19291	0.096455
E	0.26281	0.131405
KKT	0.26974	0.134869
TKY	0.27454	0.137270

**Şekil 3.** Alternatiflerin ağırlık oranı

Şekil 3 incelendiğinde alternatifler arasında en yüksek oran 0.27454 ile TKY olarak belirtilmiş olan *Toplu Koruma Yöntemleri* çıkmıştır. Diğer alternatifler; *Kişisel Koruyucu Tedbirler (KKT)* 0.26974, *Eğitim (E)* 0.26281 ve *Denetim ve Bakım (DB)* 0.19291 şeklinde sıralanmışlardır.

## 4.2 PROMETHEE Çözümü

PROMETHEE yöntemi ile yapılan çözümde, anket çalışması verilerine göre AHP yöntemi ile hesaplanan kriter ağırlıkları ve ikili karşılaştırma verileri Visual PROMETHEE programına girilerek sonuca ulaşılmıştır. Veri girişleri Şekil 4'te gösterilmiştir.

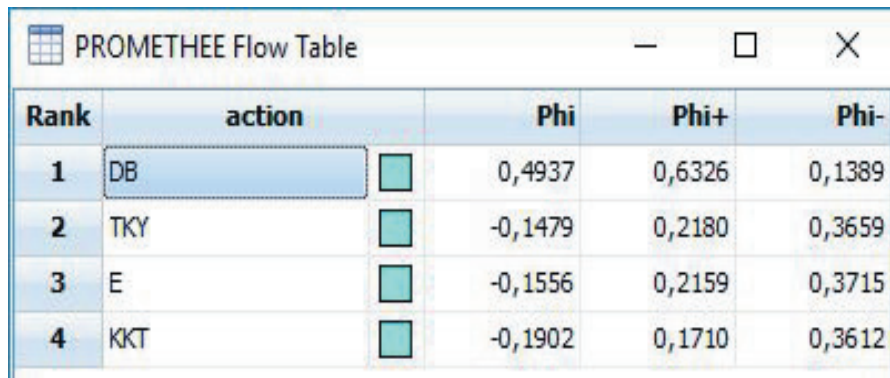


Scenario1	ÇD	MD	EÇ	İMDY	ÇÇ	SHMY	MK
Unit	Unit	Unit	Unit	Unit	Unit	Unit	Unit
Cluster/Group							
<b>Preferences</b>							
Min/Max	min	min	min	min	min	min	min
Weight	0,38	0,06	0,26	0,06	0,04	0,12	0,08
Preference Fn.	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- P: Preference	0,18055	0,38856	0,22257	0,11581	0,11581	0,38764	0,18311
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>Statistics</b>							
Minimum	0,12315	0,07981	0,12965	0,18759	0,18759	0,12049	0,12315
Maximum	0,35005	0,50441	0,38895	0,33101	0,33101	0,53953	0,35005
Average	0,24750	0,25000	0,25000	0,25000	0,25000	0,25000	0,25000
Standard Dev.	0,08270	0,17497	0,10217	0,05155	0,05155	0,16896	0,08386
<b>Evaluations</b>							
DB	0,12315	0,32019	0,12965	0,18759	0,18759	0,53953	0,12315
E	0,23452	0,07981	0,38895	0,33101	0,24070	0,12049	0,29228
KKT	0,28228	0,09558	0,30312	0,24070	0,33101	0,15017	0,35005
TKY	0,35005	0,50441	0,17829	0,24070	0,24070	0,18981	0,23452

Şekil 4. Visual PROMETHEE programı veri girişleri

Şekil 4'te gösterildiği üzere kriterlerin tercih yönleri ve tercih fonksiyonları belirlenmiştir. Bütün kriterler için ortalamanın altında kalan değerler de dikkate alınmak istendiği için tercih fonksiyonu Üçüncü Tip (V Tipi) fonksiyon seçilmiştir. Tercih yönleri de minimum olarak seçilmiştir.

Veriler programa girildikten sonra pozitif, negatif ve net üstünlük hesaplama sonuçları Şekil 5'te gösterilmiştir.



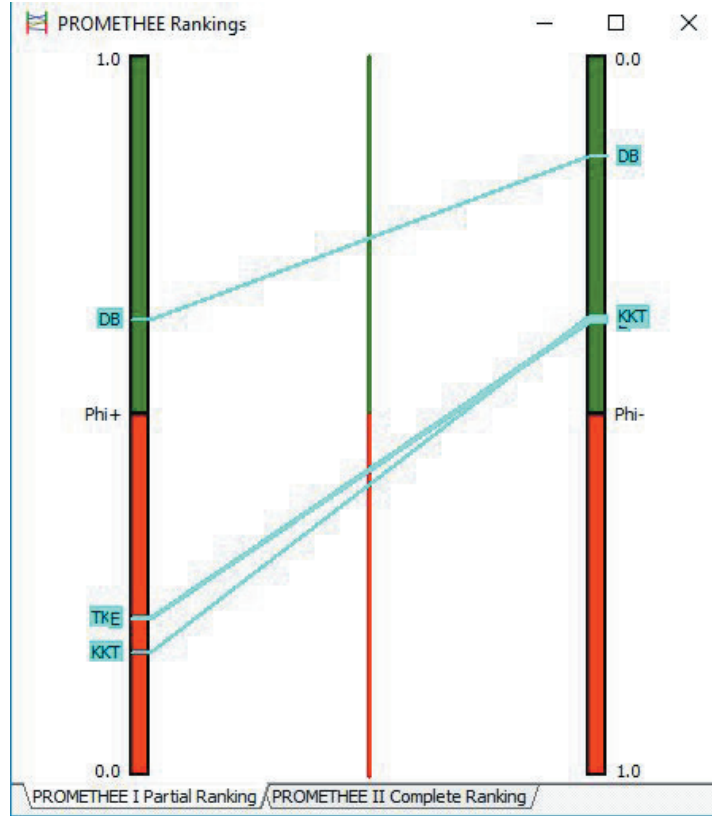
Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	DB	0,4937	0,6326	0,1389
2	TKY	-0,1479	0,2180	0,3659
3	E	-0,1556	0,2159	0,3715
4	KKT	-0,1902	0,1710	0,3612

Şekil 5. PROMETHEE üstünlük değerleri



Şekil 5 incelendiğinde pozitif (Phi+), negatif (Phi-) ve aradaki farklarından oluşan net üstünlük (Phi) değerlerinden net üstünlük değeri olarak 0.4937 oranı ile denetim ve bakım (DB) alternatifi ortaya çıkmaktadır. Diğerleri de sırasıyla toplu koruma yöntemleri TKY), eğitim (E) ve kişisel koruyucu tedbirler olarak sıralanmaktadır.

PROMETHEE I yöntemi ile belirlenen kısmi öncelikler Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. PROMETHEE I kısmi öncelikler

PROMETHEE I kısmi öncelik sıralamasına göre DB (Denetim ve Bakım) en iyi alternatif çıkmıştır. Diğerleri; KKT (Kişisel Koruyucu Tedbirler)TKY, (Toplu Koruma Yöntemleri), E (Eğitim) ve şeklinde sıralanmıştır.

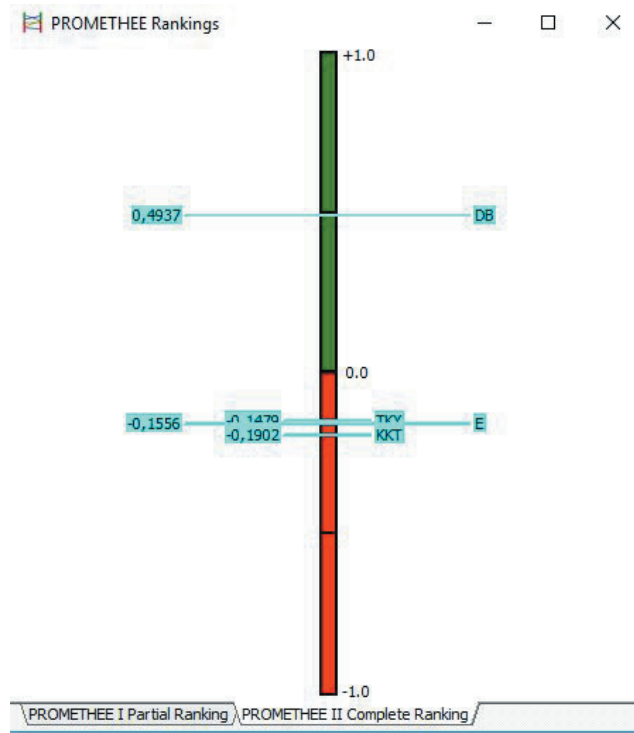
PROMETHEE II yöntemi ile belirlenen tam öncelikler Şekil 7'de gösterilmiştir.

PROMETHEE II tam öncelik sıralamasına göre DB (Denetim ve Bakım) en iyi alternatif çıkmıştır. Diğerleri; TKY (Toplu Koruma Yöntemleri), E (Eğitim) ve KKT (Kişisel Koruyucu Tedbirler) şeklinde sıralanmıştır.

## 5. Tartışma ve sonuç

Deniz taşımacılığı özellikle uluslararası taşımacılıkta önemli bir yere sahiptir. Bu bakımdan tersanelerin dünya ticaret hacmine katkısı çok önemli seviyededir. Tersaneler; gemi üretimi, bakım, söküm, tamir faaliyetlerinin yapıldığı, malzeme tedariki ve nakledilmesi işlerinin yoğun olduğu, çalışan sayısının çok fazla olduğu ve bu durumun çok hareket kattığı birçok iş kolunun aynı anda, aynı alanda çalışma yapmak durumunda olduğu çok tehlikeli bir iş koludur. Bu durum da beraberinde çalışma şekli, çalışılan makine ve ekipman kaynaklı birçok risk ortaya çıkarmaktadır. Özellikle gemi boyutlarından kaynaklanan seviye farklarının olması çalışmaların belli bir seviyenin üzerinde yapılmasını zorunlu hale

getirmektedir. Bu durum da yüksekte çalışma risklerini ortaya çıkarmaktadır. Tersanelerde iskelede çalışma, merdivende çalışma, tekne ve havuzda çalışma, teleskopik vinçte çalışma işleri genel olarak yüksekte yapılan çalışmalardır. Bu çalışmada tersanelerde yüksekte çalışma riskleri ve alınacak önlemler çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP tabanlı PROMETHEE ile analiz edilmiştir. Çalışmada, “çalışanın düşmesi, malzemenin düşmesi, elektrik çarpması, iskelenin/merdivenin devrilmesi/yıkılması, çarpma-çarpışma, statik hesaplama ve mühendislik yanlışlıkları ve meteorolojik koşullar” olmak üzere 7 kriter ve “bakım ve denetim, eğitim, kişisel koruyucu tedbirler, toplu koruma yöntemleri” gibi 4 önleyici tedbir de alternatifler olarak belirlenmiştir.



Şekil 7. PROMETHEE II tam öncelikler

Kriterleri kendi aralarında ve alternatifleri her kriter için ikili olarak karşılaştıracak şekilde anket oluşturulmuştur. Tuzla Tersaneler Bölgesinde iş güvenliği uzmanı olarak görev yapan 5 kişinin değerlendirmeleri AHP yöntemi ile işlem yapan Super Decisions v2.1 paket programına işlenerek kriter ağırlıkları bulunmuştur. Çıkan sonuçlara göre en yüksek ağırlığa sahip olan kriter “çalışanın düşmesi” olarak tespit edilmiştir. Bu sonuç doğrultusunda, yüksekte çalışma risklerini önlemeye yönelik yapılacak çalışmaların çalışan odaklı olması gerektiğini göstermektedir. Diğer kriterler ise en yüksekten düşük olana doğru “elektrik çarpması, statik hesaplama ve mühendislik yanlışlıkları, meteorolojik koşullar, iskelenin/merdivenin devrilmesi/yıkılması, malzeme düşmesi, çarpma-çarpışma” şeklinde sıralanmıştır. Elektrik çarpması diğerlerine göre ön plana çıkmıştır. Dolayısıyla elektrik çalışmaları ile ilgili risklerin detaylandırılarak doğru önlemlerin alınması sürecin kazasız ilerlemesini sağlayacaktır.

AHP yöntemiyle Super Decisions 2.1 kullanılarak elde edilen veriler PROMETHEE yöntemi ile çözüm yapan Visual PROMETHEE programına işlenerek alternatiflerin nihai sıralaması belirlenmiştir. Tam öncelik sıralamasına göre DB (Denetim ve Bakım) en iyi alternatif olarak tespit edilmiştir. Diğerleri; TKY (Toplu Koruma Yöntemleri), E (Eğitim) ve KKT (Kişisel Koruyucu Tedbirler) şeklinde sıralanmıştır. Çalışmadaki amaca ulaşabilmek için alternatifler önemlidir. Öncelik sırasında ilk sırada olan denetim ve bakım diğerleri için de uygulanabilirlik ve süreklilik sağlayacaktır.

Çalışmada elde edilen sonuçlara benzer olarak; Barlas ve Çelebi (2014), çalışmada 2000-2013 yılları arasında meydana gelen ölümlü kazaların %37,8'ini yüksekten düşme sonucu meydana geldiği tespit edilmiştir. Tezdoğan ve Taylan (2009), çalışmada 2000 yılı ile 2008 yılı haziran ayı sonuna kadarki süreçte Tuzla tersanelerinde ölümle sonuçlanan iş kazalarının %34'ünün yüksekten düşme nedeniyle meydana geldiği tespit edilmiştir. Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) 2021 istatistik verilerine göre yüksekten düşme sonucu yaşanan iş kazası sayısı 74.472 ve bu kazalar sonucu hayatını kaybedenlerin sayısı 221 olarak açıklanmıştır (SGK, 2022). Bu çalışmada belirli yüksekte çalışma risklerinin analizi yapılmış ve yüksekten düşmeyi önleyecek alternatifler (önlemler) belirlenmeye çalışılmıştır.

Sonuç olarak, yüksekte çalışma risklerinin en önemlisinin çalışanın düşmesi olduğu söylenebilir. Çalışanın düşmesini önleyecek mevzuata uygun korkuluk sistemi, güvenlik ağı, zemin kapakları gibi tedbirlerin alınmasına öncelik verilmelidir. Denetim ve bakımların sürekliliği sağlanarak riskler bertaraf edilmelidir. Bu çalışmanın kısıtı, tersanelerde yüksekte çalışma risklerinin ve alternatiflerinin amaç hiyerarşisinde belirtildiği şekilde AHP ve PROMETHEE yöntemleri kullanılarak ele alınmış olmasıdır. Dolayısıyla farklı faktörlerin ve alternatiflerin farklı yöntemlerle değerlendirilmesiyle farklı sonuçlar elde edilebilir. Buna göre ileride çalışmalarda tersanelerde yüksekte çalışma riskleri olarak farklı kriterler ve alternatiflerin farklı yöntemlerle ele alınması araştırmacılara önerilmektedir.

## Referanslar

Abd Rahman, S. H. S. and Daud, M. Y. M. (2021). Awareness of personal protective equipment compliance in shipyard industry. *Politeknik & Kolej Komuniti Journal of Life Long Learning*, 5(1), 79-90.

Acuner, O., and Cebi, S. (2016). An effective risk-preventive model proposal for occupational accidents at shipyards. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, 67(1), 67-84.

Akyıldız, H., and Barlas, B., (2015). Tersanelerde iş sağlığı ve güvenliği yönünden risk analizi yöntemleri, teknik rapor, İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Bölümü, DEN 2015/02, 12.

Arslan, R. (2018). Çok kriterli karar verme yöntemlerinin karşılaştırılması ve bütünleştirilmesi: OECD verileri üzerine bir uygulama. *Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sivas*, 513157.

Bağcı, H., ve Esmer, Y. (2016). PROMETHEE yöntemi ile faktoring şirketi seçimi. *Beykent Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 9(2), 116-129.

Bağcı, H., ve Rençber, Ö. F. (2014). Kamu bankaları ve halka açık özel bankaların PROMETHEE yöntemi ile kârlılıklarının analizi. *Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 6(1), 39-47.

Bakacak, M. (2007). Gemi inşa ve onarım faaliyetlerinde meydana gelen kazaların analizi. *Tezsiz Yüksek Lisans Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir*, 205289.

Barlas, B., ve Çelebi, U. B. (2014). Gemi inşa sektöründe iş kazaları. *Gemi Mühendisleri Odası Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, 202, 28-39.

Bedir, N., ve Eren, T. (2015). AHP-PROMETHEE yöntemleri entegrasyonu ile personel seçim problemi: perakende sektöründe bir uygulama. *Sosyal Bilimler Araştırma Dergisi*, 4(4), 46-58.

Brans, J. P., and Vincke, P. (1985). Note—A preference ranking organisation method: (the promethee method for multiple criteria decision-making). *Management science*, 31(6), 647-656.

Caner Akın, G. (2020). İş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirme süreci için yeni bir yaklaşım: Tersane işletmelerinde uygulama. Doktora Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 627700.

Caner Akın, G., Eren, Ö., Oral, H. V., ve Heperkan, H. A. (2020). Yeni bir risk değerlendirme yöntemi ile tersane işletmelerinin sınıflandırılması. *Business & Management Studies: An International Journal*, 8(1), 232-254.

Çetinkaya, O. (2014). Tersanelerde iş güvenliği analizi (JSA). Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 384892.

ÇSGB (2013). Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği.

Dağdeviren, M. ve Eraslan, E., (2008). PROMETHEE sıralama yöntemi ile tedarikçi seçimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(1), 70.

Ediz, A., Yıldızbaşı, A. ve Baytemur E., (2017). İş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemi performans göstergelerinin AHP ile değerlendirilmesi. *The Journal of Academic Social Science Studies*, (62), 275-294, DOI: 10.9761/JASSS7227.

Eray, E. (2015). İnşaat sektöründe tedarikçi seçiminde kullanılan çok amaçlı karar destek yöntemlerinin karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 389210.

Friend, A. J., Ayoko, G. A., and Guo, H. (2011). Multi-criteria ranking and receptor modelling of airborne fine particles at three sites in the Pearl River Delta region of China. *Science of the total environment*, 409(4), 719-737.

Güler, A., (2015). Gemi bakım onarım sektöründe kimyasal risk değerlendirmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 416962.

Gündoğdu, F. K., ve Seyfi-Shishavan, S. A. (2021). Occupational Risk Assessment Using Spherical Fuzzy Safety and Critical Effect Analysis for Shipyards. *Journal of ETA Maritime Science*, 9(2), 110-119.

İzci, F. B. (2015). Gemi inşaatı sanayinde iş kazaları ve analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 421129.

Kücü, H., (2007). PROMETHEE sıralama yöntemi ile personel seçimi ve bir işletmede uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 201059.

Liu, Y., Ma, X., Qiao, W., Luo, H., ve He, P. (2021). Human factor risk modeling for shipyard operation by mapping fuzzy fault tree into Bayesian network. *International journal of environmental research and public health*, 19(1), 297.

Mahbub, P., Goonetilleke, A., Ayoko, G. A., and Egodawatta, P. (2011). Effects of climate change on the wash-off of volatile organic compounds from urban roads. *Science of the Total Environment*, 409(19), 3934-3942.

Özbek, A. ve Erol E. (2018). AHS ve SWARA yöntemleri ile yem sektöründe iş sağlığı ve güvenliği kriterlerinin ağırlıklandırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 20(2), 51-66.

Özdağoğlu, A. (2013). Üretim işletmelerinde lazer kesme makinelerinin PROMETHEE yöntemi ile karşılaştırılması. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, 9(19), 305-318.

Özdemir, Y. (2020). İnovasyon odaklı girişimlerin desteklediği teknoparkların kuruluş yeri seçiminde etkili olan değişkenlerin AHP ile önem katsayılarının belirlenmesi. *Uluslararası Yönetim Bilişim Sistemleri ve Bilgisayar Bilimleri Dergisi*, 4(1), 74-83.

Öngül, M. (2014). Gemi inşa ve onarım faaliyetlerini yürüten bir işletmeye ait iş kazalarının analizi. Yüksek Lisans Tezi, Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 377109.

Özgüven Tayfun, N. (2015). Perakendecilikte müşterilerle iletişim yönteminin seçimi: PROMETHEE karar tekniği ile bir uygulama. *Yakın Doğu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 8(2), 150-180.

Sosyal Güvenlik Kurumu, İstatistik Bilgi Sistemi. <https://www.sgk.gov.tr/Istatistik/Yillik/fcd5e59b-6af9-4d90-a451-ee7500eb1cb4> [Online] [Erişim 13.11.2022].

Şenkayas, H., ve Hekimoğlu, H. (2013). Çok kriterli tedarikçi seçimi problemine PROMETHEE yöntemi uygulaması. *Verimlilik Dergisi*, (2), 63-80.

Tansoy, R.T. (2017). Tersanelerde iş kazalarının önlenmesinde alınması gereken tedbirler ve risk analizi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 474064.

Taylan, M. (2008). Tersanelerde meydana gelen iş kazaları ve iş güvenliği, Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojileri Teknik Kongresi, İstanbul, Türkiye, 24-25 Kasım 2008.

Tezdoğan, T., ve Taylan, M. (2009). Tersanelerdeki iş kazalarının istatistikî olarak incelenmesi, *GMO Journal of Ship and Marine Technology*, 180, 10-16, ISSN 1300-1973.

Tuğrul, F. (2021). Sezgisel bulanık mantığın çok kriterli karar verme sürecinde yeni bir yöntem ile uygulanması. Doktora Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 666896.

Tüminçin, F. (2016). AHP ile bir karar destek sistemi oluşturulması: Bir üretim işletmesinde uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Bartın, 443093.

Wulandari, K. N., Tualeka, A. R., Widajati, N., and Fitri, N. (2018). Risk assessment on hull painting process at shipyard. *KnE Life Sciences*, 30-45.

Yaralıoğlu, K. (2001). Performans değerlendirmede AHP. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 16 (1), 129-142.

Yavuz, K. (2012). Tersanelerde kazaların önlenmesi ve iş güvenliği: tuzla tersaneleri. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 321662.

Yılmaz, A. I., Yılmaz, F., and Celebi, U. B. (2015). Analysis of shipyard accidents in Turkey. *British Journal of Applied Science & Technology*, 5(5), 472.

Yılmaz Kaya, B., ve Dağdeviren, M. (2010). Ekipman seçimi probleminde PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(4), 811-826.

Yorulmaz, M., ve Öztürk, M. A. (2022). Tersanelerdeki İş Kazası Nedenlerinin Önem Düzeylerine Göre Belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (41), 132-143.



Yorulmaz, M., ve Yanık, D. A. (2021). Gemi kaptanlarının yönetici kriterlerinin belirlenmesi. Balkan ve Yakın Doğu Sosyal Bilimler Dergisi, 2021:07 (02), 53-66, e-ISSN: 2146-8494.

Zaman, M. B., Pitana, T., and Septianto, A. B. (2019). Identification of occupational accident relations of shipyard labour in terms of individual and workplace factors. International Journal of Marine Engineering Innovation and Research, 3(4).

## Tank Geometrisinin Çalkantı Kuvvetlerine Etkisi

Fatih Cüneyd Korkmaz

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

fkorkmaz@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9250-5265

### ÖZET

Çalkantı kuvvetlerinin değişiminde dalga formu kadar, çarpma yüzeyinin geometrisi de etkilidir. Dalga form ise çalkantı hareketinde; tankın şekline, salınım frekansının tankın doğal frekanslarıyla çakışmasına bağlı olarak değişir. Bu çalışmada benzer boyuttaki dikdörtgen ve pahlı tankın aynı salınım frekansındaki tek eksende salınım esnasında meydana gelen yüzey deformasyonları ve yanal yüzeylerde oluşturduğu basınçların karşılaştırılması yapılmıştır. Geniş salınım frekans aralığındaki çalkantı sebebiyle yüzeylerde oluşan basınç dağılımı her iki tank için ölçülmüştür. Serbest yüzey deformasyonları rezonans ve rezonans dışı bölgelerde takip edilerek dalgaların çarpma etkileri karşılaştırılmıştır. Her iki tankta da rezonans bölgelerinde maksimum basınçlar ölçülürken diğer salınım frekanslarında basınçlar düşmüştür. Tankların benzer salınım-doğal frekans oranlarındaki çalkantıları, pahlı tankın geometrisi yardımıyla dalga formlarını değiştirdiği gibi aynı basınç ölçüm noktalarında da daha az ölçülmesi sebep olmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Sıvı Çalkantısı, dikdörtgen tank, pahlı tank, basınç ölçümü, serbest yüzey takibi

**Makale Geçmişi:** Geliş 20/10/2022 – Kabul 13/12/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1192083>

# The Effect of Tank Geometry on Sloshing Forces

Fatih Cüneyd Korkmaz

Department of Marine Engineering Operations, Naval Architecture and Maritime Faculty, Yıldız Technical University, Istanbul, Türkiye

fkorkmaz@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9250-5265

## ABSTRACT

The geometry of the impact surface is as effective as the wave shape in the change of sloshing forces. The wave shape depends on the shape of the tank, oscillation frequency coinciding with the natural frequencies of the tank under sloshing motion. This study compares the surface deformations and pressures on the lateral walls that occur during oscillation along one axis at the same oscillation frequency between a rectangular tank and a chamfered tank of similar dimensions. The pressure distribution on the surfaces due to sloshing was measured for both tanks over a wide range of oscillation frequencies. From experiments, free surface deformations were monitored in the resonant and non-resonant regions, and the impact effects of the waves were compared. While maximum pressures were measured in the resonant regions of both tanks, pressures decreased at other oscillation frequencies. The sloshing of the tanks changed the wave shapes based on the geometry of the chamfered tank and also caused lower measurements at the same pressure measurement points at similar oscillation/natural frequency ratios.

**Keywords:** Liquid sloshing, rectangular tank, chamfered tank, pressure measurement, free surface tracking

**Article History:** Received 20/10/2022 – Accepted 13/12/2022



## 1. Introduction

Sloshing is a phenomenon that causes internal forces by deforming the free surface of the liquid as a result of energy transferring from external forces to the fluid inside a tank. Measuring and estimating sloshing forces are important in terms of the possible damage to a tank's inner walls and disrupting the stability of the container. In addition, various wave types and the geometry of the impact points result in a story that differs from the physical point of view. Some studies are found to have measured or numerically approximated the pressure distribution under sloshing motion in different geometrically shaped tanks. Lee et al. (2007) performed a numerical analysis to evaluate the effect of air trapped in the wave crest during sloshing in LNG tanks. The effects from fill levels and waveforms during horizontal oscillation have also been discussed. Some wave forms create serious impacts when hitting the tank walls. Bullock et al. (2007) investigated the effects from four wave types on vertical and sloping walls at various angles. Kısacık et al. (2012) investigated the effect of extreme waves on a vertical wall and displayed the pressure distributions along the wall. Lugni et al. (2010) investigated the impact dynamics from various forms of wave strikes using different ullage pressure values inside the tank. Chella et al. (2012) investigated the impact from waves breaking on offshore structures. Cuomo et al. (2010,2011) studied the effects from waves breaking on coastal structures. Graczyk and Moan (2008) focused on the duration until maximum pressure is reached in LNG tanks under sloshing motion. Nasar et al. (2009) conducted an experimental study to understand the sloshing effect in a modeled tank exposed to irregular waves. The pressures on the walls were measured for tanks of different geometries under the same oscillation frequencies. Al Mashan et al. (2021) studied wave impacts on offshore structures. Souto-Iglesias and Botia-Vera (2012) investigated and monitored fluid motions due to sloshing by measuring the impacts in a rectangular tank. Ding et al. (2020) investigated the effect of liquid sloshing on LNG tanks under various loads. Song et al. (2013) studied liquid sloshing in a partially filled rectangular tank and experimentally discussed the effects from waves on the walls.

Sloshing forces for fluids with different viscosities will vary even under the same oscillation frequency of excitation of a tank. Zou et al. (2015) studied the effects of viscosity with regard to sloshing forces. Forces with lower impacts on the sidewalls have been proven with regard to high-viscosity fluids due to higher energy losses from viscous friction. Souto-Iglesias et al. (2015) investigated the role of tank width with regard to harmonic oscillation to experimentally study the possible change in pressure values. Kim et al. (2017) experimentally investigated the scale effect on sloshing and noted that the position of maximum pressure changes in a scaled tank. Tosun et al. (2017) used an image processing method to estimate the sloshing forces by monitoring free surface deformations. Lu et al. (2018) conducted a series of experiments to examine sloshing at various liquid fill levels. Their study showed the free surface to exhibit different deformations based on the varying natural frequencies at each fluid level.

Another research area has focused on reducing sloshing forces. Some researchers have attempted to absorb fluid forces by adding additional structures to the tank interior. Xue et al. (2017) investigated how to reduce sloshing forces by adding porous partitions to LNG tanks and discussed the effects from various modifications with regard to porous partitions. Lee et al. (2021) investigated the sloshing effect on Type C tanks with internal structural members. Korkmaz and Güzel (2021) conducted research to find the optimum number of obstacles with regard to slosh reduction by using perforated partitions in rectangular tanks. Another approach for reducing sloshing motion involves damping the free surface level by adding floating bodies to the tank (Sauret et al., 2015). In addition, some new studies have investigated the impacts from layered fluids as a different proposition. Korkmaz (2022) showed the

effectiveness of applying a high viscosity fluid as a second layer in order to mitigate the sloshing impact from a low viscosity fluid as the first layer.

Additionally, the effects of air bubbles have been widely discussed regarding wave breaking scenarios. The general tendency indicates compressed air to reduce the impact effects, with recent studies making more detailed comments. Bredmos et al. (2009) examined the effects of trapped air on the impact from waves breaking along the vertical wall. Bredmos et al. (2015) also studied the impact of aeration regarding various types of waves using analytical and numerical methods. They reported impact loads to have less of an effect on the structure due to air bubbles at the crest of the wave. Lugni et al. (2010) stated the effects of trapped air to change depending on cavitation. Higher pressures were measured when cavitation overlaps the oscillation frequency. However, they also mentioned a large volume bubble trapped under the wave crest to act as an air cushion between the wall and the fluid, measuring lower pressures.

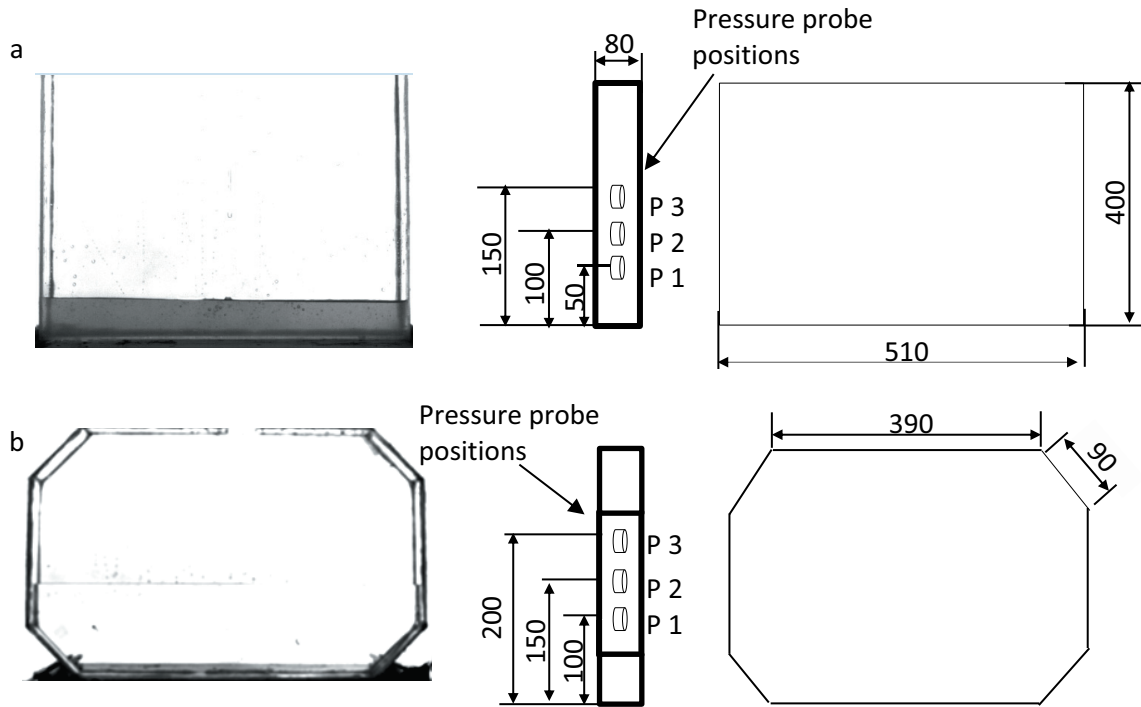
It is observed that from literature, sloshing impact data on one type of geometries are convincing. More than one type of tanks are scarce. The current study investigates sloshing loads using two different tank geometries at the same fill levels and oscillation frequencies. The tap water was chosen as experimental fluids. The pressure distributions on the lateral surfaces of the rectangular and chamfered tanks were investigated under horizontal oscillatory motions. Free surface deformations were monitored, and the impact effects of the waveforms were discussed with regard to both tanks. The 16 different horizontal oscillation frequencies of the tank were studied and were varied enough to include the primary natural frequency of the tank while examining sloshing loads at resonant and non-resonant frequencies.

## 2. Experimental Setup

In this work, sloshing event inside of a rectangular and chamfered tanks by a horizontal oscillation were investigated experimentally. The amplitude of each tank's horizontal movement was kept constant while giving different sloshing motions to the tanks by changing the forcing frequency in the experiments. The effects from different waveforms on the lateral surfaces were measured. The tanks were made by attaching transparent acrylic sheets of different sizes (see Figure 1). The tanks were kept narrow to focus on two-dimensional effects. A hole was provided for the top plate of both tanks to maintain atmospheric pressure conditions and also to ensure that the water level of the tank remained constant during heavy turbulence. The tanks were mounted on a table able to move along a single axis. The oscillating motion was supplied with a sinusoidal law:

$$X(t) = a_n \sin \omega t \quad (1)$$

where  $a_n$  is the amplitude of the tank movement,  $\omega$  is the oscillation frequency, and  $t$  is time. The oscillatory motion was provided by an AC motor, and the motion was transmitted to the tank through the arm mounted around the disc. Different sloshing motions were applied to the tank with a frequency inverter. The pressures were measured using pressure sensors on the side walls experiencing the sloshing. Three pressure sensors (model PCM300D SHLLJ) were mounted at different heights that can measure up to 0.4 Bars at a sensitivity of 0.5% and response time of 20  $\mu$ s (50 kHz); the measured area is 3.5 mm in diameter. The measuring points for both tanks are indicated in Figure 1. The Hioki LR8400 data logger was used to record and process the data. A high-speed camera (Phantom Micro eX4) was used to monitor the free surface profiles at 800 fps. The camera was placed in front of the tank and the free surface for each fill level as the focal point. For lighting, an LED lighting panel was placed behind the tank facing the camera.



**Figure 1.** Draw of rectangular (a) and chamfered (b) tanks. P1, P2 and P3 represents pressure probe and attached number of sensors are positioned as ascending order from bottom to through upper side of tanks. Dimensions in mm

Sloshing forces can create significant impact loads on the tank walls, depending on how the rates of the oscillation frequency and the natural frequency of tank match one another. Two different liquid fill levels and various oscillation frequencies were applied under a constant amplitude of 11 cm ( $\sim L/4.6$ ). The fill levels were chosen as 10 cm and 15 cm. Pressure sensors were also placed vertically in the chamfered tank. Both the pressure measurement and free surface monitoring started after the dominant oscillation frequency was reached in each experiment.

An oscillation frequency close to the tank's natural frequency is expected to create the highest free surface deformation and greatest pressure forces in the tank. The natural frequency, length  $L$ , and fill level  $h$  of a rectangular tank can be determined analytically based on Faltinsen and Timokha's (2009) following equation,

$$\omega_n^2 = g \frac{n\pi}{L} \tanh\left(\frac{n\pi}{L} h\right) \quad (2)$$

where  $\omega_n$  is the natural frequency of the rectangular tank,  $g$  is gravitational acceleration,  $L$  is the length of the rectangular tank,  $h$  is the depth of the fluid, and  $n$  is the mode number. Equation (3) then provides the natural frequency correction for a chamfered tank whose chamfered parts have the dimensions (Faltinsen and Timokha, 2009):

$$\frac{\omega_n'^2}{\omega_n^2} = 1 - \frac{\frac{\delta_1}{\delta_2} \sinh^2\left(\pi n \frac{\delta_2}{L}\right) - \frac{\delta_1}{\delta_2} \sin^2\left(\pi n \frac{\delta_1}{L}\right)}{\pi n \sinh\left(2\pi n \frac{h}{L}\right)} \quad (3)$$

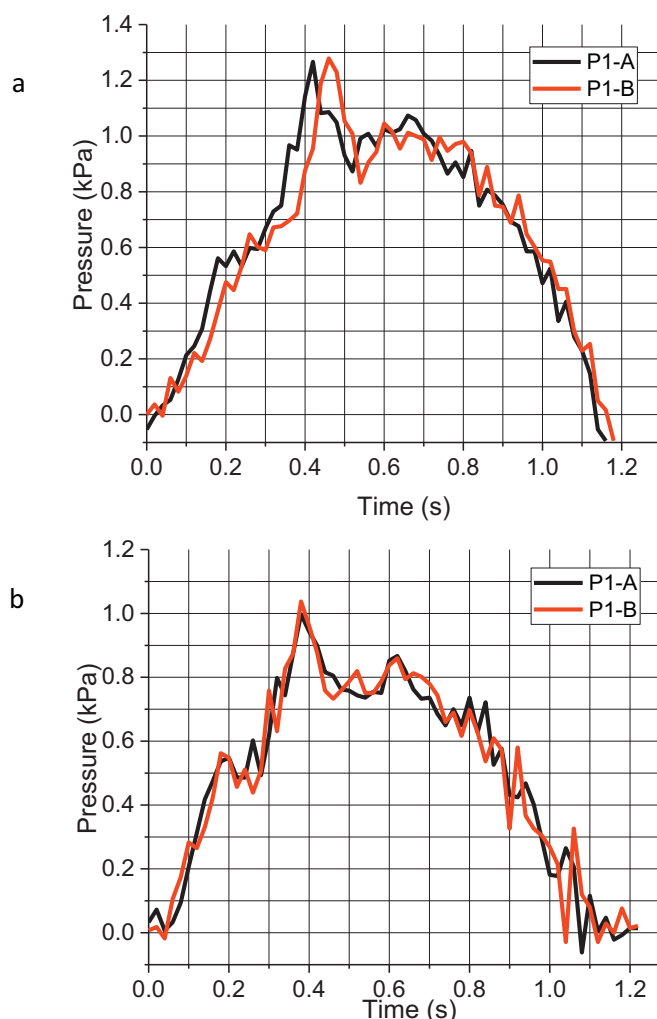
where  $\delta_1$  and  $\delta_2$  represent the horizontal and vertical dimensions of the chamfered tank and  $\omega_n'$  is the natural frequency of the chamfered tank. 16 oscillation frequencies were applied to the tanks in order

to understand the effects of fluid depth. Table 1 shows the details regarding fluid depths, horizontal motion frequencies, and natural frequencies for all fluid fill levels.

**Table 1.** Oscillation - natural frequencies for each filling levels and tanks

	Water depth (cm)	Natural Freq. $\omega_n$ (rad/s)	Natural Freq. $\omega_n'$ (rad/s)	Oscillation Frequencies (rad/s)
Case 1	10	5.75	5.71	2.8, 3.17, 3.56, 3.65, 4.07, 4.4,
Case 2	15	6.63	6.6	4.5, 4.9, 5.06, 5.23, 5.6, 6, 6.28, 6.68, 6.97, 7.42

Figure 2 shows the pressure values taken from the same point at different times for both the rectangular and chamfered tanks in the current experiment. The repeatability of the measured pressures in the non-resonant region is high for all measurement points. The sample of P1 at the low level measurement point is selected to show in Figure 2. However, due to chaotic impact, these repeatable results might not be achieved around the resonance frequency, especially at the free surface level. For rectangular at 0.67 and chamfered at 0.68  $\omega/\omega_n$ , the peak pressure values are measured with average an average uncertainty of  $\pm 1-3\%$ . Beside that the uncertainties level may increase vicinity of resonance frequency due to high nonlinearity.



**Figure 2.** Repeatability of measurements at the P1 pressure sensor. A and B letter represents first and second test. Case 2 rectangular (a) at  $\omega/\omega_n=0.67$  and chamfered (b) at  $\omega/\omega_n'=0.68$  tank

### 3. Results and Discussion

This section presents the experimental results for the rectangular and chamfered tanks at different oscillation frequencies. The 16 oscillation frequencies range from 2.8 rad/s to 7.42 rad/s and were applied to covering the primary natural frequencies of the tanks.

#### 3.1 Free surface deformation

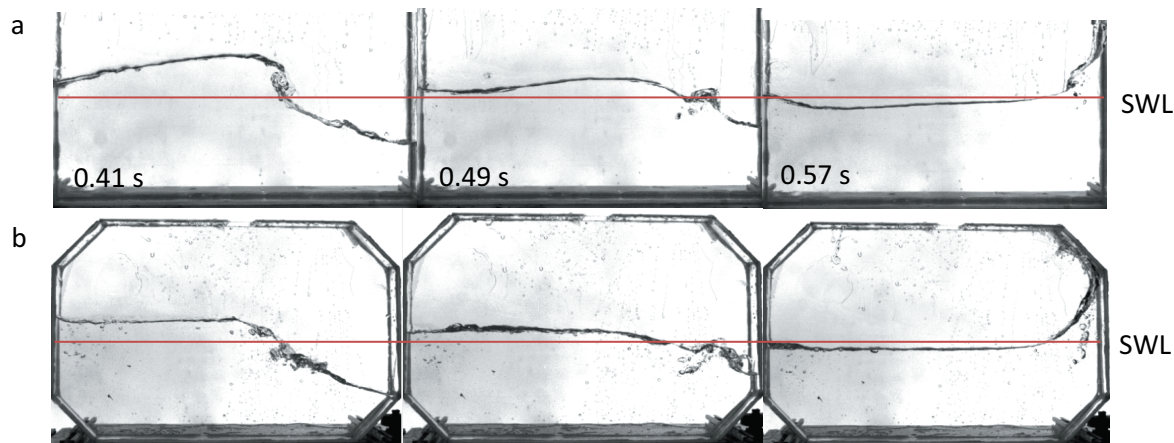
The oscillation frequency, amplitude of motion, and depth of the fluid are three main parameters affecting free surface deformations (Thiagarajan et al., 2011). Besides that the geometrical shape is another feature that effect free surface profile. For instance, the internal flow approaches until vertical wall of rectangular tank without any distortion. It causes harsh impact especially under breaking wave. However the relatively mild impact is expected at the chamfered tank. It is because, the fluid from oscillation direction, arise earlier bottom to upper side. Therefore, the incoming wave can be absorbed by interacting with the flow from the chamfered part before hitting the wall of the tank. Figure 3 shows how the same oscillation frequency was applied to both the rectangular and chamfered tanks, with the natural oscillation frequency ratios being 0.78 and 0.79 ( $\omega/\omega_n$ ,  $\omega/\omega_n'$ ), respectively. The free surface distribution started as a similar wave form then broke apart and deformed before the wave tip hit the side wall in the rectangular tank. The horizontal velocity of wave seems to be sufficient to break at the beginning of circle in the chamfered tank, but is obstructed to wave breaking by resultant velocity of stationary fluid at the chamfered part of tank. The difference in the tank geometries and the vertical velocity of the stationary fluid in the wave direction varied as the axial movement of the tank continued, and the two tanks showed different impacts upon their lateral surfaces. The free surface deformation was more severe because less fluid was near the resonant region at the same oscillation frequency (Figure 4).

Significant wave breaks are observed in Figure 4, especially for the rectangular tank. This wave break approached the lateral surface without being disturbed. The wave impact on the wall contained a certain amount of air, and this spread the effect of air compression over the entire surface. The results were seen to vary based on the cavitation frequency ( $f_r$ ). Topliss et al. (1992) estimated the following natural frequency for two-dimensional cavitation occurring in a free surface region:

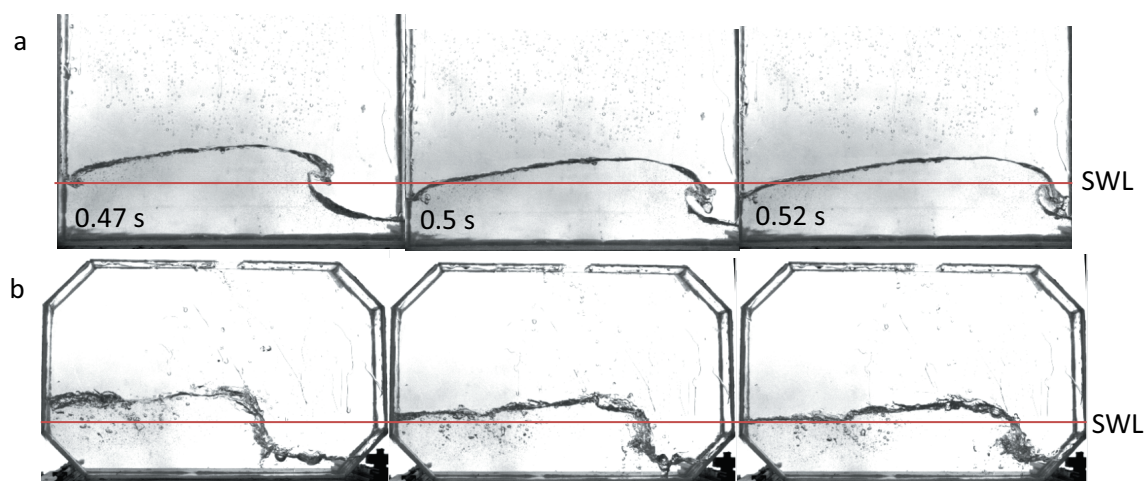
$$f_r^2 = - \frac{2\gamma p}{4\pi^2 \rho r^2 \log\left(\frac{r}{2h_y}\right)} \quad (4)$$

where  $p$  is atmospheric pressure,  $\rho$  is the water density,  $\gamma$  is the specific heat ratio,  $r$  is the half angle of the air bubble, and  $h_y$  is the distance of the air bubble from the free surface.

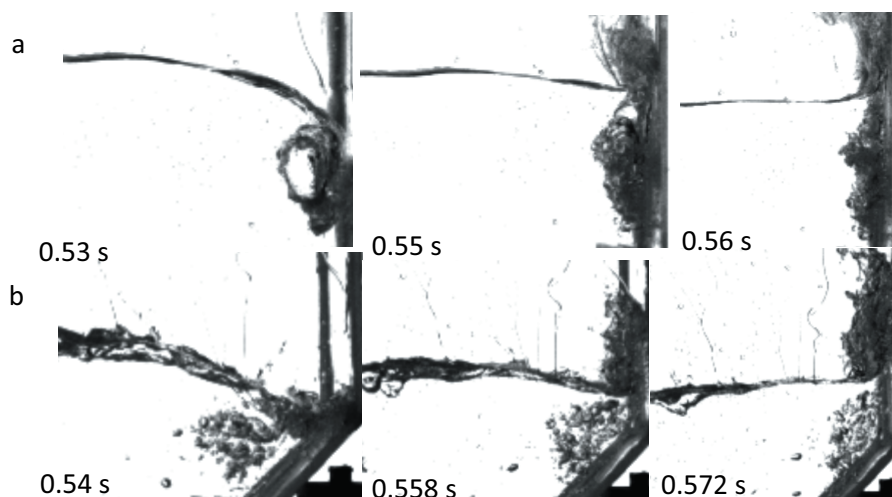
The frequency of cavitation was analytically found to be  $\sim 157$  rad/s under an oscillation frequency of 5.23 rad/s for case 1. Figure 5 shows in detail the impact and distribution of the air bubble under the wave tip. Contrary to the rectangular tank, the wave crest in the chamfered tank spills onto the free surface due to the wave not being able to completely break up, especially when approaching the lateral surface. Some air bubbles remained between the spilled wave and free surface. These air bubbles followed the fluid and preserved their shape without bursting or causing oscillations between the wall and the water. In the rectangular tank, however, the trapped air was clearly observed to get dispersed by the impact and turn into smaller air bubbles. The effects from the chaotic environment are transmitted toward the top of the free surface region along the lateral surface. In addition, the repeatability of the measurements is lower due to the distorted air bubbles in these regions, and the oscillation frequency was in range of the resonance region ( $\omega / \omega_n = 1.099$  and  $\omega / \omega_n' = 1.091$ ).



**Figure 3.** Free surface deformation of case 2 in rectangular (a) at  $\omega/\omega_n=1.267$  and chamfered tank (b) at  $\omega/\omega_n'=1.263$ . SWL: Still water level



**Figure 4.** Free surface deformation of case 1 in rectangular (a) at  $\omega/\omega_n=1.099$  and chamfered tank (b) at  $\omega/\omega_n'=1.091$

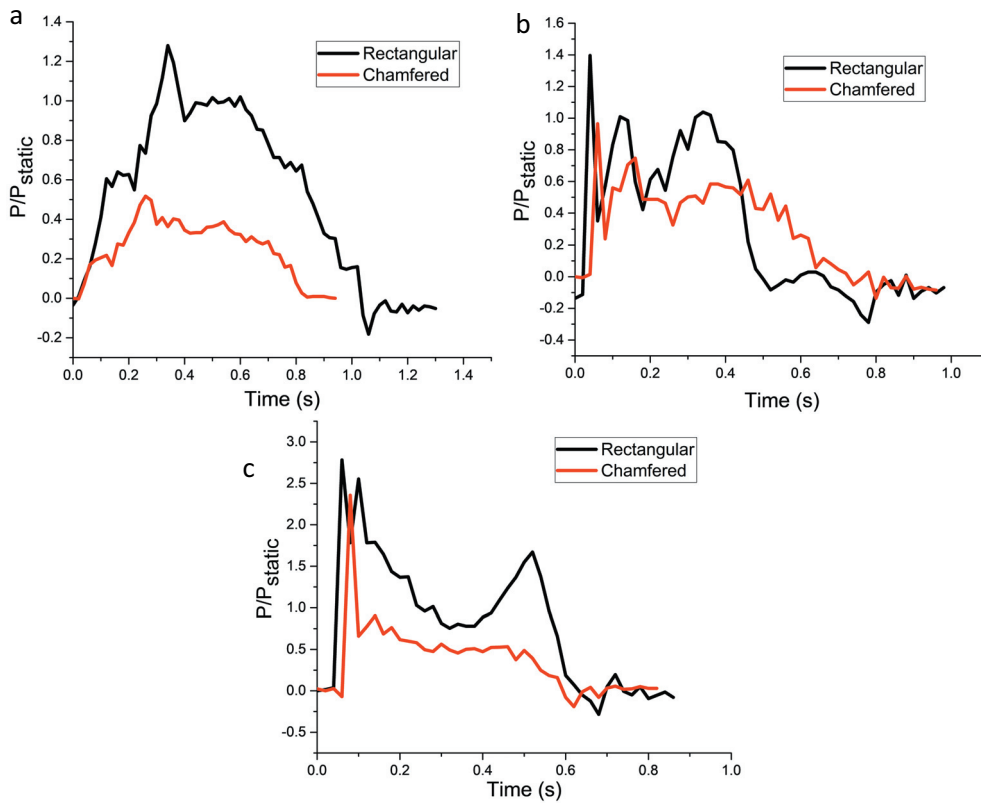


**Figure 5.** Close view of wave impact in case 1 under 5.23 rad/s at rectangular (a) and at chamfered tank (b)

### 3.2 Pressure measurement

The pressures that formed on the tanks' lateral surfaces during oscillation were measured with pressure sensors. The sensors were mounted at specific heights on the flat part of the chamfered tank as well as in the rectangular tank (Figure 1). The tests were expected to show the greatest effect at the oscillation frequency for each oscillation frequency. The measured pressure values were normalized with the static pressure formula:

$$p_{static} = \rho gh \quad (5)$$

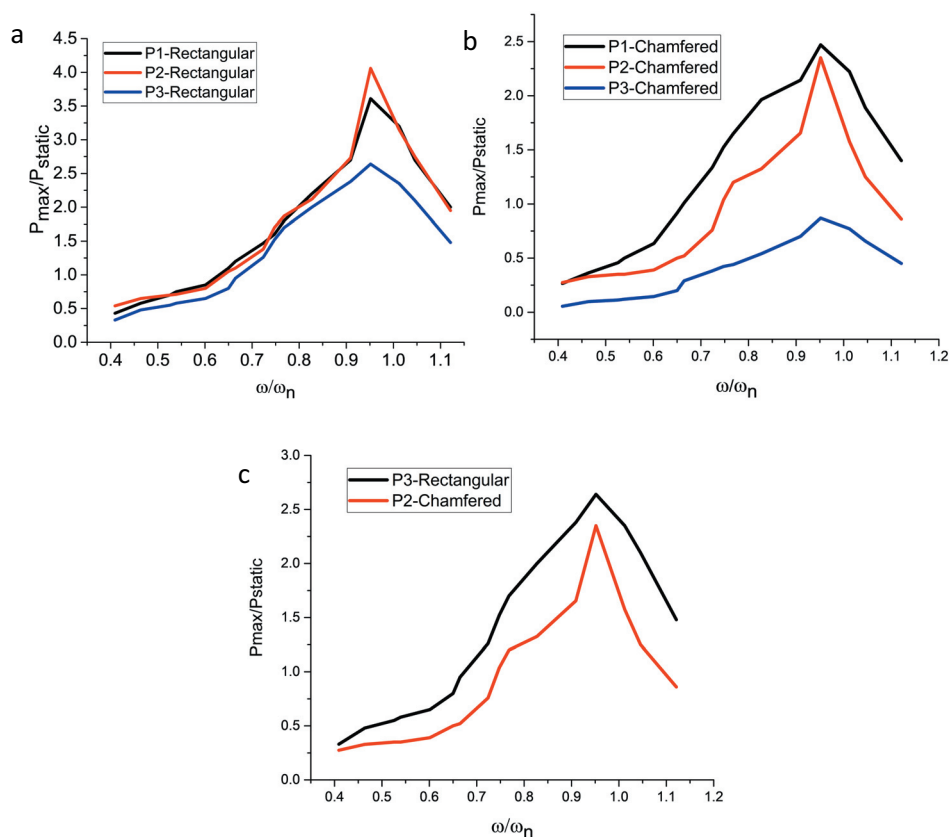


**Figure 6.** Pressure comparison under 4.5 (a), 5.23 (b) and 6.28 rad/s (c) oscillation frequencies for case 2 at the same measurement positions (P3 for rectangular and P2 for chamfered tank)

Figure 6 provides the results from the measurement points at the same height in both tanks for the resonance and the non-resonance regions by comparing the raw pressure values. While pressure rose gradually in the non-resonant regions (Figure 6a), the impact areas showed maximum pressure for a short period of time at the resonance region then decayed to lower pressure descending to zero (see Figure 6b & 6c). Massive pressure differences were measured between the chamfered and rectangular tanks due to the structure differences, with the chamfered tank having a pressure value under  $0.68 \omega/\omega_n$  and the rectangular tank measuring  $0.67 \omega/\omega_n$ . The shape of the chamfered structure mitigates and distorts the wave form's energy. However, this difference decreased and reached a maximum value in a very short time in measurements when the oscillation frequency and the natural frequencies of the tanks were closer to one another ( $0.78 \omega/\omega_n$  and  $0.79 \omega/\omega_n'$ , see Figure 6b;  $0.94 \omega/\omega_n$  and  $0.95 \omega/\omega_n'$ , see Figure 6c). After the pressure values reached their first peak in the rectangular tank, a second peak also occurred. This shows the effect of fluid passing through a second time as it falls toward the bottom of the tank due to gravity (Zou et al., 2015). However, the pressure values remained

stable for a while and then began to decline. No second peak was clearly observed for the chamfered tank.

The average maximum pressure values on the lateral surfaces of the fluid as a result of the 16 different oscillation frequencies are shown in Figure 7. Each pressure sensor shows the maximum value in the resonance region; however, the measured pressure values showed lower impact effects as they moved away from the resonance region. The same pressure distributions were observed in both tanks, with higher values being measured at each pressure sensor at the same height in the rectangular tank while this difference was greater in the non-resonant regions compared to in the chamfered tank. Chamfered part can be seen to create much difference in the peak pressure values obtained at the P3 and P2 levels which are same positions for rectangular and chamfered tank respectively (see Figure. 17c).



**Figure 7.** Peak pressure vs. excitation frequency of case 2 at the rectangular and chamfered tank

#### 4. Conclusion

This study applied various oscillatory motions onto tanks with different geometries. The free surface deformations were monitored, and the pressure measurements on the lateral surfaces were compared, and showed the waves that formed to result in similar deformations in both tanks at the resonance frequency ratios. However, due to the geometric shape of the chamfered tank, some of the energy of the wave was dispersed through the fluid along the wave front in the chamfered section. Therefore, the chamfer tank saw the wave to affect the vertical section of the tank with less pressure. Thus, different waveforms impinged on the lateral surfaces in both tanks. The distribution of pressure intensity with respect to the resonant and non-resonant regions was similar for all measurement points in each tank. In addition, lower pressures were measured in the chamfered tank for each height compared to the rectangular tank. The measured pressure differences decreased in the resonant



regions but increased in the non-resonant regions. A more dramatic reduction of pressure distribution was observed toward the upper parts of the chamfered tank.

## 5. Acknowledgements

This work was supported by Research Fund of the Yildiz Technical University. Project Number: FBA-2018-3341.

## 6. References

AlMashan, N., Neelamani S. and Al-Houti, D. (2021). Experimental investigations on wave impact pressures under the deck and global wave forces and moments on offshore jacket platform for partial and full green water conditions. *Ocean Engineering*, 234, 109324.

Bredmose, H., Bullock G. N. and Hogg, A. J. (2015). Violent breaking wave impacts. Part 3. Effects of scale and aeration. *J. Fluid Mech.*, 765, 82–113.

Bredmose, H., Peregrine D. H. and Bullock, G. N. (2009). Violent breaking wave impacts. Part 2: modelling the effect of air. *J. Fluid Mech.*, 641, 389–430.

Bullock, G. N., Obhrai, C., Peregrine D. H. and Bredmose H. (2007). Violent breaking wave impacts. Part 1: Results from large-scale regular wave tests on vertical and sloping walls. *Coastal Engineering*, 54, 602–617.

Chella, M. A., Torum A. and Myrhaug, D. (2012). An Overview of Wave Impact Forces on Offshore Wind Turbine Substructures. *Energy Procedia*, 20, 217 – 226.

Cuomo, G., Allsop W., Bruce T. and Pearson J. (2010). Breaking wave loads at vertical seawalls and breakwaters. *Coastal Engineering*, 57, 424–439.

Cuomo G., Piscopia R. and Allsop W. (2011). Evaluation of wave impact loads on caisson breakwaters based on joint probability of impact maxima and rise times. *Coastal Engineering*, 58, 9–27.

Ding, S., Wang G. and Luo G. (2020). Study on sloshing simulation in the independent tank for an icebreaking LNG carrier. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 12, pp. 667-679.

Faltinsen O. M. and Timokha, A. N. (2009). “Sloshing”, Cambridge University Press.

Graczyk M. and Torgeir M. (2008). A Probabilistic Assessment of Design Sloshing Pressure Time Histories in LNG Tanks. *Ocean Engineering*, 35 (8–9), 834–55.

Kim, S. Y., Kim, Y., Park J. J. and Kim, B. (2017). Experimental Study of Sloshing Load on LNG Tanks for Unrestricted Filling Operation. *Journal of Advanced Research in Ocean Engineering*, 3 (1), 041-052.

Kisacik, D., Troch P. and Van Bogaert, P. (2012). Description of loading conditions due to violent wave impacts on a vertical structure with an overhanging horizontal cantilever slab. *Coastal Engineering*, 60, 201–226.

Korkmaz, F. C. (2022). Damping of sloshing impact on bottom-layer fluid by adding a viscous top-layer fluid. *Ocean Engineering*, vol. 254, 111357.

Korkmaz, F. C., Yigit, K. and Güzel, B. (2021). Experimental Study on Sloshing Reduction Effects of Baffles. *El-Cezeri*, 8 (3), 1149-1157.

Lee, J., Ahn, Y., Kim, J., Kim, Y., Yang, K. K., Yi S. I. and Noh, M. H. (2021). Observation on sloshing flow and hydrodynamic pressures on cylindrical liquefied natural gas tank with swash bulkhead. *Proc IMechE Part M: J Engineering for the Maritime Environment*, 235 (1), 30–40.

Lee, D. H., Kim, M. H., Kwon, S. H., Kim J. W. and Lee, Y. B. (2007). A Parametric Sensitivity Study on LNG Tank Sloshing Loads by Numerical Simulations. *Ocean Engineering*, 34 (1), 3–9.

Lugni, C., Brocchini M. and Faltinsen, O. M. (2010). Evolution of the air cavity during a depressurized wave impact. II. The dynamic field. *Physics of Fluids*, 22, 056102.

Lugni, C., Miozzi, M., Brocchini M. and Faltinsen O. M. (2010). Evolution of the air cavity during a depressurized wave impact. I. The kinematic flow field. *Physics of Fluids*, 22, 056101.

Lu, Y., Zhou, T., Cheng, L., Zhao W. and Jiang, H. (2018). Dependence of critical filling level on excitation amplitude in a rectangular sloshing tank. *Ocean Engineering*, 156, 500–511.

Nasar, T., Sannasiraj S. A. and Sundar V. (2009). Wave-induced sloshing pressure in a liquid tank under irregular waves. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 223 (2), 145-161.

Sauret, A., Boulogne, F., Cappello, J., Dressaire E. and Stone, H. A. (2015). Damping of liquid sloshing by foams. *Physics of Fluids*, 27, 022103.

Song, Y. K. Chang, K. A., Ryu Y. and Kwon, S. H. (2013). Experimental study on flow kinematics and impact pressure in liquid sloshing. *Exp Fluids*, 54, 1592.

Souto-Iglesias, A., Botia-Vera E. and Bulian, G. (2012). Repeatability and two-dimensionality of model scale sloshing impacts. in: *Proceedings of the Twenty Second International Society of Offshore and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece.

Souto-Iglesias, A., Bulian G. and Botia-Vera, E. (2015). A set of canonical problems in sloshing. Part 2: Influence of tank width on impact pressure statistics in regular forced angular motion. *Ocean Engineering*, 105, 136–159.

Thiagarajan, K. P., Rakshit D. and Repalle, N. (2011). The air–water sloshing problem: Fundamental analysis and parametric studies on excitation and fill levels. *Ocean Engineering*, 38, 498–508.

Topliss, M. E., Cooker M. J. and Peregrine, D. H. (1992). “Pressure oscillations during wave impact on vertical walls”. *Publ by ASCE, New York, NY, United States*, 2, 1639–1650.

Tosun, U., Aghazadeh, R., Sert C. and Ozer, M. (2017). Tracking free surface and estimating sloshing force using image processing. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 88, 423-433.

Xue, M. A., Jiang, Z., Hu Y. and Yuan, X. (2017). Numerical Study of Porous Material Layer Effects on Mitigating Sloshing in a Membrane LNG Tank. *Ocean Engineering*, 218, 108240.

Zou, C. F., Wang, D. Y., Cai Z. H. and Li, Z. (2015). The effect of liquid viscosity on sloshing characteristics. *J Mar Sci Technol*, 20, 765–775.

# Gemi Sevk Gücü ve Isı Transferinin Yapısal Gelişim Teorisi ile İlişkisi

Ümit Güneş<sup>1</sup>, Erdal Çetkin<sup>2</sup>, Bahri Şahin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İzmir Yüksek Teknoloji Üniversitesi, İzmir, Türkiye

<sup>3</sup> İstanbul Gelişim Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup>(sorumlu yazar), [ugunes@yildiz.edu.tr](mailto:ugunes@yildiz.edu.tr), ORCID: 0000-0001-6942-6403

<sup>2</sup>[erdalchetkin@iyte.edu.tr](mailto:erdalchetkin@iyte.edu.tr), 0000-0003-3686-0208

<sup>3</sup>[bsahin@gelisim.edu.tr](mailto:bsahin@gelisim.edu.tr), 0000-0002-3885-9588

## ÖZET

Yapısal Gelişim Teorisi 1996 yılında literatüre kazandırılmış olup tabiattaki ve mühendislikteki tasarım prensiplerini açıklar. Teori, yeryüzündeki akış sistemlerini bütüncül bir şekilde ele alır. Akışın (hareketin) olmadığı yerde çoğu zaman canlılıktan bahsetmemiz dahi mümkün olmamaktadır. Akış sistemlerinin çözümünde anahtar davranış biçimi bu sistemlerin minimum dirençli yol ile hareketini sürdürmesidir. Belli bir zaman dilimi için minimum direnç ile hareket eden sistem zaman geçtikçe kendine yeni yollar (kanallar) bulmakta ya da bazı yolları hiç kullanmayarak yönünü değiştirmektedir. Yapısal Gelişim Teorisi ise hayati öneme sahip olan akış sistemlerinin fiziksel arka planını ortaya koymaktadır. Bu makalede özellikle mühendislik çözümlerinin başında gelen akış sistemlerinin yapısı (gemilerde kurulu ana makine gücü ve ısı transferi örnekleri özelinde) ve Yapısal Gelişim Teorisi'ne göre ilişkisi araştırılmıştır. Bunun için 1085 adet petrol tankeri için DWT ile bu tankerler için gerekli olan güç ilişkisi nonlineer regresyon ile analiz edilmiştir. Sonuç olarak gemilerdeki genel gelişimin ve ısı transferinin yapısal gelişim prensiplerine uygun şekilde gerçekleştiği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yapısal gelişim teorisi, gemi, verim, akış sistemleri, ısı transferi

**Makale geçmişi:** Geliş 14/11/2022 – Kabul 06/01/2023

<https://doi.org/10.54926/gdt.1204378>

# The Relationship Between Marine Propulsion Power and Heat Transfer with Constructal Law

Ümit Güneş<sup>1</sup>, Erdal Çetkin<sup>2</sup>, Bahri Şahin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Naval Architecture and Maritime Faculty, Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Izmir Institute of Technology, Izmir, Türkiye

<sup>3</sup>İstanbul Gelisim University, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup>(corresponding author), [ugunes@yildiz.edu.tr](mailto:ugunes@yildiz.edu.tr), ORCID: 0000-0001-6942-6403

<sup>2</sup>[erdalacetkin@iyte.edu.tr](mailto:erdalacetkin@iyte.edu.tr), 0000-0003-3686-0208

<sup>3</sup>[bsahin@gelisim.edu.tr](mailto:bsahin@gelisim.edu.tr), 0000-0002-3885-9588

## ABSTRACT

Constructal Law was introduced by Adrian Bejan to the literature in 1996 as a theory that explain the principles of design in nature and engineering. If there is no flow (movement) then the potential of a system to do work cannot be considered. One of the most important criteria to uncover solutions for flow systems is that these systems maintain their movement by using the path of the least resistance. A system that moves with the least resistance path for a certain period of time finds new paths (channels) for itself as time goes by or changes its direction by not using some possible paths. Constructal Law reveals the physics of these flow systems are in prime importance. This article provides a physical insight and analysis of flow systems that are at the core of many engineering problems (specifically installed main engine power and heat transfer) in accordance with Constructal Law. In addition, the relationship between DWT and installed main engine power for 1085 oil tankers was analyzed by nonlinear regression. As a result, the evolution of ships and heat transfer are compatible with Constructal Law.

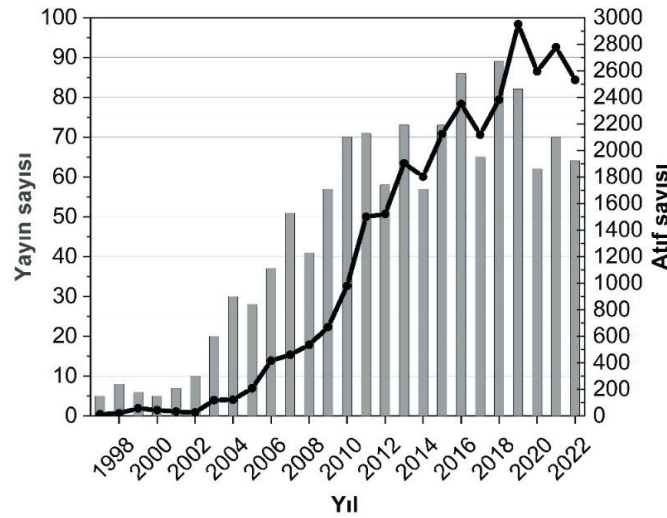
**Keywords:** Constructal law, ships, efficiency, flow systems, heat transfer

**Article history:** Received 14/11/2022 – Accepted 06/01/2023

## 1. Yapısal Gelişim Teorisi

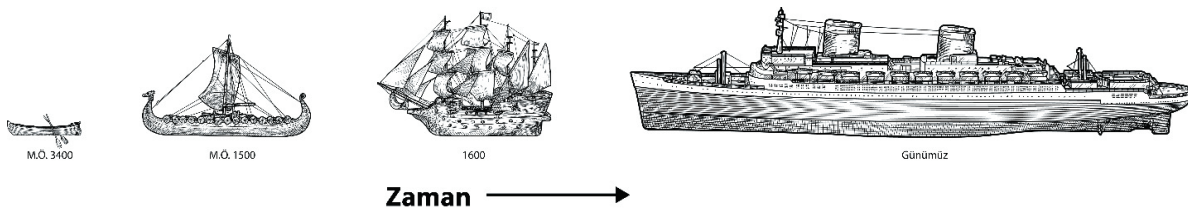
Yapısal Gelişim Teorisi (*Constructal Law*) ile sonlu boyutlu bir sistemin zaman içinde akışın daha az dirençli yollardan akmasıyla gelişebileceği fikri ilk kez Adrian Bejan (Bejan, 1996) tarafından ifade edilmiştir (Güneş, 2019). Her ne kadar bünyesinde minimum direnç ve buna bağlı olarak maksimum verim gibi yaklaşımları bulundursa da Yapısal Gelişim Teorisi'nin tam olarak bir optimizasyon yöntemi olduğunu söylenemez. Yapısal Gelişim Teorisi ile optimizasyon yöntemlerini ayıran en önemli faktör, Yapısal Gelişim Teorisi'nde bulunan sonuçların tek noktada değil belli bir zaman için geçerli olduğudur. Optimizasyon yöntemleri ile sadece bir değer bulunup optimum (minimum ya da maksimum) nokta tespit edilirken Yapısal Gelişim Teorisi'nde bu optimum nokta zaman içinde değişecektir. Çünkü zaman içinde daha az dirençli yollar/kollar gelişecektir. Bu şekilde düşünüldüğünde Yapısal Gelişim Teorisi'nin çoklu optimum noktaları barındırdığı söylenebilir.

Yapısal Gelişim Teorisi ortaya çıkışının akabinde bir çok sisteme adapte edilerek fiziksel ve sosyolojik bir çok problem bu teori ile açıklanmıştır (Basak, 2011; Bejan, 2013, 2015, 2017; Bejan & Errera, 2014; Bejan & Lorente, 2006, 2010, 2011, 2013; Chen, 2012; Kakac, 2016; Reis, 2006). Şekil 1'de Yapısal Gelişim Teorisi üzerine yayınlanmış çalışmalar ve bu yayınların aldığı atıflar görülmektedir (Scopus, 2022). Yayınların ve atıfların trendi incelendiğinde 1996 yılından günümüze yayın ve atıf sayılarında genel olarak bir artış olduğu görülmektedir.



**Şekil 1.** Yapısal Gelişim Teorisi alanında yayınlanmış çalışmalar ve bu yayınların aldığı atıflar (Scopus, 2022)

Yapısal Gelişim Teorisi tabiattaki ve mühendislikteki değişim ve bu değişimin hangi yönde olacağı hakkında fikir vermektedir. Şekil 2'de gemilerin zamanla değişimi görülmektedir. Bu tasarımlar zamanının en iyi tasarımlarıyken malzeme teknolojisi, üretim teknikleri ve ihtiyaçların farklılaşması ile ilerleyen yıllarda zamanın ihtiyaçlarına daha çok uyan ve daha gelişmiş tasarımlar ortaya çıkmıştır.



**Şekil 2.** Gemi tasarımının zaman içindeki değişimi (Bejan (2016b) kaynağından esinlenerek üretilmiştir)

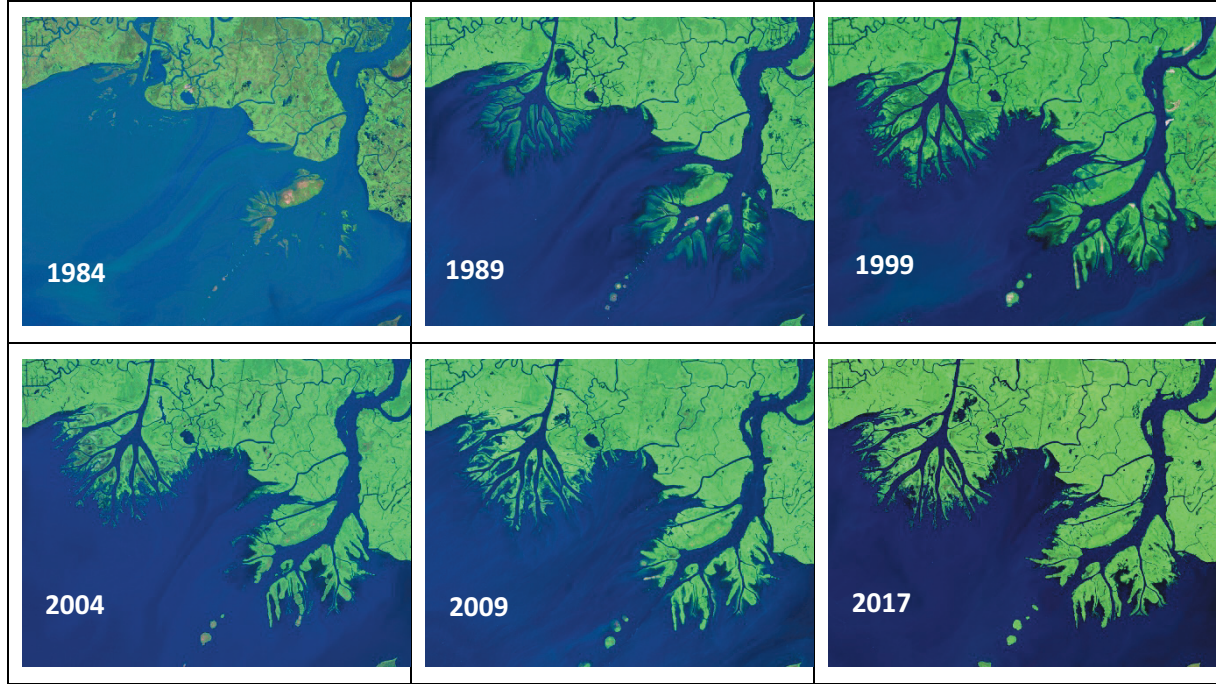
Zaman içinde gelişim kaçınılmazdır. Gelişime ayak uyduramayan bazı büyük firmalar (Yahoo, Nokia gibi) ile imparatorlukların tarihten silinmesi, gelişime direnmek yerine onunla ilerlemenin en iyi seçenek olduğunu ortaya koymaktadır. Gelişim için hareketin gerçekleşeceği doğrultuda özgürlüğe (serbestliğe) ihtiyaç vardır. Özgürlük ise yeni tasarımların ortaya çıkmasının altında yatan en önemli unsurdur. Tek serbestlik dereceli bir denklemin çözümü tektir. Dolayısıyla böyle denklemlerin sonucunda özgün tasarımların çıkması da beklenemez. Serbestlik derecesi arttıkça çözümler de artar. Doğaya ve karmaşık mühendislik uygulamalarına baktığımızda serbestlik derecesi ile sistemi etkileyen parametrelerin çokluğu göze çarpar. Bu nedendir ki doğadaki tasarımlar birbirinden farklı gibi görünseler de benzer performansı gösterebilirler. Örneğin; doğada akışkanın aktığı sistemlerde dairesel veya heksagondan daha fazla köşe sayısına ait kesitlerin olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise bu kesitlere ait tasarımların akış direnci üzerindeki etkilerinin yaklaşık aynı oranda kalması ve sistemlerin dış etkiler nedeniyle üzerlerinde hissettikleri kuvvetlerin bu kesit farklılıklarında etkili olmasıdır (Bejan & Lorente, 2006).

Bu çalışmada, Yapısal Gelişim Teorisi ile tabiattaki tasarım arasındaki ilişki örneklerle açıklanmıştır. Yapısal Gelişim Teorisi ile güç başına kurulu ana makinelerin ağırlığının ve ana makinelerin özgül yakıt tüketiminin yıllara göre değişimi veriler ışığında gösterilmiştir. Ayrıca bu çalışmada 1085 adet petrol tankeri için DWT ile bu tankerler için gerekli olan güç ilişkisi nonlineer regresyon ile analiz edilmiştir.

## 2. Tabiattaki Tasarım

Yapısal Gelişim Teorisi mühendislik ve tabiattaki tasarımların prensiplerini göstermektedir. İnsan yapımı olan tasarımlar ve tabiatta doğal olarak ortaya çıkan tasarımlar zaman içerisinde ortam şart ve koşullarına göre gelişim göstermektedir (Bejan, 1996, 2016b). Aslında her akış kendisi için en uygun minimum dirençli yolu takip etme eğilimindedir. Örneğin; trafikte iken bizi hedefe ulaştıracak en kısa, en az yakıt harcayacağımız ya da en az trafiğin olduğu yolu tercih etmek isteriz.

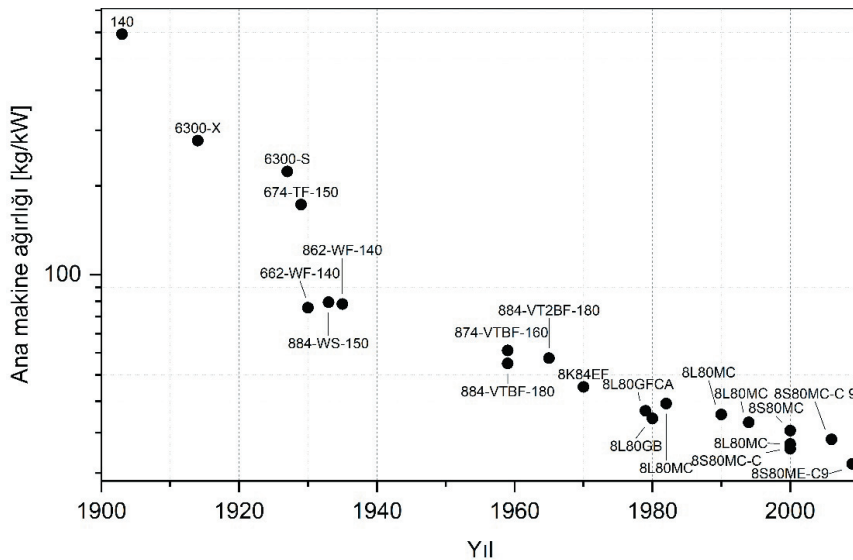
Şekil 3'te ABD'nin Louisiana eyaletinde bulunan Wax Lake deltasında 1984 ile 2017 yılları arasında meydana gelen değişim gösterilmiştir. NASA'dan (2022) alınan görsellerden de anlaşılacağı üzere yıllar içerisinde deltanın yapısı değişmektedir. Deltaya nehir akışı sırasında akış tıpkı yaprak tasarımında olduğu gibi dallanarak değişmekte ve yıllar geçtikçe kendine daha kolay yolları bulacak şekilde gelişmektedir. Bu noktada sabit bir tasarımdan bahsetmek mümkün değildir. Örneğin; belirli bir zaman dilimi için nehir akışının kaç kollu olacağı söylenebilirken zaman ilerledikçe bu kol sayısı da değişecektir. Yapısal Gelişim Teorisi bu yüzden sabit bir tasarımı değil zaman geçtikçe değişen bir tasarımı ve tasarımın prensiplerini vurgulamaktadır.



Şekil 3. Wax Lake deltasının 1984'ten 2017 yılına kadar oluşumu (NASA, 2022)

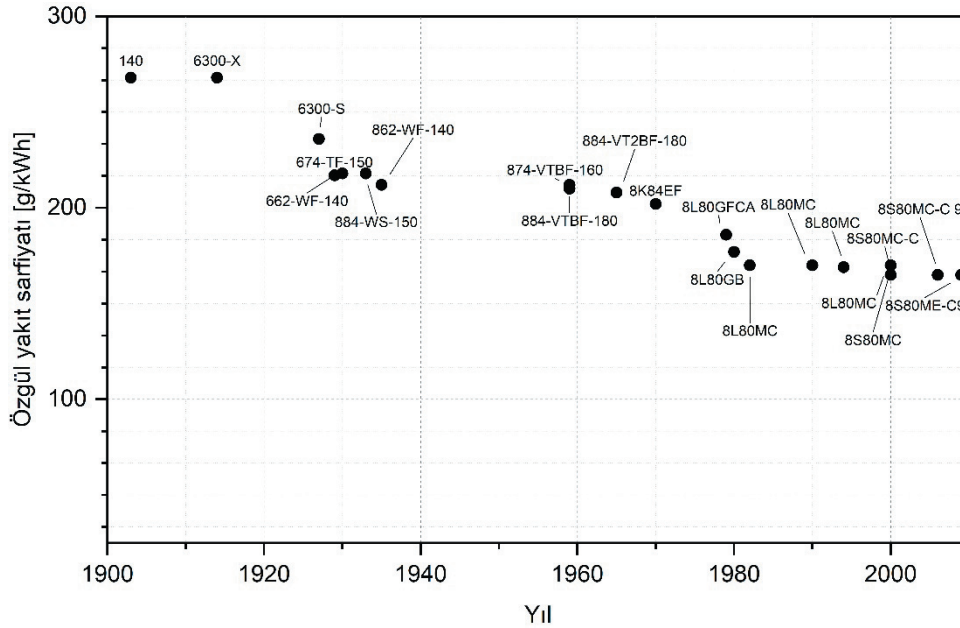
### 3. Gemilerde Yapısal Gelişim Teorisi

Deniz taşımacılığı, hareket etme özgürlüğü ve ticaret yapma imkânı sağlayarak her zaman çok büyük bir öneme sahip olmuştur. Eski medeniyetlerin deniz/nehir kenarına yerleşmeleri deniz ulaşımı ile yakından ilgilidir (Bejan, 2016b). Benzer durum insan yapımı olan makineler için de geçerlidir. Zamana bağlı olarak daha iyi tasarımlar ve buna bağlı olarak da daha verimli makineler ortaya çıkmaktadır. Bu ise makinelerin performansını ve verimini arttırmakta, makinelerin aynı güç gereksinimi için daha küçük boyutlarda üretilmesini sağlamaktadır. Şekil 4'de kW başına kurulu ana makine ağırlığı görülmektedir. 1900'lerden günümüze aynı gücün elde edildiği ana makine ağırlığı ciddi oranda azalmıştır (Bejan vd., 2019; MAN-ES, 2019). Bunun nedenleri arasında ise malzeme ve üretim gibi alanlardaki teknolojik gelişmeler gelmektedir.



Şekil 4. kW başına MAN ana makinelerin ağırlığının yıllara göre değişimi (Veri Kaynağı: (MAN Diesel, 2008)).

Zamana bağlı değişimde ana makinelerde birim güç için özgül yakıt sarfiyatı üzerinden incelendiğinde yakıt sarfiyatının ciddi anlamda azaldığı görülür. Çünkü gelişen teknoloji ve sistemler hareketin daha kolay yapılmasını sağlamaktadır. Şekil 5'te kurulu ana makine özgül yakıt sarfiyatı görülmektedir. Zamanla birim kW için harcanması gereken özgül yakıt sarfiyatı düşmektedir. Özgül yakıt sarfiyatının verim ile ters orantılı olduğu göz önünde bulundurulduğunda özgül yakıt sarfiyatının azalması motor veriminin artması anlamına gelmektedir. Şekil 5'te 22 adet tarihsel MAN gemi verisi kullanılarak motorların yakıt sarfiyatının karakteristiği sunulmuştur. Gemi ana makinelerinin gelişimi gibi yelkenli gemiler de Yapısal Gelişim Teorisi'nin prensiplerine uymaktadır (Bejan vd., 2020).



Şekil 5. Yıllara göre MAN ana makinelerin özgül yakıt tüketimi (Veri Kaynağı: (MAN-ES, 2019))

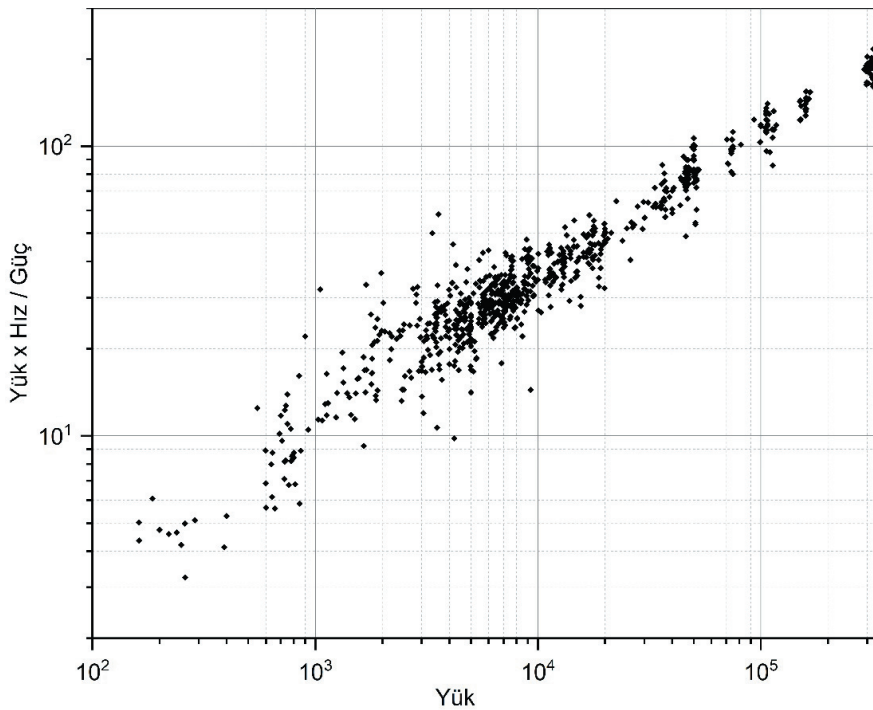
Deniz taşımacılığında amaç yükleri bir yerden başka bir yere taşımaktır. Tüm taşıma ağında bir noktadan başka bir noktaya taşıma işlemi, aynı boyuttaki gemiler ile yapılamaz. Çünkü uzak mesafelere büyük boyutlu araçlar ya da hayvanlar hareket edebilirken kısa mesafelere daha küçükleri hareket edebilmektedir (Bejan vd., 2018). Bu durum sadece deniz taşımacılığında değil hava taşımacılığında ve raylı taşımacılıkta da geçerlidir. Bir noktadan başka noktalara taşınım ve hareket Yapısal Gelişim Teorisi'nin çıkış noktasıdır (Bejan, 1996, 1997). Taşınma ve hareket minimum dirençli yol eğilimindedir çünkü minimum direnç aynı anlamda minimum enerji sarfiyatı anlamına gelmektedir. Tabiattaki hareket için bu minimum direnç prensibi deniz taşımacılığında da geçerlidir. Deniz taşımacılığında iç denizlerde taşıma yapan birçok geminin yükünü bir gemi daha uzak mesafelere götürebilmektedir. Bir noktadan başka noktalara taşınım ve hareket dallı ağları/yolları ortaya çıkarmaktadır. Nehir akışında olduğu gibi küçük kollar (gemiler) büyük kollarla birleşerek hareketine dallı yapıda devam etmektedir.

Bu hareket sürecinde büyük araçlar ve canlılar da küçüklere göre hem daha verimlidir hem de daha uzun mesafelere gidebilirler (Bejan, 2016a). Daha uzak mesafelere gidenlerin sayısı daha kısa mesafelere gidenlerin sayısına göre çok azdır. Örneğin; İstanbul'dan ABD'nin Durham şehrine seyahat etmek isteyen birisi önce uçuşunun 11 saatlik süresini haftalık yaklaşık 220 uçuş yapan İstanbul-New York hattında geçirirken (Skyscanner, 2022a) kalan 1.5 saatlik bölümünü ise New York'tan Durham'a haftalık yaklaşık 850 uçuşu bulunan hatta geçirmektedir (Skyscanner, 2022b).

Yapısal Gelişim Teorisi'nde açıklandığı gibi büyük boyutlu gemiler birim yük başına daha az enerji harcadığı için küçük boyutlu gemilere göre daha ekonomiktir. Şekil 6'da gemi büyüklüğü DWT ilişkili



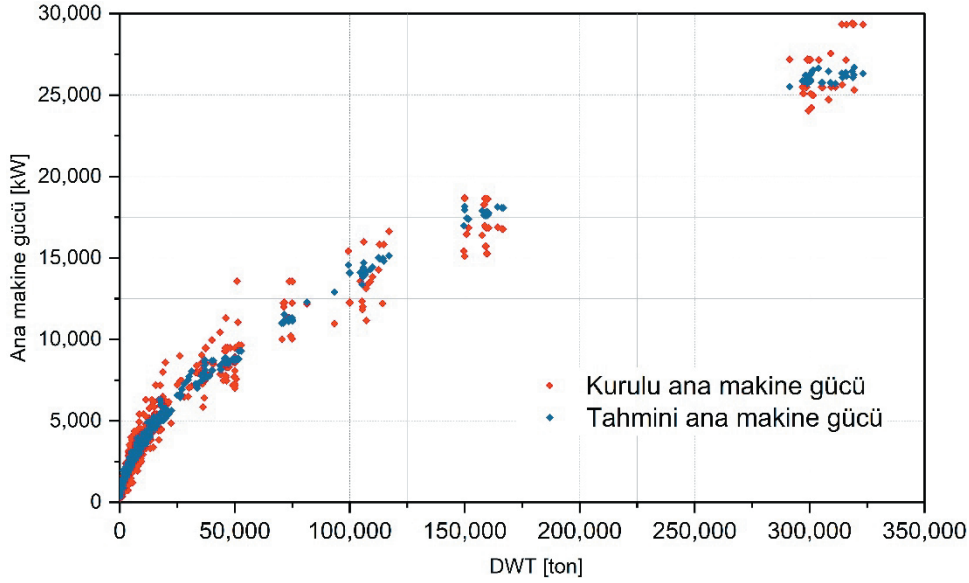
olarak gösterilmiştir. DWT, sadece taşınan yükün ağırlığı olmayıp yağlama yağı, balast suyu, kullanım suyu, yolcu ve mürettebatı ilgilendiren ağırlıkları da içermektedir. Gemilerde yük taşımacılığında geminin boyutuna bağlı olarak yükün momentumuna karşı sarfedilen gücün kurulu güce oranı ( $DWT \times V / P_{mak}$ ) Bureau Veritas (2020) klas kuruluşundan alınan 1085 petrol tankeri verisi için Şekil 6'da gösterilmiştir. Gemi DWT kapasitesi sadece kurulu ana makine gücüne bağlı olmayıp hız ve tekne-makine-pervane etkileşimini ilgilendiren değerlere de bağlıdır. Burada DWT'nin sadece kurulu ana makine gücüyle olan ilişkisi dikkate alınmıştır.



**Şekil 6.** 1085 adet petrol tankeri için boyuta bağlı olarak yükün momentumuna karşı sarfedilen gücün kurulu güce oranı ( (Veri Kaynağı: (Veritas, 2020))

Şekil 6'da verilen gemiler için boyuta bağlı olarak kurulu ana makine gücünün analizi Şekil 7'de logaritmik grafik olarak sunulmuştur. Yapılan analiz sadece bir değişkene göre olmayıp 1085 geminin DWT, GT, L ve B değerleri de dikkate alınarak nonlineer regresyon yöntemiyle analiz edilmiştir. Geliştiren nonlineer yöntemde Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmış olup ağırlıklandırma ~ yfit yöntemine göre yapılmıştır. (Press vd., 2007). Nonlineer regresyon için 4 adet regresyon katsayısı ( $c_1, c_2, c_3$  ve  $c_4$ ) ve 4 adet üst katsayısı ( $a_1, a_2, a_3$  ve  $a_4$ ) hesaplanmıştır. Verilerden elde edilen değerler ile nonlineer regresyon ile analiz edilen değerler Şekil 7'de verilmiştir. Geliştirilen nonlineer model ile ana makine gücünün tahminindeki  $R^2$  ise 0.958'lik çok yüksek yaklaşıma sahiptir. Analiz sonucunda Denklem 1 aşağıdaki gibi sunulmuştur.

$$\text{Ana Makine Gücü}^* = 4.89 \times 10^{-4} \times DWT^{*0.715} + 0.332 \times 10^{-2} \times GT^{*0.728} + 0.306 \times L^{*1.678} + 0.218 \times B^{*1.619} \quad (1)$$



**Şekil 7.** 1085 adet petrol tankeri için DWT ile gerekli olan güç ilişkisi (Veri Kaynağı: (Veritas, 2020))

Denklem 1’de verilen ifade yer alan Ana Makine Gücü\*, DWT\*, GT\*, L\* ve B\* değerleri her biri kendi kategorisindeki maksimum değer bulunup normalleştirilerek tüm değerler 0 ile 1 arasına getirilmiştir. Böylece regresyondaki her değişkenin etkisinin anlamlı olması sağlanmıştır. Her bir değişkene ait maksimum, minimum ve ortalama değerler Tablo 1’de sunulmuştur.

**Tablo 1.** 1085 adet petrol tankeri için Ana makine gücü, DWT, GT, L ve B değerlerine ait maksimum, minimum ve ortalama değerler (Veri Kaynağı: (Veritas, 2020))

	Ana makine gücü [kW]	DWT [ton]	GT	L [m]	B [m]
Maksimum	29400	323183	165965	330	60
Minimum	258	162	116	20	6.5
Ortalama	5750	34001	19371	132	23

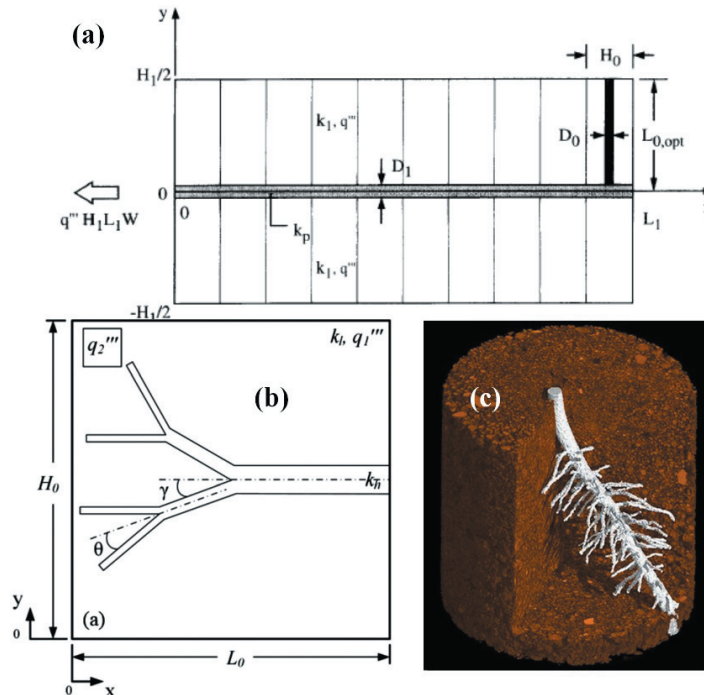
#### 4. Isı Transferi

Isının transfer edilmesi de enerjinin akışını içerdiğinden bir akış mekanizması oluşturmaktadır. Bu nedenle ısı transferi de enerjinin aktığı bir akış sistemi olarak düşünülebilir. Böylece Yapısal Gelişim Teorisi ile minimum dirençli bir ısı değiştirgecinin tasarımı ve akışkanı dağıtan bir yapının tasarımsal özelliklerinin benzer olduğu söylenebilir (Bejan & Lorente, 2008). Ancak ısı transferinde, akışkanlar mekaniğinden farklı olarak enerjinin akışı iletim, taşınım ve ışınım alt mekanizmaları sayesinde gerçekleştiğinden tasarımların boyutları ve yapılar arasındaki geometrik çap/boy gibi özellik oranları farklılık göstermektedir. Isı transferi artırımı için Yapısal Gelişim Teorisi batarya ısı yönetimi, elektronik soğutma, merkezî ısınma, türbin soğutma, iklimlendirme ve kendini soğutan akıllı malzemeler gibi birçok alanda uygulama bulmuştur. İletim ve taşınım mekanizmaları ile soğutma üzerine odaklanmış tasarımların farklı kullanım amaçları için (batarya ısı yönetimi, elektronik soğutma, ısı transfer artırımı gibi) yakın zamanda yapılmış çok sayıda yayın bulunmaktadır (Demirkıran vd., 2022; Feng vd., 2022; Gungor vd., 2022).

İletimin ısı direnci taşınımına kıyasla küçük olduğundan genelde ihmal edilmektedir. Ancak iletim ile ısı transferinin taşınım mekanizmasından ayrı düşünülmemeyeceğini ve ekipman boyutları küçüldükçe iletim dirençlerinin etkisinin ihmal edilemez seviyelere çıkacağını Bejan ve Lorente (2008) göstermiştir.

Birim hacim için üretilen ısı miktarının karakteristik cihaz boyutuna bağlı olarak hangi ısı transfer mekanizmasında nasıl bir performans gösterdiği Bejan ve Lorente (2008) tarafından ortaya konulmuştur. Karakteristik cihaz boyutunun en yüksek olduğu mertebeye doğal taşınım ve boyut düştükçe zorlanmış taşınımın daha yüksek ısı akışını sağladığını ortaya koymuşlardır. Cihaz boyutu küçüldüğünde ise iletim mekanizmasının daha yüksek ısı akışına karşılık geleceği belirtilmiştir. Bu sonuçlara ek olarak, bazı boyutların geçiş karakteristikleri göstereceği de aşikârdır. Örneğin; doğal taşınımdan zorlanmış taşınıma geçerken bu geçiş ani bir şekilde olmak yerine karışık taşınım olan bir bölge ile olmaktadır. Nano-akışkanlar üzerine literatürde birçok yayın olmasının arkasında da aslında zorlanmış taşınım ile iletim arasındaki geçiş bölgesinde nano-akışkanların bulunması olabilir. Ayrıca, bu geçiş bölgesinin dışında ısı geçiş oranında fark edilir bir artış olmaması da nano-akışkan literatüründe farklı sonuçların belgelenmesinin nedeni olarak görülebilir. Özetle, soğutulması gereken ısı üreten cihaz boyutları küçüldükçe, iletim ile ısı transfer edilmesine yönelik olan yüksek ısı iletim katsayısına sahip yapılara olan ihtiyaç da elektronik soğutmada kullanılan ısı köprüleri gibi artmaktadır.

Isı üreten bir yüzeye yüksek ısı iletim katsayılı malzeme ile kanallar yapma fikri Almogbel ve Bejan (1999) tarafından gösterilmiştir. Şekil 8a yüksek ısı iletim katsayısına sahip malzemenin  $D_0$  ve  $L_{0,opt}$  boyutlarında,  $H_0$  boyutundaki her birim alana yerleştirildiğini göstermektedir. Ayrıca çalışma, ısı transferi için farklı tasarım parametrelerinin en yüksek ısı iletimi sağlamak üzere nasıl değiştirilmesi gerektiğini tartışmaktadır. Fikrin temeli ise ısının akması için üretildiği yere yakın tali yollar (ısı direnci nispeten yüksek ısı akım çizgileri) bulunuyorsa bu tali yolların birleşeceği ana yolların olması ve bu ana yolların birleşeceği daha geniş yolların olmasıdır. Böylece belirli sayıda ısı akım çizgisinin birleştiği yere yüksek ısı iletim katsayısına sahip malzemeler yerleştirilmiş ve bu yolların bulunduğu birim alanlar yüksek ısı iletim katsayısına sahip malzemelerin olduğu bölgelerde birleştirilmiştir. Yüksek ısı iletim katsayısına sahip malzemenin homojen olarak dağıtılması yerine belirli bir tasarımla yerleştirilmesinin ne kadar önemli sonuçları olacağını ilk defa Cetkin (2014) ortaya koymuştur. Cetkin %1 hacim oranında yüksek ısı iletim katsayısına sahip malzemenin belirli bir tasarımla yerleştirilmesinin homojen olarak dağıtılmasına kıyasla tüm ısı direnci 3 kat azalttığını göstermiştir.



**Şekil 8.** (a) Yüksek ısı iletim katsayılı eklentilerin şematik çizimi (Almogbel & Bejan, 1999) (b) Homojen olmayan ısı üretimi olduğunda dallı yapının oluşumu ve ısının yoğunlaştığı yere yönelmesi (Cetkin & Oliani, 2015) (c) Bitki kökünün suyun olduğu yöne doğru yönelmesi (Bao vd., 2014)

Yapısal Gelişim Teorisi ile ortaya çıkan tasarımların dallı yapılar içermesi ve geometrik olarak ağaçlara, akciğere, yıldırıma benzemesi nedeniyle bir bio-benzeşim modeli olduğu zannedilebilir. Ancak bio-benzeşimde, doğadaki bir yapının çalışma prensibi anlaşıldıktan sonra boyutsal özellikleri kopyalanarak mühendislik uygulamalarında kullanımına geçilir. Gözlemi yapılan doğadaki canlıların işlevleri doğru bir şekilde anlaşılıp uygulanırsa mühendislik uygulamalarında avantajlar sağlar. Yapısal Gelişim Teorisi ise bir yapının belirli sınır şartlarında optimum olacağı ve zamanla bu şartların değişmesiyle yapının da değişmesi gerektiğini tartışır. Bu nedenle aslında doğadan bir kopyalama yapılmamaktadır. İletim özelinde bir örnek ile bu husus açıklanabilir (Cetkin & Oliani, 2015). Homojen olmayan ısı üretimi olan bir plakanın soğutulması için ısı iletim katsayısı yüksek malzemenin yüzeye nasıl dağıtılması gerektiği sayısal parametrik analizler ile ortaya çıkarılmıştır. Simülasyonlarda enerjinin korunumu denklemi, ısı üretimi olan ve olmayan bölgeler için çözülmüştür. Denklem (2) ısı üretimi olan ve nispeten düşük ısı iletim katsayısına sahip hacimde, Denklem (3) ise ısı üretimi olmayan ve yüksek ısı iletkenliğe sahip köprüsü hacmi için geçerli olan enerjinin korunumu denklemlerini göstermektedir.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{q'''}{k_1} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

Bu denklemlerde T sıcaklığı,  $q'''$  hacimsel ısı üretimini,  $k_1$  ısı üreten hacmin ısı iletkenliğini ve x ile y de koordinatları göstermektedir. Yüksek ısı iletkenliğe sahip olan ısı köprüleri ısı üreten hacmin içerisinde olduğu için ısı geçişi yalnızca onu çevreleyen hacimden olmaktadır. Bu nedenle Denklemler (2) ve (3) sayısal olarak çözülürken iki malzemenin ara yüzeyinde termodinamiğin birinci yasası olan enerjinin korunumu denkleminin uygulanması gerekmektedir.

Birinci yasa genel haliyle Denklem (4)' te verilmiştir.

$$\dot{E}_{giren} - \dot{E}_{çıkan} = \frac{dE_{sistem}}{dt} \quad (4)$$

Ara yüzeyin kütlesi olmayan bir sınır ayrımı olması nedeniyle burada enerjinin depolanması söz konusu olmamaktadır. Bu nedenle  $dE_{sistem}/dt$  terimi sıfır olmaktadır. Ayrıca enerji geçişinin yalnızca ısının geçişi nedeniyle olması da değerlendirildiğinde ara yüzey için birinci yasa Denklem (5)'te görüldüğü üzere yazılabilir.

$$k_l \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_l = k_h \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_h \quad (5)$$

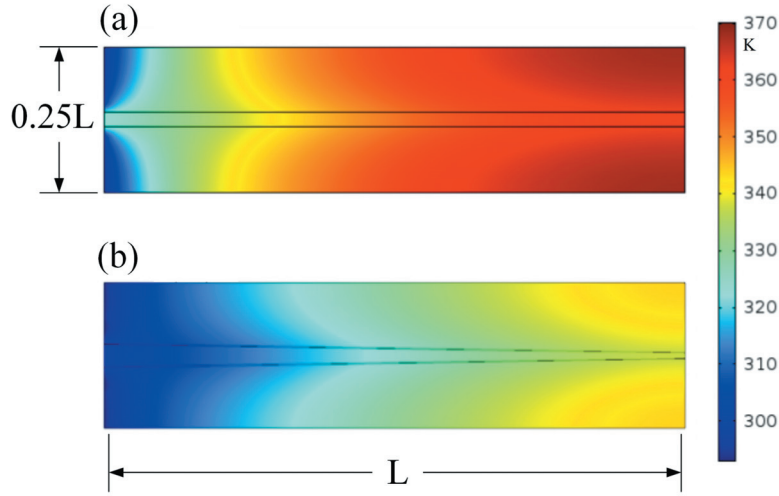
Bu denklemde l ve h sırasıyla düşük ve yüksek iletim katsayılı hacimlerin buldukları bölgeyi,  $k_h$  ve  $k_l$  yüksek ısı iletim katsayılı ısı köprüsünün ve düşük ısı iletim katsayılı hacmin iletim katsayısını ve n ise normal vektörü göstermektedir. Bu denklemlerin boyutsuz hâlde çözümleri sırasında boyutsuz ısı üretim değerlerinin sabit  $q''' = 1$ 'e pozisyona bağlı ( $q''' = 2(1-x)$  ve  $q''' = 2x$ ) durumlar için sabit bir ısı kuyusu tanımlanmış olup kanalların tasarımı ile değişen ısı geçişi oranları ortaya çıkarılmıştır. Yapılan çözümler sonucunda simetrik ve asimetric ağaç yapılı ısı köprülerinin hangi ısı üretim karakteristiklerinde akış direncini minimize ettiği ortaya koyulmuştur. Elde edilen sonuçlar ise aynı türden ağaçların ortama uyum sağlayarak akış dirençlerini minimize etmek için tasarimsal olarak simetrik ve/veya asimetric şekilde neden büyüdüğünü, elektronik soğutma için ısı köprüsü optimizasyonu sırasında ortaya çıkarmıştır. ısı iletimi ile ağaçların akış karakteristiğinin yakın olması ise

ağaçların köklerinin büyüdüğü toprağın gözenekli bir yapıya sahip olması nedeniyle kullanılan akış denkleminin ( $q = -K/\mu \cdot \nabla P$ ) ısı iletimi ( $q = -kdT / dn$ ) denklemi ile aynı olmasındandır (Bejan & Lorente, 2008).

Bu çalışma dallı yapı kullanılırsa bu dallar, ısı üretiminin nispeten yüksek olduğu bölgeye doğru büyürler (Şekil 8b). Tüm hesaplamalar bittikten sonra ise Bao vd. (2014)'nin deneysel çalışmalarında bitki köklerinin suya doğru büyüdüğü (Şekil 8c) ve kök yapısının Cetkin ve Oliani'nin çalışmasındaki (2015) ile aynı olduğunu gözlemlenmiştir. Cetkin ve Oliani (2015) parametrik olarak gerçekleştirdikleri simülasyonlar ile ısı dirençleri minimize etmek için çok sayıda parametreyi optimize etmiş ve buldukları tasarım aynı sınır şartları için bitki kökünün geometrisi olmuştur. İlk başta alakasız gibi görünen iki durum aslında dikkatlice düşünüldüğünde aynı diferansiyel denklem ile karakterize edilmektedir. Özetle, bitki kökü tasarımı dirençleri en aza düşürerek suyu ve mineralleri toplayacak şekildedir. Cetkin ve Oliani (2015)'nin amacı dirençleri minimize etmek olduğundan ortaya çıkan tasarım da bitki kökü tasarımı ile aynı olmuş yani bitki kökü tasarımı kopyalamadan ve gözlemlenmeden analizler ile bitki kökü tasarımının nasıl olması gerektiğini ortaya çıkarmışlardır.

Literatürde her ne kadar yüksek ısı iletime sahip malzemelerin dallı yapılardan oluştuğu bilinse de ısı dirençlerin istenen homojenliğe gelmesi sağlanarak en yüksek sıcaklık değeri düşürülmüş olsa da her dalın kesitinin sabit kaldığı en büyük kabulü oluşturmaktadır. Ancak doğada hiçbir dallı yapının sabit kesitli olmadığı bilinmekte ve farklı örnekler üzerinden Yapısal Gelişim Teorisi değerlendirildiğinde Bejan ve Lorente (2006) kesitin akış fiziğine göre değişmesi gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle kesit değişiminin ısı dirençleri ve sıcaklık dağılımını nasıl etkilediğini ortaya çıkarmak önem arz etmektedir.

Uzunluğu L ve yüksekliği 0.25L olan bir elemansal yüzey alanı içerisinde ısı iletim katsayısı ısı üretimi olmayan bölge için 100 kat daha fazla olarak tanımlanmıştır. Isı üretimi olan bölgedeki boyutsuz ısı üretimi oranı 1000 olarak tanımlanmıştır. Isı üretimi olmayan bölge elemansal hacmin tam ortasından geçen boydan boya bir kanatçık olarak tanımlanmıştır. Sabit kesite sahip olduğu durumda yüksekliği 0.025L ve uzunluğu L olup, toplam hacmin %10'una karşılık gelmektedir. Kanatçık için ayrılan alan her iki durumda da aynı olmakla birlikte lineer olarak değişen durumda en yüksek kanatçık yüksekliği 0.04L ve en düşük de 0.01L'dir. Yüzeyin sol tarafında taşınım ile ısı transferi tanımlanmış olup  $\overline{Nu} = 500$  ve akışkan sıcaklığı 293K'dir. Diğer tüm yüzeyler ise simetri sınır koşulu ile tanımlanmıştır. Böylece elemansal yüzey alanının çok büyük bir yüzeyin devam eden küçük bir parçası olduğu yaklaşımına uygun seçimler yapılmıştır. Sabit kesitli kanatçık için sıcaklık dağılımı Şekil 9a'da verilmiştir. Şekil 9b ise kesitin lineer bir şekilde azalması durumunda aynı yüzey alanı için sıcaklık dağılımını göstermektedir. Yüksek ısı iletime sahip malzemenin kesitinin uzunluğa bağlı olarak tanımlanması ile ısı akışına karşı olan direncin azaldığı ve bundan dolayı hem en yüksek sıcaklığın düştüğü hem de sıcaklık dağılımının homojenliğinin arttığı görülmektedir. Her malzemenin yüzey alanı her iki durumda da sabit kaldığından Yapısal Gelişim Teorisi ile ortaya çıkarıldığı üzere malzemelerin yerleşimi yani tasarımın sistemin hayatta kalması için belirli bir şekilde oluşumu, kesit alanının sabit olmaması gerektiğini göstermektedir.



**Şekil 9.** Yüksek ısı iletim katsayılı eklentiye sahip ısı üreten elemansal yüzey alanının sıcaklık dağılımı (a) eklenti kesit alanı sabit olduğunda, (b) eklenti kesit alanı lineer olarak değiştiğinde.

Isı değiştiricilerinde ısı transfer artırımı için Yapısal Gelişim Teorisi'nden faydalanan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin; Asadi vd. (2018) ısı geçişine olan direnci en düşük seviyeye çekmek için kanatçık boyutları ve kanatçıkların aralarındaki mesafeyi optimize etmişlerdir. Bejan vd. (2016) karşıt akışlı bir ısı değiştirgecinde ısı ve akış dirençlerini en düşük seviyeye düşürmek için tasarımsal değişiklikler yapmıştır. Ayrıca ortaya çıkardıkları tasarımın laminar ve türbülanslı akış için geçerli olduğunu hesaplarında göstermişlerdir. Rodrigues vd. (2015) Yapısal Gelişim Teorisi'nden faydalanarak toprak kaynaklı bir ısı pompasında toprağa gömülmüş olan ısı değiştirgeci borularının yerleşimini optimize etmişlerdir. Toprak yüzey sıcaklığını zamana bağlı bir fonksiyon olarak tanımlamış ve deneysel sonuçlarla sayısal sonuçların doğruluğunu da ortaya koymuşlardır. Mirzaei vd. (2017) ise borulu ısı değiştiricilerinde Yapısal Gelişim Teorisi'nden faydalanarak aynı üretim maliyeti için ısı değiştirgeci etkinliğinin artırılabilceğini göstermişlerdir.

## 5. Sonuç

Yapısal Gelişim Teorisi tabiattaki hareketin prensiplerini en kapsamlı şekilde sunan yaklaşımlardan birisidir. Tabiattaki akış sistemleri ile mühendislikteki sistemlerin ve süreçlerin aynı prensiplere dayandığını göstermektedir. Benzer yaklaşımlar hareketin olduğu her alanı, sosyal bilimlere de kapsayacak şekilde açıklama imkânı sunmaktadır.

Tabiatta akış her zaman mevcut şartlar içerisinde en az dirençli yol ile gerçekleşme eğilimindedir çünkü minimum direnç aynı zamanda hareket için harcanması gereken minimum enerji anlamına gelir. Bu durum ısı transferinde de geçerlidir. Çünkü ısı transferi de tıpkı diğer akış sistemlerinde olduğu gibi akış minimum dirence doğru olacak şekildedir. Aynı prensip araçlar için de geçerlidir. Araçlardaki tasarımların yapısı zamanla hareket esnasında minimum direnç oluşturacak şekilde değişmektedir. Aynı zaman diliminde ise araçlarda boyut büyüdükçe hareket için gerekli olan birim kütle başına güç azalmaktadır. Bu çalışmada bu olgu gemiler üzerinden gösterilmiştir. Gemilerde boyut (DWT) arttıkça taşınacak birim yük başına gerekli olan güç azalmaktadır. Hem gemi boyutu ile gereksinim olan güç ilişkisi hem de ısı transferi örneğiyle Yapısal Gelişim Teorisi'nin bu iki alandaki ilişkisi bu çalışmada gösterilmiştir.

## Referanslar

Almogbel, M., & Bejan, A. (1999). Conduction trees with spacings at the tips. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42(20), 3739-3756. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(99\)00051-4](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00051-4)

Asadi, M., Sunden, B., & Xie, G. (2018). Constructal Optimization of Louver Fin Channels Subjected to Heat Transfer Rate Maximization and Pressure Loss Minimization. *Heat Transfer Engineering*, 39(5), 436-448. <https://doi.org/10.1080/01457632.2017.1312881>

Bao, Y., Aggarwal, P., Robbins, N. E., Sturrock, C. J., Thompson, M. C., Tan, H. Q., Tham, C., Duan, L., Rodriguez, P. L., Vernoux, T., Mooney, S. J., Bennett, M. J., & Dinneny, J. R. (2014). Plant roots use a patterning mechanism to position lateral root branches toward available water. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(25), 9319-9324. <https://doi.org/10.1073/pnas.1400966111>

Basak, T. (2011). The law of life: The bridge between physics and biology. *Physics of Life Reviews*, 8(3), 249-252. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2011.07.003>

Bejan, A. (1996). Street network theory of organization in nature. *Journal of Advanced Transportation*, 30(2), 85-107. <https://doi.org/10.1002/atr.5670300207>

Bejan, A. (1997). Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(4), 799-816. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(96\)00175-5](https://doi.org/10.1016/0017-9310(96)00175-5)

Bejan, A. (2013). Technology Evolution, from the Constructal Law. İçinde *Advances in Heat Transfer* (C. 45, ss. 183-207). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407819-2.00003-7>

Bejan, A. (2015). Constructal Law: Optimization as Design Evolution. *Journal of Heat Transfer*, 137(6), 061003. <https://doi.org/10.1115/1.4029850>

Bejan, A. (2016a). Rolling stones and turbulent eddies: Why the bigger live longer and travel farther. *Scientific Reports*, 6, 21445. <https://doi.org/10.1038/srep21445>

Bejan, A. (2016b). *The Physics of Life: The Evolution of Everything*. St. Martin's Press.

Bejan, A. (2017). Evolution in thermodynamics. *Applied Physics Reviews*, 4(1), 011305. <https://doi.org/10.1063/1.4978611>

Bejan, A., Alalaimi, M., Lorente, S., Sabau, A. S., & Klett, J. W. (2016). Counterflow heat exchanger with core and plenums at both ends. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 99, 622-629. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.117>

Bejan, A., & Errera, M. R. (2014). Technology evolution, from the constructal law: Heat transfer designs. *International Journal of Energy Research*, 39(7), 919-928. <https://doi.org/10.1002/er.3262>

Bejan, A., Ferber, L., & Lorente, S. (2020). Convergent Evolution of Boats with Sails. *Scientific Reports*, 10(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58940-5>

Bejan, A., Gunes, U., Charles, J. D., & Sahin, B. (2018). The fastest animals and vehicles are neither the biggest nor the fastest over lifetime. *Scientific Reports*, 8(1), 12925. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30303-1>

Bejan, A., Gunes, U., & Sahin, B. (2019). The evolution of air and maritime transport. *Applied Physics Reviews*, 6(2), 021319. <https://doi.org/10.1063/1.5099626>

- Bejan, A., & Lorente, S. (2006). Constructal theory of generation of configuration in nature and engineering. *Journal of Applied Physics*, 100(4), 041301. <https://doi.org/10.1063/1.2221896>
- Bejan, A., & Lorente, S. (2008). *Design with Constructal Theory*. John Wiley & Sons, Inc.
- Bejan, A., & Lorente, S. (2010). The constructal law of design and evolution in nature. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1545), 1335-1347. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0302>
- Bejan, A., & Lorente, S. (2011). The constructal law and the evolution of design in nature. *Physics of Life Reviews*, 8(3), 209-240. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2011.05.010>
- Bejan, A., & Lorente, S. (2013). Constructal law of design and evolution: Physics, biology, technology, and society. *Journal of Applied Physics*, 113(15), 151301. <https://doi.org/10.1063/1.4798429>
- Cetkin, E. (2014). Three-dimensional high-conductivity trees for volumetric cooling. *International Journal of Energy Research*, 38(12), 1571-1577. <https://doi.org/10.1002/er.3176>
- Cetkin, E., & Oliani, A. (2015). The natural emergence of asymmetric tree-shaped pathways for cooling of a non-uniformly heated domain. *Journal of Applied Physics*, 118(2), 024902. <https://doi.org/10.1063/1.4926620>
- Chen, L. (2012). Progress in study on constructal theory and its applications. *Science China Technological Sciences*, 55(3), 802-820. <https://doi.org/10.1007/s11431-011-4701-9>
- Demirkiran, İ. G., Rocha, L. A. O., & Cetkin, E. (2022). Emergence of asymmetric straight and branched fins in horizontally oriented latent heat thermal energy storage units. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 189, 122726. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122726>
- Feng, H., Chen, L., Zhang, F., & Ge, Y. (2022). Constructal design of a fan-shaped high thermal conductivity path in a square heat generation body. *Case Studies in Thermal Engineering*, 102565. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102565>
- Gungor, S., Cetkin, E., & Lorente, S. (2022). Canopy-to-canopy liquid cooling for the thermal management of lithium-ion batteries, a constructal approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 182, 121918. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121918>
- Güneş, Ü. (2019). *Hareketli Sistemlerin Performans ve Boyut İlişkisi: Yapısal Gelişim Teorisi* [Doktora Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Kakac, S. (2016). Evolution of the science of thermodynamics: The history. *Journal of Thermal Science & Technology*, 36(2), 1-6.
- MAN Diesel. (2008). *B&W-dieselmotorens historie 1898 – 2008*. MAN Diesel, DieselHouse.
- MAN-ES. (2019). *DieselHouse by MAN-ES*.
- Mirzaei, M., Hajabdollahi, H., & Fadakar, H. (2017). Multi-objective optimization of shell-and-tube heat exchanger by constructal theory. *Applied Thermal Engineering*, 125, 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.137>
- NASA. (2022, Mart 10). *World of Change: Growing Deltas in Atchafalaya Bay*. World of Change: Growing Deltas in Atchafalaya Bay; NASA Earth Observatory. <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/WaxLake>



Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (2007). 15.5 Nonlinear Models. İçinde *Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press.

Reis, A. H. (2006). Constructal theory: From engineering to physics, and how flow systems develop shape and structure. *Applied Mechanics Reviews*, 59(5), 269-282. <https://doi.org/10.1115/1.2204075>

Rodrigues, M. K., da Silva Brum, R., Vaz, J., Oliveira Rocha, L. A., Domingues dos Santos, E., & Isoldi, L. A. (2015). Numerical investigation about the improvement of the thermal potential of an Earth-Air Heat Exchanger (EAHE) employing the Constructal Design method. *Renewable Energy*, 80, 538-551. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.041>

Scopus. (2022, Eylül 9). *Scopus—Constructal law search*. <https://www.scopus.com/>

Skyscanner. (2022a). Flights from New York to Raleigh/Durham. <https://www.skyscanner.net/routes/nyca/rdu/new-york-to-rayleigh--durham.html>

Skyscanner. (2022b). *Skyscannerskyscanner*. <https://www.skyscanner.net/routes/ista/nyca/istanbul-to-new-york.html>

Veritas, B. (2020). Bureau Veritas VeriSTAR. <https://www.veristar.com/portal/veristarinfo/generalinfo/registers/seaGoingShips>

# Tekne ve Makine Sigortaları Kapsamında Türk Deniz Ticaret Filosunun Risk Analizi

Kadir Emrah Erginer

Gemi Makinaları İşletme Mühendisliği Bölümü, Denizcilik Fakültesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye

emraherginer@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2227-3486

## ÖZET

Dünyada sigortacılığın ilk örnekleri denizcilikte kullanılmıştır. Özellikle deniz sigortalarının günümüzde kullanılmakta olduğu anlamıyla ilk örnekleri Edward Lloyd tarafından Londra'da işletilmekte olan kahvehanede başlamış ve günümüzde deniz sigortaları denildiğinde akla ilk gelen pazar Lloyd's olmaktadır. Armatör işletmeleri tarafından en önemli varlıkları olan ve milyonlarca ABD Doları değerindeki gemileri her seferlerinde ya da limanlarda birçok farklı riskle karşı karşıya kalmaktadır. Armatör işletmeleri bu nedenle en değerli varlıkları olan gemilerini olası hasar ya da kayıplara karşı sigortalatmak ihtiyacı duymuşlardır. Bu çalışmanın ana amacı armatör işletmeleri tarafından ödenmekte olan tekne ve makine sigortası primlerinin matematiksel risk modelinin yapılarak incelenmesidir. Bu çalışmanın en büyük kısıtı deniz sigorta sektörünün çok fazla konservatif (kapalı) ve dış kaynaklı olmasıdır. Türkiye'de mevcut tekne ve makine sigortası kapsamında hasar ve prim oranlarının yayınlanmış net bir kaynağına erişilememiştir ve bu nedenle yapılan risk modellemesi sonucu oluşan değerler başka verilerle kıyaslanamamıştır. Birinci bölümde risk kapsamlı bir şekilde tanımlanmıştır. İkinci bölümde risk ve sigorta kavramları arasındaki ilişki detaylandırılmıştır. Üçüncü bölümde deniz sigortaları sınıflandırılmış, dördüncü bölümde ise tekne ve makine sigortaları ve reasürans kapsamlı bir şekilde anlatılmıştır. Beşinci bölümde çalışmanın matematiksel modellenmesi hakkında teorik bilgi verilmiş ve altıncı bölümde bu modelleme Türk Deniz Ticaret Filosu'na uygulanmıştır. Son bölümde ise sonuçlar verilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Tekne ve Makine Sigortası, Risk Modellemesi, Aktüerya, Türk Deniz Ticaret Filosu

**Makale geçmişi:** Geliş 21/11/2022 – Kabul 13/12/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1208026>

# Risk Analysis of the Turkish Merchant Marine Fleet within the Scope of Hull and Machinery Insurance

**Kadir Emrah Erginer**

Department of Marine Engineering Operations, Faculty of Maritime, Dokuz Eylül University, Izmir, Türkiye

emraherginer@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2227-3486

## ABSTRACT

The early examples of insurance are used in the maritime industry. The earliest examples of marine insurance being used as today are started by Edward Lloyd in the coffee house operated in London and Lloyd's is the first market that comes to mind in the field of marine insurance. The most valuable assets of shipping companies, worth millions of dollars, may face many different risks on every voyage or in ports. For this reason, shipowner companies felt the need to insure their most valuable assets, their ships, against possible damage or loss. The main purpose of this study is to investigate the hull and machinery insurance premiums paid by shipping companies by creating a mathematical risk model. A published source of net damage and premium rates under the current hull and machinery insurance could not be retrieved in Turkey so the values formed as a result of risk modelling could not be compared with other available data. The risk is comprehensively defined in the first section. In other following sections, the correlation between risk and insurance concepts is presented in detail. Then marine insurance is classified, and hull and machinery insurance and reinsurance are explained in detail, and also theoretical background on the mathematical model of the study is provided with the model application to the Turkish Merchant Marine Fleet. Finally, the results of this study are shown in the last section.

**Keywords:** Hull and Machinery Insurance, Risk Modelling, Actuary, Turkish Merchant Marine Fleet

**Article history:** Received 21/11/2022 – Accepted 13/12/2022

## 1. Risk Tanımı

Risk kelimesi günlük hayatta oldukça sık olarak kullanılmaktadır. Olayları birbirleri ile mukayese ederken, hangisinin diğerinden daha riskli olduğu tartışılmaktadır ve çoğu zamanda daha az riskli olana göre karar verilmektedir. İnsanoğlunun var olduğu günden günümüze kadar gelen ve gelecekte de varlığını sürdüreceği ve daha da büyük önem kazanacak olan riskin kelime kökeni de insanoğlunun ilk keşfettiği birçok konu gibi denizciliğe dayanmaktadır. Risk kavramı ne kadar süredir insanoğlunun hayatının bir parçasıdır? Bu soruya verilecek en doğru cevap, riskin insanoğlunun varlığı kadar eski bir kavram olduğudur. Belki, günümüzdeki gibi detaylı bir şekilde tanımlanıp, hakkında kapsamlı araştırmalar ve çalışmalar yapılmıyordu; ama binlerce, hatta milyonlarca yıl önce de insanların yaşantılarında sayısız risk olduğunu ve bu risklerin en azından bir kısmıyla başa çıkmak için bir takım risk yönetim tekniklerinin, ne yaptıklarını tam da kavrayamamış olsalar bile, bir şekilde kullanıldığını tahmin etmek hiç de zor değildir (Çipil,2008:26). Risk kelimesi düşünüldüğünde herkese çok tanıdık ve hemen tanımlanabilecek bir kelime gibi gelmektedir. Oysa risk günlük yaşamda birçok farklı konuda kullanılan ama en az anlaşılmalı olan terimlerden birisidir (Kuo, 1999:4). Böylesine kolay anlaşılabilir ama tam anlamıyla da anlaşılması güç olan "risk" kavramının kökenini araştırdığımızda: "risk" sözcüğünün eski İtalyancada "cüret etmek" anlamında kullanılan "risicare" fiilinden geldiğini görülmektedir. Bu anlamda risk, kaderden çok bir seçimdir yani insanlar karşılaştıkları durumlarda bir yol ayırmasına geldiklerinde olaylar arasındaki risk potansiyeline göre karar vermek durumunda kalmaktadırlar. Riskin hikâyesi tamamen, tercih yapma özgürlüğümüz ölçüsünde göze aldığımız eylemlerdir ve bu öykü, insan olmanın anlamını tanımlamamızı sağlamaktadır (Bernstein, 2006:26). Risk sözcüğünün bugünkü anlamı ile kullanımının ise 17. yüzyılın sonlarından itibaren başladığı da söylenebilir. Fransızca "risque" ile İtalyanca "risicare" sözcüklerinden diğer dillere geçen risk kavramının temel çıkış noktasının ise antik Yunancadaki "rhiza" sözcüğü olduğu da kabul edilmektedir. Ancak, rhiza sözcüğünün Antik Yunan'daki anlamı bugün bildiğimiz risk sözcüğünden çok farklı olarak "kök" anlamında kullanılmaktaydı. Şair Homeros'un yazdığı iki büyük destandan biri olan Odesa Destanına adını veren kahraman Odysseus'un Scylla'nın sarp kayalıklarında kendisini Charybdee'den vahşi bir incir ağacının köklerine tutunarak kurtarmaya çalışmasının anlatıldığı öyküde kullanılan "rhiza" sözcüğü mecazi olarak "denizde tehlikeden kaçınma güçlüğü" anlamına sahipti. Yani risk kelimesi dünyada ilk defa denizcilik literatüründe kullanılmıştır. Sözcük, daha sonraları Latince "sarp kayalık/cliff" anlamında da kullanılmıştır. Latince biraz daha değişen sözcük diğer dillere geçmiştir. Nitekim rhiza Latincedeki "resicum, risicum, rischio" sözcüklerinin, İtalyancadaki "risicare, risico, risco, rischio" 'nun, İspanyolcadaki "riesgo" ve Fransızcadaki "risque" kelimelerinin kökenidir. İngilizler, İspanyolcadan, Almanlar ise İtalyancadan risk sözcüğünü ödünç alırken, diğer pek çok dile de özellikle 18. Yüzyıldan sonra Fransızcadan geçmiştir. Sanayi Devrimleri sonrasındaki süreçte, İngilizce'nin Fransızca'dan daha yaygın hale gelmesiyle birlikte İngilizcedeki risk sözcüğü pek çok dile yayılmıştır (Çipil, 2008:4, <https://tr.wikipedia.org/wiki/Risk>, 20.11.2019, <http://plato.stanford.edu/entries/risk/>, 20.11.2019). Türkçede ise risk kavramı eş anlamlı olarak kullanılan iki sözcük ile yani risk ve riziko olarak kullanılmaktadır. Türk Dil Kurumu (TDK) Türkçe Sözlüğü'ne bakıldığında, bu iki sözcük tamamen eş anlamlı olup, risk Fransızca'dan, riziko ise İtalyanca'dan dilimize geçtiğini görmekteyiz. Riziko, daha eski tarihli çalışmalarda daha sık kullanılırken, günümüzde daha çok tercih edilen eş anlamlı kelime ise "risk"tir. Risk kelimesini kullandığımızda mutlaka içinde herhangi bir belirsizliğin olduğu konuyu tartışıyoruz anlamına gelmektedir. Risk, bir olayın olasılığı ile sonuçlarının kombinasyonudur (ISO/IEC Guide 73:2002, ISO 8402:1995 / BS 4778). Risk sözcüğü günlük hayatımızda ve işletmelerde birçok farklı anlama sahiptir ve farklı anlamlarda kullanılmaktadır. Ama çoğunlukla risk, belirsizlik sonucunda meydana gelecek olan herhangi bir durumu tanımlamak için kullanılır (Harrington

v.d., 2003:1). Genel anlamda risk; bir olayın gerçekleşen sonucunun, beklenen sonucundan önemli derecede sapmasının objektif olasılığı olarak tanımlanabilir (Akmüt, 1980:26). Risk kelimesinin tek bir tanımı yoktur. Her ne kadar ekonomistler, risk teorisyenleri, istatistikçiler ve aktüerler kendilerine göre farklı tanımlamalar yapsalar da geleneksel olarak risk kelimesi belirsizlik açısından tanımlanmaktadır. Bu kapsamda risk kaybı oluşturan belirsizlik olarak tanımlanır (Rejda, 2003:3). Risk belirsizlik olarak tanımlanmakla birlikte sıkıntıya maruz kalma anlamına da gelmekte olup sigortacılık sektöründe ise sigortalanmış muhataralar anlamına gelmektedir. Risk kelimesi sıklıkla sigorta ile bağlantılı olarak kullanılmaktadır. Sigortanın en önemli özelliği risklerin sigortacıya transfer edilmesidir. Genel olarak kabul edilmiş bir risk tanımlaması bulmak kolay değildir. Birçok farklı tanımından iki tanesi ayıracıdır. Bunlardan ilki; risk bir olayın olası sonuçlarının varyasyonlarının tesadüflere dayanmasıdır diğer bir anlamda beklenen veya istenilen farklı sonuçların sayısı arttıkça riskte daha çok büyür ve olumsuz sapma olasılığı artar. İkinci anlamı ise; ortalama beklenen kayıp çevresindeki değişim büyüdükçe riskte büyür. Bu tanım muhtemel kayıplarla alakalı belirsizliklerin tanımıdır. Sigortacılık sektöründe çalışanlarsa riski genellikle kayba maruz kalma olarak tanımlarlar (Dorfman, 2001:6). Risk, kişinin sakınmak istediği zararın elemanıdır. Belirsizliği, şüpheli, kayıp olasılığını ve zarar ihtimalini ifade eder. Sistemin belli bir zayıflığından faydalanarak sisteme zarar verme ihtimalidir (Yaralıoğlu, 2010:3). Risk sigortacılıkta ise meydana gelmesi muhtemel hasar olasılığı şeklinde de açıklanmaktadır (Güredin, 1976:7). Belirsizlik ortamında bir sonucun ya da geleceğin öngörülebilmesi, üzerinde durulması gereken önemli alanlardan biridir. Küreselleşmenin etkilerinin her geçen gün daha fazla hissedilmesi ile belirsizlik kavramı daha da karmaşıklaşmıştır. Karmaşıklaşan belirsizlik ortamında öngörme, kestirme ve tahmin yöntemleri geliştirilmeli ve de olaylar tesadüfe bırakılmamalıdır (Fıkırkoca, 2003:7).

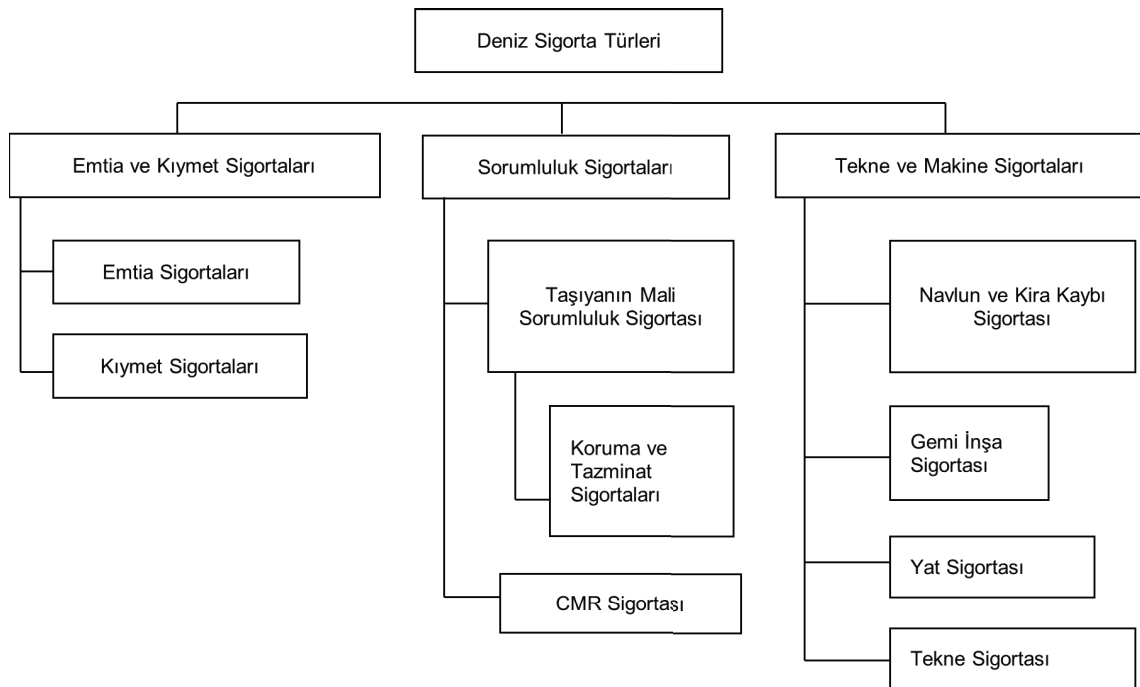
## 2. Risk ve Sigorta

Sigortanın ilk ve en önemli fonksiyonu kişilere ve ticari işletmelere ekonomik ve sosyal hayatta güvende olmalarını sağlamaktır. 19. yüzyılda şehirleşme ve sanayileşmenin gelişmesi ile önemi çok fazla artmıştır. 20. yüzyılda ise gelişen teknoloji ve iş sahalarının çeşitliliği neticesinde sorumluluk sigorta anlayışı gelişmiştir. İnsanlar ölmekte, hastalanmakta, sakatlanmakta ve işsiz kalabilmektedir. Ticari işletmeler iflas etmekte, hırsızlıkla soyulabilmekte ve yangın ile her şeyini kaybedebilmektedir. Mesleki sorumluluğun risk unsuru olarak, ticari faaliyetini devam ettirirken üçüncü şahıslara zarar verebilmektedir. Mesleki sorumluluğunu yerine getirirken meydana gelen bu risk unsuru, yukarıda sayılan olasılıklardan bir tanesinin gerçekleşmesi kişinin ya da ticari işletmenin ekonomik olarak zarara uğramasına neden olabilmektedir. Bu olasılıklara kaza denilmektedir. Risk ise kazanın gerçekleşme olasılığıdır. Kazanın ise gerçekleşme ihtimalini, ne zaman meydana gelebileceğini kimse bilememektedir (kötü niyetli kasten yapılmamışsa). Yalnızca oluşabilecek kazaya önceden önlem alınabilmektedir. Bu bile kazanın olmamasına neden değildir. İnsanlar oluşabilecek kazaya ya da belirsizliğe önceden önlem alma gereksinimi duymaktadır. Riskin gerçekleşme olasılığı başlangıçta önlem olarak azaltılabilmektedir. Ama sonuçta risk gerçekleşir ise oluşabilecek kayıpları da telafi edecek önlemler alınabilir. Bunu sağlayan sisteme sigorta güvencesi denilmektedir (Özbolet, 2008,31). Riskler, doğal olaylar ya da kaza nedeniyle üçüncü şahısların bilerek veya bilmeyerek neden oldukları davranışlar sonucu gerçekleşmektedir. Kişiler, arzu etmedikleri halde karşılaşma ve sonunda da ekonomik durumlarında olumsuzluklar meydana getirme ihtimali bulunan çeşitli olaylara (risklere) karşı korunma ihtiyacı hissetmişler, önlemler alma yoluna gitmişlerdir. Bu önlemlerden biri de kişilerin taşıdıkları riski, bir başkasına devretmeleridir. Risklerin bu şekilde sistemli organizasyonlara devredilmesi, hayat sigortaları dışındaki sigorta branşlarını ortaya çıkarmıştır. Sigorta, aynı türden tehlikeyle karşı karşıya olan

kişilerin, belirli bir miktar para ödemesi yoluyla toplanan tutarın, sadece o tehlikenin gerçekleşmesi sonucu fiilen zarara uğrayanların zararını karşılamada kullanıldığı, bir risk transfer sistemidir. Sigorta işletmelerinin geleneksel işlevi, ekonomik zararı önleme ve telafi etme işlevidir, insanlar, ölüm, hastalık, kaza, işsizlik gibi rizikolarla karşı karşıyadır. Şirketler de yangın, hırsızlık, patlama, kaza gibi (muhatara olarak-peril-adlandırdığımız) nedenlerle aktiflerini kaybetme, kasıtsız eylemleri ile üçüncü kişilere zarar verme, yanlış pazarlama ve üretim politikaları izleme gibi rizikolarla karşı karşıyadır. Öte yandan çağımızda yurtiçi ve yurtdışı ekonomik faaliyetin son derece karmaşık bir niteliğe sahip olması riziko olasılığını artırmaktadır. Bu noktada sigorta, bir riziko/risk yönetimi aracı olarak devreye girmekte ve bir dizi işlev üstlenmektedir (Güvel v.d.,2006:30).

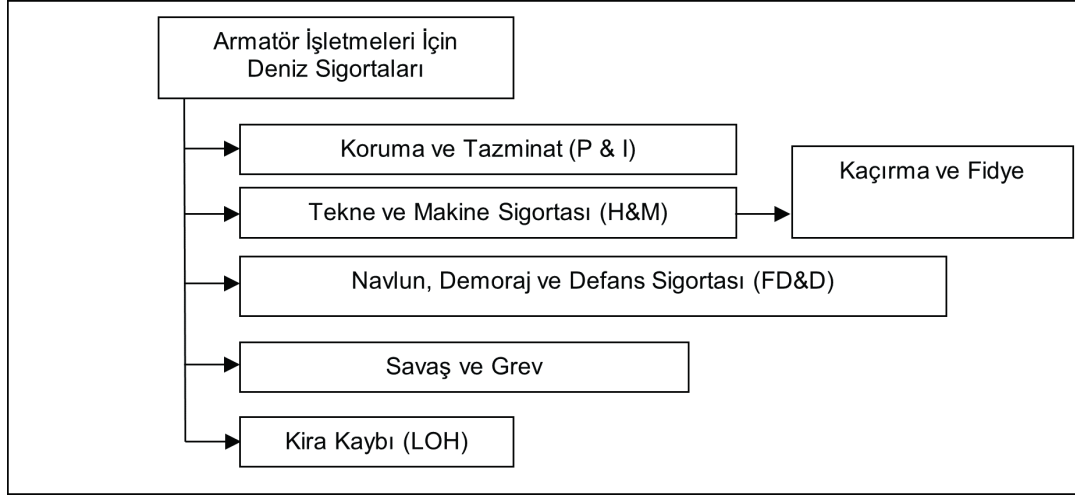
### 3. Deniz Sigortaları

Deniz sigortalarının çıkış noktası 1890'da yayınlanan York-Antwerp Kuralları, ardından 1891 yılında İngiltere'de yayınlanan Stamp Act ve en nihayetinde 1906 yılında yine İngiltere'de yayınlanan "Marine Insurance Act (MIA)" yani Deniz Sigortası Kanununa dayanmaktadır. Sigortacılığın tarihi de aslında deniz sigortaları ile başlamaktadır. En eski sigortacılık dalı olan nakliyat sigortalarının köklerinin, "deniz ödücü (bottomry)" biçiminde ilkçağa dayandığı ve Fenike, Roma, Yunan, Hint ve Babil uygarlıklarında görüldüğü bilinmektedir. Deniz ödücü uygulamasında, donatan, deniz yolculuğunu finanse etmek için ödünç para almakta ve sefer salimen bittiğinde de bu parayı faiziyle birlikte geri ödemekteydi. Geminin seferi tamamlayamadan batması, kaybolması vb. hallerinde ise, parayı ödünç veren kimse parasını kaybetmiş olmaktadır. Bu durumda, ödünç para veren kişilerin uyguladıkları faiz oranı, dönemin yürürlükteki faiz oranından daha yüksek olmakta ve bu iki oran arasındaki farkta, bir anlamda, sigorta primini ifade etmiş olmaktadır (Nomer v.d., 2000:33). Üç temel guruba ayrılan sigorta türleri ve dalları ile ilgili ayırım Şekil 1'de gösterilmektedir (Erol,2009:45).



Şekil 1. Deniz Sigorta Türleri (Erol, 2009:45)

Deniz sigortaları literatürde birçok farklı şekilde türlere ayrılmaktadır. Ama armatör işletmelerinin işletmekte oldukları gemilerini direkt olarak ilgilendiren sigorta türleri Şekil 2’de sıralanmıştır.



**Şekil 2.** Armatör İşletmelerinin Hizmette Olan Gemilerini İlgilendiren Deniz Sigortaları

Tekne ve Makine sigortası, geminin makinesi, ekipmanı ve donanımı gibi tüm fiziksel öğelerini kapsamaktadır. Sigortanın kapsama kriterleri arasında, söz konusu öğenin geminin bir özelliğine bağlı; örneğin geminin projelerinde yer alan gemiyle doğrudan ilintili ve geminin operasyonu ve emniyeti açısından gerekli olması bulunmaktadır. Sigorta kapsamına dâhil edilmenin bir diğer ilkesi de tüm sigortalarda olduğu gibi, armatör işletmelerinin sigortaya dahil edilecek konuyla ilgili sigortalanabilir çıkarının bulunması gereğidir. Başka bir deyişle, sigortalanan konunun tehlikeye maruz kalması sonucu, sigortalanan geminin gelir getiren bir varlık olmaktan çıktığı ya da düşük değerli bir varlık haline geldiği durumlarda armatör işletmelerinin hesaplanabilir finansal kayba uğrayacağını gösterebilmesi gerekmektedir. Tekne ve Makine sigortası en eski deniz sigortası olup, “adı konmuş bir riziko/risk” bazında yapılandırılmaktadır. Başka bir deyişle, armatörün koruma istediği durumlar, olaylar belirgin bir şekilde sigorta poliçesinde adlandırılır. Söz konusu tehlikeler ve bu tehlikelerin sigortalandırıldığı koşullar, sigorta poliçesini oluşturan “Institute Clauses/Enstitü Klozları” gibi adlandırılan birçok farklı klozlar üzerinde tecrübe ile mutabakata varılmış standart maddeler kapsamında sıralanmaktadır. Sigortayı yüklenen (taahhüt eden) taraf, sigortanın şartlarını ve maddelerini, sözü edilen standart maddeler ve değiştirilebilir değerleri baz alarak belirlemektedir. Denizde “kayıp ya da hasar” değişkenlerinin tanımlarını gözden geçirmek gerekmektedir. Tüm kayıplar, tam ya da kısmi ziya olarak bölümlenebilir. Daha sonra bunlar, fiili tam ziya ya da dolaylı tam ziya ve müşterek avarya ya da hususi avarya şeklinde alt bölümlere ayrılmaktadır. “Avarya” denizcilikte geleneksel olarak, eskilerden bu yana, “kısmi ziya” anlamında kullanılmaktadır (Golish, 2005:16).

#### 4. Tekne ve Makine Sigortası

Deniz, göl veya nehirlerde çalışan ve herhangi bir yükü taşıyan veya bir hizmeti gören, yolcu taşıma veya gemi çekme gibi, yüzen her türlü vasıtaya "tekne" denmektedir. Tekne hukuk bakımından özellik taşıyan bir varlıktır. Sabit olan, bina gibi cisimler hukukta “gayri menkul” yani “taşınmaz” olarak isimlendirilir ve bir

sicile bağı olarak işlem görür. Tekne de kendine özel hukuk itibariyle "taşınmaz" yani gayrimenkul olarak isimlendirilmektedir ve özel bir sicile ki buna "gemi sicili" denmektedir, kayıtlı olarak işlem görür. Her ülke hukukunda gemi için özel hükümler tespit edilmiştir ve gemiye ait işlemler de bu hukuka göre icra edilmektedir (Yücesan, 2004:35). Alman Ticaret Kanunu'nda olduğu gibi Türk Ticaret Kanunu'nda da geminin denizcilik rizikolarını/risklerini salimen/emniyetle geçirmesine ilişkin menfaatin sigortalanması, "geminin sigortası" terimi ile ifade edilmiştir; bu sigortaya ilişkin genel şartlar ve uygulamada kullanılan "tekne sigortası" terimi kanunda kullanılmamıştır. Alman Ticaret Kanunu ve Türk Ticaret Kanunu'nun geminin sigortalanması hakkındaki özellikle sigortalının bırakma hakkına dair TTK m. 1420, geminin sigortasında menfaatin ispatı için mülkiyeti tevsik eden senetlerin yeterli olduğuna dair TTK m. 1443 hükümlerinden anlaşıldığı üzere, "geminin sigortası" ile gemiye ilişkin malik menfaatinin denizcilik rizikolarına karşı sigortalanması kastedilmektedir. Buna göre TTK'n da "geminin sigortası" terimi ile ifade edilen tekne sigortası, geminin ziya veya hasara uğraması ya da malikin hakimiyet alanından çıkması sonucu gemi malikinin malvarlığında meydana gelecek azalmanın teminat altına alındığı bir deniz sigortası türüdür (Yazıcıoğlu, 2003:14-15). Tekne sigortaları, "tekne sigortası", "yat sigortası", "gemi inşa sigortası" ile "navlun ve kira kaybı sigortası" gibi dallara ayrılmaktadır. Kelime anlamı olarak tekne, içinde bir boşluk bulunan, eşya ve insan taşıyabilen ve bunun yanında nehir ve deniz suyunda yüzebilen bir araçtır (Doğanay, 2004). Bununla beraber Türk Dil Kurumu tekneyi geminin omurga, kaburga ve kaplamadan oluşan temel bölümü olarak tanımlarken TTK'nunda da tekne kelimesi yerine tanımlama yaparken gemi sözcüğünü kullanmıştır. Buna göre TTK Md. 816'da gemi, "tahsis edildiği gayeye uygun olarak kullanılması, denizde hareket etme imkanına bağlı bulunan ve pek küçük olmayan her türlü tekne gemi sayılır" şeklinde ifade edilmiştir (Erol, 2009:51).

Şekil 3'te armatörlerin tekne ve makine sigortası için prim alma süreci gösterilmektedir. Öncelikle armatör işletmeleri tekne ve makine rizikolarına/risklerine ilişkin soru formunu gemisi için; adı, donatan, işleten, inşa tarihi/yeri, GRT/DWT değerleri, cinsi, IMO numarası, bayrağı, sınıfı, mürettebatın uyruğu, tekne ve makine bedeli, teminat şartları, seyir alanı, mevcut broker ve/veya sigortacısının adı, satılan gemiler de dahil olmak üzere sigortalının geçtiğimiz son beş yıla ilişkin ödenen ve muallak hasar bilgileri, son yenileme sürveyi tarihi/raporu, sonraki yenileme sürveyi tarihi, gelecek havuz sürveyi, ISM bilgileri, donatan/operatör ve işletenin ne zaman kurulduğu, deneyimi ve geleceğe yönelik planları da dahil olmak üzere eksiksiz geçmiş, son beş yıl içerisinde sahip olunan diğer gemilerin detayları, teknede son 12 ay içerisinde gerçekleştirilen bakım tutum işlemleri ile ilgili bilgi, önümüzdeki 12 ay içerisinde gerçekleştirilecek bakım tutum işlemleri için ayrılan tutar, bilgilerini içerecek şekilde doldurarak ilgili broker/sigortacıya teslim etmektedir.

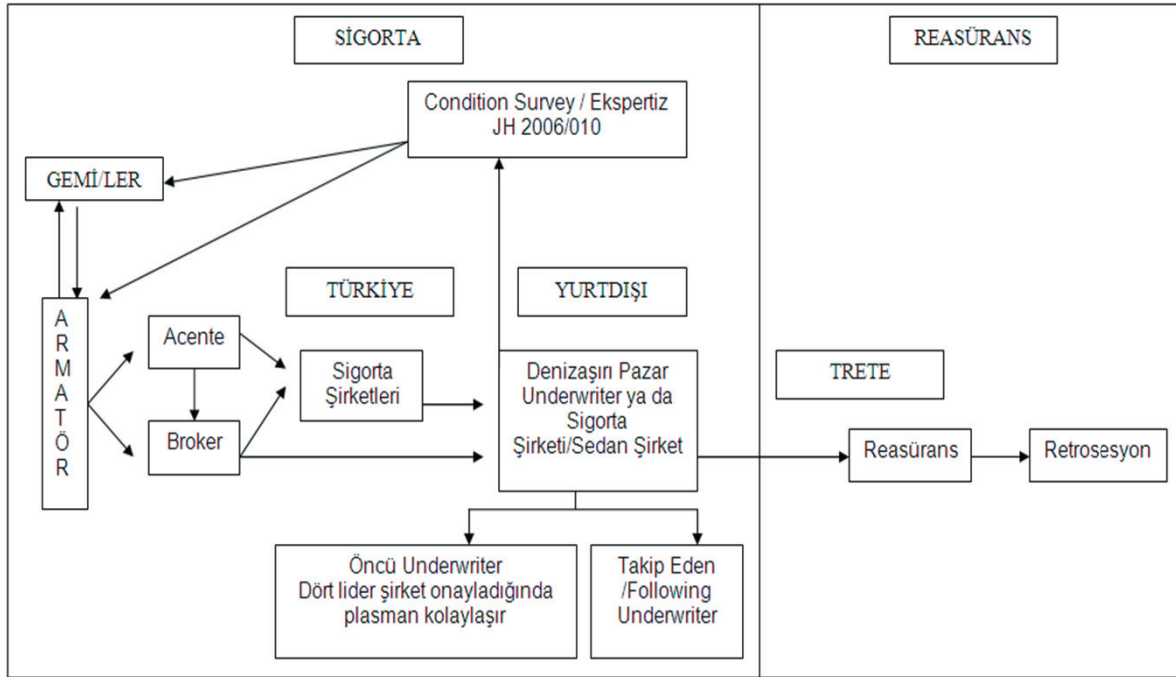
Sigorta şirketleri armatör işletmelerine tekne ve makine sigortası teklifi vermeden önce aldıkları formdan sonra isterlerse "Tekne ve Makine – Kondisyon ve Risk Değerlendirmesi" sürveyi/denetimi yapmaktadırlar. Armatör işletmelerinin hem gemilerine hem de ofislerine yapılan bu denetimler: JH2006/010 denetim listesi başlığında aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

- i. Makine Dairesi ve Makinelerin Risk Değerlendirilmesi/Engine Room Management & Machinery Risk Assessment JH 2006/010A.
- ii. Kondisyon Sürveyi / Condition Survey JH 2006/010B.
- iii. Ofis İşletmecilik/Yönetim Değerlendirilmesi / Office Management Assessment (JH 2006/010C).



iv. Gövdesel Kondisyon Sörveyi / Structural Condition Survey (JH 2006/010D).

Yapılan bu denetimlerden sonra öncü “underwriter” ‘ın (leading) tekne ve makine riskinin slip formundaki belirli bir yüzdesini almasından sonra diğer sigorta şirketlerinin de slip formunun %100’ünün plasmanının tamamlanmasının ardından ITC sözleşmesi imzalanır. Genellikle ilk prim verilen süre içerisinde sigorta şirketleri tarafından peşin alınmaktadır.



**Şekil 3.** Armatörlerin Tekne ve Makine Sigortası Primi Alma Süreci (Bu çalışmada önerilmiştir)

#### 4.1. Reasürans

Bir önceki bölümde şekil 3'te sağ tarafta da “reasürans” kısmı görülmektedir. Reasürans başka sigortacılarla, rizikoyu paylaşmakta bir garanti yoludur. Sigortacı, sigorta ettiği şeyleri, belli bir oranda, öteki bir veya birkaç meslektaşına sigorta ettirdiği takdirde; ileride doğabilecek olan zararın bir kısmını onlara ödettirerek, tamamını ödemekten kurtulmuş olmaktadır. Bu hukuki ilişkiye “mükerrer sigorta = reasürans” denmektedir (Yavaşca, 1993:148). Deprem gibi büyük felaketler sonucu ödenen hasarların sigorta şirketlerinin mali güçlerini aşan tutarlara ulaşması nedeniyle, sigortacılar da kendi üstlendikleri riskleri sigortalamaktadırlar. Bu yeniden sigortalama işlemine reasürans denir. Reasürans konusunda çalışan şirketlere reasürör adı verilir. Reasürörler, verdikleri teminat karşılığında sigorta şirketlerinden prim alırlar. Reasürans, uluslararası bir iştir. Bir sigorta şirketi, risklerini pek çok reasüröre devredebilir. Böylece, deprem gibi felaket boyutlarındaki riskler bile dünya çapında pek çok şirkete dağılarak ödenebilir hale gelmektedir. Bu durumun bir yansıması olarak, dünyanın herhangi bir yerinde meydana gelen bir felaket, tüm sigorta piyasasını etkilemektedir. Örneğin, ABD'de meydana gelen 11 Eylül saldırıları sonucunda, Türkiye'deki sigorta primleri de (Dünya çapında olduğu gibi) artmıştır. Herhangi bir sigorta konusunun değer ve büyüklük bakımından tek bir sigortacının kapasitesini aşması halinde, böyle bir rizikoyu teminat

altına alan sigortacı, bunun bir kısmını, "reasürans" olarak adlandırılan bir işlemle diğer bir sigortacıya devretmek istemektedir. Sözü edilen büyük çaplı sigorta konularına bütün sigorta dallarında rastlamak mümkün olduğuna göre, her sigorta dalında reasürans işlemine gereksinim olduğu açıktır. Bu işlemle, olası bir hasar tek bir sigortacının verdiği poliçe altında meydana gelmekle birlikte, sonuçları birçok sigortacı tarafından paylaşılmaktadır. Reasürans işlemlerinde kullanılan tanımlar aşağıda sıralanmaktadır (Nomer v.d., 2000:159-163):

- i. Reasürans: Sigortacının üstlendiği sorumluluğun bir kısmını veya tamamını, diğer bir sigortacıya devretmesi.
- ii. Reasürans Komisyonu: Sedan şirketin istihsal giderleriyle bir kısım genel masraflarının karşılanması amacıyla, reasüröre devrettiği prim tutarı üzerinden aldığı komisyon.
- iii. Reasürör: Poliçeden doğan sorumluluğun bir kısmını, sedandan reasürans yoluyla devralan şirket.
- iv. Retrosesyon: Reasürans yoluyla devralınan sorumluluğun kısmen veya tamamen başka bir şirkete devredilmesi.
- v. Riziko: Sigorta konusu şey, değer.
- vi. Saklama Payı (Konservasyon, Retansiyon): Şirketin, üstlendiği teminat üzerinden herhangi bir reasüransa başvurmaksızın, kendi üzerinde tuttuğu kısım.
- vii. Sedan Şirket: Sigortalıya karşı üstlendiği sigortanın bir kısmını veya tamamını reasürans yoluyla devreden şirket.
- viii. Sesyon (Devir): Sedan şirketin reasürans konusu yaptığı kısım veya miktar.
- ix. Sigortacı: Sigorta teminatını sigortalıya taahhüt eden ve sigortalı cephesinden sorumluluğun tamamını üstlenen sigorta şirketi.

Reasüransa duyulan gereksinimin nedenleri ve bu kurumun toplumsal ve ekonomik yaşamdaki işlevleri de şöylece özetlenebilir (Nomer v.d., 2000:159-163):

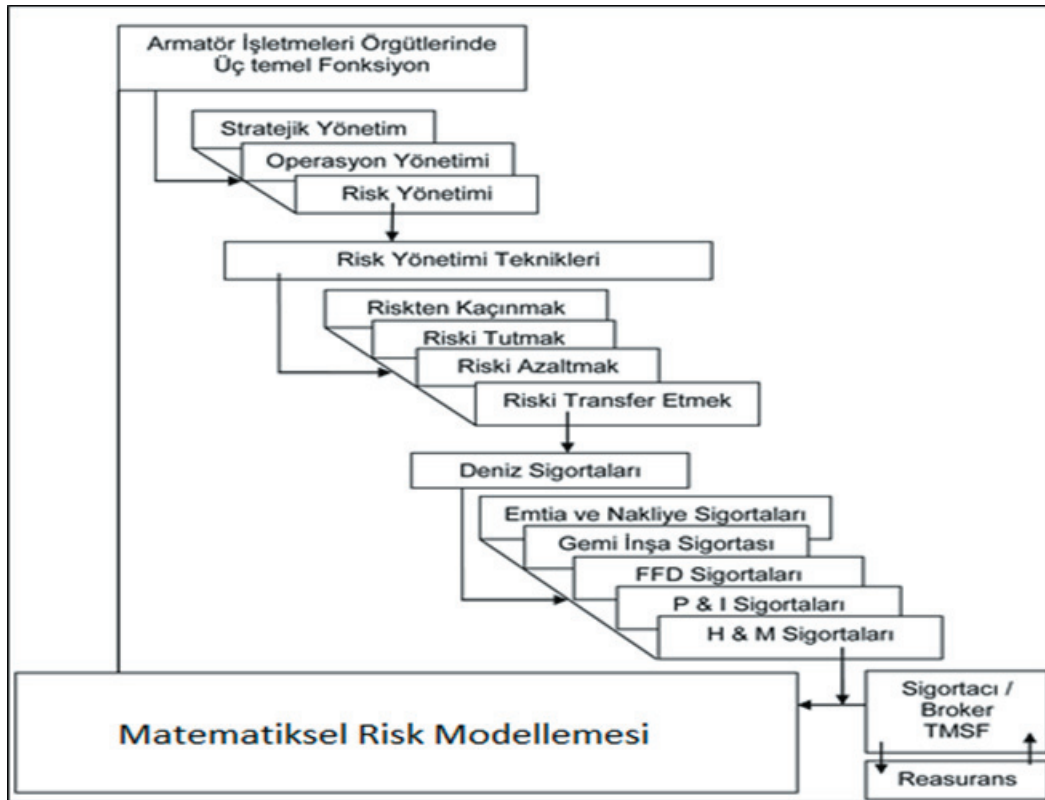
- i. Rizikonun Yayılması.
- ii. Sigortacının İş Kabul Kapasitesinin Artması.
- iii. Sigortacının İş Kabul Esnekliğinin Artması.
- iv. Sigorta şirketinin Mali Yapısının Desteklenmesi.
- v. Birikim (Kümü) Fazlasının Yol Açabileceği Katastrofik Hasarların Kontrolü.
- vi. Reasürörden Sigortacıya Teknik Bilgi Aktarımı.

Ülkemizde de Milli Reasürans, Türkiye İş Bankası tarafından zorunlu reasürans sistemini işletmek üzere 26 Şubat 1929 tarihinde kurulmuş ve 19 Temmuz 1929 tarihinde faaliyete geçmiştir([www.millire.com](http://www.millire.com)).

## 5. Çalışmanın Matematiksel Risk Modellemesi

Bu bölümünde Türk deniz ticaret filosunun tekne ve makine sigortası kapsamında risk değerlendirmesi/analizi yapılmıştır. İstanbul ve İzmir'de 40 ayrı armatör işletmesine gidilmiş ve işletmelerin tekne ve makine sigortası sorumluları ile yüz yüze görüşülerek Türk bayraklı gemilerinin son beş yıllık prim değerleri ve varsa hasar

tazminat verileri toplanmıştır. Çeşitli tipteki gemilere ait 349 adet veri toplanmıştır. Aşağıdaki bölümlerde öncelikle sigorta matematiği olarak da bilinen aktüeryal modeller hakkında prim ve hasar modellemeleri hakkında bilgiler ve sonrasında da çalışmanın matematiksel risk modellemesi anlatılmaktadır. Şekil 4'te K. Emrah Erginer'in 2010 yılında danışman hocası Prof. Dr. Ender Asyalı ile yapmış olduğu Doktora tezindeki araştırmanın genel çerçevesi görülmektedir (Erginer,2010:126).



**Şekil 4.** Risk Analizinin Genel Çerçevesi (Bu çalışmada önerilmiştir)

### 5.1 Aktüeryal Modeller

“Hasar Dağılımlar Yaklaşımında” yer alan aktüeryal risk değişkenleri bir zararın karşılanmasını gerekli kılan olayların gerçekleşme olasılığı, olayın gerçekleşme zamanı ve ödemenin (veya kaybın) tutarından oluşmaktadır. Aktüeryal modellerde ödeme yapılmasına neden olan olayın ortaya çıkma olasılığı ödeme sıklığı ile ödeme tutarının büyüklüğü ayrı süreçte incelenir. Her iki süreçte kullanılan modeller toplam hasar modeli altında bir araya getirilmekte ve toplam hasar dağılımına ulaşılmaktadır. Toplam hasar dağılımı tanımlanmış bir sigorta sözleşmesi grubu için belli bir süre içerisinde risklerin gerçekleşmesi nedeniyle ortaya çıkabilecek tüm ödemeleri göstermektedir (Klugman, 1998). Toplam hasar dağılımı yaygın olarak aktüeryal pratikte kullanılır. Hem sigorta şirketinin riski sınıflandırma ve sigorta sınıfı için fiyatlandırma sürecinde hem de fonlandırma sürecinde kullanılır. Heckman-Meyers Metodu, Panjer Metodu, Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform-FFT) ve stokastik simülasyon toplam hasar dağılımlarını hesaplamak için geliştirilmiş bazı yaklaşımlardır. Tüm bu metotlar temelde hasar frekans dağılımı ve hasar şiddeti dağılımının var olması varsayımına dayanır. Ancak bazen pratikte frekans ve şiddet ayrı ayrı oluşmaz ve sadece toplam bilgilendirme analizi için var olabilirler. Bu durumda toplam hasar dağılımının biçimi ile

İlgili varsayım özellikle dağılımın kuyruk kısmında çok önemli hale gelir. Toplam hasar dağılımının modellenmesi aşağıda gösterildiği şekilde üç aşamada ele alınır:

- i. Hasar frekansının modellenmesi.
- ii. Hasar şiddetinin modellenmesi.
- iii. Toplam hasar dağılımının modellenmesi.

Hasarın hangi sıklıkla gerçekleşeceğini ve gelecekte ne şekilde bir eğilim göstereceğinin belirlenmesi amacı ile risklerin gerçekleşme sıklığını ortaya koyan frekans modeli oluşturulmaktadır. Frekans modeli; kaybın meydana gelme sıklığına ilişkin davranışı belirleyerek, gelecekte kayıp olaylarının hangi sıklıkla gerçekleşebileceğine ilişkin tahminleri yapabilmemize olanak sağlamaktadır. Kesikli bir stokastik süreç olarak tanımlanan frekans modelindeki temel varsayım, hasarın ortaya çıkma sıklığı değişkeninin rastgele bir değişken olduğu ve hasar olayına ait büyüklük sürecinden bağımsız olduğu varsayımdır. Sigortacılıkta belli bir zaman aralığında kaç adet hasar meydana geleceği ve bu hasarların şiddetinin ne olacağını tahmin edilmesi süreci oldukça önemlidir. Belli bir zaman aralığında gerçekleşen hasarların sayısı  $N$  olmak üzere hasar frekansının fonksiyonu:

$$p_k = P(N = k) \quad k=0,1,2,\dots$$

$N$  toplam hasar frekansını ifade eder:

$$N = x_1 + x_2 + \dots + x_k$$

$N$ 'in kesikli bir rastgele değişken olmasından dolayı hasar sıklığının dağılımı için genel olarak hayat dışı sigortalarda Poisson dağılımı, Binom dağılımı ve Negatif Binom dağılımları kullanılırken hayat sigortaları için Bernoulli dağılımı kullanılmaktadır. Toplam hasar dağılımının modellenmesi sürecinde birbirinden bağımsız olarak modellenmesi gereken ikinci süreç hasar olayına ilişkin şiddet modelinin oluşturulması sürecidir. Şiddet modeli birbirinden bağımsız ve aynı dağılıma sahip (Independent and Identically Distributed-IID) olan ve meydana gelme sıklığından bağımsız dağılım özelliği gösteren hasar risklerinin şiddetinin sistematik bir şekilde ifade edilmesi olarak tanımlanabilir.

Belli bir zaman aralığında gerçekleşen bireysel kayıpların büyüklüğünü gösteren hasar şiddeti dağılım fonksiyonu:

$$F_x(X) = P(X \leq x), \quad 0 \leq x$$

biçiminde gösterilir. Burada  $X$  bireysel hasar büyüklüğünü ifade etmektedir. Hasar şiddetini modellemek üzere birçok dağılım vardır. Genel olarak bu dağılımların ortak özelliği sağa çarpık ve uzun kuyruklu olmalarıdır. Gamma, Weibull ve Lognormal dağılımlar kullanılan sürekli dağılımlardan biridir. Büyüklük modelinde kullanılabilecek sürekli dağılımları ve olasılık yoğunluk fonksiyonu:

$$\text{Lognormal Dağılım} \quad : \quad f(x) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \left[ \ln \left( \frac{x}{\mu} \right) \right]^2 \right\}, \quad x > 0$$

$$\text{Gamma Dağılımı} \quad : \quad f(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}}{\Gamma(\alpha) \beta^\alpha}, \quad x > 0$$

Pareto Dağılımı	:	$f(x) = \frac{\alpha\beta^\alpha}{x^{\alpha+1}}, x>0$
Weibull Dağılımı	:	$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right], x>0$
Ters Gauss Dağılımı	:	$f(x) = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi x^3}} \exp\left[-\frac{\lambda(x-\mu)^2}{2x\mu^2}\right], x>0$
Burr Dağılımı	:	$f(x) = \frac{\nu\alpha\lambda^\alpha x^{\nu-1}}{(\lambda+x^\nu)^{\alpha+1}}, x>0$
Üstel Dağılım	:	$f(x) = \frac{1}{\lambda} e^{-x/\lambda}, x>0$

Bireysel hasar büyüklüklerinin ve hasar frekansının modellenmesinde kullanılabilecek dağılımların sigortalanan risklerin niteliğinden kaynaklanan kendine özgü bazı özellikler taşımaları gerekmektedir. Bunlar sırasıyla:

- Dağılımda yalnızca pozitif sayılara olasılık değeri verilmeli, diğer bir deyişle, dağılımın değer aralığı 0 ile  $\infty$  arasında olmalıdır.
- Dağılımda mevcut veriler içerisinde bulunmamasına rağmen yüksek miktarlı kayıp olaylarına da olasılık değeri verilmeli, dağılımın kuyruk kısmına da olasılık değeri vermek sureti ile kalın veya ince kuyruk özellikleri taşınmalıdır.

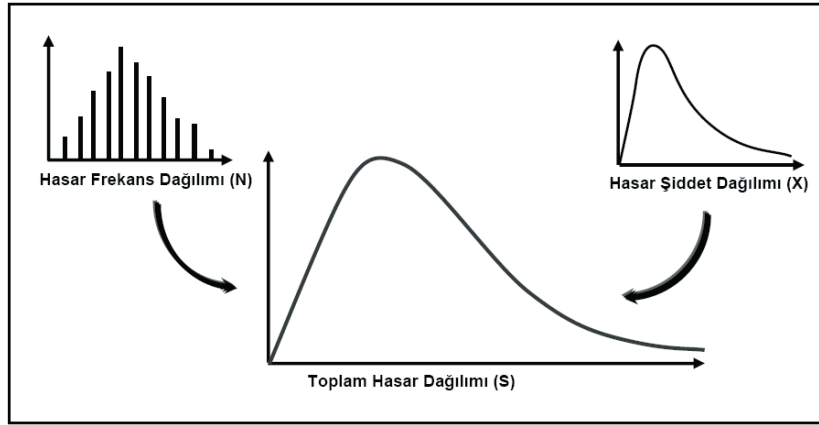
N, sigorta şirketinin belli bir zaman aralığında hasar sayısı ve  $X_i$  bu zaman aralığında meydana gelen i. hasar büyüklüğü olmak üzere bu zaman aralığındaki toplam hasar miktarı sayısı S ile tanımlanır. Her bir  $X_i$  birbirinden ve hasar sayısı N den bağımsız ve aynı dağıldığı varsayılmaktadır. Hasar şiddeti dağılımı bilinen ve dağılım fonksiyonu  $F_X(X)$  ile gösterilen, hasar frekans dağılımı bilinen ve olasılık yoğunluk fonksiyonu  $p_k$  ile gösterilen bir portföy için toplam hasar dağılımının fonksiyonu:

$$F_s(x) = \sum_{k=0}^{\infty} p_k F_x^{*k}(x), x \geq 0$$

$F_x^{*k}(x)$ ,  $F_x(x)$  in k. dereceden konvolüsyonu,  $p_k$  ise k tane hasar oluşma olasılığını göstermektedir. Toplam hasar dağılımı, hasar frekansı dağılımı ile hasar şiddeti dağılımının birleştirilmesi ile oluşturulur. Frekans dağılımı kesikli bir dağılım olup belirli bir zaman aralığında meydana gelen hasar sayısını gösterirken, şiddet dağılımı sürekli bir dağılım olup parasal bir büyüklüğü ifade etmektedir. Bu iki dağılımın karakteristiği tamamıyla birbirinden farklı olduğu için birbirleri ile doğrudan işlem yapılamaz. Bu iki dağılımı birleştirmek için:

- Kapalı Form (Closed Form).
- Açık Form (Open Form).

yaklaşımlarından biri kullanılır. Kapalı form yaklaşımı  $F_s(x) = \sum_{k=0}^{\infty} p_k F_x^{*k}(x)$  eşitliği ile çözülür. Bilinen en yaygın Kapalı Form çözümü, teorik bir matematiksel yöntem olan konvolüsyon yöntemidir. Karmaşık integral çözümlerini gerektirir. En basit istatistiksel dağılımlar için bile konvolüsyon yönteminin bilgisayar ile çözümü oldukça zor ve uzun sürmektedir. Diğer bir Kapalı Form yaklaşımı ise Hızlı Fourier Dönüşümüdür. Fourier dönüşümü ile frekans ve şiddet dağılımları üzerinde dönüşüm yapılarak toplam hasar dağılımı hesaplanır. Hızlı Fourier Dönüşümünün uygulaması Konvolüsyon yöntemine göre daha basittir ve trigonometrik fonksiyonlar ve karmaşık sayılar kullanılır. Açık Form uygulaması Kapalı Form uygulamasına göre daha basittir. En yaygın kullanılan yöntemlerde birisi Monte Carlo Simülasyonudur. Simülasyon tekniği ile değişik istatistik dağılımları kullanılarak hasar frekans ve şiddetinin dağılımı için farklı senaryolar elde edilmektedir. Ancak bu yöntem hayat dışı sigortalarda (yangın, kasko vb. gibi) uygulanamamaktadır. Hayat sigortaları için toplam hasar dağılımının daha iyi tahmin edilmesini sağlayan ve sadece frekans ve şiddetin doğrudan kullanıldığı moment eşitleme yöntemi kullanılmaktadır.



Şekil 5. Toplam Hasar Dağılım Grafiği (Anonim)

Toplam k dağılımları bireysel (individual) dağılım ve birleşik (compound) dağılım olarak iki ayrı dağılım ile hesaplanabilir. İlk durumda toplam hasarı bireysel poliçelerin hasar miktarı toplamı oluşturmaktadır.

$$S = X_1 + X_2 + \dots + X_n$$

Bireysel risk modelinde  $X_i$ , i. kişinin ya da poliçenin getirdiği hasar miktarını belirtir.  $X_i$ 'ler birbirinden bağımsızdır ve n sabittir. Her bir  $X_i$  değerinin aynı dağılımdan gelmesi beklenir ancak zorunlu değildir. Bireysel Risk Modellemesinde toplam hasarın momentleri aşağıdaki gibidir.

$$E[S] = \sum_{i=0}^n E[X_i]$$

$$Var[S] = \sum_{i=0}^n Var[X_i]$$

i. kişinin ya da poliçenin getirdiği hasar miktarının iid olması durumunda toplam hasarın beklenen değer ve varyansı aşağıdaki gibidir.

$$E[S] = nE[X] \quad Var[S] = nVar[X]$$

Toplam hasarın moment çıkararak fonksiyonu ise  $X_i$ ' lerin moment çıkararak fonksiyonlarının toplamıdır.

$$M_s(t) = [M_x(t)]^n$$

Toplam hasar değişkeninin bireysel risk modellemesi ile belirlenmesinde hasar şiddeti ve hasar frekansı dikkate alınmaktadır. Toplam hasar değişkeni olan  $X$ , hasar şiddeti  $B$ , hasar frekansı  $I$  değişkenlerinin çarpımları ile formüle edilir. Bir rassal değişken olan  $I$  aktüeryal modellerde  $[0,1]$  aralığında değerler alır. Aynı zamanda bir belirteç olarak modellenen hasar rassal değişkeni hasarın gerçekleştiği durumlarda,  $I=1$ , hasar gerçekleşmediği durumlarda,  $I=0$ , değerlerini alır. Hasar gerçekleşme olasılığının  $q$  olduğunu ve hasar gerçekleştiği takdirde oluşan hasar miktarının  $b$  olduğu varsayımı altında toplam hasar değişkeni  $X$  aşağıdaki gibi modellenir. Toplam hasar değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu:

Olasılık dağılım fonksiyonu:

$$F_x(X) = \Pr(X \leq x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 - q & 0 \leq x < b \\ 1 & x \geq b \end{cases}$$

Toplam hasar rassal değişkeni  $X=B$  ile formüle edilmektedir ve burada  $b$  hasar şiddeti hasar gerçekleştiği takdirde sigortaya ödenen miktardır ve sabittir. Hasar frekansı ise rassal bir değişkendir ve hasarın gerçekleşip gerçekleşmeme durumlarına göre değerlendirilir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Pr(I = 0) = 1 - q$$

$$\Pr(I = 1) = q$$

Toplam hasar değişkeninin beklenen değer ve varyansı ise aşağıdaki gibidir:

$$E[X] = bq$$

$$Var(X) = b^2q(1 - q)$$

İkinci durum ise;  $N$  tane rassal değişken ve olasılık fonksiyonu  $q_n = \Pr\{N = n\}$ ,  $n=0,1,2,\dots$  olan ayrıca  $\{X_n, n=1,2,\dots\}$  ardışık birbirinden bağımsız ve aynı dağılıma sahip pozitif rastgele değişkenler için genel dağılım fonksiyonu  $P(x)$  dir. Dağılımın rassal toplamı:

$$S = X_1 + X_2 + \dots + X_N$$

Birleşik (compound) dağılım birçok pratik olasılık modellerinden meydana gelmektedir ve özellikle sigorta risk modellerinden oluşur. Örneğin, bir birleşik dağılım, verilen bir zaman periyodu için bir sigorta portföyünden oluşan toplam hasar modelinde kullanılabilir. Bu bağlamda  $N$ , portföyden gelen hasar sayısını (hasar frekansını) gösterir,  $\{X_n, n=1,2,\dots\}$  birbirini izleyen (ardışık) bireysel hasar miktarını (hasar şiddetini) gösterir ve rassal toplam  $S$  toplam hasar miktarını gösterir. Bu yüzden, sırasıyla hasar frekansı ve şiddeti dağılımlarını birinci ve ikinci, dağılım olarak gösteririz. Birleşik risk modelinde  $X_i$  gelen  $i$ . hasarın getirdiği hasar miktarını belirtir.  $X_i$ ' ler birbirinden ve  $N$ ' den bağımsızdır. Ayrıca  $X_i$  'ler ortak dağılıma sahiptir. Birleşik

risk modelinde hasar frekansı N bir rassal değişkendir ve çeşitli dağılımlar göstermektedir. Birleşik Risk Modellemesinde toplam hasarın momentleri aşağıdaki gibidir.

$$E[S] = E[X]E[N]$$

$$Var[S] = E[N]Var[X] + Var[N]E[X]^2$$

### 5.2. Hasar Rassal Değişkenin Modifikasyonları

Hasar rassal değişkeninin modifikasyonları muafiyet, limit, iştirak ve enflasyon oranı olmak üzere dört başlıktan oluşmaktadır. Bu kısımda sigorta şirketi hasar miktarının belli bir oranından yükümlüdür. Aktüeryal modellerde X, hasar miktarı rassal değişkenini; Y, hasar başına düşen ödeme miktarını; Z ise ödeme başına düşen ödeme miktarını göstermektedir.

### 5.3. Muafiyet

Sigortacılıkta sigortalının riskin bir bölümünü üstlenmesi anlamına gelmektedir. Muafiyet, sigorta şirketinin riskini önemli ölçüde sınırlar. Zira olasılık olarak küçük hasarların gerçekleşme sıklığı daha yüksektir ve muafiyet sayesinde özellikle bu hasarların sigorta şirketine etkisi azalır. Ayrıca, risk sigortalı ile bölüşüldüğü için, sigortalı daha dikkatli davranarak sigortalı malını tehlikelerden daha iyi koruyacaktır. Sigortalı tarafından ise, muafiyet, ödenmesi gereken primde önemli bir tasarruf sağlar. Örneğin sadece %10 oranındaki bir muafiyetin primi %50 oranında düşürmesi mümkündür. Muafiyet kelime manası olarak sorumluluk demektir. Aktüeryal modellerde d hasar miktarının belli bir eşik değerini gösterir. Muafiyet uygulanmış poliçelerde ancak bu eşik değerini aşılması durumunda belli bir ödeme yapılır. Eğer X hasar miktarı bu d eşik değerini aşarsa, sigorta şirketi X-d miktarında bir ödeme yapmak durumunda kalır. Ödeme miktarı rassal değişkeni olan Y 'nin olasılık yoğunluk fonksiyonu ve beklenen değeri aşağıda verilmiştir.

$$Y = \begin{cases} (X \wedge d)_+ = 0 & X \leq d \\ X - d & X > d \end{cases}$$

$$f_y(y) = \begin{cases} F_x(d) & y = 0 \\ f_x(d+y) & y > d \end{cases}$$

$$E[Y] = E[(X - d)_+] = \int_d^{\infty} (X - d) f_x(x)$$

Ödeme başına düşen ödeme miktarı olan Z rassal değişkeninin beklenen değeri aşağıdaki gibidir.

$$Z = Y|Y > 0 = Y|X > d$$

$$E[Z] = E[(Y|X - d)] = \frac{E[Y]}{1 - F_x(d)}$$



#### 5.4. Limit Poliçe

Limiti,  $u$  şeklinde gösterilir. Sigorta şirketi belirli bir  $u$  değerini baz almıştır ve bu değer aşıldığı takdirde hasar miktarı ne olursa olsun sigortacıya  $u$  kadar ödeme yapılır. Burada da amaç riskin belirli bir kısmının üstlenilmesini sağlamaktır.

$$Y = \begin{cases} (X \wedge u) = X & X \leq u \\ u & X > u \end{cases}$$

$$f_y(y) = \begin{cases} F_X(y) & y \leq u \\ 1 - F_X(u) & y = u \end{cases}$$

#### 5.5. İştirak Oranı

İştirak oranlı poliçelerde, ödeme miktarı hasar miktarıyla belli bir oranda orantılıdır. Bu oran  $\alpha$  şeklinde gösterilir ve  $(0,1)$  aralığındadır.

$$Y = \alpha X$$

$$f_y(y) = \frac{1}{\alpha} f_x\left(\frac{y}{\alpha}\right)$$

$$E[Y] = \alpha E[X]$$

#### 5.6. Enflasyon Etkisi

Eğer hasar zamanı ile ödeme zamanı arasında aralık varsa, sigorta şirketi enflasyon etkisini kapsamak zorundadır. Bu durumda hasar miktarı  $X$  yerine  $(1+r)X$  şeklinde düşünülebilir. Bu zaman periyodundaki enflasyon etkisi  $r$  ile gösterilir. Muafiyetli poliçeler için; muafiyet değeri, enflasyon oranı dikkate alındıktan sonra hesaptan çıkartılır. Bu yüzden, ödeme miktarındaki etki iki nedenden dolayı %100  $r$ 'den büyük olur.

- i. Şimdi, muafiyet miktarını aşan daha fazla ödeme vardır.
- ii. Muafiyet miktarı, enflasyon için arttırılmaz. Bu yüzden muafiyet değerini aşan ödemeler, enflasyondan önce bile, enflasyon oranından daha fazla artacaktır.

$Y$ 'nin beklenen değeri,

$$E(Y) = (1+r) \left[ E(X) - E\left(X \wedge \frac{d}{1+r}\right) \right]$$

$Z$ 'nin beklenen değeri

$$E(Z) = \frac{E(Y)}{\left[ 1 - F_X\left(\frac{d}{1+r}\right) \right]}$$

## 6. Matematiksel Risk Modelinin, Çalışma Kapsamında Verileri Toplanan Türk Deniz Ticaret Filosuna Uygulanması

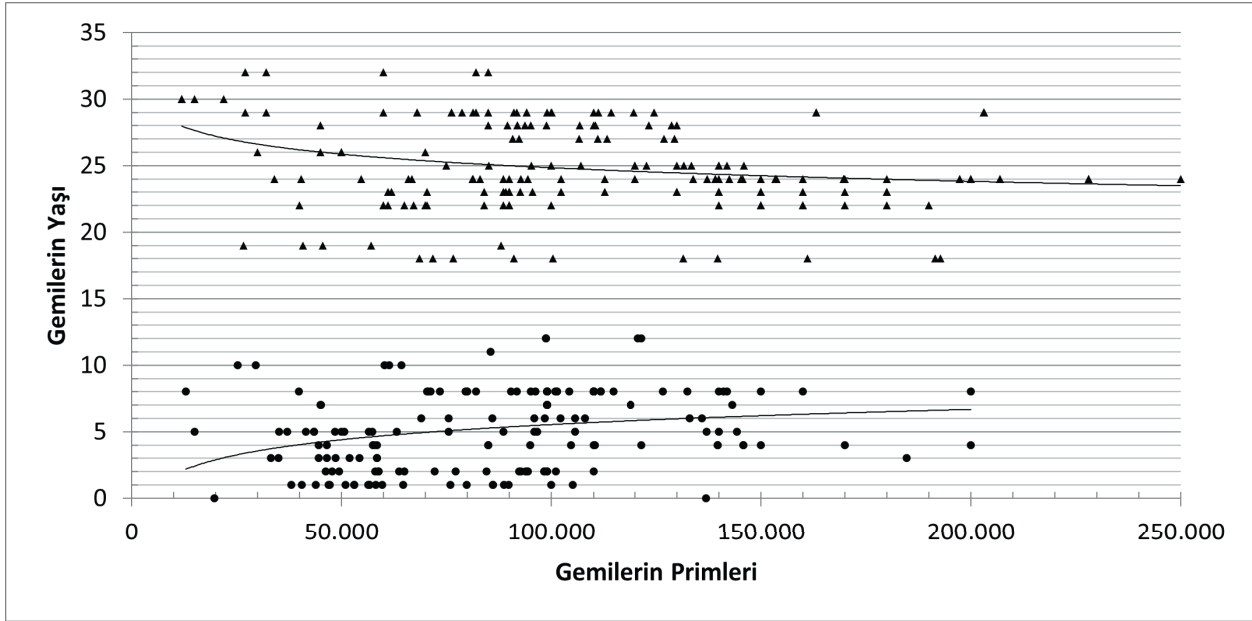
Veri setinde Türk deniz ticaret filusunda bulunan 103 tane Türk bayraklı farklı tipteki geminin, toplam 349 adet tekne ve makine sigorta kaydı bulunmaktadır. İlk olarak bu verilere ait tanımlayıcı bilgiler incelenmiştir. Gemi tiplerine göre yaş değişkeni incelendiğinde en yaşlı gemilerin genel kargo tipli gemiler olduğu görülmektedir. Kimyasal tanker ve tanker tipli gemilerin ise daha yeni olduğu görülmektedir.

**Tablo 1.** Gemi Tipi ve Gemilerin Ortalama Yaş Tablosu

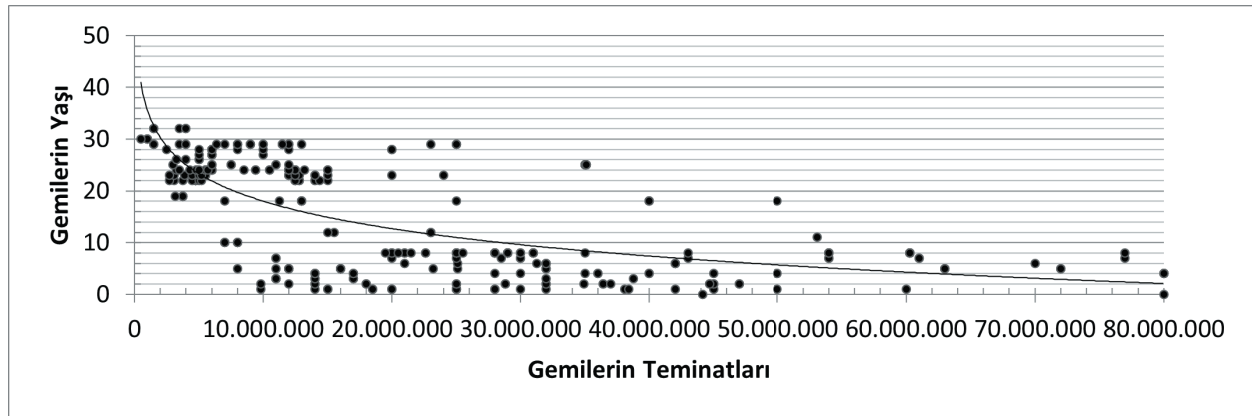
Gemi Tipi	Ortalama Yaş
Dökme yük	18
Genel Kargo	24
Kimyasal Tanker	4
Konteyner	15
Tanker	4
<b>Genel Ortalama</b>	<b>15</b>

Tüm gemilerin yaş ortalaması Tablo 1’de verilmiştir. Veri seti incelendiğinde en yaşlı gemilerin genel kargo gemileri, ardından dökme yük ve konteyner gemileri olduğu görülmektedir. Türk Ticaret Deniz Filosuna kayıtlı olan Türk bayraklı gemilerin toplanabilen verileri doğrultusunda kayıtlı oldukları klas kuruluşlarına göre ortalama yaşlarına bakıldığında TL klaslı gemilerin en yaşlı, NKK klaslı olanların ise en genç olduğu görülmektedir. Gemi tiplerine göre ödenen ortalama prim miktarları incelenmiştir. Verilere göre en fazla primin dökme yük tipli gemilere ödendiği görülmektedir. En az primin ise kimyasal tanker tipli gemilere ödendiği belirlenmiştir. Kimyasal tankerlerin yaş ortalaması 4’tür. Dökme yük gemilerinin ise 18’dir. Ödenen prim miktarları incelendikten sonra kayıtlı olan gemi tiplerine göre ortalama teminat (gemi değeri) miktarları incelenmiştir. En fazla teminatın tanker tipli gemilere ait olduğu görülmektedir. Tanker ve dökme yük tipli gemilerin teminat miktarları karşılaştırıldığında dökme yük tipli geminin teminat miktarı daha az olmasına rağmen ödenen prim miktarı tankerden daha fazladır. Klaslarına göre gemilerin ortalama prim miktarları incelendiğinde en fazla primin GL ve BV klasında olan gemilere ödendiği görülmektedir. En az primin ise DNV klaslı gemilere ödendiği görülmektedir. En fazla yaşlı olan dökme yük tipli gemilerin en fazla hasar miktarına sahip olduğu görülmüştür. Yaşlarına göre yeni olan gemilerin hasar getirmediği tespit edilmiştir. DWT’u en fazla olan gemi tipinin tanker olduğu görülmektedir. En az olanının ise kimyasal tanker olduğu toplanan veriler içerisinde belirlenmiştir. Toplanan veriler içerisindeki Türk Bayraklı gemilerin inşa edildikleri yerlere göre ortalama prim miktarları incelendiğinde ilk sırada yer alan ülkelerin sırasıyla Brezilya, Portekiz ve Çin olduğu görülmektedir. En az primin ise İtalya’da inşa edilmiş gemilere ödendiği belirlenmiştir. İnşa yerlerine göre gelen ortalama hasar miktarları incelendiğinde en fazla hasarlı gemiyi inşa eden ülkenin Çin olduğu görülmektedir. Buna karşılık en yüksek hasarın Almanya’da inşa edilen gemiye ait olduğu görülmektedir. Almanya’yı takip eden ülkenin yine Çin olduğu görülmektedir.

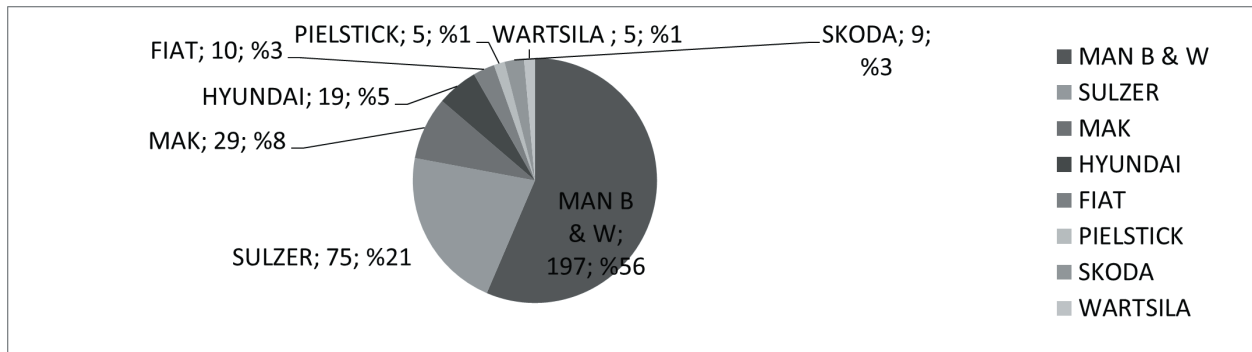
Şekil 6’da gemilerin yaşı ve primleri grafiği verilmiştir. Şekil 7’de gemilerin yaşı arttıkça gemi değerlerinin düşmekte olduğu görülmektedir. Şekil 8’de gemilerin ana makine markalarının dağılımı gösterilmektedir. En çok tercih edilen ana makine Man B&W’dır.



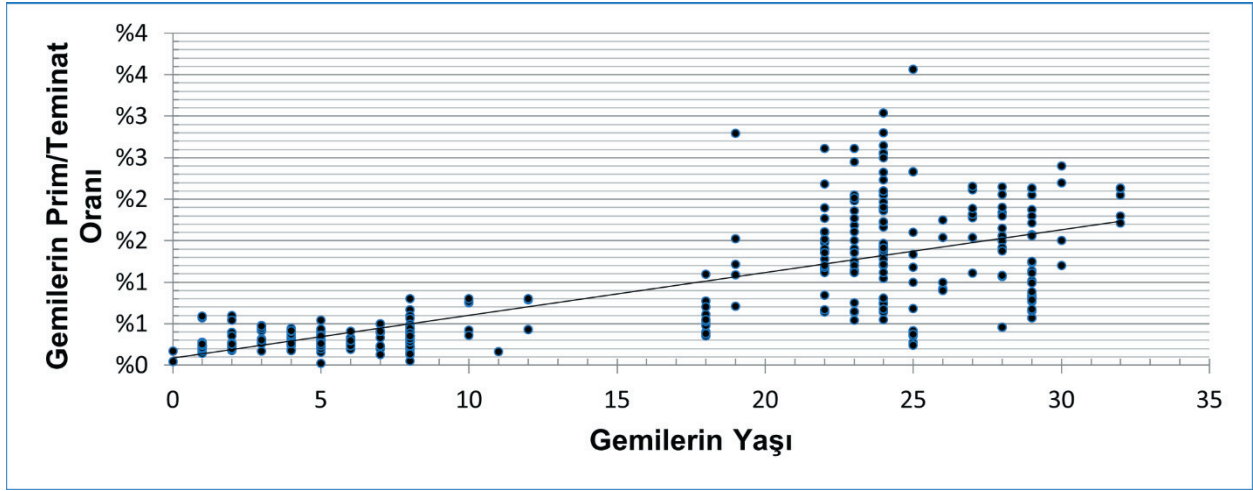
Şekil 6. Gemilerin Yaşı ve Gemilerin Primleri (ABD doları) Tablosu



Şekil 7. Gemilerin Yaşı ve Gemilerin Teminatları (ABD doları) Tablosu

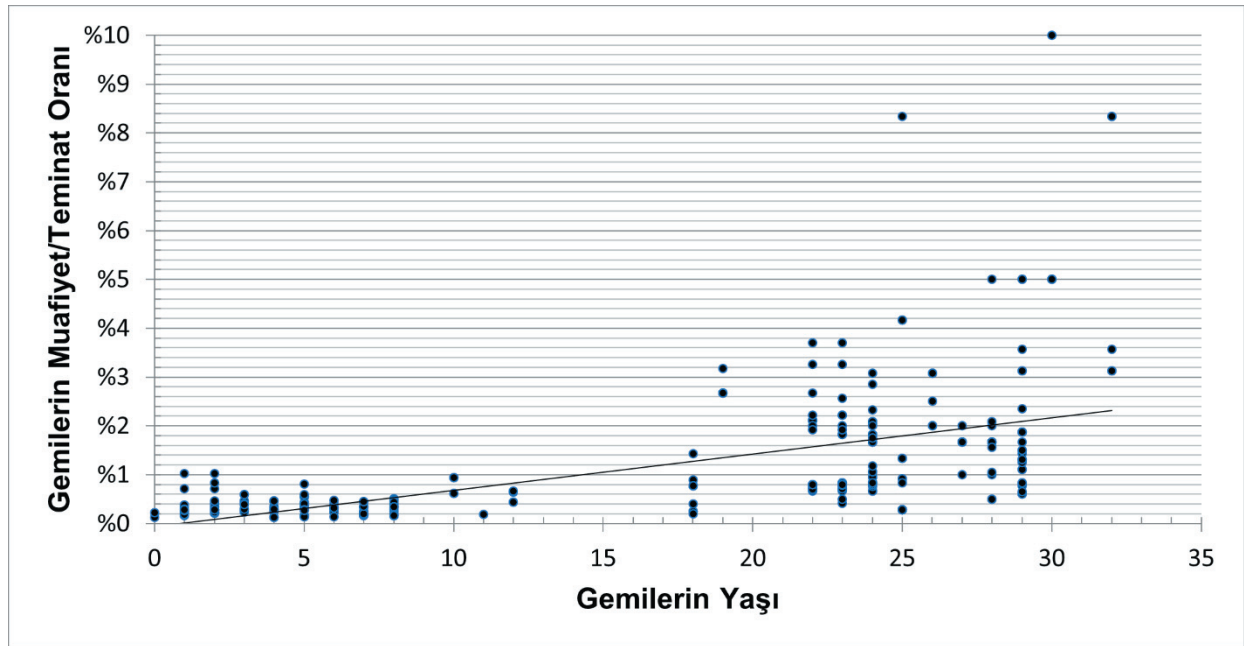


Şekil 8. Gemileri Ana Makinelerinin Dağılımı Grafiği



Şekil 9. Gemilerin Yaşı ve Gemilerin Prim/Teminat Oranı Grafiği

Şekil 9'da ve Şekil 10'da gemilerin yaşları arttıkça prim-teminat oranlarının ve muafiyet-teminat oranlarının arttığı görülmektedir.



Şekil 10. Gemilerin Yaşı ve Gemilerin Muafiyet/Teminat Oranı Grafiği

## 7. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında Türk Deniz Ticaret Filosunun Tekne ve Makine sigortası kapsamında risk değerlendirmesi yapılmıştır. Araştırmada 349 adet gerçek veriyle çalışılmıştır. Bu 307 adet poliçeden 5 yıl içerisinde 11 adet hasar ile karşılaşmıştır. Risk modellemesini uygulayabilmek için elimizde olan verilerin nasıl dağıldığı belirlenmiştir. Hasar frekansı için Poisson dağılımı varsayılmıştır. Çünkü hasar gerçekleşme olasılığı düşüktür. Hasar şiddeti verilerinin ise üstel dağıldığı varsayılmıştır. Daha sonra gerçek verilerin ortalama ve varyansıyla karşılaştırılarak varsayım desteklenmiştir. Türk Deniz Ticaret Filosunun Türk

Bayraklı gemilerinin %45 DWT oranı için: %90 güven düzeyiyle hesaplanan ortalama prim baz alındığında gerçek ortalama prim ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak Türk deniz ticaret filosundaki Türk bayraklı 103 adet gemiden alınan verilerin ışığı altında alınması gereken prim değerinden yaklaşık 4,39 kat fazla tekne ve makine sigortası primi armatör işletmelerinden alındığı tespit edilmiştir. Beklenen toplam hasar miktarları, beklenen varyans ve ortalama prim değerleri yukarıda hesaplandı. Poliçeleri düzenleyen sigorta şirketi 100.000 ABD Doları muafiyet bedeli koyduğunda yani 100.000 ABD Doları ve altında oluşan hasar miktarları için ödeme yapmadığında 5 yılı göz önünde bulundurduğumuzda beklenen hasar miktarı 398.571,50 'dir. Sigorta şirketinin hasar geldiği takdirde ödeme yapacağı hasar miktarları için beklediği değer 410.328,77 'dir. Türk Deniz Ticaret Filosunun Türk Bayraklı dökme yük gemilerinin %43 DWT oranı için: Yukarıda %90 güven düzeyiyle hesaplanan ortalama prim baz alındığında gerçek ortalama prim ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak piyasadan dökme yük tipli gemiler için yaklaşık 14,16 kat fazla prim alındığı tespit edilmiştir. Beklenen toplam hasar miktarları, beklenen varyans ve ortalama prim değerleri yukarıda hesaplandı. Poliçeleri düzenleyen sigorta şirketi 100.000 ABD Doları muafiyet bedeli koyduğunda yani 100.000 ABD Doları ve altında oluşan hasar miktarları için ödeme yapmadığında 5 yılı göz önünde bulundurduğumuzda beklenen hasar miktarı 67.145 ABD Doları'dır. Sigorta şirketinin hasar geldiği takdirde ödeme yapacağı hasar miktarları için beklediği değer 69.052 ABD Doları'dır. Türk Deniz Ticaret Filosunun Türk Bayraklı konteyner gemilerinin %78 DWT oranı için: Yukarıda %90 güven düzeyiyle hesaplanan ortalama prim baz alındığında gerçek ortalama prim ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak piyasadan konteyner tipli gemiler için yaklaşık 1,64 kat fazla prim alındığı tespit edilmiştir. Beklenen toplam hasar miktarları, beklenen varyans ve ortalama prim değerleri yukarıda hesaplandı. Poliçeleri düzenleyen sigorta şirketi 100.000 ABD Doları muafiyet bedeli koyduğunda yani 100.000 ABD Doları ve altında oluşan hasar miktarları için ödeme yapmadığında 5 yılı göz önünde bulundurduğumuzda beklenen hasar miktarı 774.297 ABD Doları'dır. Sigorta şirketinin hasar geldiği takdirde ödeme yapacağı hasar miktarları için beklediği değer 804.367 ABD Doları'dır. Unutulmamalıdır ki sigorta sadece risklerin transfer edilmesi ve güvence altına alınması anlamına gelmektedir. Olası risklerin yaşanmaması anlamına gelmemektedir. Bu nedenle armatör işletmeleri proaktif bir yönetim sistemi benimsemeli ve bu çalışmada belirtilmiş olan risklerin oluşmaması için çaba göstermelidirler (ISM zorunluluğu haline gelmiştir). Bu çalışmada kurumsal ve çok sayıda gemisi olan armatör işletmelerinin daha düşük prim ödedikleri, bunun yanında az sayıda gemiye sahip olup küçük ve orta ölçekli armatör işletmelerinin daha az hasar oranına sahip olmalarına karşın daha fazla tekne ve makine sigortası primi ödediği sonucuna varılmıştır. Tekne ve makine sigortalarının gemilerin yaşı ile direkt bir bağı olmadığı gözlenmiştir. Sonuç olarak armatör işletmeleri daha fazla prim ödememek için kendi örgütleri içinde risk yönetimi konusunda daha fazla uzmanlaşmalı hatta orta ve büyük ölçekli armatör işletmeleri Risk Baş Yöneticisi pozisyonunu örgüt yapılarında oluşturmayı düşünmelidirler. Armatör işletmeleri satın aldıkları tekne ve makine sigortası ürünü hakkında daha fazla farkındalığa sahip olmalıdırlar ve böylelikle sigortacı/brokerlerle daha fazla pazarlık yapabilmeli ve düşük primler alabilmek şansına sahip olmalıdırlar. Böylelikle işletme maliyetlerindeki prim giderlerini azaltarak rekabet güçlerini arttırabilirler. Ama en önemlisi Türkiye'de orta ve büyük ölçekli armatörler bir araya gelmeli ve daha makul tekne ve makine sigortası primleri alabilmek adına tekne ve makine sigortası havuzu oluşturmalıdırlar.

## Teşekkür

Rahmetli Prof. Dr. Yücel Odabaşı Hocamızı şükran ve minnetle anıyor, Kuzey Sigorta/Emin Yaşacan ve Kaptan Ufuk Teker'e de desteklerinden dolayı teşekkür ediyorum.

## Referanslar

- Akmüt, Özdemir, (1980) "Hayat Sigortası, Teori ve Türkiye'deki Uygulamalar", Ankara Üniversitesi Siyasal Bilgiler Fakültesi Yayınları No: 447, Ankara.
- Bernstein, Peter L., (2006) "Tanrılara Karşı Riskin Olağanüstü Tarihi", Scala.
- Çipil, Mahir, (2008) "Risk Yönetimi ve Sigorta, Yeni Sigortacılık Mevzuatı ile Uyumlu", Nobel, İstanbul.
- Doğanay, İsmail, (2004). "Türk Ticaret Kanunu Şerhi", 3. Cilt, Beta, İstanbul.
- Erginer, Emrah, (2010). "Türk Deniz Ticaret Filosunun Tekne ve Makine Sigortası Kapsamında Risk Değerlendirmesi", Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Denizcilik İşletmeleri Yönetimi Anabilim Dalı Denizcilik İşletmeleri Yönetimi Programı Doktora Tezi, İzmir.
- Erol, Sercan, (2009). "Deniz Sigortacılığı: Primin Belirlenmesinde İnsan Faktörü", Celepler Matbaacılık, Trabzon.
- Fıkırkoca, Meryem, (2003). "Bütünsel Risk Yönetimi", Pozitif Matbaacılık, Ankara.
- Golish, Heinz, (2005) "Briefing Report-Marine Insurance 2005-2006", Drewry, Londra.
- Güredin, Ersin, (1976). "Sigorta İşletmelerinde İktisadilik Analizi ve Türk Tatbikatından Örnekler", Doktora Tezi, İstanbul.
- Güvel, Enver ve Öndaş, (2006). "Sigortacılık", Seçkin, Ankara.
- Harrington, Niehaus, (2003). "Risk Management and Insurance", McGraw Hill.
- Harrington, Casualty ve Yu, (2003). "Insurance Underwriting Margins Have a Unit Roots?", The Journal of Risk and Insurance, Vol. 70, No. 4, 715-733.
- <https://tr.wikipedia.org/wiki/Risk>, (Erişim 20.11.2019).
- <http://plato.stanford.edu/entries/risk/>, (Erişim 20.11.2019).
- <https://www.millire.com/>, (Erişim 12.12.2022).
- ISO/IEC Guide 73:2002, "Risk management — Vocabulary — Guidelines for use in standards.
- ISO 8402:1995 / BS 4778 "Quality management and quality assurance — Vocabulary".
- Klugman, S.A., Panjer, H.H. ve Willmot, G.E., (2004). "Loss Models From Data to Decisions", John Wiley, N.J. (Ch. 5, 6, 9,10,11,12,13).
- Kuo, The Nautical Institute, (1999). "Managing Risk in Shipping".
- Mark, S. Dorfman, (2004)"Introduction to Risk Management and Insurance", Prentice Hall.
- Nomer, Cahit ve YUNAK, Hüseyin, (2000). "Sigortanın Genel Prensipleri", Ceyma Matbaacılık, İstanbul.

Özbolet, Murat, (2008) “Temel Sigortacılık”, Seçkin, Ankara.

Rejda George E., Mc Namara Michael, (2003). “Principles of Risk Management and Insurance, Pearson.

Yaralıoğlu, Kaan, (2004). “Uygulamada Karar Destek Yöntemleri”, İzmir.

Yavaşca, Cemaleddin, (1993). “Deniz Ticaret Hukuku Deniz Kazaları ve Deniz Sigortaları”, Beta, İstanbul.

Yazıcıoğlu, Emine, (2003). “Tekne Sigortası Sözleşmesi”, Beta, İstanbul.

Yücesan, Osman, (2004). “Nakliyat Tekne ve Emtea Sigortaları”, Emek Matbacılık, İstanbul.

# HAD Metodu ile Sınır Tabaka Emme Tekniği Kullanılan Rüzgar Destekli Sevk Sistemi Geliştirilmesi

Gözde Nur Küçüksu<sup>1,2</sup>, Ahmet Ziya Saydam<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye  
<sup>2</sup>Hidro teknik Tasarım Teknolojileri Ltd., İstanbul, Türkiye  
<sup>3</sup>Piri Reis Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup>(sorumlu yazar), [gkucuksu@hidro-teknik.net](mailto:gkucuksu@hidro-teknik.net), ORCID: 0000-0002-5003-3359  
<sup>2</sup> [zsaydam@hidro-teknik.net](mailto:zsaydam@hidro-teknik.net), 0000-0002-1266-9401

## ÖZET

Gemi kaynaklı sera gazı emisyonlarının azaltılması kapsamında Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından Enerji Verimliliği Tasarım Endeksi (EEDI), Enerji Verimliliği Mevcut Gemi Endeksi (EEXI), Karbon yoğunluk Göstergesi (CII) gibi kavramlar ortaya çıkartılmış ve önümüzdeki süreçte sera gazı emisyonlarının azaltılması için bir yol haritası belirlenerek kurallar yürürlüğe sokulmuştur. IMO tarafından yürürlüğe sokulan kurallar belirli periyotlarda emisyonların azaltılmasını gerektirmektedir. Bu kapsamda tasarım yaklaşımları, gemilerde kullanılan sevk sistemleri ve seyir sürat profilleri değişmektedir. Ancak, bahsi geçen değişimlerle uzun vadede emisyonların kademeli olarak azalmasını talep eden kurallara uyulabilmesi mümkün gözükmemektedir.

Uzun vadede deniz ticaretinin rekabetçi bir şekilde sürdürülebilmesi ve emisyonların azaltılabilmesi için inovatif teknolojilerin geliştirilmesi gerekmekte olup rüzgar destekli sevk sistemleri bu konuda oldukça yüksek potansiyele sahiptir. Sınır tabaka emme tekniği kullanılan kanatlar da rüzgar destekli sevk sistemleri içerisinde yüksek kaldırma kuvveti yaratan alternatifler arasında bulunmaktadır.

Bu çalışmada, sınır tabaka emme tekniği kullanılan bir kanat yapısı için tasarım parametrelerinin aerodinamik performansa etkileri Reynolds Averajlı Navier Stokes (RANS) metodu ile incelenmiştir. Öncelikle, hesaplamalı yaklaşımın çözülen probleme uygunluğu ağdan bağımsızlık çalışması ile irdelenmiş, takiben literatürde bulunan deneysel veriler ile doğrulama çalışması icra edilmiştir. Üretilen kaldırma kuvvetinin mertebesine doğrudan etkisi bulunan flap açısı ve sınır tabaka emme bölgesinin açıl konumu ile ilgili parametrik çalışma icra edilerek optimum konumlar tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Sınır tabaka emme, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), rüzgar destekli sevk, turbo-yelken, aerodinamik

**Makale geçmişi:** Geliş 22/11/2022 – Kabul 06/12/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1208594>



# Development of a Wind-Assisted Propulsion System Using Boundary Layer Suction with CFD Method

Gözde Nur Küçüksu<sup>1,2</sup>, Ahmet Ziya Saydam<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Hidroteknik Nautical Design Technologies Ltd., İstanbul, Türkiye

<sup>3</sup> Piri Reis University, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup>(corresponding author), [gkucuksu@hidro-teknik.net](mailto:gkucuksu@hidro-teknik.net), ORCID: 0000-0002-5003-3359

<sup>2</sup> [zsaydam@hidro-teknik.net](mailto:zsaydam@hidro-teknik.net), 0000-0002-1266-9401

## ABSTRACT

The International Maritime Organization (IMO) establishes a roadmap to put into force new regulations in the context of reducing greenhouse gas emissions from ships and presents new parameters such as Energy Efficiency Design Index (EEDI), Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) and Carbon Intensity Indicator (CII). The regulations issued by IMO require emission reductions at specific time intervals in a progressive manner. Ship design approaches, propulsion systems used on ships, and ship operating profiles are changing along with these regulations. However, it does not seem possible to comply with the regulations demanding a gradual reduction in emissions in the long term with the above changes.

Innovative technologies such as wind-assisted propulsion systems which have a very high potential in this manner need to be developed to keep maritime trade competitive and reduce emissions. Devices utilizing boundary layer suction are also among the alternatives that generate high lift in wind-assisted propulsion systems. In this study, the effects of design parameters on aerodynamic performance for a wing structure are investigated by using the boundary layer suction technique with Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) method. First, the suitability of the numerical approach with a grid independence study is assessed for predicting the aerodynamic performance of the suction wing, followed by the validation study with the experimental data found in the literature. Flap angle and the extent of the suction area has been varied parametrically and the effect of the variation of these parameters on the aerodynamic performance has been investigated.

**Keywords:** Boundary layer suction, computational fluid dynamics (CFD), wind-assisted propulsion, aerodynamics, turbo-sail

**Article history:** Received 22/11/2022 – Accepted 06/12/2022

## 1. Giriş

Denizde can güvenliğini sağlamak amacıyla kurulan Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün (International Maritime Organization, IMO) yetkisi, 1954 yılındaki Denizlerin Petrolle Kirlenmesinin Önlenmesine ilişkin uluslararası sözleşme (OILPOL Sözleşmesi) ile beraber genişletilmiştir. Can güvenliğinin yanısıra kirlilik sorunlarının sorumluluğunu da üstlenmeye başlayan ve bu konuda başarılı sonuçlar elde eden IMO'nun, şimdiye kadar uluslararası deniz taşımacılığının düzenlenmesi için yürürlüğe soktuğu 53 anlaşmanın 21'i doğrudan çevre ile ilgilidir (IMO, 2011). 1973'te yürürlüğe giren Gemi Kaynaklı Kirlilik Önlenmesine ilişkin sözleşmedeki (MARPOL) Ek VI Enerji Verimliliği Tasarım Endeksi (EEDI) yeni gemiler için zorunlu hale getirilmiştir. IMO tarafından önerilen Enerji Verimliliği Tasarım Endeksi formülü (IMO,2012):

$$EEDI = \frac{(\prod_{j=1}^n f_j)(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(j)} \cdot SFC_{ME(i)}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE*})}{f_i \cdot f_c \cdot f_1 \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}} + \frac{((\prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)}) C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_c \cdot f_1 \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}} - \frac{(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME**})}{f_i \cdot f_c \cdot f_1 \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}} \left[ \frac{g}{t \cdot nm} \right] \quad (1)$$

\*: Normal azami elektrik gücünün bir kısmı şaft jeneratör tarafından karşılanıyorsa,  $SFC_{AE}$  ve  $C_{FAE}$  yerine  $SFC_{ME}$  ve  $C_{FME}$  kullanılmalıdır.

\*\* :  $P_{PTI(i)} > 0$  durumunda,  $P_{eff}$  hesaplaması için  $(SFC_{ME} \cdot C_{FME})$  ve  $(SFC_{AE} \cdot C_{FAE})$  'nin ortalama ağırlık değeri kullanılmalıdır.

Formülde  $ME(i)$  ve  $AE(i)$  indeksleri ana ve yardımcı makineyi belirtmektedir.  $C_F$  yakıt tüketimi ve  $CO_2$  emisyonu arasındaki boyutsuz dönüşüm faktörü,  $V_{ref}$  gemi hızı,  $P$  ana ve yardımcı makine gücü,  $f_j$  spesifik gemi dizayn elementleri için düzeltme faktörü,  $f_c$  kapasite faktörü,  $f_w$  hava faktörüdür.

IMO tarafından 2023'te yürürlüğe sokulacak olan bir diğer endeks ise Enerji Verimliliği Mevcut Gemi Endeksi (EEXI) sera gazı stratejisinde belirlenen hedeflere ulaşma çalışmalarındaki bir sonraki aşamadır (IMO, 2022a). Mevcut gemilerde EEXI hesaplaması için IMO tarafından önerilen formül ise aşağıdaki gibidir (IMO,2022b):

$$EEXI = \frac{(\prod_{j=1}^n f_j)(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(j)} \cdot SFC_{ME(i)}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE*})}{f_i \cdot f_c \cdot f_1 \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref} \cdot f_m} + \frac{((\prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)}) C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_c \cdot f_1 \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref} \cdot f_m} - \frac{(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME**})}{f_i \cdot f_c \cdot f_1 \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref} \cdot f_m} \left[ \frac{g}{t \cdot nm} \right] \quad (2)$$

Yukarıda belirtilen yeni kurallar, zaman içerisinde belirli aralıklarda daha düşük sera gazı salınımına izin verecek biçimde kademeli olarak güncellenmektedir. IMO hedefleri kapsamında, gemi kaynaklı sera gazı emisyon seviyesinin 2008 yılı seviyesine nazaran 2030 yılında %40, 2050 yılında ise %70 oranında azaltılması hedeflenmektedir. Bu durumda, mevcut gemiler ve yeni inşa edilecek gemilerin tasarım ve işletilmesi ile ilgili yaklaşımlarında da değişmesi gerekmektedir. Formülasyonda görüldüğü üzere, gemi üzerinde kullanılan inovatif teknolojilerden elde edilen enerji tasarrufu toplam sera gazı salınımindan düşülerek enerji verimliliği parametreleri hesaplanmaktadır. Bu durumda, rüzgar destekli sevk sistemlerinin kullanılması önümüzdeki yıllarda yeni inşa edilen ve mevcut gemiler için enerji verimliliği kurallarına uyum için önem arz etmektedir.

Czermanski v.d. (2022) 12 farklı tipte mevcut gemi üzerinde EEXI hesaplamalarını yapmışlardır. Çalışmanın amacı, EEXI kuralları yürürlüğe girdikten sonraki süreçte yapılacak alternatif uygulamaların IMO hedeflerine ulaşım konusunda yeterliliğinin irdelenmesi olarak belirlenmiştir. Mevcut teknolojilerin ve uygulamaların 2030 hedefleri için yeterli olamayacağı sonucuna varılmıştır. Rüzgar destekli sevk sistemi kullanılmasıyla beraber yakıt tüketimi ve emisyon azaltımı konusunda Lindstad v.d. (2022) kuru yük gemisi örneğini ele almışlardır. Çalışmada, yenilikçi tasarım yaklaşımları ilerüzgar destekli sevk sisteminin birlikte kullanılması durumunda indeksin %40'a kadar düşebileceği sonuca varılmıştır. Güncel çalışmalar incelendiğinde, mevcut tasarım yaklaşımları, inovatif teknolojiler ve işletme yaklaşımlarının sera gazı azaltımı hedeflerine ulaşabilecek yeterlilikte olmadığı sonucuna varılabilmektedir.

Rüzgar destekli sevk sistemleri, tarihi olarak rüzgarın gemi sevk için kullanılmaya başlanmasından bu yana geliştirilmektedir. Yelkenli tekneler olarak adlandırılan ve sadece rüzgar enerjisi ile sevk edilen teknelerde kare yelken ve bermuda yelken kullanılmaktadır. Teknolojinin gelişimi ile birlikte yelken benzeri rijit yelken, dynarig ve rüzgarı enerji kaynağı olarak kullanan ancak yelken içermeyen uçurtma, flettner rotor ve turbo-yelken, rüzgardan elektrik elde ederek sevk için kullanan yatay ve dikey rüzgar türbinleri gibi yeni rüzgar sevk sistemleri kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 1.1.).



**Şekil 1.1.** Sağ üstten sola doğru rüzgâr sevk sistemleri: dynarig, flettner rotor, rijit yelken, turbo-yelken, dikey rüzgâr türbini (sail-world.com, loc.gov, wikipedia.org, cousteau.org, Bockmann & Steen).

Diğer bir teknolojik rüzgar destekli sevk sistemi ise daha tam olarak limitleri keşfedilememiş olan turbo-yelkendir. Flettner rotora benzer silindirik yelkenlere sahip olmasına rağmen, silindirler döndürülmemektedir. Turbo-yelkende, üçgen kesitli bir yönlendirme sistemi ve silindir üzerindeki deliklerden hava emen bir fan sistemi mevcuttur. Üçgen yönlendirme sistemi istenen yönde kuvvet elde edilmesini sağlamakta, hava emişi ise sınır tabakayı istenen yöne çekerek yanal kuvvetin şiddetini arttırmaktadır.

Bu sistemin uygulandığı en bilinen örnek, Cousteau vakfının 1980 yılında çalışmaya başlayan Alcyone teknesidir (Şekil 1.2.). Gemi 2 adet dizel makineye sahiptir, baş tarafı tek gövdeye kıç tarafı katamaran forma sahiptir. Tekne boyu 31.4 m, genişliği 8.84 m ve 10.65 knot seyir hızına sahiptir. 10.1 m yüksekliğe ve 2 m çapa sahip 2 adet turbo-yelken kullanılmıştır. Turbo-yelkenler hareketli olmadığı için

teknede titreşim, gürültü ve döndürme gücüne ihtiyaç duyulmamaktadır. Cousteau vakfı tarafından yapılan kapsamlı çalışmada, (Charrier v.d., 1985) sınır tabaka emme tekniği ile farklı kesitlerin aerodinamik performansları rüzgar tüneli testleriyle detaylı bir şekilde karşılaştırılmış olup değişik rüzgar destekli sevk sistemleri ile de karşılaştırmalara da yer verilmiştir.



**Şekil 1.2.** Turbo-yelken entegre edilmiş The Alcyone teknesi (fr.cousteau.org)

Turbo-yelkenler ile ilgili deneysel çalışmalara bir örnek Low ve ekibinin Singapur Ulusal Üniversitesi (NUS) bünyesinde gerçekleştirdiği çalışmadır (Low v.d., 1991). Çalışmada kullanılan kanat kesidi silindirik olup, rüzgar tüneli zemininden tavana kadar uzanmaktadır. Bu şekilde, uç girdap etkisinden arınıdırılarak inceleme yapılması mümkün olup, silindirik keside bağlanan flap ve sınır tabaka emiş tekniği kullanımı ile yüksek kaldırma kuvveti elde edilmesi sağlanmıştır. Deneysel çalışmada basınç dağılımı, kaldırma kuvveti ve direnç kuvvetinin flap açısı ve emme alanının konumuna göre nasıl değiştiği incelenmiştir. Yapılan incelemelerde sınır tabaka emiş miktarı, emme katsayısı ile tanımlanmıştır:

$$C_q = \frac{Q}{Ud} \quad (3)$$

Burada  $C_q$  emme katsayısını,  $Q$  birim kanat açıklığına karşılık gelen debiyi,  $U$  bağıl rüzgar hızını,  $d$  ise silindirik çapını ifade etmektedir. Çalışmada farklı emme katsayıları için aerodinamik performans da incelenmiştir.

Turbo-yelken ile ilgili hesaplamalı çalışmalarda, özellikle viskoz etkilerin hassas bir şekilde hesaba katılabilmesi maksadıyla, çoğunlukla RANS metodu kullanılmaktadır (Gurerri v.d., 2016; Yihuai v.d., 2017). Bu çalışmalarda flap pozisyonu, emme katsayısı ve silindirik olmayan kanat yapılar için hücum

açısının etkisi incelenmiş olup kullanılan hesaplamalı yaklaşımın çözülen probleme uygunluğu irdelenmiştir.

Turbo-yelken kanat profili de üretilen aerodinamik kuvvetler üzerine etki etmektedir. Hcini v.d. (2017) tarafından geliştirilen metodoloji ile kanat kalınlığı, emme ve flap açısız konumları Hess-Smith panel yönetimi ile incelenmiştir ve sonuçlar deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Rüzgar destekli sevk sistemlerinin gemilerde kullanılması durumunda oluşacak kuvvet ve moment dengesi, geleneksel sevk sistemlerinin kullanıldığı gemilere göre farklılıklar göstermektedir. Oluşan aerodinamik yanal kuvvet hidrodinamik yanal kuvvet ile dengelenmekte, bu durum geminin bir sürüklenme açısı altında ilerlemesine neden olmaktadır. Ayrıca, yanal kuvvet tarafından oluşturulan yatırıcı moment geminin belirli bir meyil açısında dengeye gelmesine neden olmaktadır. Bunlara ilaveten, pervanenin düşük yüklenmede çalışacak olması münasebetiyle tekne verimi, açık su verimi ve relatif dönme verimi de farklılıklar gösterecektir. Bu koşullar altında işletilecek bir geminin tasarımı aşamasında yukarıda bahsi geçen koşulların hidrodinamik performansa etkisinin incelenmesi gerekmektedir. Bu konuda yapılan güncel bir çalışmada (Saydam v.d., 2022) ticari bir geminin meyil ve sürüklenme açısı altında ve farklı hızlarda hidrodinamik performansı RANS metodu ile incelenmiş ve güncel tasarım metodlarının bu tarz gemilere uygulanabilirliği tartışılmıştır.

Yapılan literatür değerlendirmesinde, turbo-yelken veya sınır tabaka emme tekniği kullanarak rüzgar destekli gemi sevk sistemi geliştirilmesi konusundaki yüksek potansiyele rağmen yeteri kadar çalışma yapılmadığı görülmektedir. Özellikle, Cousteau vakfına ait patent süresinin dolmasını takiben çalışmaların çeşitliliğinin arttığı, silindir dışında farklı kanat kesitlerinin de ileri hesaplamalı yöntemler ile incelendiği görülmektedir. Halihazırda, yapılacak güncel çalışmaların ilgili teknolojinin detaylı olarak anlaşılması, farklı kesit tiplerinin incelenmesi, üretilen kaldırma kuvvetini artırıcı farklı yaklaşımların geliştirilmesi, gemi üzerinde oluşan aerodinamik ortamda performans tahmini, hidrodinamik etkileşimlerin anlaşılması vb. konuların da bilgi birikimini geliştireceği değerlendirilmektedir.

Mevcut çalışmada, RANS metodu kullanılarak ileriye doğru eliptik bir kanat kesidi için flap ve emme alanı açısız konumlarının aerodinamik performansa etkisi incelenmiştir. Literatürde yüksek kaldırma kuvveti üretme potansiyeli olan eliptik kesitler için kısıtlı sayıda çalışma olduğundan, gemi üzerinde kullanılabilecek tasarım alternatifleri üzerinde yapılan çalışmaların konu ile ilgili literatürü geliştireceği değerlendirilmektedir. Günümüz şartlarında, özellikle flettner rotor ve diğer alternatif rüzgar destekli sevk sistemleri ile rekabet edebilecek seviyede kaldırma kuvveti üretebilen turbo-yelken tasarımı ile ilgili çalışmalar yapılmasına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu çalışmada flap konumu ve emme alanı açısız konumu değiştirilerek yüksek kaldırma kuvveti elde edilmesi hedeflenmektedir.

Çalışmanın ikinci bölümde hesaplamalı analiz yaklaşımı sunulmuş , takiben üçüncü bölümde inceleme için kullanılacak hesaplamalı yaklaşımın probleme uygunluğu ağdan bağımsızlık analizi ile incelenmiş ve literatürde bulunan deneysel bir çalışmanın sonuçları kullanılarak doğrulama yapılmıştır. Dördüncü bölümde ise tasarım parametrelerinin aerodinamik performansa etkileri tahmin edilmiştir.

## 2. Hesaplamalı Analiz Yaklaşımı

Sınır tabaka emme tekniği ile yüksek kaldırma kuvveti üreten kanat yapısının aerodinamik performansının incelenmesi için icra edilecek hesaplamalı çalışmalar üç aşamalı olarak kurgulanmıştır. Öncelikle, silindirik kanat yapısı için ağdan bağımsızlık çalışması icra edilmiştir. Bu aşamada sınır tabaka emme tekniği uygulanmamış olup silindir etrafındaki hücre sayısı ve sınır tabaka ağ yapısı karakteristiği global olarak incelenmiştir. Takiben, deneysel veriler kullanılarak doğrulama çalışması icra edilmiştir.

Bu aşamada, global ağ yapısına ilave olarak sınır tabaka emme bölgesindeki ağ yapısı ve emme işleminin modellenmesi ile ilgili detayların belirlenmesi ve incelenen probleme uygun çözüm stratejisi oluşturulduğunun doğrulanması sağlanmıştır. Takiben, parametrik çalışmalar ilk iki aşamada belirlenen ağ yapısı ve çözüm parametreleri kullanılarak icra edilmiştir.

Hesaplama analizler, bir RANS çözücüsü olan Ansys CFX ticari yazılımı ile icra edilmiştir. Bu yazılım, sonlu hacimler metodu kullanarak ayrıklaştırılmış süreklilik ve momentum denklemlerini düğüm noktası merkezli (vertex centered) bir yaklaşım ile çözmektedir. Taşınım ve türbülans sayısal modelleri “yüksek çözünürlüklü” ayarlanarak çözücünün lokal olarak ilgili denklemleri, çözüm ağı içerisinde karışım (blend) faktörünü yerel akış karakteristiğine uygun şekilde değiştirerek mümkün olan en yüksek doğruluk mertebesine getirmesi sağlanmaktadır (Ansys, 2013).

Hesaplama çalışmaları esnasında türbülans modellemesi olarak Kayma Gerilimi Taşıma (SST) Gamma-Theta türbülans modeli kullanılmıştır. İncelenen deneysel çalışmalarda ve takiben icra edilen analizlerde Reynolds sayılarının (Re) tam türbülanslı akış kabulü yapılabilecek mertebenin altında olması dolayısıyla ( $Re < 10^6$ ) bu yaklaşım tercih edilmiştir. Ağdan bağımsızlık analizleri zamandan bağımsız (steady-state) olarak icra edilmiş olup, takip eden çalışmalar zamana bağlı (unsteady) olarak gerçekleştirilmiştir.

Ağdan bağımsızlık çalışması Uluslararası Deney Havuzları Konferansı (ITTC) tarafından önerilen yaklaşım ile icra edilmiştir. Bu yaklaşıma göre en az üç analiz icra edilmesi gerekmektedir. Ağ yapısını oluşturan hücrelerin boyutları iyileştirme katsayısı oranında ( $r_i$ ) her bir analiz için küçültülmektedir. Bu çalışmada, silindirik yüzeyi üzerindeki hücre boyutlarının elde edilen kuvvetlere etkisi incelenmiş olup  $r_i \sqrt{2}$  olarak alınmıştır. Kaldırma kuvveti ve direnç için yakınsama oranları aşağıdaki şekilde belirlenmiştir (ITTC, 2017):

$$R_i = \frac{S_{i2} - S_{i1}}{S_{i3} - S_{i2}} = \frac{\epsilon_{i,21}}{\epsilon_{i,32}} \quad (4)$$

Burada  $R_i$  yakınsama oranını,  $S_i$  ilgili analizin sonucu elde edilen parameter değerini,  $\epsilon_{i,21}$  orta yoğunluklu ve düşük yoğunluklu ağlar ile elde edilen sonuçlar arasındaki farkı ve  $\epsilon_{i,32}$  ise yüksek yoğunluklu ve orta yoğunluklu ağ yapıları ile elde edilen sonuçlar arasındaki farkı simglemektedir. Bu durumda, elde edilen yakınsama oranına göre dört farklı yakınsama koşulu elde edilebilmektedir:

- (i) Monoton yakınsama ( $0 < R_i < 1$ ),
- (ii) Salınımlı yakınsama ( $-1 < R_i < 0$ ),
- (iii) Monoton ıraksama ( $1 < R_i$ ),
- (iv) Salınımlı ıraksama ( $R_i < -1$ ).

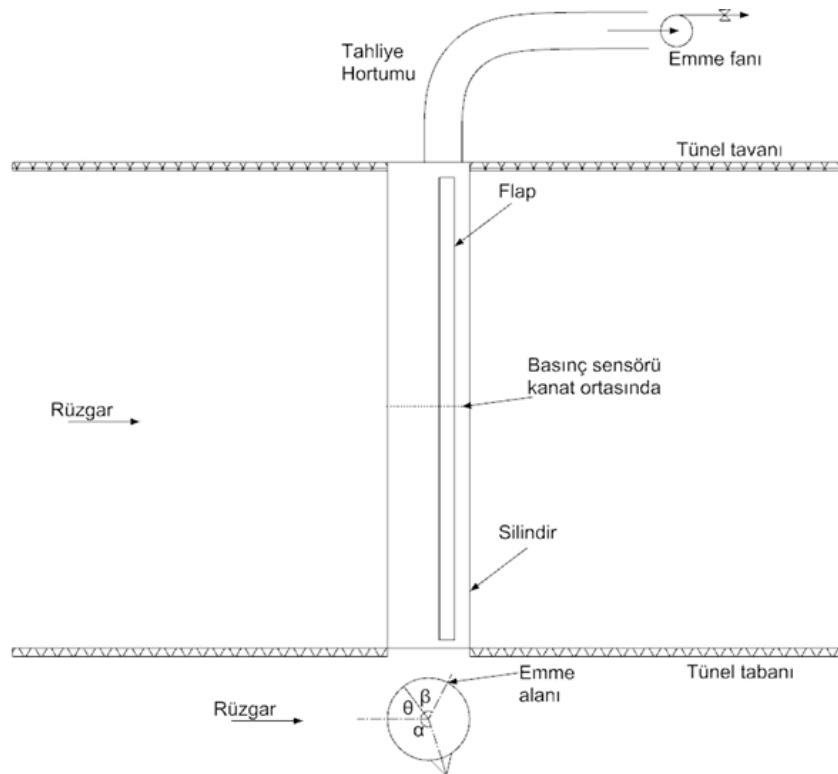
### 3. Doğrulama Çalışması

Detaylı parametrik analizler öncesinde, kullanılacak hesaplamalı model ve belirlenen çözüm parametrelerinin uygunluğunun tespit edilebilmesi amacıyla ağdan bağımsızlık analizi ve doğrulama analizleri yapılmıştır. Yapılan hesaplamalı çalışmalardan elde edilen sonuçlar, literatürde bulunan (Low, Luo, & Winoto, 1991) deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Doğrulama analizleri kapsamında Low ve diğerleri (1991) tarafından National University of Singapore bünyesindeki rüzgar tüneline gerçekleştirilen deney sonuçları ele alınmıştır. Rüzgar tüneli 0.6 m

yüksekliğinde ve 1 m genişliğindedir. Deney  $6 \times 10^4$  Reynolds sayısına karşılık gelen 9 m/s sürat için gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan sınır tabaka emişli kanat modeli 1 m çapında ve 0.6 m yüksekliğinde silindirik bir yapıdadır. Model, rüzgar tünelinin merkezine tavandan ve tabandan bağlı olarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.1.). Model üzerinde flap ve %18 oranında gözenekli bir emme alanı bulunmaktadır. Emme alanı 2 mm delikli 4 boyuna kolondan oluşmaktadır. Flap 30 mm derinliğinde kanat boyunca uzanan üçgen kesit alanlı bir yapıdır. Flap ve emme alanı sırasıyla  $\alpha$  ve  $\beta$  açılarına bağlı olarak konumlandırılmıştır.

Deneyde emme akışı, kanadın üst kısmına bağlı 370 W santrifüj fan ile sağlanmıştır. Deneyde ölçülen maksimum debi  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$  ve karşılık gelen azami emme katsayısı ( $C_q$ ) 0.2'dir. Deneyde basınç dağılımı silindirik kanat yapısının merkez hattına  $15^\circ$  açı aralıklarıyla yerleştirilen 24 basınç sensörü ile ölçülmüştür. Deneyde emme alanı açıl konumu,  $\beta$ ,  $10^\circ$  aralıklarla  $90$ - $130^\circ$  arasında değiştirilmiştir. Her emme alanı açıl konumu için flap açıl konumu,  $\alpha$ ,  $10^\circ$  aralıklarla  $80$ - $160^\circ$  arasında deney icra edilmiştir.



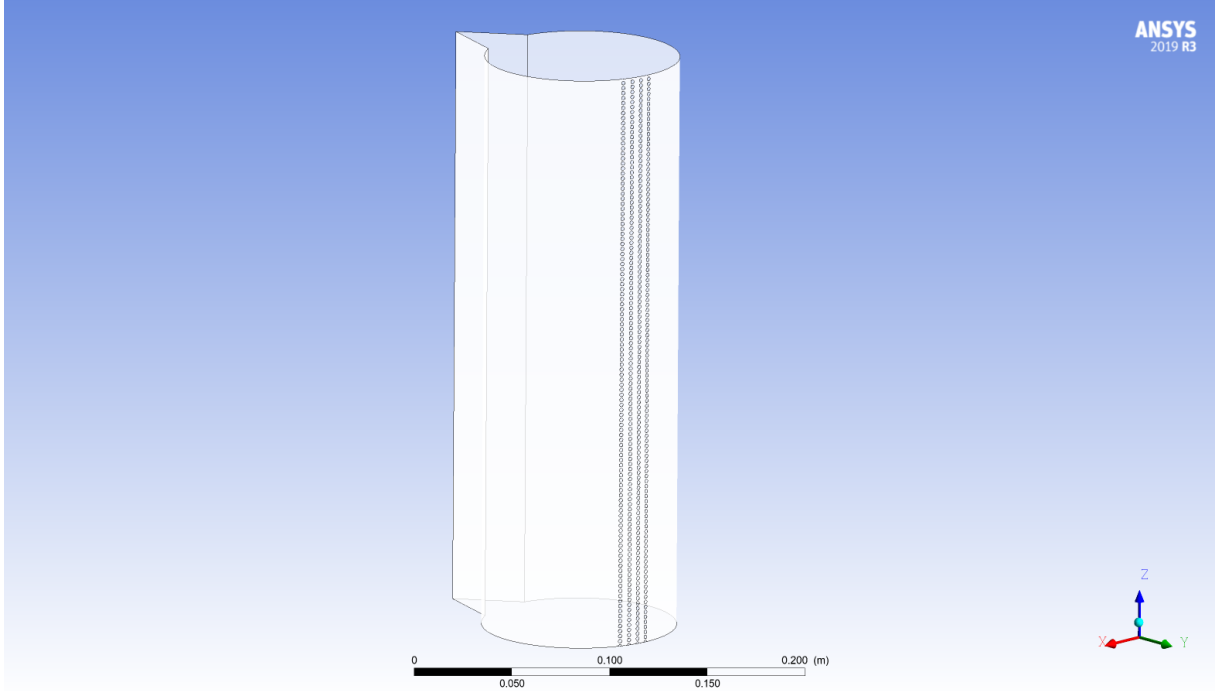
**Şekil 3.1.** Turbo-yelken modeli deney düzeneği

Deneyde emme alanı açıl konumunun direnç ve kaldırma kuvveti üzerindeki etkisi  $C_q=0.09$  için incelenmiştir. Aynı zamanda emme alanı açıl konumunun basınç üzerindeki etkisi flap açıl konumu  $\alpha=110^\circ$  de sabit tutularak 3 farklı açı,  $\beta=90, 110$  ve  $130^\circ$  için ölçülmüştür. Emme katsayısının kaldırma kuvveti üzerindeki etkisini incelemek için iki farklı katsayıda deney icra edilmiştir:  $C_q=0.09$  ve  $C_q=0.2$ .

Flap açıl konumunun kaldırma ve direnç kuvveti üzerindeki etkisi  $C_q=0.09$  için incelenmiştir. Flap açıl konumunun basınç dağılımı üzerindeki etkisi ayrıca incelenmiş olup, emme alanı açıl konumu  $\beta=110^\circ$  de sabit tutularak üç farklı flap açıl konumu  $\alpha=90, 110$  ve  $150^\circ$  için analiz yapılmıştır.

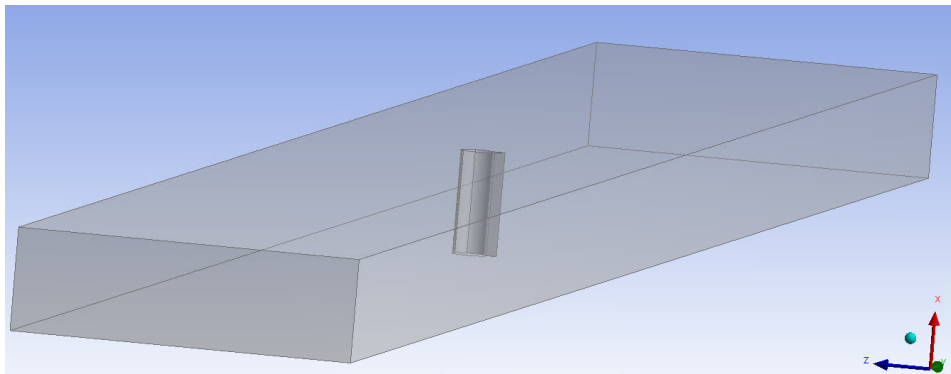
Sınır tabaka emmeli kanat, deneyde verilen model ve rüzgar tünel ölçülerine uygun olarak Rhinoceros programı ile modellenmiştir. Emme alanı %18 oranında gözenekli yapıyı sağlayacak şekilde 2 mm delikli 4 kolon olarak modellenmiştir (Şekil 3.2.). Turbo-yelken modeli 0.1 m çapında ve 0.6 m yüksekliğinde

silindirik bir yapı olarak tünelin merkez hattına yerleştirilmiştir (Şekil 3.3). Emme alanı ve flap her analiz için farklı açılarda modellenmiştir. Flap, deneye uygun şekilde 30 mm derinliğinde üçgen kesitli silindirik boyunda bir katı cisim olarak modellenmiştir. Yapının simetrik olmasından kaynaklı analizler yarı model üzerinden gerçekleştirilmiştir.



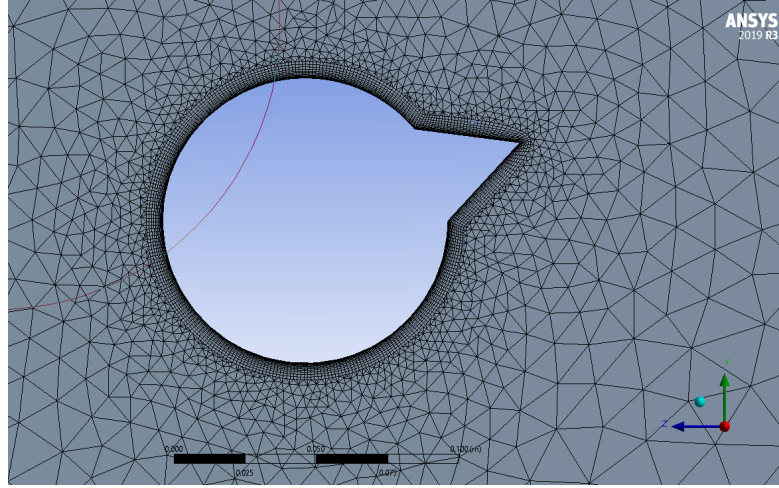
Şekil 3.2. Analiz için modellenen kanada ait perspektif görünüş

Analizler ANSYS-CFX yazılımı ile icra edilmiştir. Oluşturulan katı model öncelikle çözüm hacmi haline getirilmiştir. Şekil 3.3. ile gösterilen çözüm hacminin uzunluğu 10m, genişliği 1m ve yüksekliği model boyuyla aynı olup 0.6 metredir. Ağ yapısından bağımsızlık analizi emmenin olmadığı koşulda zamandan bağımsız (steady state) gerçekleştirilmiştir. Ağ yapısını oluşturmak için ANSYS Mesher yazılımı kullanılmıştır. Kanat etrafında sınır tabaka ağ yapısı uygulanmıştır (Şekil 3.4). Analiz için 3 farklı hücre boyutunda,  $\Delta x_i$ ,  $r = \sqrt{2}$  iyileştirme oranına sahip ağ yapıları kullanılmıştır. Analizi gerçekleştirilen hücre boyutları ve toplam hücre sayısı bilgileri Tablo 3.1 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Analiz çözüm hacmi





**Şekil 3.4.** Ağ numarası 003 için kanat üzerinde oluşturulan sınır tabaka çözüm ağı

**Tablo 3.1.** Ağ yapısından bağımsızlık analiz ağı bilgileri

Ağ numarası	Hücre boyutu [m]	Toplam hücre sayısı
1	0.00222	955094
2	0.00157	1843528
3	0.00111	3213050

Ağ yapısından bağımsızlık analizde elde edilen direnç ve kaldırma kuvvet Tablo 3.2 ile gösterilmiştir. Analiz sonucu elde edilen parametrelerin değişimi ve yakınsama oranları Tablo 3.3 ve yakınsama grafiği Şekil 3.5 ile gösterilmiştir. Kaldırma kuvveti (L) ve direnç (D), aşağıda verilen formüller kullanılarak katsayı halinde incelenmiştir:

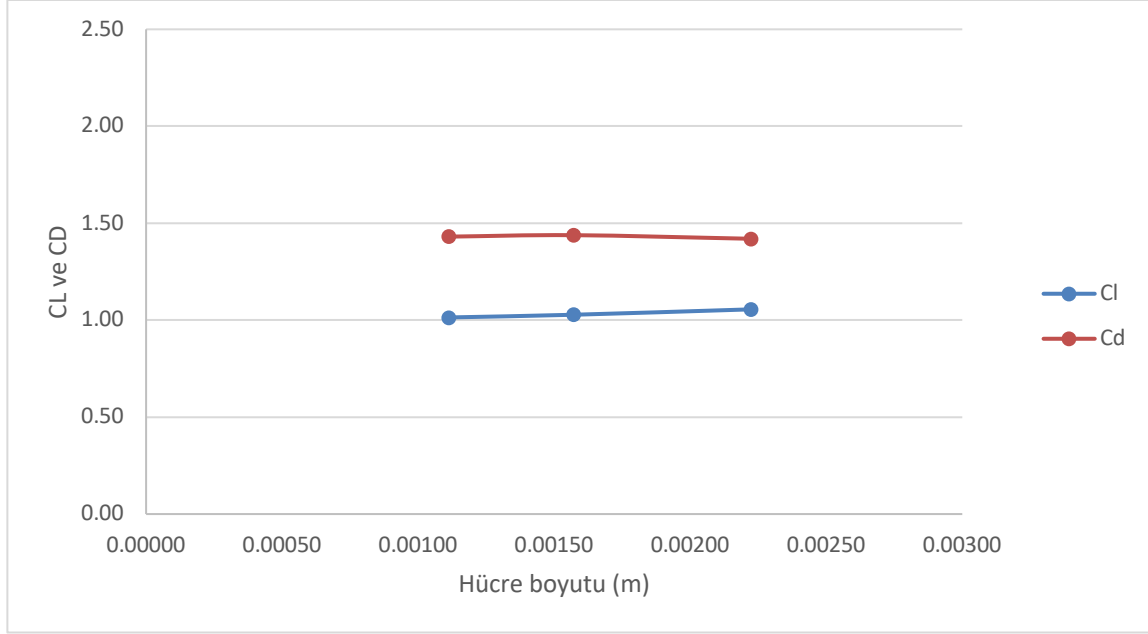
$$C_L = \frac{L}{0.5\rho SV^2}, C_D = \frac{D}{0.5\rho SV^2} \quad (5), (6)$$

**Tablo 3.2.** Ağ yapısından bağımsızlık analizi kaldırma ve direnç kuvvet katsayıları

Ağ numarası	L [N]	C <sub>L</sub>	D [N]	C <sub>D</sub>
1	1.52	1.06	2.04	1.42
2	1.48	1.03	2.07	1.44
3	1.46	1.01	2.06	1.43

**Tablo 3.3.** Ağ yapısından bağımsızlık analizi yakınsama oranları

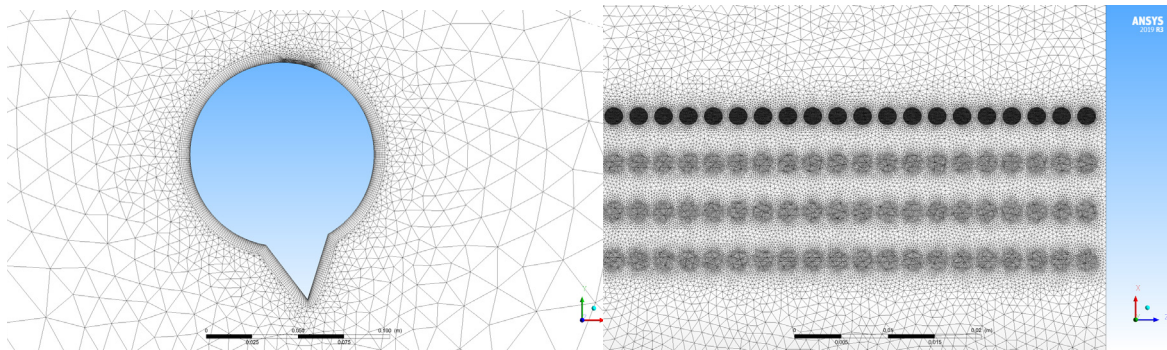
	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>
<b>ε<sub>1,2</sub></b>	-0.028	0.019
<b>ε<sub>2,3</sub></b>	-0.014	-0.008
<b>R<sub>1</sub></b>	0.500	-0.410



**Şekil 3.5.** Ağdan bağımsızlık analizi yakınsama grafiği

Yapılan ağdan bağımsızlık çalışması sonucunda, kaldırma kuvvetinin monoton olarak yakınsadığı görülmüştür. Direnç kuvvetinde ise salınımlı yakınsama elde edilmiştir. Çalışmanın ana hedefi kaldırma kuvveti üretme potansiyellerini değerlendirmek olduğundan mevcut aşamada elde edilen sonuçlara göre, 3 numaralı ağ yapısı kullanılarak flap ve emme alanının açılma konumunun ve emme katsayısının direnç, kaldırma kuvveti ve basınç dağılımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analizler ANSYS-CFX yazılımında zamana bağlı (transient) ve SST Gamma-Theta türbülans modeli ile icra edilmiştir. Deneyde belirtilen  $6 \times 10^4$  Reynolds sayısına göre analizler 9 m/s sürat için gerçekleştirilmiştir.

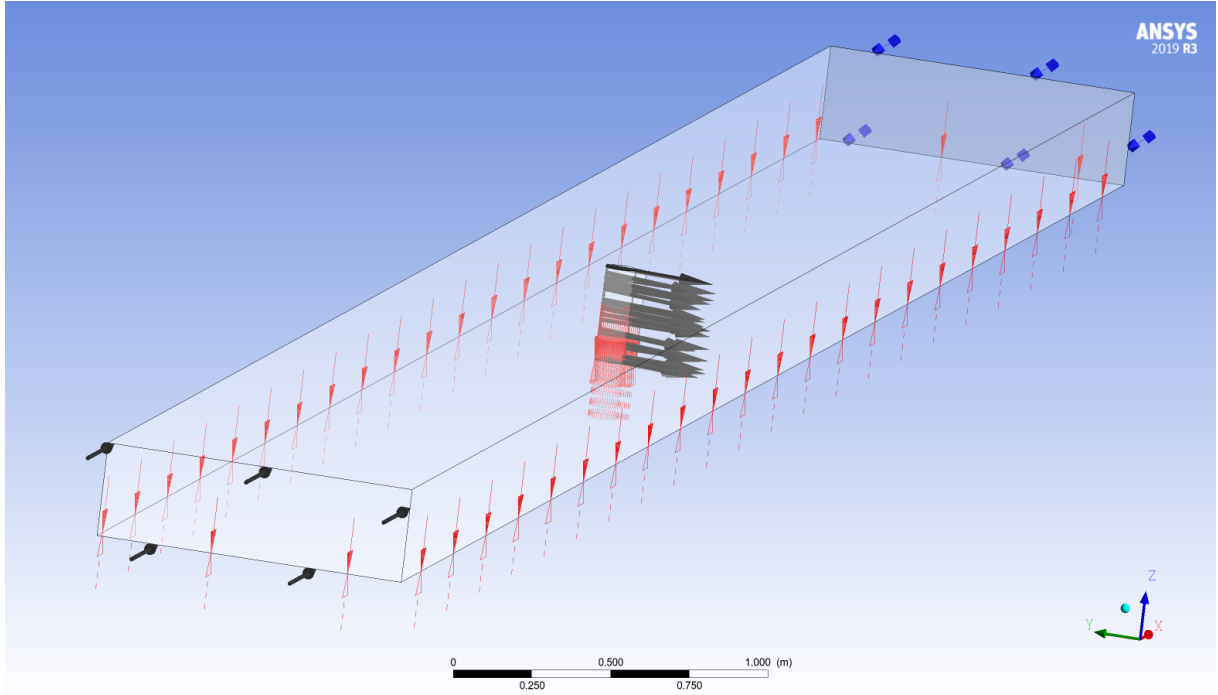
Oluşturulan katı model, ağ yapısını oluşturmak için ANSYS Mesher yazılımına aktarılmıştır. Ağ yapısından bağımsızlık analizinde farklı olarak emme yüzey alanındaki ağ yapısı daha küçük elemanlarla oluşturulmuştur (Şekil 3.6.). Turbo-yelken etrafında sınır tabaka ağ yapısı uygulanmıştır. Ağ yapısında toplam 9,378,091 eleman bulunmaktadır.



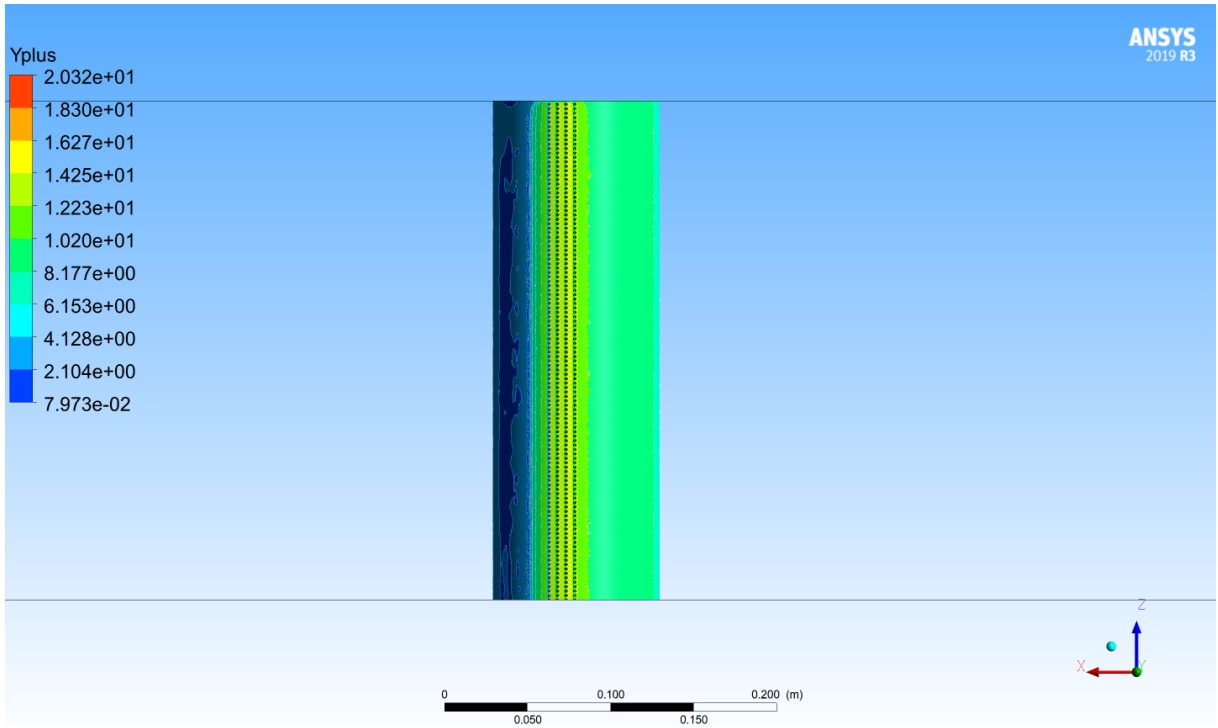
**Şekil 3.6.** Kanat üzerinde oluşturulan sınır tabaka ağ yapısı

Analiz sınır şartları Şekil 3.7’de verilmektedir. Simetrik akış dolayısıyla yarım model kullanılmış olup, toplam kanat açıklığının ortasında bulunan düzlemde simetri koşulu uygulanmıştır. Turbo-yelken emiş deliklerinde, istenilen emme katsayısını sağlayacak akış hızı tespit edilip başlangıç koşulu olarak tanımlanmıştır.

Analiz sonucu elde edilen Yplus dağılımı Şekil 3.8’de gösterilmektedir. Kanat yüzeyinde genel olarak 10 ve altında değerler elde edildiği görülmüştür.



Şekil 3.7. Analiz sınır koşulları

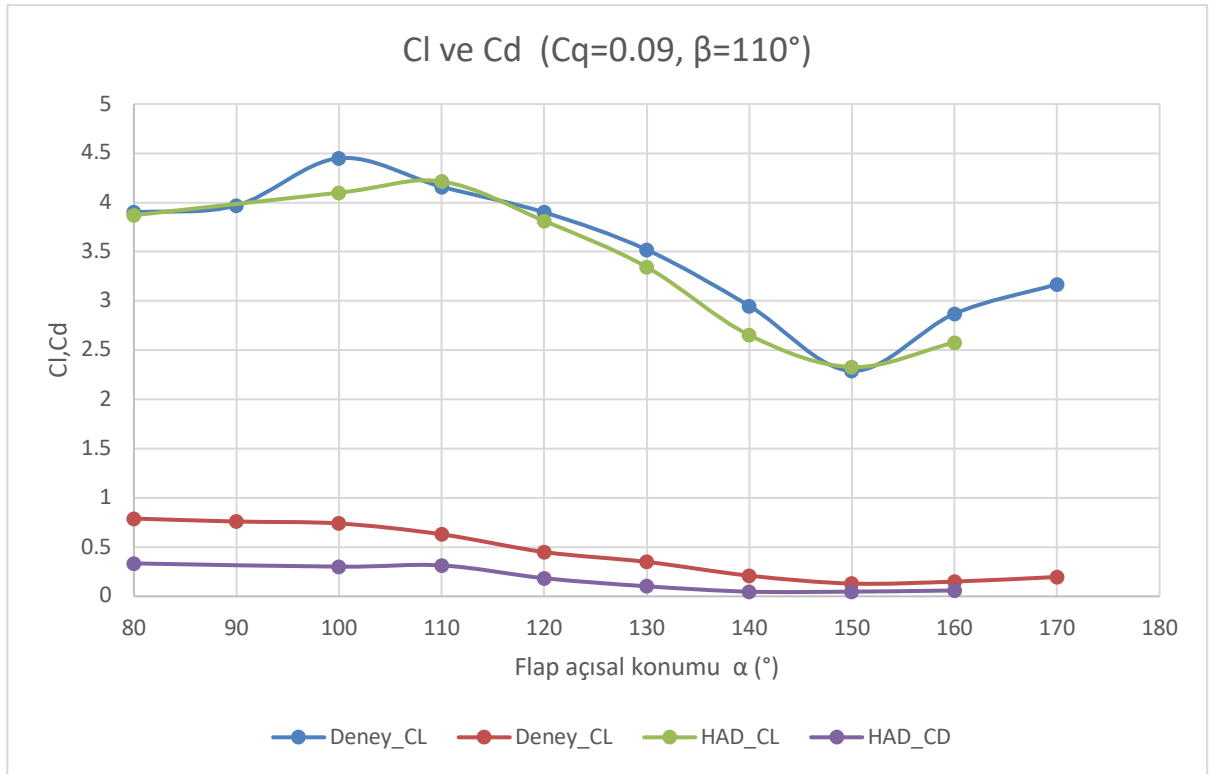


Şekil 3.8. Tubroyelken model üzerindeki y+ dağılımı

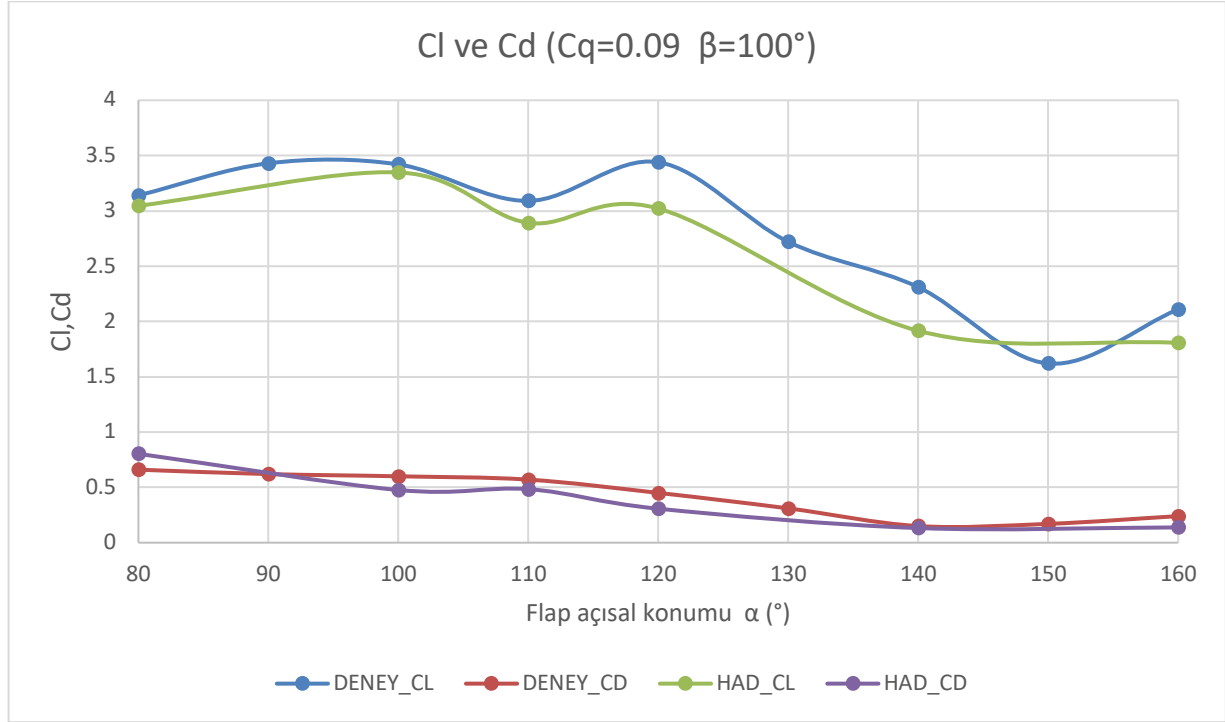
Emme katsayısı 0.09 ve iki farklı emme alanı açısıl konumu  $100^\circ$  ve  $110^\circ$  için farklı flap açısıl konumlarında elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 3.9 ve Şekil 3.10 ile gösterilmiştir. Emme katsayısı 0.2 için elde edilen sonuçlar Şekil 3.11 ile gösterilmiştir. Her iki emme katsayısında elde edilen hesaplamalı

kaldırma kuvveti değerlerinin deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmektedir. Kaldırma kuvveti değerleri ve kuvvetin değişim eğiliminin deneysel ve hesaplamalı yaklaşımlarda benzer şekilde davrandığı değerlendirilmektedir. Flap açıl konumu ve emme alanı açıl konumunun değişiminin kaldırma kuvvetine etkisi mevcut hesaplamalı yaklaşım ile hassas bir şekilde tespit edilebilmektedir.

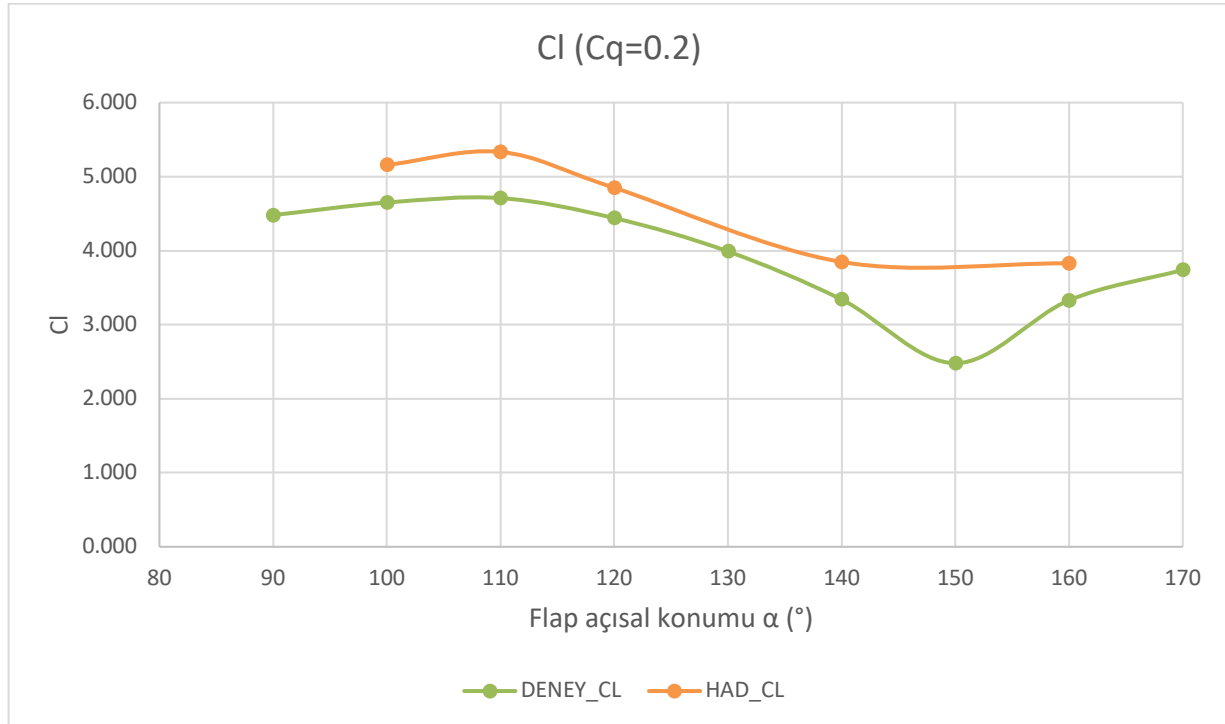
Direnç değerleri karşılaştırıldığında, belirli koşullarda deneysel sonuçlar ile hesaplamalı sonuçların benzer olduğu ancak genel olarak mertebelerin uyumlu olmadığı görülmektedir. Silindirik yapılar için direnç değerlerinin RANS metodu ile tahmin edilmesi kendi içerisinde belirli zorluklar barındırmakta olduğundan, mevcut metodoloji ile silindirik yapılar özelinde ağ yapısı ve türbülans modelleme yaklaşımının değiştirilmesinin etkilerinin kısıtlı olacağı değerlendirilmiştir. Turbo-yelken özelinde, silindirik yapıdan farklı bir kesit kullanılması durumunda da deneysel veri yaratılarak, ağdan bağımsızlık ve doğrulama çalışmasının gözden geçirilmesi faydalı olacaktır.



Şekil 3.9. Deneysel ve hesaplamalı kaldırma ve direnç kuvvet katsayıları değerleri ( $Cq=0.09$  ve  $\beta=110^\circ$ )



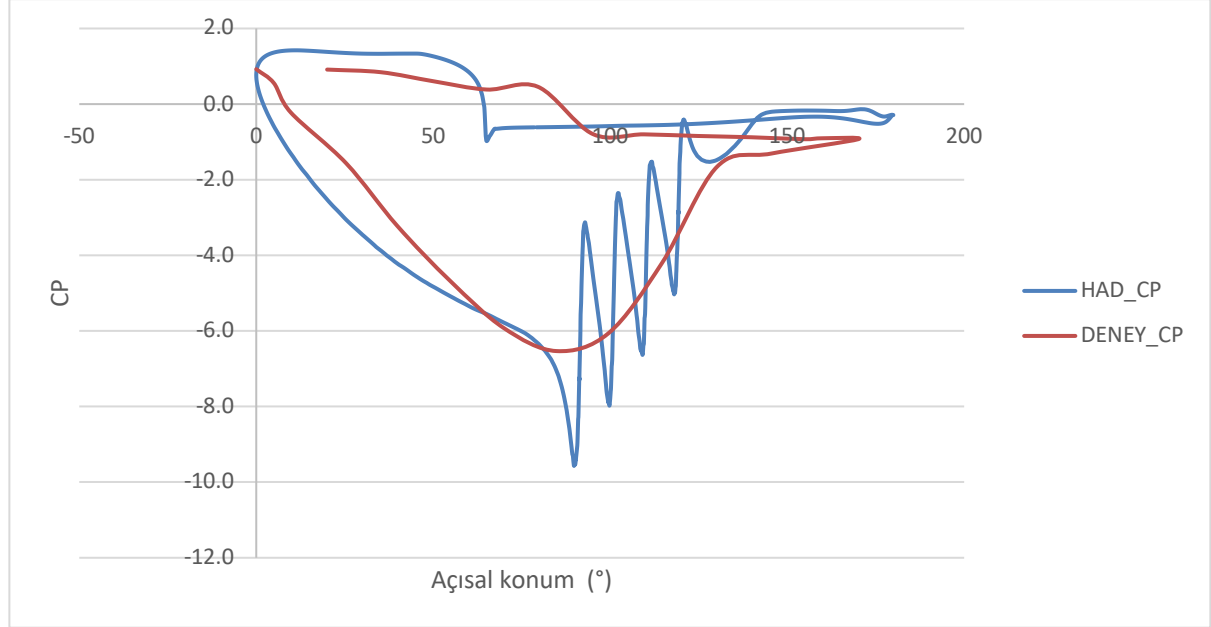
**Şekil 3.10.** Deneysel ve hesaplamalı kaldırma ve direnç kuvvet katsayıları değerleri ( $C_q=0.09$  ve  $\beta=100^\circ$ )



**Şekil 3.11.** Deneysel ve hesaplamalı kaldırma ve direnç kuvvet katsayıları değerleri ( $C_q=0.2$  ve  $\beta=110^\circ$ )

Basınç dağılımları,  $110^\circ$  flap açısı ve  $110^\circ$  emme alanı açısı için karşılaştırılmıştır (Şekil 3.12.). Kanat önder kenarında bulunan durma noktasında (stagnation point) basınç mertebeleri her iki yaklaşımda eşittir. Pozitif basınç bölgesinde, akışın flap öncesinde hızlanması dolayısıyla görülen ani basınç değişimi deneyde yaklaşık  $80^\circ$  açıl konumunda oluşmakta olup, hesaplamalı çalışmada  $65^\circ$  mertebesinde. Basınç katsayısı eğrilerinin altında kalan alanlar birbirine oldukça yakın olduğundan benzer kaldırma kuvveti değerleri ortaya çıkmaktadır. Hesaplamalı çalışmada negatif basınç alanında

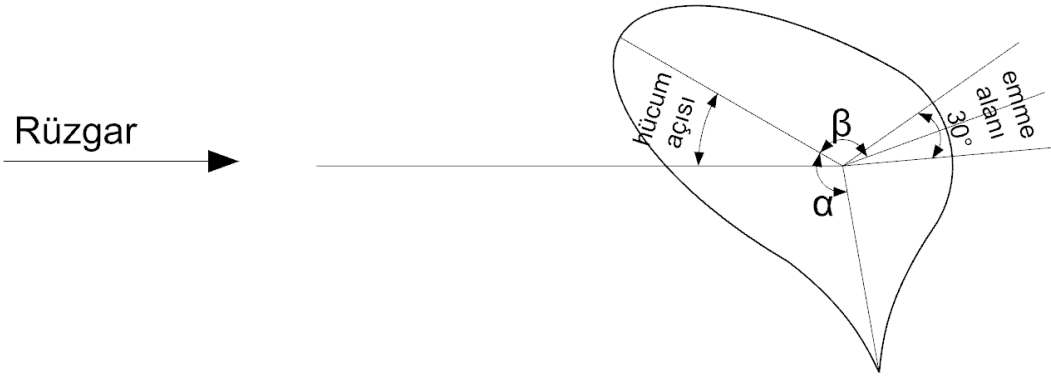
deliklerden de basınç değerleri alındığı için salınım görülmekte olup deneysel düzende bu durum oluşmadığından daha düzgün bir basınç dağılımı görülmektedir.



**Şekil 3.12.** Flap açısı 110° ve emme alanı açısı 110° için basınç dağılım karşılaştırması

#### 4. Tasarım Parametrelerinin Aerodinamik Performansa Etkileri

Bu bölümde flap ve emme alanı açısal konumları değiştirilerek farklı oryantasyonlarda analizler icra edilmiştir. Bu konu üzerinde literatürde birkaç çalışma bulunmaktadır (Low, Luo, & Winoto, 1991) (Hcini, Abidi, Kamoun, & Afungchui, 2017) (Yihuai, Taiyou, & Yongli, 2017). Bu bölümde amaç, farklı flap ve emme alanı açısal konumları denenmesi ile en iyi kaldırma kuvvetini elde etmektir. Analiz edilecek modelde, doğrulama çalışmasından farklı olarak ileriye doğru eliptik kesit yapısı ve kavisli üçgen flap kesit kullanılmıştır, emme alanı 30° bir alanı taramaktadır ve modelin hücum açısı 30°'dir. Flap ve emme alanı açısal konumu 90°-130° arasında her 10° için modellenmiştir. Parametrize edilen model Şekil 3.13 ile gösterilmiştir. Şekilde gösterilen modelde flap ve emme alanı açısal konumu 90°'dir. Flap açısal konumu  $\beta$  ile ve emme alanı konumu  $\alpha$  ile gösterilmektedir.  $\alpha$  ve  $\beta$  açıları 10° aralıklarla değiştirilerek farklı kombinasyonlar oluşturulmuştur. Toplamda 36 farklı modelin analizi icra edilmiş olup oluşturulan test matrisi Tablo 3.4 ile gösterilmiştir.

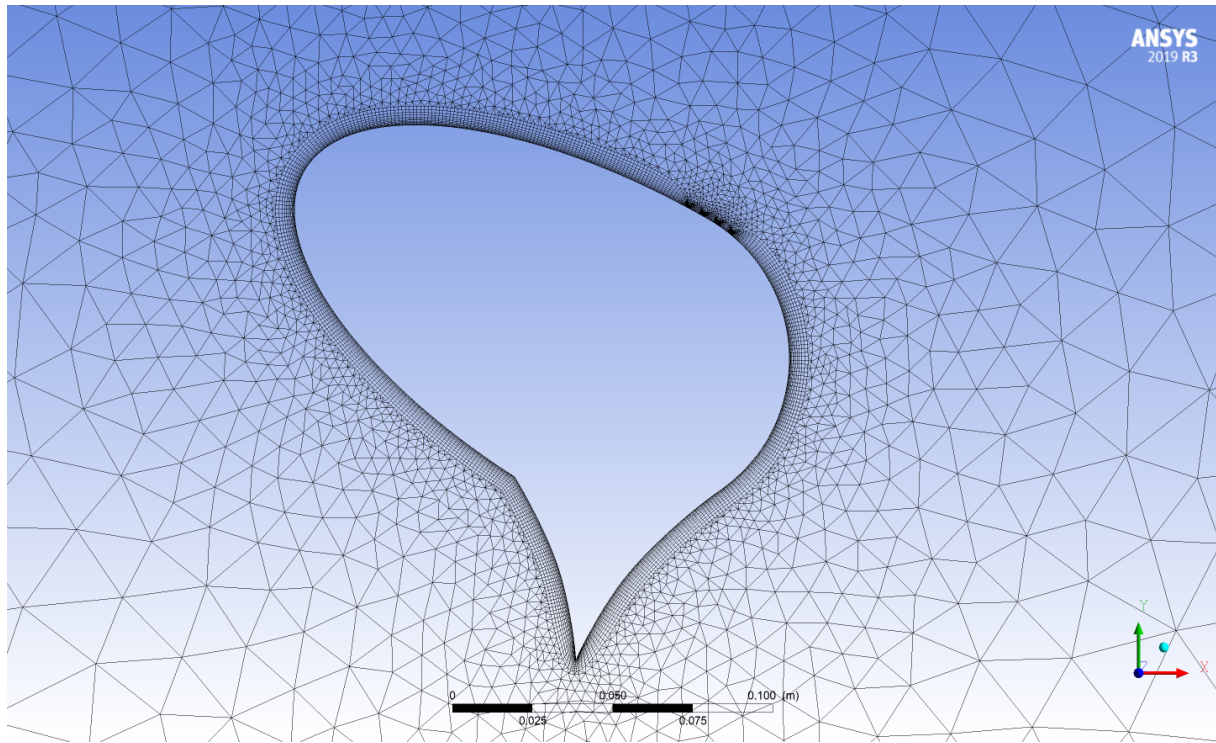


**Şekil 3.13.** Değişik flap ve emme alanı açıları için model tanımı

**Tablo 3.4.** Farklı flap ve emme alanı açılal konumları için oluşturulan test matrisi

Parametreler					
$\beta$ (°)	90	100	110	120	130
$\alpha$ (°)	90	100	110	120	130

Model, doğrulama çalışmasında kullanılanlar ile aynı çözüm hacmi ve çözüm ağı boyutlarına sahiptir. Elde edilen çözüm ağı Şekil 3.14 ile gösterilmiştir.



**Şekil 3.14** Farklı flap ve emme alanı açılal konumunda gerçekleştirilecek analizler için oluşturulan çözüm ağı

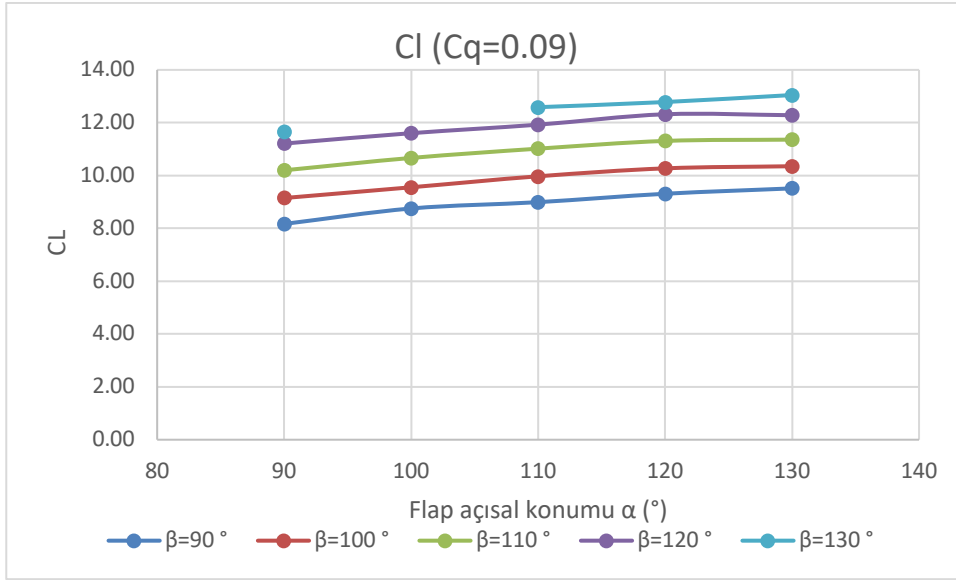
Analizler emme katsayısı 0.09 ve rüzgar hızı 9 m/s için zamana bağımlı (transient) olarak gerçekleştirilmiştir. 0.01 sn zaman adımı ile 4 sn boyunca çalıştırılan analizlerden elde edilen sonuçlar

Tablo 3.5'de gösterilmiştir. Emme alanı açısız konumunun farklı flap açısız konumuna göre katsayılar üzerindeki etkisi Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da verilen grafiklerle gösterilmiştir. Genel olarak bakıldığında emme alanı açısız konumunun izler kenara doğru ötelenmesi ile beraber kaldırma kuvveti artmakta ve direnç kuvveti azalmaktadır. Flap açısının artımı ile kaldırma kuvveti de artmakta olup, aynı durum direnç kuvvetinde gözlenmemiştir. Flap etkisi için yapılacak genel yorum, tüm durumlarda flap açısız konumu 110° iken en yüksek direnç elde edilmiştir. Yüksek flap açısız konumlarında elde edilen direnç değerleri daha düşüktür. Emme alanı açısız konumu 130° için flap açısız konumu 100° analizde stol gözlenmiştir. Sonuçlar göz önüne alındığında en yüksek kaldırma kuvveti flap açısız konumu ve dinamik emme açısız konumu 130° iken elde edilmiştir.

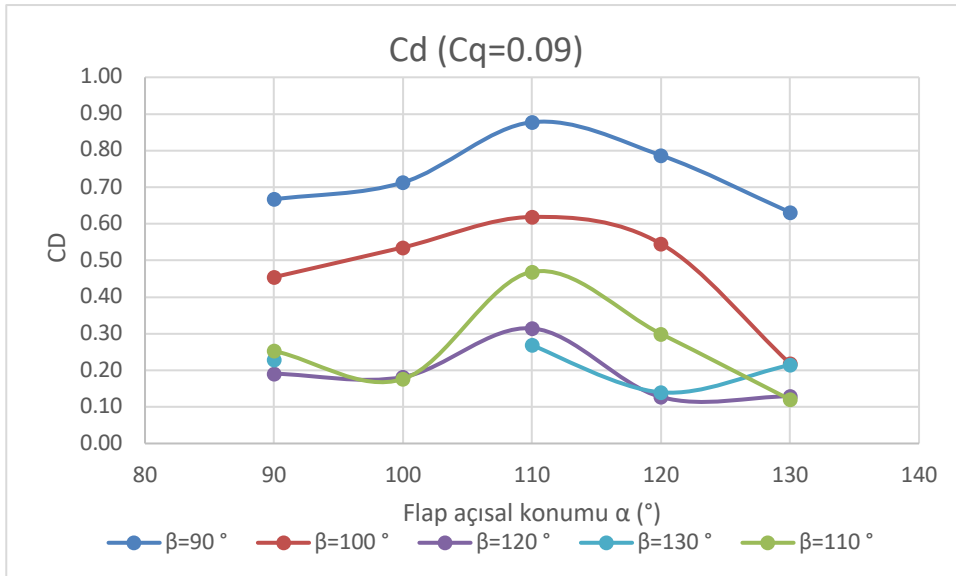
**Tablo 3.5.** Farklı flap ve emme alanı açısız konumunda gerçekleştirilen analizlerde elde edilen sonuçlar

$\beta$ (°)	$\alpha$ (°)	L (N)	$C_L$	D (N)	$C_D$
<b>90</b>	90	3.92	8.17	0.32	0.67
	100	4.20	8.75	0.34	0.71
	110	4.32	8.99	0.42	0.88
	120	4.47	9.31	0.38	0.79
	130	4.57	9.51	0.30	0.63
<b>100</b>	90	4.39	9.15	0.22	0.45
	100	4.59	9.56	0.26	0.54
	110	4.79	9.97	0.30	0.62
	120	4.93	10.27	0.26	0.55
	130	4.97	10.35	0.10	0.22
<b>110</b>	90	4.89	10.20	0.12	0.25
	100	5.12	10.67	0.08	0.18
	110	5.29	11.02	0.23	0.47
	120	5.43	11.31	0.14	0.30
	130	5.45	11.36	0.06	0.12
<b>120</b>	90	5.38	11.21	0.09	0.19
	100	5.57	11.60	0.09	0.18
	110	5.72	11.93	0.15	0.31
	120	5.91	12.32	0.06	0.13
	130	5.90	12.28	0.06	0.13
<b>130</b>	90	5.60	11.66	0.11	0.23
	100	STOL	STOL	STOL	STOL
	110	6.04	12.59	0.13	0.27
	120	6.13	12.78	0.07	0.14
	130	6.26	13.05	0.10	0.21



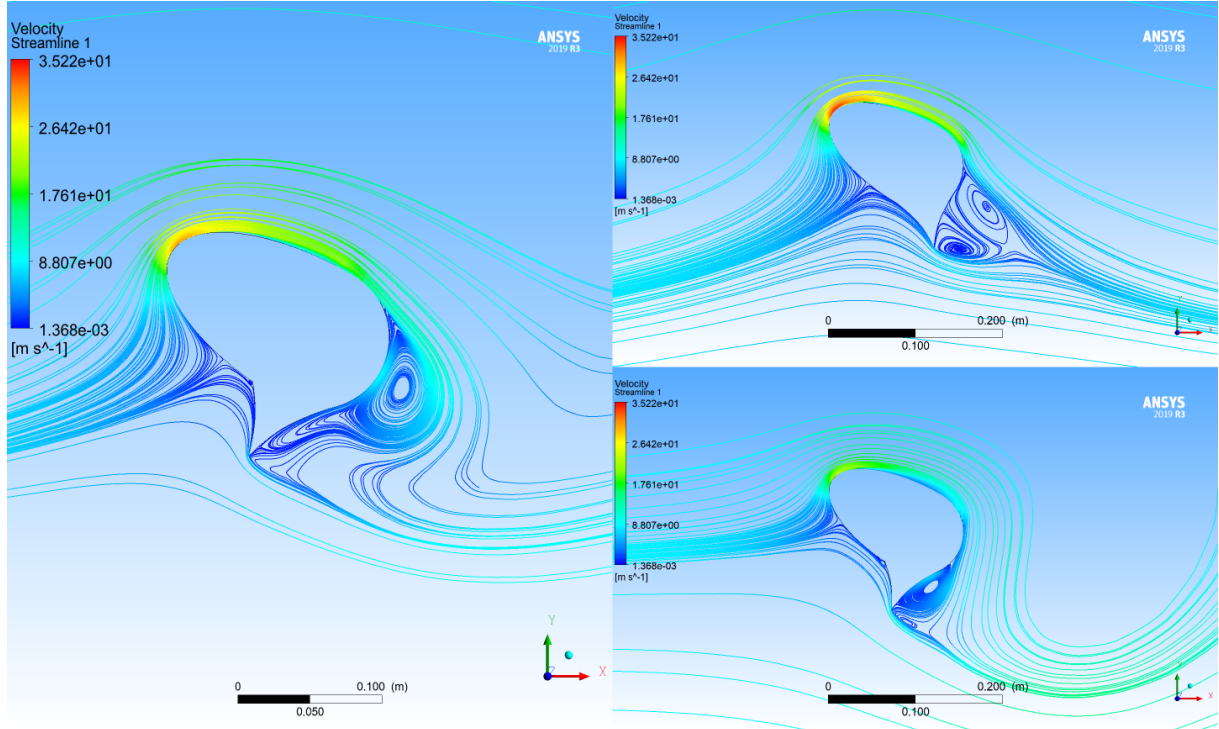


**Şekil 3.15.** Farklı flap ve emme açılal konumu için elde edilen kaldırma kuvvet katsayıları



**Şekil 3.16.** Farklı flap ve emme açılal konumu için elde edilen direnç kuvvet katsayıları

Stol durumu, en yüksek ve en düşük kaldırma kuvveti elde edilen durumlar, turbo-yelken etrafındaki akım hatları görselleştirilerek Şekil 3.17’de karşılaştırılmıştır. Flap açısının doğru konumlandırılması durumunda, akımın düzgün bir şekilde yönlendirilebildiği ve girdap yapısının kontrol edilebildiği görülmüştür. Yüksek flap açılarında, bu kontrol mekanizması verimli bir şekilde çalışmaktadır. Flap ve emme açısının konumuna göre durma noktası pozisyonu da değişim göstermektedir. Durma noktasının flap bölgesine yaklaştığı durumlarda, negatif basınç tarafında ilerleyen akışın daha büyük bir eğrilik ile karşılaşması dolayısıyla daha fazla hızlanma oluşmakta, bu durum da elde edilen kaldırma kuvvetini artırmaktadır.



**Şekil 3.17.** 3 farklı durum için turbo-yelken etrafındaki akım hatlarının karşılaştırılması (sol: en düşük kaldırma kuvveti elde edilen durum; sağ üst: en yüksek kaldırma kuvveti elde edilen durum; sağ alt stol durumu)

## 5. Sonuç

Yapılan çalışmada, gemilerde rüzgâr destekli sevk sistemi olarak kullanılabilir sınır tabaka emme tekniği ile yüksek kaldırma kuvveti üretebilen bir kanat profili için (turbo-yelken) hesaplama analiz gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, ağdan bağımsızlık çalışması yapılarak ağ yapısında kullanılan hücre boyutlarının sonuçlara etkisi incelenmiştir. Takiben, silindirik kesite sahip bir kanat için yapılmış olan deneysel çalışma, RANS metodu ile sayısal olarak modellenmiş ve yöntemin incelenecek probleme uygunluğu doğrulanmıştır. Oval bir kanat yapısı için farklı flap açıları ve emme alanı konumlarının aerodinamik kuvvetlere etkisi incelenmiştir. Flap açısının artırılması durumunda tüm emme alanı açılma konumları için üretilen kaldırma kuvvetinin de arttığı görülmüştür. Sabit flap açısında, emme alanı açısının artırılması durumunda da kaldırma kuvveti artmaktadır. Flap açısının 110° mertebesinde bulunması durumunda direnç kuvvetinin yükseldiği, daha düşük ve yüksek flap açılarında bu etkinin azaldığı görülmüştür.

Mevcut çalışmada kaldırma kuvveti katsayısı 13 mertebesine kadar çıkarılabilmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, farklı tasarım parametrelerinin performansa etkisinin incelenmesi ile kaldırma kuvveti katsayısının daha da artırılabilirliği değerlendirilmektedir. Bu durumda, dönen parçaların az olması ve düşük enerji tüketimi ile turbo-yelken teknolojisinin rüzgâr destekli sevk sistemi alternatifleri arasında oldukça avantajlı bir konuma geleceği öngörülebilmektedir. Bu tarz rekabetçi sistemlerin mevcut gemiler veya yeni inşalarda kullanılması durumunda, enerji verimliliği indekslerinde daha düşük değerler elde edilebilecektir. İndeks değerlerinde elde edilecek iyileşme gemi tipine, taşınan yük miktarına, gemi hızına ve gemi kurulu gücüne göre değişmekte olup her bir koşul için ayrı bir şekilde değerlendirilmelidir.

RANS metodu ile turbo-yelken tarafından üretilecek kaldırma kuvvetinin hassas bir şekilde tahmin edilebildiği görülmüştür. Silindirik kesite sahip yelken için direnç karakteristiği mevcut metodoloji ile

yeteri kadar hassas bir şekilde tespit edilememektedir. Bu sonucun silindirik yapılar haricinde kesite sahip turbo-yelkenlerdeki geçerliliğinin detaylı bir şekilde irdelenebilmesi için silindik olmayan kesite sahip turbo-yelken ile deneysel çalışmalar icra edilerek doğrulama verisi üretilmesi gereklidir.

Turbo-yelken teknolojisinin gemi üzerindeki performansının anlaşılabilmesi ve gerçekçi bir şekilde olası yakıt tüketimi azaltım mertebelerinin belirlenebilmesi için gemi üzerindeki aerodinamik koşullarda performans tahminleri yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda, atmosferik sınır tabaka etkileri, rüzgâr açısının düşeyde değişimi (twist), gemi üst binası-turbo-yelken etkileşimleri ile birden fazla turbo-yelken kullanılması durumunda turbo-yelkenler arası etkileşimlerin hesaba katılarak daha detaylı analiz modellerinin oluşturulması gerekmektedir.

Rüzgâr destekli sevk durumunda oluşan hidrodinamik koşulların, olası yakıt tüketimi değişimlerinin öngörülmesi aşamasında hesaba katılması gerekmektedir. Meyil ve sürüklenme açısı altında tekne direncinin değişimi, teknenin yanal kuvvet üretebilme kabiliyeti, pervane yükünün değişmesi dolayısıyla oluşacak genel sevk verimi değişimlerinin hız tahminlerinde hesaba katılabilmesi için bu hususlarda bilgi birikiminin artırılması gerekmektedir.

Mevcut gemilere yapılacak tadilatlar (retrofit) ile eklenecek rüzgâr destekleri sevk sistemleri haricinde, yeni gemi tasarım süreçlerinde meyil ve sürüklenme açısı altındaki performansın incelenerek bu koşullarda yapılacak incelemelerin gemi tasarım sürecine katılması gerekmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda pratik metodolojilerin geliştirilmesi ile tasarımcıların meyil ve sürüklenme açısı altında gemi hidrodinamik performansını inceleyebileceği araçların geliştirilmesinin faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

## 6. Teşekkür

Bu çalışma, “RÜZGAR DESTEKLİ GEMİ SEVK SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ, ANALİZİ VE PROTOTİP DOĞRULAMASI” projesi içeriğinde gerçekleştirilmiş olup 1501 Sanayi Ar-Ge Destek Programı kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

## 7. Referanslar

ANSYS (2013). *Ansys CFX Solver Modelling Guide*. Canonsburg: ANSYS, Inc.

Bockmann, E., Steen, S. (2011). Wind turbine Propulsion of Ships. Second International Symposium on Marine Propulsors (SMP 11). Hamburg, Almanya, 17-18 Haziran 2011.

Charrier, B., Constans, J., Cousteau, J., Daif, A., Malavard, L., Quinio, J. (1985). Foundation Cousteau and Windship Propulsion 1980-1985 System Cousteau Pechiney. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (20), 39-60.

Czermanski, E., Jastrzabek, A.O., Spangenberg E.F., Kozłowski, Ł., Adamowicz, M., Jankiewicz, J., Cirella, G.(2022) Implementation of the Energy Efficiency Existing Ship Index: An important but costly step towards ocean protection. *Marine Policy* (145).

[En.wikipedia.org/wiki/Alcyone\\_%281985\\_ship%29](https://en.wikipedia.org/wiki/Alcyone_%281985_ship%29), [Erişim 18.11.2022].

[en.wikipedia.org/wiki/USA\\_17](https://en.wikipedia.org/wiki/USA_17), [Erişim 18.11.2022].

[fr.cousteau.org/turbovoile.php](https://fr.cousteau.org/turbovoile.php), [Erişim 18.11.2022].

Guerra, O., Liberge, E., Hamdouni, A. (2016). Numerical Simulation of the Turbulent Flow Around an Oval-Sail. *Journal of Applied Fluid Mechanics* (9) 2009-2023.

Hcini, C., Abidi, E., Kamoun, B., Afungchui, D. (2017). A Turbosail Profile Analysis Code Based on the Panel Method. *Energy*, (118), 147-155.

<https://www.sail-world.com/news/235003/DynaRig-by-Southern-Spars-on-two-superyachts>, [Erişim 18.11.2022].

IMO (2011). IMO and the Environment.

<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Default.aspx> [Erişim 03.12.2022].

IMO (2012). IMO Train the Trainer Course, Module 2: Ship Energy Efficiency Regulation and Related Guidelines. Londra. Ocak 2016.

IMO (2022a). Rules on ship carbon intensity and rating system enter into force. [Rules on ship carbon intensity and rating system enter into force \(imo.org\)](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Default.aspx). [Erişim 03.12.2022].

IMO (2022b). MEPC 78/1/Add.1 Annex 12: 2022 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI). 10 Haziran 2022.

ITTC (2017). Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures, 7.5-0.3-01-01. <https://www.ittc.info/media/8153/75-03-01-01.pdf> [Erişim 29.07.2022].

Lindstad, E., Stokke, T., Alteskjær, A., Borgen, H., Sandaas, I. (2022) Ship of the future – A slender dry-bulker with wind assisted propulsion. *Marine Transport Research* (3).

[loc.gov/item/2014717912/](https://www.loc.gov/item/2014717912/), [Erişim 18.11.2022].

Low, H. T., Luo, S. C., Winoto, S. H. (1991). Flow Past a Wind-Assisted Ship Propulsion Device. *Ocean Engn*, (18), 555-565.

Saydam, A.Z., Küçüksu, G. N., İnel, M., Gökçay, S. (2022). Investigation of the Influence of Wind-Assisted Propulsion Devices on Hull Design. *Sustainable Development and Innovations in Marine Technologies*, Taylor and Francis, London.

Yihuai, H., Taiyou, W., Yongli, L. (2017). Numerical Simulation and Kinetic Analysis of Turbine Sail. *Journal of Energy and Power Engineering*, (11), 127-134.

## Gemilerde Kullanılan Termik Yağ Sisteminin Performans Analizleri

Asım Sinan Karakurt<sup>1</sup>, Burak Başaran<sup>1,2</sup>, Engin Ziya Çubukçu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Seft Gemi İnşaa Sanayi ve Mühendislik, İstanbul, Türkiye

<sup>3</sup> Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup> (sorumlu yazar), [asinan@yildiz.edu.tr](mailto:asinan@yildiz.edu.tr), ORCID: 0000-0002-6205-9089

<sup>2</sup> [burak.basaran@std.yildiz.edu.tr](mailto:burak.basaran@std.yildiz.edu.tr), 0000-0001-8332-1421

<sup>3</sup> [ziya.cubukcu@std.yildiz.edu.tr](mailto:ziya.cubukcu@std.yildiz.edu.tr), 0000-0003-3897-1489

### ÖZET

Enerji verimliliği günümüzde giderek önem kazanmaktadır. Enerji verimliliğinin artırılması ile yakıt tüketimi ve çevreye zararlı olan etkileri azaltmak mümkün olmaktadır. Ayrıca yakıt fiyatlarının önümüzdeki yıllarda artan trend göstermesi öngörülmektedir. Gemilerde uygulanan enerji verimliliği uygulamalarında enerji kaybının yaklaşık %25'ini oluşturan ekzoz gazından enerji kazanım yöntemleri öne çıkmaktadır. Gemilerde atık egzoz baca gazı enerjisini geri kazanmak için ekonomizer kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, ekonomizer ana kazanın ön ısıtıcısı olarak çalışırken, termik yağ sisteminin performans, maliyet ve çevresel etki analizlerini gerçekleştirmektir. Bu kapsamda ana makinesi 4350 kW, kazanı 1500 kW ve ekonomizeri 340 kW olan bir gemi ele alınmıştır. Sonuç olarak, incelenen sistemde, termik yağ olarak Syltherm XLT ve yakıt olarak da VLSFO'nun kullanılması ile hem yakıt maliyeti açısından tasarrufun sağlandığı hem de SO<sub>x</sub> salımlarının azaldığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji geri kazanımı, termal yağ, termik sistem

**Makale geçmişi:** Geliş 27/11/2022 – Kabul 28/12/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1210117>

# Performance Analyses of Marine Thermal Oil System

Asım Sinan Karakurt<sup>1</sup>, Burak Başaran<sup>1,2</sup>, Engin Ziya Çubukçu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Naval Architecture and Maritime Faculty, Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Shipbuilding Endustri and Engineering, İstanbul, Türkiye

<sup>3</sup> Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Naval Architecture and Maritime Faculty, Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup>(corresponding author), [asinan@yildiz.edu.tr](mailto:asinan@yildiz.edu.tr), ORCID: 0000-0002-6205-9089

<sup>2</sup> [burak.basaran@std.yildiz.edu.tr](mailto:burak.basaran@std.yildiz.edu.tr), 0000-0001-8332-1421

<sup>3</sup> [ziya.cubukcu@std.yildiz.edu.tr](mailto:ziya.cubukcu@std.yildiz.edu.tr), 0000-0003-3897-1489

## ABSTRACT

Energy efficiency is getting more and more important nowadays. By increasing energy efficiency, it is possible to reduce fuel consumption and harmful effects on the environment. In addition, fuel prices are expected to show an increasing trend in the coming years. In energy efficiency applications applied on ships, energy recovery methods from the exhaust gas, which constitutes approximately 25% of energy loss, come to the fore. Economizers are used to recovering the waste exhaust flue gas energy in ships. The aim of this study is to perform performance, cost, and environmental impact analyses of the hot oil system while the economizer is working as the preheater of the main boiler. In this context, a ship with the main engine (4350 kW), boiler (1500 kW) and economizer (340 kW) is considered. As a result, it has been observed that the use of Syltherm XLT as thermal oil and VLSFO as fuel in the examined system provides both savings in terms of fuel costs and reduced SOX emissions.

**Keywords:** Energy recovery, thermal oil, thermal system

**Article history:** Received 27/11/2022 – Accepted 28/12/2022

## 1. Giriş

Dünyada üretimin artmasına bağlı olarak fosil yakıtlar kullanan içten yanmalı motorların kullanılması, küresel ısınmayı olumsuz etkilediği için, ekolojik olarak büyük bir tehlike oluşturmaktadır. CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyonları bu tehlikenin en önemli unsurları olarak görülmektedir (El-Taybany vd., 2019). Dünya ticaretinin %90'ından fazlasının deniz taşımacılığı ile yapıldığı ve CO<sub>2</sub> salımının yaklaşık olarak %3'ünün deniz taşımacılığı endüstrisinden kaynaklandığı bilinmektedir (Saraçoğlu vd., 2013). Dünya gemi taşımacılık filosunun yarısından fazlası limanlarda çeyreği de sahile yakın olmak üzere çok büyük bir kısmının kıyı bölgelerinde ve yakını yerlerde bulunmaktadır (Kiliç, 2009). Gemi kaynaklı emisyonlar özellikle liman bölgelerini ve kıyı kesimlerini hem insan sağlığı hem de ekolojik denge yönlerinden etkilemekte ve hatta kıtalar arasında olumsuz bir etkileşime sebep olabilmektedir (Aygül & Baştuğ, 2020). Gemiler için de enerji verimliliği ve emisyon salımı kavramları gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Şu anki veriler ile 2050 yılı için, atmosferde yer alan karbon dioksit yoğunluğu 500 ppm civarı ve hatta üzerinde değerlere ulaşacağı ve bu miktarların da küresel ısınmayı arttıracığı öngörülmektedir (Bogdanowicz & Kniaziewicz, 2020). Buradan hareketle, Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından 2050 yılı hedefleri kapsamında, iklim değişikliği ile mücadele amacı ile hem denizcilik kaynaklı sera gazı emisyonlarının 2018 yılına oranla yarıya düşürülmesi hem de karbon yoğunluğunun 2008 yılına göre %70 azaltılması hedeflenmektedir (IMO, 2018).

Dünyada enerji fiyatlarının önümüzdeki yıllarda daha da artması öngörülmektedir ve yakıt fiyatlarındaki bu artış deniz yolu taşımacılığında da etkisini göstermektedir (Kiliç, 2009). Artan yakıt fiyatları da taşınan ürünlerin nakliye ücretlerinin artmasına neden olmaktadır. Gemilerdeki işletme maliyetleri hesaplandığında kullanılan yakıt sarfiyatının bu konudaki en önemli masraf kalemi olduğu görülmektedir. Gemilerde kullanılan makinelerin termik verimleri, teknolojisine göre, %50'lere ulaşabilmekte ve sisteme giren enerjinin geriye kalan büyük çoğunluğu da kullanılabilir ve kullanılmayan enerji olarak sistem kayıpları, soğutma suyu ve egzoz gazı şeklinde atılmaktadır (Dzida, 2009). Atılan bu enerjinin kullanılabilir kısmının geri kazanılması enerji verimliliğini artırarak hem maliyetlerin hem de emisyonların azaltılmasına olumlu katkı sağlayacaktır. Makinenin verimi artırılması yanında gemide kullanılan diğer sistemlerde atık ısı geri kazanım yöntemleri kullanımı ile yakıt tasarrufu sağlanması da mümkündür. Kargo bölümü için ısıtıcı sistemlerin kullanıldığı kimyasal tankerlerde işletme maliyetleri kuru yük gemilerinden daha fazladır. Örnek olarak; 5000 DWT kimyasal tankerin günlük işletme maliyeti aynı tonajdaki kuru yük gemisinin günlük işletme maliyetinden 371 \$ daha fazladır (Çolak, 2015).

Literatürde, termik sistemlerde atık ısıdan enerji kazanımı üzerine yapılan çalışmalarda çoğunlukla enerji tüketimi, ekonomik etkiler, çevresel etkiler ve verimler gibi kriterler incelenmiştir. Bunların yanında termik sistemlerin iyileştirilmeleri için yapılan çalışmalarda kullanılmak üzere, destekleyici nitelikte sonuçlar da elde edilmiştir. Ma vd. (2012) tarafından bir dizel motorunda atık ısıyı geri kazanmak ve enerji verimliliğini artırmak için kombine bir türbin-egzoz gazı atık ısı geri kazanım sistemi önerilmiştir. Enerji ve ekserji analizleri çerçevesinde farklı basınç ve sıcaklık değerlerinin etkileri incelenmiş ve önerilen sistem için en uygun basınç değeri ile bu değerdeki verim değerleri paylaşılmıştır. Güneş (2013) tarafından yapılan çalışmada gemilerde kullanılan farklı atık ısı geri kazanım yöntemleri ve organik rankine çevrimi sistemlerinin termoeconomik incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde farklı güçlerdeki iki zamanlı motorlarda motor yüklerinde ve dizayn koşullarındaki değişimlerin atık enerji potansiyelleri üzerindeki etkileri incelenerek ne tür bir enerji kazanımı tekniğinin uygulanmasının ekonomik olarak daha uygun olduğunu gösteren analizler yapılmıştır. Güneş ve Karakurt (2015) tarafından iki zamanlı bir dizel motorunda kullanılan çift basınç kademeli bir atık ısı kazanına ait enerji ve ekserji analizleri (değişken motor yükleri, değişken egzoz gazı

sıcaklıkları ve farklı yakıtlar için) gerçekleştirilmiş ve bunların termik verim, yakıt tüketimi ve ekserji verimi üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Akman (2017) tarafından yapılan çalışmada ise bir kimyasal tankere ait ana makinenin atık ısı analizleri gerçekleştirilmiş ve farklı kalitelere ait atık ısı kaynaklarının kullanıldığı bir organik rankine çevrimi modeli incelenmiştir. Organik rankine çevrimi kullanılarak atık ısıların kullanılabilir enerjiye dönüştürülmesi ile toplam termik verim %8 civarında artmış ve buna karşılık da yılda 14,6 g/kWh'a yakın yakıt tasarrufu sağlanmıştır. Köroğlu ve Söğüt (2017) tarafından beş silindirli, iki zamanlı, düşük devirli bir gemi dizel motoru egzoz kazanından sonra yerleştirilen bir organik Rankine çevriminin enerji, ekserji ve ileri ekserji analizleri yapılarak farklı çalışma koşulları altında parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Kökkülünk vd. tarafından (2017) bir dökme yük gemisinde kullanılan 600 kW kapasiteli bir dizel jeneratörün atık ısı potansiyeli farklı yükler, değişken liman süreleri ve farklı çalışma senaryoları baz alınarak analiz edilmiştir. Akman ve Ergin (2019, 2021) tarafından gemilerde, hem organik Rankine çevrimi hem de transkritik organik Rankine çevrimi temelli atık ısı geri kazanım yöntemlerinin, farklı çalışma koşullarında, performans ve emisyon üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Nugroho vd. (2020) tarafından yakıt tanklarının baca kazanı ve yakıt ile çalışan ilave bir kazan yardımıyla ısıtıldığı iki farklı simülasyon için ısı transferi analizi yapılmıştır. Termik yağ olarak Therminol 66 kullanıldığı çalışmada farklı ana makine devirlerindeki ısıtma kapasiteleri belirlenmiştir. Yakıt kazanı ile yapılan ısıtma kapasitesinde baca kazanına göre daha hızlı ısıtma süresine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Başhan ve Kökkülünk (2020) tarafından değişken deniz suyu sıcaklıklarının atık ısı geri kazanım sistemine sahip bir soğutma sisteminin ekserji verimi, yakıt tüketimi ve emisyonlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak, soğutma sisteminde atık ısı geri kazanımının kullanılmasının yakıt tüketimini ve emisyonlarını doğrudan azalttığı görülmüştür. Delibaş ve Kayabaşı (2021) tarafından gemilerde kullanılan farklı türdeki atık ısı geri kazanım yöntemleri için enerji, çevre ve maliyet analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, gemilerde kullanılan termik yağ sisteminin çalışma prensibini aktarmak ve ilgili sisteme ait olan komponentler hakkında bilgi vermek olup aynı zamanda ekonomizer, yakıtlı kazanın ön ısıtıcısı olarak çalışırken, termik yağ sisteminin 7 farklı termik yağ ve 4 farklı yakıt türü için karşılaştırmalı performans, maliyet ve çevresel etki analizlerini gerçekleştirmektir. Bu amaçların yanında, elde edilen sonuçlar doğrultusunda optimum termik yağ ve yakıt seçiminde kullanılmak üzere bir referans oluşturmak ve baca kazanının sisteme etkisini gözlemlektir.

## 2. Termik Yağ Sistemlerinin Çalışma Prensibi ve Termodinamik Modeli

Günümüz endüstrisinde doğrudan ısı transferinin mümkün olmadığı sistemler bulunmaktadır. Aynı zamanda termik yağ ile ısıtma yapılması gereken birçok işlem bulunmaktadır. Isıtılacak malzeme yanıcı olduğunda, ısıtılacak madde termolize neden olabileceğinden ve gerektiğinde yüksek sıcaklıkta eşit ısıtma elde edilme gereksiniminden dolayı termik yağ sistemine gereksinim duyulmaktadır. Bu gibi sistemlerde sistemin çalışma basıncı düşük tutulmak istenildiğinde, termik yağ sistemi tercih edilmektedir. Termik yağ sistemleri korozyon, donma ve kireçlenme riski olmaması, daha düşük sistem basınçlarıyla çalışabilmesi ile güvenlik risklerini asgariye indirmesi, daha fazla enerji verimliliği ile ekonomik tasarruf sağlaması gibi birçok yönden avantajlar sağlamaktadır.

Gemilerde kullanılan sıcaklık isterleri çok yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Bu sıcaklıklara buhar sıcaklığı ile çıkılmak istenirse 240 °C için buhar basıncının yaklaşık 25 bar değerine çıkması gerekmektedir. Buhar kullanarak böyle bir sistem kurmak hem işletmeyi çok zorlaştıracağı gibi hem de çok maliyetli olacaktır. Bu nedenle gemilerde istenilen ısıtma ve soğutma işlemlerinin, özel sıcaklık düzeylerinde yapılabilmesi için termik yağ sistemlerine gereksinim duyulmaktadır (Şekil 1).



Termik yağ sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılan ve bu çalışmada da tercih edilen 7 farklı akışkana ait yoğunluk, alevlenme noktası, ısı genleşme katsayısı, ısı iletkenlik ve çalışma sıcaklık aralığı gibi termofiziksel özellikler Tablo 1’de verilmiştir (“Shell Thermia Oil D”, 2022; SYLTHERM™ XLT, 2022; Therminol Heat Transfer Fluids, 2022; “XCEL THERM® 600”, 2022).

**Tablo 1.** Termik yağların termofiziksel özellikleri

Termal Akışkan	Therminol 72	Therminol 66	Therminol 55	Therminol 59	Shell Thermia D	Syltherm XLT	Xceltherm 600
Yoğunluk (@20 °C) (kg/m <sup>3</sup> )	1079	1008	872	857	885	852	851
Parlama Noktası (ASTM D-92) (°C)	132	184	177	208	252	54	216
Isıl Genleşme Katsayısı (1/°C)	0,00113	0,000819	0,000961	0,000971	0,0008	0,0008	0,00089
Isıl İletkenlik (@200 °C) (W/m*K)	0,118	0,1056	0,1074	0,121	0,134	0,062	0,094
Sıcaklık Aralığı (°C)	-14 - 380	-3 - 345	-28 - 290	-49 - 315	-9 - 320	-100 - 280	-21 - 315
Kritik P (bar)	32,4	24,3	13,2	22,3	-	12,16	15,2
Kritik T (°C)	527	569	512	514	-	327	542
Akma Noktası (°C)	-18	-32	-54	-68	-9	-110	-29
Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı (°C)	603	374	366	372	-	350	349

Çalışmada kullanılan Syltherm XLT ısı transfer yağının çalışma sıcaklığı -100 ile 280 °C aralığındadır. Pompa tarafından baca kazanına aktarılan ısı transfer yağı 200 °C’ye kadar ısıtılmaktadır. Baca kazanı ile atıl olan ana makine egzoz gazının ısı enerjisi ile termik akışkanın ısıtılması sağlanır. Ön ısıtması tamamlanan Syltherm XLT, yakıt ile çalışan kazana girerek 280 °C’ye ısıtılmaktadır. Sıvı yakıt yakılarak kimyasal enerjisinin termik akışkana geçişi sağlanır. Gerekli sıcaklığa ulaşmış termik akışkan, buhar kazanına, tank yıkama suyu ısıtıcısına ve ikincil bir termik sistem olan kargo bölümü ısıtıcısına tercih edilen miktarlarda gönderilir. Buhar kazanında termik yağın ısı enerjisi kazan içerisinde suya aktarılır ve kızgın buhar elde edilir. Tank yıkama suyu ısıtıcısında termik yağın ısı enerjisi kargo yıkama suyunun istenen sıcaklığa ulaşması için kullanılır. İkincil bir termik sistemde ise termik yağın ısı enerjisi, diğer bir termik yağ ısıtılması için kullanılır.

Sistemde yer alan termik elemanların çalışma prensipleri de şu şekildedir. Baca kazanı bu sistemde ön ısıtıcı görevi görmektedir. Baca kazanında ön ısıtması yapılan termik yağ daha sonra sirkülasyon pompaları vasıtasıyla tekrar kazanlara gönderilerek sistemi başlangıç durumuna getirip bir çevrim oluşturur. Degazör tankının sistemdeki görevlerinden biri her ne kadar sistem kapalı çevrim olsa da sistemde yaşanabilecek istenmeyen kaçaıklardan doğan yağ kaybını sisteme tekrar kazandırmak ya da sistemdeki yağın sıcaklığının değişmesiyle oluşan buharın genleşme tankına gönderilmesini sağlamaktır. Sirkülasyon pompaları, degazör tankından gelen yağı tekrar kazana göndermek için kullanılan pompalardır ve girişlerinde filtre ve kesici vana, çıkışlarında ise geri döndürmez kesici vana kullanılmaktadır. Genleşme tankı, sistemdeki yağın ısınması ile hacminin arttığı durumda, borularda basınç artışına veya patlamaya sebebiyet vermemesi için kullanılır. Termik yağ sisteminde yakıtlı kazan, sistemdeki yağın ana ısıtıcısı görevini görmektedir. Kazanın içerisinde bulunan ısıtma kangalları, brülör vasıtasıyla ısıtılır ve kangalların içerisindeki yağın sıcaklığı bu şekilde artırılır. Isıtma kangallarının yüzey alanları, kalınlığı ve malzemesi kazan dizaynında sıcaklık değişim isterlerini karşılayacak şekilde



**Tablo 2.** Sistemdeki komponentlerin denge denklemleri

Komponent	Denge Denklemleri	
Baca Kazanı (bk)	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$	$\dot{Q}_{bk} * \eta_{yanma} = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1 h_1$ $\dot{Q}_{bk} * \eta_{yanma} = \dot{Q}_{termik\_yağ}$
Yakıt Kazanı (yk)	$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$	$\dot{Q}_{yk} = \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_2 h_2$ $\dot{m}_{yakıt} * LHV_{yakıt} * \eta_{yanma} = \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_2 h_2$
Tank Yıkama Isı Değiştiricisi	$\dot{m}_4 + \dot{m}_{12} = \dot{m}_7 + \dot{m}_{13}$	$\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_{12} h_{12} = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{13} h_{13}$
Tank Isıtma Isı Değiştiricisi	$\dot{m}_5 + \dot{m}_{14} = \dot{m}_8 + \dot{m}_{15}$	$\dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_{14} h_{14} = \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{15} h_{15}$
Buhar Kazanı	$\dot{m}_6 + \dot{m}_{16} = \dot{m}_9 + \dot{m}_{17}$	$\dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{16} h_{16} = \dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{17} h_{17}$
Tatlı Su Isı Değiştiricisi	$\dot{m}_{10} + \dot{m}_{18} = \dot{m}_{11} + \dot{m}_{19}$	$\dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{18} h_{18} = \dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_{19} h_{19}$

### 3. Analizler ve Değerlendirme

Geminin ana makine ve baca kazanı teknik özellikleri Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiş olup dakikada 167 devir yaparak 4350 kW güç üreten bir makinenin (MAN 5S35ME-C9.7 HL) (CEAS Engine Calculations, 2022) baca kazanının (HEATMASTER HTX3-40-1140-SF) 10 bar basınçta 250 kW ısı enerjisi sağladığı kabul edilmiştir (Heat System Design, 2022).

**Tablo 3.** Ana makine egzoz parametreleri (ISO) (CEAS Engine Calculations, 2022)

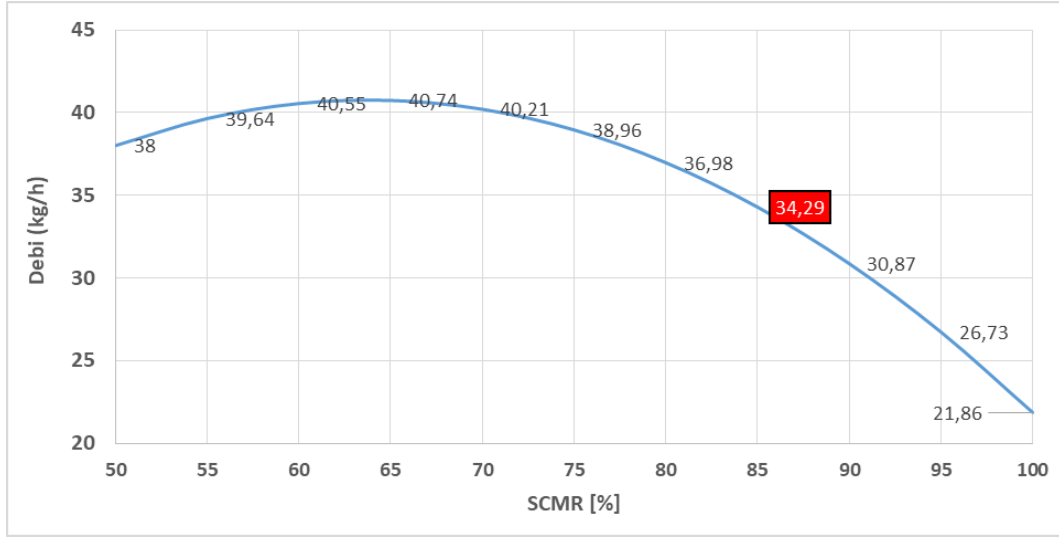
(\*Egzoz gazının parametre değerleri turboşarj sonrası için gösterilmiştir.)

Devir (%)	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50
Güç [kW]	4350	4133	3915	3698	3480	3263	3045	2828	2610	2393	2175
Devir [d/dk]	167	164,2	161,2	158,2	155	151,7	148,3	144,7	140,9	136,8	132,5
Debi [kg/s]	9,1	8,8	8,5	8,2	7,8	7,5	7,1	6,7	6,3	5,8	5,4
Çıkış* [°C]	240	233	228	224	221	220	220	222	225	229	235

**Tablo 4.** Ana makine yük durumuna bağlı olarak baca kazanı giriş ve çıkış ısı enerjileri (Ana makine egzoz gazının bacadan çıkış sıcaklığı 200 °C kabul edilmiştir.)

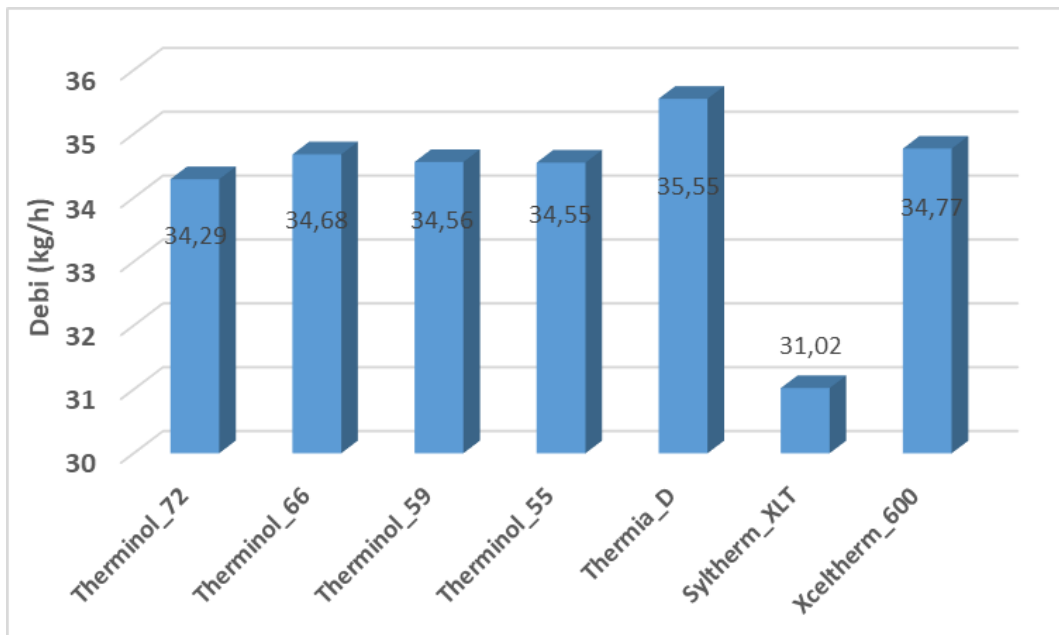
SMCR [%]	Debi [kg/s]	Giriş Sıcaklığı [K]	Giren Akışkan Isıl Yük [kJ/kg]	Çıkan Akışkan Isıl Yük [kJ/kg]
100	9,1	513,15	4709,123	4337,843
95	8,8	506,15	4491,045	4194,837
90	8,5	501,15	4294,591	4051,831
85	8,2	497,15	4109,561	3908,825
80	7,8	494,15	3885,227	3718,151
75	7,5	493,15	3728,145	3575,145
70	7,1	493,15	3529,311	3384,471
65	6,7	495,15	3344,144	3193,796
60	6,3	498,15	3163,772	3003,122
55	5,8	502,15	2936,343	2764,779
50	5,4	508,15	2766,884	2574,104

Geminin ana makinesinin atık ısı değerlerinin bulunabilmesi için MAN CEAS yazılımından yararlanılmıştır. Yazılım, farklı özelliklerdeki ana makineler için çeşitli seçeneklerde performans analizleri yapmaktadır. Ele alınan ana makinenin tasarım parametreleri (silindir sayısı, turboşarjır tipi, pervane tipi vb.) ve çalışma koşulları yazılıma tanımlanarak, farklı çevre koşullarında (ISO, tropik vb.) enerji analizleri gerçekleştirilmektedir (CEAS Engine Calculations, 2022).



Şekil 2. Seyir durumunda ana makine yük durumuna göre yakıt debi miktarları

Şekil 2’de görülebileceği gibi ana makine devri %65 olduğunda yakıtlı kazan yakıt sarfiyatı maksimuma ulaşırken, %65 ana makine devrinden sonra düşüşe geçerek %100 devirde minimum değerine ulaşmıştır. Ancak ana makine devri ideal olarak %85 olarak kullanıldığı için bu grafikten %85 ana makine devrinde yakıt debisi olarak 34,29 kg/h sarfiyat değeri olarak kabul edilmiştir.



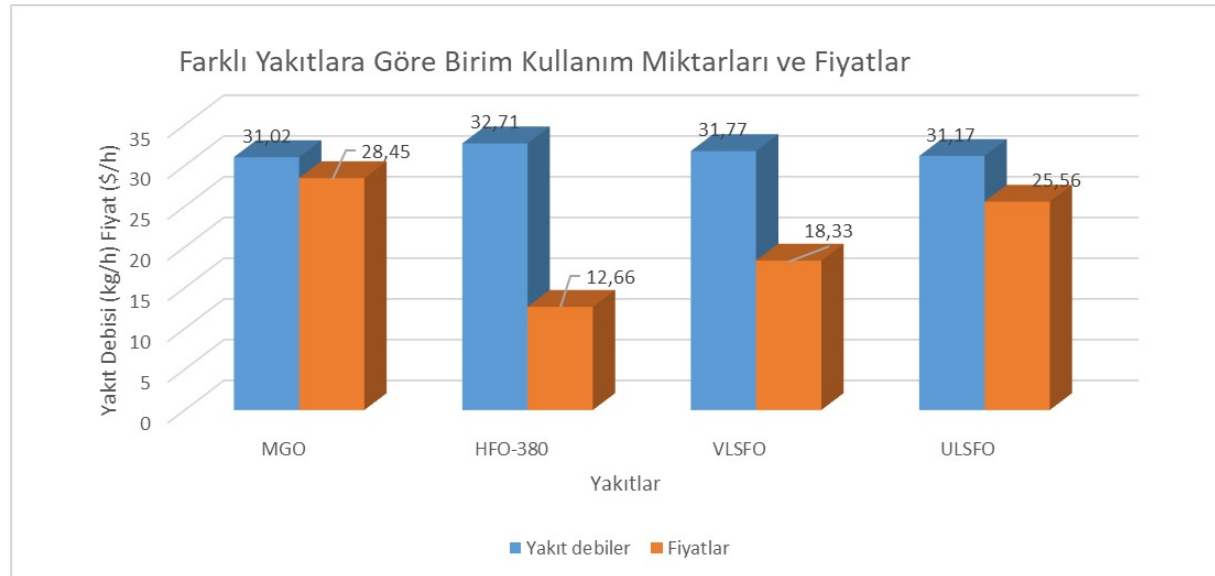
Şekil 3. Seyir durumunda (%85 SCMR) farklı termik yağlara göre yakıt debisi miktarları

Tablo 1’de termodinamik özellikleri verilen termik yağlar ile Engineering Equation Solver (EES) programında yapılan analizlerde seyir durumunda ana makine ideal yükü olan %85 ile çalışırken yakıtlı kazanındaki yakıt sarfiyatları Şekil 3’teki gibi elde edilmiştir. Şekilden görülebileceği üzere Syltherm XLT termik yağı 31,02 kg/h sarfiyat ile en düşük yakıt tüketimini sağlamıştır. Buna karşın 35,55 kg/h yakıt sarfiyatı ile Thermia D termik yağı en yüksek yakıt sarfiyatına sebebiyet vermiştir. Syltherm XLT yağının istenilen şartları en az yakıt tüketimi ile sağlamasından dolayı bundan sonraki analizlerde diğer yağ türleri kullanılmayacaktır. Syltherm XLT kullanılan sistemde yer alan baca kazanı, buhar kazanı ve yakıtlı kazan ile tank yıkama suyu, kargo tank ısıtma, tatlı su ve bünye tankları ısıtma devrelerindeki ısı denge değerleri Tablo 5’te verilmiştir.

**Tablo 5.** Termik yağ olarak Syltherm XLT kullanan sistemin parametreleri

(\*Baca kazanı çıkış sıcaklığı, ana makine egzoz gazının baca kazanındaki enerji denklemleri vasıtasıyla hesaplanmıştır.)

i	Komponent	Akışkan Cinsi	Debi [kg/s]	T_giren [K]	h_giren [kJ/kg]	T_çıkan [K]	h_çıkan [kJ/kg]	Isı Miktarı [kJ/s]
A	Baca Kazanı	Syltherm XLT	5	443	487,4	469,1*	542,7	214,9
B	Yakıtlı Kazan	Syltherm XLT	5	469,1*	542,7	553	729,9	325
C	Tank Yıkama I. D.	Syltherm XLT	1,2	288	60,03	358	341,1	140
D	Tank Isıtma I. D.	Syltherm XLT	1	433	466,9	473	551,2	183,3
E	Buhar Kazanı	Syltherm XLT	2,8	289,2	104,9	370	406,3	112,7
F	Tatlı Su I. D.	Syltherm XLT	5	309	150,3	329	233,9	47,31
G	Bünye Tankları I.	Syltherm XLT	5	309	150,3	329	233,9	56,55

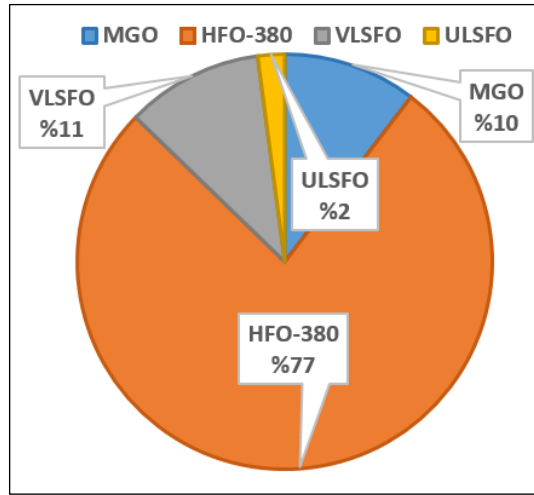


**Şekil 4.** Seyir durumunda (%85 SCMR) farklı yakıtlara göre debi ve birim maliyetleri

Şekil 3’teki karşılaştırmada en verimli termik yağın Syltherm XLT olduğu gözlemlenmiş olup bu yağ için yakıtlı kazanın farklı özelliklerdeki akaryakıt seçenekleri için, Tablo 6, birim sarfiyatları ile bu sarfiyatlardan kaynaklı yakıt maliyetleri Şekil 4’te gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere en yüksek yakıt sarfiyatı HFO-380 akaryakıt tipinde gözlenmesine rağmen aynı zamanda en düşük maliyet de yine HFO-380’de 12,66 \$/h olarak gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise HFO-380 fiyatının diğer akaryakıtlardan daha uygun olmasıdır (*Rotterdam Bunker Prices, 2022*).

**Tablo 6.** Analizlerde kullanılan yakıtların özellikleri (*Marine Fuel and Lubricants : IndianOil, 2022*)

Özellikler	Test Metodu	Birim	VLSFO	ULSFO	HFO-380	MGO
Kinematik Viskozite (50°C)	ISO 3104	cSt	Maks 380	10-60	Maks 380	1,4-11
Yoğunluk (15°C)	ISO 3675 / 12185	kg/m <sup>3</sup>	Maks 991	790-910	Maks 991	Maks 876
Sülfür	ISO 8754 / 14596	% kütle	Maks %0,5	Maks %0,1	Maks %3,5	Maks %0,1
Parlama Noktası	ISO 2719	°C	Min 66	Min 60	Min 60	Min 66
Hidrojen Sülfür	IP 570	mg/kg	Maks 2,0	Maks 2,0	Maks 2,0	Maks 2,0
Asit İndeksi	ASTM D664	mg KOH/g	Maks 2,5	Maks 0,5	Maks 2,5	Maks 0,3
Artık Yakıtlardaki Toplam Tortu	ISO 10307-2	% kütle	Maks 0,10	0,01-0,05	Maks 0,10	Maks 0,10
Karbon Atığı	ISO 10370	% kütle	Maks 18	2	Maks 18	Maks 0,2
Akma Noktası	ISO 3016	°C	Maks 30	18	Maks 30	Maks (-) 6
Su	ISO 3733	% hacim	Maks 0,50	0,05	Maks 0,50	Maks 0,30
Kül	ISO 6245	% kütle	Maks 0,1	0,01	Maks 0,15	Maks 0,005

**Şekil 5.** Seyir durumunda (%85 SCMR) farklı yakıtlara göre SO<sub>x</sub> emisyon oranları

Yakıt içerisinde bulunan SO<sub>x</sub>, düşük sıcaklıklarda yoğunlaşmaya başladığında su ile reaksiyonundan meydana gelen sülfirik asit bacada ve baca kazanı metal malzemesinde korozyona neden olmaktadır. Bu nedenle sülfirik asit oluşumunu engellemek için egzoz gazı sıcaklığını belirli bir değer altına indirmek uygun değildir. Maliyet bazında düşünüldüğünde HF-380 akaryakıtı en makul seçenek olmasına rağmen içeriğindeki SO<sub>x</sub> miktarından ötürü çevreye diğer yakıtlara göre %77 daha fazla salım yapacağı öngörüldüğü için tercih sebebi değildir (Şekil 5).

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, gemilerde kullanılan termik yağ sisteminin tercih sebepleri araştırılmış ve sistemin çalışma prensibi ile ilgili bilgi verilmiştir. Bunun yanı sıra, ana makinenin MCR değeri %50 ile %100 arasında değiştirilerek, 7 farklı termik yağ (Therminol 72, Therminol 66, Therminol 55, Therminol 59, Shell Thermia D, Syltherm XLT ve Xceltherm 60) ve dört farklı akaryakıt (HFO-380, MGO, VLSFO ve ULSFO) için karşılaştırmalı hesaplamalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki gemilerde baca kazanı kullanımı, özellikle ana makine devri %65'ten fazla iken yakıtlı kazanda önemli ölçüde yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca bu hesaplar, bütün ısı değiştiriciler ve buhar kazanı eş zamanlı

çalıştırıldıkları varsayımı ile yapılmış olup, gerçekte karşılığı olmadığından birçok senaryoda sadece baca kazanı çalışır durumdayken dahi geminin ısıtma ihtiyacını karşılayabilecek durumda olabilir. Baca kazanları, ana makine egzoz gazı ile çalıştıklarından dolayı hem maliyet olarak işletmeciye hem de zararlı egzoz salımlarını azaltması yönünden de çevreye büyük bir fayda sağlamaktadır. Ayrıca VLSFO akaryakıtı hem maliyet hem de sahip olduğu düşük SO<sub>x</sub> miktarı sebebi ile yakıtlı kazanlar için makul bir akaryakıt seçeneği olduğu gözlemlenmiştir.

## 5. Kaynaklar

Akman, M. (2017). *Bir Petrol Tankeri İçin Organik Rankine Çevrimi Atık Isı Geri Kazanım Sisteminin Termodinamik Analizi* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. <http://hdl.handle.net/11527/15805>

Akman, M., & Ergin, S. (2019). An investigation of marine waste heat recovery system based on organic Rankine cycle under various engine operating conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 233(2), 586-601. <https://doi.org/10.1177/1475090218770947>

Akman, M., & Ergin, S. (2021). Thermo-environmental analysis and performance optimisation of transcritical organic Rankine cycle system for waste heat recovery of a marine diesel engine. *Ships and Offshore Structures*, 16(10), 1104-1113. <https://doi.org/10.1080/17445302.2020.1816744>

Aygül, Ö., & Baştuğ, S. (2020). Deniz Taşımacılığı Kaynaklı Hava Kirliliği ve İnsan Sağlığına Etkisi. *Journal of Maritime Transport and Logistics*, 1(1), Art. 1.

Başhan, V., & Kökkülünk, G. (2020). Exergoeconomic and air emission analyses for marine refrigeration with waste heat recovery system: A case study. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 19(3), 147-160. <https://doi.org/10.1080/20464177.2019.1656324>

Bogdanowicz, A., & Kniaziewicz, T. (2020). Marine Diesel Engine Exhaust Emissions Measured in Ship's Dynamic Operating Conditions. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20(22), 6589. <https://doi.org/10.3390/s20226589>

CEAS engine calculations. (2022). MAN Energy Solutions. <https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/ceas-engine-calculations>

Çolak, S. (2015). *Gemi İşletmeciliğinde Kimyasal Tanker Ve Kuru Yük Gemisi Yatırım Analizleri* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. <http://hdl.handle.net/11527/9028>

Delibaş, H. M., & Kayabaşı, E. (2021). Energy, environment and economy assessment of waste heat recovery technologies in marine industry. *The International Journal of Materials and Engineering Technology*, 4(2), Art. 2.

Dincer, I., & Al-Muslim, H. (2001). Thermodynamic analysis of reheat cycle steam power plants. *International Journal of Energy Research*, 25(8), 727-739. <https://doi.org/10.1002/er.717>

Domingues, A., Santos, H., & Costa, M. (2013). Analysis of vehicle exhaust waste heat recovery potential using a Rankine cycle. *Energy*, 49, 71-85. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.001>

Dzida, M. (2009). On the possible increasing of efficiency of ship power plant with the system combined of marine diesel engine, gas turbine and steam turbine, at the main engine—Steam turbine mode of cooperation. *Polish Maritime Research*, 16(1), 47-52. <https://doi.org/10.2478/v10012-008-0010-z>

El-Taybany, A., Moustafa, M. M., Mansour, M., & Tawfik, A. A. (2019). Quantification of the exhaust emissions from seagoing ships in Suez Canal waterway. *Alexandria Engineering Journal*, 58(1), 19-25. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.11.016>

Güneş, Ü. (2013). *Gemilerde atık ısı geri kazanım yöntemlerinin teknik ve ekonomik yönden incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi]. <http://dSPACE.yildiz.edu.tr/xmlui/handle/1/2702>

Güneş, Ü., & Karakurt, A. S. (2015). Exergy And Economic Analysis Of Dual Pressure Waste Heat Recovery Boiler. *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering*, 2(5), 41-43.

*Heat system design*. (2022). <https://heatmaster.nl/heat-system-design>

IMO. (2018). Initial IMO GHG Strategy.

<https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>

Kiliç, A. (2009). Marmara Denizi'nde Gemilerden Kaynaklanan Egzoz Emisyonları. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(2), Art. 2.

Kökkülünk, G., Başhan, V., Kaya, A., Sönmez, H., & Sarica, A. (2017, Aralık 21). *Design and Calculation of the Waste Heat Recovery Potential for a Bulk Carrier Marine Diesel Generator*. 3rd Conference on Advances in Mechanical Engineering, ISTANBUL.

Köroğlu, T., & Söğüt, O. S. (2017). Advanced exergy analysis of an organic Rankine cycle waste heat recovery system of a marine power plant. *Journal of Thermal Engineering*, 3(2), Art. 2. <https://doi.org/10.18186/thermal.298614>

Ma, Z., Yang, D., & Guo, Q. (2012). Conceptual Design and Performance Analysis of an Exhaust Gas Waste Heat Recovery System for a 10000TEU Container Ship. *Polish Maritime Research*, 19(2), 31-38. <https://doi.org/10.2478/v10012-012-0012-8>

*Marine Fuel and Lubricants: IndianOil*. (2022). <https://iocl.com/marine-oils>

Nugroho, T. F., Busse, W., Wardhana, E. M., & Panggabean, J. I. O. (2020). Heat Transfer Analysis of Thermal Oil Plant on Fuel Oil Tanks of 17500 LTDW Product Oil Tanker. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 2(2), Art. 2. <https://doi.org/10.12962/j25481479.v2i2.2615>

*Rotterdam Bunker Prices*. (2022, Kasım 24). Ship & Bunker. <https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam>

Saraçoğlu, H., Deniz, C., & Kiliç, A. (2013). An Investigation on the Effects of Ship Sourced Emissions in Izmir Port, Turkey. *The Scientific World Journal*, 2013, e218324. <https://doi.org/10.1155/2013/218324>

Shell Thermia Oil D. (2022). *Southern Lubricants*. <https://www.southernlubricants.co.uk/lube-library/shell-thermia-oil-d/>

SYLTHERM™ XLT. (2022). <https://www.dow.com/en-us/pdp.syltherm-xtl-heat-transfer-fluid.23834z.html>



*Therminol Heat Transfer Fluids*. (2022). <https://www.therminol.com/resources/fluid-selection>

XCELTHERM® 600. (2022). *Radco Ind.* <https://www.radcoind.com/fluid/xceltherm-600/>

İndisler	
$C_p$	Özgül ısı (kJ/kg. K)
$h$	Özgül entalpi (kJ/kg)
<b>HFO-380</b>	Ağır akaryakıt
<b>IMO</b>	Uluslararası denizcilik örgütü
<b>ISO</b>	Uluslararası standardizasyon kuruluşu
<b>LHV</b>	Alt ısı değer (kJ/kg)
<b>MGO</b>	Deniz tipi gaz yakıt
$\dot{m}$	Kütleli debi (kg/s)
<b>P</b>	Basınç (kPa)
<b>ppm</b>	Milyonda bir parçacık
$\dot{Q}$	Isı enerjisi (kJ/s)
$s$	Özgül entropi (kJ/kg. K)
<b>SCMR</b>	Ana makine yüzdeleri yük
<b>SFOC</b>	Özgül akaryakıt tüketimi
<b>T</b>	Sıcaklık (K)
<b>ULSFO</b>	Çok düşük sülfür içerikli akaryakıt
<b>VLSFO</b>	Düşük sülfür içerikli akaryakıt
$\eta$	Verim
$\Delta$	Değişim
Alt indisler	
<b>ba</b>	Baca kazanı çıkışı egzoz gazı
<b>bk</b>	Baca kazanı
<b>ç</b>	Çıkan
<b>eg</b>	Egzoz gazı
<b>g</b>	Giren
<b>p</b>	Pompa
<b>ty</b>	Termik yağ
<b>yk</b>	Yakıtlı kazan

# Balast Tanklarında Sediman Birikimini Azaltacak Sistemin Optimizasyonuna Yönelik İstatistiksel Yaklaşımlar

Ceren Bilgin Güney

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

bilgincer@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3445-8688

## ÖZET

DeneySEL çalışmalar mühendislik alanında sistem ve yapıların tasarımı, optimizasyonu, tasarımın iyileştirilmesi faaliyetlerinin vazgeçilmez öğelerindendir. Ancak özellikle birden çok faktörün performans ölçümleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi amacıyla yapılan deneySEL çalışmalarda elde edilen bulguların işaret ettiği sonuçlar, istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde yorumlanamayabilir. Buna ek olarak, kaynakların (zaman, iş gücü ve maddi kaynaklar vb.) kısıtlı oluşu ise deneySEL çalışmaların en önemli sınırlılıkları arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, gemilerin balast tanklarında sediman birikimini azaltmak için geliştirilen pnömatik sistemin çalışma koşullarını belirleyen üç temel faktör ele alınmış ve bu faktörlerin sedimanın azaltılmasına etkisi istatistiksel açıdan irdelenmiştir. Çalışma kapsamında uygulanan klasik istatistiksel yaklaşımlarla, deneySEL veriler istenilen düzeyde anlamlı bir şekilde yorumlanamamıştır. Bu nedenle deney setinden elde edilen veri kümesindeki ilişkileri istatistiksel bir model üzerinden yorumlamak yerine doğrudan veri üzerinden değişkenler arasındaki ilişkinin ortaya çıkarılması değerlendirilmiştir. Bunun için her ne kadar veri kümesindeki veri sayısı sınırlı olsa da Yapay Sinir Ağları (YSA) yaklaşımı uygulanmıştır. YSA girdi setinde veri sayısı bu yaklaşımın doğruluk ölçüsü (accuracy) üzerinde büyük bir öneme sahiptir. Söz konusu deneySEL çalışmada veri setinin sonsuz sayıya çıkarılması teorik olarak mümkün olsa da kaynak kısıtları nedeniyle bunun gerçekleştirilmesi uygulanabilir değildir. Bu nedenle YSA modeli oluşturulurken deneySEL çalışmanın amacı dikkate alınmış ve farklı bir yaklaşım uygulanmıştır. Deney verisinin bir kısmı YSA modelinin eğitim aşamasında kullanılmış, YSA modelinin optimum bir çalışma koşulu önermesi sağlanmıştır. YSA eğitim aşamasına dahil edilmemiş olan deneySEL sonuçlar ise model tarafından önerilen optimum çalışma koşulunun deneySEL olarak karşılaştırılmasında kullanılmıştır. Söz konusu çalışmada YSA optimizasyon için bir araç olarak kullanılmış ve model tarafından önerilen optimum çalışma koşulu, tüm deney verileri arasında sediman birikimini azaltılması açısından en uygun sonucu vermiştir. Bu çalışmada, gemilerin balast tanklarında sediman birikimini azaltmak için geliştirilen sistemin işletme parametresinin optimizasyonu için yapılan deneySEL çalışma sonuçlarının istatistiksel olarak yorumlanmasında yaşanan sorunlar ve YSA kullanılırken uygulanan yaklaşıma yer verilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** YSA, balast sedimanı, balast tankı

**Makale geçmişi:** Geliş 28/11/2022 – Kabul 11/01/2023

<https://doi.org/10.54926/gdt.1211008>

# Statistical Approaches to Optimize the System to Reduce Sediment Accumulation in Ballast Tanks

Ceren Bilgin Güney

Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering,  
İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye

[bilgincer@itu.edu.tr](mailto:bilgincer@itu.edu.tr), ORCID: 0000-0003-3445-8688

## ABSTRACT

Experimental studies, which are essential methods in engineering, are powerful techniques in terms of designing structures, optimization, and improvement of design. However, the results illustrated by experimental studies evaluating the effect of multiple factors on measures of performance may not be interpreted as statistically significant. In addition, the limited resources (time, labor and financial resources, etc.) are among the most important limitations of the experimental studies. In this study, three main factors that determine the working conditions of the pneumatic system developed to reduce the sediment accumulation in the ballast tanks of the ships are considered and the effect of these factors on sediment reduction is examined statistically. With the classical statistical approaches applied within the study, the experimental data could not be interpreted in a meaningful way at the desired level. For this reason, instead of interpreting the relationships in the data set obtained from the experimental set through a statistical model, it was determined to reveal the relationship between the variables directly through the data. Therefore, although the number of data in the dataset is limited, the Artificial Neural Networks approach been applied (ANN). The number of input data in the ANN structure set greatly affects the accuracy of this approach. Although it is theoretically possible to increase the data set to an infinite number in the experimental study in question, this is not applicable due to resource limitations, particularly time and labor. Because of that, another application is created when forming the ANN model, considering the purpose of the experimental study. Some of the experimental data is used in the training phase of the ANN model, and the ANN model is provided to suggest an optimal working condition. Experimental results not included in the ANN training phase are used to experimentally compare the optimal working condition proposed by the model. In this study, ANN is used as a tool for optimization and the optimum operating condition suggested by the model provides the best result in terms of sediment accumulation reduction among all experimental data. In this study, the problems experienced in the statistical interpretation of the experimental study results for the optimization of the operating parameter of the system developed to reduce the sediment accumulation in the ballast tanks of the ships and the approach applied when using Artificial Neural Networks (ANN) are discussed

**Keywords:** ANN, ballast sediment, ballast tank

**Article history:** Received 28/11/2022 – Accepted 11/01/2023

## **Kısaltmalar:**

**IMO:** Uluslararası Denizcilik Örgütü

**MEPC:** Deniz Çevresini Koruma Komitesi

**BHB:** Başlangıç hava basıncı

**ÇS:** Çalıştırılma süresi

**TS:** Çalıştırılma tekrar sayısı

**YSA:** Yapay Sinir Ağları

## **1. Giriş**

Mühendislik alanında sistem ve yapıların tasarımında, optimizasyonunda ve tasarımın iyileştirilmesi aşamalarında deneysel çalışmalar önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmalarda temel amaç genel olarak girdi değişkenlerinde yapılan anlamlı değişikliklerin çıktı üzerinde oluşturduğu değişimin ne şekilde olduğunun ve nedeninin belirlenmesidir (Özkurt 1999). Bununla birlikte zamansal ve maddi kısıtlar başta olmak üzere kaynakların kısıtlılığı deneysel çalışmayı sınırlandıran en belirleyici parametreler arasında yer almaktadır. Bu kısıtlar elde edilen verilerin analizinde de belirleyici olabilmektedir.

Bu çalışma, balast tanklarında sediman birikimini azaltmak için geliştirilen pnömatik sistem için operasyonel parametrelerin optimizasyonuna yönelik deneysel çalışma sonuçlarının istatistiksel olarak yorumlanmasında karşılaşılan sorunları ve ayrıca yorumlama için uygulanan metodolojiyi sunmaktadır. Bu bağlamda çalışmanın araştırma problemi, sistem tasarlanırken belirlenmiş olan ve sistemin çalışma koşulunu belirleyen faktörlerle balast tankı modelinde kalan sediman miktarı arasındaki ilişkinin istatistiksel açıdan incelenmesidir.

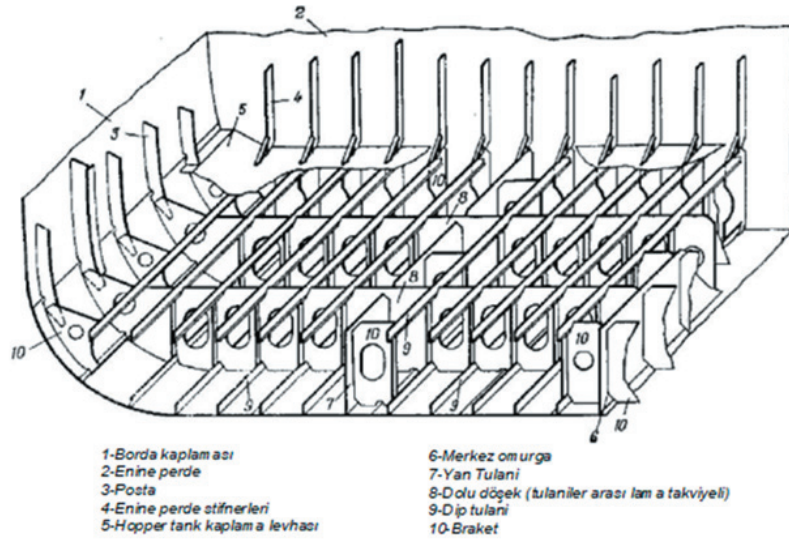
### **1.1 Balast Sedimanı Problemi**

Gemilerde güvenli ve verimli yüzmeye şartlarının sağlanabilmesi, gemilerin ağırlık yönetiminin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesine bağlıdır. Yükleme koşullarındaki değişiklikler ve de yakıt ve su tüketimi gibi nedenlerle ortaya çıkan ağırlık kayıplarının, geminin özelliklerine ve de yüzmeye koşullarına bağlı olarak telafi edilmesi gemi güvenliği açısından hayati önem taşımaktadır. Bu kayıpları karşılamak için günümüz gemi inşa teknolojisinde gemilerin yüzdüğü ortamdan alınan balast suyu kullanılmaktadır.

Balast operasyonu büyük ölçüde gemilerin yüklerini boşalttıkları limanda gerçekleşmektedir. Ancak gemiler balast suyu ile birlikte, o anda suda askıda bulunan ve balast sistemlerinden geçebilecek büyüklükteki her şeyi tanklarına almaktadır. Bu nedenle bir çok organizma da gemilerin balast sularıyla birlikte tanklara alınmakta (Wu et al. 2017) ve gemilerle birlikte alındıkları yerden çok daha uzakta bulunan bölgelere taşınmaktadır (European Environment Agency 2021; Grigorovich et al. 2003; Leppäkoski and Gollasch 2006; Wu et al. 2017). Bu türlerin taşınması ise ekoloji, halk sağlığı ve ekonomi üzerinde önemli bir tehdit teşkil etmekte, bazen yıkıcı sonuçlara yol açabilmektedir (Altug et al. 2012; Drake, Doblin, and Dobbs 2007; Glomski 2015; Hallegraeff 2015; McCarthy and Khambaty 1994; Nichols 2001; Raaymakers 2002; Shiganova et al. 2001; Takahashi et al. 2008). Balast tankları organizmalar için balast suyu, tank dibinde biriken sediman-su karışımından oluşan çökelti ve tankların iç yüzeylerinde oluşan biyofilmler olmak üzere üç farklı habitat sunmaktadır (Drake et al. 2007). Bu da taşınabilecek türlerin çeşitliliğini arttırmaktadır.

Bu problemle mücadele etmek için denizcilikle ilgili uluslararası düzenlemeleri en geniş ölçekte yapan ve Birleşmiş Milletler'e bağlı olan Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO-International Maritime Organization) 2004 yılında 'Gemi Balast Sularının ve Sedimanlarının Kontrolü ve Yönetimi Sözleşmesi'ni imzaya açmış, sözleşme 2017 yılında yürürlüğe girmiştir. Bu sözleşmeyle, zararlı organizmaların ve patojenlerin gemilerin balast suları ve sedimanları yoluyla transferinin sonucunda ortaya çıkabilecek risklerin önlenmesi, en aza indirilmesi ve nihai olarak ortadan kaldırması amaçlanmaktadır (Gollasch and David 2019). Sözleşme balast suyu ve sedimanının uygun şekilde yönetilmesini gerektirmekte, gemilerin balast suyu arıtım sistemleri ile donatılmasını zorunlu kılmaktadır (IMO 2004). Sözleşme aynı zamanda gemilerin sediman alımını ve bu sedimanın birikimini en aza indirecek şekilde tasarlanıp inşa edilmesi gerektiğinin altını çizmektedir. Sözleşmenin yanı sıra, IMO'ya bağlı MEPC (Deniz Çevresini Koruma Komitesi- Marine Environment Protection Committee) tarafından yayınlanan 'G12- Gemi üzerinde sediman kontrolünün sağlanmasına yönelik tasarım ve inşa standartları ile ilgili kılavuz' ile balast tanklarının sediman birikimini en aza indirecek şekilde tasarlanması desteklenmektedir (MEPC 2012).

Gemilerde balast tankları gerek gemi tipine göre gerekse gemi üzerinde bulunduğu yere göre farklı geometrilere sahip kapalı hacimlerdir. Ancak genellikle geminin yapısal bütünlüğünün korunması amacıyla kullanılan enine ve boyuna mukavemeti sağlayacak yapısal elemanlarının yer aldığı (Şekil 1), farklı bir amaç için kullanılmayacak bölgeler balast tankı olarak kullanılmaktadır. Balast suyunun alınması ve boşaltılması esnasında, tankların bu geometrisi akış alanında hızın yavaşlamasına ve bazı noktalarda yerel hızın sifıra düşmesine neden olur. Hızın yavaşladığı veya durduğu bu noktalar sediman birikiminin en çok görülebileceği yerlerdir.



**Şekil 1.** Klasik bir boyuna sistem dip konstrüksiyonu (Özalp 1977)

Bu çalışmanın öncülü olan çalışmalar da yapısal elemanların, tanktaki akışı etkilediğini ve sediman birikimini arttıracak yönde etkileri olduğunu göstermektedir. (Bilgin Güney, Danışman, and Ertürk Bozkurtoğlu 2020). Biriken bu sediman, başta istilacı türlerin taşınımıyla ilgili risklerin devamı olmak üzere çeşitli problemlere de neden olmaktadır (Bilgin Güney et al. 2016). IMO Sözleşmesi'nin balast suyu deşarj standartları, organizmaları boyutlarına göre iki sınıfa ( $10 \mu\text{m}$  -  $50 \mu\text{m}$  olan ve de  $50 \mu\text{m}$ 'den büyük olan organizmalar) ayırarak beher hacimde bulunabilecek yaşayan organizma sayısını sınırlandırmaktadır (IMO 2004). Oysa birçok deniz organizması, çeşitli yaşam evrelerinde,  $10 \mu\text{m}$ 'den daha küçük boyutlarda bulunabilmektedir ve dip sedimanı, farklı yaşam evrelerinde bulunan bir çok

deniz organizması ve patojenler için balast tankı içinde habitat oluşturabilir (Dong et al. 2021; Lv et al. 2018; Shang et al. 2019; Tang, Shang, and Dobbs 2022; Wu et al. 2019). Bu organizmalar koşulların uygun olması halinde balast suyuna geçerek farklı yerlere taşınabilir ve gerek istila gerekse halk sağlığı açısından risk oluşturabilir. İçerdiği organizmaların yanı sıra kompozisyonunda bulunan ağır metal ve diğer kirleticiler nedeniyle de dip sedimanının oldukça dikkatle ve önemle yönetilmesi gerekmektedir (Feng et al. 2017; Maglić et al. 2017; Valković and Obhodaš 2020).

Dip sedimanın miktarı geminin operasyon karakteristiği ve de balast tanklarının yapısına göre değişiklik göstermekte, bazı gemilerde ihmal edilebilir miktarlardayken bazı gemilerde yüzlerce tona ulaşabilmektedir (Hamer 2002; Johengen et al. 2005). Tanklarda biriken bu ağırlık, yıllar boyunca kümülatif olarak gemilerde yük kapasitesinde azalmaya dolayısıyla gelir kaybına neden olacaktır. Elbette balast suyu arıtma sistemlerinin gemilere takılmasıyla birlikte sediman birikiminin azalması beklenmektedir. Ancak balast sedimanı büyük oranda kil ve silt partiküllerinden oluşmaktadır (Maglić, Zec, and Frančić 2016) bu da çoğu balast suyu arıtım sisteminin 40 µm -50 µm mekanik ön arıtma limitlerinin altındadır (Bilgin Güney 2017). Ayrıca sistemlerin çoğu içerse de bir kısmı mekanik ön arıtma içermemektedir. Balast suyu artma sistemiyle donatılmış 29 gemide yakın zamanda yapılmış olan balast suyu örnekleme çalışmasında örneklerin üçte birinde ince sediman partiküllerinin tespit edilmiş olması da sistemlerin birikimini engellemeyeceğine işaret etmektedir (Bailey et al. 2022).

Balast sedimanı problemi çeşitli boyutlarıyla ortaya konmuş olsa da sediman birikiminin engellenmesi veya giderilmesi yönünde çok az çalışma bulunmaktadır. Yuan vd, (2017) dipte biriken sedimanını tekrar balast suyuna karışmasını sağlamak için su enjeksiyonu yapılmasını önermektedir. Bu yöntemle sedimanın tanktan uzaklaştırılması için sistemin hidrosiklonla desteklenmesi ve de balast suyunun sirküle edilerek hidrosiklondan geçirilmesi gerekmektedir (Yuan, Zhou, and Mei 2017). Pereira vd (2021), balast değişimi sürecinde sedimanın tanktan uzaklaştırılması için iki farklı önlem önermektedir. Önlemlerden biri akışı bozmak ve sediman giderimini artırmak için bir deflektör kullanmasıdır, diğeri ise tank tabanından balast suyu enjeksiyonu ile tortunun askıya alınmasıdır (Pereira et al. 2021). Sediman balast tankından atılmasını kolaylaştırmak için önerilen bir diğer yöntem ise balast suyu boşaltmadan önce pnömatik bir sistem kullanılarak tankın dip bölgesine hava enjeksiyonu yapılmasıdır (Bilgin Güney vd., 2020). Bilgin Güney vd. tarafından yapılmış olan çalışma, mevcut makalenin de öncüllerindedir.

## 2. Materyal ve Metot

Balast tankları, gemi tipi, gemi kapasitesi ve gemi yapım esaslarına göre farklı yapılarda olabilir, gemide farklı yerlerde bulunabilir (National Research Council 1996). Bu çalışmanın öncülü olan laboratuvar çalışmalarında, boyuna sistem ile inşa edilmiş olan bir tankerde çift dip balast tankında sediman birikiminin en çok görülebileceği bölgenin merkez tülaniye komşu olan bölge olduğu tespit edilmiş (Bilgin Güney et al. 2018a, 2018b), sediman birikimini azaltmak üzere tankın bu bölgesinde çalışacak bir pnömatik bir sistem tasarlanmıştır (Bilgin Güney et al. 2018a, 2020). Bu sistemle balast suyu deşarj edilmeden hemen önce, merkez tülaniye komşu hatta, balast tankının dibine yakın bir dizi noktadan tanka hava verilerek, dibe çökmüş sedimanın hareketlendirilmesi ve tekrar suya karışması, böylece balast suyuyla birlikte tanktan deşarj edilmesi hedeflenmiştir. Tank dibinde sedimanın birikiminde ve bu sedimanın giderilmesinde birçok faktör belirleyicidir. Yapılan deneysel çalışmalar, bu faktörler arasında yer alan ve sistemle ilgili olan operasyonel parametrelerin, sediman birikimi üzerindeki etkisinin anlaşılması ve sistem için optimum çalışma koşullarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiş, bulgular yayınlanmıştır (Bilgin Güney 2022). Sistemin çalışma koşulları üç faktör ile belirlenmektedir. Bu faktörler ise şunlardır:

- pnömatik sistemle tank dibine verilen havanın basıncı,
- havanın tanka ne kadar süreyle verildiği,
- hava verilme işleminin tekrar sayısı.

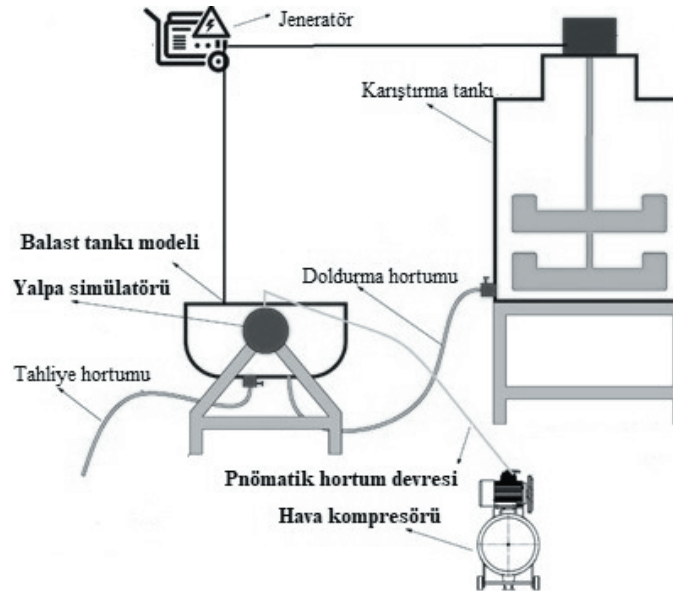
Bu makale, sistemin tasarlanma sürecinde belirlenmiş olan faktörler ile balast tankı modelinde kalan sediman miktarı arasındaki ilişkinin istatistiksel açıdan incelenmesi ve optimum çalışma koşullarının belirlenmesi için yapılmış olan çalışmaları konu almaktadır. Ancak öncesinde, çalışmanın bütünlüğünün sağlanması amacıyla, verilerin elde edilmesi sürecinde yer alan deneysel arka plana kısaca değinilmiştir.

## 2.1 Çalışmanın Deneysel Arka planı

### 2.1.1 Deney sistemi ve prosedürü

Deney sisteminin ana bileşenleri balast seyri simüle etmek üzere tasarlanmış olan bir yalpa simülatörü, balast tankı modeli ve pnömatik sistemdir (Şekil 2). Sediman birikimini azaltmak üzere geliştirilmiş olan pnömatik sistem bir hava kompresörü ve bir pnömatik hortum devresinden oluşmaktadır. Yapılan çalışmalarda var olan bir tankerin çift dip yapısının 1/20 ölçeğinde modeli kullanılmıştır (Şekil 3).

Deneylerde kullanılan yapay balast suyu ise, 5 g/L bentonit kili içecek şekilde, deney sisteminin içerisinde yer alan karıştırma tankında hazırlanarak balast tankı modeline doldurulmuştur. Gerçek koşullarda balast suyu ile tanka alınan sediman deniz dibinde suya doymuş halde olduğundan, musluk suyu ve bentonit kiliyle hazırlanan yapay balast suyu, her bir seyir simülasyonunun başlangıcından önceki 24 saat boyunca, balast suyu hazırlama tankında karıştırılmıştır. Deney sisteminin kesintisiz olarak çalışmasının sağlanabilmesi için, sistem jeneratörle desteklenmiştir.



Şekil 2. Deney sistemi (Bilgin Güney 2022)

Söz konusu çalışmada pnömatik temizleme sistemin veriminin farklı çalışma koşulları altında incelenmesi amaçlandığı için, bu koşulların değiştiği deney setleri oluşturulmuştur. Her bir deney seti birbirini takip eden üç balast seyri simülasyonundan meydana gelmiştir. Bir seyir model ölçeğinde 24 saat yani 1 gün olarak belirlenmiştir. Modelin ölçeği 1/λ olduğunda, model ile gerçek geminin zamanı

arasındaki ilişkinin  $t/\lambda^{1/2}$  olduğu, yani model zamanının, gerçek gemi zamanına göre, ölçeğin kare kökü kadar daha hızlı aktığı bilinmektedir. Buna bağlı olarak, deneylerde kullanılan ölçek dikkate alındığında, model süresinin gerçek gemi süresinden  $20^{1/2} \approx 4,5$  kat daha hızlı aktığı görülmektedir. Sonuç olarak 24 saatlik deney süresinin gerçek gemi ölçeğinde  $\sim 108$  saate karşılık geldiği söylenebilir.



**Şekil 3.** Balast tankı modeli ve pnömatik hortum devresi (Bilgin Güney 2022)

Her bir deney setinde operasyon parametreleri farklı kombinasyonlarda uygulanmıştır (Tablo 1).

Çalışma koşullarını belirleyen operasyon parametreleri şunlardır:

**Başlangıç hava basıncı (BHB):** Pnömatik sistemle verilen havanın başlangıç basıncını ifade etmektedir.

**Çalıştırılma tekrar sayısı (TS):** Her bir deney setinde yer alan üçer günlük seyir simülasyonlarının kaçının sonunda balast suyu deşarj edilirken pnömatik sistemin çalıştırıldığını ifade etmektedir.

**Çalıştırılma süresi (ÇS):** Pnömatik sistemin tanka ne kadar süreyle hava verdiğini ifade etmektedir.

**Tablo 1.** Operasyon parametreleri (Bilgin Güney 2022)

Çalıştırma Tekrar Sayısı (TS)	T1: Pnömatik sistem 1 kere çalıştırılmıştır (3. seyir simülasyonunun sonunda) T2: Pnömatik sistem 2 kere çalıştırılmıştır (2., ve 3. seyir simülasyonlarının sonunda) T3: Pnömatik sistem 3 kere çalıştırılmıştır (1., 2., ve 3. seyir simülasyonlarının sonunda)
Başlangıç Hava Basıncı (BHB):	2 bar 4 bar 6 bar
Çalıştırma Süresi (ÇS)	30 s 90 s



Deney setlerini oluşturan her bir simülasyon sonunda yapay balast suyu modelden tahliye edilmiş, bir sonraki seyir simülasyonu için tekrar doldurulmuştur. Üçüncü seyir simülasyonunun sonunda set tamamlandığı için model tekrar doldurulmamıştır. Her bir deney seti tamamlandıktan sonra tankta kalan toplam sediman miktarı, bölmelerde kalan toplam katı maddenin kuru ağırlığının tespiti ile belirlenmiştir. Bir deney setinde üç balast seyrini, sediman alımını ve ölçümü için toplam 14 günlük süreye ihtiyaç duyulmuştur. Bu süreci özetleyen örnek program Tablo 2 ile sunulmuştur.

**Tablo 2.** Deney setleri için çalışma planı

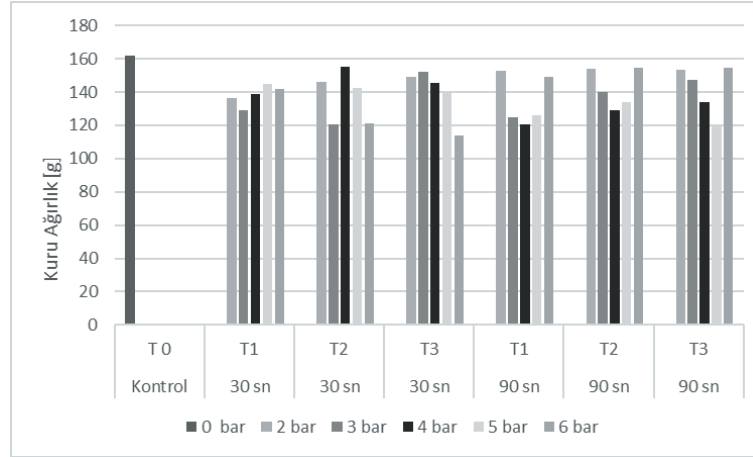
Gün	Yapılan işlem
Pazartesi	- Yeni başlayacak setin 1. Balast seyri için yapay balast suyunun hazırlanması - Bir önceki hafta tamamlanan deney setinin sonunda tankta kalan sedimanın kurutma için beherlere alınması ve etüve konulması - 14 gün önce başlatılmış olan deney setinin sedimanın tartılması (etüvdeki 7 günlük bekleme tamamlandığı beherler)
Salı	- Modelin temizlenmesi ve yeni deney seti için hazırlanması - 1. Balast seyrinin başlatılması - 2. Balast seyri için yapay balast suyunun hazırlanması
Çarşamba	- 1. Balast seyri sonunda tankın deşarjı - 2. Balast seyrinin başlatılması (yapay balast suyu deşarj kalıntısının üstüne alınır) - 3. Balast seyri için yapay balast suyunun hazırlanması
Perşembe	- 2. Balast seyri sonunda tankın deşarjı - 3. Balast seyrinin başlatılması (yapay balast suyu deşarj kalıntısının üstüne alınır)
Cuma	3. Balast seyri sonunda tankın deşarjı
Cumartesi	Sedimanın modelde bekletilmesi
Pazar	Sedimanın modelde bekletilmesi

Deney setlerinin sonunda modelde kalan sediman miktarının belirlenmesi için, model bölmelerinden toplanan sediman önceden tartımı yapılmış olan beherlere alınmıştır. Sedimanın toplanabilecek kıvamda olması için iki günlük bekleme süresine ihtiyaç duyulmuştur. İki günlük bekleme sonunda modelin içindeki 24 bölmenin dibinde kalan kalıntı, önceden tartılmış 24 farklı beherde alınmış, bu beherler etüvde 103-105°C sıcaklıkta sabit ağırlık elde edilene kadar kurutulmuştur. Modelde üç seyir simülasyonu sonunda birikmiş olan toplam katı madde, toplanan sedimandaki buharlaştırma kalıntısının yani beherdeki ağırlık artışının hassas teraziyile ölçülmesiyle tespit edilmiştir. Etüvde bekleyen sedimanın içeriğindeki suyun tamamen buharlaşması ve geriye kalan kuru maddenin sabit ağırlığa gelmesi, her bir bölmeden alınan sediman miktarına ve içerisinde mevcut olan suyun oranına göre değişmektedir. Ancak 7 günlük etüvde bekleme sonuna tüm beherlerin sabit tartıma geldiği tespit edilmiştir. Bu nedenle beherler etüvde 103-105°C sıcaklıkta 7 gün süre ile bekletilmiştir.

Yapay balast suyunun hazırlanmasıyla başlayan her bir deney seti, modelde kalan sediman kalıntısının etüve konulması ile bir haftada tamamlanmıştır. Ancak her bir setin kalıntısının ölçülmesi için beherlerin etüvde bir hafta beklemesi gerekmiştir. Sonuç olarak her bir deney setinin başlatılmasıyla, set sonuna tankta kalan sedimanın tartılabilmesi arasında 14 günlük süreye ihtiyaç duyulmuştur. Çalışma boyunca kontrol seti dışında toplam 30+1 operasyon parametresi kombinasyonu için deneyler yapılmıştır. Bunlardan otuzu sistemin önceden belirlenmiş parametreler ile çalıştırılması ile gerçekleştirilmiş biri ise çalışmada optimum olarak bulunan çalışma koşulunun test edilmesi için yapılmıştır.

## 2.1.2 Deneysel çalışma sonuçları

Kontrol deneyi sonunda modelde 161,62 g sediman kaldığı tespit edilmiştir. Pnömatik sistemin çalıştırıldığı bütün setlerde sediman miktarında bir azalma olduğu gözlenmiştir (Şekil 4). Tüm setler arasında en düşük sediman ağırlığı (114,08 g) ise pnömatik sistemin her üç seyrin sonunda (T3), 6 bar başlangıç hava basıncıyla 30 sn süreyle çalıştırıldığı deney seti sonunda elde edilmiştir (Bilgin Güney 2022).



Şekil 4. Sediman kuru ağırlığının deney parametrelerine göre aldığı değerler

Ancak çalışmanın bağımsız değişkenlerini oluşturan operasyonel parametrelerin, çalışmanın bağımlı değişkeni olan sediman miktarı üzerinde karmaşık bir etkisi olduğu görülmektedir (Şekil 4). Örneğin tüm setler arasında hem en büyük hem en düşük sediman miktarı pnömatik sistemin her bir seyrin simülasyonu sonunda (T3) 6 bar başlangıç hava basıncı (BHB) ile çalıştırıldığında elde edilmiştir. Sistem 6 bar BHB ile 30 sn'lik çalışma süresiyle (ÇS) çalıştırıldığında tekrar sayısının artması sediman miktarında daha büyük düşüş sağlamıştır. Ancak BHB 6 bar olduğunda sistem 90 sn süreyle çalıştırıldığında bu durum tam tersi yönde gerçekleşmiştir, tekrar sayısı arttıkça sediman miktarındaki düşüş azalmıştır. Bu ilişki diğer basınç değerlerinde daha da karmaşık hale gelmektedir.

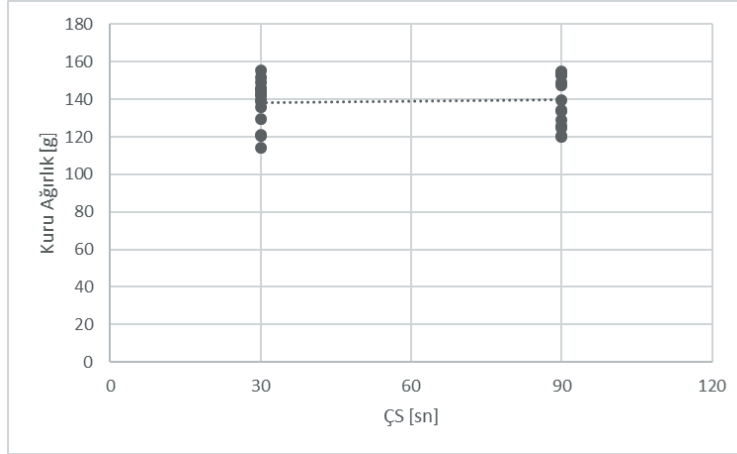
## 3. Deneysel çalışma sonuçlarının yorumlanması

### 3.1. Deney Sonuçlarının Ön Analizi

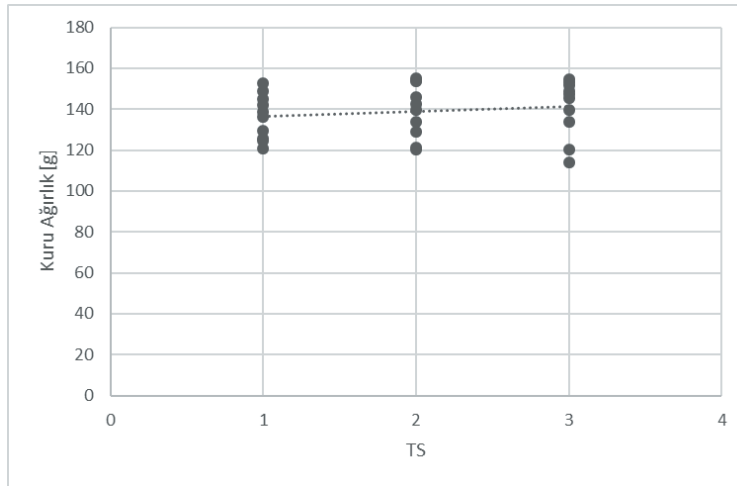
Oluşturulan deney setinden kesikli ve sürekli olmak üzere iki tür veri elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmanın bağımsız değişkenleri (TS, BHB, ÇS) kesikli veri setlerini oluştururken, bağımlı değişkeni (sedimanın kuru ağırlığı) sürekli veri setini oluşturmaktadır (Şekil 5-7). Çalışmada hangi değişkenin bağımlı değişken üzerinde ne kadar ağırlığa sahip olduğu bilinmediğinden ve literatürde benzer bir çalışma bulunmadığından bağımsız değişkenler öncelikle eşit ağırlıklı olarak kabul edilmiştir.

Sediman kuru ağırlığının (bağımlı değişken) pnömatik sistemin çalıştırılma süresine (bağımsız değişken) göre değişimi Şekil 5 ile verilmektedir. Bu grafik incelendiğinde, çalışmanın bağımlı değişkeninin, söz konusu bağımsız değişkeninin her iki değerinde de (30 sn ve 90 sn çalışma süresi için) benzer aralıkta (120-160 g) kümelendiği tespit edilmiştir. Sediman kuru ağırlığının (bağımlı değişken) pnömatik sistemin çalıştırılma tekrar sayısına (bağımsız değişken) göre değişimi ise Şekil 6'da yer almaktadır. Bu grafik de yine bağımlı değişkenin, bağımsız değişken olan tekrar sayılarının her değerinde aynı aralıklarda kümelendiği göstermektedir. Şekil 5'te ve Şekil 6'da gösterilen grafiklerden anlaşılacağı

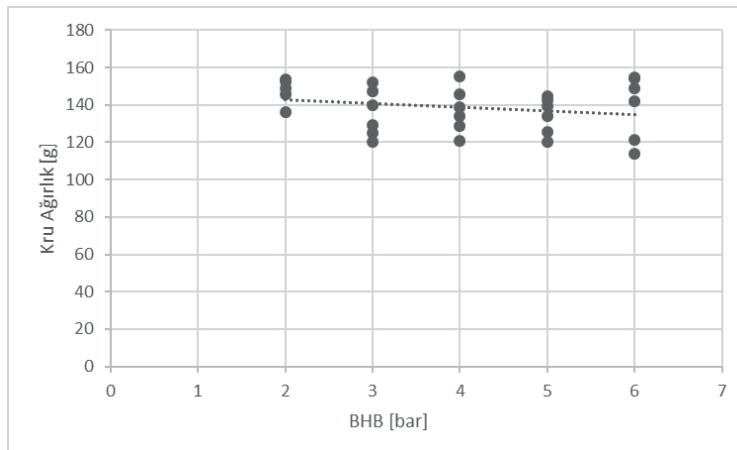
üzere her iki bağımsız değişkenin aldığı değer, bağımlı değişken olan sediman miktarı üzerindeki etkisinde farklılık görülememektedir. Bu durum sisteme verilen başlangıç hava basıncı olan BHB bağımsız değişkeninin etkisinde ise az da olsa değişiklik göstermektedir. Başlangıç hava basıncının değeri 2 bar olduğunda sediman miktarı daha yüksek bir aralıkta kümelenmişken, 5 bar olduğunda daha düşük bir aralıkta kümelenmiştir (Şekil 7). Ancak yine de bu grafikten bağımsız değişken olan BHB'nın bağımlı değişken olan sediman kuru ağırlığı üzerine genel bir çıkarım yapmak mümkün değildir.



Şekil 5. Sediman kuru ağırlığının sistemin çalıştırılma süresine göre dağılımı



Şekil 6. Sediman kuru ağırlığının sistemin çalıştırılma tekrarı sayısına göre dağılımı



Şekil 7. Sediman kuru ağırlığının sistemin başlangıç hava basıncına göre dağılımı

Sonuç olarak sediman miktarının bağımsız değişkenlerden her biriyle ilişkisini veren bu grafikler incelendiğinde, bağımlı ve her bir bağımsız değişken arasında lineer bir ilişki olmadığı görülmektedir. Diğer bir ifadeyle rastlantısal bir değişken olan sediman miktarının davranışı lineer bir model kullanılarak kestirilememektedir. Bu durumda da bağımsız değişkenlerin sediman miktarına olan etkisindeki farklılıklardan anlamlı bir sonuca ulaşılamamaktadır. Diğer taraftan Şekil 4'te açıkça görüldüğü üzere her üç bağımsız değişkenin farklı kombinasyonlarının etkileşimi farklı sonuçlara yol açmaktadır. Bu durum, deney sonuçları ile elde edilen değerlerin istatistiksel olarak incelenmesini gerektirmektedir. Bu çalışmayla bağımsız değişkenlerle bağımlı değişken arasındaki korelasyonun varlığı irdelenmiştir.

### 3.2. Deney Sonuçlarının İstatistiksel Analizi

İstatistiksel bir çıkarım yapabilmek için hipotez testlerinden yararlanılır. Bunun için öncelikle sıfır hipotezi ve bu hipoteze karşı olan araştırma hipotezi oluşturulur. Pnömatik sistemle ilgili belirlenmiş olan faktörlerin, tankta kalan sediman miktarı üzerindeki etkisinin araştırıldığı deneysel çalışmada elde edilen veri kümesinin istatistiksel analizi için çalışma kapsamında aşağıdaki hipotezler oluşturulmuştur:

**H<sub>0</sub> Hipotezi (Sıfır Hipotezi):** 'Çalıştırma tekrar sayısı', 'çalıştırma süresi' ve 'başlangıç hava basıncı' süreksiz bağımsız değişkenleri ile yapılan deneylerde gözlenen ve beklenen sediman azalması arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur.

**H<sub>1</sub> Hipotezi (Karşıt Hipotez):** 'Çalıştırma tekrar sayısı', 'çalıştırma süresi' ve 'başlangıç hava basıncı' süreksiz bağımsız değişkenleri ile yapılan deneylerde gözlenen ve beklenen sediman azalması arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar vardır.

Başka bir ifadeyle yapılacak istatistik değerlendirmeler sonucunda faktörlerdeki farklılıklarla sediman miktarının değişimi arasında istatistiksel bir ilişki yoksa sıfır hipotezi geçerli olacaktır. Diğer durumda yani faktörlerdeki değişimlerle sediman miktarının değişimi arasındaki ilişki istatistiksel açıdan anlamlı ise H<sub>1</sub> hipotezi kabul edilecektir.

Hipotez testinde kullanılan yöntemlerden bir tanesi varyans analizidir. Ancak analizin yapılabilmesi için belli varsayımlar vardır. Bu varsayımlara göre veri kümesi normal dağılımda bulunmalıdır ve de birden fazla veri kümesi varsa, bunların varyansları homojen olmalıdır.

Çalışmanın başında bağımsız değişkenlerle bağımlı değişken arasındaki ilişkilerin genel durumunu görmek amacıyla ilk önce Pearson regresyon analizi uygulanmış ve Tablo 3'te görülen sonuçlar elde edilmiştir. Pearson korelasyon katsayısı  $r$ , -1 ile 1 arasında değerler alabilir. Bu değer sıfırdan ne kadar uzaksa, değişkenler arasındaki doğrusal ilişki o kadar güçlüdür (Edwards 1984). Çalışma kapsamında gerçekleştirilen regresyon analizi sonucunda Tablo 3'te görüldüğü üzere Pearson Korelasyon Katsayısı 0,27 bulunmuştur ve bu değer bağımsız değişkenlerle bağımlı değişken arasındaki ilişkinin zayıf ilişki olduğunu göstermektedir.

**Tablo 3.** Ceteris paribus durumunda çoklu regresyon analizi sonuçları

Regresyon İstatistiği Özeti	
Pearson Korelasyon Katsayısı ( $r$ )	0.27
Açıklayıcılık Katsayısı ( $R^2$ )	0.08
Örneklem Büyüklüğü	30

Ardından dağılımın parametrik olmadığı göz önünde bulundurularak Spearman regresyon analizi uygulanmış ancak değişkenler arasında yine anlamlı bir korelasyonun olmadığı görülmüştür (Tablo 4).

**Tablo 4.** Spearman sıra korelasyon katsayıları

	<b>ÇS</b>	<b>TS</b>	<b>BHB</b>
<b>Sediman Kuru Ağırlığı</b>	0.073	0.165	-0.188

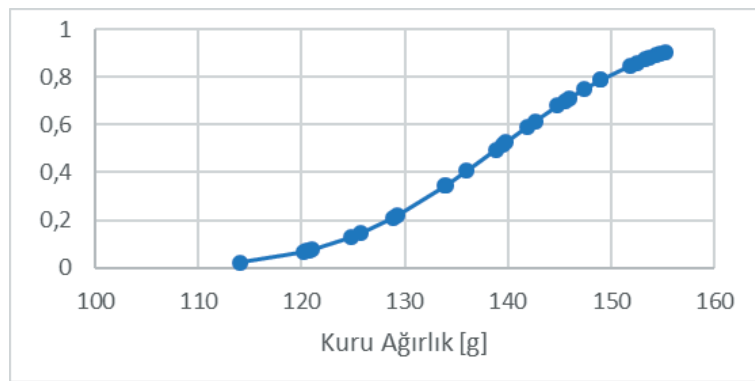
Regresyon analizlerinde istatistiksel olarak anlamlı sonuçların elde edilememesinden sonra veri kümesinin normal dağılımda olup olmadığını kontrol etmek için önce Tablo 5'teki betimsel istatistik üretilmiş ve daha sonra bu bilgiler kullanılarak en çok kullanılan normallik testler arasında yer Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk normallik testleri uygulanmıştır (Rani Das and Rahmatullah Imon 2016). Bu testlerden elde edilen sonuçlarda (Tablo 6) sedimanın kuru ağırlığının normal dağılımda olduğu görülmüştür ve Şekil 8'deki normal dağılım grafiği elde edilmiştir.

**Tablo 5.** Sediman Kuru Ağırlığına ilişkin betimsel istatistik bilgileri

Örneklem Büyüklüğü	30
Ortalama	138.97
En Küçük Değer	114.08
En Büyük Değer	155.28
Varyans	156.69
Standard Sapma	12.52
Standart Hata	2.29
%95 Güven Aralığı Değeri	4.48
Güven Aralığı Alt Sınır	134.49
Güven Aralığı Üst Sınır	143.45
Hata Payı	2.24

**Tablo 6.** Normal dağılım testi (yanılma düzeyi  $\alpha=0.05$ )

	<b>test değeri</b>	<b>tablo değeri</b>
<b>Kolmogorov-Smirnov</b>	0.112	0.242 ( $\alpha=0.05$ )
<b>Shapiro-Wilk</b>	0.923	0.927 ( $\alpha=0.05$ )


**Şekil 8.** Sedimanın kuru ağırlığının dağılım grafiği

Varyans analizi için gerekli diğer koşulda deney kümeleri arasında farklılık olup olmadığının belirlenmesi diğer bir ifadeyle varyansların homojenliği varsayımdır. Bunun kontrolü için uygulanan testlerden biri F testidir. F testi, birbirinden bağımsız faktörlerin normal dağılımda olduğu varsayımlarda kullanılan bir parametrik testtir (Archdeacon 1994). Bu çalışmada da kesikli değişkenlerle sürekli değişken arasındaki korelasyonu tam olarak anlayabilmek için F-testi üzerinden varyans analizi tek faktörlü, iki faktörlü ve üç faktörlü olarak ayrı ayrı uygulanmıştır (Tablo 7-9).

Yapılan varyans analizleri sonucunda tek değişkenli varyans analizlerinde sıfır hipotezi geçerli iken iki değişkenli varyans analizlerinde sıfır hipotezi reddedilmektedir. Üçlü varyans analizinde hata toplamları sıfır olduğu için anlamlı sonuç elde edilememektedir.

**Tablo 7. Tek faktörlü varyans analizi sonuçlar**

<b>Tek Yönlü Varyans Analizi (Bağımsız Değişken: Çalışma Süresi, Bağımlı Değişken: Sediman Kuru Ağırlığı)</b>						
	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F testi değeri	F testi tablo değeri	Karşılaştırma
Toplam	4543.9048	29	156.6864			
Gruplar için Kareler Toplamı	9.4650	1	9.4650	0.0584	3.6823	$F_{test} < F$ ( $\alpha=0.05, 1.28$ )
Kareler Toplamı Hatası	4534.4399	28	161.9443			
<i>Sıfır hipotezi geçerlidir. Karşılaştırılan gruplar arasında ve karşılaştırılan grupların ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamaktadır.</i>						
<b>Tek Yönlü Varyans Analizi (Bağımsız Değişken: Çalıştırma Tekrar Sayısı, Bağımlı Değişken: Sediman Kuru Ağırlığı)</b>						
	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F testi değeri	F testi tablo değeri	Karşılaştırma
Toplam	4543.9048	29	156.6864			
Gruplar için Kareler Toplamı	111.8883	2	55.9442	0.3408	3.3541	$F_{test} < F$ ( $\alpha=0.05, 2.27$ )
Kareler Toplamı Hatası	4432.0165	27	164.1488			
<i>Sıfır hipotezi geçerlidir. Karşılaştırılan gruplar arasında ve karşılaştırılan grupların ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamaktadır.</i>						
<b>Tek Yönlü Varyans Analizi (Bağımsız Değişken: Başlangıç Hava Basıncı, Bağımlı Değişken: Sediman Kuru Ağırlığı)</b>						
	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F testi değeri	F testi tablo değeri	Karşılaştırma
Toplam	4543.9048	29	156.6864			
Gruplar için Kareler Toplamı	742.3704	4	185.5926	1.2205	2.7587	$F_{test} < F$ ( $\alpha=0.05, 4.25$ )
Kareler Toplamı Hatası	3801.5345	25	152.0614			
<i>Sıfır hipotezi geçerlidir. Karşılaştırılan gruplar arasında ve karşılaştırılan grupların ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamaktadır.</i>						

Her üç ölçüt grubundaki veri kümelerine ilişkin değişkenlerin süreklilik göstermemesi nedeniyle sonuçlar beklenildiği gibi elde edilmiştir. Diğer bir ifadeyle belirli bir değer aralığında kümelenen (Şekil 5-7) tek bağımsız değişken söz konusu olduğunda bağımlı değişken ile korelasyon oluşmamaktadır. Üç ölçüt grubunun herhangi ikisine ilişkin iki bağımsız kesikli değişken söz konusu olduğunda sediman ağırlığı ile korelasyon oluşmaktadır. Üç bağımsız kesikli değişken ile bağımlı değişken arasında klasik istatistiksel bakış açısıyla anlamlı bir ilişki bulunamamıştır.

**Tablo 8. İki faktörlü varyans analizi sonuçları**

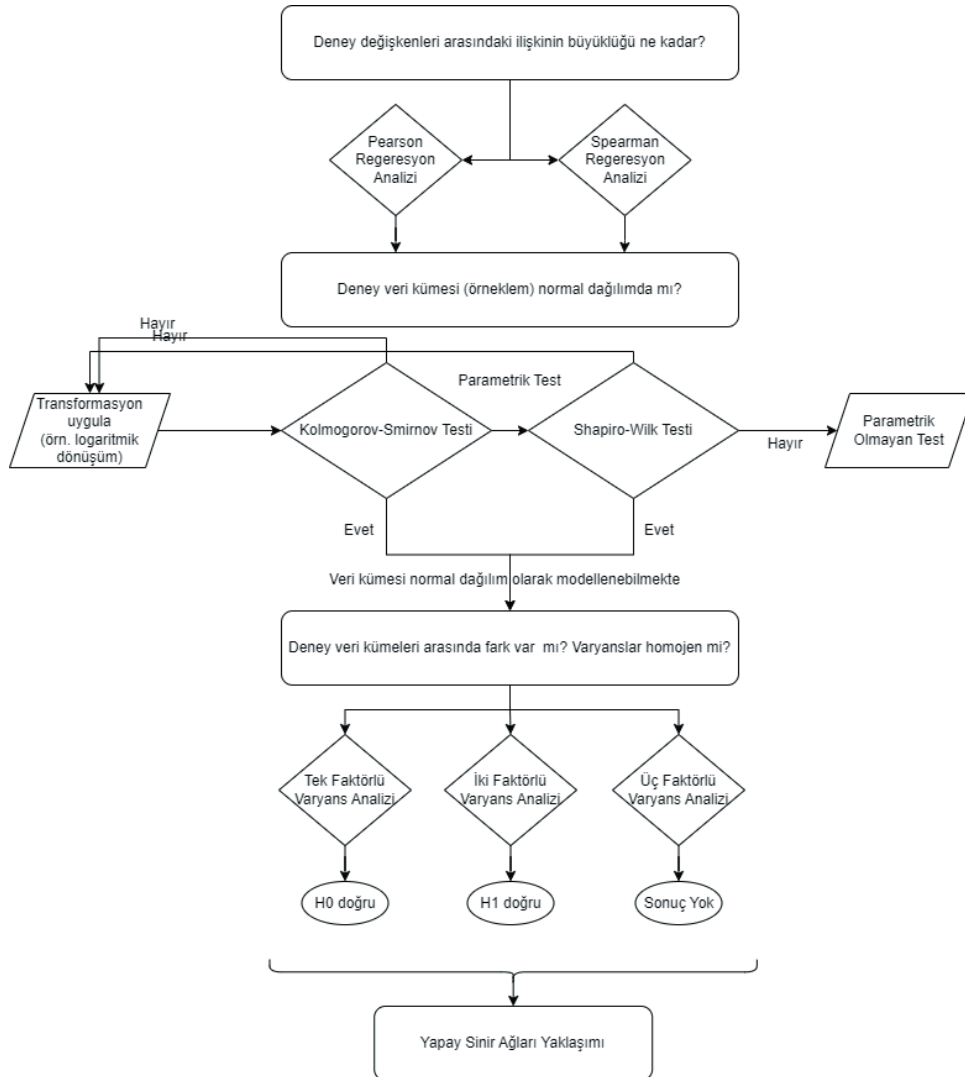
<b>Çift Yönlü Varyans Analizi (Bağımsız değişkenler: BHB ve ÇS, Bağımlı Değişken: Sediman Kuru Ağırlığı)</b>						
	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F testi değeri	F testi tablo değeri	Karşılaştırma
1. Faktör için Kareler Toplamı	9.4650	1	9.4650	0.1141	4.3512	$F_{test} < F$ ( $\alpha=0.05, 1,20$ )
2. Faktör için Kareler Toplamı	742.3704	4	185.5926	2.2371	2.8661	$F_{test} < F$ ( $\alpha=0.05, 4,20$ )
Her 2 Faktör için Kareler Toplamı	2132.8148	4	533.2037	6.4270	2.8661	$F_{test} > F$ ( $\alpha=0.05, 4,20$ )
Gruplar için Kareler Toplamı	1659.2546	20	82.9627			
Kareler Toplamı Hatası	4543.9048	29	156.6864			
<i>Sıfır hipotezi geçerli değildir. Her iki faktörün birlikte sediman kuru ağırlığı değişimi üzerine etkisi bulunmaktadır.</i>						
<b>Çift Yönlü Varyans Analizi (Bağımsız değişkenler: TS ve ÇS, Bağımlı Değişken: Sediman Kuru Ağırlığı)</b>						
	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F testi değeri	F testi tablo değeri	Karşılaştırma
1. Faktör için Kareler Toplamı	9.4650	1	9.4650	0.1141	4.2597	$F_{test} < F$ ( $\alpha=0.05, 1,20$ )
2. Faktör için Kareler Toplamı	111.8883	2	55.9442	0.6743	3.4028	$F_{test} < F$ ( $\alpha=0.05, 4,20$ )
Her 2 Faktör için Kareler Toplamı	96.8782	2	48.4391	0.5839	3.4028	$F_{test} > F$ ( $\alpha=0.05, 4,20$ )
Gruplar için Kareler Toplamı	4325.6733	24	180.2364			
Kareler Toplamı Hatası	4543.9048	29	156.6864			
<i>Sıfır hipotezi geçerli değildir. Her iki faktörün birlikte sediman kuru ağırlığı değişimi üzerine etkisi bulunmaktadır.</i>						
<b>Çift Yönlü Varyans Analizi (Bağımsız değişkenler: TS ve BHB, Bağımlı Değişken: Sediman Kuru Ağırlığı)</b>						
	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F testi değeri	F testi tablo değeri	Karşılaştırma
1. Faktör için Kareler Toplamı	111.8883	2	55.9442	0.6743	3.6823	$F_{test} < F$ ( $\alpha=0.05, 1,20$ )
2. Faktör için Kareler Toplamı	742.3704	4	185.5926	2.2371	3.0556	$F_{test} < F$ ( $\alpha=0.05, 4,20$ )
Her 2 Faktör için Kareler Toplamı	916.4987	8	114.5623	1.3809	2.6408	$F_{test} > F$ ( $\alpha=0.05, 4,20$ )
Gruplar için Kareler Toplamı	2773.1474	15	184.8765			
Kareler Toplamı Hatası	4543.9048	29	156.6864			
<i>Sıfır hipotezi geçerli değildir. Her iki faktörün birlikte sediman kuru ağırlığı değişimi üzerine etkisi bulunmaktadır.</i>						

Bu durumda bağımsız değişkenlerle bağımlı değişkenler arasındaki ilişkinin kurulabilmesi için alternatif arayışa geçilmiştir. Deney setinden elde edilen veri kümesindeki ilişkileri istatistiksel bir model

üzerinden yorumlamak yerine doğrudan veri üzerinden değişkenler arasındaki ilişkinin ortaya çıkarılması değerlendirilmiştir. Bunun için her ne kadar veri kümesindeki veri sayısı sınırlı olsa da Yapay Sinir Ağları yaklaşımı uygulanmıştır. Deneysel çalışma sonuçlarını yorumlamak için uygulanan istatistiksel betimleme süreci Şekil 9 ile özetlenmiştir.

**Tablo 9.** Üç faktörlü varyans analizi sonuçları

Üç Faktörlü Varyans Analizi (Bağımsız değişkenler: TS, ÇS ve BHB; Bağımlı Değişken: Sediman Kuru Ağırlığı)			
	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması
BHB	742.3704	4	185.5926
ÇS	9.4650	1	9.4650
TS	111.8883	2	55.9442
BHB & TS	916.4987	8	114.5623
TS & ÇS	96.8782	2	48.4391
BHB & ÇS	2132.8148	4	533.2037
BHB & ÇS & TS	533.9893	3	114.4519
Gruplar için Kareler Toplamı	4543.9048	29	156.6864
Kareler Toplamı Hatası	0.0000	5	0.0000



**Şekil 9.** Deneysel çalışma sonuçlarının istatistiksel betimlenme süreci



### 3.3 Yapay Sinir Ağları Yaklaşımının Uygulanması (YSA)

Yapay Sinir Ağları, insan beyni gibi öğrenme, hafızaya alma ve öğrendiklerini yeni bilgiler üretecek biçimde genelleme, değişkenler arasındaki ilişkileri ortaya koyma yeteneklerine sahip bilgisayar yazılımlarıdır (Yazıcı et al. 2007). YSA yaklaşımı birçok alanda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Örneğin, Ma vd. (2022) çift yakıtlı deniz motoru emisyonlarının ve performansının tahmini ve optimizasyonu için kullanılırken, Danişman (2014) bu yaklaşımı katamaranlarda yarı gövde dalga girişim direncinin azaltılması çalışmalarında, Guo vd. (2020) su ürünleri yönetimi için alg patlaması risk tahmini çalışmalarında, Amin vd (2019) Hazar Denizi dip sedimanı üzerinde polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH) oluşumunun tahmininde, Yonsel vd. (2014) bir karar verme aracı olarak balast suyu elektroklorinasyon sistemi için yaptıkları çalışmalarda kullanmışlardır.

YSA yaklaşımı ile birçok durumda sistemin davranışını taklit etmek mümkündür. Normal şartlarda YSA yaklaşımında çok sayıda girdi kullanılmaktadır. Ancak bu deneysel çalışmada en önemli kısıtlardan bir tanesi olan zaman, girdi sayısını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle YSA modeli oluşturulurken farklı bir uygulamaya gidilmiştir. Mevcut 30 set deney verisinin 20 tanesi MatLab yazılımıyla YSA modelinin eğitim aşamasında kullanılmış, YSA modelinin optimum bir çalışma koşulu önermesi sağlanmıştır. YSA eğitim aşamasına dahil edilmeyen 10 deneysel sonuç ise model tarafından önerilen optimum çalışma koşulunun deneysel olarak karşılaştırılması için kullanılmıştır (Bilgin Güney 2022).

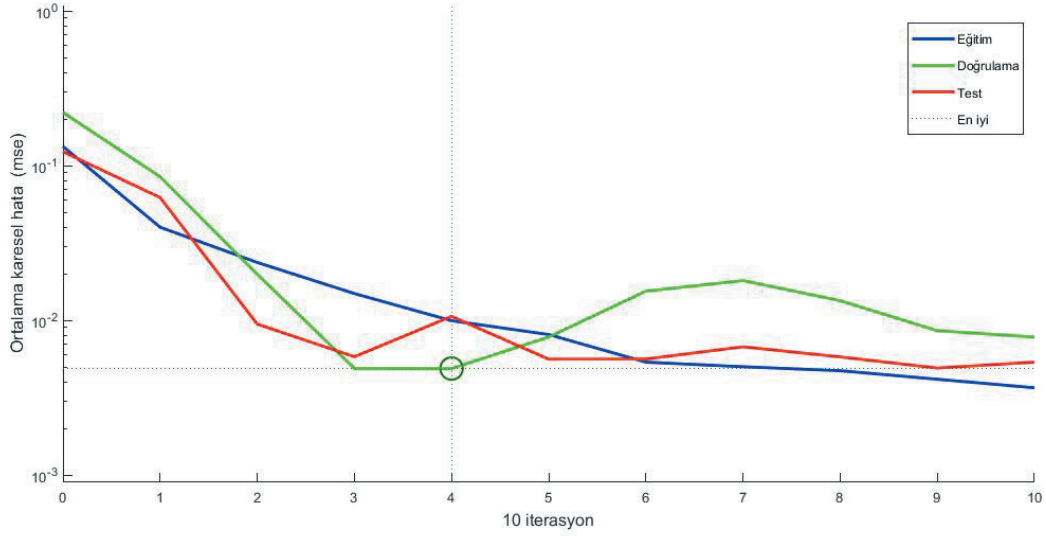
Eğitim aşamasında ve karşılaştırma aşamasında kullanılan deney seti kombinasyonları Tablo 8 ile verilmektedir. Bu Tabloda 'e' YSA modelinde eğitim aşamasında girdi olarak kullanılan deney setlerinin bağımlı değişken kombinasyonlarını, 'K' ise YSA ile önerilen optimum koşulu karşılaştırmak için kullanılan deneysel sonuçların bağımlı değişken kombinasyonlarını temsil etmektedir. YSA eğitimine tabloda yer almamakla birlikte, yapılmış olan iki kontrol deneyi setinin sonucu da girdi olarak eklenmiştir, (Yani TS=0, (BHB=0, ÇS=0=)

**Tablo 8.** YSA modelinde girdi olarak ve karşılaştırmak için kullanılan değişken kombinasyonlar

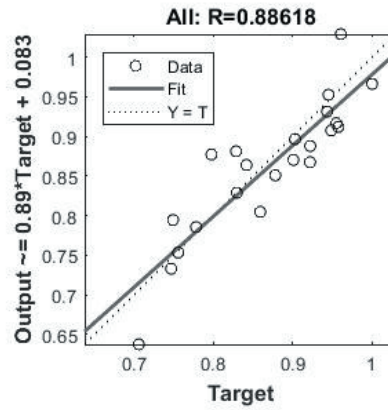
Çalışma Süresi (ÇS)	Tekrar Sayısı (TS)	Başlangıç Hava Basıncı (BHB)				
		2 bar	3 bar	4 bar	5 bar	6 bar
30 sn	T1	e	K	e	K	e
	T2	e	K	e	K	e
	T3	e	K	e	K	e
90 sn	T1	e	K	e	e	e
	T2	e	K	e	e	e
	T3	e	K	e	K	e

Eğitim sürecinde giriş datasının azlığı nedeniyle zorluklarla karşılaşmış ve en iyi korelasyonu veren eğitimdeki ağırlık katsayıları kullanılarak YSA oluşturulmuştur. Şekil 10'da eğitim sürecinin yakınsaması en küçük kareler metoduyla gösterilmektedir. En iyi sonuca 40. iterasyonda ulaşılmış olsa da eğitim süreci 100. iterasyona kadar sürdürülmüştür. YSA eğitimi Tablo 8'de "e" ile belirtilen bu 20 set deney verisiyle %88 doğrulukla (*accuracy*) tamamlanmıştır. Eğitimin ve doğrulama çalışmasının regresyon analizi görülmektedir. Buna göre YSA %88 doğrulukla deneyleri temsil edebilmektedir (Şekil 11).

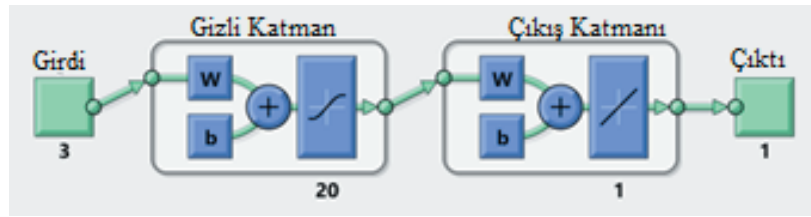
Eğitim tamamlandıktan sonra optimizasyon için MatLab Sinir Ağları araç kutusunda yer alan ve az sayıda girdi verisiyle başarılı sonuçlar verebilen (Danişman 2014) 'The Scaled Conjugate Gradient Algorithm' alt programı kullanılmıştır. Gizli katmanda 20 adet nöron kullanılmıştır, YSA giriş datası 20 örnek ve 3 parametre içerir, çıkış datası ise bir tanedir (Şekil 12).



Şekil 10. Eğitim iterasyonları



Şekil 11. YSA eğitim sonucu (Bilgin Güney 2022)



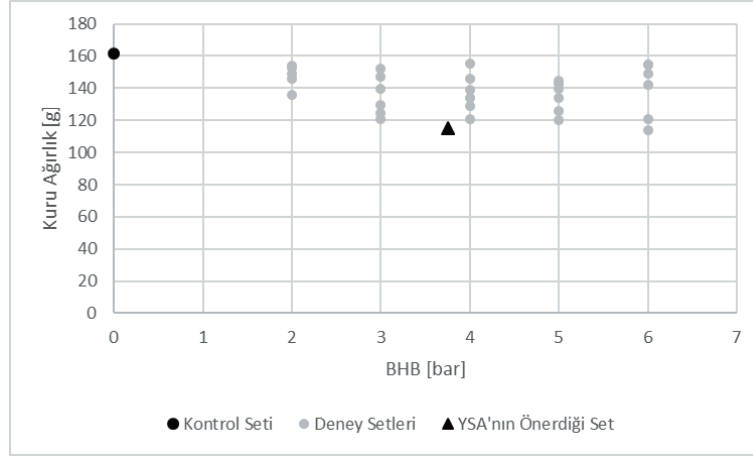
Şekil 12. YSA modelinin yapısı

Bu YSA'nın test ve doğrulama çalışması nümerik olarak değil, YSA eğitiminde herhangi bir şekilde kullanılmamış olan ek deneysel verilerle karşılaştırılarak yapılmıştır. Bu veriler Tablo 8'de "K" ile belirtilen 10 set deney verisidir.

YSA optimizasyonu sonucunda sistemin 3.7 bar başlangıç hava basıncı (BHB) ile üç seyirlik simülasyonda sadece bir kere (T1) 52 sn süreyle çalıştırılması önerilmiştir. Pnömatik sistem, YSA'nın önerdiği koşullarla çalıştırılarak 3 seyir simülasyonundan oluşan bir set deney daha yapılmıştır. Bu set sonunda tank modelinde 115.11 gr sediman kaldığı tespit edilmiştir.

Bu değer Tablo 8 ile verilen gerek eğitim aşamasında kullanılan deney setleri (yani "e"), gerekse herhangi bir şekilde sayısal modele dahil edilmeyen ama karşılaştırma için kullanılan deneysel veriler

(yani “K”) kontrol aşamasında elde edilmiş olan en düşük değerle hemen hemen aynıdır (Şekil 13). Aralarında sadece ~1g fark bulunmaktadır (Tablo 9). Bu fark sedimanın tank boyunca 24 bölmenin her birinden tek tek elle toplandığı düşünüldüğünde ihmal edilebilecek seviyededir.



**Şekil 13.** Bütün setlerden elde edilmiş olan sediman ağırlıkları

Diğer taraftan önerilen koşullara bakıldığında, gerek başlangıç hava basıncının daha düşük olması gerekse tekrar sayısının az olması gemi üzerindeki pratik uygulamalar açısından daha tercih edilebilir koşullardır (Bilgin Güney 2022).

**Tablo 9.** En iyi sonuç veren deney seti ile YSA'nın önerdiği setin karşılaştırılması

	BHB	TS	ÇS	Kalan sediman
En iyi sonuç veren set	6 bar	3	30 s	114.08 g
YSA'nın önerdiği set	3.7 bar	1	52 s	115.11 g

#### 4. Sonuçlar ve tartışma

Deneysel çalışmalar araştırma geliştirme faaliyetlerinin vazgeçilmez öğelerindedir. Ancak deneysel çalışmalardan elde edilecek verilerin yorumlanabilmesi, deney tasarımı kadar önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle birden çok faktörün performans ölçümleri üzerindeki etkisini verimli bir şekilde değerlendirilmesi gerektiğinde deneysel olarak elde edilmiş olan verilerin işaret ettiği sonuçlar, istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde yorumlanamayabilir. Yapılmış olan bu çalışmada da deneysel veriler önemli sayısal sonuçlar gösterirken, sistemin çalışma parametrelerinin sonuçlarının birbirine olan etkisi istatistiksel analizde görülemediğinden, deneysel sonuçlar istatistiksel olarak istenilen düzeyde anlamlı bir şekilde yorumlanamamıştır. Bu durumda deneylerden elde edilen veri kümesinde fiziksel bir korelasyondan bahsedilemezken, Şekil 4'teki deney sonuçlarına dayanarak matematiksel bir korelasyondan bahsedilebilir.

Birçok durumda Yapay Sinir Ağları (YSA) yaklaşımı ile sistemin davranışını taklit etmek mümkündür. Bir YSA modelinin temel amacı, eğitim seti tarafından tanımlanan model uzayı içinde yer alan girdi vektörünün/vektörlerinin çıktı değerini/değerlerini tahmin etmektir. YSA modelinin başarımını gösteren ölçütlerinden birisi doğruluk (*accuracy*) ölçütüdür. Çalışma kapsamında oluşturulan YSA modelinin doğruluk ölçütü çalışmanın girdi veri kümesindeki veri sayısının az olması nedeniyle ne kadar anlamlı ve güvenilir olduğu tartışmaya açıktır. Bilindiği üzere yapay sinir ağlarında girdi veri sayısı sınırlı olması durumunda öğrenme girdi verisine aşırı uyumlu (*overfitting*) olacak biçimde sonuçlar

üretebilmektedir. Bu tür durumlarda klasik yaklaşım yerine genelde cross-validation yaklaşımı tercih edilmektedir. Ancak cross-validation yaklaşımı da aşırı uyumlu olmayı (overfitting) engelleyememekte, yalnız modelin doğruluğu hakkında daha objektif sonuçlar vermektedir.

Her ne kadar çalışmanın odağını klasik istatistiksel yaklaşım oluştursa da kesin hesaplama yaklaşımıyla anlamlı biçimde ortaya çıkarılmayan değişkenler arasındaki ilişkiler esnek hesaplama tekniğiyle ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Çalışma kapsamında esnek hesaplama tekniği olarak yapay sinir ağı yaklaşımı optimizasyon yöntemi olarak uygulanmıştır.

Diğer taraftan deneysel çalışmanın sınırlamaları nedeniyle, her bir gerçek yaşam parametresinin sonuçlar üzerindeki etkisini ayrı ayrı ölçmek mümkün değildir. Örneğin bu çalışmada bağımsız değişkenlerin kombinasyon sayısının artırılmasıyla bağımlı değişken veri kümesinin eleman sayısı teorik olarak sonsuza çıkartılabilir. Ancak her bir deney setinden sonuç almak için ihtiyaç duyulan süre değerlendirildiğinde bunun pratik olarak uygulanmasının mümkün olmadığı açıkça görülmektedir.

Bu çalışmaya da konu olan deneysel çalışmanın asıl amacın pnömatik sistemin balast tankındaki sedimanı maksimum seviyede giderecek çalıştırılma koşullarının en optimal kombinasyonun tespiti olduğu göz önünde bulundurulmuş, YSA modelinin doğruluk değerini arttıracak sayıda girdi verisi başta zaman ve iş gücü gibi kaynak kısıtları nedeniyle deneysel olarak üretilemeyeceği için farklı bir uygulamaya gidilmiştir.

Mevcut deneysel verilerin bir kısmı YSA eğitim aşamasında kullanılırken bir kısmı YSA optimizasyonu sonucunda önerilen çalışma koşulunun karşılaştırılmasında kullanılmıştır, yani YSA'nın test ve doğrulama çalışması nümerik olarak değil, YSA eğitiminde kullanılmamış olan ek deneysel verilerle karşılaştırılarak yapılmıştır. Optimizasyon sonucunda önerilen pnömatik sistemin çalıştırılma koşulları da YSA eğitiminde kullanılmayan bir kombinasyondur. Bu kombinasyonla elde edilen deneysel sonuç, tüm deney sonuçlarıyla kıyaslandığında (deney hassasiyetinde ihmal edilebilir bir farkla) en düşük sediman miktarıyla eşdeğer bir sonuç vermiştir. Ancak optimizasyon sonucunda önerilmiş olan çalışma koşullarının kombinasyonu, eş değer sonucu veren kombinasyona göre uygulamada daha tercih edilebilir bir kombinasyondur.

## Teşekkür

Deneysel çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (İTÜ-BAP-41718) kapsamında desteklenen 'Balast Tanklarında Sediman Birikimini Azaltacak Pnömatik Temizleme Sistemi Optimizasyonu' başlıklı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazar, YSA çalışması sırasında değerli yorumları ve katkıları için Doç. Dr. Devrim Bülent Danışman'a teşekkür eder.

## Referanslar

Altug, Gulsen, Sevan Gurun, Mine Cardak, Pelin S. Ciftci, and Samet Kalkan. 2012. "The Occurrence of Pathogenic Bacteria in Some Ships' Ballast Water Incoming from Various Marine Regions to the Sea of Marmara, Turkey." *Marine Environmental Research* 81:35–42. doi: 10.1016/j.marenvres.2012.08.005.

Archdeacon, Thomas. 1994. *Correlation and Regression Analysis: A Historian's Guide*. University of Wisconsin Press.

Bailey, Sarah A., Torben Brydges, Oscar Casas-Monroy, Jocelyn Kydd, R. Dallas Linley, Robin M. Rozon, and John A. Darling. 2022. "First Evaluation of Ballast Water Management Systems on Operational Ships for Minimizing Introductions of Nonindigenous Zooplankton." *Marine Pollution Bulletin* 182:113947. doi: 10.1016/J.MARPOLBUL.2022.113947.

Bilgin Güney, Ceren. 2017. *BALAST SUYU ARITIM SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ*. İstanbul.

Bilgin Güney, Ceren. 2022. "Optimization of Operational Parameters of Pneumatic System for Ballast Tank Sediment Reduction with Experimental and ANN Applications." *Ocean Engineering* 259:111927. doi: 10.1016/J.OCEANENG.2022.111927.

Bilgin Güney, Ceren, Devrim Bülent Danışman, and Şafak Nur Ertürk Bozkurtoğlu. 2020. "Reduction of Ballast Tank Sediment: Evaluating the Effect of Minor Structural Changes and Developing a Pneumatic Cleaning System." *Ocean Engineering* 203. doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107204.

Bilgin Güney, Ceren, Devrim Bülent Danışman, Şafak Nur Ertürk Bozkurtoğlu, and Fatma Yonsel. 2018a. "Determination of Sediment Accumulation Pattern in A Double Bottom Ballast Tank Model." *Brodogradnja/Shipbuilding* 69(2):55–67. doi: 10.21278/brod69204.

Bilgin Güney, Ceren, Devrim Bülent Danışman, Şafak Nur Ertürk Bozkurtoğlu, and Fatma Yonsel. 2018b. "Determination of Sediment Distribution in a Lab-Scale Ballast Tank Model." Pp. 815–26 in *INT-NAM 2018 3rd International Naval architecture and Maritime Symposium*, edited by A. D. Alkan. İstanbul.

Bilgin Güney, Ceren, Şafak Nur Ertürk Bozkurtoğlu, Devrim Bülent Danışman, and Fatma Yonsel. 2016. "Another Challenge: Sediments of The Ballast Tanks." in *1st International Congress on Ship and Marine Technology; "Green Technologies."* İstanbul.

Danışman, Devrim Bülent. 2014. "Reduction of Demi-Hull Wave Interference Resistance in Fast Displacement Catamarans Utilizing an Optimized Centerbulb Concept." *Ocean Engineering* 91:227–34. doi: 10.1016/J.OCEANENG.2014.09.018.

Dong, Ying, Haoran Zhang, Huixian Wu, Junzeng Xue, Yanan Liu, and Xiaodong Jiang. 2021. "Invasion Risk to Yangtze River Estuary Posed by Resting Eggs in Ballast Sediments from Transoceanic Ships." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 545. doi: 10.1016/j.jembe.2021.151627.

Drake, Lisa A., Martina A. Doblin, and Fred C. Dobbs. 2007. "Potential Microbial Bioinvasions via Ships' Ballast Water, Sediment, and Biofilm." *Marine Pollution Bulletin* 55(7–9):333–41. doi: 10.1016/j.marpolbul.2006.11.007.

Edwards, Allen L. 1984. *An Introduction to Linear Regression and Correlation*. 2nd ed. W.H. Freeman.  
European Environment Agency. 2021. "Pathways of Introduction of Marine Non-Indigenous Species to European Seas." Retrieved (<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/trends-in-marine-alien-species-1/assessment>).

Glomski, LeeAnn M. 2015. *Zebra Mussel Chemical Control Guide - ERDC/EL TR-15-9*.

Gollasch, Stephan, and Matej David. 2019. *Ballast Water: Problems and Management*. Second Edi. Elsevier Ltd.

Grigorovich, Igor A., Robert I. Colautti, Edward L. Mills, Kristen Holeck, Albert G. Ballert, and Hugh J. MacIsaac. 2003. "Ballast-Mediated Animal Introductions in the Laurentian Great Lakes: Retrospective and Prospective Analyses." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 60(6):740–56. doi: 10.1139/f03-053.

Guo, Jiu hao, Yahong Dong, and Joseph H. W. Lee. 2020. "A Real Time Data Driven Algal Bloom Risk Forecast System for Mariculture Management." *Marine Pollution Bulletin* 161:111731. doi: 10.1016/J.MARPOLBUL.2020.111731.

- Hallegraeff, Gustaaf M. 2015. "Transport of Harmful Marine Microalgae via Ship's Ballast Water: Management and Mitigation with Special Reference to the Arabian Gulf Region." *Aquatic Ecosystem Health and Management* 18(3):290–98. doi: 10.1080/14634988.2015.1027138.
- Hamer, John P. 2002. "Ballast Tank Sediments." *Invasive Aquatic Species of Europe. Distribution, Impacts and Management* 232–34. doi: 10.1007/978-94-015-9956-6\_24.
- IMO. 2004. *International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments. International Maritime Organization.* doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- Johengen, Thomas, David Reid, Gary Fahnenstiel, Hugh Maclsaac, Fred Dobbs, Martina Doblin, Greg Ruiz, Philip Jenkins, and Philip T. Jenkins. 2005. *Assessment of Transoceanic NOBOB Vessels and Low-Salinity Ballast Water as Vectors for Non-Indigenous Species Introductions to the Great Lakes.*
- Leppäkoski, E., and S. Gollasch. 2006. *Risk Assessment of Ballast Water Mediated Species Introductions - a Baltic Sea Approach. Report Prepared for HELCOM, Helsinki, Finland.*
- Lv, Baoyi, Yuxue Cui, Wen Tian, Jing Li, Bing Xie, and Fang Yin. 2018. "Abundances and Profiles of Antibiotic Resistance Genes as Well as Co-Occurrences with Human Bacterial Pathogens in Ship Ballast Tank Sediments from a Shipyard in Jiangsu Province, China." *Ecotoxicology and Environmental Safety* 157:169–75. doi: 10.1016/J.ECOENV.2018.03.053.
- Ma, Cheng, Chong Yao, En Zhe Song, and Shun Liang Ding. 2022. "Prediction and Optimization of Dual-Fuel Marine Engine Emissions and Performance Using Combined ANN with PSO Algorithms." *International Journal of Engine Research* 23(4):560–76. doi: 10.1177/1468087421990476.
- Maglić, Lovro, Damir Zec, and Vlado Frančić. 2016. "Ballast Water Sediment Elemental Analysis." *Marine Pollution Bulletin* 103(1–2):93–100. doi: 10.1016/j.marpolbul.2015.12.042.
- McCarthy, S. A., and F. M. Khambaty. 1994. "International Dissemination of Epidemic *Vibrio Cholerae* by Cargo Ship Ballast and Other Nonpotable Waters." *Applied and Environmental Microbiology* 60(7):2597–2601.
- MEPC. 2012. *RESOLUTION MEPC.209 (63) 2012 Guidelines on Design and Construction to Facilitate Sediment Control on Ships (G12).* Vol. 209.
- National Research Council. 1996. *Stemming the Tide: Controlling Introductions of Nonindigenous Species by Ships' Ballast Water.* Washington, DC: The National Academies Press.
- Nichols, D. 2001. "Implications of the Introduction and the Transfer of Non-Indigenous Marine Species with Particular Reference to Canadian Marine Aquaculture." School of Graduate Studies, Marine Studies, Memorial University of Newfoundland.
- Özalp, Teoman. 1977. *Gemi Yapısı ve Elemanları.* İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi Yayınları.
- Özkurt, Özlem. 1999. "Deney Tasarımları ve İstatistiksel Veri Analizleri." İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Pereira, Lucas Soares, Liang Yee Cheng, Gabriel Henrique de Souza Ribeiro, Pedro Henrique Saggioratto Osello, Fabio Kenji Motezuki, and Newton Narciso Pereira. 2021. "Experimental and Numerical Studies of Sediment Removal in Double Bottom Ballast Tanks." *Marine Pollution Bulletin* 168. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112399.

Raaymakers, Steve. 2002. "The Ballast Water Problem : Global Ecological , Economic and Human Health Impacts Paper Presented at the Dubai , UAE 16-18 Dec 2002." 1–22.

Rani Das, Keya, and A. H. .. Rahmatullah Imon. 2016. "A Brief Review of Tests for Normality." *American Journal of Theoretical and Applied Statistics* 5(1):5. doi: 10.11648/j.ajtas.20160501.12.

Sayyad Amin, Javad, Hossein Rajabi Kuyakhi, and Alireza Bahadori. 2019. "Prediction of Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAHs) on Sediment of Caspian Sea Using Artificial Neural Networks." *Petroleum Science and Technology* 37(18):1987–2000. doi: 10.1080/10916466.2018.1496111.

Shang, Lixia, Zhangxi Hu, Yunyan Deng, Yuyang Liu, Xinyu Zhai, Zhaoyang Chai, Xiaohan Liu, Zifeng Zhan, Fred C. Dobbs, and Ying Zhong Tang. 2019. "Metagenomic Sequencing Identifies Highly Diverse Assemblages of Dinoflagellate Cysts in Sediments from Ships' Ballast Tanks." *Microorganisms* 7(8):1–28. doi: 10.3390/microorganisms7080250.

Shiganova, T. A., Z. A. Mirzoyan, E. A. Studenikina, S. P. Volovik, I. Siokou-Frangou, S. Zervoudaki, E. D. Christou, A. Y. Skirta, and H. J. Dumont. 2001. "Population Development of the Invader Ctenophore Mnemiopsis Leidy, in the Black Sea and in Other Seas of the Mediterranean Basin." *Marine Biology* 139(3):431–45. doi: 10.1007/s002270100554.

Takahashi, C. K., N. G. G. S. Lourenço, T. F. Lopes, V. L. M. Rall, and C. a M. Lopes. 2008. "Ballast Water: A Review of the Impact on the World Public Health." *Journal of Venomous Animals and Toxins Including Tropical Diseases* 14(3):393–408. doi: 10.1590/S1678-91992008000300002.

Tang, Ying Zhong, Lixia Shang, and Fred C. Dobbs. 2022. "Measuring Viability of Dinoflagellate Cysts and Diatoms with Stains to Test the Efficiency of Facsimile Treatments Possibly Applicable to Ships' Ballast Water and Sediment." *Harmful Algae* 114:102220. doi: 10.1016/J.HAL.2022.102220.

Wu, Huixian, Chen Chen, Qiong Wang, Junda Lin, and Junzeng Xue. 2017. "The Biological Content of Ballast Water in China: A Review." *Aquaculture and Fisheries* 2(6):241–46. doi: 10.1016/J.AAF.2017.03.002.

Wu, Huixian, Chen Shen, Qiong Wang, Richard B. Aronson, Chen Chen, and Junzeng Xue. 2019. "Survivorship Characteristics and Adaptive Mechanisms of Phytoplankton Assemblages in Ballast Water." *Journal of Oceanology and Limnology* 37(2):580–88. doi: 10.1007/s00343-019-7288-9.

YAZICI, Ayşe Canan, Ersin ÖĞÜŞ, Seyit ANKARALI, Sinan CANAN, Handan ANKARALI, and Zeki AKKUŞ. 2007. "Yapay Sınır Ağlarına Genel Bakış." *Türkiye Klinikleri Tıp Bilimleri Dergisi* 27(1):65–71.

Yonsel, Fatma, Ceren Bilgin Guney, and Devrim Danisman Bulent. 2014. "A NEURAL NETWORK APPLICATION FOR A BALLAST WATER ELECTROCHLORINATION SYSTEM Fatma." *Fresenius Environmental Bulletin* 23(12b):3353–61.

Yuan, Han, Peilin Zhou, and Ning Mei. 2017. "Numerical and Experimental Investigation on the Ballast Flushing System." *Ocean Engineering* 130(December 2016):188–98. doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.12.003.

## Kovid-19 Salgını Döneminde Türk Tersaneleri

Mehmet Tantan<sup>1</sup>, Hatice Camgöz Akdağ<sup>2</sup>, Mehtap Karahalli Özdemir<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> İşletme Mühendisliği Bölümü, İşletme Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

<sup>3</sup> Türkiye Gemi İnşa Sanayicileri Birliği (GİSBİR), Tuzla, İstanbul

<sup>1</sup> (sorumlu yazar), mehmettantan@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1315-4653

<sup>2</sup> camgozakdag@itu.edu.tr, 0000-0002-9818-6012

<sup>3</sup> mehtapkarahalli@gmail.com, 0000-0003-3574-1733

### ÖZET

Dünya çapında etkili olabilecek bir salgın tahmin edilemezdi belki, ama Kovid-19 salgını başladığında koruyucu önlemlerde inisiyatif almak başarı için kritikti. Dünya tarihindeki şimdiye kadar bilinen en büyük salgın olan Kovid-19, sosyal, ekonomik ve politik değişimlere neden olacaktır. Ülke yönetimleri, sivil toplum kuruluşları ve firmalar salgından kaynaklanan ekonomik ve sosyal krizi en az hasarla atlama amacıyla yeni yetenekler ve yetkinlikler geliştirmişlerdir. Bu makale, GİSBİR ve İstanbul Teknik Üniversitesi Akademik personelinin iş birliği ile Kovid-19 salgınının ilk safhasında Türk tersanelerinde alınan önlemleri ve salgının etkisini araştırmayı amaçlamaktadır. İlk olarak, literatür araştırması yapılarak mevcut akademik çalışmalar gözden geçirilmiştir. Daha sonra, GİSBİR bilgi formları, Baltık Kuru Yük Endeksi, tersane sipariş defteri istatistikleri ve istihdam istatistikleri birincil veri olarak değerlendirilmiştir. Tersanelerin İnternet siteleri ve sektör yöneticilerinin raporları ikincil veriler olarak ele alınmıştır. Salgının başlangıç aşamasında yayınlanan kötümser haber, akademik çalışma ve anketlere rağmen, yazarlar Kovid-19'un Türk tersaneleri üzerindeki orta vadeli olumsuz etkisini gösterecek herhangi bir kanıt bulamamışlardır. Baltık Kuru Yük Endeksi 2020'nin ilk çeyreğinde bir düşüş gösterse de ikinci çeyreğin hemen ardından yükselmeye başlamış ve aynı şekilde tersane sipariş defteri istatistikleri de artış göstermiştir. İstihdam istatistiği ise kademeli olarak sürekli yükselmeye devam etmiştir. İyileşme, tersanelerin GİSBİR desteği ile etkin kriz yönetimi ve özel gemi üretimlerine önem vererek, sürekli iyileştirme çalışmalarına, yeşil teknoloji ve sistemlere yatırım yaparak krizin olumsuz etkilerinin üstesinden gelebilmesine bağlıdır.

**Anahtar Kelimeler:** Türk tersaneleri, gemi inşaatı, salgın esnasındaki önlemler, Kovid-19 salgını etkisi.

**Makale geçmişi:** Geliş 28/11/2022 – Kabul 11/01/2023

<https://doi.org/10.54926/gdt.1208340>



## Turkish Shipyards During COVID-19 Pandemic

Mehmet Tantan<sup>1</sup>, Hatice Camgöz Akdağ<sup>2</sup>, Mehtap Karahalli Özdemir<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Department of Management Engineering, Faculty of Management, Istanbul Technical University, Istanbul, Türkiye

<sup>3</sup>Turkish Shipbuilders' Association (GISBIR), Tuzla, Istanbul

<sup>1</sup>(sorumlu yazar), mehmettantan@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1315-4653

<sup>2</sup>camgozakdag@itu.edu.tr, 0000-0002-9818-6012

<sup>3</sup>mehtapkarahalli@gmail.com, 0000-0003-3574-1733

### ABSTRACT

It might be unimaginable to anticipate the pandemic but taking the initiative in measures when Covid-19 occurred was critical to success. However, the impact of this worldwide pandemic, ever known in World History, was predictable. Covid-19, the largest known pandemic in world history, will cause social, economic, and political changes. Country governments, non-governmental organizations, and companies have developed new skills and competencies to overcome the economic and social crisis caused by the pandemic with minimum damage. This paper aims to investigate the effects of the pandemic and the measures taken in Turkish shipyards in the first phase of the Covid-19 pandemic with the cooperation of GISBIR and Istanbul Technical University Academic staff. Firstly, current academic studies were reviewed by conducting a literature search. Then, GISBIR data sheets, Baltic Dry Cargo Index, shipyard order book statistics, and employment statistics were evaluated as primary data. The shipyards' websites and the sector managers' reports are secondary data. Despite the pessimistic news, academic studies, and surveys published during the outbreak's initial phase, the authors could not find any evidence to indicate the medium-term negative impact of Covid-19 on Turkish shipyards. Although the Baltic Dry Index showed a decline in the first quarter of 2020, it rose right after the second quarter, and the shipyard order book statistics increased. Employment statistics, on the other hand, continued to increase gradually. Recovery depends on the shipyards overcoming the harmful effects of the crisis by investing in continuous improvement efforts, green technology, and systems, with the support of GISBIR, giving importance to effective crisis management and distinctive ship production.

**Keywords:** Turkish shipyards, shipbuilding, measurements during the pandemic, the impact of Covid-19.

**Article history:** Received 28/11/2022 – Accepted 11/01/2023

## 1. Introduction

The coronavirus (Covid-19) pandemic spread worldwide incredibly fast and brutally. It has caused one of the worst global crises in world history. More than 500 million people have gotten sick, and more than 6 million died worldwide as of 1 April 2022, (WHO, 2022). World Health Organization (WHO) proposed measures to prevent the virus's rapid spread among the people and nominated the virus as a global pandemic. The governments acted rapidly with strict measures to protect public health. However, these measures deteriorated the economies with partial or complete lockdowns those caused to slow down economic activities and resulted in the cancellation or postponement of purchasing orders and deliveries in many economic and industrial sectors. Travel restrictions prisoned people at home or in limited districts. Travels between countries were banned or limited subject to high restrictions or when duly justified. The air transport of passengers stopped, and the numerous aircraft fleets stayed on the ground idle for many months. The governments prohibited people from traveling between cities within the national borders.

This circumstance resulted in a sharp decline in economic growth and forced companies worldwide to revise their forecasts. Governments issued new incentives to overcome the crises and grants to those who did not work or lost their jobs during the pandemic. The local and global supply chains, macroeconomic systems, and transnational trade relations have been interrupted and will take time to return to "normal as usual" (Sarkis, et al. 2020). The interruption caused delays, postponements, and cancellation of demand and consumption. The same effect occurred in the manufacturing and production plants and flashed fears of approaching monetary concern and recession (Nicola et al. 2020). On the contrary, packaging, delivery, and demand for hygiene products increased four times. In addition, the usage of digital technology improved, and all kinds of meetings and education have occurred through digital platforms like Zoom, Google, Skype, and WhatsApp.

The United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) estimates that commercial ships transported around 11 billion tons of cargo in 2019, 90% of global trade. Maritime trade doubled between 2000 and 2018, assisted by the widespread acceptance of free trade principles, fair competition, and open shipping markets (VanGrasstek, et al. 2021). Any economic crises and drop-in world trade also affect the maritime industry and its related sector. When Covid-19 emerged rapidly, generalized lockdowns, safety requirements, social distancing, personal temperature controls, pre-reporting requirements, sanitation, health restrictions, and remote working to minimize the infection disrupted the maritime industry.

Alamouh et al. (2021) investigated the Covid-19 impact on the maritime supply chain and industry. Ports are considered the central node of the supply chain. More than eight hundred out of 8,292 ports conduct 99 % of seaborne trade (Exportvirginia, 2014). Ports confronted a decline in vessel calls, hinterland transport delays, the shortage of port-related workers, and high capacity utilization of warehousing and storage facilities. The fall in demand and protectionism led shipping to modify its supply and deployed capacity. Changes in port procedures and restrictions resulted in delays for shipping (increases in turnaround time), heightened by disorder in port operations and supply chain disruptions. The cruise ships were blocked in the ports because of the cancellation of reservations. Container ships stayed idle due to decreased demand and port shutdowns (Ozturk & Turan, 2020).

Consequently, shipyards are affected in an operational capacity, supply chain transactions, and demand for new builds. Many shipyards in Europe and East Asia were forced to stop their activities during lockdowns. They had difficulties in delivery since travel restrictions did not allow experts or customer representatives, Kamola-Cieślik (2021). Shipowners cancelled or delayed their new-build

orders, which affects the shipyard's future projections. After that, forecasts decrease, and the shipyards confront financial disruptions and start to lay off workers.

The incidents presented in the above paragraphs indicate that the pandemic occurrence was unpredictable, but taking the initiative in measures was critical to success and survival. It was inevitable that the pandemic would cause social, economic, and political changes. The stakeholders had a pessimistic expectation of the impact of Covid-19 on the world economy and the shipbuilding sector in the start phase. Hence, the administrations and countries confronted the challenge of overcoming the economic and social crisis caused by the expectations and lockdowns. They developed new capabilities and competencies during and post-Covid time.

### 1.1. The aim of the study

Since the World Health Organization (WHO) named the virus Covid-19 and declared it a global pandemic on 11 March 2020, worldwide governments have taken radical measures. After that time, studies about the new virus began to emerge. The subjects were mainly people's medical and health, including preventive measurements. After a while, some studies started to analyze the impact on the regions, industrial sectors, and economies. However, studies about the impact on shipyards and shipbuilding are rare.

This paper aims at the measures and the pandemic's impact on the Turkish shipyards with collaboration between GISBIR (Gemi İnşa Sanayicileri Birliği, Turkish Shipbuilders' Association) and Istanbul Technical University Academic staff. The output of this paper will contribute to the Covid-19 literature by focusing on the shipyards and shipbuilding sector concerning measures and impacts. This paper is unique and fulfills the research gap in that area. The following section reviews the literature on the research area and is followed by the methodology. The third section presents the analyses and results. Section four discusses the outcomes and section five concludes the findings.

### 1.2. The literatur review

The authors searched academic databases Scopus, WoS, and Google Scholar with the keywords "shipbuilding, shipyard, and Covid-19" between 1 January 2020 and 1 July 2021. The search queries resulted in a few articles and conference proceedings about mainly maritime-related studies. The studies targeting shipbuilding were rare. The article lists obtained from databases were merged using Endnote software to eliminate duplicates. The abstracts were filtered, and the full papers were sorted out to form the library for the study. The final findings related to shipbuilding and maritime economics are summarized below.

Yazir et al. (2020) reviewed the impact of Covid-19 on the maritime industry and focused on the tanker, dry bulk, cruiser, and container sectors. They discussed recent industries' development directions and revealed further challenges and potential solutions concerning these four sectors. The study reached two findings. Firstly, the stakeholders, especially cruise industries, confronted operational losses and inconveniences because of health and safety considerations like 14 days of quarantines, investigation, and test procedures. Secondly, adequate Port State inspections based on the International Maritime Organization (IMO) conventions and big data applications could lower possible operational hazards after the pandemic and provide successful turnaround opportunities. In addition, according to Baltic and International Maritime Council (BIMCO) data, the pandemic caused a 55% decrease in new shipbuilding contracts and a 16.7% decrease in ship deliveries in the first quarter of 2020,

corresponding to the same period of the previous year. The decline is 43% in product tankers and 49% in crude oil tankers in the same period.

Holy (2020) wrote that Chinese and South Korean yards confronted a 50% and 81% fall. A Bangladeshi company received 52 order postponements. The order fall was expected to be 26% globally. The Association of Export-Oriented Shipbuilding Industries of Bangladesh (AEOSIB) declared a 120 million USD loss in export orders.

In another study, Reza, et al. (2020) analyzed the Covid-19 impact on the Bangladesh shipbuilding sector. The shipbuilding industry asked for three demands: to pay monthly salaries for each employee, waive utility bills for shipbuilding industries until December 2020, suspend income tax on workers' wages and allowances, and 353.22 million USD loan as working capital with a 2% interest rate for keeping shipyards functional.

Menhat, et al. (2021) reviewed the impact of the Covid-19 pandemic on the Malaysian fisheries, shipping, oil, gas sector, and maritime tourism between January and July 2020. The pandemic substantially impacted maritime sectors regarding business operations, economic and social effects (relating to employability), and global business. Despite negatively impacting the economy and the nation's welfare, the pandemic forced the enterprise to accelerate its capability to respond to disturbances, develop better long-term strategies to deal with uncertainties, and embrace more sustainable approaches.

Millefiori, et al. (2021) analyzed the global nautical traffic data accumulated via a worldwide automatic identification system receivers' network. They compared 2020 mobility levels to prior years, supposing that an intact growth rate would have been performed without Covid-19. From March to June were the most severe restrictions in force. The mobility variances for container ships were between -5.62% and -13.77%. The variance occurred between -19.57% and -42.77% for passenger traffic, between +2.28% and -3.32% for dry bulk, and between -0.22% and -9.27% for wet bulk ships.

Cengiz, et al. (2021) applied a web-based survey among decision-makers in the maritime sector, including shipyard executives and owners. The top three effects of the pandemic were reduced logistics services, reduced investments, and a temporary shutdown. The companies tried to respect the measures but had challenges in maintaining social distancing in the workplace, supplying adequate test kits to test employees, and the absence of personnel who are afraid to be infected in the work area. Teleworking, reducing personnel, and suspension investments were the main strategies of maritime companies. The post-Covid era accelerated the pace of digital transformation, communication skills, and business intelligence. Nearly half of the respondents estimated their revenue would have a decreasing tendency. They emphasized the importance of disaster, crisis management, and the capability to adapt to new normal conditions.

The Covid-19 pandemic period yielded a fall in world trade and subsequent demand for new ships. As a result, only 5 out of 10 Japanese shipyards could receive orders, and the ship recycling volume exceeded the total volume of 2019 in the first half of 2020, (Ilchenko 2021).

Kamola-Cieřlik (2021) discovered that the pandemic hit the operational capability of the shipbuilding sector, the supply chain, and the market for ships. Furthermore, the pandemic affected European shipyards that specialized in constructing cruise ships more than Asian shipyards. While compared to

the previous year, the new ships' orders decreased by 41% worldwide; 906 ships with a value of 38.7 million USD were ordered in 2019, but 532 ships with a total value of 26.7 million USD were ordered until November 2020. In detail, 8.7% in Chinese, 66.7% in Japanese, and 8.4% in South Korean shipyards. The shipyards had to work overtime to arrive at delivery dates because they stopped at the debut of the pandemic. The European shipyards constructing cruise and offshore vessels suffered more than East Asian shipyards. However, the Polish shipyards continued successfully but with a slowdown in their operations due to small companies, diversification in the niche markets, and component producers of the European shipyards. These shipyards extended their production cycles but suffered from disrupting the supply chain of specialized equipment and production material.

The studies referenced above demonstrated that two main research trends have appeared. The first trend is to examine the global effect of Covid-19 by examining the commercial ships' mobility data tracking in dry bulk, wet bulk, passenger, and container ship categories, the executives' future projections and current perceptions based on an online survey, the new build order cancellation and postponement statistics in dry bulk, tanker, container, and cruiser from several secondary data. The second trend is to analyze the micro-level impact on specific regions or countries like European, Asian, Polish, Ukrainian, East Asian, Malaysian, and Bangladesh shipbuilding sectors. The overall view of the preventive measures taken and governmental incentives proposed during the pandemic's start phase. Neither trend contained detailed data or measurement lists. The shipyards' reactions did not exist in the literature too. In addition, the authors determined that none of the manuscripts evaluated Turkish shipyards. Hence, this study positioned in the second trend and fulfills the gap in Turkish shipyard responses, revealing the measurements and the consequences just after the first phase of the pandemic from January to July 2020 with few site cases.

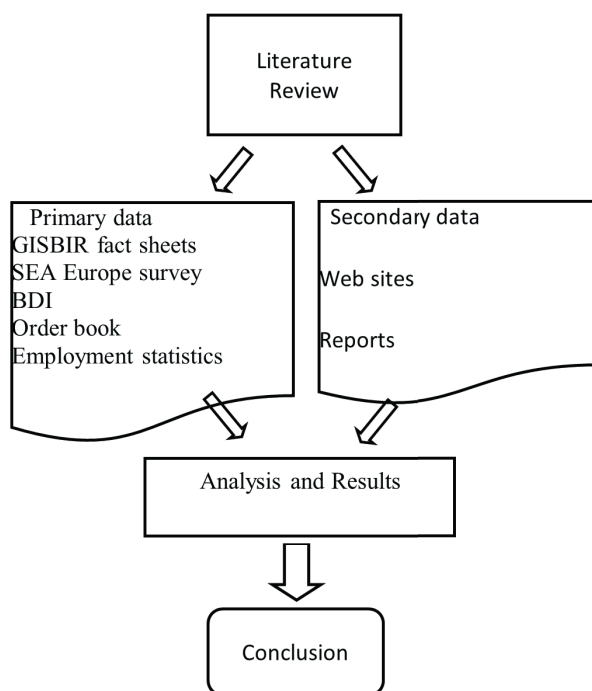
## 2. Methodology

The methodology depends upon the objective of the study. The empirical analysis depends on evidence acquired through observation or scientific data collection methods. Since the study focuses on the covid-19 pandemic, its measures, and its impacts on the Turkish shipyards, the authors conducted an empirical methodology using both qualitative and quantitative research approaches, as shown in Figure 1. GISBIR took a critical role because 90% of shipyards are a member of this association. GISBIR took a coordinating role in this study to obtain primary data (GISBIR fact sheets, SEA Europe Survey, Baltic Dry Index, Order Book, Employment Statistics). Turkish shipyards' websites provided the necessary information for the measures taken during the pandemics' first phase as secondary data. Then, the authors defined the GISBIR fact sheets, the Baltic Dry Index, ship order books, the Sea Europe survey, and employment statistics as research variables for the quantitative part of the study.

Shipyards' websites and available public reports of the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), International Chamber of Shipping (ICS), and Baltic and International Maritime Council (BIMCO) concerned as secondary data sources.

The Sea Europe survey revealed the executive's recognition and expectation during the first phase of the pandemic. BDI, the shipyard's order book, and employment statistics are determinant factors of this study. BDI describes the direct impact of the current market expectations for the future. The shipyard's order book reflects the current and future workload of the shipyards and is directly related to BDI. Any decrease reflects a recession in the sector. The employment statistics represent the social

effects of the pandemic because shipbuilding is a labor-intensive industry and reacts rapidly to the existing shocks and future expectations in BDI and order books.



**Figure 1.** Methodology of the study

### 3. Analyses and Results

#### 3.1. Turkish shipyard's situation during the pandemic

Turkey formed the Coronavirus Scientific Advisory Board as an advisory committee to the Presidential Government regarding WHO propositions on the pandemic. The Minister of Health and Minister of Interior declared the measurements. Turkey applied a partial and transitional lockdown policy by starting the control measures with thermal cameras and travel limitations to China and Iran. Also, in March 2020, most international flights were suspended, all schools and universities started online courses, and a curfew started for those under 20 years and older than 65. In addition, all religious buildings were closed, (Guner, et al. 2020).

Turkish shipyards are small or medium-sized private companies and work multipurpose. They construct new ships and offer conversion, repair, and maintenance services. In 2019, Turkey was the 11th biggest global shipbuilding industry in nautical vessel completions and reached 268.578 compensated gross tons. Turkish shipyards are constructing a wide range of trawlers, tugs, passenger ferries, tankers, offshore service vessels, gas and bulk carriers, and hybrid-and electric-powered vessels. Furthermore, Turkey has an essential share in the global ship repair, maintenance, and recycling industry (OECD 2021).

The shipyards organized under the GISBIR is the Turkish Shipbuilders' Association. GISBIR was established in 1971 as one of the oldest NGOs in Turkey. GISBIR works as a meditative and coordinative body between the shipyards and other stakeholders. GISBIR has ninety-eight active corporates and actual person members, 90% of all shipyards and owners. The following subsection summarizes the role of this association during the pandemic.

## 3.2. Primary data

### 3.2.1. GISBIR fact sheet

The International Maritime Organization (IMO) circulated several letters and guided member states and their ports and shipping industries to ensure resilient shipping and maritime trade and the safety and security of seafarers, Alamoush, A.S. et al.(2021). They emphasized providing access for ships to port berths, with no restriction on loading and unloading cargoes and facilitating crew changes (IMO., 2020). United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) secretariat produced a technical note that contained guidelines to enforce and follow a set of measures. The focus was on keeping supply chains, letting continuous maritime trade, and taking other measures to protect all personnel, UNCTAD. (2020). The International Chamber of Shipping (ICS) published many brochures for the hierarchy of control measures to achieve adequate safety control and risk reduction. These brochures were easy to read and explicitly demonstrated the measures with necessary illustrations (ICS, 2020).

In general, guidelines and safety measures were about preventive hygiene measures (handwashing), limitation of physical interaction and contact using radios and telephones, social distancing, personal protective equipment (PPE), sanitation of surfaces, control points to monitor temperature/symptoms, fumigation and disinfection of vulnerable port areas, cargo, and trucks, and boosting the use of digital documentation and other digital technologies to reduce human contact, Alamoush, A.S. et al.(2021).

GISBIR prepared in coordination with the instructions and guidelines published by the WHO, UNCTAD, ICS, IMO, Turkish Ministry of Health, and other administrative bodies and distributed detailed specific Guidelines for Shipyards. Furthermore, during the pandemic, the GISBIR Occupational Health and Safety Commission met regularly to evaluate implementation in shipyards, updated measures, and informed SEA Europe regularly about the latest situation. The main measures in the fact sheets are presented below:

- Social distance
- HES code to follow Covid case and affiliations.
- Teleworking or flexible working hours, especially for the white collars, and shift hours for the blue-collars
- Hygiene, disinfection, and daily cleaning services improvements, especially in closed areas like using the masque
- 14 days of quarantine rule and crew control measures for arriving ships from abroad
- Decrease active population in shipyards by increasing shifts
- Extra precautions and limitations on recreation areas
- Personnel service shuttle capacities were reduced to half
- Deployment of thermal measures at entrances and disinfectants at necessary points
- Informative notices are provided on boards and in public areas
- Extra precautions on food supply and shipyard cafeterias include using plastic plates and cups in restaurants and serving pre-packaged meals during lunchtime.

The HES principle is applied; HES stands for "Hayat Eve Siğar" in Turkish, meaning "Life Fits into Home." During controlled social life conditions, the HES code helped track the people and follow the affiliations for the treatment and quarantine issues. The code is usually used in travel, visits, and shopping activities while entering buildings, universities, and schools. Hence, the HES code is applied at the entrances of each shipyard. GISBIR actively followed the relevant publications for Covid-19 measures of several organizations and disseminated them to its members daily from February 2020. These organizations are international and national; WHO, IMO, ICS, Ministry of Transport and Infrastructure, Ministry of Interior, Ministry of Environment and Urbanization, Ministry of Health-Science Committee, and IMEAK Chamber of Shipping.

GISBIR performed additional studies and training activities during the pandemic. The training activities provided the necessary training sessions for the Covid-19 measures to the shipyards. The required documentation was released and circulated to members; it explained the actions to be taken by the shipyards based on the advice released by the Ministry of Health-Science Committee. The fact sheet "Covid-19 Work-Based Employer and Employee Rights" about the legal consequences and the report "Financial Measures on Effects of Covid-19" analyzing the financial impact of the measures declared by National Authorities are the primary studies prepared by GISBIR consultants. These documents notified the shipyard's management and became a reference for the measures inside the shipyards.

The reflections of the measure for shipyards are mostly strict rules about hygiene, social distancing, and flexible working time to reduce the number of personnel in the closed areas. For example, the application in the British Aerospace systems is a form of flexible working called 'smart working on the office side of their naval ships' workplaces. Smart working enabled staff to design their working patterns and manage their working hours around 'the core hours of 10 am-2 pm. Workers on the manufacturing side worked their total contracted hours on adjusted shift patterns, with staff spread across staggered shifts to facilitate social distancing. New health and safety measures include one-way walk systems, ground markings to ensure social distancing, new site induction processes, and cleaning staff's trembling, (Jung, et al. 2020).

### 3.2.2. SEA Europe survey

SEA Europe prepared an expectation survey in the first phase of the pandemic and provided complementary information about the Turkish shipyard executives' perspectives and recognition. The survey started with demographic questions about the company's core activity and size. Eighteen subscales followed two scales. The answers were two types of multiple choices: "moderate, substantial, very strong, I do not know" and "none, below 10%, 10%-30%, 30%-50%, above 50%". The first main scale questioned the tangible impacts experienced in the company, whereas the second one questioned the expected impact for the first half of 2020. The subscales include the supply chain disruption, Production/Repair delay, Labor shortage, Design/production regulatory-related impact due to expected delayed delivery of ships, Contracting and sales anticipated reduction (in March compared to your forecast), and Turnover anticipated reduction and Liquidity.

GISBIR applied the survey to its member through email. Fifty-one shipyards responded to the survey. The response rate is 75% in general but 50% in several subscales. The result was published as descriptive statistics, (GISBIR 2020). In Table 1, 26 of 51 respondent shipyards reported that their main business activity is new shipbuilding. The remaining shipyards have repair, conversion, maintenance, and other activities. Therefore, the order book data reflected only half of the activity of the existing shipyards.

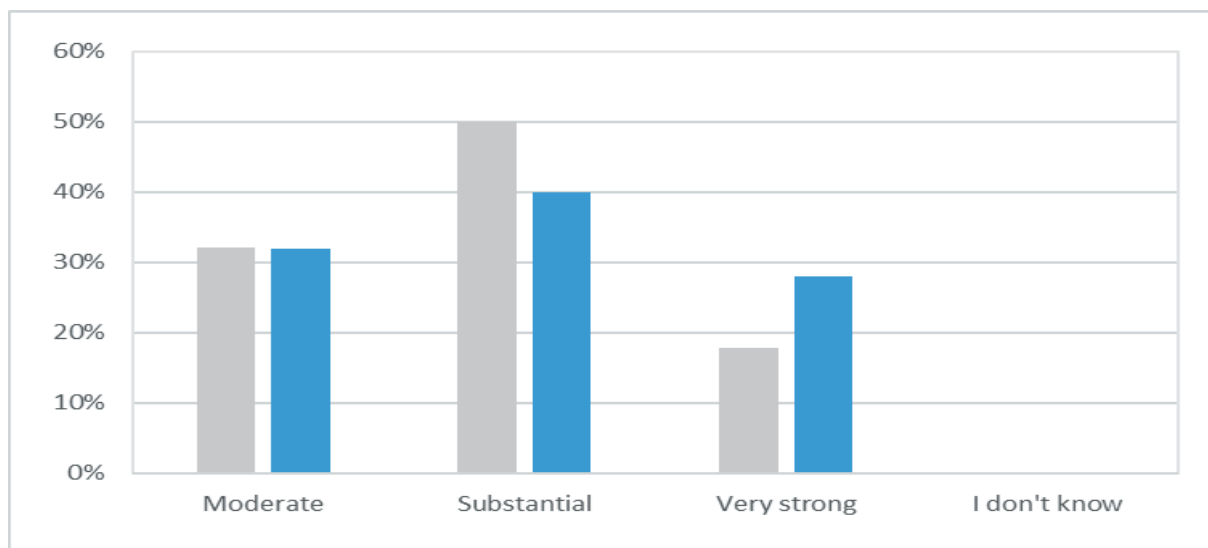


The authors selected three related figures of eighteen figures from the survey. Gray-colored columns represent the substantial impact and blue for the expected impact of the pandemic. Travel restrictions, quarantine, and curfew halted the suppliers and technical services in the different countries and disrupted the supply chain.

**Table 1.** Shipyards’ business activity

Answer Choices	Responses (%)	Response (qt.)
Newbuilding	51%	26
Ship repair, conversion, and maintenance	35%	18
Others	14%	7

Delays and cancellations occurred in sending and controlling parts and equipment. This concern may force the shipyards and customers to revise the delivery time for the ongoing ship construction projects. Executives faced these substantial disruptions and expected a more challenging situation in the first half of 2020, as shown in Figure 2.

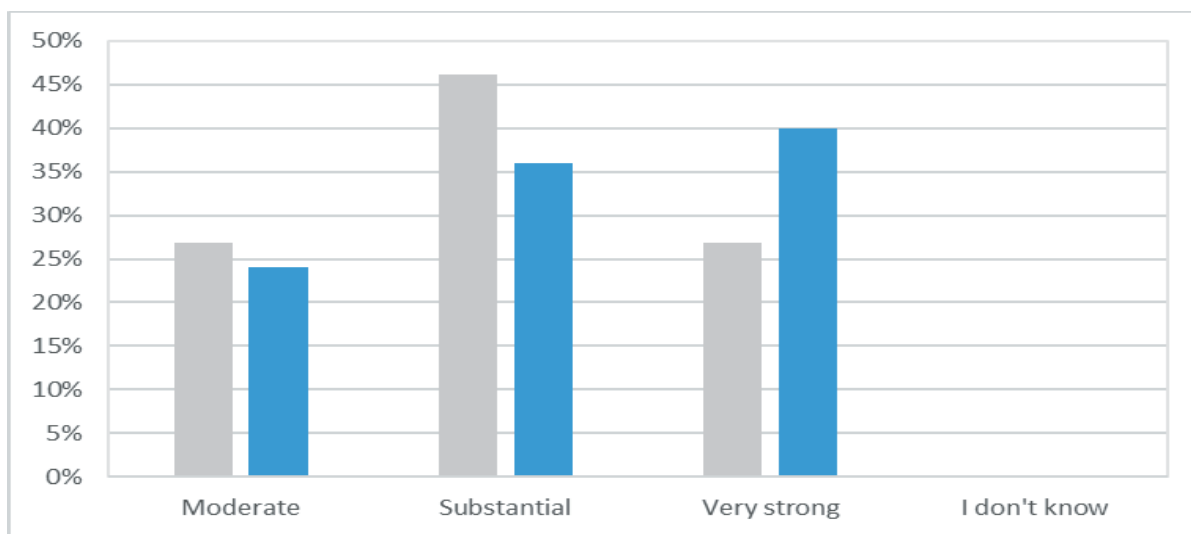


**Figure 2.** Disruption of the supply chain

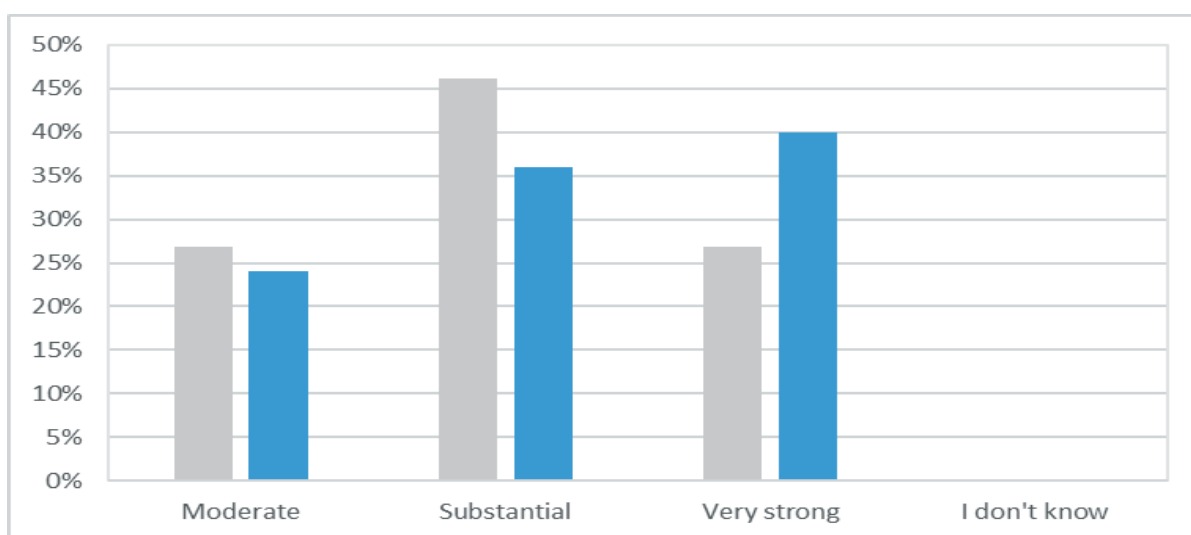
If the supply chain does not function well and punctuality disappears, production and repair work delays become a fact. Figure 3 represents this, where executives maintain pessimistic opinions regarding the current situation. There is a shift of concern from the current situation, and future expectations about the delays will become stronger than substantial.

During economic recessions and crises, investors postpone or cancel their orders. Similarly, the pandemic obliged the companies to revise their future contract and sales budgets. Figure 4 depicts this fact accurately in a pessimistic view. The executives have already confronted quite a high contract and sales reduction and expect to continue in the midterm.

The executives had a pessimistic reflection. Generally, that is understandable in the start phase of the pandemic because of uncertainty and many pessimistic scenarios in public. The Baltic Dry Index, the shipyard's order book, and employment statistics are indicators of the market reaction. They will help interpret the Turkish shipyard's performance during the pandemic and compare it with the expectation survey.



**Figure 3.** Production / Repair delay

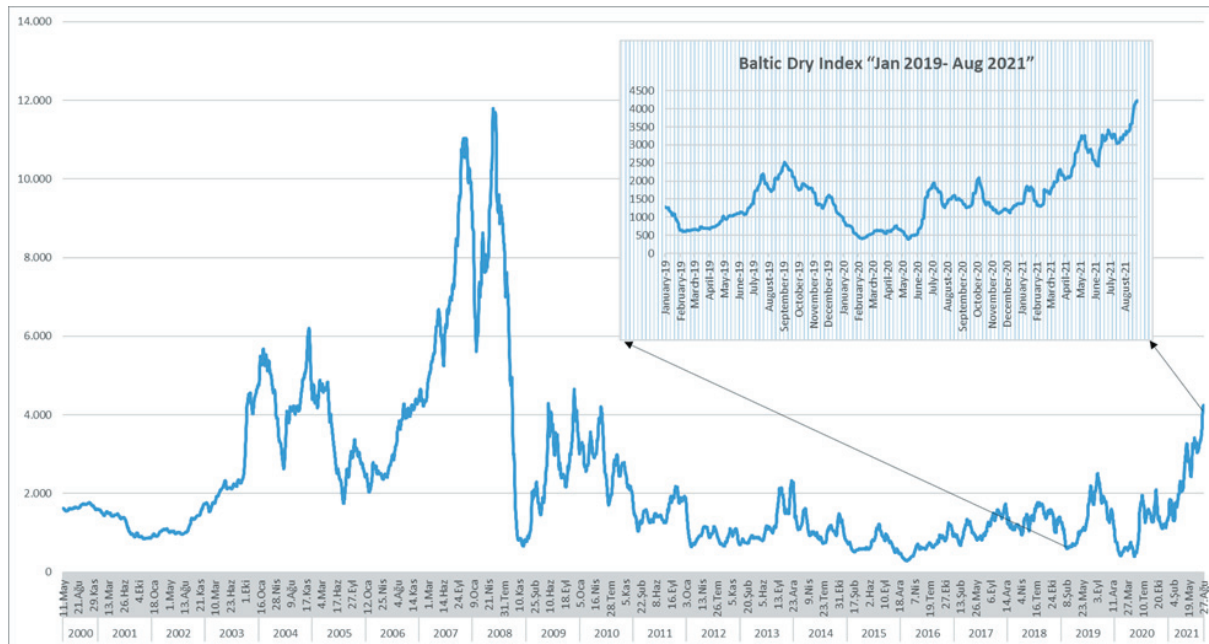


**Figure 4.** Contracting and sales anticipated reduction

### 3.2.3. The market behavior, Baltic Dry Index (BDI)

The drop-in world commerce and investments caused economic stagnation and affected the Baltic Dry Exchange Index (BDI), a leading arrow of the economic transaction; shifts in the BDI reveal the supply and demand for basic materials used in manufacturing. A shift in the BDI can provide investors insight into global supply and demand trends. The increase is assumed to be a positive indicator of future economic growth, (Kopp 2021).

The higher freight rates have ensured new ship orders for the shipyards historically. So, BDI is a determinant variable for new shipbuilding. When the BDI increases, the ship owners tend to order new ships, which means the trade increases and demand for further ships increases. When the BDI falls, the trade will decrease, and the supply of the ships will reach the market demand, which means fewer orders for the new ships. The drop may be an opportunity for the ship owners to scrap or recycle/reuse/reduce old ships and renew their fleets, (Hess, et al. 2020).



**Figure 5.** Baltic Dry Index May "2000- Aug 2021", (GİSBİR, 2021)

However, Başer, et al. (2018) questioned the relationship retard of the shipbuilding building with the cargo prices. They selected the total completed tonnage as the indicator of the shipbuilding market and the BDI as an indicator of the cargo prices. They hypothesized a lagged relationship between these indicators, whereas the ship deliveries accumulated for 1 to 3 years, theoretically. Two years later, a relatively high positive correlation was found between the completed tonnage value and cargo prices. Positive relationships were found in correlation and regression models using lagged values. The 10% shift in the cargo prices yielded a 1.2% shift in the two years lagged value of total completed tonnage regarding the regression model.

Xu, et al. (2008) wrote that the shipbuilding design, construction, and commission phases took a long before service. A new vessel delivery time will be between one and a half to two years concerning the different market situations. Therefore, the timing of the investment decisions is critical. Wrong timing of shipbuilding can turn the possibility of profits into heavy losses and lead to the closure of the business.

If the BDI chart in Figure 5 is analyzed, the drop in 2020 was not sharp as in 2008, when the big financial crises occurred in the United States of America (USA). BDI fell sharply from 11.793 on 20/05/2008 to 663 on 5/12/2008. BDI started to recover in February 2009 with a three-month steady increase followed by a month's smooth fall and stayed stable until the end of 2010, around 3.000 but never reaching the peak value of 11.793 went 20 May of 2008. Therefore, it can be concluded that the pandemic's financial impact was not severe as big financial crises, although a curfew was applied in many countries. The main reason may be the governmental support and incentives to the public rather than the financial sector, which was supported during the economic crisis of 2008.

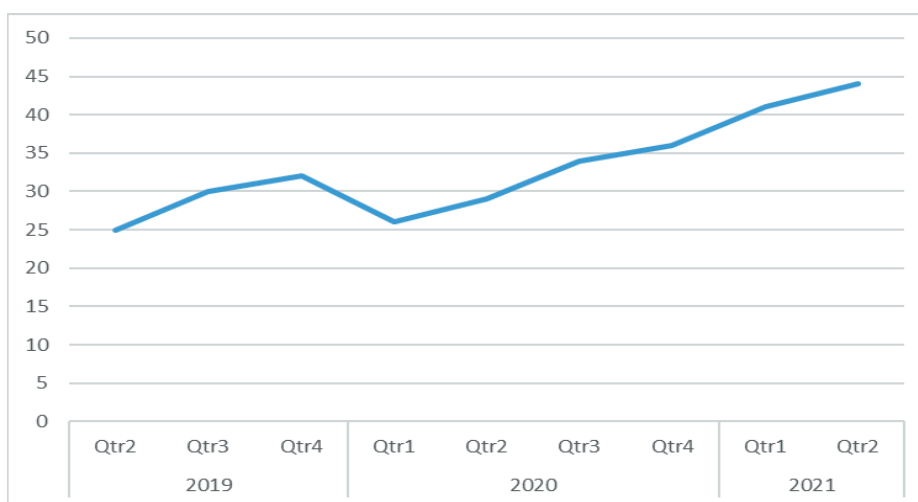
Before the pandemic, BDI started an undulant and decreasing movement at the beginning of September 2019. After the pandemic, BDI decreased to 411 on 10/02/2020, increased slightly to 757 on 20/04/2020, and dropped to 393 on 14/05/2020, the lowest level in 2020. Then BDI faded up undulant, reaching 4.235 on 28/08/2021. The lowest index was 293 on 05/02/2016 since 01/01/2000. The BDI graph justifies that Covid-19 affected the shipbuilding sectors negatively in the short-term but not in the mid-term because BDI reached the peak of 5.650 on 07/10/2021.

### 3.2.4. The Turkish shipyard's order book

The order book of the shipyards is the second database related to the BDI and reflects the consequent effect of the pandemic. Since order books are not open-access documents, GISBIR provided these data for the article in a quarterly format. However, the order of naval ships, tugs, small fishing vessels, small offshore vessels, and superyachts is considered. Therefore, the order book reflects only a part of the shipyards' activity.

Figure 6 shows the order quantities from the second quarter of 2019 until the second quarter of 2021. The order book quantities increased steadily, although a drop during the curfew in the first quarter of 2020 occurred. After that quarter, order quantity increased and peaked at 44 orders in the second quarter of 2021. The order quantity data show that the pandemic created a shock wave in the industry, but an increasing trend has started. OECD (2021) report similarly stated that the shipyards had not significantly delayed new building and repair projects but a slight slowdown. No order cancellations have been reported during 2020. In the data sheets, some delivery dates have been revised. These revisions were not specified, but each case might have its cause. However, the significant delays caused by main engine and equipment delivery, quarantine procedure of shipyards' personnel, the closure of frontiers, and travel restrictions, blocked specialists and technicians from accessing and controlling the ships during the construction phase.

Turkish shipyards did not stop the activities like those in East Asia and Europe due to the successful application of measurement and coordination between shipyards and administration. As a result, they gained a competitive advantage "to work" during the pandemic and managed to keep the current orders and gain new ones.



**Figure 6.** Turkish Shipyards Order Book "Jan 2019- June 2021", (GISBIR, 2021)

OECD (2021) report indicated that there were 151 vessels in the order book. The difference in quantity between the OECD report and the GISBIR report is the tugboat orders. 70% of the total number of vessels in the order book are the tugboats that are not taken into account in the GISBIR order book.

However, the order book does not support sufficient information for the performance during the pandemic because, firstly, naval ship construction orders do not exist in the list. Secondly, nearly half of the Turkish shipyards worked on repair and conversion projects. In addition, GISBIR informed that in 2019-2020, shipyards completed 350+ Ballast Water Treatment (BWT) systems and 130+ Scrubber

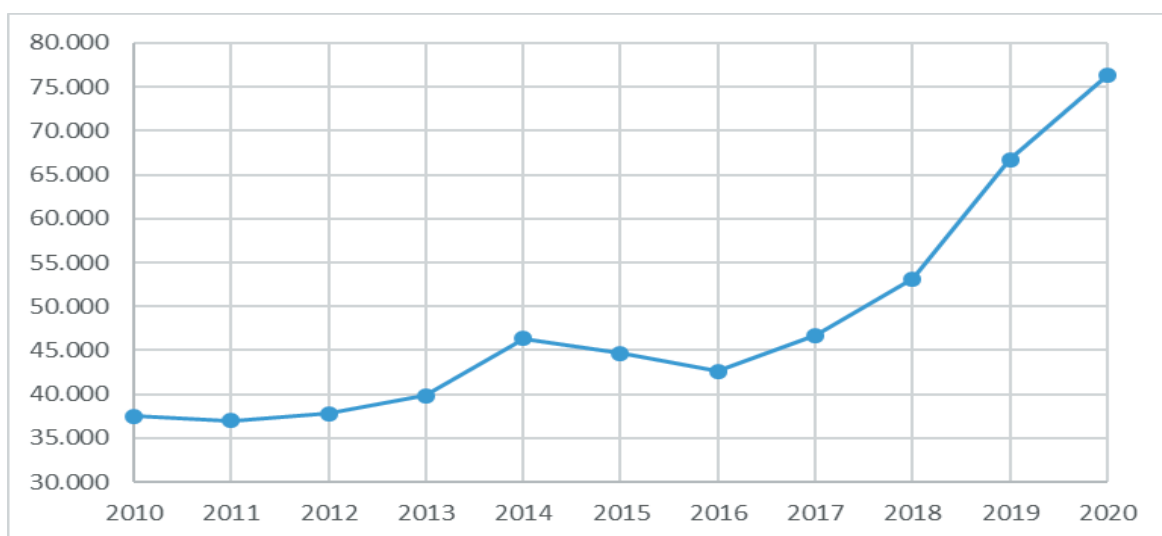
equipment within the scope of the recently increasing retrofit needs related to repair and maintenance, and Turkish shipyards have gained significant success and global awareness.

### 3.2.5. The employment statistics

The employment statistic has been considered as the complementary variable of this article. When BDI increases, new investment projects like new-build, repair, maintenance, and conversion will increase. Consequently, shipyards will start to work with high utilization and invest in personnel, construction material, and workshop facilities; they will hire new personnel.

So, the increase in BDI will result indirectly in an increase in employment numbers. The relation is positively proportional and does not imply a dependent time lag like new shipbuilding orders. The first and easy part of sacrificing any business activity is the blue-collar and white-collar workers. It should be noted that direct employment was the shipyards decreased from a peak of 34.000s to 19.000s in several weeks of the 2008 big financial crisis. A similar event has never occurred during 2020.

In addition, most Turkish shipyards work with an extensive supplier pool. They keep a core team to sustain the minimum requirements and tasks; other tasks are subcontracted to the suppliers. With this strategy, shipyards can flexibly arrange their workforce according to the existing and forecasting projects and benefit from the suppliers' experience and know-how at a specific task.



**Figure 7.** Number of Workers Employed in Shipbuilding and Sub-Industry, (GİSBİR, 2021)

Figure 7 depicts the total number of employees working in the shipbuilding industry. Data include the declared employees of both shipyards and their suppliers, like outsourcing companies, subcontracting teams, consultants, and specialized technicians. Since all employees must be reported to Social Security Institution (SGK), this graph is the most reliable information to justify the impact of Covid-19 on the shipyards. Employment data was obtained by indexing the selected occupational codes of the employees in the SGK database. The chart's x-axis is annualized to eliminate duplicate and overlapping entries. The steady increase in the chart is positively proportional to the BDI index and shows the continued growth in the sector. Therefore, the change in the sector roots the growth in the sector's business activity, and the impact of the Covid-19 pandemic is not seen in the employment statistics.

### 3.3. Secondary data

#### 3.3.1. Shipyard's web sites analysis

After overiewing the 68 shipyards' websites, the authors found that Cemre shipyard, Ereğli shipyard, Gemak shipyard, Sanmar Shipyard, and Mengi Yay shipyard published the preventive and action plan for Covid-19 measures list with related photos of disinfection and entry control. They stressed the employees' health, re-organization of familiar places like restaurants, work floor, business meetings on the digital platform, 14-day quarantine procedure for the visitor from abroad, and HES code application for employers and visitors. Those actions were by the GISBIR proposed measures lists, (Cemre 2020), (Eregli 2020), (Gemak 2020), (Sanmar 2020), and (Yay 2020). It can be concluded that shipyards had followed the Covid-19 measurements with the coordination of GISBIR and pursued a successful policy, as cited in the (OECD 2021) report.

Furthermore, Sanmar (2020) became a successful Covid-19 measure implementer with its success story of delivering 30 tug boats, a record of all time in 2020. The customers ranged from Turkey, the United Kingdom, Canada, Italy, Germany, Latvia, Oman, Seychelles, the United Arab Emirates, to Panama. Sanmar executives recognized the pandemic threat and took all necessary measures to decrease the impact of Covid-19. They emphasized employee safety as a top priority and ensured the work "continued" without disruption. As a result, the company kept its existing customers and gained new orders in 2020. In the second example, Tersan (2020) reported its successful delivery process of a 74 mt long trawler to its Canadian customer. The delivery process was stuck in the travel restriction during the pandemic's first phase. Both shipyards, and the customer, tackled hard to get permission from the Turkish administration for a crew charter flight. When the crew arrived in Turkey, they were moved to the ship under severe Covid-19 measures and contacted nobody. The ship was evacuated in the same manner before the crew's arrival. That trawler, Calvert, was the first ship exported during the Covid-19 period.

These two examples above indicate how the dynamic Turkish shipyards challenged the pandemic, overcame this threat, and turned it into an opportunity to obtain a competitive advantage in the highly competitive global market.

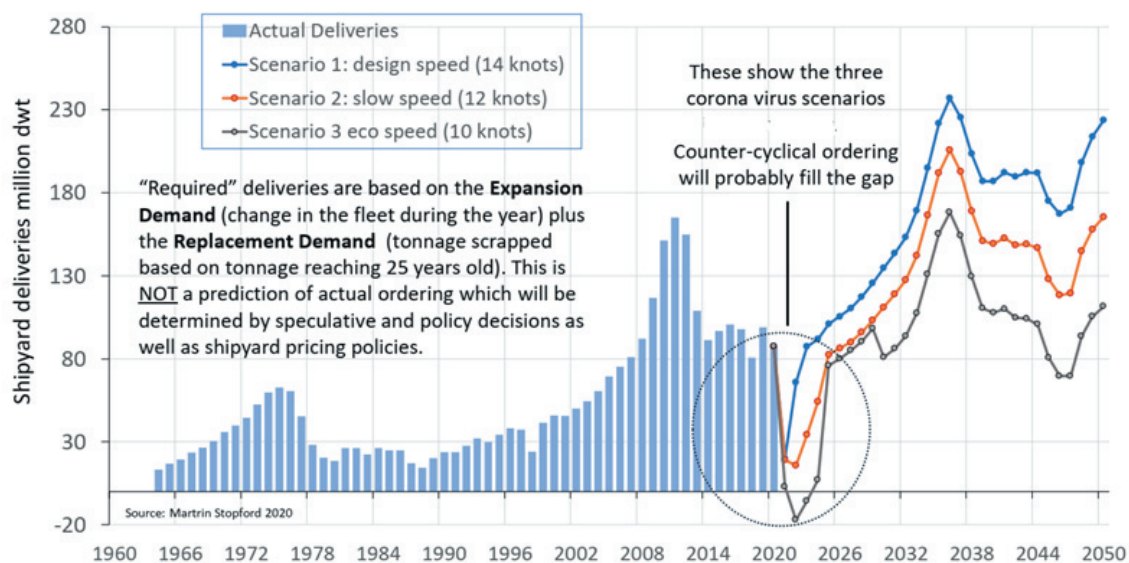
#### 3.3.2. Reports

The OECD (2021) mentioned that the Turkish shipyards successfully applied the pandemic measures, avoided cross-infection between the vessel and shipyard personnel, and reported fewer issues than similar sectors.

Stopford (2020) overemphasized this circumstance and analyzed long-term scenarios to incorporate the pandemic. He studied the shipping cycles between 1885-2020 and summarized recessions into two categories. The most severe shipping recessions/depressions during that period included a shipbuilding boom followed by a fierce trade slump in the first category. There was no shipbuilding boom in the second category, but the demand side was taken into account from the worst economic issues, and the reasonable recession carried on. This coming recession may be classified as category two because the shipbuilding sector faces this recession at the end of a long-term contraction. Industry 4.0, digitalization initiatives, new greenhouse gas (GHG) emissions measures, and support for research and development primarily for Europe may create new prospects for investors.

Stopford developed three scenarios of the global sea trade and then derived three related scenarios for shipbuilding. The main assumptions are the three average fleet speeds, 10, 12, and 14 knots, and a 40% increase in the average ship size between 2020 and 2050. Stopford expected shipyards to confront a crash in new-build orders in the short term. In Figure 8, the blue bars indicate the realized ship's delivery in a million deadweight tons between 1960-2020. The estimation after 2020 consists of the expansion demand plus the replacement demand due to the scrap ships older than 25 years old. However, he emphasized that the actual order depends on speculative and policy decisions that affect the shipyard's pricing policies. There are three economic and two technical factors of the downturn and presented below:

1. The impact and timing of the coronavirus pandemic on the ship demand cycle.
2. The ongoing impact of climate change regulations on ship demand.
3. Shipbuilding new orders, prices, and capacity management.
4. The timescale for introducing zero carbon ship propulsion systems.
5. The timescale for digital technology in ships, companies, and logistics.



**Figure 8.** Three shipbuilding scenarios showing actual deliveries to 2019 and “required” deliveries scenarios 2020-2050, Stopford (2020)

#### 4. Discussion

In March-April-May 2020, when the effects of Covid-19 were most intense, difficulties arose regarding working order, communication, and supply chain disrupted by the pandemic conditions. GISBIR reached its members with a detailed survey in April 2020 and studied the current situation and expectations for the near future. Uncertainties and total curfew were the main concerns among GISBIR members. The seriously and properly implemented measures and good coordination with local, national, and international stakeholders gave positive results, such as preventing mass infection of the virus. The measures allowed us to focus on the main activities, rapid adaptation to the usual conditions, and continue to work without any stop like the other shipyards in East Asia and Europe.

It should be noted that shipyards did not get any incentives from the government. The sector omitted the six-month delay in tax and duty payment, (GISBIR 2020). Although in the report of (Stopford 2020), the pessimistic expectation result of the SEA Europe survey and other articles discussed in the literature section, the authors did not find any evidence to justify the short-term negative impact of Covid-19 on the Turkish shipyards. The BDI undulant increased since mid of 2019, and the employment numbers of Turkish shipbuilding (shipyards and suppliers) have increased steadily since the big financial crisis in 2008. The order book fell slightly in the second quarter but rose in the last quarter of 2020. However, the order book has two deficiencies. First, these data do not cover all the shipyard activities, half of which have repair, maintenance, and conversion activities. Secondly, the order of the naval vessel, superyachts, and tug boats was not considered in the order book. In compliance, these factors describe a rapid recovery or continuous improvement.

Özhan Doğan, et al. (2020) stated that Turkish shipyards gave importance to the production of customized ships following the market's demand to overcome the global economic crisis's negative consequences. Shipyards are producing more efficient and faster vessels with continuous improvement efforts. The OECD (2021) report concluded that, like other shipyards worldwide, Turkish shipyards confronted the threat of a decline in new-build orders in 2020. However, environmental regulations encourage the demand for retrofitting ships and eco-friendly vessels. This circumstance provides golden opportunities for Turkish shipyards and marine equipment suppliers.

## 5. Conclusion

Since shipyards are working in an international environment, the restrictions and measures published by International Organizations and local administrations converged to equivalent levels. The global economic slowdown was an adverse effect that may disrupt the shipyards by order cancellation and halting due to the lockdowns and delays in the supply chain. Governmental subsidies to the shipyards become essential to success during that time. Some shipyards in Europe and East Asia forced temporary stops, but most used distance working and teleworking methods and suffered efficiency losses that caused delivery delays. However, east Asian shipyards, which have been receiving government subsidies for years, are in a better situation than European shipyards, Kamola-Cieślík (2021).

On the contrary, Turkish shipyards did not stop their activities compared shipyards East Asia and Europe. They successfully delivered new ships to their customers, respecting both local and international measures, Sanmar, (2020) and Tersan, (2020). Furthermore, there is no justification that Covid-19 affected the shipyards in the short term. There was indeed a shock, but they rapidly recovered due to the shipyards' effective crisis management with GISBIR and the ability to overcome the crisis's negative impact. The success factors may be quantitative, qualitative, or intangible, but it lies in the shipyards' independent, dynamic and fragmented structure. Although the shipyards were not supported by governmental incentives like those in East Asia, they could put their presence in that highly competitive global market. In conclusion, there is no justification that Covid-19 affected the shipyards in the short term. There was indeed a shock, but they rapidly recovered due to the shipyards' effective crisis management with GISBIR and the ability to overcome the crisis's negative impact. The success factors may be quantitative, qualitative, or intangible, but it lies in the shipyards' independent, dynamic and fragmented structure. Although the shipyards were not supported by governmental incentives like those in East Asia, they could put their presence in that highly competitive global market.



In future research, the mid-term impact of Covid-19 on Turkish shipyards should be examined. The financial crisis in 2008 and its effects on the Turkish shipyards should be compared to the Covid-19 pandemic. The same study should be the extent to European shipyards respecting the same methodology and compare with this study.

## Abbreviations

WHO: World Health Organization; UNCTAD: United Nations Conference on Trade and Development; GHG: greenhouse gas; BDI: Baltic Dry Index; OECD: Organization for Economic Cooperation and Development; ICS: International Chamber of Shipping; BIMCO: Baltic and International Maritime Council; GISBIR: Türkiye Gemi İnşa Sanayicileri Birliği (Turkish Shipbuilders' Association); IMO: International Maritime Organization; HES: Hayat Eve Sığar (Life Fits into Home); SGK: Sosyal Güvenlik Kurumu (Social Security Institution)

## Acknowledgements

The authors would like to thank GISBIR for collecting and contributing data to this study.

## References

- Alamouh, A.S., et al. (2021), Ports, maritime transport, and industry: The immediate impact of COVID-19 and the way forward. *Maritime Technology and Research*, <https://doi.org/10.33175/mtr.2022.250092>.
- Başer, S. Ö., and Açık, A. (2018). The Response of Shipbuilding Activities to Freight Market, *Uluslararası İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi* 4(1), pp.124-136
- Cemre, S. (2020). Fighting Against Covid-19: Cemre Shipyard Action Plan. [WWW] <URL: <https://www.cemreshipyard.com/en/news/fighting-against-covid-19-cemre-shipyard-action-plan>> [Accessed 08/08/2021.]
- Cengiz, H., and Turan, E. (2021). Business Impact of Covid-19 Pandemic on Global Maritime Industry, *Journal of Naval Sciences and Engineering* 17(1), pp.43-75
- Eregli, S. (2020). Ereğli Shipyard Covid-19 Measures. <URL: [www.ereglishipyard.com/detay-217-eregli-shipyard-covid-19-measures.html](http://www.ereglishipyard.com/detay-217-eregli-shipyard-covid-19-measures.html)> [Accessed 08/08/2021.]
- Gemak, S. (2020). Gemak Preventive Actions Against Covid-19. <URL: [www.gemak.com/newsDetails.aspx?q=46](http://www.gemak.com/newsDetails.aspx?q=46)> [Accessed 08/08/2021.]
- GISBIR (2020). Covid-19 Measures and Effects on Shipbuilding Industry in Turkey. GISBIR. Istanbul, Turkey: GISBIR
- GISBIR (2021). Baltic Dry Index Historical Data, Ship Order Book Statistics, Employment Statistics, GISBIR. Istanbul, Turkey: GISBIR
- Guner, R., Hasanoglu, I., and Aktas, F. (2020). Covid-19: Prevention and control measures in the community, *Turk J Med Sci* 50(SI-1), pp.571-577
- Hess, M., Pavić, I. F., Kos, S., and Brčić, D. (2020). Global shipbuilding activities in the modern maritime market environment, *Scientific Journal of Maritime Research* 34(2), pp.270-281

Holy, I. J. (2020). Beyond Coronavirus: The Next Phase for Shipbuilding Industry. [Accessed 19/07/2021] <URL: [www.lightcastlebd.com/insights/2020/07/beyond-coronavirus-the-next-phase-for-shipbuilding-industry](http://www.lightcastlebd.com/insights/2020/07/beyond-coronavirus-the-next-phase-for-shipbuilding-industry)>.

Ilchenko, S. V. (2021). Conceptual Aspects of Achieving Competitive Advantages by Shipbuilding Enterprises of Ukraine, *Economic innovations* 23(1(78)), pp.84-94

IMO. (2020). Circular Letter No.4204/Add.6 - 27 March 2020: Preliminary list of recommendations for Governments and relevant national authorities on the facilitation of maritime trade during the COVID-19 pandemic. International Maritime Organization.

ICS, (2020) Shipping, T.I.C.o., Covid-19-protecting-everyone-during-ship-visits and other brochuers.

Jung, C., Statham, R., and Roberts, C. (2020). The Covid Shift Working Time in Manufacturing, Engineering, Shipbuilding and Aerospace after the Pandemic. The IPPR Centre for Economic Justice. London, England: IPPR

Exportvirginia. (2014). Seaports of the world by country. Retrieved from <http://exportvirginia.org/wp-content/uploads/2014/04/Seaports-of-the-World.pdf>

Kamola-Ciešlik, M. (2021). Changes in the Global Shipbuilding Industry on the Examples of Selected States Worldwide in the 21st Century, *European Research Studies Journal* XXIV(2B), pp.98-112

Koop, C.M. (2021). Baltic Dry Index (BDI). <[www.investopedia.com/terms/b/baltic\\_dry\\_index.asp](http://www.investopedia.com/terms/b/baltic_dry_index.asp)> [Accessed 22/08/2021]

Menhat, M., Mohd Zaideen, I. M., Yusuf, Y., Salleh, N. H. M., Zamri, M. A., and Jeevan, J. (2021). The impact of Covid-19 pandemic: A review on maritime sectors in Malaysia, *Ocean Coast Manag* 209(1 August 2021), pp.1-8

Millefiori, L. M., Braca, P., Zissis, D., Spiliopoulos, G., Marano, S., Willett, P. K., and Carniel, S. (2021). Covid-19 Impact on Global Maritime Mobility, *arXiv preprint:2009.06960*, pp.1-22

Nicola, M., Alsafi, Z., Sohrabi, C., Kerwan, A., Al-Jabir, A., Iosifidis, C., Agha, M., and Agha, R. (2020). The socio-economic implications of the coronavirus pandemic (COVID-19): A review, *Int J Surg* 78, pp.185-193.

OECD (2021). Peer Review of the Turkish Shipbuilding Industry. OECD. Paris, France.

Özhan Doğan, S., Özcan, M., Özşahin, S., and Bayar, E. (2020). In new Ship Building; Review of Production Stages. In: 6th International Congress on Engineering, Architecture, and Design, Conference, Location, pp.434-439

Ozturk, O., and Turan, E. (2020). "Examination of the Impact of the Covid-19 Outbreak on Sea Freight Transportation". 2nd International Symposium of Engineering Applications on Civil Engineering and Earth Sciences (IEACES), pp. 40-47

Reza, F., Kawsar, E., and Mahabub, T. B. (2020). Covid-19 impact and responses: Bangladesh. *Build Bangladesh*. Dhaka, Bangladesh.

Sanmar, S. (2020). Covid-19 Measures at Sanmar Shipyards. <URL: [www.sanmar.com.tr/covid-19-measures-at-sanmar-shipyards/](http://www.sanmar.com.tr/covid-19-measures-at-sanmar-shipyards/)> [Accessed 08/08/2021.]

Sanmar, S. (2020). Sanmar delivers 30 tugs during a challenging year. <URL: [www.sanmar.com.tr/sanmar-delivers-30-tugs-during-challenging-year/](http://www.sanmar.com.tr/sanmar-delivers-30-tugs-during-challenging-year/)> [Accessed 08/08/2021.]

Sarkis, J., Cohen, M. J., Dewick, P., and Schroder, P. (2020). A brave new world: Lessons from the COVID-19 pandemic for transitioning to sustainable supply and production, *Resources, Conservation & Recycling* 159, 104894.

Stopford, M. (2020). *Coronavirus, Climate Change & Smart Shipping Three Maritime Scenarios 2020-2050*. Seatrade Maritime. London, England: S. Maritime

Tersan, S. (2020). A Successful Delivery Despite the COVID-19 Challenging Days NB1091 CALVERT. [WWW] <URL: <https://tersanshipyard.com/en/news/a-successful-delivery-despite-the-covid-19-challenging-days-nb1091-calvert>> [Accessed 07/08/2021.]

UNCTAD. (2020). How countries can leverage trade facilitation to defeat the Covid-19 pandemic.

In Proceedings of the United Nation Conference on Trade and Development, Geneva, Switzerland.

VanGrasstek, C., and Shepherd, B. (2021). *Protectionism in Maritime Economies Study Summary Report*. International Chamber of Shipping. London, England: M. Publications.

WHO (2022). WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard. <URL: <https://covid19.who.int/>>

Xu, J. J., Yip, T. L., and Liu, L. (2008). Dynamic Interrelationships between Sea Freight and Shipbuilding Markets. In: *International Forum on Shipping, Ports, and Airports, IFSPA 2008 - Trade-Based Global Supply Chain and Transport Logistics Hubs: Trends and Future Development*, Conference, Location, pp.480-494

Yay, S. M. (2020). Covid-19 Safety at Mengi Yay. <URL: <https://www.mengiyay.com/covid-19-safety-at-mengi-yay-news>> [Accessed 08/08/2021.]

Yazir, D., Sahin, B., Yip, T. L., and Tseng, P. H. (2020). Effects of Covid-19 on the maritime industry: a review, *Int Marit Health* 71(4), pp.253-264

TMMOB Gemi Mühendisleri Odası  
**ENDAZE**  
BÜLTENİ  
ARALIK 2022  
"GÜÇLÜ EĞİTİM GÜÇLÜ SEKTÖR"  
**GMO**  
**68**  
YAŞINDA

Endaze Bülteni, Gemi Mühendisleri Odası üyelerine e-posta yolu ile iletir.  
Ulaşmasını istediğiniz e-posta detaylarını lütfen Gemi Mühendisleri Odası'na bildiriniz.  
Adres: Postane Mahallesi Nil Sokak No:10 Tuzla-İstanbul  
Telefon: (216) 447 40 30-31-32 - Faks: (216) 447 40 33

[www.gmo.org.tr](http://www.gmo.org.tr) [twitter.com/Gemimuhendis](https://twitter.com/Gemimuhendis)  
[www.facebook.com/tmmobgmo](https://www.facebook.com/tmmobgmo) [www.instagram.com/gemimuhendislerodasi](https://www.instagram.com/gemimuhendislerodasi)  
LinkedIn/gemimuhendislerodasi

TMMOB Gemi Mühendisleri Odası  
**ENDAZE**  
BÜLTENİ  
KASIM 2022

Endaze Bülteni, Gemi Mühendisleri Odası üyelerine e-posta yolu ile iletir.  
Ulaşmasını istediğiniz e-posta detaylarını lütfen Gemi Mühendisleri Odası'na bildiriniz.  
Adres: Postane Mahallesi Nil Sokak No:10 Tuzla-İstanbul  
Telefon: (216) 447 40 30-31-32 - Faks: (216) 447 40 33

[www.gmo.org.tr](http://www.gmo.org.tr) [twitter.com/Gemimuhendis](https://twitter.com/Gemimuhendis)  
[www.facebook.com/tmmobgmo](https://www.facebook.com/tmmobgmo) [www.instagram.com/gemimuhendislerodasi](https://www.instagram.com/gemimuhendislerodasi)  
LinkedIn/gemimuhendislerodasi

TMMOB Gemi Mühendisleri Odası  
**ENDAZE**  
BÜLTENİ  
EKİM 2022  
**29**  
EKİM  
KUTLU OLSUN

Endaze Bülteni, Gemi Mühendisleri Odası üyelerine e-posta yolu ile iletir.  
Ulaşmasını istediğiniz e-posta detaylarını lütfen Gemi Mühendisleri Odası'na bildiriniz.  
Adres: Postane Mahallesi Nil Sokak No:10 Tuzla-İstanbul  
Telefon: (216) 447 40 30-31-32 - Faks: (216) 447 40 33

[www.gmo.org.tr](http://www.gmo.org.tr) [twitter.com/Gemimuhendis](https://twitter.com/Gemimuhendis)  
[www.facebook.com/tmmobgmo](https://www.facebook.com/tmmobgmo) [www.instagram.com/gemimuhendislerodasi](https://www.instagram.com/gemimuhendislerodasi)  
LinkedIn/gemimuhendislerodasi

TMMOB Gemi Mühendisleri Odası  
**ENDAZE**  
BÜLTENİ  
EYLÜL 2022

Endaze Bülteni, Gemi Mühendisleri Odası üyelerine e-posta yolu ile iletir.  
Ulaşmasını istediğiniz e-posta detaylarını lütfen Gemi Mühendisleri Odası'na bildiriniz.  
Adres: Postane Mahallesi Nil Sokak No:10 Tuzla-İstanbul  
Telefon: (216) 447 40 30-31-32 - Faks: (216) 447 40 33

[www.gmo.org.tr](http://www.gmo.org.tr) [twitter.com/Gemimuhendis](https://twitter.com/Gemimuhendis)  
[www.facebook.com/tmmobgmo](https://www.facebook.com/tmmobgmo) [www.instagram.com/gemimuhendislerodasi](https://www.instagram.com/gemimuhendislerodasi)  
LinkedIn/gemimuhendislerodasi

TMMOB Gemi Mühendisleri Odası  
**ENDAZE**  
BÜLTENİ  
AĞUSTOS 2022

Endaze Bülteni, Gemi Mühendisleri Odası üyelerine e-posta yolu ile iletir.  
Ulaşmasını istediğiniz e-posta detaylarını lütfen Gemi Mühendisleri Odası'na bildiriniz.  
Adres: Postane Mahallesi Nil Sokak No:10 Tuzla-İstanbul  
Telefon: (216) 447 40 30-31-32 - Faks: (216) 447 40 33

[www.gmo.org.tr](http://www.gmo.org.tr) [twitter.com/Gemimuhendis](https://twitter.com/Gemimuhendis)  
[www.facebook.com/tmmobgmo](https://www.facebook.com/tmmobgmo) [www.instagram.com/gemimuhendislerodasi](https://www.instagram.com/gemimuhendislerodasi)  
LinkedIn/gemimuhendislerodasi

TMMOB Gemi Mühendisleri Odası  
**ENDAZE**  
BÜLTENİ  
TEMMUZ 2022

Endaze Bülteni, Gemi Mühendisleri Odası üyelerine e-posta yolu ile iletir.  
Ulaşmasını istediğiniz e-posta detaylarını lütfen Gemi Mühendisleri Odası'na bildiriniz.  
Adres: Postane Mahallesi Nil Sokak No:10 Tuzla-İstanbul  
Telefon: (216) 447 40 30-31-32 - Faks: (216) 447 40 33

[www.gmo.org.tr](http://www.gmo.org.tr) [twitter.com/Gemimuhendis](https://twitter.com/Gemimuhendis)  
[www.facebook.com/tmmobgmo](https://www.facebook.com/tmmobgmo) [www.instagram.com/gemimuhendislerodasi](https://www.instagram.com/gemimuhendislerodasi)  
LinkedIn/gemimuhendislerodasi

TMMOB Gemi Mühendisleri Odası  
**ENDAZE**  
BÜLTENİ  
HAZİRAN 2022

Endaze Bülteni, Gemi Mühendisleri Odası üyelerine e-posta yolu ile iletir.  
Ulaşmasını istediğiniz e-posta detaylarını lütfen Gemi Mühendisleri Odası'na bildiriniz.  
Adres: Postane Mahallesi Nil Sokak No:10 Tuzla-İstanbul  
Telefon: (216) 447 40 30-31-32 - Faks: (216) 447 40 33

[www.gmo.org.tr](http://www.gmo.org.tr) [twitter.com/Gemimuhendis](https://twitter.com/Gemimuhendis)  
[www.facebook.com/tmmobgmo](https://www.facebook.com/tmmobgmo) [www.instagram.com/gemimuhendislerodasi](https://www.instagram.com/gemimuhendislerodasi)  
LinkedIn/gemimuhendislerodasi

TMMOB Gemi Mühendisleri Odası  
**ENDAZE**  
BÜLTENİ  
MAYIS 2022

Endaze Bülteni, Gemi Mühendisleri Odası üyelerine e-posta yolu ile iletir.  
Ulaşmasını istediğiniz e-posta detaylarını lütfen Gemi Mühendisleri Odası'na bildiriniz.  
Adres: Postane Mahallesi Nil Sokak No:10 Tuzla-İstanbul  
Telefon: (216) 447 40 30-31-32 - Faks: (216) 447 40 33

[www.gmo.org.tr](http://www.gmo.org.tr) [twitter.com/Gemimuhendis](https://twitter.com/Gemimuhendis)  
[www.facebook.com/tmmobgmo](https://www.facebook.com/tmmobgmo) [www.instagram.com/gemimuhendislerodasi](https://www.instagram.com/gemimuhendislerodasi)  
LinkedIn/gemimuhendislerodasi

TMMOB Gemi Mühendisleri Odası  
**ENDAZE**  
BÜLTENİ  
NISAN 2022  
**23 Nisan**  
Ulusal Egemenlik ve Çocuk Bayramı  
*Kutlu Olsun*

Endaze Bülteni, Gemi Mühendisleri Odası üyelerine e-posta yolu ile iletir.  
Ulaşmasını istediğiniz e-posta detaylarını lütfen Gemi Mühendisleri Odası'na bildiriniz.  
Adres: Postane Mahallesi Nil Sokak No:10 Tuzla-İstanbul  
Telefon: (216) 447 40 30-31-32 - Faks: (216) 447 40 33

[www.gmo.org.tr](http://www.gmo.org.tr) [twitter.com/Gemimuhendis](https://twitter.com/Gemimuhendis)  
[www.facebook.com/tmmobgmo](https://www.facebook.com/tmmobgmo) [www.instagram.com/gemimuhendislerodasi](https://www.instagram.com/gemimuhendislerodasi)  
LinkedIn/gemimuhendislerodasi

# TÜRKİYE'NİN TEKNOLOJİDE ÖNCÜ LİDER KLAS KURULUŞU

Bağımsız, Tarafsız, Güvenilir, Uzman

60  
yıl



**TÜRK LOYDU**

**#60YıldırGüvenle**