Sayı / Number: 223

GEMİ ve DENİZ TEKNOLOJİSİ

GMO JOURNAL OF SHIP AND MARINE TECHNOLOGY

TMMOB GEMİ MÜHENDİSLERİ ODASI
The Turkish Chamber of Naval Architects and Marine Engineers

1 TEMMUZ
DENİZCİLİK VE KABOTAJ BAYRAMI
KUTLU OLSUN !

Happy 97th Anniversay of Turkish Maritime and Cabotage DAY, 1 July 2023 !

GMO

TMMOB GEMİ MÜHENDİSLERİ ODASI

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/

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

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 düzenlencektir. 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
E-posta: 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

EDİTÖRDEN / EDITORIAL

Değerli Meslektaşlarımız ve Okurlar,

Bu sayımızda altı adet araştırma makalesi ve bir adet kişisel teknik rapor yayınlamaktayız. Makaleler; tersanelerde kullanılan vinçlerin risk analizi, kompozit bir teknenin taban plakasının yapısal optimizasyonu, konteyner limanlarında istifleme yöntemlerinin analizi ve geliştirilen bir öneri, farklı ağ elemanı boyutlarının ve türbülans modellerinin düz levha sürtünme direncine etkisi, denizaltı gövdesinden türetilen bir formun hidrodinamik katsayılarının belirlenmesi ve gemi dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketlerinin HAD yöntemi ile karşılaştırmalı incelemesi konularını kapsamaktadır.

Teknik rapor ise yakın zamanda can kaybına neden olmuş Titan isimli mini denizaltı faciasının gemi mühendisliği yönünden teknik değerlendirmelerini içeren bir yazıdır.

Yayınlamış olduğumuz makalelerin ve teknik raporun tüm taraflar için faydalı olmasını diliyoruz.

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

Dear Colleagues and Readers,

In this isssue we are pleased to present six research articles and a personal technical report. The articles composed of risk analysis of cranes used in shipyards, FEM analysis and structural optimization of the bottom plate of a composite boat, analysis of storage methods in container ports and a systematic recommendation, the effect of different mesh element size and turbulence models on flat plate frictional resistance, and determination of hydrodynamic coefficients of a form derived from a submarine hull, comparative analysis of ship heave and pitch motions using CFD methods.

The technical report, on the other hand, presents evaluations in terms of naval architecture and marine engineering of the Titan mini-submersible disaster which has caused loss of five people on board recently.

We hope that the articles and the technical report published will be useful to all parties.

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.

Saygılarımızla / Regards.

Ahmet Dursun ALKAN - Baş Editör / Editor-in-Chief

Dursun Murat SEKBAN - Yardımcı Editör / Deputy Editor

Ali DOĞRUL - Yardımcı Editör / Deputy Editor

Onur USTA - Yardımcı Editör / Deputy Editor

Abdullah TÜRK - Teknik Editör / Technical Editor

Aykut KORKMAZ - Teknik Editör / Technical Editor

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

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

Asst. Prof. Onur USTA PhD
Istanbul, Türkiye

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

Ress. Asst. S. Aykut KORKMAZ
Dokuz Eylül University, Maritime Faculty, Izmir, Türkiye

Yayın Sekreteri / Editorial Secretary
Hilal SAKARYA
Müge Helin DEVİREN

Yönetim / Management
TMMOB GMO
Postane Mahallesi, Nil Sokak No: 3934940
Tuzla, İstanbul, Turkiye
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

Basıldığı Yer / Printed by
Ankamat Matbaacılık Sanayi Ltd. Şti.
1333. Cad.5. 13445 Sokak No:60 İvedik Organize Sanayi-Ankara
Tel: +90 (0312) 394 54 94
www.ankamat.com

Yayın Türü / Publication Type / Sayı / Number
Süreli Yayın (6 Aylık) / Periodical, 6 months
Sayı / Number : 223

E-ISSN: 2651-530X
ISSN: 1300-1973
Baskı Tarihi / Date of print :
Haziran / June 2023

Baskı Sayısı / Number of prints : 50

Gemi ve Deniz Teknolojisi
Sayı: 223, Haziran 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

ALAN EDİTÖRLERİ / SECTION EDITORS

Naval Architecture
Prof. Alberto FRANCESCUTTO - University of Trieste, Trieste, Italy
Asst. Prof. Dr. Ziya SAYDAM - Pîrî Reis University, Istanbul, Türkiye
Asst. Prof.Dr. 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
Asst.Prof.Dr. 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 University, Balıkesir, Türkiye Asst.
Prof. Dr. Mehmet ÖNAL - İzmir Kâtip Çelebi University, İzmir, Türkiye
Asst. Prof. Dr. 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, Istanbul, Türkiye
Asst. Prof. Dr. Hasan ÖLMEZ - Karadeniz Technical University, Trabzon, Türkiye

Offshore and Ocean Technology
Prof. Dr. Ismail Hakkı HELVACIOĞLU - İstanbul Technical University, Istanbul, Türkiye
Assoc. Prof. Dr. Özgür Özgüç - İstanbul Technical University, Istanbul, 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 - Pîrî 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
Asst. Prof. Dr. Erdem AKTOSUN - İzmir Kâtip Çelebi University, İzmir, Türkiye

GMO Journal of Ship and Marine Technology
Issue: 223, June 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Journal homepage: http://www.gmoshipmar.org/

EDİTÖRLER KURULU / EDITORIAL BOARD

Prof. Dr. Karin ANDERSSON - Chalmers University, Gothenburg, Sweden
Prof. Dr. Mehmet ATLAR - Strathclyde University, Glasgow, UK
Prof. Dr. Serdar BEJ - Istanbul Technical University, Istanbul, Türkiye
Prof. Dr. Volker BERTRAM - DNV, Hamburg, Germany
Prof. Dr. M.Sander ÇALIŞAL - Pîrî Reis University, Istanbul, Türkiye
Prof. Dr. Fahri ÇEL - Yıldız Technical University, Istanbul, Türkiye
Prof. Dr. Bettar O. EL-MOCTAR - University of Duisburg -Essen, Duisburg, Germany
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 - İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye
Prof. Dr. Gökdeniz NEŞER - Dokuz Eylül University, İzmir, Türkiye
Prof. Dr. Aykut ÖLÇER - World Maritime University, Malmö, Sweden
Prof. Dr. Süleyman ÖZKAYNAK - Pîrî 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 - Pîrî 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 - İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye
Prof. Dr. Ömer Kemal KINACI - İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye
Assoc.Prof.Dr. Veysel ALANKAYA - Istanbul, Türkiye
Assoc.Prof.Dr. Uğur Oral ÜNAL - İstanbul Technical University, Istanbul, Türkiye
Assoc.Prof.Dr. Bekir ŞENER - Yıldız Technical University, Istanbul, Türkiye
Assoc.Prof.Dr. Emrah ERGİNER - Dokuz Eylül University, Izmir, Türkiye
Assoc.Prof.Dr. Emre PEŞMAN - Karadeniz Technical University, Trabzon, Türkiye
Dr. Güner ÖZMEN - Dokuz Eylül University, Izmir, Türkiye
Dr. Tahsin TEZDOĞAN - University of Southampton, Southampton, UK
Dr. Serkan TÜRKMEN - Newcastle University, Newcastle, UK

Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi
Sayı: 223, June 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/

İÇİNDEKİLER

Editörden / Editorial

Titan Batiskafı Üzerine Teknik bir İnceleme 1
A Technical Investigation on Titan Bathyscape Accident
Münir Cansın Özden
(Rapor / Report)

Tersanelerde Vinç ile Yük Elleçleme Operasyonları ve FRAM Yöntemi Kullanılarak Risk Analizi 13
Cargo Handling Operations with Craner in Shipyards and Risk Analysis Using FRAM Method
Selahattin Özsayan, Barış Barlas
(Araştırma Makalesi / Research Article)

Farklı Ağ Elemanı Boyutlarının ve Türbülans Modellerinin Düz Levha Sürtünme Direnci Üzerindeki Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi 29
Numerical Investigation of the Effect of Different Grid Element Sizes and Turbulence Models on the Friction Resistance of Plates
Erhan Aksu
(Araştırma Makalesi / Research Article)

Kompozit bir Teknenin Dip Levhasının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi ve Yapısal Optimizasyonu 47
Analysis and Structural Optmization of the Bottom Plate of a Composite Boat with Finite Element Method
Recep Tayyip Kılıç, Mustafa Erden Yıldızdağ
(Araştırma Makalesi / Research Article)

Konteyner Limanlarında Geleneksel İstifleme Yöntemlerinin Kaynak Temelli Yaklaşım Bağlamında Bulanık AHP Yöntemiyle Analizi: Sistemsel bir Öneri 64
An Analysis of Traditional Storage Methods in Container Ports By Fuzzy AHP Method in the Context of Resource-Bades View: A Systematic Recommendation
Umur Bucak,Tarık Efe Kendir
(Araştırma Makalesi / Research Article)

GEMİ ve DENİZ TEKNOLOJİSİ
GMO Journal of Ship and Marine Technology

TMMOB GEMİ MÜHENDİSLERİ ODASI
The Turkish Chamber of Naval Architecs and Marine Engineers

Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi
Sayı: 223, June 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/

Non-dimensional Hydrodynamic Coefficients Determination of a Derived-Submarine Bare Hull Form 79
Denizaltı Gövdesinden Türetilen bir Formun Boyutsuz Hidrodinamik Katsayılarının Belirlenmesi
Gökhan Budak
(Araştırma Makalesi / (Research Article)

Baş-Kıç Vurma ve Dalıp-Çıkma Hareketinin HAD Yöntemi Kullanılarak İncelenmesi 92
Investigation of Pitch and Heave Motion by Using CFD
Yavuz Hakan Özdemir, Taner Çoşgun
(Araştırma Makalesi / (Research Article)

ERRATUM / DÜZELTME 123

GEMİ ve DENİZ TEKNOLOJİSİ
GMO Journal of Ship and Marine Technology

TMMOB GEMİ MÜHENDİSLERİ ODASI
The Turkish Chamber of Naval Architecs and Marine Engineers

Gemi ve Deniz Teknolojisi
Sayı: 223, Haziran 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Rapor

Titan Batiskafı Kazası Üzerine Teknik Bir İnceleme

Münir Cansın Özden [1,2]

[1] Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
[2]Datum Denizaltı Teknolojileri Uygulama ve Mühendislik A.Ş., Istanbul, Türkiye

[1,2]ozden@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3807-2942
https://doi.org/10.54926/gdt.1339171

14 Nisan 1912 yılında batan ve 1 Eylül 1985'te enkazı bulunan Titanic en son 18 Haziran 2023'te kendini tüm dünyaya bir kez daha hatırlattı. Daha önce Titanic'e 90 kere dalmayı denediği ve bunların 13'ünde dalışı gerçekleştirebildiği bilinen Titan isimli batiskaf ile, aralarında bu aracın sahibinin de bulunduğu beş maceraperest, bugüne kadar sadece belgesellerde izledikleri bu tarihin en önemli gemi enkazını yakından görebilmek için Kuzey Atlantik'in derinliklerine daldılar. Titan dalışa geçtikten 1 saat 45 dk sonra yüzeyde onları izleyen anagemi ile irtibatı koptu ve o andan itibaren tüm dünya nefesini tutarak bu denizaltı ve içindeki kazazedelerle ilgili haberleri takip etmeye başladı. Denizaltıdan sinyal alındığı, arama kurtarma çalışmalarının başladığı belirtiliyordu. Herkes bir yandan gözü kulağı bu kazada, bir yandan da denizaltıların çalışma prensiplerini araştırıyor ve Titan'ın neden batmış olabileceği sorusuna cevap arıyordu. İşte bu süreçte bana da, Denizaltılarla ilgili hem teorik hem de pratik araştırmalar yaptığımı bilen arkadaşlarım ulaştılar ve kazayla ilgili fikirlerimi sordular. Konunun çok merak uyandırması üzerine bende de, hem İstanbul Teknik Üniversitesi'nde (İTÜ) denizaltılarla ilgili çal ışmalar yürütüyor olduğum, hem İTÜ ve Pîrî Reis Üniversitesi'nde Denizaltı Tasarımının Temelleri dersini vermekte olduğum, hem de 15 yıldır özellikle mini denizaltılar üzerine çalışmalar yaptığım için teknik bir inceleme yazısı hazırlama fikri oluştu. Bu yazıyla konu hakkındaki düşüncelerimi teoriye çok değinmeden ara notlar da ekleyerek açıklamaya çalışacağım. Bunu yaparken de hem bir denizaltı tasarımcısının gözünden konuya yaklaşmaya çalışacağım hem de 250.000$ bilet ücreti ödeyerek böyle bir aracın içine girip o derinliğe bir seyahati gerçekleştiren bu maceraperest zenginleri anlamaya çalışacağım.

İngilizce submarine ve submersible diye iki ayrı kelime vardır, Titan denizaltı denilen submarine'den ziyade bir submersible yani Türkçe'de de kullandığımız ta biriyle "batiskaf" tipi araçtır. Submarine dediğimiz denizaltılar şekli puroyu andıran kıçta + veya x şeklinde dört dümeni ve baş kısımda veya yelken dediğimiz üst yapısı üzerinde yatay dümenleri bulunan ve bir veya iki pervanesi olan sualtı araçlarıdır. B atiskaf dediğimiz araçlar ise daha çok derin dalışlarda okyanus araştırmaları için veya eğlence amaçlı lüks yatlarda kullanılan baş kısımda bulunan büyük bir lumbuzdan dışarının izlenebildiği sualtı araçlarıdır. Bunlar bazen pozitif sephiyede yani motorlar ı durduğu anda suyun kaldırma kuvveti ile yukarı çıkabilecek tipte de üretilebilirler. Ancak genellikle tıpkı denizaltılar gibi dalış ve çıkışı sağlayan ana dalma sarnıçları (denizaltı literatüründe tanka "sarnıç" denir), denizaltının trim ve meyilini düzeltecek trim sarnıçları ve farklı yoğunluklu sularda veya dalış esnasında daralan mukavim tekne (denizaltının içinde personel ve kuru kalması gereken elektrik elektronik vd. cihazlarının bulunduğu içi

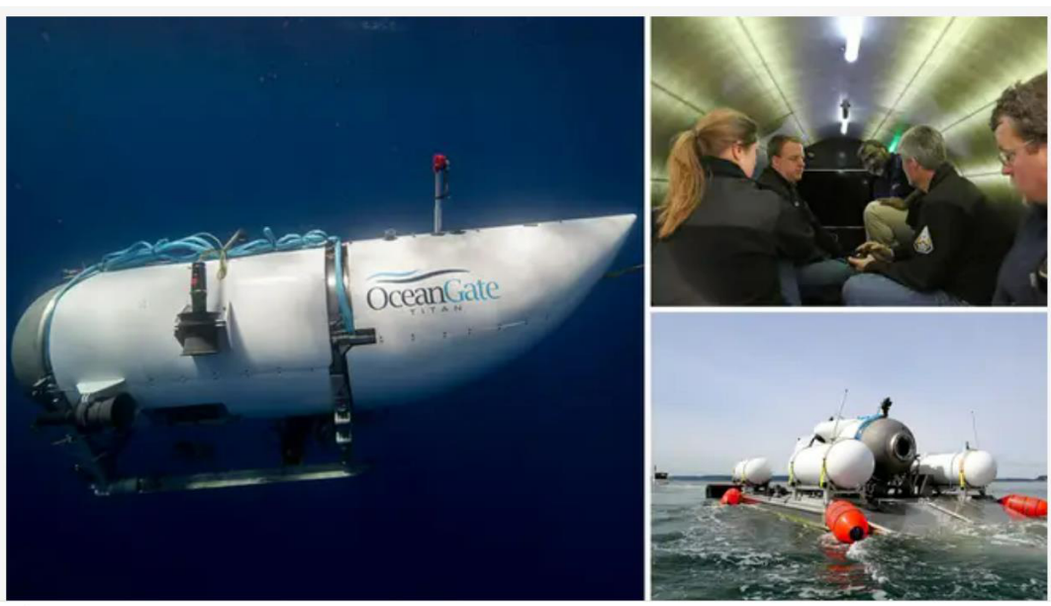
1 atmosfer (atm) basınçtaki gövdesine mukavim tekne denir) çapını tolere edecek şekilde ayar sarnıçlarına sahip olacak şekilde üretilirler. Batiskafları genel olarak üç tipte gruplamak mümkündür:

1- Anagemiden indirildikten sonra (mothership) ona umbilical denilen bir kablo ile bağlı olarak çalışan otonom olmayan submersiblelar.

2- Anagemiden (mothership) indirildikten sonra kendi kendine hareket edecek şekilde çalışan otonom submersiblelar.

3- Tamamen bağımsız şekilde bir destek gemisine ihtiyaç duymadan hareket edebilen bağımsız submersiblelar.

Oceangate Titan batiskafı yukarıda sayılan üç tip batiskaftan ikinci tip olan otonom submersible tipine uygun bir modeldir. Yani bir destek gemisi tarafından dalışını yapacağı bölgeye kadar getirilir, burada o gemiden indirilir ve görevini yerine getirir sonra satha kendi imkânları ile çıkar. Sonrasında yine bu destek gemisi üzerindeki ekipmanlar (A frame vb. kaldırma vinçleri, launch/recovery rampaları vs.) kullanılarak araç gerisin geri gemiye alınır. Titan batiskafı anagemiden bir platform ile suya indirilmekte ve bu platform kullanılarak dalışına başlamaktaydı (URL 1). Bu yöntem sayesinde Oceangate ana dalma sarnıçlarına sahip olmayan sadece bir mukavim tekne ve sevk ekipmanlarına sahip bir batiskaf ortaya koymuştur. Bunu aracın kullanımını basitleştirmek ve ebatlarını ufaltmak için yaptıkları sanılmaktadır. Bu yöntem batiskaflarda daha önce de kullanılmış bir yöntemdir. Yöntemle ilgili ayrıntılar Amerikan Gemi Mühendisleri Odası (SNAME - Society of Naval Architects and Marine Engineers) tarafından yayınlanmış Submersible Vehicle Systems Design Kitabı'nda örnekleriyle anlatılmaktadır (Allmendinger, 1990).



Şekil 1. Titan Batiskafı

Bir denizaltı ile batiskaf arasındaki farkı detaylı bir şekilde açıkladıktan ve batiskafları da kendi içinde gruplara ayırdıktan sonra Titan Batiskafı'nda meydana gelen kazanın detaylarına geçilebilir. Buradaki sorunun temelinde yatan neden Titan'ın tasarım ve inşaasında "klas kuruluşu" dediğimiz üçüncü taraf bir kontrol kuruluşunun bulunmuyor oluşudur.

Belli bir adetten fazla yolcu taşıyan, belli bir boydan büyük veya özel tipte gemileri kendi kurallarınıza göre yapıp kullanamazsınız. Nasıl ki otomobilinizi götürüp TÜV'de periyodik muayeneye sokuyorsunuz, aynı onun gibi geminizin tasarım ve inşasını denetleyen ve inşa sonrasında test eden "klas kuruluşu" (classification society) kuruluşlar vardır. Türkiye'nin Türk Loydu, Norveç'in Det Norske Veritas, Rusya'nın Russian Maritime Register of Shipping, İngiltere'nin Lloyd's Register ve Amerika'nın ABS American Bureau of Shipping gibi klas kuruluşları farklı gemilerin ve bunlara ait sistemlerin sağlaması gereken şartları belirleyen kural kitapları hazırlarlar. Bu klas kuruluşları genel olarak plan onay, malzeme sertifikasyonu ve sörvey kısımlarından oluşur. Plan onay kısmı, kayıtları altına alacakları yeni inşa edilen gemileri, henüz daha tasarım aşamasındayken, yukarıda bahsedilen kural kitaplarına uygun olarak tasarlanıp tasarlanmadıklarını denetleyerek başlar. Sertifikasyon kısmı, gemide kullanılacak ekipmanların ya tip onaylı, (yani üretici tarafından klas kuruluşlarının isterlerine göre üretilmiş ve gerekli testler tatbik edilerek isterleri sağladığı gösterilmiş) ya da benzer şekilde hem kullanılan malzemeler hem imalat hesaplarının detaylı kontrolüyle hem de imalat sonrası çalışma şartlarının çok üstünde belirlenmiş test koşullarında güvenilirliği kanıtlanmış olduğunu denetler. Önemli ekipmanların fabrikada yine klas kuruluşu tarafından belirlenmiş şartları sağladığının test edildiği fabrika kabul testleri yapılır. Sörvey kısmı ise geminin inşası boyunca yapılan tüm işlemlerin yine kural kitaplarına uygun şekilde gerçekleştirildiğini denetler. Gemi tamamlandığında öncelikle tüm sistemlerin çalışırlığının görüldüğü liman kabul testleri gerçekleştirilir. Sonrasında da deniz tecrübelerinde gemiye ait tüm sistemler yine klas kuruluşunun kural kitaplarında belirlendiği şartlara göre test edilir ve ancak bu testlerde başarılı olduktan sonra geminin denize çıkabilmesi için gerekli klas onayı verilir.

Denizaltı ve batiskafların tasarım ve inşası ile meşgul tasarımcılar ve mühendisler klas kuruluşlarının kural kitapları ile sıklıkla haşır neşir olmaktadır. Bu kural kitapları denizaltıların sağlaması gereken minimum güvenlik önlemlerini ortaya koymaktadır. Bu kural kitaplarına uygun olarak inşa edilmiş olan batiskafların anagemi ile bağlantısının kesilmiş olması çok da büyütülecek bir sorun teşkil etmemektedir. Böyle bir durumda devreye sokulabilecek pek çok güvenlik senaryosu geminin klas kuruluşu kontrolünde yapılan deniz testleri sırasında denenmekte ve çalışırlığından emin olunmaktadır. Ancak Titan hiçbir klas kuruluşunun denetiminde yapılmamıştı. Bu durumda Titan'nın klas kuruluşu denetiminde yapılan denizaltılara nazaran ne gibi farklılıklarının olduğunu ve bu farklılıkların güvenlik açısından etkilerini aşağıdaki ana tespitler üzerinde inceleyebiliriz;

a- Batiskafın mukavim teknesinin (yani insanların içinde bulundukları basınca dayanıklı kısım), nasıl ve kaç metreye kadar test edildiğine dair bir açıklamaya ulaşılamamıştır,

b- Aracın oksijen kapasitesi kural kitaplarında sağlanması gerekene göre yaklaşık %45 daha azdır,

c- Aracın kumandasının herhangi bir sertifikaya sahip olmayan bir oyun konsolu ile yapılıyor oluşu,

d- Aracın kurtarma şamandırasının bulunmuyor oluşu,

e- Batiskafta hatch olarak isimlendirilen giriş çıkış kaportasının bulunmuyor oluşu,

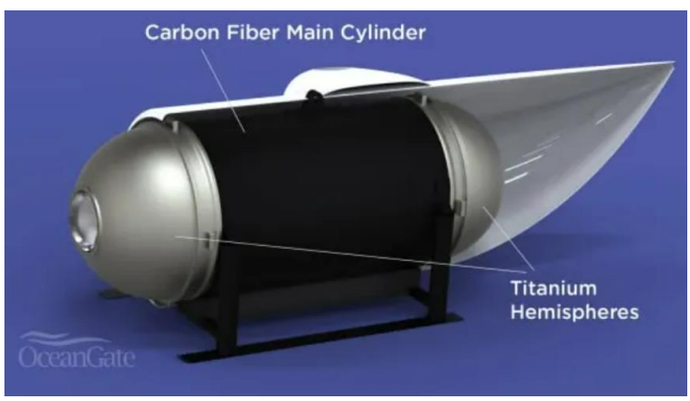
f- Araçta ana dalma sarnıçlarının bulunmuyor oluşu ve atılabilir safranın iptidai oluşu,

g- Aracın kendi üzerinde bir navigasyon sisteminin bulunmuyor oluşu.

Şimdi bu tespitleriyle sırasıyla daha yakından inceleyelim.

a- Titan'ın mukavim teknesi üzerine

Arama çalışmaları tamamlanıp enkaza ulaşıldıktan sonra Ocean Gate'in mukavim teknesinin çökmesi sonucunda battığı anlaşılmıştır. Öncelikle Titan'ın indiği 4000m derinlik hiç azımsanacak bir derinlik değildir. Ancak derin deniz araştırmaları konusu söz konusu olduğu zaman Jacques Piccard'ın 1960 yılında Trieste isimli submersible ile 10,916m derinliğindeki Mariana Çukuru'nun en derin noktası olan Challenger Deep'e indiği hatırlanmalıdır.



Şekil 2. Titan Batiskafı'nın titanyum ve karbon fiberden oluşan mukavim teknesi

Denizaltı mukavemet hesaplarında üç farklı derinlik ve bunlara bağlı üç farklı basınçtan bahsedilir, bunlar: Nominal Dalış Derinliği <Test Dalış Derinliği <Çökme Dalış Derinliği' dir.

Bunlardan CDD (Collapse Diving Depth), denizaltının tasarım hesaplarının yapıldığı teorik çökme dalış derinliğidir. NDD ise bu çökme basıncına göre güvenlik katsayıları konularak hesaplanmış olan mukavim teknenin çalışmasına izin verilen maksimum derinliktir. Ancak mukavim tekne dayanımının gösterimi için hesapla yetinilmemekte ve mutlaka bir test ile mukavim teknenin istenen basınca dayandığının gösterilmesi istenmektedir. Örneğin; NDD 4000m derinlikte çalışması istenilen bir denizaltının tasarımında, kurallardaki güvenlik katsayıları nedeniyle 6920m'de çökecek şekilde düşünerek malzeme kalınlıklarına ve destek elemanlarının boyutlarına karar verilmektedir. Sonrasında denizaltının mukavim teknesinin inşası tamamlandıktan sonra bir sefere mahsus 4800m'ye daldırılarak test edilmesi gerekmektedir. Ancak 4800m'de mukavemeti kanıtlanmış olan denizaltı 4000m'ye maksimum 1000 kere dalış gerçekleştirebilir. Bu derinlikler aşağıda verilmiştir:

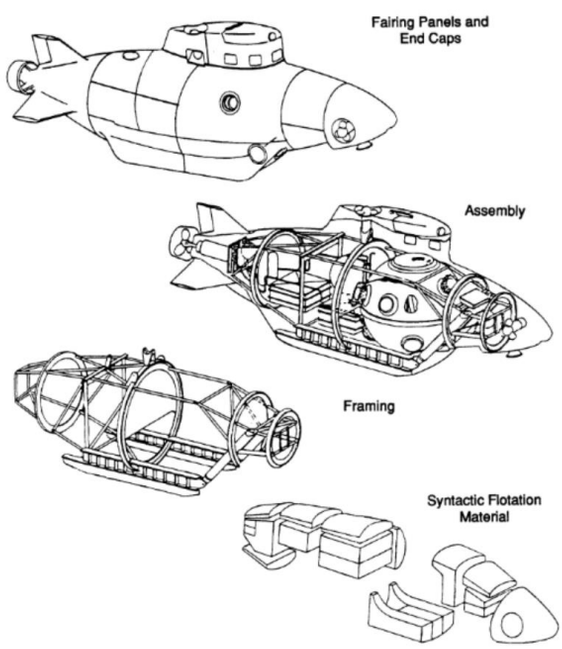
4000m (NDD) <4800m (TDD) <6920m (CDD).

4800m derinlikte test edilen denizaltının 4800m'ye göre sertifikalandırılmaması ve ancak 4000m'de çalışma basıncında çalıştırılmasına müsaade edilmesindeki amaç, ortaya çıkabilecek malzeme yorulması ve kullanıma bağlı kusurların tehlike yaratmasının önüne geçebilmektir.

Şekil 2'de görüldüğü gibi (URL 2), Titan denizaltısının mukavim teknesinin bombe ve flanş kısımları titanyum ve silindirik kısmı karbon fiber malzemeden imal edilmiştir. Bu malzemeler denizaltı imalatında daha önce kullanılmış malzemelerdir ancak kompozit malzemeden mukavim tekne imalatı hala üzerine çalışılan bir araştırma geliştirme konusudur. Karbon fiber malzemenin çeliğe göre çok daha yüksek dayanıma ve çok daha düşük yoğunluğa sahip olduğu bilinmektedir. Bunun yanında gerek izotropik olmayan (yani malzeme mukavemet özellikleri elyafın örgü yönüne göre değişim gösteren)

bir yapıya sahip olması nedeniyle çelik veya titanyum gibi izotropik olan malzemelere göre davranışı daha karmaşıktır. Diğer yandan karbon fiberin basınç altında denizaltının karşılaştığı akma ve burkulma hadisesi esnasında üzerine gelen yükler altındaki davranışı tam olarak anlaşılamamış ve bununla ilgili hesaplar ve klas kuralları henüz tam olarak oluşturulamamıştır. Diğer yandan titanyum malzemesi uzun yıllardır başta Rusya olmak üzere denizaltı inşasında kullanılmakta ve bu malzeme ile ilgili hesaplar, imalat ve kaynak prosedürleri daha detaylı olarak anlaşılabilmiştir.

Oceangate Firması'nın Titan'ın boyutlarını mümkün olduğunca küçük ebatta tutabilmek için, daha bilindik, standart çelik malzemelerin kullanılmasını tercih etmediği ve onun yerine aslında çok da kendini kanıtlamamış ve kontrol edilemez olduğuna inanılan karbon fiber yapıyı seçtiği değerlendirilmektedir. Hızlı bir mukavim tekne boyutlandırma hesabı yapıldığında, standart basınçlı kap çeliği (P355 türevi) kullanılması durumunda bu batiskafın 130mm'den daha kalın bir mukavim tekne sacı ile ancak bu basınca dayanabilecek mukavemeti sağlayacağı görülmektedir (Çelik için yapılan hesaplamada 4m mukavim tekne boyu ve 1500mm dış çap düşünülmüş ve 300 mm aralıkla 45mm kalınlıkta 140 mm yükseklikte kemereler yerleştirilmiştir). Bu şekilde imal edilen denizaltının sadece mukavim teknesi yaklaşık 30 ton ağırlıkta olacak ve hacmi ise sadece 9 m3 civarında kalacaktır. Yani mukavim tekne ağırlığının deplasmana oranı standart bir çelik malzemede yaklaşık %300'ü bulmakta hatta geçmektedir. Yani bu denizaltıyı yüzdürebilmek ve suyun altında nötr sephiyede tutabilmek için aradaki yaklaşık 20 tonluk ağırlığı dengeleyebilecek bir sephiyeye ihtiyaç duyulacaktır.

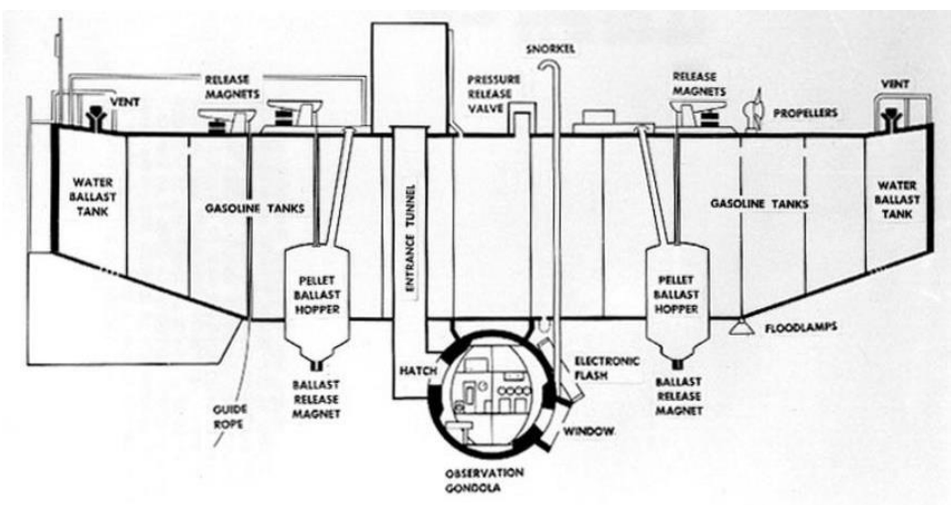


Şekil 3. Syntactic köpüğün batiskaflarda kullanımı

Sephiyeyi dengeleyecek ancak diğer taraftan da yine 4000m derine inildiğinde şeklini kaybetmeyecek bir malzeme ile bu sephiyenin sağlanabilmesi gerekmektedir. Bu da genellikle syntactic foam denen basınca dayanıklı bir tür köpük ile sağlanabilmektedir. Ancak eklenen her sentetik köpük (syntactic foam) bloğu sephiyeye kendi ağırlığı kadar katkı yapacağı için bu denizaltıya yaklaşık 25 m3 sentetik köpük eklenmesi icap edecektir ve geminin toplam ağırlığı diğer malzemelerle beraber 40 tonu geçecek ve boyutları 10-12 metrelere yaklaşacaktır. Bu tarzda bir küresel mukavim tekne ve onu yüzdürmek

için kullanılan sentetik köpük bloklarının görüldüğü bir batiskaf tasarımı Şekil 3'te verilmiştir (Allmendinger, 1990). Syntactic foamun henüz keşfedilmediği 1960 senesinde Piccardlar Trieste batiskafında Şekil 4'te görüldüğü gibi (URL 3), 2.4m çapındaki bir çelik küreyi yüzdürebilmek için içi suya göre daha düşük yoğunluğu olan benzin ile doldurulmuş 18.14 m boyunda ve 3.51 m genişliğinde bir tank kullanmıştı.

Mukavim tekne imalatında kullanılmak üzere araştırılan farklı malzemeler arasındaki bu karşılaştırma Stan Zimmerman'ın "Submarine Technology for 21st Century" kitabında verilmiştir (Zimmerman, 2006).



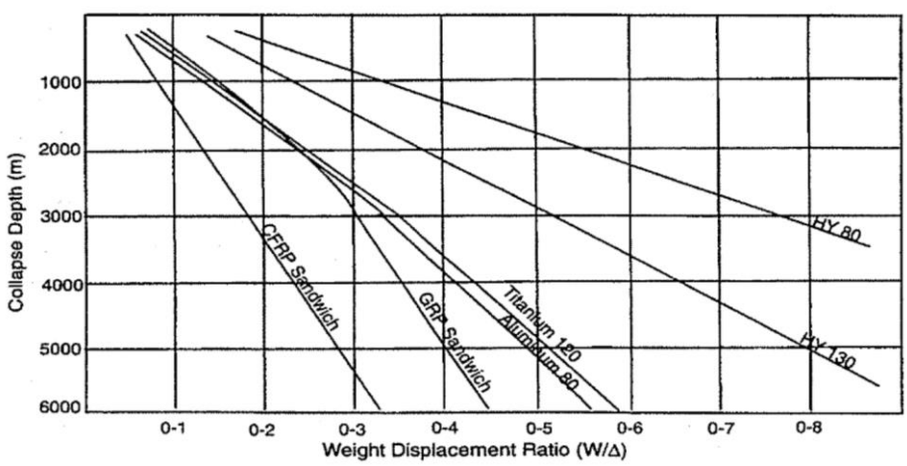
Şekil 4. Trieste batiskafı

Bu grafik, çökme derinliği ile mukavim tekne malzemesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Yatay eksen, denizaltının mukavim teknesinin toplam ağırlığının deplasmanına (taşırdığı suyun ağırlığı) oranını vermektedir. Yani mesela Türk Bahriyesi'ndeki denizaltıların imalatında kullanılan HY80 tipi malzeme ile 3000m'ye dalan bir denizaltı mukavim teknesi yapılırsa mukavim teknenin ağırlık/hacim oranı yaklaşık %77 olacaktır. Ancak karbon fiber takviyeli bir gövde ile bunu %18 mertebesinde sağlamak mümkün olmaktadır (Zimmerman, 2006).

Oceangate firması, Titan'ı küçük ebatta ve hafif bir araç olarak bitirmek istemiş olmalıydı. Çünkü bu sayede denizaltıyı daldırmak için ihtiyaç duyacağı yardımcı sistemler çok daha düşük kapasiteli olacaktı. Bu sebepten mümkün olduğunca yüksek teknoloji bir mukavim tekne malzemesi kullanmak istemiş ve kolaylığı güvenliğe tercih etmiş oldu. NASA'nın mukavim teknenin imalatında Ocean Gates'e danışmanlık verdiği ve üretime destek olduğu basına yansımış ancak testleri kendilerinin gerçekleştirmediğini açıklamıştır. İnternette Titan'ın mukavim teknesini nasıl ve kaç metrede test ettiklerine dair bir bilgiye rastlanamamakta ancak yukarıda değinildiği gibi, 4000m'de çalışacak bir denizaltının hesaplarının 6920 m'ye göre yapılması ve aracın dayanımı 4800m'de test edilmesi gerekirdi. Titan mukavim teknesinin çökmesi sonucu battığına göre bunun üç sebebi olabilir; ya bu testlerin icra edilmemiş olduğu, ya mükerrer dalışlar sonrasında ilk testlerde görülmeyen bir yorulma hadisesinin ortaya çıkmış olabileceği ya da dikkate alınmayan lokal bir deformasyonun yük altında büyüyerek yapıyı çökerttiği düşünülebilir.

Norveç Loydu, Det Norske Veritas, İsveç'te inşa edilmiş kompozit Visby fırkateynini klaslayan ve kompozit üretiminde en tecrübeli klas kuruluşlarındandır. DNV'nin batiskaflarla ilgili kurallarına

baktığımızda (URL 6), Fiber takviyeli plastiklerin denizaltıda sadece basınç yükü taşımayan üst kaplamalarda ve içten basınçlı gaz tankları gibi pressure vessel adı verilen ekipmanlarda kullanımına müsaade ettiği görülmektedir. Kuralla r karbon veya diğer kompozit türevlerinin mukavim tekne imalatında kullanılmasına izin vermemektedir. Her ne kadar şimdi bu kuruluşların adı pek geçmese de internetten eski haberler incelendiğinde Oceangate'in mukavim teknesinin karbonfiber olan silindir kısmının imalatında Boeing ve NASA ile çalıştığı bilgilerine rastlanmaktadır. Yani yüksek teknolojik olan bu kısmın aslında hala araştırma geliştirme safhasında olduğu ve sivil kullanıma henüz uygun olmadığı acı şekilde tecrübe edilmiş oldu.



Şekil 5. Denizaltı mukavim teknesi imalatında kullanılabilecek malzemelerin dayanım derinliği-ağırlık/deplasman oranı karşılaştırması

b- Titan'ın Oksijen Kapasitesi Üzerine

Titan'ın enkazına ulaşılıp da çökme sonucu battığı anlaşılmadan önce batiskaftakilerin hala hayatta olduğuna ve yardım beklediklerine inanılıyordu. Olayın gerçekleşmesinden ve arama çalışmalarının başlamasından birkaç gün sonra Amerika Birleşik Devletleri Donanması'ndan bazı yetkililer Titan'ın battığı bölgeye yakın bir bölgeden her yarım saatte bir kendini tekrar etmesi sebebiyle kesinlikle bir insan tarafından çıkarıldığına inanılan bir ses tespit ettiklerini açıkladılar. Bununla beraber de Titan'da kalan oksijen kapasitesi sayılmaya başlandı ve oksijen kapasitesinin tükenmesi ile beraber de henüz yeri tespit edilemeyen denizaltıdakilerin canlı kurtarılma ihtimalleri tamamen sona erdiği duyuruldu. Yani Titan'ın mukavim teknesi çökmemiş olsa bile içeridekil erin kurtarılması hem de tüm dünya bunun için seferber olmuş olmasına rağmen mümkün olmayacaktı. Çünkü Titan, hiçbir klas kuruluşu kuralına uygun olarak inşa edilmemişti.

Batiskaflarda mürettebatın soluduğu havada %19 ile %23 oranları arasında oksijen bul undurulması istenmektedir. Bu değerlerin altı baygınlık riski/ölüm ve bu değerlerin üstü yangın riski taşımaktadır. Diğer yandan ortamdaki karbondioksit seviyesinin de %0.01'in altında tutulması istenmekte ve %2'nin üzerine çıkması ise ciddi zehirlenmelere neden olmaktadır. Batiskaflarda oksijen özel tüplerde tutulmakta ve bu tüpler genellikle aracın dışında bulunmaktadır ve içeriye borularla girişleri yapılmaktadır. CO2 gazının tutulması ise aracın içerisindeki havanın fanlar aracılığıyla sodalime adı verilen bir tür kimyasalın içerisinden geçirilerek filtrelenmesi ile gerçekleştirilmektedir. Türk Loydu Submersible inşa kuralları (URL 5), tıpkı Det Norske Veritas kuralları (URL 6) gibi, bir batiskafın

operasyonda kullanılacak oksijen ve sodalime miktarına ek olarak tüm personele en az 168 saat daha yetecek oksijen ve solunum sırasında oluşacak CO2 gazının da tutulabileceği kadar sodalime bulundurulmasını istemektedir. Kurallar, bu solunum sisteminin denizaltının ana elektrik sistemi arıza yapsa dahi çalışabilecek harici bir acil durum elektrik sistemine bağlanmasını şart koşmaktadır.

18 Haziran günü dalışına başladıktan sonra anagemi ile irtibatı kopan Titan batiskafı, 22 Haziran'da yaklaşık 120 saat sonra bulunabilmiştir. Oceangate'in, Titan'ın oksijen kapa sitesini 96 saat ile sınırlamış olmasının sebebinin; yine yukarıda bahsedilen boyut kısıtları olduğu düşünülmektedir. (kural kitaplarında zorunlu kılınan 168 saatlik kapasitenin %45 eksiği). Yani Titan mukavim teknesinin çökmesi sonucu batmamış ve içerisinde bulunan insanlar hayatta ve yardım bekliyor olsalardı da bu sefer de oksijensiz kalarak hayatlarını kaybedeceklerdi. Bu da yine aracın tasarımında yapılmış olan çok mühim bir güvenlik eksiği olarak karşımıza çıkmaktadır.

Titan'ın kaybolması tüm dünyanın takip ettiği önemli bir haber olmuş ve kazazedelerin kurtarılması için derhal çok uluslu bir operasyon başlatılmıştır. Arama ve kurtarma çalışmaları için seferber olunmasına rağmen aracın bulunması beş gün sürmüş ve enkazın çıkarılması ise on gün sürerek 28 haziran tarihinde mümkün olabilmiştir. Titan içindeki kazazedeler hayatta kalmış olsalardı da sadece yerlerinin bulunması yeterli olamayacak, kurtarılmaları için batiskafın satha çıkarılması icap edecekti. Bu işlemin on gün sürmüş olduğu göz önünde bulundurulduğunda bırakınız 96 saati 168'in bile yetersiz olduğu ve klas kurallarının 168 saat olan acil durum oksijen kapasitesinin 240 saate çıkarılması gerektiği değerlendirilmelidir.

c- Titan'ın bir oyun konsolu ile kumanda ediliyor olması üzerine

Titan'ın Oceangate'in sahibi Stockton Rush ile beraber dört yolcu ile battığı ve bu yolcuların Titanic Gemisi'nin enkazına dalabilmek için 250.000$ ödedikleri bilinmektedir. Bu bilet fiyatı çok yüksek olduğu değerlendirilebilir bir tutar ve bu dört kişinin birleşerek 1 milyon dolar önermeleri durumunda dünyadaki bu derinliğe dalabilen herhangi bir batiskafı kiralayabilecekleri ve onunla da bu dalışı gerçekleştirebilecekleri değerlendirilebilir. Ancak Oceangate firması burada diğer batiskafların sağlayamayacağı başka bir deneyimi pazarlamaktaydı. Aracın kullanımı o kadar basitleştirilmişti ki, ziyaretçiler sadece akrilik bir pencereden Titanic'i izlemekle kalmıyor aynı zamanda bu batiskafı kumanda etme ayrıcalığına da sahip olabiliyorlardı. Batiskaf imalat kuralları, aracın kumanda konsolu ile ilgili herhangi bir kısıtlama getirmemektedir. Yani Oceangate bu kumandayı tip onaylı veya gerekli testlerden geçirilerek Titan'da kullanması mümkün olmaktaydı. Ancak bu sistemin arıza yapması durumunda bir yedeğinin bulunması sağlanmalı ve bu sistem bozulsa bile batiskafın güvenle satha çıkabilmesini sağlayacak ikincil bir sistemin daha sağlanması gerekmektedir.

d- Aracın kurtarma şamandırasının bulunmuyor oluşu üzerine

Titan denizaltısının Titanic gemisinin enkazına dalmış olduğu nokta biliniyor olmasına rağmen arama çalışmaları okyanus akıntıları ile aracın sürüklenmiş olma olasılığına karşın yaklaşık 20 km2'lik bir alanda yapıldı ve yaklaşık beş gün sonunda aracın enkazına ulaşılabildi. Oysa yine klas kuralları, batiskaflarda bir acil durum şamandıra sistemi bulunmasını ve satha kendi imkanları ile çıkamayan bir aracın içerisinden mekanik yolla bırakılacak bir acil durum şamandırasının bulundurulmasını şart koşmaktadır. Bu şamandıra Titan gibi derin dalış yapan batiskaflarda herhangi bir ipe bağlı olmaksızın salınan ancak akıntı çapası ile atılarak rüzgarla uzaklaşmasına mani olunan ve satha çıktığı zaman acil durum sinyali

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/

yayınlayan bir sistemdir. Yine Titan batiskafı içerisindeki kazazedeler hayatta kalmış olsalardı bile böyle bir şamandırayı bırakarak kurtarma ekiplerinin onları daha hızlı bulmasını sağlayacak önemli bir güvenlik sisteminden mahrumdular. Bu husus da yine kural kitaplarındaki acil durum önlemlerinden birinin eksikliğini gözler önüne sermektedir.

e- Batiskafta giriş-çıkış kaportasının bulunmuyor oluşu

Yine kural kitapları, batiskaflarda içerideki personelin araca giriş çıkış yapabileceği en az bir adet kaportanın (hatch) bulunmasını şart koşmaktadır. Bu kaportanın hem içeriden hem de dışarıdan açılabilmesi istenir ki içerideki personel baygın durumda olursa bile satha çıkarılan aracın kaportası dışarıdan açılabilsin ve içerideki personel kurtarılabilsin. Bu kaportanın da yine test dalış derinliğine dayanıyor olması ve sadece bir değil iki kilitle kilitlenebilmesi beklenmektedir.

Titan batiskafında böyle bir kaporta bulunmuyordu. Aracın baş kısmındaki titanyum bombe, aracın karbon elyaftan üretilen silindir gövdesine cıvatalarla bağlanmaktaydı. Yani Titan kendi imkanlarıyla bile satha çıkabilse içerideki personel mahsur kalmaya devam edecek ve araçtan yardım gelene kadar çıkamayacaktı. Bu husus da yine kural kitaplarına ve mantığa aykırı bir başka durum olarak karşımıza çıkmaktadır.

f- Titan Batiskafı'nın sarnıçları ve acil durum safra bırakma sistemi üzerine

Yine klas kuralları, batiskafların deplasmanlarının %10'unundan fazla bir rezerv sephiyeye sahip olmalarını istemektedir. Yani bir batiskafın suya konulduğunda taşırdığı suyun %10'u kadar toplam kapasitesi olan ana dalma sarnıçlarının bulunması ve satıhta iken bu sarnıçların hava ile doldurulabilmesi istenmektedir. Bu sarnıçların en büyüğünün hacminden daha az olmamak kaydıyla da atılabilir balast olması istenmektedir ki bir arıza durumunda sarnıçların içine hava üflenerek sarnıçlar içindeki su boşaltılamazsa bile bu ağırlıklar atılarak araç yine satha çıkarılabilsin.

Titan Batiskafı'nda ana dalma sarnıcı olmadığı görülmüştür. Ancak denizaltılardaki mukavim ayar sarnıcına benzer bir acil durum sarnıcı bulunmaktaydı. Bu sarnıç normal şartlarda yarısı suyla dolu olarak muhafaza edilmekte ve inilen derinlikle beraber aracın hacmindeki değişikliği kompanse etmekte kullanılmaktaydı. Derine inildikçe değişen yoğunluk ve basınca karşı aracın dengede kalması için bu sarnıca su alınmakta veya sarnıçtan dışarı su boşaltılmaktaydı. Bu sarnıç içerisindeki suyu dışarı boşaltabilmek için 10000psi (yaklaşık 699.5 bar) basınçta hava bulundurulmaktaydı. Bir acil durum anında bu tanktaki su vanalar açılarak tahliye edilmekte ve hafifleyen batiskaf yukarı doğru harekete başlamaktaydı.

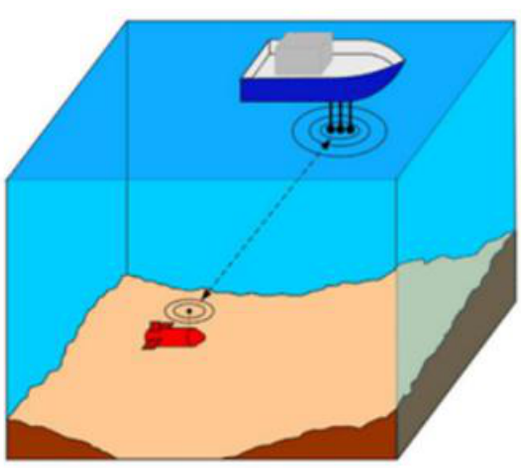
Titan'daki yolcular araç içerisinde bir koltuk bulunmadığı için bağdaş kurarak oturmaktaydılar. Acil bir durumda uygulanacak bir diğer güvenlik önlemi ise oldukça iptidai görünen, çelik borular ve kum torbalarından oluşan bir safra sistemiydi. Bu safra batiskafın içerisinden bir hidrolik kol ile salınabilmekteydi. Ancak görüldüğü kadarıyla araç içerisinde hidrolik motorların bozulması ihtimaline karşı mekanik bir hidrolik pompa veya diğer bir bırakma sistemi bulunmamaktaydı. Bu da aracın elektrik sisteminde meydana gelebilecek bir sorunda safraların bırakılamayacağı anlamına gelmekteydi. Böyle bir ihtimale karşı safraların mukavim tekneye bağlantı noktaları suda 16 saatte eriyen bir malzemeden imal edilmişti. Bu sayede araç tüm sistemleri bozulmuş bir halde dipte kalırsa bile 16 saat içerisinde bu safraları tutan aparatlar eriyecek, safralar araçtan kurtularak aracı hafifletecek ve su üstüne çıkışını sağlayacaktı. Tabi böyle bir çıkış yavaş başlayacak ancak aracın pozitif sephiyesi, üzerine etkiyen

kuvvetle eşitlenene kadar hızlanmaya devam edecek ve erişebildiği maksimum süratte sabitlenecekti. Bu da aracın satha ulaştıktan sonra suyun dışına fırlaması ve sonra sert bir şekilde suya geri düşmesi anlamına gelmektedir ki bu halde Titan'da bağdaş kurarak oturmuş olan yolcuların ciddi bir hasar almadan kurtulmaları büyük mucize olacaktır.

Bu durumda denilebilir ki batiskaf mukavim teknesinin çökmesi sonucu parçalanmasaydı ve içerisinde bulunan insanlar hayatta kalmış olsalardı (bir elektrik kesintisi ile pervaneleri devre dışı kalması halinde) batiskafı satha güvenli bir şekilde çıkarmaları veya içinden sağlam olarak çıkmaları mümkün olamayabilirdi. Araçta bir giriş/çıkış kaportası da bulunmuyor oluşundan ötürü batiskaf satha çıksa bile yolcular içinden çıkamayacaklardı.

g- Aracın kendi üzerinde bir navigasyon sisteminin bulunmuyor oluşu

Yine basına yansıyan güvenlik sorunlarından birisi de Titan'ın kendi üzerinde bir navigasyon sistemi bulundurmuyor oluşuydu. Kural kitapları navigasyon sistemi ile ilgili olarak kapsamlı bir sınırlama getirmemekte ve araçta en az bir gyro pusula olması koşulunu şart koşmaktadır. Gerek araç üzerindeki sponsor firma logolarından ve gerekse de aracın kara kutusundan duyulan pinger seslerinden anlaşıldığı kadarıyla Titan, bir Fransız firmaya ait USBL (ultra short baseline) tarzı navigasyon sistemi ile anagemiye bağlı olarak navigasyon sağlamaktaydı. Şekil 6'da verildiği gibi (URL 4), USBL sistemlerinde sualtındaki araç üzerinde bir gürültü kaynağı pinger bulunmakta ve su üstünde GPS uyduları üzerinden kendi konumunu bilen anagemiye olan mesafenin ölçülmesi ile konum saptanmaktadır. Titan'ın videolarında anlaşıldığı kadarıyla araç, kuralları sağlayacak şekilde dahili bir pusula veya daha üst düzey bir seyrüsefer sistemine sahip değildi.



Şekil 6. Titan'da da kullanılan USBL tarzı pozisyonlama sistemi

Titan Batiskafı'ndaki güvenlik sorunlarına değindikten sonra süreçle ilgili olarak da bazı yorumlar yapmakta fayda görülmektedir. Arama çalışmaları başladıktan kısa bir süre sonra Amerikan Donanması'na bağlı bazı kişiler yarım saatte bir tekrar etmesi nedeniyle insan kaynaklı olduğundan emin oldukları bir sinyal aldıklarını açıkladılar ve bu, kurtarma operasyonunu takip eden herkeste kazazedelerin hayatta olduklarına dair bir umut uyandırdı. Ancak beşinci günde aracın enkazına ulaşılıp Titan'ın mukavim teknesindeki çökme nedeniyle batmış olduğu anlaşılınca Amerikan Donanması'ndan

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/

ikinci bir açıklama daha geldi ve sonar sistemlerinin aslında 18 Haziran 2023 günü bu bölgede bir patlama olduğunu tespit ettiği ve başından beri Titan'ın ne zaman ve nasıl battığını bildiklerini açıkladılar. Titan'ın mukavim teknesinden kalanlar incelendiğinde aracın bir sızdırmazlık sorunu nedeniyle içine su almadığı ve mukavim teknesinin karbon elyaftan imal edilmiş olan kısmının milisaniyeler içinde parçalanmasına neden olacak şekilde içe çökerek patladığı anlaşılmıştır. Bu çökme anında düşük frekansta ve yüksek dalga boyunda bir gürültü ortaya çıktığını yapılan model mukavim tekne çökertme deneylerinden de bilinmektedir. Titan'ın da çökmesi sonucunda kuvvetli bir sinyalin düşük frekansta oluştuğu değerlendirildiğinde bu sinyalin çok uzak mesafelerden tespit edilebilmesi gerekirdi. Bu iki açıklamadaki tutarsızlık Amerikan Donanması'nın düşük frekansta gerçekleşmiş olan ve çok uzak mesafelerden aslında tespit edilebilmesi gerektiği düşünülen gürültü sinyalini gerçekten tespit edip edemediğiyle ilgili de kuşku ve yetkinlikleri konusunda hayret uyandırmıştır.

Sonuç olarak, Oceangates firmasının Titanic gibi çok ünlü bir batığa ziyaretçileri Titan isimli batiskafı ile daldırma ve onlara sualtında batiskaf kullanma deneyimi yaşatma iş fikri üzerinden kişi başına 250,000$ tutarında bilet kestiği bilinmektedir. Hem aracın NASA ve Boeing desteği ile yapılmış olduğunun beyan edilmesi hem de firma sahibinin de ziyaretçilerle beraber dalışa katılıp aracı kullanarak güven veriyor olması sayesinde ziyaretçileri araca, tüm bu eksik güvenlik önemlerine rağmen, güvenerek dalışı gerçekleştirmeye ikna edebilmiştir. Yukarıda açıklandığı gibi kompozit mukavim tekne imalatının aracın boyutlarını ve yardımcı sistemlerini ufaltmakla ilgili önemli avantajlarının bulunuyor olmasına karşılık su üstü gemilerinde kendini kanıtlamış bu imalat yönteminin denizaltılarda kullanımı için hala araştırma geliştirme çalışmalarına ihtiyaç duyulduğu acı şekilde görülmüştür.

Yaşanan acı olay, denizaltı gibi özel gemilerin klas kurallarına uygun şekilde imal edilmesinin önemini gözler önüne sermiştir. Titan için gerçekleştirilen kurtarma operasyonu, Titan'ın 96 saatlik oksijeninin yetersiz olduğunu göstermiş ve kazazedeler denizaltıda mahsur kalmış olsalar dahi kurtarılmalarının mümkün olamayacağı görülmüştür. Denizaltı kurallarındaki 168 saat oksijen miktarının dahi yetersiz olabileceği hususunu gözler önüne sermiştir. Yine kurtarma operasyonu ve yaşanan süreç denizaltıdaki acil durum tankları, balast bırakma sistemi ve kurtarma şamandırası gibi kurtarma sistemlerinin önemini gözler önüne sermiştir.

Ülkemizde son yıllarda gerek savunma sanayimizdeki atılımlar ve gerekse açık denizlerimizde yürütülen petrol ve doğalgaz faaliyetleri nedeniyle denizaltı ve sualtı sistemlerinin tasarım faaliyetleri hız kazanmıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi'nde ve Pîrî Reis Üniversitesi'nde Denizaltı Tasarımı dersleri verilmeye başlanmıştır. İTÜ'de hem teorik hem de Ata Nutku Gemi Model Deney La boratuvarı'nda deneysel olarak denizaltıların hidrodinamiği, akustik karakteristikleri ve mukavemeti konusunda çalışmalar yürütülmektedir. Konuyla ilgili birçok deney sistemi kurulmuş ve başta Deniz Kuvvetleri Komutanlığı olmak üzere önde gelen savunma sanayii şirketleri için denizaltı ve sualtı sistemlerine yönelik testler icra edilmektedir. İTÜ'nün bir iştiraki olan Datum Denizaltı Teknolojileri Uygulama ve Mühendislik A.Ş. firması tarafından 2013 yılından beri sualtı sistemlerinin testleri, sualtı taarruz komandolarının intikal araçları, denizaltıdan personel kurtarma ve turistik amaçlarla kullanılmak üzere tasarımı ve yazılımı %100 milli olan mini denizaltılar tasarlanmakta ve yüksek yerlilik oranıyla inşa edilmektedir.

Denizaltı tasarım faaliyetlerinin henüz başında olan ülkemizin Titan'ın başına gelen acı kazadan dersler çıkarması büyük felaketlerin önüne geçecektir. Savunma Sanayii Başkanlığı'nın öncülüğünde yapılan çalışmalarda klas kuruluşu kurallarına riayet edilmesine gösterilen özenin ve ilgili kuralların geliştirilmesi için yapılan yatırımların değeri daha iyi anlaşılmıştır. Tasarlanan yeni araçların kullanıma alınması öncesinde yapılması gereken testlerin ihmalinin ne denli hayati sorunlar ortaya çıkarabildiği

bu kazada görülmüştür. Benzer olayların ülkemizde yaşanmaması için gerekli bilincin oluşturulması hayatidir. Hem gerekli testlerin Savunma Sanayii Başkanlığı ve Türk Loydu eşliğinde iyi şekilde planlanması hem de bu tarz projelerde devletimizin, özellikle Deniz Kuvvetleri ve Kıyı Emniyeti Genel Müdürlüğü, başta olmak üzere imkanlarının kullanımının kolaylaştırılması önem arz etmektedir. Gerek savunma sanayi, gerek doğalgaz ve yaygınlaşan turistik denizaltı kullanım faaliyetleri nedeniyle yerli veya yabancı batiskaf veya denizaltılarda oluşabilecek bir kazada kazazedelerin kurtarılması konusu ülkemizde bu iki kurumun imkan ve kabiliyetlerine muhtaç olacaktır. Deniz Kuvvetlerimizin TCG ALEMDAR Denizaltı Kurtarma Anagemisi, kurtarma ve yedekleme gemileri TCG IŞIN, TCG AKIN ve Kıyı Emniyeti Genel Müdürlüğü'nün NENE HATUN gemilerinin inşasının ne denli önemli yatırımlar olduğu bu vesile ile görülmüştür. Bu gemiler başta olmak üzere kurtarma gemilerinin ve bunlara ait ekipmanların; mini denizaltıların da arama ve kurtarma operasyonunu gerçekleştirebilecek şekilde hazırlanmaları gerektiği ortaya çıkmıştır. Bu gemilerin bakımlı tutulmalarının yanı sıra, planlı faaliyetlerine mini denizaltı ve batiskaflarla ilgili de arama ve kurtarma tatbikatlarının eklenmesinin hazırlık seviyesini artırmak yönünde önemli bir gereklilik olduğu anlaşılmıştır.

Referanslar

URL 1: https://www.lbc.co.uk/news/inside-titan-submersible-lost-titanic-exploration/

Allmendinger, E. E., "Submersible Vehicle Systems Design", SNAME, (1990)

URL 2: https://www.engineering.com/story/the-titan-submersible-a-little-testing-wouldnt-have-killed-them

URL 3: https://education.nationalgeographic.org/resource/bathyscaphe/

Zimmerman, S. – "Submarine Technology for 21st Century", (2006)

URL 4: https://www.researchgate.net/publication/356679991_Review_of_Underwater_Sensing_Technologies_and_Applications

URL 5: Türk Loydu Kuralları, Chapter-53, Submersibles https://www.turkloydu.org/pdf-files/turk-loydu-kurallari/cilt-d/chapter-53-submersibles-2015.pdf

URL 6: DNV Rules, Manned Submersibles https://rules.dnv.com/

Gemi ve Deniz Teknolojisi
Sayı: 223, Haziran 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

Tersanelerde Vinç ile Yük Elleçleme Operasyonları ve FRAM Yöntemi Kullanılarak Risk Analizi

Selahattin Özsayan[1], Barış Barlas[2]

[1,2] Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

[1] (sorumlu yazar), ozsayan@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2727-2076
[2] barlas@itu.edu.tr, 0000-0002-5846-2369

ÖZET

Vinçler günlük hayatta inşaat ve gemi inşaatı sanayi, çeşitli fabrikalar, limanlar, demiryolları, her türlü kurtarma işleri gibi çeşitli alanlarda kullanılan, ağır yüklerin kaldırılması ve taşınmasında çok büyük kolaylık sağlayan ekipmanlardır. Kullanım alanlarına ve yük taşıma kapasitelerine göre çok farklı vinç tipleri vardır. Tersaneler, ağır yük elleçleme operasyonları nedeniyle vinçlerin en çok kullanıldığı yerlerden birisidir. Portal vinçler, kule vinç ler ve mobil vinçler tersanelerde başlıca tercih edilen vinç tipleridir. Vinçlerin sıklıkla kullanılması vinç kazalarını da beraberinde getirmektedir. Ülkemizdeki tersanelerde, geçmişten günümüze çok sayıda vinç kazası olmuş ve bu kazalarda istenmeyen yaralanma ve ölümler gerçekleşmiştir. 2010 -2015 yılları arasında tersanelerimizde gerçekleşen 77 vinç kazası tespit edilmiştir. Bu kazalarda yük çarpması %62.3 ile en çok karşılaşılan kaza tipi olurken, yük düşmesi %28.6, yüksekten düşme %7.8 ve elektrik çarpması %1.3 ile onu takip etmiştir. Vinç devrilmesi, montaj sırasında ezilme ve bom/kablo arızası gerçekleşme olasılığı yüksek diğer risklerdir. Ancak vinç tipine göre risklerle karşılaşılma durumları değişmektedir. Bu çalışmada tersanelerdeki vinç kazaları incelenmiş ve yük elleçleme operasyonlarındaki risk analizi Fonksiyonel Rezonans Analiz Metodu (FRAM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Teknik, organizasyonel ve insan faktörleri, FRAM'ın ortak performans koşullarına göre belirlenmiştir. Fonksiyonel rezona ns ilişkisi incelendiğinde ise 'Yüke kaldırma aparatlarının bağlanması', 'Vincin gözle muayenesi', 'Operasyondan önce iletişim prosedürünün belirlenmesi' ve 'Taşınacak yükün istiflenmesi' kritik fonksiyonel modüller olarak belirlenmiştir. Çalışmada kazaları önlemek ve riskleri ortadan kaldırmak için fiziksel, fonksiyonel, sembolik ve görünmeyen engeller ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Vinç kazaları, Tersane, Risk analizi, FRAM

Makale geçmişi: Geliş 12/12/2022 – Kabul 28/07/2023

https://doi.org/10.54926/gdt. 1217718

GMO Journal of Ship and Marine Technology
Issue: 223, June 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Journal homepage: http://www.gmoshipmar.org/
Research Article

Cargo Handling Operations with Cranes in Shipyards and Risk Analysis Using FRAM Method

Selahattin Özsayan[1], Barış Barlas[2]

[1,2] Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Faculty of Naval Architecture and Ocean, Istanbul Technical University, Istanbul

[1] (corresponding author), ozsayan@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2727-2076
[2] barlas@itu.edu.tr, 0000-0002-5846-2369

ABSTRACT

Cranes are equipment used in multiple areas such as shipbuilding industry, construction sector, factories, ports, railways, rescue works and etc. in daily life and provide excellent convenience in lifting and transporting heavy loads. There are many different types of cranes according to their usage areas and load-carrying capacities. Due to heavy load handling operations; shipyards are one of the most used places for cranes. Portal, tower cranes are the primary, and mobile cranes are the preferred crane types in shipyards. The extensive use of cranes has brought occupational accidents. Between 2010 and 2015, 77 related occupational accidents in Turkish shipyards were identified. In these accidents, being struck by load was the most common type of accident with 62.3%, followed by load drop at 28.6%, falling from height at 7.8% and electrocution at 1.3%. Crane tip over, crushed during assembly, and boom/cable failure are other risk factors with a high probability of occurring. In this study, crane accidents in shipyards were examined and risk analysis in cargo handling operations was carried out using the Functional Resonance Analysis Method (FRAM). Technical, organizational and human factors were determined according to the typical performance requirements of FRAM. Crane load handling operation is divided into 11 functional modules and risk factors for these functional modules are evaluated accordingly. As a result of the FRAM analysis, the performance fluctuation of the functional modules 'Lifting the load by crane' and 'Carrying the load' is high. These two functions have been determined as functions with increased accident risk in load-handling operations with a crane. When the functional resonance relationship is examined, 'Connecting the load lifting apparatus', 'Visual inspection of the crane', 'Determining the communication procedure before the operation,' and 'Stacking the load to be transported' are determined as critical functional modules. The physical, functional, symbolic and invisible barriers were revealed to prevent accidents and eliminate risks.

Keywords: Crane accidents, Shipyard, Risk analysis, FRAM

Article history: Received 12/12/2022 – Accepted 28/07/2023

1. Giriş

Vinçler ağır yüklerin kaldırılması ve taşınmasında inşaat ve gemi inşaatı sanayi başta olmak üzere çoğu endüstriyel sektörde, geçmişten günümüze kullanılan önemli bir ekipmandır. Vinçler endüstride çok büyük kolaylık sağlamasına rağmen, vinç kazalarının gerçekleşmesini de beraberinde getirmiştir. 2000-2010 yılları arasında raporlanan kaza istatistikleri incelendiğinde, dünya genelinde 1125 vinç ile ilgili kaza ve bu kazalarda 780'den fazla ölüm ve çok sayıda yaralanma meydana gelmiştir (Norton, 2016). Tersanelerde her yıl çok sayıda iş kazası gerçekleşmektedir. Barlas (2012) 10 yıllık verilere göre yapmış olduğu çalışmada, 10 yılda toplam 1620 kazanın gerçekleştiğini ve bu kazalarda 115 işçinin yaşamını yitirdiğini belirtmiştir. Tersanelerde gerçekleşen iş kazalarında vinç kazaları önemli bir paya sahiptir ve bu kazalarda istenmeyen ölüm ve ağır yaralanmalar gerçekleşmiştir. Tersanelerde meydana gelen kazalara ait iş kazası raporları incelediğinde, yük çarpması, yük düşmesi, yüksekten düşme, elektrik çarpması, bom veya kablo arızası başlıca vinç kazası nedenleridir.

Kullanım alanlarına ve yük taşıma kapasitelerine göre farklılık gösteren farklı vinç tipleri mevcuttur. Şantiyelerde başlıca, kule vinçleri malzeme taşımada kullanılırken, tersanelerde başlıca, portal vinçler, mobil vinçler ve kule vinçleri, blok kaldırma ve döndürme, malzeme taşıma işlemlerinde kullanılırlar. Kaza nedenleri vinç tiplerine göre farklılık gösterse de, Beavers ve diğ. (2006) yapmış oldukları çalışmada 7 farklı vinç tipi için ortak olan kaza nedenlerini bom veya kablo arızası, vinç devrilmesi, elektrik çarpması, yük çarpması/düşmesi, düşme, montaj sırasında ezilme ve karşı ağırlık çarpması olarak belirtmişlerdir.

Bu alanda yapılan çalışmalar incelediğinde özellikle inşaat alanında yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir. Beavers ve diğ. (2006) 1997-2003 yılları arasında ABD'de meydana gelen inşaat sektöründeki vinç ile ilgili 127 kazayı incelemişlerdir. Bu kazalardan %84'ü mobil vinç ile ilgili kazalardır. En çok karşılaşılan kaza tipi ise yük çarpması (%40) ve elektrik çarpmasıdır (%32). Ross ve diğ. (2007) Milwaukee Brewers beyzbol stadyumu çatı inşaatındaki vincin çökmesi ile ilgili vinç operatörü, tasarımcısı ve inşaacısı tarafından ortaya atılan teorileri çürütmek amacıyla kapsamlı bir kaza analizi çalışması yapmışlardır. McCann ve diğ. (2009) 1992-2006 yılları arasında ABD'de gerçekleşen, 323 işçinin yaşamını yitirdiği 307 vinç kazasını incelemişlerdir. Bu kazalarda elektrik çarpması (%32), vincin çökmesi (%21) ve bom arızası (%18) ölümlerin önde gelen nedenleri olarak tespit edilmiştir. Zhao ve diğ. (2012) kule vinci ile ilgili kaza nedenlerini balık kılçığı diyagramı kullanarak ve Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yönteminden yararlanarak incelemişlerdir. Swuste (2013) kule vinçler ile ilgili tasarım aşamasındaki eksikliklere ve vinç piyasaya sürüldükten sonra, denetim aşamasındaki eksiklere odaklanmıştır. Gharaie ve diğ. (2015) yapmış oldukları çalışmada, Avustralya'da inşaat sektöründeki vinç kazalarını Loughborough Modeli ile üç düzeyde (acil durumlar, şekillendirici faktörler ve kaynak etkiler) inceleyerek; acil durumlar için, kullanılan araç ve gereç, malzemeler, çalışanlar ve saha ortamının özelliklerini; şekillendirici faktörler için saha kısıtı, eğitim, çalışanların bilgi seviyesi, denetim ve eşya tasarımı; kaynak etkiler içinse risk yönetimi, inşaa süreci ve proje yönetimini içerdiğini ortaya koymuşlardır. Çalışmadaki kaza raporları analiz edildiğinde, yük çarpması ve elektrik çarpması en yaygın kaza nedeni, alan yerleşimi ve vinç etrafındaki kısıtlı alan en yaygın acil neden, fiziksel saha kısıtlamaları ve inşaat sürecinin tasarımı ise en yaygın şekillendirici faktördür.

Milazzo ve diğ. (2016) beş yıl boyunca anket yoluyla dünya çapında birçok veriyi inceleyerek kazaların ana nedenleri ile ilgili bir veri tabanı oluşturmuşlardır. Veri tabanındaki kazaların %72'si mobil vinçler, %22'si kule vinçleri ile ilgilidir. Mobil vinçlerdeki ana kaza nedeni vinç devrilmesi, kule vinçlerinde ise vincin çökmesidir. Güney Kore'de 2007 yılından 2016 yılına kadar 245 ölümlü mobil vinç kazası incelenmiş, kazaların ana nedeni olarak insan hatası ve vinç sorunları belirlenmiştir (Lee ve diğ., 2020). Mobil vinç kazalarını minimuma indirmek için eğitim, teknik ve kurallar konusunda önerilerde

bulunmuşlardır. Zaini ve diğ. (2020) en çok atıf yapılan 8 makaleyi inceleyerek vinç kazalarının nedenlerini özetlemiş ve Malezya'da inşaat sektöründeki başlıca vinç kazası nedenlerini n, operasyonel ve teknik problemler olduğunu ortaya koymuştur. Kim ve Kang (2022), ,insan yapımı, yönetim, ekonomik, fiziksel, politik ve sosyal (The man-made, management, economic, physical, political, and social – MEPS) analiz yöntemi ile Güney Kore'de 2015-2019 yılları arasında gerçekleşen 56 mobil vinç kazasının temel nedenlerini incelemişlerdir. Analiz sonuçlarında fiziksel faktörde mobil vincin devrilmesi ve düşmesi, yönetim faktöründe ise prosedür ve düzenleme eksikliği öne çıkmıştır.

Tersanelerde vinç operasyonları sıklıkla yapılmasına ve vinç kazaları meydana gelmesine rağmen literatürdeki risk analizi çalışmaları inşaat sektörü üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada kullanılan 2010-2015 yılları arasındaki kaza raporlarından ülkemizdeki tersanelerdeki vinç kazası nedenleri 11 temel başlık olarak belirlenmiş ve vinç ile yük elleçleme operasyonlarındaki riskler "Fonksiyonel Rezonans Analiz Metodu (Functional Resonance Analysis Method - FRAM)" ile incelenmiştir. FRAM analizi çıktılarına göre vinç kazalarının azaltılması ve önlenmesi ile ilgili öneriler çalışmanın ileriki bölümlerinde sunulmuştur. Bu çalışmada, tersanelerimizde meydana gelen vinç kazalarının oluşmasında belirlenen 11 adet fonksiyonel arasından, yükün kaldırılması ve yükün taşınması fonksiyonel modüllerinin performans dalgalanmasının en yüksek olduğu ve vinç operasyonlarının yüksek kaza riski barındıran en önemli iki fonksiyonu olduğunu ortaya konulmuştur.

2. Materyal ve Metod

Fonksiyonel Rezonans Analiz Metodu (FRAM), risk değerlendirmesi ve/veya kaza araştırmalarında son yıllarda sıklıkla kullanılan bir performans değerlendirme yöntemidir. Fonksiyonel rezonans, sistemdeki anlık etkileşimdir ve FRAM, normal bir durumdan fonksiyonel rezonansa geçişi tanımlamanın bir yoludur (Hollnagel, 2012). FRAM, başarı ve başarısızlığın denkliği ilkesi, yaklaşık ayarlamalar ilkesi, ortaya çıkma ilkesi ve işlevsel rezonans ilkesi olmak üzere 4 temel ilkeye sahiptir.
FRAM analizi 5 ana adımda gerçekleştirilir (Hollnagel, 2012):

Adım 0: Analizin amacını ve kapsamını belirleme
Adım 1: Sistem fonksiyonlarını tanımlama
Adım 2: Performans değişkenliğini tanımlama
Adım 3: Performans değişkenliğinin toplama
Adım 4: Değişkenliği kontrol etmenin yolları

İlk olarak FRAM yönteminde, bir sistemin belirli bir sonuç üretmesi için ihtiyacı olan fonksiyonların tanımlanması gerekir (Diop ve diğ, 2022). Her bir fonksiyon girdi (I), çıktı (O), önkoşul (P), kaynak (R), zaman (T) ve kontrol (C) kısımlarına sahiptir ve altıgen yapı şeklinde gösterilir (Şekil 1). Şekil 1'de gösterilen FRAM ifadeleri aşağıda tanımlanmıştır.

Girdi (I): Fonksiyonu başlatır ya da dönüştürür.

Çıktı (O): Fonksiyonun sonucu ya da bir durum değişikliğidir.

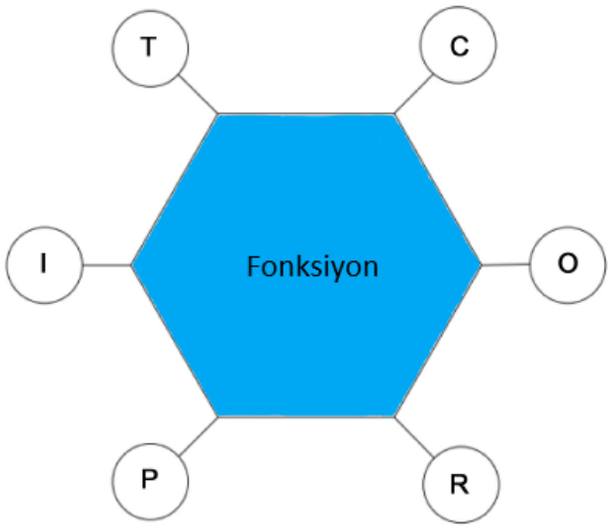
Önkoşul (P): Bir fonksiyonun gerçekleştirilebilmesi için olması gereken koşullardır.

Kaynak (R): Fonksiyonun çıktıyı üretmek için ihtiyaç duyduğu kısımdır.

Zaman (T): Fonksiyonel bir modülde zaman ile ilgili kısıtlamalardır.

Kontrol (C): Fonksiyonun nasıl izlendiğini ve kontrol edildiğini ifade eder.

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/



Şekil 1. Altıgen fonksiyon grafiği (Hollnagel, 2012).

Her bir fonksiyon için Şekil 1'deki gibi yapı oluşturulduğunda, çeşitli fonksiyonlar arasındaki bağlantı kurulur. Her fonksiyonel modül tek bir fonksiyonel modül ile bağlanabileceği gibi aynı anda birden fazla fonksiyonel modül ile de bağlanabilir. FRAM, sistemi etkileyen faktörleri ve sistem işlevinin nasıl değiştiğini belirleyen bir tür ortak performans koşulunu belirler. Ortak performans koşullarının değerlendirme sonuçları yeterli, yetersiz ve öngörülemez olarak sınıflandırılmıştır. "Yeterli" risk faktörünün oluşma olasılığının düşük olduğunu, "yetersiz" risk faktörünün meydana gelme olasılığının daha yüksek olduğunu ve "öngürülemez" risk faktörünün ortaya çıkma olasılığının çok yüksek olduğunu göstermektedir (Hu ve Tang, 2018). Fonksiyonların performans değişiklik durumu rastgele, fırsat, taktik ve strateji olmak üzere dört kategoride tanımlanabilir. Bu dört kategori fonksiyonel performanstaki dalgalanmaları ifade eder. Rastgele işlevsel modülün performansının büyük oranda dalgalandığını ifade etmektedir. Bir fonksiyonun sonucu rastgele olarak değerlendirildiğinde bu fonksiyon, kolayca hatalı hale gelir ve fonksiyonel rezonans üretir. FRAM analizi sonucunda rastgele fonksiyonel modülünü etkileyen diğer fonksiyonel modüllerin etkisi tespit edilir ve hatanın bağlantısı belirlenir. Fonksiyonların performans değişiklik durumları, ortak performans koşullarının değerlendirme sonuçları ile Tablo 1'deki gibi belirlenir (Hu ve Tang, 2018).

Tablo 1. FRAM fonksiyonların performans değişiklik durumları.

Rastgele	Öngörülemez≥3 ya da Yetersiz≥8
Fırsat	Öngörülemez=2 ya da Yetersiz≥6
Taktik	Öngörülemez=1 ya da Yetersiz≥4
Strateji	Öngörülemez=0 ya da Yetersiz≤3

FRAM metodolojisinde kazaları önlemek, riskleri ortadan kaldırmak için engeller mevcuttur. Bunlar fiziksel, işlevsel , sembolik ve maddi engeller olarak ifade edilir (Hollnagel, 2009). Fiziksel engeller, belirli olayların oluşmasını engeller ve acil durumların etkisini azaltır. İşlevsel engeller, bir eylemi gerçekleştirmeden önce yerine getirilmesi gereken bir veya daha fazla ön koşul oluşturur. Sembolik engellerde engelleme işlemi, kısıtlanmış davranışın yorumlayıcı işareti aracılığıyla değerlendirilir. Maddi engeller, bir bariyer rolü oynamak için kullanıcı bilgisini esas alır.

3. Tersanelerde Kullanılan Vinçler

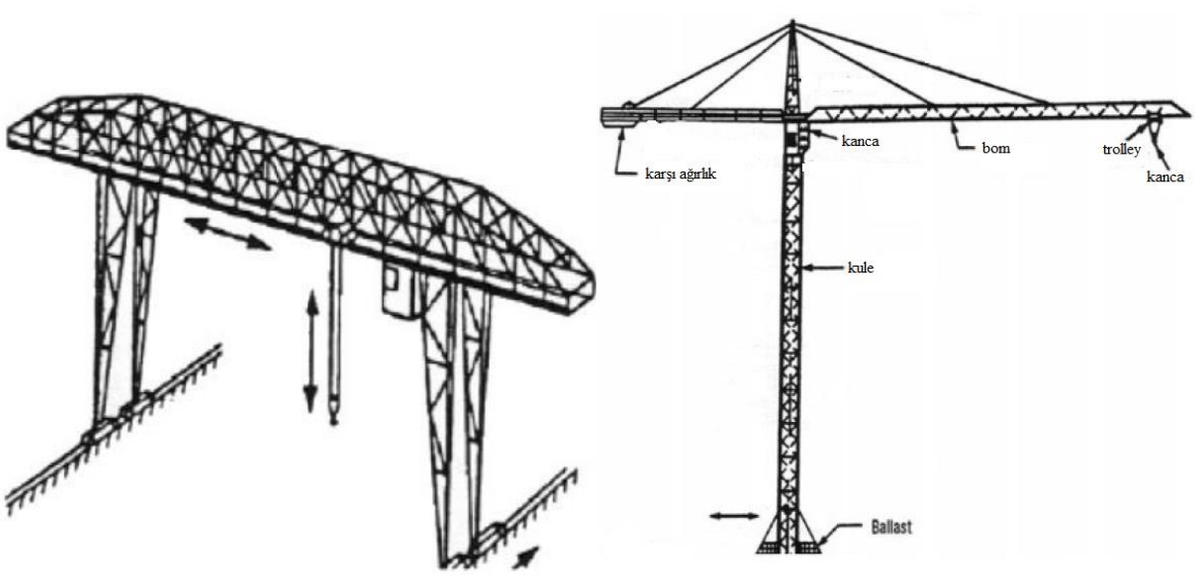
Tersanelerd e portal vinçler, kule vinçler, mobil vinçler, monoray vinçler, sepetli vinçler, pergel vinçler, gezer köprülü vinçler gibi birçok vinç çeşidi bulunmaktadır. Tersane sahasında kullanım alanlarına göre bakıldığında, kızak bölgesinde, zeminden gemi güvertesine malzeme taşımak için genellikle kule vinçler ve pergel vinçler kullanılırken, blok montaj alanındaki blokların, döndürme ve kızağa taşınma işlemlerinde, stok alanlarında tersanelerin çoğunda portal vinçler ve mobil vinçler kullanılır. Kapalı atölyelerde ise genellikle gezer köprülü vinçler ya da monoray vinçler tercih edilmektedir. Gemi bordasında kaynak ya da boyama işlemlerinde ise sıklıkla sepetli vinçler kullanılır. Ayrıca bu vinç tipleri kendi aralarında da sınıflandırılmaktadır.

3.1. Portal vinçler

Portal vinçler köprü adı verilen yatay kirişten, kirişi taşıyan ayak veya ayaklardan, kiriş üzerinde hareket eden yükleri taşımak için kullanılan yapıdan (trolley) oluşur ve zemine sabitlenmiş raylar üzerinde hareket eder (URL-4, 2023). Kiriş ve ayak sayısına göre farklı tipleri mevcuttur. Yüksek taşıma kapasitesi sunması, açık ve kapalı alanlarda kullanılabilmesi, kullanım kolaylığı ve kolay bakımı bu vincin avantajlarıdır. Tersane sahaları incelendiğinde tersanelerde en çok yer alan vinç çeşididir (Şekil 2).

3.2. Kule vinçler

Kule vinçler kule adı verilen bir gövde ile zemine sabitlenirler. Gövde kısmının üzerinde rayları olan, yükleri taşıyan, yatay olarak yerleştirilmiş bom bulunmaktadır ve bomun kuyruk kısmına, yükü dengelemek için karşı ağırlık sabitlenmiştir. Bom üzerinde, bom boyunca gidip gelebilen, vinç halatlarının bağlı olduğu bir araba (şaryo) mevcuttur (Shapara ve diğ., 2007). Bu sayede en ağır yükleri gövdeye yakın yerlerde taşırlar. Yük alım miktarı gövdeden uzaklaştıkça azalmaktadır ve en uçta 1 tonu geçemez (URL-1, 2022). Kule vinçlerde dişli mekanizması yardımıyla üst kısım 360 derece dönebilmektedir (Şekil 2). Kule vinçler yüksekliği fazla olan sahalarda kullanılırlar. Bu nedenle kızak sahasında gemi güvertesine malzeme taşımasında tercih edilmektedirler.

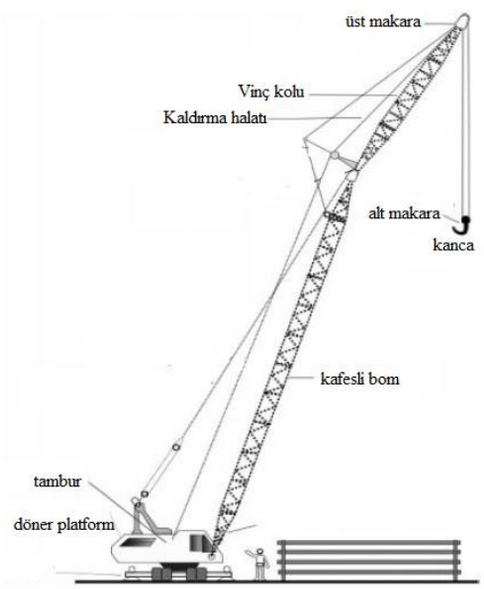


Şekil 2: Vinç görünümleri, sol) portal, sağ) kule vinç (URL-3,2023).

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

3.3. Mobil vinçler

Mobil vinçler paletli veya lastik tekerlekli kamyon, tır gibi taşıyıcılara monte edilmiş, kablo kontrollü bir yapıda ya da teleskobik bomlu hidrolik tahrikli yapıdadır. Hareke tli yapısından dolayı, günlük işlerin çoğunda, dar alanlarda kullanılabilmesi ve yüksek taşıma kapasitesine sahip olması en büyük avantajıdır (URL-2,2022). Dezavantajı ise eğimli yerlerde kullanılmaya elverişli olmamasıdır. Tersanelerde özellikle blok kaldırma işlemlerinde, portal vinçlerin yeterli olmadığı durumlarda kullanılırlar (Şekil 3).



Şekil 3: Mobil vinç görünümü (URL-3,2023).

3.4. Gezer köprülü vinçler

Kapalı alanlarda kullanılan gezer köprülü vinçler, köprü adı verilen yatay kirişten ve köprü üzerinde hareket eden trolleyden oluşmaktadır (URL-4, 2023). Bina tavanlarına yerleştirilen vinç yolu üzerinde yatay kiriş hareket etmektedir . Portal vinçlerden temel farkı ayaklarının olmamasıdır. Kiriş sayısına göre farklı tipleri mevcuttur. Tersanelerde kapalı atölyelerde sıklıkla kullanılmaktadır.

3.5. Pergel vinçler

Zemine sabitlenen bir kolon ve kolana bağlanan yüklerin taşındığı kısımdan oluşmaktadır (URL-4, 2023). En büyük avantajı istenilen açıda dönmesi ve maliyetinin ucuz olmasıdır. Tersanelerde kızak bölgesinde kullanılmaktadır.

4. Tersanelerde Gerçekleşen Vinç Kazaları ve Barındırdığı Riskler

Ülkemizdeki tersanelerde vinç kaynaklı kazalar önemli bir yere sahiptir. Tersanelerimizde 2010-2015 yılları arasında meydana gelen vinç operasyonu kaynaklı 77 kaza meydana gelmiştir. Bu kazalara ait kaza inceleme raporları ve bilirkişi raporları toplanarak, tek tek incelenmiştir. Raporlardan elde edilen verilere göre kazalarda en çok karşılaşılan kaza başlığı yük çarpmasıdır. Tablo 2'de 2010-2015 yılları arasında tersanelerimizde gerçekleşen vinç kazaları başlıkları ve rakamları verilmiştir.

Tablo 2. 2010-2015 yılları arasında gerçekleşen vinç kazaları ve rakamları.

Kaza	Kaza sayısı
Yük çarpması	48
Yük düşmesi	22
Yüksekten düşme	6
Elektrik çarpması	1

Tablodan görüldüğü üzere yük çarpması ve yük düşmesi tüm vinç operasyonu kazalarının %91'ini oluşturmaktadır. Örnek olması açısından, Tuzla'da gerçekleşen vinç operasyonu kazalardan birisinin detayları şu şekildedir: Kaza olayı kule vinç ile yük kaldırma esnasında gerçekleşmiştir. 3.5-4 ton arası ağırlığa sahip bir yük vinç tarafından kaldırılmaya başlandığı esnada, henüz yükün tamamı kaldırılmadan, vinç bomundaki civataların kopması sonucu, bomun bir parçası ana bom gövdesinden ayrılıp düşmeye başlamış, düşen parça, operatör kabinine vurarak, kabini vinçten ayırmış ve aşağıya düşmesine neden olmuştur. Kabin içerisinde yer alan vinç operatörü 15 m yükseklikten kabin ile birlikte düşerek hayatını kaybetmiştir. Vinç kazalarına ait kaza raporlarının derinlemesine incelenmesi sonucunda, yük elleçleme operasyonlarında karşılaşılan riskler 7 başlık altında toplanmıştır. Vinç tipine göre risklerle karşılaşılma durumları değişmektedir. Mobil vinçlerde vincin devrilmesi en çok karşılaşılan risk olurken kule vinçlerinde vincin çökmesi en çok karşılaşılan risktir.

4.1. Bom/kablo arızası

Kule ve mobil vinçlerde karşılaşılma riski çok yüksek olan bom/kablo arızasına neden olan alt faktörler bom burkulması, bom çökmesi, aşırı yük, ekipman hasarı, yanlış montaj, kablo kopması olarak sıralanabilir (Milazzo ve diğ., 2016). Alt faktörlerden biri kaza oluşumuna tek başına da sebep olabilirken, birden fazla alt faktörde kazaya sebebiyet vermektedir.

4.2. Vinç devrilmesi

Mobil vinçlerde görülen en yüksek risktir (Milazzo ve diğ., 2016). Kule vinçlerinde de şiddetli rüzgarlar sebebiyle karşılaşılma olasılığı yüksektir. Vinç devrilmesinin alt faktörleri incelendiğinde aşırı yükleme, ağırlık merkezinin kontrol edilememesi, denge ayakları arızası, şiddetli rüzgarlar, yan çekme ve uygun olmayan bakım gösterilebilir (Beavers ve diğ, 2006).

4.3. Elektrik çarpması

Elektrik çarpması tüm vinç tiplerinde karşılaşılan bir risktir. Elektrik çarpmasının alt nedenleri incelendiğinde vinç etrafındaki elektrik hattı ile bom, kablo, askı, yük kontağı verilebilir. Bu nedenle vinç çalışma alanlarında elektrik kablo ve sistemleri, elleçleme operasyonu öncesinde titizlikle incelenmelidir.

4.4. Yük çarpması/ Karşı ağırlık çarpması

Yük çarpması tersanelerde karşılaşılma olasılığı yüksek risklerden biridir. Yük çarpmasının alt nedenleri incelendiğinde dengesiz yüklenmiş yükler, hızlandırılmış hareketler ve ekipman zararları verilebilir (Beavers ve diğ, 2006). Karşı ağırlık çarpmasında ise kule vinçlerindeki karşı ağırlıkların düşmesi, portal vinçlerde yük asılan kancanın çarpması alt faktörler olarak sıralanabilir.

4.5. Yüksekten düşme

Tüm vinç tiplerinde görülen risklerden biridir. Tersanelerde ve gemi bordalarında işlem yapılırken vinç sepetlerindeki korkulukların eksikliğinden, ekipman yetersizliğinden ya da vinçlerin bakımları için yüksekte çalışılması gerektiğinde sıklıkla karşılaşılabilmektedir.

4.6. Montaj sırasında ezilme

Vinçlerin bakımları esnasında ya da ilk kurulum esnasında karşılaşılan risklerdir. Vinç kurulumu yapılırken yanlış montaj yapılması, bakım esnasında yanlış pin sökülmesi nedeniyle devrilme alt faktörler olarak sıralanabilir.

4.7. Yük düşmesi

Yük düşmesi, aynı yük çarpması gibi tersanelerde karşılaşılma olasılığı yüksek risklerden biridir. Bağlantı elemanlarının yanlış ya da yetersizliği ve dengesiz yüklenmiş yükler alt risk faktörleri olarak karşımıza çıkmaktadır.

5. Vinç ile yük elleçleme operasyonlarında risk analizi

Tersanelerde vinç ile yüklerin kaldırılması ve taşınması operasyonları gün içerisinde sıklıkla gerçekleştirilen operasyonlardır. Bu operasyonlar çok sayıda risk barındırmaktadır. Bu kısımda FRAM ile risk analizi bu operasyonlar için uygulanacaktır.

5.1. Vinç ile yük elleçleme operasyonları

Tersanelerde vinçler ile boru, ekipman, profil gibi küçük ve nispeten hafif malzemeler taşındığı gibi modül, blok gibi büyük ve ağır malzemelerde taşınır. Yük elleçleme operasyonlarının nasıl gerçekleştirildiği bu kısımda anlatılmıştır. Operasyondan önce vinç operatörü ve görevli personel operasyonla ilgili bilgilendirilir. Bu bilgilendirme taşınacak yük veya yüklerin özellikleri, nereden nereye taşınacağı ve ne zaman taşınacağı ile ilgilidir. Taşınacak yükün özellikleri (yükün ağırlığı, ağırlık merkezinin yeri, yapısı) bu operasyonlarda çok büyük önem taşır. Taşınacak yükün özelliklerine göre uygun ekipman seçimi gerçekleştirilir. Eğer taşınacak yükün üzeri nde vincin halatı ile bağlanmasına olanak sağlayan bağlantı elemanları (mapaları) yoksa mapalar bu bilgilere göre yerleştirilir. Mapaların özellikleri yükün ağırlığına göre seçilir. Mapaların yüke bağlanması esnasında konumu ağırlık merkezine göre ve yükün yapısına göre belirlenir. Mapaların bağlantısının uygunluğu kalite kontrol birimi tarafından incelenmelidir. Mapaların boyutlarının, bağlantı yerlerinin ve kaynak tipinin resimle uygunluğu, uygulanan kaynağın ise tahribatsız muayene yöntemleri ile uygunluğu kontrol edilmelidir. Eğer bir geminin yaşam mahalli, makine dairesi üst blokları gibi rijit olmayan bir blok elleçleme operasyonu yapılır ise bloğun deforme olmaması ve elleçleme operasyonunun riskli hale gelmemesi için blok bünyesine yapısal elemanlar ile desteklemeler eklenmelidir. Yükün vince bağlanıp taşınacağı yer ise operasyondan önce vincin ve yükün hareketine uygun olacak şekilde ayarlanmalıdır.

Operasyondan önceki hazırlıklar tamamlandıktan sonra vincin halatları ile yük mapalardan birbirine bağlanır. Bu esnada bağlantının uygun olup olmadığı kesinlikle kontrol edilmelidir. Vincin halatları, yük birden fazla noktadan kaldırılacak ise merkezlenmelidir. Kaldırma işlemi başlamadan önce yükün üzerinde personel bulunmamalıdır ve rüzgar durumu yakından takip edilmelidir. Vincin kaldırma ve

taşıma sahasının uygunluğu kontrol edilmelidir. Yük kaldırma işlemi başladığında mapaların bağlantı noktaları, yük ve vinç dikkatle izlenmelidir. Herhangi bir farklı ses ya da tehlike öngörülüyorsa yük bırakılmalıdır. Yük kaldırıldıktan sonra yükün altında ve taşıma alanında kesinlikle personel bulunmamalıdır. Yük belirlenen alana kadar dikkatlice taşınmalı ve daha sonra o noktaya bırakılmalıdır.

5.2. Vinç ile yük elleçleme operasyonunun fonksiyonel modüllerinin belirlenmesi

Vinç ile yük elleçleme operasyonunun risk analizini değerlendirmek için operasyonun tüm süreci, 11 fonksiyonel modül kullanılarak tanımlanmıştır. Tablo 3'te tersanelerde yük elleçleme operasyonlarındaki fonksiyonel modüller verilmiştir.

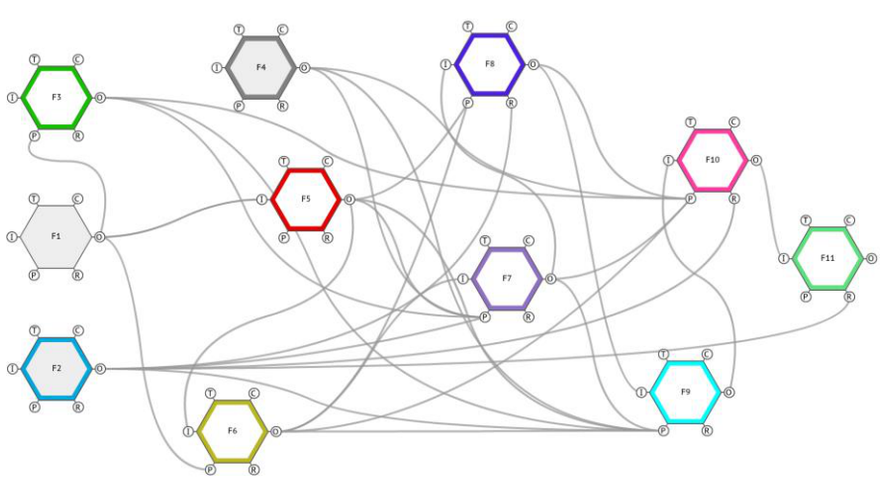
Bölüm 2'de ifade edildiği gibi her bir fonksiyon için altıgen yapı oluşturulmuştur. Tablo 4'te örnek olarak F9 fonksiyonun altıgen yapısındaki tanımlamalar verilmiştir. Tablo 3'te verilen FRAM fonksiyonel modülleri arasında oluşturulan FRAM fonksiyonel ağı, Şekil 4'te verilmiştir.

5.3. Her bir fonksiyon için performans değişkenliğinin değerlendirilmesi

Yük elleçleme operasyonları için tanımlanan 11 fonksiyon için ortak performans durumlarına göre risk faktörleri, elde bulunan vinç kazalarına ait kaza raporlarının derinlemesine incelenmesi sonucunda, belirlenmiştir. Belirlenen riskler yeterli, yetersiz ve öngörülemez olarak değerlendirilmiştir. Tablo 5'te F9-Yükün taşınması fonksiyonu için performans değişkenliği örnek olarak verilmiştir. Risk faktörleri değerlendirilmiş, 4 adet öngörülemez, 4 adet yetersiz ve 1 adet yeterli çıkmıştır. Her bir fonksiyonel modüldeki performans değişkenliğinin risk faktörlerine göre değerlendirilmesi ise benzer şekilde yapılmıştır ve Şekil 5'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Yük elleçleme operasyonu fonksiyonları.

F1- Vinç Operatörü ve personelin görevle ilgili bilgilendirilmesi	F7- Yükün vince bağlanması
F2- Operasyondan önce iletişim prosedürünün belirlenmesi	F8- Vinç tarafından yükün kaldırılması
F3- Vincin gözle muayene edilmesi	F9- Yükün taşınması
F4- Vincin periyodik muayenesinin yapılması	F10- Yükün belirlenen alana indirilmesi
F5- Taşınacak yükün istiflenmesi	F11- Yükün vinçten ayrılması
F6- Yüke kaldırma aparatlarının bağlanması	



Şekil 4. Yük elleçleme operasyonu fonksiyonları için oluşturulmuş FRAM fonksiyonel ağı.

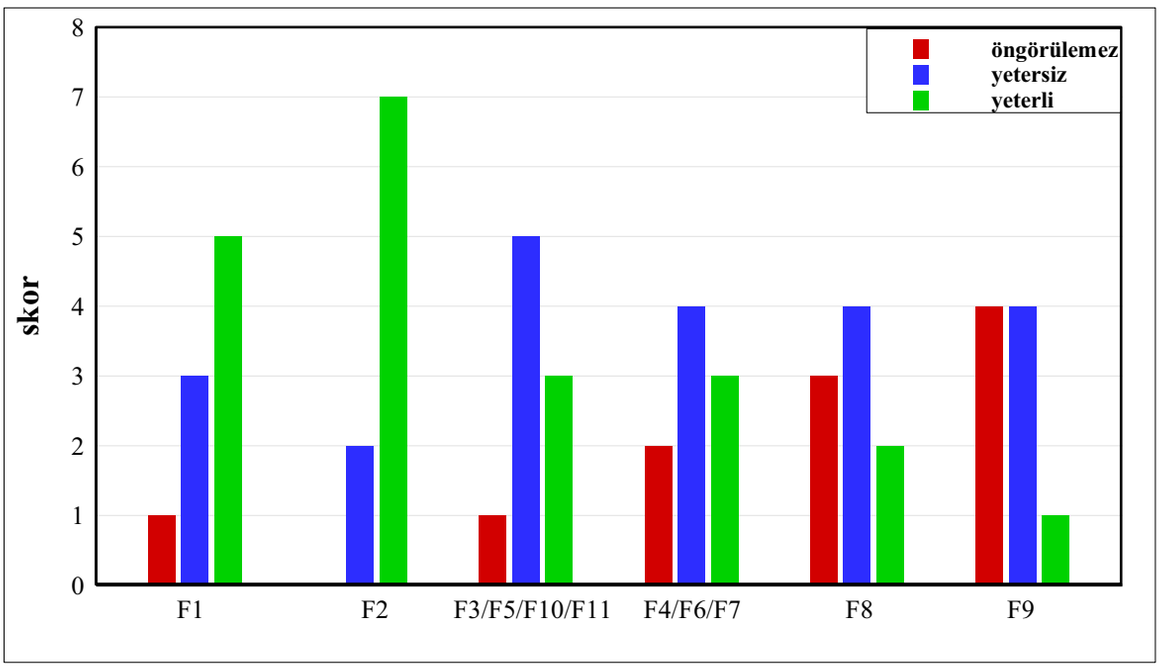
Tablo 4. F9- Yükün taşınması fonksiyonun altıgen modülü.

Girdi (I)	Vinç tarafından yükün kaldırılması
Çıktı (O)	Yükün belirlenen alana indirilmesi
Kaynaklar (R)	Vinç
	Vinç operatörü
	Saha ekibi
	İletişim sistemi
	Sapanlar
Zaman (T)	Belirli bir zaman yoktur
Kontrol (C)	Vinç bağlantı yerleri izlenmelidir
	Mapalar izlenmelidir
	Yük kontrol edilmelidir
	Operasyon sahası kontrol edilmelidir
Önşartlar (P)	Vincin gözle muayene onay belgesi
	Vincin periyodik muayene sertifikası
	Yük istifinin operasyon sahasına uygunluğu
	Taşıma aparatlarının dinamik yüklere uygunluğu
	Yükün taşımaya uygun vince bağlanması
	Operasyon sahasının uygunluğu

Tablo 5. F9-Yükün taşınması fonksiyonu için ortak performans durumları.

Ortak Performans Durumları	Risk Faktörleri	Değerlendirme sonuçları
Organizasyonun kalitesi ve desteği	1) Vincin bağlantı yerlerinin arızası. 2) Taşınacak ekipmanın gelen dinamik yükler nedeniyle deformasyonu. 3) Dinamik yükler nedeniyle vinç devrilmesi.	öngörülemez
Çalışma koşulları	1) Aşırı rüzgar nedeniyle yük çarpması. 2) Taşıma sahasının sıkışık, dar olması nedeniyle yük çarpması veya düşmesi.	yetersiz
İnsan-Makine Arayüzü ve operasyonel destek	1) Taşıma esnasında vincin elektrik hattına teması ile vinç operatörüne elektrik çarpması.	öngörülemez
Prosedürlere ve yöntemlere erişim	1) Taşıma alanının prosedürlere uygun olmaması. 2) Vinç ile taşıma esnasındaki prosedürlere uyulmaması.	öngörülemez
Gerekli zaman/mevcut zaman ilişkisi	1) Operasyon süresi uzayabilir.	yeterli
Sirkadiyen ritim ve basınç	1) Operatörün zayıf psikolojik toleransı. 2) Operatörün yorgunluğu ve iş paniği. 3) Depresyon.	öngörülemez
Eğitim ve Tecrübe	1) Vinç operatörünün yetersizliği. 2) Yeni operatörün ilk defa bu görevi yapması.	yetersiz
Mürettebat işbirliği/iletişim kalitesi	1) Vinç operatörü ve ekibin ilk kez birarada çalışması. 2) İletişim sistemi arızası.	yetersiz
Kaynakların kullanılabilirliği	1) Taşıma prosedürü hataları. 2) Vincin arızası.	yetersiz

GMO Journal of Ship and Marine Technology
Issue: 223, June 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Journal homepage: http://www.gmoshipmar.org/
Research Article



Şekil 5. Fonksiyonel modüllerin değerlendirme sonuçları.

5.4. Fonksiyonel rezonans için olasılıkların belirlenmesi

F8 ve F9 fonksiyonel modüllerinin performans değişkenliği rastgele olarak değerlendirilmiştir. Bu nedenle bu iki fonksiyonel modül için fonksiyonel rezonans modülü, etkileyen faktörleri ve başarısız bağlantıları belirlemek için analiz gerçekleştirilmiştir.

F8 modülü incelendiğinde yükün kaldırılması esnasında kaldırma aparatlarının belirlenen yerlere düzgün şekilde bağlanması büyük önem taşır. Kaldır ma aparatları farklı yerlere bağlanırsa yük dengesiz kalkabilir ve çarpma vb. durumlar söz konusu olabilir. Eğer düzgün bağlanmaz ise bağlantı yerlerinden kopabilir ve yükün düşmesine neden olabilir. Bir diğer önemli parametre ise görevli ekibin aralarındaki iletişimdir. Yükün kaldırılması esnasında vinç operatörü ve sahadaki görevliler iletişim halinde olmalıdır. Aksi durumda yük çarpması, yük düşmesi gibi durumlar söz konusu olabilir. Vincin operasyondan önce gözle muayene edilmesi de önemli parametrelerden bir tanesidir. Vinçte meydana gelebilecek herhangi bir arıza olumsuz sonuçlara yer açabilir. Tablo 6'da F8 için fonksiyonel rezonans analizi sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 6. F8 fonksiyonu için fonksiyonel rezonans ilişkisi.

Fonksiyonel rezonans birimi	Fonksiyonel rezonans etki faktörleri	Başarısız fonksiyon bağlantısı
F6- Yüke kaldırma aparatlarının bağlanması	**F8** (P) - Kaldırma aparatlarının yerine ve düzgün montajı	**F8** (O) - **F9** (I) **F8** (O) - **F10** (I)
F3- Vincin gözle muayene edilmesi	**F8** (P) - Vincin kontrol edilmesi	**F8** (O) - **F9** (I) **F8** (O) - **F10** (I)
F2- Operasyondan önce iletişim prosedürünün belirlenmesi	**F8** (P) - Ekip arasındaki iletişim	**F8** (O) - **F9** (I) **F8** (O) - **F10** (I)

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

F9 modülü incelendiğinde ise yükün taşınması esnasında F8 modülüne benzer olarak kaldırma aparatlarının belirlenen yerlere düzgün şekilde bağlanması büyük önem taşır. Artık bu kaldırma aparatlarının üzerine dinamik yüklerde büyük oranda etkiyecektir. Yükün herhangi bir yere veya kişiye çarpmaması için saha ekibi ile vinç operatörü arasındaki iletişim büyük önem taşır. Bir diğer önemli parametre ise yükün düzgün istiflenmemesidir. Düzgün yüklenmeyen yük, çarpmaya ve düşmeye yol açabilir. Vincin operasyondan önce mutlaka gözle kontrol edilmesi gerekir. Tablo 7'de F9 için fonksiyonel rezonans analizi sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 7. F9 fonksiyonu için fonksiyonel rezonans ilişkisi.

Fonksiyonel rezonans birimi	Fonksiyonel rezonans etki faktörleri	Başarısız fonksiyon bağlantısı
F6- Yüke kaldırma aparatlarının bağlanması	**F9** (P) - Kaldırma aparatlarının yerine ve düzgün montajı	**F9** (O) – **F10** (I)
F3- Vincin gözle muayene edilmesi	**F9** (P) - Vincin kontrol edilmesi	**F9** (O) - **F10** (I)
F2- Operasyondan önce iletişim prosedürünün belirlenmesi	**F9** (P) - Ekip arasındaki iletişim	**F9** (O) - **F10** (I)
F5- Taşınacak yükün istiflenmesi	**F9** (P) – Yükün düzgün, düşmeyecek şekilde istiflenmesi	**F9** (O) - **F10** (I)

5.5. Engeller ve risklerin önlenmesi

Fonksiyonel rezonans için olasılıklar analiz edildikten sonra kazaları önlemek, yük çarpması, yük düşmesi, elektrik çarpması, yüksekten düşme, vinç devrilmesi, montaj sırasında ezilme, bom/kablo arızası gibi riskler için engeller ve önlemler önerilmiştir. Engeller, fiziksel, işlevsel, sembolik ve maddi engeller olmak üzere 4 ana başlık altında Tablo 8'de verilmiştir.

6. Sonuç ve Öneriler

Vinçler tersanelerde her gün sıklıkla kullanılan ve her tür ebatta ve ağırlıkta yükleri kaldırıp taşıyan bir ekipmandır. Kullanım alanlarına ve yük taşıma kapasitelerine göre farklılık gösteren vinç tipleri mevcuttur. Tersanelerde portal vinçler, mobil vin çler ve kule vinçleri sıklıkla tercih edilir. Vinçler büyük kolaylık sağlamasına rağmen vinç kazaları da kaçınılmaz olmuştur. Tersanelerde sıklıkla ölümlü ve yaralanmalı vinç kazaları meydana gelmektedir. Ülkemizdeki tersanelerde elde edilen verilere göre 2010-2015 yılları arasında 77 vinç kazası meydana gelmiştir. Bu kazalarda yük çarpması %62.3 ile en çok karşılaşılan risk olurken, yük düşmesi ise %28.6 ile onu takip etmektedir. Yüksekten düşme, elektrik çarpması ve verilerde görünmeyen ancak gerçekleşme olasılığı yüksek olan vinç devrilmesi, montaj sırasında ezilme ve bom/kablo arızası ise diğer riskler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada vinç ile yük elleçleme operasyonlarındaki risk analizi FRAM yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. FRAM yön temi, kazaların oluşmasında hangi risk faktörlerinin etkin olduğunu, risk faktörlerinin sistemi ve fonksiyonel modülleri nasıl etkilediğini açıklar. Risk faktörleri ortak performans koşullarına göre belirlenir. Vinç ile yük elleçleme operasyonları 11 fonks iyonel modül ile tanımlanmıştır. *Vinç tarafından yükün kaldırılması-(F8)* ve *yükün taşınması-(F9)* fonksiyonel modüllerinin performans dalgalanması yüksektir ve vinç operasyonlarının yüksek kaza riski barındıran

en önemli iki fonksiyonudur. 2010 -2015 yılları arasındaki kaza raporları da incelendiğinde, sıklıkla aynı 2 fonksiyon esnasında kazaların meydana geldiği görünmektedir. Bu nedenle, kazaları önlemek ve riskleri ortadan kaldırmak için FRAM metodolojisinden yararlanarak engeller ortaya koymak önemlidir.

Tablo 8. Vinç ile yük elleçleme operasyonlarındaki engeller.

Engel tipi	Engeller ve önlemler
Fiziksel	1- Kaldırma aparatlarının bağlandığı yerlere gelecek yükler dikkate alınarak bu bölgeler güçlendirilmelidir.
	2- Yük kaldırma operasyonlarına başlamadan önce rüzgâr durumu kontrol edilmelidir. Aşırı rüzgar durumunda operasyon iptal edilmelidir.
	3- Görevli ekip operasyon süresince süreci yakından takip etmeli, herhangi bir olumsuzluk sezdiği an durdurmalıdır.
	4- Yetkili mühendis vinç operasyonundan önce kaldırma aparatlarının bağlantılarını kontrol etmelidir.
	5- Vinç kaldırma ve taşıma alanında, vincin ve yükün çarpabileceği şeyler varsa kaldırılmalıdır.
	6- Yüksekte çalışma yapıldığında, emniyet kemeri gibi koruyucu ekipmanlar kullanılmalıdır.
	7- Operasyon sürecinde yükün altında ve yakınında personel bulunmamalıdır.
İşlevsel	1- Vinç operasyondan önce, tüm personelin yeterli kapasitede olduğu ölçülmelidir.
	2- Vinç bakımları periyodik olarak yapılmalıdır. Periyodik bakımlarda vinç parçaları kontrol edilmeli varsa hasarlı parçalar değiştirilmelidir.
	3- Görevli ekip tüm durumlar için acil durum planlarını hazırlamalıdır.
Sembolik	1- Hızlandırılmış hareketlerden kaçınmak için operasyon süresi operasyondan önce belirlenmelidir.
	2- Elektrik çarpması risklerine karşı vinç halatı ve kancasının temasından kaçınılmalıdır.
Maddi	1- Vinç taşıma alanı, yük ve vincin çarpmayacağı şekilde tasarlanmalıdır.
	2- Blok kaldırma gibi büyük operasyonlardan önce simülasyon kullanılarak gelecek yükler belirlenmelidir.
	3- İstifleme sahasının özellikleri önceden ölçülmelidir.

Sonuç olarak bakıldığında vinç ile yük elleçleme operasyonlarında yük çarpması, yük düşmesi, yüksekten düşme, elektrik çarpması, vinç devrilmesi ve bom/kablo arızası sıklıkla karşılaşılan risklerdir. Bu riskleri önlemek için fiziksel, fonksiyonel, sembolik ve görünmeyen engeller ortaya koyulmuştur. Fiziksel engeller ve önlemler incelendiğinde, kaldırma aparatları seçimi ve montajı uygun yapılmalı, yetkili mühendis tarafından seçilen ekipmanlar ve bağlantılar kontrol edilip onay alındıktan sonra operasyon başlatılmalıdır. Ayrıca operasyon başlamadan önce rüzgâr durumu kontrol edilmeli, aşırı rüzgâr varsa operasyon iptal edilmelidir. Vincin kaldırma ve taşıma alanında, vincin ve yükün çarpabileceği şeyler varsa kesinlikle kaldırılmalıdır. Özellikle elektrik ha tlarına dikkat edilmelidir. Operasyon esnasında ise görevli ekip tarafından süreç dikkatlice takip edilmeli, herhangi bir olumsuzluk durumunda operasyon durdurulmalıdır. Tüm operasyon süresince yükün altında ve yakınında personel kesinlikle bulunmamalı ve yüksekte çalışma yapılması durumunda koruyucu ekipmanlar kullanılmalıdır. Fonksiyonel engeller ve önlemler incelendiğinde, vinç operasyonu öncesi, görevli personelin yeterli kapasitede olduğu ölçülmelidir. Vinç bakımları periyodik olarak yapılmalıdır. Peri yodik bakımlarda vinç parçaları dikkatlice kontrol edilmeli varsa hasarlı parçalar değiştirilmelidir. Görevli ekip tarafından tüm durumlar için acil durum planları hazırlanmalıdır. Sembolik engeller ve önlemler incelendiğinde, hızlandırılmış hareketlerden kaçınmak için operasyon süresi belirlenmelidir. Elektrik çarpması risklerine karşı vinç halatı ve kancasının temasından kaçınılmalıdır. Son olarak görünmeyen engeller

incelendiğinde ise vinç taşıma alanı, yük ve vincin çarpmayacağı şekilde tasarlanmalıdır. Blok kaldırma gibi büyük operasyonlardan önce simülasyon kullanılarak gelecek yükler belirlenmelidir. İstifleme sahasının özellikleri önceden ölçülmelidir. Bu makalede etraflıca anlatılan yöntem ile, ileride iş kazaları konusunda yapılacak çalışmalarda, tersanelerde meydana gelen diğer kaza tipleri de incelenerek, FRAM ile risk analizleri yapılabilecektir.

Referanslar

Barlas, B. (2012). Shipyard fatalities in Turkey. *Safety science*, *50*(5), 1247-1252.

Beavers, J. E., Moore, J. R., Rinehart, R., & Schriver, W. R. (2006). Crane-related fatalities in the construction industry. *Journal of construction engineering and management*, *132*(9), 901-910.

Diop, I., Abdul-Nour, G., & Komljenovic, D. (2022). The Functional Resonance Analysis Method: A Performance Appraisal Tool for Risk Assessment and Accident Investigation in Complex and Dynamic Socio-Technical Systems. *American Journal of Industrial and Business Management*, *12*(2), 195-230.

Gharaie, E., Lingard, H., & Cooke, T. (2015). Causes of fatal accidents involving cranes in the Australian construction industry. *Construction Economics and Building*, *15*(2), 1-12.

Hollnagel E., 2009. Barriers and Accident Prevention. Ergonomics. 50(6), 961-962.

Hollnagel E., 2012. FRAM: The Functional Resonance Analysis Method: Modeling Complex Socio-Technical Systems.

Hu J. & Tang J., 2018. Risk analysis of CTV transfer operation mode based on Functional Resonance Accident Model.
Kim, S., & Kang, C. (2022). Analysis of the Complex Causes of Death Accidents Due to Mobile Cranes Using a Modified MEPS Method: Focusing on South Korea. *Sustainability*, *14*(5), 2948.

Lee, J., Phillips, I., & Lynch, Z. (2020). Causes and prevention of mobile crane-related accidents in South Korea. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 1-10.

McCann, M., Gittleman, J., & Watters, M. (2009). Crane-related deaths in construction and recommendations for their prevention. The Center of Construction Research and Training.

Milazzo, M. F., Ancione, G., Brkic, V. S., & Vališ, D. (2 016). Investigation of crane operation safety by analysing main accident causes. *Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice*, 74-80.

Norton, R. F. (2016). *Of Cracks, Cranks and Cranes*
<https://www.nortonrosefulbright.com/en/knowledge/publications/1b0b9a11/of-crackscranks-and-cranes> 25.03.2022

Ross, B., McDonald, B., & Saraf, S. V. (2007). Big blue goes down. The Miller Park crane accident. *Engineering Failure Analysis*, *14*(6), 942-961.

Shapira, A., Lucko, G., & Schexnayder, C. J. (2007). Cranes for building construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, *133*(9), 690-700.

Swuste, P. (2013). A 'normal accident' with a tower crane? An accident analysis conducted by the Dutch Safety Board. *Safety science*, *57*, 276-282.

URL-1 <h_ps://insapedia.com/kule-vinc-nedir-cesitleri-kurulmasi-sokulmesi-ve-parcalari/> 08.12.2022
URL-2 <h_ps://san_yede.com/vinc-cesitleri-nelerdir-ozellikleri-kullanim-alanlari/ > 07.12.2022
URL-3 < h_ps://commons.wikimedia.org/> 05.03.2023
URL-4 <h_ps://www.arnikon.com.tr/proses-vincler-8> 05.03.2023
Zaini, N. Z. M., Hasmori, M. F., Salleh, M. A. M., Yasin, M. N., & Ismail, R. (2020, May). Crane Accidents
at Construc_on Sites in Malaysia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 498,
No. 1, p. 012105). IOP Publishing.
Zhao, C. H., Zhang, J., Zhong, X. Y., Zeng, J., & Chen, S. J. (2012). analysis of accident safety risk of tower
crane based on fishbone diagram and the Analy_c Hierarchy Process. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 127, pp. 139-143). Trans Tech Publica_ons Ltd.

Gemi ve Deniz Teknolojisi
Sayı: 223, Haziran 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

Farklı Ağ Elemanı Boyutlarının ve Türbülans Modellerinin Düz Levha Sürtünme Direnci Üzerindeki Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Erhan Aksu

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye

eaksu@ktu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9333-8371

ÖZET

Geminin hız gereksinimini karşılayacak makine gücünü belirlemek için gemi direncinin doğru bir şekilde tahmin edilmesinde kullanılan model deneyleri yönteminde model deneylerinin sonuçları ölçeklendirilerek modelden gemiye aktarılır ve gemi direnci belirlenir. Bu aktarımda uygulanan işlem adımlarında düz bir levhanın sürtünme direncinin belirlenmesi önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada iki boyutta düz bir levha üzerindeki akış 7 farklı Reynolds sayısı aralığında hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak standart k-ε (gelişmiş duvar yaklaşımı ile) ve SST k-ω türbülans modelleri ile analiz edilmiştir. Analizler neticesinde yerel ve toplam sürtünme katsayıları ampirik bağıntılarla karşılaştırılmış, farklı ağ boyutlarının sayısal çözümler üzerinde etkisi incelenmiş ve türbülans modelleri karşılaştırılmıştır. Öncelikle akış yönünde eleman sayısı ve ilk ağ elemanın duvardan olan mesafesinin değiştirildiği ağ yapıları oluşturulmuştur. Bu ağ yapılarının seçilen türbülans modellerinde sürtünme direnç katsayıları ile olan ilişkisini belirleyebilmek için en düşük ve en yüksek hızda analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler neticesinde akış yönündeki eleman sayısının toplam direnç katsayısı üzerinde etkisinin çok az olduğu görülmüştür. Buna karşın ilk ağ elemanın duvardan olan mesafesi özellikle düşük Reynolds sayısında gerçekleştirilen analizlerde etkilidir. En düşük ve en yüksek hızlarda gerçekleştirilen analizlerde yerel sürtünme direnç katsayısı eğrisinin ampirik bağıntılarla olan uyumlu olduğu ağ yapısında tüm hızlar için analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak toplam sürtünme direnç katsayısı ve maksimum sınır tabaka kalınlıkları SST k-ω türbülans modeline göre standart k-ε (gelişmiş duvar yaklaşımı ile) türbülans modelinde daha büyük çıkmaktadır.

Anahtar kelimeler: Düz levha, sürtünme direnci, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, ağ yapısı

Makale geçmişi: Geliş 07/02/2023 – Kabul 09/03/2023

https://doi.org/10.54926/gdt.1248594

GMO Journal of Ship and Marine Technology
Issue: 223, June 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Journal homepage: http://www.gmoshipmar.org/
Research Article

Numerical Investigation of the Effect of Different Grid Element Sizes and Turbulence Models on the Friction Resistance of Flat Plates

Erhan Aksu

Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Surmene Faculty of Marine Sciences, Karadeniz Technical University, Trabzon, Türkiye

eaksu@ktu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9333-8371

ABSTRACT

In the model testing method, the results of the model testing are scaled and transferred from the model to the ship, and the ship resistance is determined to accurately estimate the resistance of the ship to determine the engine power that meets the speed requirement of the ship. The evaluation of the frictional resistance of a flat plate is critical to the process steps used in this transfer. In this study, the flow on a flat plate is analyzed in two dimensions using computational fluid dynamics in the 7 different Reynolds numbers with standard k-ε (with an enhanced wall treatment) and SST k-ω turbulence models. As a result of the analyzes, local and total friction coefficients are compared with empirical relationships, the effect of different grid sizes on numerical solutions is investigated and turbulence models are compared. In the first step, structures are developed where the number of elements in the flow direction and the distance of the first grid element from the wall are modified. The lowest and highest velocity analysis is performed to determine the relationship of these grid structures to the resistance coefficients in the selected turbulence models. The analysis shows that the number of elements in the flow direction has little impact on the total resistance coefficient. However, the distance from the wall of the first grid element is particularly effective in analyzing the low Reynolds number. Analyzes are performed for all velocities in the grid structure where the local frictional resistance coefficient curve is compatible with empirical correlations in the analyzes performed at the lowest and highest velocities. As a result, the total frictional drag coefficient and maximum boundary layer thicknesses are larger in the standard k-ε turbulence model (with an enhanced wall treatment) than in the SST k-ω turbulence model.

Keywords: Flat plate, friction resistance, computational fluid dynamics, grid structure

Article history: Received 07/02/2022 – Accepted 09/03/2022

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

1.Giriş

Geminin toplam direncinin tahmini gemi tasarımında geminin hızının ve makine gücünün belirlenmesi açısından oldukça önemli bir konudur. Toplam direnci tahmin etmek için kullanılan yöntemlerden birisi, model deneylerinden elde edilen sonuçların ölçeklendirilmesine dayanmaktadır. Temelde bu yaklaşım ında Froude (Froude, 1872; Froude, 1874; Froude, 1955) ve Hughes (Hughes, 1954) yöntemleri olmak üzere iki ana metot vardır. Toplam direnç; Froude yönteminde artık ve levha sürtünme direnci, Hughes yönteminde ise dalga ve viskoz direnç (1+k form katsayısı ile levha sürtünme direncinin çarpımı) olmak üzere iki bileşene ayrılır. Levha sürtünme direnci, model veya tam ölçekli gemi uzunluğuna eşit aynı ıslak yüzey alanına sahip düz bir levhanın direnci hesaplanarak bulunur. Bu yaklaşımlarda düz bir levhanın sürtünme direncinin doğru tahmin edilmesi geminin toplam direncinin belirlenmesi açısından oldukça önemlidir.

Düz bir levhanın sürtünme katsayısının Reynolds sayısına bağlı olarak değişimini veren pek çok deneysel ve sayısal çalışma literatürde mevcuttur. İlk olarak, Prandlt 1904 yılında sürtünme etkilerinin yalnızca akışkan içerisinde hareket eden bir cismin yakınında yaşandığı düşüncesiyle yüzey üzerinden akan bir akışkanda sınır tabaka kavramını tanıtmıştır (Anderson, 2005). Von Karman sınır tabaka denklemini sınır tabakası boyunca entegre ederek integral denklemini türetmiştir (Von Kármán, 1921). Sınır tabaka kalınlıklarını hesaplamak için yaygın olarak kullanılan yaklaşım yöntemlerinin çoğu için temel olan bu denklem von Karman momentum denklemi olarak bilinir. Schoenherr (Schoenherr, 1932) deneysel verileri Prandtl-von Karman teorisi ışığında yeniden değerlendirerek düz bir levha için Reynolds sayısı ve sürtünme direnç katsayısı arasında ilişkiyi ortaya koyan bir formül tanımlamıştır. Schoenherr formülünün çeşitli varyasyonları içerisinde yer alan ve popüler olan, Madrid'de Uluslararası Çekme Tankı Komisyonu (ITTC) toplantısında sunulan, model-gemi korelasyon hattı olarak kullanılan ITTC 1957 (ITTC, 1957) yaklaşımıdır. ITTC-57 çizgisi düz bir levha korelasyon çizgisi değil, form faktörü düzeltmesi içeren bir gemi-model korelasyon çizgisidir (Gorski, 2011). ITTC-57 gemi-model korelasyon çizgisi, Hughes'un düz levha sürtünme çizgisi yaklaşımına dayanmaktadır ve aslında % 12 form etkisine sahip Hughes formülüdür ve ITTC-57 yüksek Reynolds değerlerinde Schoenherr formülüyle uyumlu, ancak küçük Reynolds değerlerinde Schoenherr formülünün üzerindedir (Molland, 2017). Düz bir levha için önerilen bir diğer yaklaşımda Grigson (Grigson, 1999) iki Reynolds sayısı aralığında momentum integral denklemi ve Coles duvar-iz yasasına (Coles, 1956) dayanarak yeni bir sürtünme direnci eğrisi üretmiştir. Grigson'un formülasyonunda iddia edilen iyileşme, teorik gelişme ve geosim araştırmalarında form faktörleri için gözlemlenen iyileştirilmiş tutarlılığa dayanmaktadır (Bose, 2002). Katsui vd. (Katsui, 2005) tarafından önerilen formül momentum-integral denklemi ve Coles duvar-iz yasası temelinde tam bir diferansiyel denklemin çözümüne dayanmaktadır. Grigson ve Katsui formülasyonları karşılaştırıldığında hem model ölçekli hem de tam ölçekli Reynolds sayıları için iki yöntem arasındaki sürtünme katsayısında önemli farklılıklar olduğu görülmektedir. (Campana, 2008). Düz bir levhanın sürtünme hattı çizgisinin simüle edildiği çalışmalarda arasında Date ve Turnock (Date, 1999) RANS (Reynolds Ortalamalı Navier Stokes) temelli akış çözücüsü kodunda standart ve RNG k-ε türbülans modellerini kullanarak düz levhanın çeşitli uzunlukları ve Reynolds sayısı aralığındaki akışlar için viskoz akış hesaplamaları yapmışlardır. Eça ve Hoekstra (Eça, 2008) yedi farklı türbülans modelinde (Menter ve Spalart–Allmaras tek denklem türbülans modelleri, Wilcox k-ω iki denklem türbülans modeli, k-ω türbülans modelinin TNT, BSL, SST versiyonları ve $k-\sqrt{k}L$ iki denklem modeli) ve 14 farklı Reynolds sayısında sonsuz ince bir levhanın sürtünme direnci katsayısının sayısal olarak hesaplanması üzerine bir çalışma sunmuşlardır. Wang vd. (Wang, 2015) SST k-ω türbülans modeli ile RANS

akış çözücü kullanarak iki boyutlu düz bir levha sürtünme direnci hesaplamış, literatürdeki yaklaşımlarla karşılaştırmış ve DTMB5415, KVLCC2, SUBOFF formlarının tam ölçekli viskoz direncini tahmin etmiştir. Park (Park, 2015) tarafından Reynolds sayısına bağlı olarak form faktöründeki ölçek etkisini ITTC 1957, Grigson ve Katsui sürtünme direnci eğrileriyle bağlantılı olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle incelenmiştir. Korkmaz vd. (Korkmaz, 2019) EASM ve SST k-ω türbülans modellerini kullanarak, farklı Reynolds sayısı aralığında sonsuz ince düz bir levhanın sürtünme direnci katsayısı sayısal olarak hesaplanmıştır. Zeng vd. (Zeng, 2019) çalışmalarında hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemini kullanarak, sığ su koşullarında geminin dip yüzeyindeki sığ su etkilerini hesaplamak için sayısal bir sürtünme çizgisi önermiştir.

Bu çalışmada düz bir levha üzerindeki akış, hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak, ilk ağ hücresinin duvardan olan mesafesi ve elemanların akış yönündeki boyutları değiştirilerek elde edilmiş olan ağ yapıları standart k-ε (gelişmiş duvar yaklaşımı (Enhanced Wall Treatment) ile) ve SST k-ω türbülans modelleri ile analiz edilmiş, analiz sonucunda elde edilen yerel ve ortalama sürtünme katsayıları ampirik bağıntılarla karşılaştırılmış, farklı ağ yapılarının sayısal çözümler üzerinde etkisi incelenmiş ve türbülans modelleri karşılaştırılmıştır.

2.Materyal ve Metot

Akışkanlar dinamiği problemlerinin çözümü ve simülasyonu için geliştirilmiş olan hesaplamalı akışkanlar dinamiği sayısal yöntem ve algoritmaları kullanan tasarım değişkenlerinin deneysel yöntemlere göre daha hızlı ve daha kolay değerlendirilmesine olanak sağlayan bir yöntemdir. HAD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) ön işlem (pre-processing), hesaplama (CFD solver) ve art işlem (post-processing) adımlarından oluşmaktadır. Ön işlem sürecinde katı model ve çözüm ağı oluşturma, hesaplama sürecinde sınır koşulları, çözüm algoritmaları, yakınsama kriterleri gibi alt başlıkların belirlenmesi ve son olarak art işlem sürecinde akış görüntüleri ve ilgili büyüklüklerin hesaplanması gerçekleşir. HAD yönteminde genel olarak akışı temsil eden kütle, momentum ve enerji diferansiyel yapıdaki korunum denklemleri ayrıklaştırma teknikleri yardımıyla cebirsel denklem takımını dönüştürülerek çözüm aranır. Bu bağlamda HAD yazılımlarından birisi olan Ansys Fluent ticari yazılımı düz bir levha üzerindeki akış için kullanılmıştır.

2.1. Problem tanımı

Sınır tabaka, akışkanın viskozitesinden dolayı katı-sıvı etkileşiminin meydana geldiği, viskoz kuvvetlerin önemli olduğu ince bir akışkan tabakadır. Akışkan hızının serbest akış hızının %99'una ulaştığı nokta sınır tabakanın üst sınırı olarak kabul edilmiştir. Duvar ile bu üst sınır hattı arasında kalan bölgede, duvar kaymama koşulu nedeniyle, akış hızı ve türbülans miktarları, duvar yüzeyinden itibaren doğrusal olmayan bir şekilde sıfırdan ani bir şekilde değişir. Sınır tabakanın çözülmesi duvar kayma gerilmesi, yüzey basıncı gibi büyüklüklerin katı yüzey üzerindeki etkisinin doğru bir şekilde belirlenmesini sağlamaktadır.

Serbest akım hızına sahip akışkanın bir katı yüzey üzerinde hareket etmesiyle sırasıyla laminer, geçiş ve türbülanslı sınır tabaka bölgeleri oluşur. Tam gelişmiş türbülanslı sınır tabaka bölgesi toplamda dört alt bölgeden oluşur: viskoz alt tabaka (viscous sublayer), tampon tabaka (buffer layer), logaritmik tabaka (log-law layer) ve dış tabaka (outer layer). Duvara en yakın bölge olan viskoz alt tabakada (y^+(boyutsuz duvar

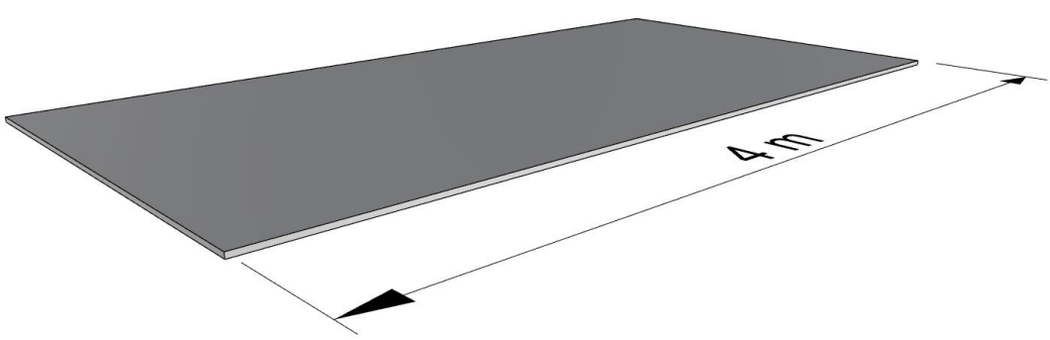
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

mesafesi)<5) akış laminerdir ve viskoz kayma gerilmesi baskın, türbülans kayma gerilmesi ise ihmal edilebilirdir. Bir üst tabaka olan tampon tabakada (5<y $^{+}$<30) ise hem viskoz kayma gerilmesi hem de türbülans kayma gerilmesi ihmal edilemeyecek kadar önemlidir. Logaritmik tabakada (30<y $^{+}$<300) hem türbülans kayma gerilmesi hem de viskoz kayma gerilmesi önemli olmakla birlikte türbülans kayma gerilmesi viskoz kayma gerilmesine göre daha baskındır. Son olarak dış tabakada (300<y $^{+}$) türbülans kayma gerilmesi baskın, viskoz kayma gerilmesi ihmal edilebilir düzeydedir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde duvara yakın bölgeyi modelleyebilmek için yüksek Reynolds ve düşük Reynolds sayısı modelleri olmak üzere temelde iki yaklaşım mevcuttur. Yüksek Reynolds sayısı modellerinde duvar fonksiyonları adı verilen yarı ampirik bağıntılar kullanılarak duvar ile logaritmik tabaka arasında ilişki kurulur. Düşük Reynolds sayısı modellerinde ise viskoz alt tabakayı modelleyebilmek için türbülans modeline ek bir fonksiyon eklenmeksizin türbülans modellerinde bazı parametreler tanımlanarak düzenlemeler yapılır. Düşük Reynolds sayılı modeller yüksek Reynolds sayılı modellere göre sınır tabakayı daha doğru tahmin etmekle birlikte viskoz alt tabakayı hesaplayabilmek için yüksek sayıda ağ elemanı gerektirdiğinden daha fazla hesaplama maliyetine sebep olmaktadır. Ayrıca bu tabakada kullanılacak ağ elemanları yüksek en boy oranına sahip olacaktır. Seçilmiş olan türbülans modelleri ile düz levha üzerindeki akış probleminde, sınır tabakada kullanılacak olan elemanların hassasiyetinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

2.2. Geometri ve ağ üretimi

Akış problemlerinde genel olarak bir cisim etrafındaki akışkanın hızı, üç boyutta değişmesine rağmen bazı durumlarda bir yöndeki hız değişimi diğer yönlere göre oldukça küçük kalabilir ve göz ardı edilebilir. Bu durumda düz bir levha etrafındaki akışta olduğu gibi akış iki boyutlu incelenerek analizler kolaylaştırılabilir. Şekil 1'de görüleceği üzere 4 m uzunluğuna sahip kalınlığı çok ince olan düz bir levha iki boyutta ele alınmıştır.



Şekil 1. Düz levha perspektif resmi

HAD yönteminde en önemli adımları arasında yer alan ağ üretimi, matematiksel denklemleri uygulayabilmek için akış alanının belirli büyüklükte elemanlara ayrıklaştırılması işlemidir. Güvenilir sonuçlar elde etmek için uygun ağ seçimi, HAD analizlerinde dikkate alınması gereken faktörlerden bir tanesidir. Çünkü ağın yapısı simülasyonun doğruluğu, yakınsaması ve hızı üzerinde önemli etkiye sahiptir.

GMO Journal of Ship and Marine Technology
Issue: 223, June 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Journal homepage: http://www.gmoshipmar.org/
Research Article

Ağ üretiminde ilk olarak duvar yakınındaki akışın davranışı daha ayrıntılı yakalayabilmek için duvar yüzeyi boyunca katmanlı bir ağ yapısı kullanmak sonuçların doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Duvar yakınındaki ilk ağ elemanının yüksekliği aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\tau_w = \frac{C_f \rho {U_\infty}^2}{2} \quad (1)$$

$$U_{fric} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2)$$

$$\Delta_S = \frac{y^+ \mu}{U_{fric} \rho} \quad (3)$$

Burada τ_w duvar kayma gerilmesini, U_∞ serbest akım hızını, U_{fric} sürtünme hızını, ρ akışkanın yoğunluğunu, μ dinamik viskoziteyi, Δ_S duvardan olan mesafeyi temsil etmektedir. Burada kullanılan boyutsuz parametre y^+ değeri uygulamada en düşük ve en yüksek hız için 0.5, 1, 5 ve 10 olarak seçilmiştir. Düz levha üzerinde türbülanslı bir sınır tabakada yerel sürtünme katsayısı C_f Prandtl–Schlichting (Schlichting, 1979) formülasyonu ile tahmin edilmiştir. Serbest akım hızına da bağlı olan ilk ağ elemanın duvardan olan uzaklıkları en düşük ve en yüksek hız için Tablo 1'de y^+=1 için ara hızlardaki değerler ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. İlk ağ elemanının duvardan olan mesafesinin en düşük ve en yüksek akış hızına göre değişimi

	Δ_S [mm] (U1 hızı için)	Δ_S [mm] (U7 hızı için)
y^+=0.5	0.02458	0.00014
y^+=1	0.04915	0.00029
y^+=5	0.24576	0.00144
y^+=10	0.49153	0.00289

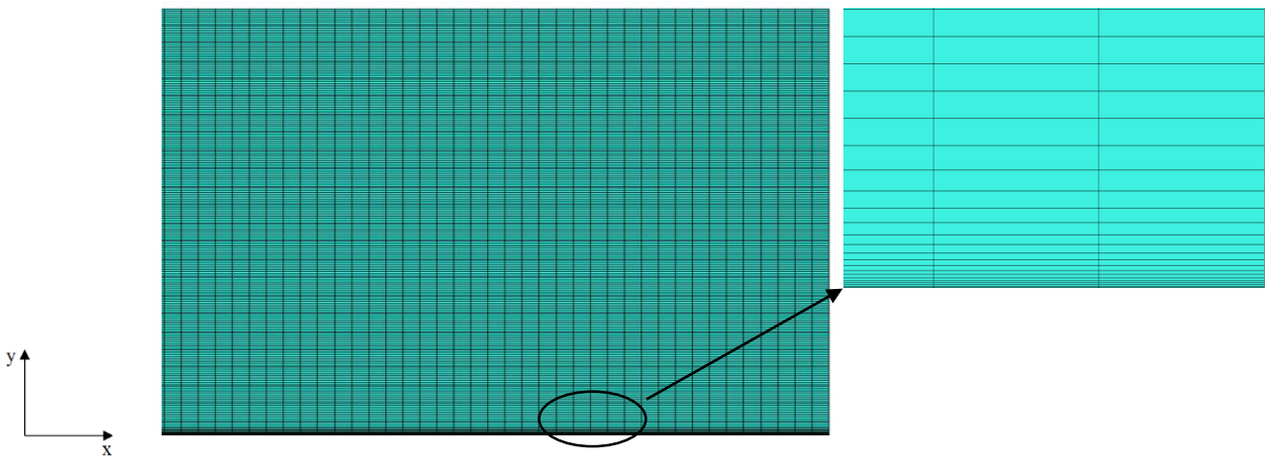
Tablo 2. y^+=1 için ilk ağ elemanının duvardan olan mesafesinin diğer akış hızlarına göre değişimi

	U2	U3	U4	U5	U6
Δ_S [mm]	0.02108	0.00900	0.00383	0.00162	0.00069

Akış alanının ayrıklaştırılmasında bir diğer konu kullanılan elemanların bağlantı şekilleri ve tipi ile ilgili seçimdir. Uygulamada kullanılan yapısal ağlarda, ağın iç kısmındaki bütün ağ noktaları eşit sayıda bitişik elemana sahiptir ve bunun neticesi olarak iki boyutlu olan bu problemde dörtgen elemanlar kullanılmıştır. Şekil 2'de kullanılan yapısal ağ ve dikdörtgen elemanlar görülmektedir.

Uygulamada ağ bağımsızlığı ve akış yönünde ağ elemanlarının sayısının etkisinin incelenmesi için y ekseninde maksimum eleman boyutu sabit tutularak akış yönünde eleman sayısı değiştirilmiştir. Bu bağlamda akış yönünde (x doğrultusunda) eşit aralıklı olmak üzere ağ elemanları boyutları sırasıyla 5 mm, 10 mm, 20 mm ve 40 mm alınmıştır. Akışa dik yönde (y doğrultusunda) ilk elemanın yüzeyden olan mesafesine ve Reynolds sayısına bağlı olarak eleman sayıları artırılarak y doğrultusunda elemanın maksimum boyutu üst sınırda 5 mm olması tüm ağ yapılarında sağlanmıştır. Ayrıca katmanlı ağ yapısında birbirini izleyen her bir elemanın kenar uzunluğundaki artış oranı uygulamada 1.2 olarak seçilmiştir.

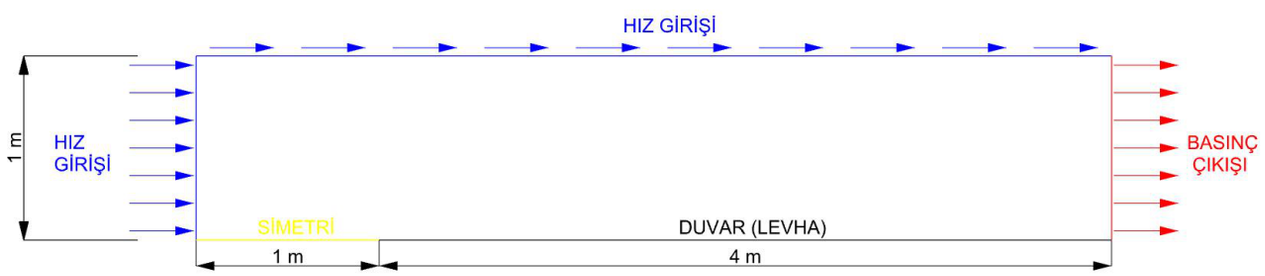
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi



Şekil 2. Akış alanının ağ yapısı

2.3. Sınır koşulları ve nümerik çözüm

Şekil 3'te görüleceği üzere düz bir levha üzerinde viskoz bir akışı analiz etmek için 2 boyutlu bir akış alanı oluşturulmuştur. Serbest akış oluşmasını sağlamak için giriş sınırı levhanın 1 m önüne yerleştirilmiştir. Üst sınır levhanın 1m yukarısında çıkış sınırı ise levhanın bitimindedir.



Şekil 3. Akış alanı boyutları ve sınır koşulları

Giriş sınırında uniform hız profil şartı ile akışkan akış alanına dik bir şekilde 7 farklı hızda girerek analizler 7 farklı Reynolds sayısında aralığında gerçekleştirilmiştir ve Tablo 3'te değerler verilmiştir.

Tablo 3. Reynolds sayısı ve hız aralıkları

No	Re_L	$\log(Re_L)$	U_∞ [m/s]
1	2.0E+06	6.3	0.50
2	5.0E+06	6.7	1.26
3	1.3E+07	7.1	3.16
4	3.2E+07	7.5	7.94
5	7.9E+07	7.9	19.94
6	2.0E+08	8.3	50.08
7	5.0E+08	8.7	125.80

Reynolds sayısı levhanın uzunluğuna (L) ve serbest akım hızına (U_∞) bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$Re_L = \frac{U_\infty L}{\nu} \tag{4}$$

Burada ν kinematik viskoziteyi temsil etmektedir ve uygulamada suyun 20 ^{0}C' deki özellikleri kullanılmıştır. Ayrıca girişte türbülans yoğunluğu ve türbülanslı viskozite oranı sırasıyla %1 ve 2 olarak seçilmiştir. Çıkış sınırında basınç sınır koşulu kabul edilerek gösterge basıncı 0 Pa olarak alınmıştır. Üst sınırda hız giriş şartı kabul edilmek suretiyle y doğrultusundaki hız bileşeni sıfır, x doğrultusunda hız bileşeni ise giriş hızına eşit alınarak serbest akım hızı sağlanmıştır. Levha için ise kaymama koşulu ile duvar sınır şartı oluşturulmuştur. Levha ile giriş sınırı arasındaki açıklıkta akışa dik yöndeki tüm akış miktarlarının hızı ve türevlerinin sıfır olması için simetri sınır koşulu uygulanmıştır.

Akışı temsil eden korunum (süreklilik) ve Navier-Stokes denklemlerinin karmaşıklığını azaltmak ve çözülebilir hale getirmek için kullanılan Reynolds ayrıştırması temel araçlardan birisidir. Reynolds ayrıştırması ile ilgili akış değişkenlerini, ortalama ve çalkantı büyüklerinin toplamı olarak yazmak mümkündür. Sonuç olarak kartezyen koordinat sisteminde zamandan bağımsız sıkıştırılamaz akış için kütle ve momentum denklemi (Reynolds-averaged Navier–Stokes equations (Reynolds ortalamalı Navier Stokes denklemi)) aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i) = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{u_i{}'u_j{}'}\right) \tag{6}$$

Bu denklemlerde u_i, u_j terimleri ortalama hızları, $u_i{}', u_j{}'$ terimleri çalkantı hızlarını, ρ akışkan yoğunluğunu, μ dinamik viskoziteyi, δ_{ij} terimi Kronecker delta fonksiyonunu, P terimi akışkan basıncını göstermektedir. Altı adet bilinmeyeni barındıran $\left(-\rho\overline{u_i{}'u_j{}'}\right)$ terimi Reynolds gerilmesi olarak isimlendirilir ve türbülans etkisini temsil eder. Bu durum denklemleri tamamlamak için bir modelleme metodolojisinin gerekliliğini ortaya koyar. Yaygın olarak kullanılan Boussinesq (Boussinesq, 1877) hipotezinde türbülans gerilmeleri aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$-\rho\overline{u_i{}'u_j{}'} = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\left(\rho k + \mu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)\delta_{ij} \tag{7}$$

Boussinesq hipotezinde, viskoz gerilmelerin tam hız gradyanlarıyla ilişkili olduğu gibi türbülans gerilmeleri de ortalama hız gradyanlarıyla ilişkilidir (Glegg, 2017) ve bu denklemde μ_t türbülans viskozitesini k ise türbülans kinetik enerjisini temsil eder. Türbülans viskozitesi, farklı türbülans modelleri ile hesaplanır ve eklenen diferansiyel denklem sayısına göre modelleme seviyesi belirlenir.

İki denklemli modeller arasında yer alan türbülanslı akış koşullarını simüle etmek için yaygın olarak kullanılan standart k-ε türbülans modelinde (Launder, 1983) türbülans kinetik enerjisi k ve yayılma hızı ε için taşınım denklemleri, türbülans viskozitesi ve model sabitleri aşağıdaki gibidir:

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (9)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

$$C_{1\varepsilon} = 1.44;\ C_{2\varepsilon} = 1.92;\ C_{3\varepsilon} = 1.3;\ C_\mu = 0.09;\ \sigma_k = 1.0;\ \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (11)$$

Bu denklemlerde, G_k ortalama hıza bağlı türbülans kinetik enerjisinin oluşumu, G_b kaldırma kuvvetine bağlı türbülans kinetik enerjisinin üretimi, Y_M sıkıştırılabilir türbülanstaki çalkantılı genleşmenin genel yayılma hızına katkısı, S_k ve S_ε kaynak terimleri, σ_k ve σ_ε k ve ε için türbülans Prandlt sayıları ve $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$, C_μ model sabitleridir.

Düşük Reynolds sayılı bir model olan k-ε türbülans modeli ancak duvar fonksiyonu ile kullanılabilir. Uygulamada kullanılan gelişmiş duvar yaklaşımı (enhanced wall treatment), yakın duvar model metodu olup iki katmanlı model ile gelişmiş duvar fonksiyonunu birleştirir. Duvara yakın ağ, viskoz alt katmanı çözebilecek kadar iyiyse (tipik olarak $y^+ \approx 1$), o zaman gelişmiş duvar işlemi geleneksel iki katmanlı bölgesel modelle aynı olacaktır (Fluent, 2015).

İki denklemli modellerden birisi olan SST k-ω türbülans modeli Menter (Menter, 1994) tarafından geliştirilmiştir. Bu model k-ω türbülans modeli ile k-ε türbülans modelini birleştirerek sınır tabakasının iç bölgesinde k-ω türbülans modelini, serbest akışta k-ε türbülans modelini kullanır. Bu modelde kinetik enerjisi k ve yayılma hızı ω için taşınım denklemleri, türbülans viskozitesi ve model sabitleri aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k - Y_k + S_k \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (13)$$

$$\Gamma_k = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right);\ \Gamma_\omega = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}\right);\ \mu_t = \frac{\rho k}{\omega}\frac{1}{max\left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{\alpha_1 \omega}\right]} \quad (14)$$

$$\alpha^* = \alpha_\infty^*\left(\frac{\alpha_0^* + Re_t/Re_k}{1 + Re_t/Re_k}\right);\ Re_t = \frac{\rho k}{\mu\omega};\ \alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3};\ \beta_i = 0.072; \quad (15)$$

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* = 1\ y\ddot{u}ksek\ Reynolds\ Sayısı\ için \quad (16)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1/\sigma_{k,1} + (1-F_1)/\sigma_{k,2}};\ \sigma_\omega = \frac{1}{F_1/\sigma_{\omega,1} + (1-F_1)/\sigma_{\omega,2}} \quad (17)$$

$$F_1 = tanh(\phi_1^4);\ \phi_1 = min\left[max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2}\right];\ D_\omega^+ = max\left[2\rho\frac{1}{\sigma_{\omega,2}}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10}\right] \quad (18)$$

$$F_2 = tanh(\phi_2^2);\ \phi_2 = max\left[2\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right] \quad (19)$$

$$\sigma_{k,1} = 1.176;\ \sigma_{\omega,1} = 2.0;\ \sigma_{k,2} = 1.0;\ \sigma_{\omega,2} = 1.168;\ \alpha_1 = 0.31 \quad (20)$$

Bu denklemlerde yukarıda belirtilen standart k-ε türbülans modelinde yer alan terimlerden farklı olarak Y_K ve Y_ω türbülanstan dolayı k ve ω'nın yayılmasını, D_ω çapraz difüzyon terimini, S_ω kaynak terimini, Γ_k ve Γ_ω terimleri k ve ω için etkin yayılmayı, α^* terimi düşük Reynolds sayısı düzeltmesi için viskoziteyi azaltan katsayı, σ_ω terimi ω için türbülans Prandlt sayısı, F_1 ve F_2 harmanlama fonksiyonu, $\sigma_{k,1}$, $\sigma_{\omega,1}$, $\sigma_{k,2}$, $\sigma_{\omega,2}$, α_1, β_i model sabitleridir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde akışı temsil eden diferansiyel yapıdaki denklemlerin cebirsel denklem takımına dönüştürülmesi için kullanılan yaklaşımlardan birisi sonlu hacim yöntemidir. Sonlu hacim yönteminde akış alanı elemanlara ayrıklaştırılır ve diferansiyel denklemler her bir eleman üzerinde entegre edilir. İlgili büyüklükler genellikle kontrol noktalarında hesap edildiği için kontrol noktalarını çevreleyen kontrol hacmi yüzeylerindeki değerler interpolasyon yardımıyla hesap edilir ve bu uygulamada ikinci derece ileri gidişli şema (second order upwind scheme) seçilmiştir. Entegrasyon neticesinde elde edilmiş olan ayrıklaştırılmış denklemler sınır koşullarını da kapsayacak şekilde düzenlenerek tekrarlı olarak çözülür. İteratif çözüm yöntemlerinden olan basınca dayalı çözücülerde, basınç alanı, süreklilik ve momentum denklemlerinin bir kombinasyonundan elde edilmiş basınç veya basınç düzeltme denklemi çözülerek hesaplanır. Çalışma kapsamında basınca bağlı denklemler için yarı kapalı yöntem (semi-implicit method for pressure linked equations) algoritması denklem takımının çözülmesi için seçilmiştir. Yakınsama kriteri değeri $1x10^{-6}$ alınmıştır ve denklem sistemindeki hata bu artık değerin altına düşene kadar çözüm yinelenmiştir.

2.4. Yerel ve toplam sürtünme direnç katsayıları

Akışkanlarda sürtünme, akışkanın molekülleri arasındaki çekim ve akışkanın akışa paralel bir yüzey ile etkileşimden kaynaklanmaktadır. Akışkan sabit bir yüzey üzerinden aktığında, akışkanın viskozitesi özelliği nedeniyle yüzeye yapışır, tamamen durur. Sonuç olarak yüzey üzerinde hareket eden herhangi bir akışkan, kayma gerilmesine neden olur. Duvar kayma gerilmesi olarak isimlendirilen bu gerilme, yüzeyde akan bir sıvının duvara uyguladığı kuvvetin teğetsel bileşenin yüzey alanına oranıdır. Boyutsuz bir parametre olan sürtünme katsayısı ise duvar kayma geriliminin serbest akışın dinamik basıncına oranı olarak tanımlanır ve birim genişlik için yerel sürtünme katsayısı aşağıdaki gibi yazılır:

$$C_{f,x} = \frac{\tau_w}{0.5\rho U_\infty^2};\ \tau_w = \mu\left(\frac{\partial u_x}{\partial y}\right)_{y=0} \quad (21)$$

1908 yılında Blasius tarafından levha etrafındaki laminer akış için yerel sürtünme katsayısı aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (White, 2006):

$$C_{f,x} = 0.664/(Re_x)^{-2} \quad (22)$$

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

Düz bir levha paralel üzerindeki akışta tam türbülanslı sınır tabaka için literatürde önerilen yerel sürtünme katsayıları aşağıdaki gibidir:

a. Prandtl–Schlichting (Schlichting, 1979) formülü:

$$C_{f,x} = (2log_{10}(Re_x) - 0.65)^{-2.3} \quad (23)$$

b. Schultz–Grunow (Schultz-Grunow, 1941) formülü:

$$C_{f,x} = 0.37\big(log_{10}(Re_x)\big)^{-2.584} \quad (24)$$

c. White (White, 2006) formülü:

$$C_{f,x} = 0.455\big(ln(0.06Re_x)\big)^{-2} \quad (25)$$

Yerel sürtünme katsayısının levha uzunluğu boyunca integre edilmesiyle toplam sürtünme katsayısı aşağıdaki gibi elde edilir:

$$C_F = \frac{1}{L}\int_0^L C_{f,x}\, dx \quad (26)$$

Düz bir levha paralel üzerindeki akışta tam türbülanslı sınır tabaka için literatürde önerilen toplam sürtünme katsayıları ise aşağıdaki gibidir:

a. Schoenherr (Schoenherr, 1932) formülü:

$$0.242/C_F = log_{10}(Re_l C_F) \quad (27)$$

b. Prandtl–Schlichting (Schlichting, 1979) formülü:

$$C_F = 0.455\big(log_{10}(Re_l)\big)^{-2.58} \quad (28)$$

c. Schultz–Grunow (Schultz-Grunow, 1941) formülü:

$$C_F = 0.427(log_{10}(Re_l) - 0.407)^{-2.64} \quad (29)$$

d. Hughes (Hughes, 1954) formülü:

$$C_F = 0.067(log_{10}(Re_l) - 2)^{-2} \quad (30)$$

e. ITTC 1957 (ITTC, 1957) model-gemi korelasyon formülü:

$$C_F = 0.075(log_{10}(Re_l) - 2)^{-2} \quad (31)$$

f. Grigson (Grigson, 1999) formülü:

$$C_F = G0.075(log_{10}(Re_l) - 2)^{-2} \quad (32)$$

$$G = 0.9335 + 0.147(log_{10}(Re_l) - 6.3)^2 - 0.071(log_{10}(Re_l) - 6.3)^3; 1.5x10^6 \leq Re_l \leq 7x10^7$$

$$G = 1.0096 + 0.0456(log_{10}(Re_l) - 7.3) - 0.013944(log_{10}(Re_l) - 7.3)^2 + 0.0019444(log_{10}(Re_l) - 7.3)^3; 2x10^7 \leq Re_l \leq 6x10^9$$

g. Katsui (Katsui, 2005) formülü:

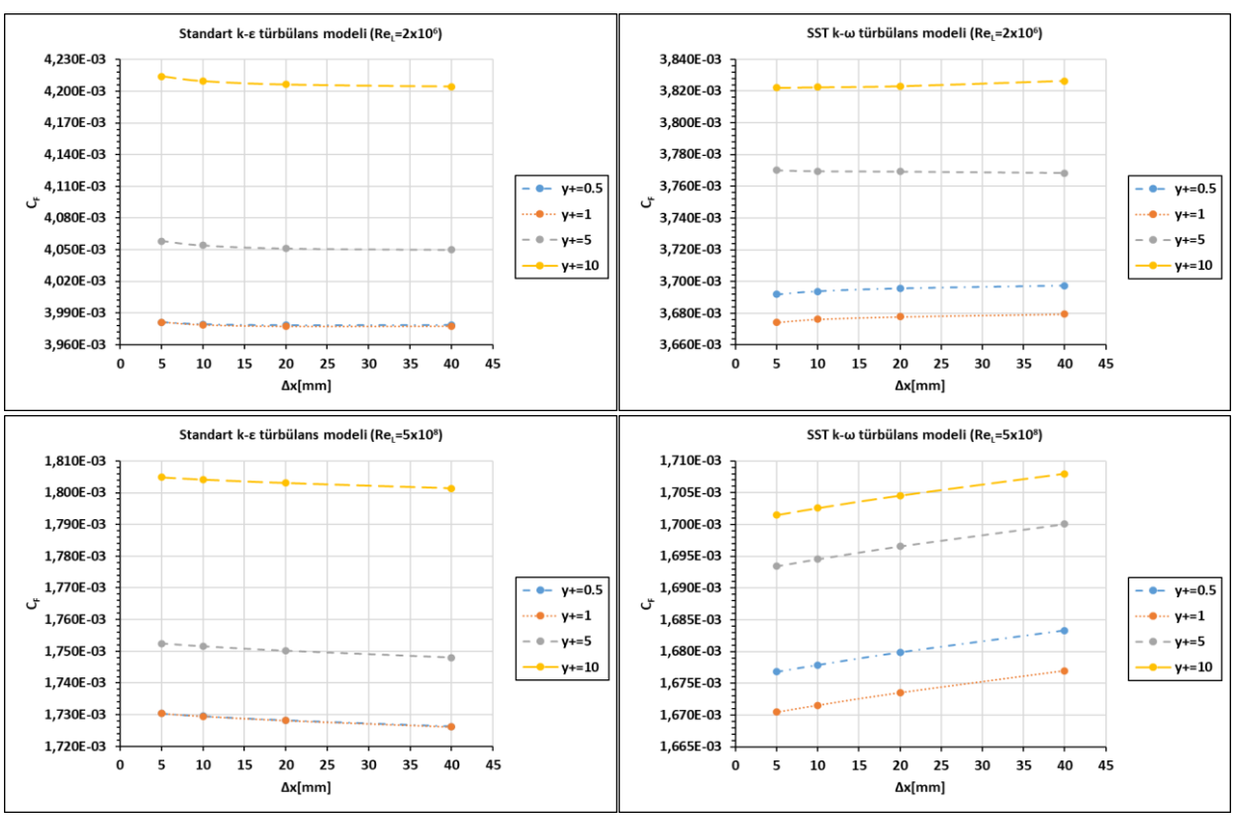
$$C_F = 0.0066577(log_{10}(Re_l) - 2)^{-(0.042612log_{10}(Re_l)+0.56725)}; 1x10^6 \leq Re_l \leq 7x10^9 \quad (33)$$

h. White (White, 2006) formülü:

$$C_F = 0.523\left(ln(0.06Re_l)\right)^{-2} \quad (34)$$

3. Bulgular ve tartışma

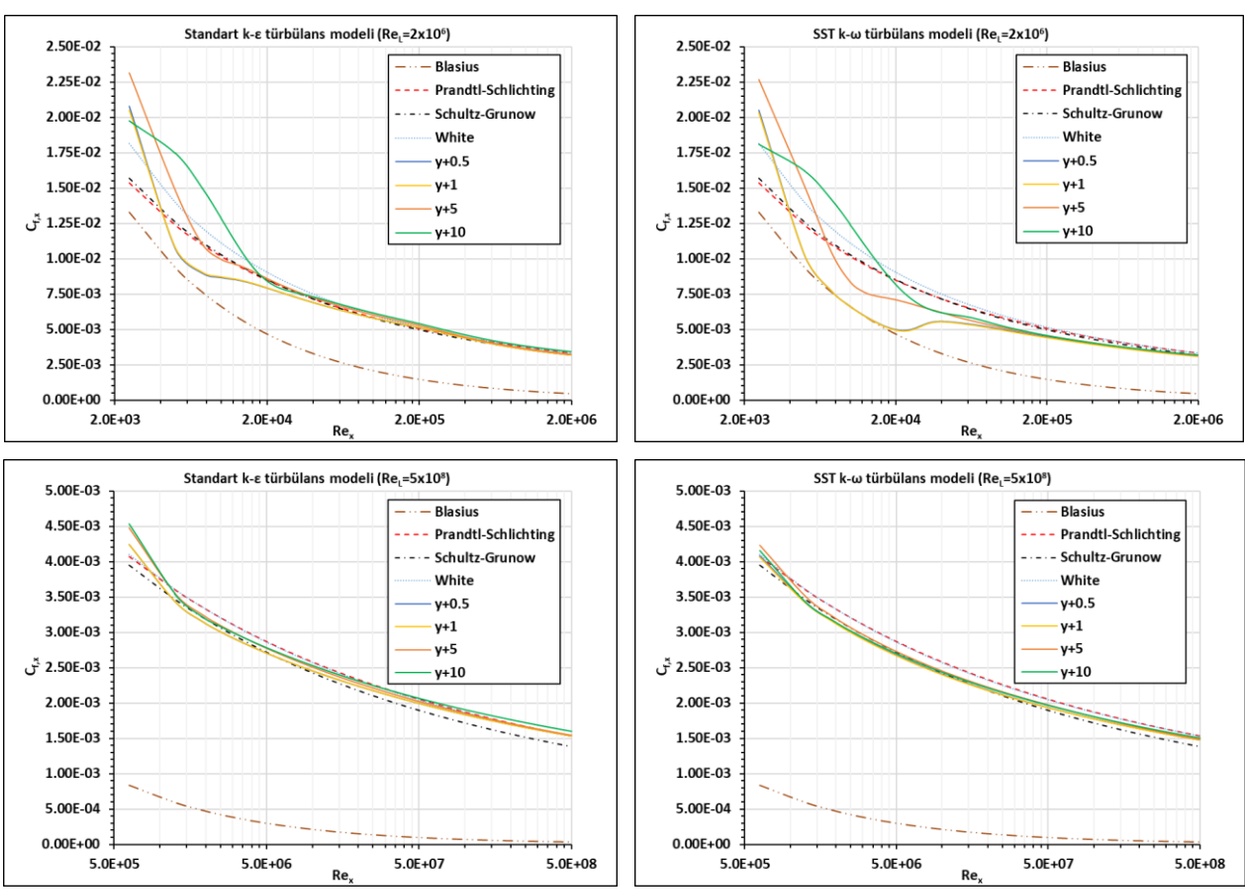
7 farklı Reynolds sayısında standart k-ε ve SST k-ω türbülans modeli ile yerel ve toplam sürtünme direncinin hesap edildiği bu çalışmada öncelikli olarak en düşük ve en yüksek akış hızında akış yönündeki eleman boyutlarının ve ilk ağ elemanının duvardan olan mesafesinin etkisi y doğrultusundaki maksimum eleman boyutunun sabit tutulduğu farklı ağ yapılarında araştırılmıştır. Şekil 4'te akış yönündeki eleman büyüklüğü 5 mm, 10 mm, 20 mm ve 40 mm, y^+ (boyutsuz duvar mesafesi) 0.5, 1, 5 ve 10 değerlerinde üretilmiş olan ağ yapılarının en düşük ve en yüksek hızlar için iki türbülans modelinde toplam sürtünme direnç katsayısına etkisi görülmektedir. Akış yönünde eleman sayısı 8 kat artırılmış olmasına rağmen iki türbülans modelinde, iki Reynolds sayısında ve bütün y^+ değerlerinde toplam sürtünme direnç katsayısı değişimi ortalama olarak %0.5' in altındadır. Bu durum akış yönünde eleman sayısının artırımı sadece toplam hücre sayısını artırmakla birlikte toplam sürtünme direnç katsayısına bir etkisinin olmadığını göstermektedir.



Şekil 4. Akış yönü doğrultusunda eleman boyutunun toplam sürtünme direnç katsayısına etkisi

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

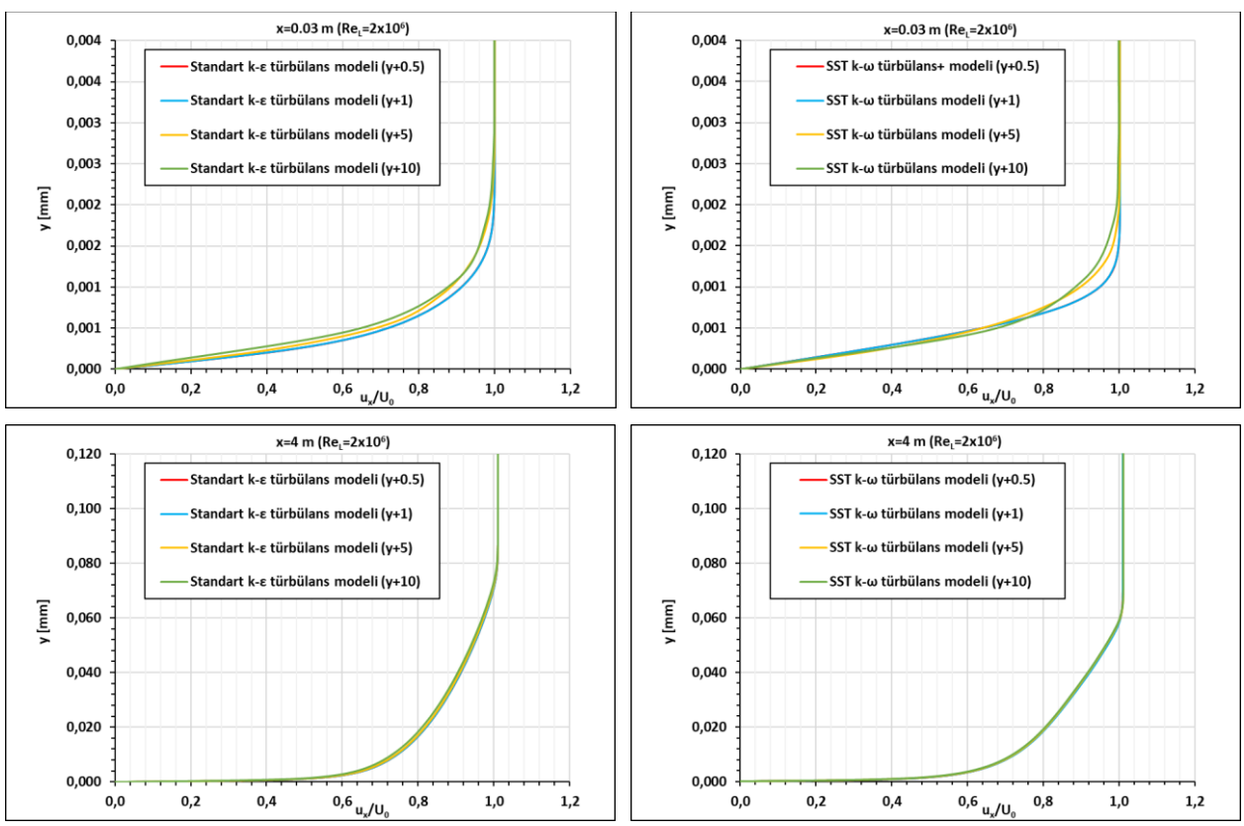
Akış yönünde eleman sayısının artırmakla ortaya çıkan etkinin aksine ilk ağ elemanının duvardan olan mesafesi toplam sürtünme direnç katsayısında oldukça belirleyicidir. Bu durumun daha açıklayıcı anlatılması için Şekil 5'te iki farklı hız ve türbülans modelinde ve en sık ağ yapısında yerel sürtünme direnç katsayısının levha boyunca değişimi ampirik bağıntılarla karşılaştırılmıştır. Düşük hızda ($Re_L=2x10^6$) laminerden türbülansa geçiş belirgin bir şekilde görülmekte iken yüksek hızda ($Re_L=5x10^8$) bu geçiş levhanın başında çok çok kısa bir mesafede oluşmakta ve türbülanslı akış levhanın neredeyse tamamı boyunca hakim olmaktadır. Özellikle düşük hızda laminer bölgeyi yakalamakta (Blasius eğrisi) SST k-ω türbülans modeli standart k-ε modeline göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Her iki türbülans modelinin iki Reynolds sayısı değeri için $y^+=0.5$ ve $y^+=1$'e göre oluşturulmuş ağ yapılarında yerel sürtünme direnç katsayıları eğrileri çakışmaktadır. Türbülanslı bölgede olmasa da laminer bölgede ilk ağ elemanının duvardan olan mesafesi kayma gerilmesinin doğru tahmini için oldukça önemlidir. Bu mesafe arttık ça laminerden bölgeden türbülanslı bölgeye geçiş kaybolmakta sonuçlar ampirik bağıntılardan uzaklaşmaktadır.



Şekil 5. En sık ağ yapısında y^+ değişiminin yerel sürtünme direnç katsayısına etkisi

İlk ağ elemanının duvardan olan mesafesine bağlı olarak yerel sürtünme direnç katsayılarında oluşan farklılık kayma gerilmesine bağlıdır. Kayma gerilmesi ise akışkanın dinamik viskozitesi ve hız gradyanlarının bir fonksiyonudur. Belirli bir akışkanda hız gradyanlarındaki değişim doğrudan sürtünme direncini etkileyecektir. Şekil 6'da ilk ağ elemanının duvardan olan mesafesine bağlı olarak plaka üzerinden akan

akışkanın en düşük Reynolds sayısında (Re_L=2x10^6) x=0.03m (levhanın baş tarafı) ve x=4 m (levhanın sonu) konumlarında yatay yöndeki hızların serbest akım hızlarına oranı düşey mesafelerde gösterilmiştir. Şekilde de görüleceği üzere levha üzerinde akışkanın hızı levha hızına eşittir. Yani akışkan hızı levha hareketsiz olduğundan sıfır hızdadır. Bu durum doğrudan katı yüzeyle temas eden akışkan parçacıklarının yüzeye yapışması ve kaymaması neticesinde ortaya çıkar. Kaymama şartı olarak bilin en bu olay nedeniyle hız profilleri ortaya çıkar ve yüzey üzerinde sıfır hızından serbest akım hızının olduğu yere kadar hızlarda değişimler görülür. İlk ağ elemanının duvardan olan mesafesine bağlı olarak akışkanın hızlarına ait profillerdeki değişimler her iki türbülans modelinde de özellikle levhanın giriş kısmında ortaya çıkmaktadır. Levhanın sonunda ise ilk ağ elemanına bağlı olarak her bir türbülans modelinde hız profillerindeki değişimler azalmaktadır. Ayrıca hız profillerinden anlaşılacağı üzere sınır tabaka kalınlığı levhanın sonuna doğru artış göstermektedir.

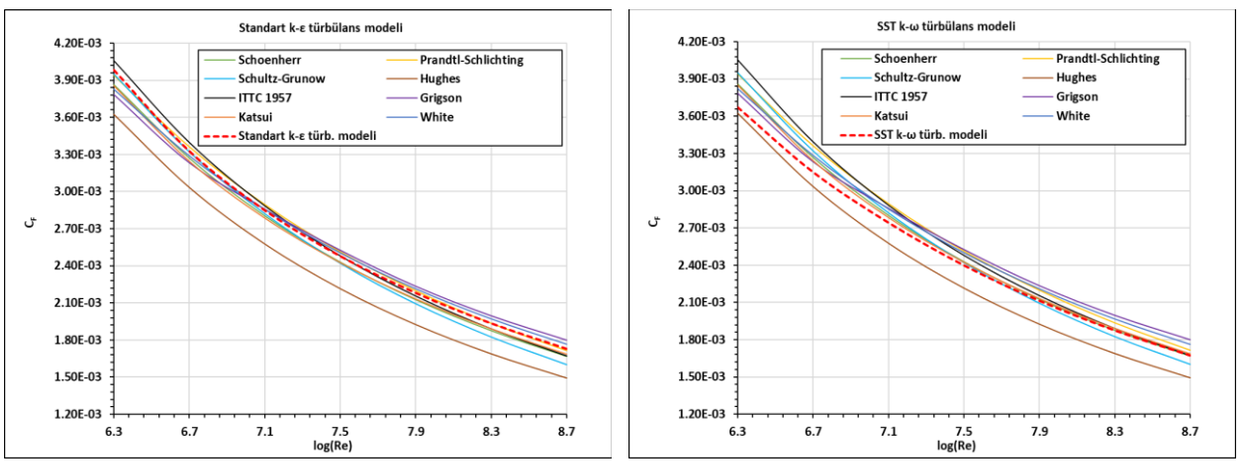


Şekil 6. En sık ağ yapısında y^+ değişiminin hız profillerinde etkisi

Ara hız değerlerinde simülasyonları doğruluğu açısında akış yönünde eleman sayısı en fazla olan ve duvar yakını y^+=1 göre örülmüş olan ağ yapılarında analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da iki türbülans modeline ait toplam sürtünme direnç katsayısı değerleri literatürdeki ampirik bağıntılarla karşılaştırılmıştır. Şekil 7'de görüleceği üzere standart k-ε türbülans modeli simülasyonu sonuçları Prandtl–Schlichting ampirik bağıntısıyla çakışmakla birlikte ayrıca yüksek Reynolds sayısında ITTC-1957, Katsui ve Schoenherr formülasyonlarına yakındır. SST k-ω türbülans modeli simülasyon sonuçları yüksek Reynolds sayılarında White, ITTC-1957, Katsui ve Schoenherr formülasyonları ile yakınlık göstermektedir. Genel olarak her iki

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

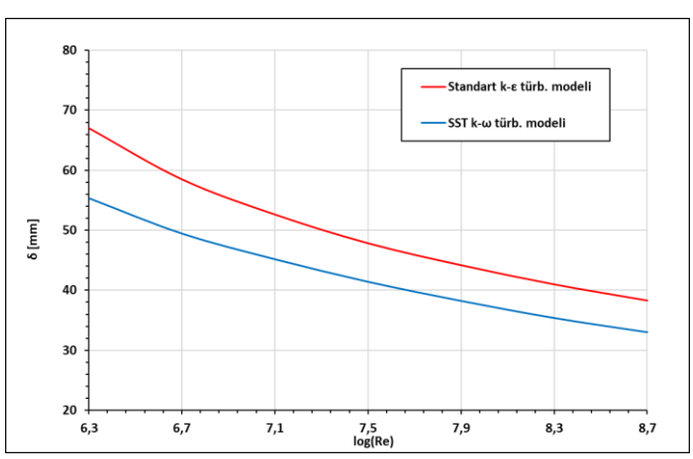
türbülans modeli düşük Reynolds sayılarında tam türbülanslı toplam sürtünme direnç katsayıları bağıntılarından farklılık göstermektedir. Her iki türbülans modelinden elde edilen toplam direnç değerlerinin karşılaştırıldığı Tablo 4'te görüleceği üzere standart k-ε türbülans modeli kullanılarak elde edilen sonuçlar SST k-ω türbülans modeline göre daha büyük çıkmakta, bağıl fark yüzdesi artan Reynolds sayısıyla birlikte % 3 civarlarındadır.



Şekil 7. Toplam sürtünme direnç katsayısının ampirik bağıntılarla karşılaştırılması

Tablo 4. Türbülans modellerinde toplam direnç katsayılarının karşılaştırılması

No	Re_L	$log(Re_L)$	Standart k-ε (C_F)	SST k-ω (C_F)	%Bağıl Fark
1	2.0E+06	6.3	3.98E-03	3.67E-03	7.7
2	5.0E+06	6.7	3.33E-03	3.15E-03	5.3
3	1.3E+07	7.1	2.85E-03	2.74E-03	3.7
4	3.2E+07	7.5	2.48E-03	2.40E-03	3.3
5	7.9E+07	7.9	2.18E-03	2.11E-03	3.2
6	2.0E+08	8.3	1.94E-03	1.87E-03	3.3
7	5.0E+08	8.7	1.73E-03	1.67E-03	3.5



Şekil 8. Maksimum sınır tabaka kalınlıkları

Akışkanın katı bir yüzey üzerinde akması durumunda sıvı parçacıkları yüzey üzerinde sıfır hıza sahiptir ve dikey doğrultuda akışkan parçacıklarının bitişik olan akışkan parçacıklarının hızını azaltmak için gösterdikleri etki serbest akış hızının %99'u olduğu sınır tabakasının kenarına kadar devam eder. Şekil 8' de görüleceği üzere bu sınır tabakanın plakanın sonundaki kalınlığı (maksimum kalınlık) SST k-ω türbülans modeline göre standart k-ε türbülans modelinde daha büyük çıkmaktadır.

4. Sonuç

Bu çalışmada genel olarak düz bir levha üzerindeki akış için oluşturulan ağ yapılarıyla belirli bir Reynolds sayısı aralığında hesaplamalı akışkanlar dinamiği yardımıyla analiz edilerek yerel ve toplam sürtünme direnç katsayıları hesap edilmiştir ve literatürdeki ampirik bağıntılarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca standart k-ε türbülans modeli ve SST k-ω türbülans modeliyle yapılan analizler aralarında karşılaştırılarak farklılıkları ortaya koyulmuştur. En düşük ve en yüksek hız için akış yönündeki eleman sayısı ve ilk ağ elemanının duvardan olan mesafesi değiştirilerek gerçekleştirilen analizlerde levha sürtünme direnç katsayılarındaki değişim hesap edilmiştir. Buna göre akış yönündeki eleman sayı sı artışı toplam sürtünme direnç katsayında etkin bir faktör olarak gözükmemektedir. Buna karşın ilk ağ elemanın duvardan olan mesafesi özellikle düşük Reynolds sayısında gerçekleştirilen analizlerde laminerden ve türbülansa geçişte farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Hız profillerini levhanın baş kısmında ve sonunda karşılaştırdığımızda özellikle baş kısmındaki farklılığın bu ilk eleman hücresinin uzaklığından etkilendiği levhanın sonuna doğru profil eğrilerinin çakıştığı görülmektedir. Toplam sürtünme direnç katsayılarının literatürdeki bağıntılar ile karşılaştırılmasında ise özellikle düşük Reynolds sayılarında farklılığın ortaya çıktığı görülmektedir. Ayrıca standart k -ε türbülans modeli ile gerçekleştirilen analizlerde elde dilen toplam direnç katsayıları sonuçları SST k-ω türbülans modeliyle elde edilen sonuçlara göre daha büyük çıkmaktadır. Son olarak maksimum sınır tabaka kalınlıklarını karşılaştırdığımızda direnç katsayısındaki gibi benzer büyüklüğün ortaya çıktığı görülmektedir.

Referanslar

1957 "Proceedings of the 8th ITTC." Madrid, Spain 1957, published by Canal de Experiencias Hidrodinamicas, El Pardo, Madrid.

Anderson, J. D. J. P. t. (2005). "Ludwig Prandtl's boundary layer.", Physics today , 58(12): 42 -48.

Bose, N., et al. (2002). "Final Report and Recommendations to the 23rd ITTC." Proceedings of the 23rd ITTC.

Boussinesq, J. (1877). Essai sur la théorie des eaux courantes, Imprimerie nationale.

Campana, E., et al. (2008). The Resistance Committee -Final Report and recommendations to the 25th ITTC. 25th International Towing Tank Conference.

Coles, D. (1956). "The law of the wake in the turbulent boundary layer." Journal of Fluid Mechanics 1(2): 191-226.

Date, J. C. and S. R. Turnock (1999). A study into the techniques needed to accu rately predict skin friction using RANS solvers with validation against Froude's historical flat plate experimental data.

Eça, L., et al. (2008). "The numerical friction line." Journal of marine science and technology, 13(4): 328-345.

Fluent, A. (2015). Ansys Fluent Theory guide, ANSYS Inc.

Froude, W. (1872). "Experiments on the surface-friction experienced by a plane moving through water." British Association for the Advancement of Science 42: 118-124.

Froude, W. (1874). Report to the lords commiss ioners of the admiralty on experiments for the determination of the frictional resistance of water on a surface, under various conditions, performed at Chelston cross, under the authority of their lordships, Taylor & Francis.

Froude, W., et al. (1955). The Papers of William Froude, 1810-1879: With a Memoir by Sir Westcott Abell and an Evaluation of William Froude's Work by RWL Gawn: Collected Into One Volume, Institution of Naval Architects.

Glegg, S. and W. Devenport (2017). Chapter 8 - Turbulence and stochastic processes. Aeroacoustics of Low Mach Number Flows. S. Glegg and W. Devenport, Academic Press: 163-184.

Gorski, J., et al. (2011). The resistance committee-final report and recommendations to the 26th ittc. Proceeding of 26th Iternational Towing Tank Conference.

Grigson, C. (1999). "A planar friction algorithm and its use in analysing hull resistance." Trans RINA.

Hughes, G. (1954). "Friction and form resistance in turbulent flow, and a proposed formulation for use in model and ship correlation." National Physical Laboratory, NPL, Ship Division, Presented at the Institution of Naval Architects, Paper No. 7, London, April, RINA Transactions 1954-16.

Katsui, T. (2005). The proposal of a new friction line. Fifth Osaka colloquium on advanced CFD applications to ship flow and hull form design, Osaka, Japan, 2005.

Korkmaz, K., Werner, S., Bensow, R. (2019). Numerical Friction Lines For CFD Based Form Factor Determination. In MARINE VIII: proceedings of the VIII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering (pp. 694-705). CIMNE.

Launder, B. E. and Spalding, D. B. (1983). Paper 8 - The numerıcal computatıon of turbulent flows. Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion. S. V. Patankar, A. Poll ard, A. K. Singhal and S. P. Vanka, Pergamon: 96-116.

Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, *32*(8), 1598-1605.

Molland, A. F., et al. (2017). Ship resistance and propulsion, Cambr idge university press.

Park, D.-W. (2015). "A study on the effect of flat plate friction resistance on speed performance prediction of full scale." International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 7(1): 195-211.

Schlichting, H. (1979). Boundary layer theory, 7th edn. McGrawHill, New York.

Schoenherr, K. E. (1932). "Resistance of flat surfaces moving through a fluid." Trans. Soc. Nav. Archit. Mar. Eng. 40: 279-313.

Schultz-Grunow, F. (1941). New frictional resistance law for smooth plates, National Advisory Commitee for Aeronautics.

Von Kármán, T. J. Z. A. M. M. (1921). "Uber laminare und turbulente Reibung." 1: 233 -252.

Wang, Z.-z., et al. (2015). "A numerical flat plate friction line and its application." Journal of Hydrodynamics, Ser. B 27(3): 383 -393.

White, F. M. (2006). Viscous fluid flow, third ed. McGraw -Hill, New York.

Zeng, Q., et al. (2019). "A modification of the ITTC57 correlation line for shallow water." Journal of Marine Science and Technology 24(2): 642 -657.

Gemi ve Deniz Teknolojisi
Sayı: 223, Haziran 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

Kompozit Bir Teknenin Dip Levhasının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi ve Yapısal Optimizasyonu

Recep Tayyip KILIÇ[1], Mustafa Erden YILDIZDAĞ[2]

[1] Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
[2] Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

[1](sorumlu yazar), rtkilic@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0819-2177
[2] yildizdag@itu.edu.tr, 0000-0003-3041-133X

ÖZET

Gemi sanayinde üretim malzemeleri, teknolojinin gelişmesine paralel yönde değişim göstermektedir. Eski çağlarda ağaç kütüklerinin birbirine bağlanması ile elde edilen sandallar zamanla yerlerini işlenmiş ahşaptan üretilmiş teknelere bırakmıştır. İnsanoğlu metalleri eritip şekil verebildiği nde ise demirden yapılma büyük ve dayanıklı gemiler üretilmeye başlanmıştır. Günümüz teknolojisinde ise demirden yapılan hantal gemilere alternatif olarak çok daha hafif ve benzer dayanımları gösteren kompozit tekneler üretilmektedir. Kompozit iki veya daha fazla materyalin niteliklerinde değişim olmadan makro düzeyde bir araya gelmesi ile oluşan yapısal malzemedir. Gemi inşaatı sanayisinde polimer matrisli kompozitler kullanılır. Bu kompozitlerde reçine olarak en çok polyester, epoksi ve vinilester; lif ol arak da en çok cam elyaf, karbon elyaf ve aramid elyaf kullanılır. Diğer tekne türleri gibi kompozit tekneler de üretilirken belli standartlar ve kurallara tabi tutulur. 24 metre ve altı tekneler daha çok Uluslararası Standardizasyon Teşkilatı'nın (ISO) ko yduğu kurallar çerçevesinde boyutlandırılır. Standartlar teknenin dip, borda, güverte gibi kısımlarındaki levhaların ve destek elemanlarının dayanması gereken yüklemeleri ampirik formüller yardımı ile hesaplanmasını sağlar. Yapısal elemanlar boyutlandırılırken müşterinin isterileri, malzemelerin standart ölçülerde üretilebilirliği ve en önemlisi üretim maliyetleri göz önüne alınır. Üretim maliyetinin düşürülmesi ve üretimin daha az malzeme ile yapılabilmesi için farklı optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmada kompozit bir teknenin dip levhasının daha az malzeme ile üretilmesini sağlamak amacıyla optimizasyon çalışması yapılmıştır. Literatürde daha önce kullanılan ölçülerde bir levha ve levhayı destekleyen iki adet şapka tipi destek elemanı ele alınmıştır. Dip levhasına etki eden kuvvetler Uluslararası Standardizasyon Teşkilatı'nın belirlediği kurallar doğrultusunda tekne ve levha ölçüleri kullanılarak bulunmuştur. Levha sonlu eleman yöntemi ile modellenmiş ve analiz edilmiştir. Yapılan optimizasyon çalışmasında ilk olarak en uygun oryantasyon dizilimi aranmıştır. En uygun dizilim kullanılarak daha sonra levha genişliği ve destek eleman yüksekliği optimizasyonu, katman kalınlığı optimizasyonu yap ılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde ilave bir güçlendirmeye gerek kalmadan sadece levhada açı ve katman optimizasyonu yapılarak çok daha az malzeme ile yeterli dayanımın sağlanabileceği gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: kompozit tekne, destekli levha, oryantasyon optimizasyonu, katman kalınlığı optimizasyonu

Makale geçmişi: Geliş 12/04/2023 – Kabul 30/07/2023

https://doi.org/10.54926/gdt.1282017

Gemi ve Deniz Teknolojisi
Sayı: 223, Haziran 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

Analysis and Structural Optimization of the Bottom Plate of a Composite Boat with Finite Element Method

Recep Tayyip KILIÇ[1], Mustafa Erden YILDIZDAĞ[2]

[1] Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Naval Architecture and Maritime Faculty, Yıldız Technical University, Istanbul, Türkiye
[2] Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering, İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye

[1] (sorumlu yazar), rtkilic@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0819-2177
[2] yildizdag@itu.edu.tr, 0000-0003-3041-133X

ABSTRACT

Materials used in ship industry usually change in parallel with technological advancements. Boats formed by connecting tree logs in ancient times were replaced by boats made of processed wood over time. Then, large and durable ships made of iron began to be produced when metals could be melt and formed. Composite is a structural material formed by the combination of two or more constituent materials. Polymer matrix composites are commonly used in shipbuilding industry. In these composites, polyester, epoxy or vinyl ester are used as resin whereas glass fiber, carbon fiber or aramid fiber are used as fiber. Composite boats are subjected to certain standards and rules while being produced. Scantling of a boat under 24 meters is determined within the framework of the rules set by the International Organization for Standardization (ISO). The standards allow for the calculation of the design loads that the plates and support elements must withstand. In this study, the bottom plate of a composite boat is optimized to reduce production costs. A top-hat stiffened composite plate which was studied in the literature is examined. The design loads are determined according to the International Organization for Standardization. The plate is modeled and analyzed by a commercial finite element analysis software. For the structural optimization, the most suitable orientation sequence is first identified. Then, by using the determined orientation sequence, plate width, stiffener height, and layer thickness parameters are optimized. As a result, it is shown that sufficient strength can be achieved with much less material by optimizing the angle and layer only on the plate without the need for additional reinforcement.

Keywords: composite boat, supported plate, orientation optimization, layer thickness optimization

Article history: Received 12/04/2023 – Accepted 30/07/2023

1. Giriş

Kompozit, iki veya daha fazla malzemenin niteliklerinde değişim olmadan, makro düzeyde bir araya gelmesi ile oluşan yapısal malzemedir. Kompozit içerisinde takviye (reinforcement) ve matris fazı olmak üzere iki faz bulunur. Takviye fazı, lif, tanecik (part icle) ve pul (flake) halinde olabilir. Matris fazı ise takviye fazını çevreleyen devamlı bir yapıya sahiptir. Kompozit malzemeler takviye malzemesinin şekline göre ve matris malzemesinin türüne göre iki farklı sınıflandırmaya tabi tutulur. Takviye malzemesine göre lif takviyeli, tanecik takviyeli ve pul takviyeli olarak üç sınıfta incelenir. Matris türüne göre ise metal matrisli, seramik matrisli ve polimer matrisli olmak üzere üç sınıftır.

Polimer matrisli malzemeler yüksek spesifik mukavemet ve yüksek spesifik gerilme katsayılarına sahiptir. Spesifik mukavemet ve spesifik gerilme kavramları malzemenin gerilme ve mukavemet değerlerinin, malzeme yoğunluğuna oranını ifade etmektedir. Polimer matrisli kompozitleri kullanarak aynı dayanım çok daha hafif bir malzeme ile elde edilebilir. Polimer matrisli kompozitlerden elde edilen ürünler farklı metotlarla üretilebilir. Birçok üretim yönteminde kalıplar kullanılır. Kalıplar dişi ve erkek olmak üzere ikiye ayrılır. Dişi kalıp ürünün tersi görünümde olup iç kısmına üretim uygulaması yapılır. Erkek kalıp ise ürün ile aynı görüntüye sahiptir ve dış kısmına üretim uygulaması yapılır. Üretimde en çok kullanılan metotlar ise şunlardır:

- El Yatırması
- Vakum İnfüzyon
- Filament Sarma
- Reçine Transfer Kalıplama (RTM)
- Otoklav (Autoclave)

Gemi inşaatı sanayisinde kompozit malzemeler dendiğinde akla polimer matrisli kompozitler gelir. Diğer matris türlerinin kullanımı yok denecek kadar azdır. Kompozitten mamul tekneler incelendiğinde büyük çoğunluğun 25 metre altında olduğu görülür. Hücumbotlar, yelkenli tekneler, motor yatlar, yarış tekneleri insansız deniz araçları, balıkçı tekneleri gibi birçok yüzer platform kompozitten üretilmektedir. Sektörde kullanılan en yaygın üç reçine: polyester, epoksi ve vinilesterdir. Polyest er düşük mekanik özellikleri nedeniyle yüksek performanslı teknelerde kullanılmaz. Vinilester reçineler mekanik özellikleri ve maliyetleri açısından polyester ve epoksinin arasında yer almaktadır. Reçine sertleştirici karışım oranları epoksiye göre daha toleranslıdır. Epoksinin mekanik özellikleri ve maliyeti diğer reçinelere nazaran daha yüksektir. Bu nedenle çoğunlukla yüksek performans istenen yerlerde kullanılır. Sektörde kullanılan en yaygın elyaflar ise cam elyaf ve karbon elyaftır. Yüksek performans ve düşük kütle istenen üretimlerde yüksek mekanik özellikleri nedeniyle karbon elyaflar kullanılır. Cam elyaflar, düşük maliyetleri nedeniyle sektörde en çok tercih edilen elyaftır. Cam elyaflar içerisinde ise en çok E-cam kullanılır. Gemi inşaatı sanayind e en çok kullanılan üretim yöntemleri el yatırması ve vakum infüzyondur. El yatırması düşük maliyeti sebebiyle tercih edilirken vakum infüzyon kaliteli ve homojen sonuç vermesi nedeniyle tercih edilir.

Kompozit malzemeler ikinci dünya savaşından sonra denizcilik uygulamalarında kullanılmaya başlandı. Düşük yoğunlukları, yüksek mekanik özellikleri ve yüksek korozyon dayanımları sayesinde oldukça ilgi çeken kompozit malzemelerin denizcilik alanında kullanımıyla ilgili çok sayıda akademik araştırma yapılmıştır. Mouring (1997) tarafından yapılan çalışmada denizcilik sektöründe kullanılmak üzere destekli bir cam takviyeli kompozit levhanın farklı fiber yönlerindeki konfigürasyonları tek yönlü sıkıştırma yükü altında test edilmiştir.

Mantari ve Guedes (2013) gelişmiş kompozit levhaların eğilme analizi için genelleştirilmiş bir teori ve onun sonlu eleman formülasyonunu sunmuşlardır. Sundukları teoriden elde ettikleri verileri daha önce kullanılan teorilerin elde ettiği veriler ile karşılaştırmışlardır. Raju (2013) b ir teknede salmanın bağlanacağı kompozit dip levhasını şapka formlu destek elemanları ile birlikte ele almıştır. Yapının statik bir yük altında katman ayrılmasını incelemek için hem deneyler yapmış hem de yapıyı sonlu elemanlar yöntemi ile modelleyerek elde ettiği verileri kıyaslamıştır. 2014 yılına gelindiğinde Colombo ve Vergani (2014) cam elyaf kompozitlerde katman ayrılmasının yorulma üzerindeki etkisini araştırmak için deneyler yapmıştır. 2015 yılında yapılan çalışmada SudhirSastry (2015) kompozit bir levhayı farklı tip destek elemanları ile güçlendirip tek eksenli basma yükü altında deneysel olarak incelemiş ve levhayı optimize etmiştir. Ma ve Liu (2016) katmanlar arası hasar başlaması ve ilerlemesinin tahmini için üç boyutlu bir hasar modeli geliştirmiştir. Bu modeli sonlu elemanlar yöntemi temelli bir bilgisayar programında enine yüklemeye maruz kalan açılı dizilmiş bir kompozit levhaya uygulamış ve elde ettiği verileri literatürde bulunan deneysel veriler ile kıyaslamıştır. Mo vd. (2016) şapka deste k elemanlı kompozit bir paneli basma yükü altında burkulma davranışlarını deneysel olarak incelemiş ve şapka destek elemanını optimize etmiştir. Khosravani, ve Weinberg (2017, 2018) yaptıkları çalışmalarda yaşlanmanın sandviç yapıdaki kompozit malzemeler üzerindeki etkisini incelemek için deneyler yapmıştır. Bal peteği yapısına sahip T bağlantıları termal etkiler ile yapay olarak yaşlandırarak malzemenin yaşlanma öncesi ve sonrası mekanik değerlerini ölçüp karşılaştırmıştır. 2018 yılına gelindiğinde Kharghani ve Guedes Soares (2018), polinom şekil fonksiyonlarına dayanan farklı teorileri, iki farklı lif açı kombinasyonu ve iki farklı sınır koşulu için kompozit levhadaki sapmayı ve boyuna gerinimi tahmin etmek için kullanmışlardır. Elde ettikleri verileri de neylerden ve sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan programdan elde ettikleri veriler ile karşılaştırmışlardır. Li (2018), gerçekleştirdiği deneysel çalışmada, farklı katman ayrılmalarına sahip takviyeli kompozit levhalarının basmaya dayanım özelliklerini incelemiştir. 2018 yılında yapılan bir diğer çalışmada Kolanu (2018) basma kuvveti altında karbon fiber takviyeli kompozit panelin burkulma ve burkulma sonrası davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Imran vd. (2019) suyun 300 metre altında çalışacak bir denizaltı aracının kompozit yapıdaki kabuğu için optimizasyon yapmıştır. Kompozit yapının fiber yönleri, katman sayısı ve kullanılan lif malzemeleri optimize edilmiş, başarısızlık kriteri olarak Tsai -Wu ve Tsai -hill kriterleri kullanılmıştır. Kharghani'nin (2019) yaptığı çalışmada kompozit çelik bağlantısı bükme ve burulma yükleri altında hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. Zhao (2019), tek eksenli sıkıştırmaya maruz kalan destekli kompozit levhalarda kabuk konfigürasyonunun burkulma davra nışına olan etkisini hem sayısal hem de deneysel olarak incelemiştir. Kai vd. (2020) sandviç yapılı kompozit L bağlantı elemanının çekme yükü altında davranışını hem deneysel olarak hem de simülasyon ortamında incelemişlerdir. Li (2020), gemi güvertesinde kullanılmak üzere destekli kompozit bir levhanın optimizasyonunu sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan bir program üzerinden gerçekleştirmiştir. 2022 yılında yapılan çalışmada havacılık alanında kullanılmak için tasarlanan bir adet şapka tipi destek ele manı ile desteklenen bir levha 4 noktalı eğilme testine tabi tutulmuş ve elde edilen veriler yapılan analizler ile karşılaştırılmıştır (B. Li vd., 2022). 2021 yılında yapılan çalışmada Morshedsolouk ve Karimirad (2021) denizcilikte kullanılmak üzere tasarlanan iki şapka tipi destek elemanlı bir levhayı ele almışlardır. Levhanın başlangıç koşulunda hasarlı olduğu kabulünü yaparak ilk hasarın burkulma sonrası davranışa nasıl etki ettiğini incelemişlerdir . Schilling ve Mittelstedt (2022) yaptıkları çalışmada şapka tipi destek elemanı ile desteklenmiş kompozit levhanın burkulma davranışını incelemiş ve burkulma sonrasının incelenmesi için yeni tip kapalı form analitik bir çözüm tanımlamışlardır. Yine 2022 yılında yapılan bir başka çalışmada Zhang (2022) farklı tipteki destek elemanları ile desteklenen kompozit bir levhanın taşıma kapasitesini hem deneysel hem de sayısal olarak incelemiştir.

GMO Journal of Ship and Marine Technology
Issue: 223, June 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Journal homepage: http://www.gmoshipmar.org/
Research Article

Bu çalışmada 24 metre uzunluğundaki bir motor yatın dip levhasına gelen yük ISO standartları çerçevesinde bulunmuştur. Le vhaya etki eden yüke göre levha ve destek elemanları boyutlandırılmıştır. Levha ve destek elemanlarının her biri 4 mm olan 5 katmandan oluştuğu kabul edilmiştir. Her bir katman birbirinden bağımsız elyaf yönüne sahiptir. Başlangıçta her bir katman için bir elyaf yönü kabulü yapılmış ardından katman yönleri optimize edilmiştir. Optimum yön dizilimin bulunmasının ardından tüm levhada levha genişliği ve destek eleman yüksekliği optimizasyonu ve katman kalınlığı optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyonlarda deni zden gelen yüklere dayanabilecek bir dip levhasının daha az malzeme ile üretilebilirliği araştırılmıştır.

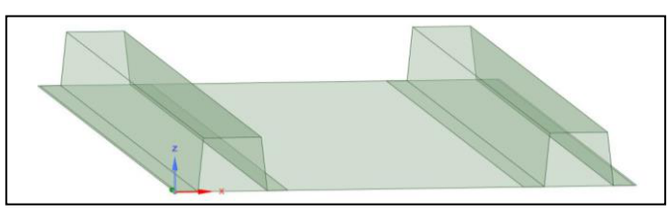
2. Boyutlandırma kuralları ve ilgili standartlar

Bu çalışma kapsamında Marmara denizinde kullanılacak 24 metre uzunluğunda cam elyaf takviyeli kompozitten mamul bir tekne ele alınmaktadır. Tekne boyutları Tablo 1'de verilmiştir. Tekne boyutları belirlenirken benzer özelliklere sahip 24 metre tekneler incelenmiş ve onlara göre ortalama değerler kabul edilmiştir.

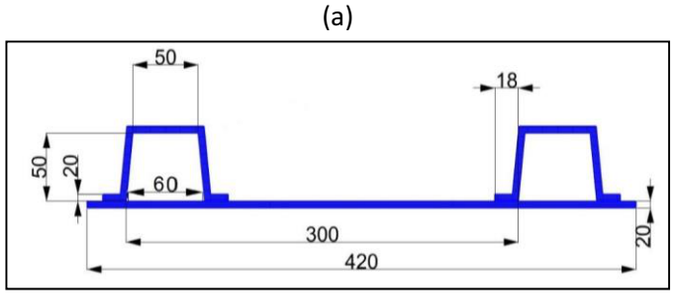
Tablo 1. Çalışma kapsamında incelenen teknenin değerleri

Gemi Tipi	Motor Yat	
Su Hattı Boyu (L_{wl})	24	m
Genişlik (B)	7	m
Su çekimi (T)	1.34	m
Fribord (F)	2	m
Seyir Hızı	23	Knots
Blok Katsayısı (C_b)	0.39	
Hacim	87.797	m^3
Kütle	90	ton

Bu çalışmada kullanılan levhanın boyutları mm cinsinden Şekil 1'de gösterilmektedir. Geminin orta bölümde dipte yer alan 1000 mm uzunluğundaki levhanın enine iki perde arasında olduğu kabul edilmiştir. Levhanın gemideki temsili konumu Şekil 2'de gösterilmektedir. Levha boyuna yönde uzanan iki adet şapka tipi destek elemanı ile desteklenmektedir.



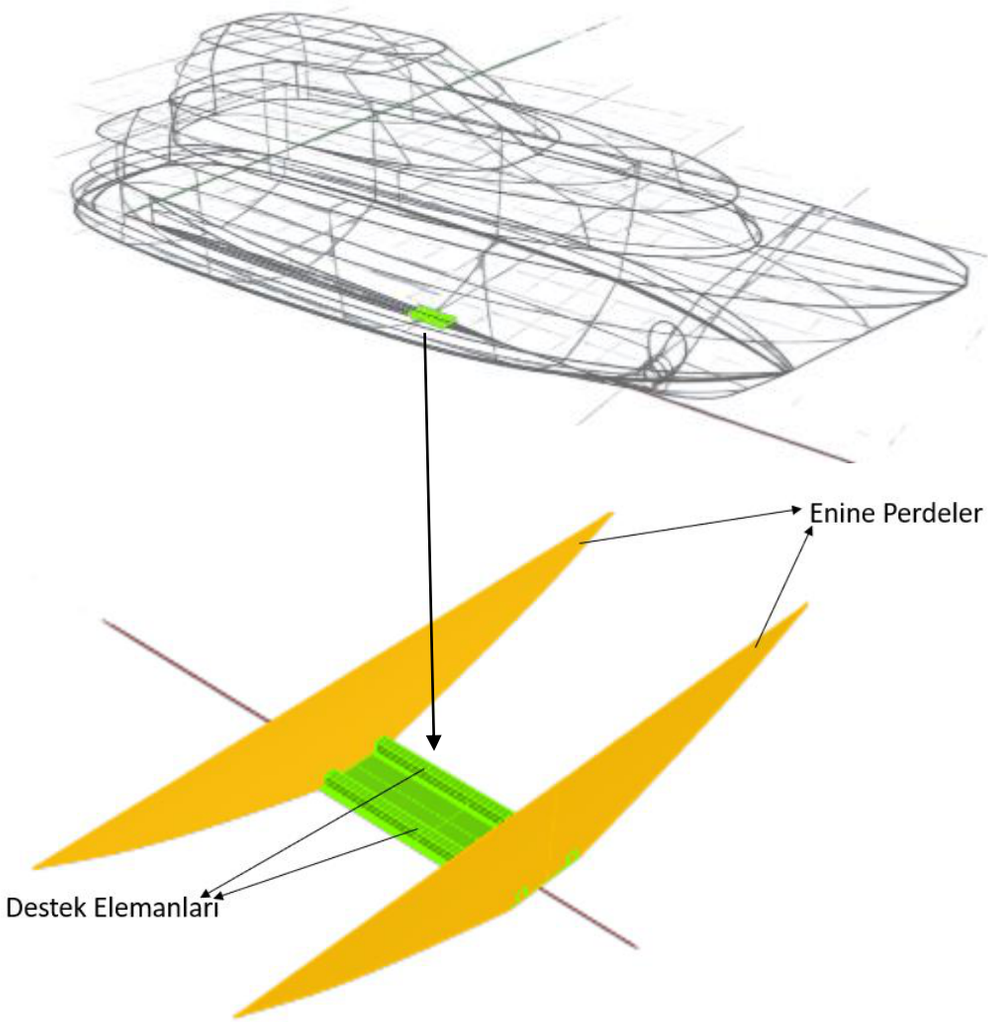
(a)



(b)

Şekil 1. Levha perspektif görüntüsü (a) ve ölçüleri (b, mm)

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi



Şekil 2. Levha konumunun temsili gösterimi

Levhanın uzunluğu, destek elemanlarının genişliği ve destekler arası mesafe hali hazırda literatürde kullanılan üzerine birden fazla makale yazılan (Chen & Soares, 2007; Chen & Soares, 2008; Morshedsolouk & Karimirad, 2021) bir levhaya uygun olarak seçilmiştir. Levhanın kalınlığı ise kendi gemi boyutlarımıza uygun olacak şekilde revize edilmiştir.

Gemi inşaatı sanayinde üretilecek olan tekneler klas kuruluşları tarafından belirlenen kurallar ve standartlar ölçüsünde imal edilir. Klaslama kurallarına ek olarak 24 metre ve altı tekneler için Uluslararası Standardizasyon Teşkilatı ISO (Internatio nal Standardization Organization) kuralları da kullanılabilir. Özellikle iç sularda seyir edecek ve Uluslararası Denizcilik Örgütü IMO (International Maritime Organization) numarası almayacak tekneler için ISO kurallarını kullanmak önceliklidir. Oluşturulan kurallardaki ana mantık eldeki veriler ve daha önce edinilmiş tecrübeler ışığında boyutlandırılacak bölüme gelen yükü bulmak ve bu yüke dayanım gösterecek saç kalınlığı, destek eleman sayısı ve destek eleman boyutlarını hesap etmektir. Boyutlandırma yapa rken Uluslararası Standardizasyon Teşkilatı'nın 'ISO 12215 -5:2019 Small craft - Hull construction and scantlings - Part 5: Design pressures for monohulls, design stresses, scantlings determination' (ISO, 2018) bölümü kullanılmıştır.

Levha üzerine gelen yükü bulurken Tablo 1 ve Şekil 1(b)'deki değerler kullanılmıştır. Bu değerlerden yola çıkılarak basınç faktörleri (Tasarım Kategori Faktörü (k_{DC}), Dinamik Yük Faktörü (k_{DYN}), Boyuna Basınç Dağıtım Faktörü (k_L), Alan Basıncı Azaltma Faktörü (k_{AR})) bulunmuştur.

Tekneler kullanılacakları deniz durumlarına göre farklı tasarım kategorilerine göre üretilirler. Tablo 2'de gösterilen tasarım kategorileri belirgin dalga yüksekliği ve rüzgar kuvvetine göre sınıflandırılır. Belirgin dalga yüksekliği denizde oluşan dalgaların en yüksek üçte birinin ortalamasını ifade eder. Rüzgar kuvveti ise Beaufort Skalasına göre belirtilir. Marmara denizi belirgin dalga yüksekliği değeri 2,5 metredir (Kutupoğlu vd., 2018; Saraçoğlu vd., 2014). Bu nedenle teknenin tasarım kategorisi B'di r ve k_{DC} değeri 0,8'dir.

Tablo 2. Tasarım kategorileri

Tasarım Kategorisi	**Belirgin Dalga Yüksekliği**	**Rüzgar Kuvveti (Beaufort Skalasına göre)**	**k_{DC}**
A	4 metreyi aşan	8'i aşan	1
B	4 metreye kadar	8'e kadar	0.8
C	2 metreye kadar	6'ya kadar	0.6
D	0,3 metreye kadar	4'e kadar	0.4

Dinamik yük faktörü için k_{DYN1} ve k_{DYN2}'den küçük olanı seçilir. k_{DYN1} değeri Tablo 3'deki hesap sonucunda 1.147 bulunur. k_{DYN2}'nin alabileceği en alt değer 3 olduğu için k_{DYN} değeri 1.147 olarak seçilir. Boyuna basınç dağıtım faktörü k_L, gemideki boyuna konumuna göre basınç yüklerinin değişimini dikkate alır. Geminin mastorisindeki konumda olduğumuz için x/L_{wl} değerimiz 0.5 olmaktadır. Verilen bilgiler ışığında k_L değeri 0.9 olarak kabul edilmiştir. Alan b asıncı azaltma faktörü Tablo 4'te verilen hesaplama sonucunda 1.21 olarak bulunur fakat kural gereği 1'den büyük olamayacağı için değer 1 olarak kabul edilir.

Tablo 3. Dinamik yük faktörü hesap tablosu

Sembol	**Formül**	**Değer**	**Tanım**
k_{DYN1}	$0.32*(L_{wl}/(10*B_c)+0.084)*(50-\beta_{0.4})*(V^2B_c^2/m_{LDC})$	1.147	Dinamik yük faktörü
L_{wl}		24	Su hattı boyu (m)
B_c		6	0.4 x Lwl'deki çene genişliği
$\beta_{0.4}$		15	Ölü açı (deadrise angle)
V		23	Seyir hızı (knots)
m_{LDC}		90000	Maksimum kütle (kg)

Tablo 4. Alan basıncı azaltma faktörü hesabı

Sembol	**Formül**	**Değer**	**Tanım**
k_{AR}	$k_R*0.1*m_{LDC}$^0.15/A_D^0.3	1.210	Alan basıncı azaltma faktörü $0<k_{AR}<1$
k_R	$1.5 - 3 \times 10{-}4 \times b$	1.428	Yapısal bileşen ve tekne tipi faktörü
A_D	$(l \times b) \times 10{-}6$	0.240	Levha için tasarım alanı

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/

Motor yatlar ve yelkenli tekneler için iki ayrı basınç hesabı yapılır. Bu çalışmada motor yat hesabı kullanılmıştır. Motor yatlar için de iki ayrı hesap söz konusudur. İlk olarak deplasman kuvvetleri etkisinde olanlar için deplasman modu (displacement mode), ikinci olarak da hidrodinamik kuvvetler etkisinde olanlar için kayar mod (planing mode). Fakat hangi kuvvetlerin etkisinde olursa olsun iki ayrı hesaptan hangisi büyükse basınç değeri o kabul edilir.

Levhanın teknedeki konumuna (dip, borda, güverte, üst yapı) göre farklı hesaplar kullanılmaktadır. Bu çalışmada dip levhaları için olan hesaplamalar kullanmaktadır. Tablo 5'de motor yat deplasman modu için dip basıncı hesabı yapılmaktadır. Tablo 6'da ise motor yat kayar mod için dip basıncı hesabı yapılmaktadır. Kayar moddaki değer daha büyük çıktığı için dip basıncımız 114 kPa olarak bulunmuştur.

Tablo 5. Motor yat deplasman modu için dip basıncı hesabı

Sembol	Formül	Değer	Tanım
$P_{BMD\ PLT}$	max($P_{BMD\ BASE}$*k_{AR} *k_{DC}*k_L; $P_{BM\ MIN\ PLT}$)	**88.949 kPa**	Motor yat deplasman modu için dip basıncı
	$P_{BMD\ BASE}$*k_{AR}*k_{DC}*k_L	88.949	
$P_{BMD\ BASE}$	2.4*m_{LDC}^0.33+20	123.540	Motor yat deplasman modu için dip basıncı
$P_{BM\ MIN\ PLT}$	max[(0.45*m_{LDC}^0.33+0.9*L_{wl}*k_{DC}) *k_L;10*Tc;7]	33.025	Motor yat deplasman modu için minimum dip basıncı
	0.45*m_{LDC}^0.33+0.9*L_{wl}*k_{DC})*k_L	33.025	
	10*Tc	13.4	10*Su çekimi

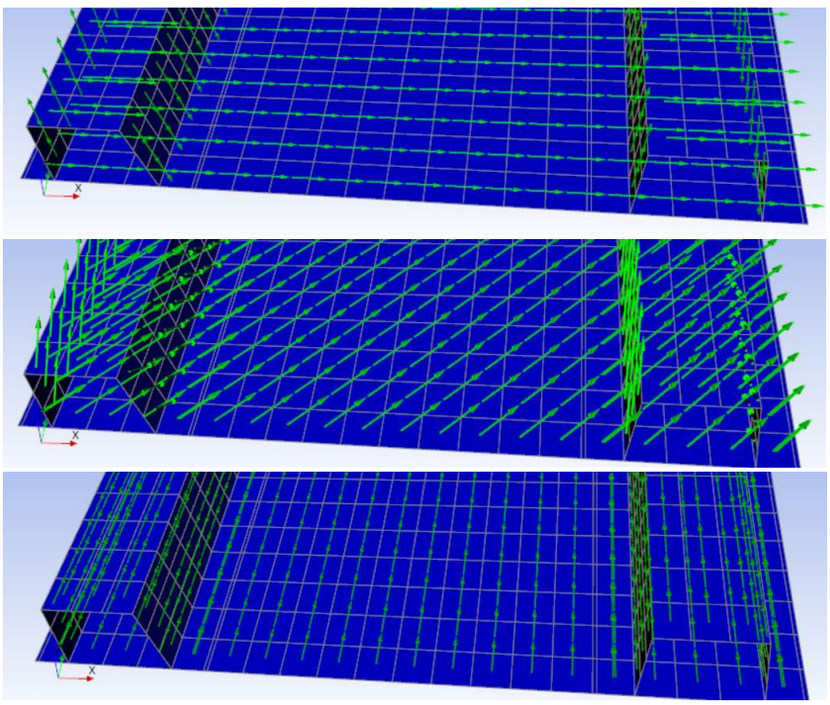
Tablo 6. Motor yat kayar mod için dip basıncı hesabı

Sembol	Formül	Değer	Tanım
$P_{BMP\ PLT}$	max($P_{BMP\ BASE}$*k_{AR}*k_L; $P_{BM\ MIN\ PLT}$)	**114 kPa**	Motor yat kayar mod için dip basıncı
	$P_{BMP\ BASE}$*k_{AR}*k_L	114	
$P_{BMP\ BASE}$	0.1*m_{LDC}*(1+($k_{DC}^{0.5}$*k_{DYN}))/(L_{wl}*B_c)		Motor yat kayar mod için dip basıncı
$P_{BM\ MIN\ PLT}$	max[(0.45*m_{LDC}^0.33+0.9*L_{wl}*k_{DC}) *k_L;10*Tc;7]	33.025	Motor yat deplasman modu için minimum dip basıncı
	0.45*mLDC^0.33+0.9*Lwl*kDC)*kL	33.025	
	10*Tc	13.4	10* Su çekimi

3. Sonlu elemanlar modeli ve optimizasyon

Levha, tek yönlü cam elyaf lifler ile epoksi reçinenin birlikte kullanılması ile elde edilen kompozit malzemeden üretilmiştir. Elde edilen malzemenin mekanik özellikleri ise Tablo 7'de veri lmiştir. Levha her biri 4 mm olan 5 katman elyaf ile üretildiği kabul edilmiştir. Her katmanda bulunan elyaflar tek yöne dizilmiştir. Bu dizilim başlangıç olarak 90/45/0/-45/90 olarak kabul edilmiştir. Elyaf yönlerinin levha üzerindeki gösterimi Şekil 3'te gösterilmiştir.

GMO Journal of Ship and Marine Technology
Issue: 223, June 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Journal homepage: http://www.gmoshipmar.org/
Research Article



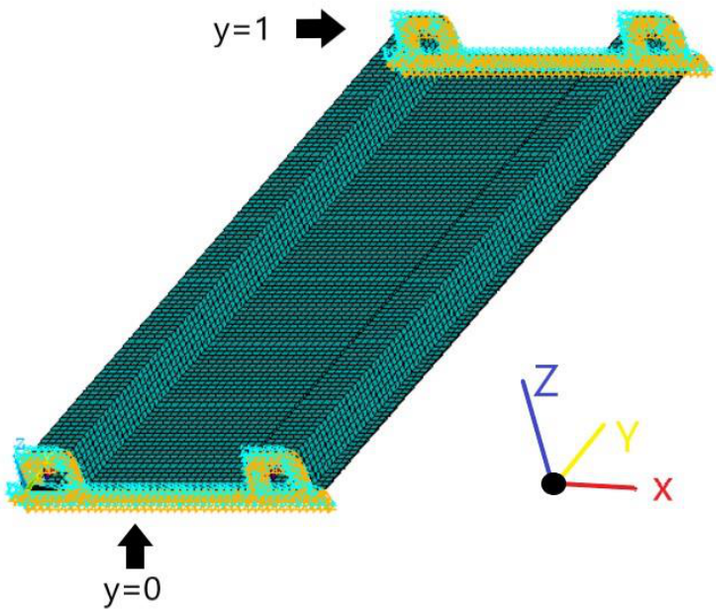
Şekil 3. Elyaf yönleri (üstte 0°, ortada 45° ,altta 90°)

Tablo 7. Levha malzemesinin mekanik özellikleri

E_{xx} (X yönünde Çekme Modülü)	35 GPa
E_{yy} (Y yönünde Çekme Modülü)	9 GPa
E_{zz} (Zyönünde Çekme Modülü)	9 GPa
NU_{xy} (XY yönünde Poisson Oranı)	0.28
NU_{yz} (YZ yönünde Poisson Oranı)	0.4
NU_{xz} (XZ yönünde Poisson Oranı)	0.28
SM_{xy} (XY yönünde Kesme Modülü)	4.7 GPa
SM_{yz} (YZ yönünde Kesme Modülü)	3.5 GPa
SM_{xz} (XZ yönünde Kesme Modülü)	4.7 GPa
Yoğunluk	1850 kg/m^3

Levha örgü yapısı 7700 adet elemana sahiptir. Levhanın ve destek elemanlarının perdeye bağlandığı yerler yani dikdörtgen şeklin kısa kenarlarında basit mesnet kabulü yapılmıştır. Basit mesnet kabulü neticesinde Şekil 4'te gösterildiği gibi koordinat sisteminde y=0 ve y=1 düzlemlerinde yer alan tüm noktalardaki X, Y, Z yönündeki öteleme hareketleri ile Y ve Z eksenleri etrafındaki dönme hareketleri sabit ve 0 olarak belirlenmiştir. Levhanın uzun kenarında, daha önce yapılmış çalışmalarla benzerlik göstermesi için bir sınır kabulü yapılmamıştır. Bir önceki bölümde bulduğumuz levhaya etki eden 114 kPa'lık basınç kuvveti levhanın deniz ile temas eden yüzeyi boyunca eşit şekilde etki ettirilmiştir.

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi



Şekil 4. Levha sınır şartları

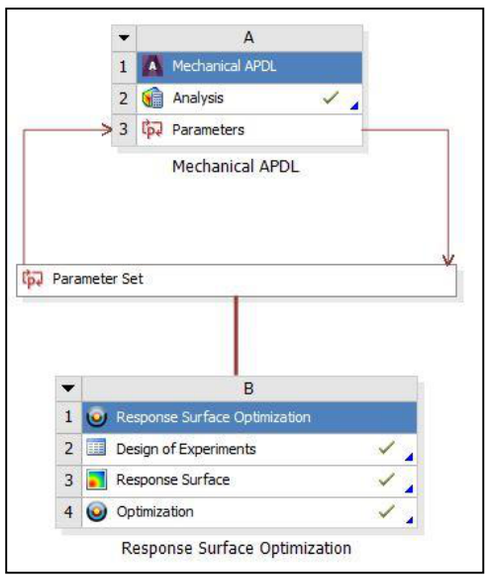
Analizler, modellemenin de yapıldığı ANSYS Mechanical APDL programı üzerinden yapılmaktadır. Analizlerde kompozit malzemeler için geliştirilmiş hasar tahmin kriterlerinden biri olan Tsai -Wu kriteri göz önüne alınmıştır. Tsai -Wu kriteri, incelenen malzemenin tüm yönlerdeki çekme, basma ve tüm düzlemlerdeki kesme nihai gerilim değerleri ile malzemenin yük altındayken oluşan tüm yönlerdeki çekme, basma ve tüm düzlemlerdeki kesme gerilim değerlerinin birlikte kullanılarak oluşturulan denklem sonucunda bulunur. Denklem sonucunun 1'den büyük olması malzemenin uygulanan yüke dayanmayacağını göstermektedir.

Levhanın farklı bölgelerinde gerilim ve buna bağlı olarak kriter değeri yoğunlaşmaktadır. En tehlikeli yer, kriter değerinin en yüksek olduğu yer olduğu için optimizasyon yaparken maksimum Tasi -Wu kriter değeri göz önüne alınmaktadır. Değerin 1'den büyük o lması levhanın o bölgeden kırılacağını göstermektedir. Bu nedenle maksimum değer daima 1'in altında tutulmalıdır. Maksimum değerin çok küçük olması ise levhanın gereğinden sağlam olduğu ve ihtiyaçtan fazla malzeme kullanıldığı anlamına gelmektedir.

Bu çalışmanın amacı yeterli dayanımı gösterecek levhayı en az malzeme ile yani en ucuz şekilde elde etmektir. Optimizasyon sonunda elde edilecek panelin maksimum Tsai -Wu kriter değerinin emniyet faktörü göz önüne alınarak 0.9'un altında ve bu değere yakın olması istenmektedir. Optimizasyonlar Şekil 5'te gösterildiği gibi ANSYS Workbench programı üzerinden yapılmaktadır. İlk olarak Mechanical APDL kodu yüklenmekte ardından optimize edilecek girdi ve çıktı parametreleri belirlenmektedir. Her bir girdi parametresinin hangi değerleri alabileceği yada hangi değerler arasında kullanılabileceği belirlenir. Girdi değerleri üzerinden deney matrisi oluşturulur ve matristeki her kombinasyon için analiz yapılır. Analiz sonuçları tepki yüzey optimizasyonu modülü içerisine alına rak girdilere bağlı olarak çıktılar için ampirik formüllere dönüştürülür. Daha sonra optimizasyon modülünde her bir çıktı parametresinin kriterleri belirlenir. Son olarak belirlenen çıktı kriterlerini en iyi sağlayan analiz sonuçları listelenir.

Bu çalışmada kullanılan sonlu eleman modeli ANSYS Mechanical APDL içerisinde koşturulabilen bir kod yardımı ile oluşturulmuştur (https://github.com/yildizdag/composite adresinden koda ulaşılabilir).

GMO Journal of Ship and Marine Technology
Issue: 223, June 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Journal homepage: http://www.gmoshipmar.org/
Research Article



Şekil 5. Optimizasyon şeması

3.1. Optimizasyon kısım 1: 90/P/P/P/90

İlk optimizasyon adımında ilk ve son katmanın X ekseniyle 90 derece yapacak şekilde yayıldığı ortada kalan üç katmanın ise X ekseni ile -90, -60 -45, -30, 0, 30, 45 ve 60 derecelerde yayıldığı kombinasyonlar denenmiştir. Lifler tek yönlü oldukları için -90 ve 90 derece yayılmaları aynı anlama gelmektedir. Burada her katmanın kalınlığı sabit ve 4 mm'dir. 1728 farklı kombinasyon analiz edilmiştir. Tsai -Wu hasar kriter değerinin en düşük olduğu kombinasyonlar aranmıştır. Tablo 8'de gösterildiği üzere başlangıç dizilimi olan 90/45/0/-45/90, Tsai-Wu hasar kriterini sağlamaktadır fakat daha uygun kombinasyonlar bulunmaktadır.

Tablo 8. 1. kısım en uygun serim değerleri

Katman	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**Tsai-Wu Hasar Kriter Değeri**
En Uygun Kombinasyonlar	**Serim Açısı**					
1.	90	0	0	0	90	0.0898
2.	90	0	90	0	90	0.0899
3.	90	90	-60	0	90	0.0900
Başlangıç	90	45	0	-45	90	0.1180

3.2. Optimizasyon kısım 2: 0/P/P/P/0

Optimizasyonun 1. Kısmında tüm elemanlardaki ilk ve son katmanı 90 derece serim açısında sabit tutup ara değerleri değiştirerek bir optimizasyon çalışması yapmıştık. 2. kısımda ise ilk ve son katmanın serim açılarını X ekseni ile 0 derece açı yapacak şekilde sabit tutup aradaki üç katmanı yine -90, -60 -45, -30, 0, 30, 45, 60 derecelerde yayarak yeni bir kombinasyonda optimizasyon çalışması gerçekleştirdik. 1728 farklı kombinasyonun analiz edildiği bu kısımda ilk ve son katmanın serim açısının etkisini 1. Kısım ile kıyaslamış olduk. Bu kısımda en uygun olan serim açıları Tablo 9'da verilmiştir.

ISSN: 1300-1973,e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/

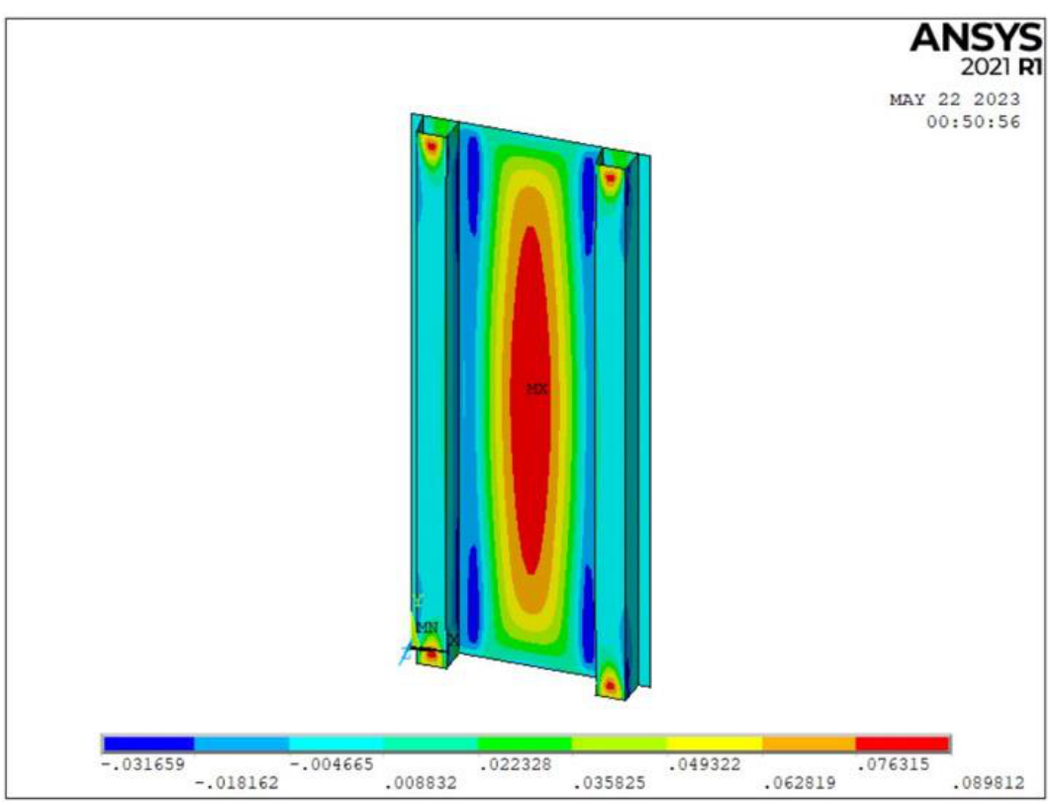
Tablo 9. 2. kısım en uygun serim değerleri

Katman	1	2	3	4	5	Tsai-Wu Hasar Kriter Değeri
En Uygun Kombinasyonlar	Serim Açısı					
1.	0	90	0	90	0	0.406
2.	0	90	90	90	0	0.409
3.	0	90	-30	90	0	0.416

Bu kısımda başlangıç kombinasyonundaki hasar kriterinin altına düşülememiştir. En uygun olan değerlerin ortak noktası, ara açı (30, 45, 60) değerlerinden çok 0, 90 derece ve bu derecelere yakın değerlerde serim açılarının olmasıdır.

3.3. Optimizasyon kısım 3: P/P/P/P/P

Önceki optimizasyon kısımlarında ara açılardaki serim değerlerinin Tsai-Wu hasar kriter değerlerini düşürmediği görülmüştür. Bu nedenle bu kısımda çözüm matrisini büyütmemek ve hızlı sonuç almak için bu kriter optimizasyona dahil edilmemiştir. Optimizasyonun 3. kısmında levhada ve destek elemanında aynı olmak üzere tüm katmanlardaki serim açıları 0, 90 derecelerde kombine edilmiştir. 32 farklı kombinasyonun analiz edildiği bu kısımda en uygun olan serim açıları Tablo 10'da verilmiştir. Optimum açı kombinasyonu 90/0/0/0/90 olarak bulunmuştur. Bu kombinasyonun Tsai-Wu hasar kriteri grafiği Şekil 6'da gösterilmiştir. Kombinasyonun en yüksek hasar kriter değeri 0.0898'dir.



Şekil 6. 90/0/0/0/90 serim açılı levhanın hasar kriteri grafiği

Tablo 10. 3. kısım en uygun serim değerleri

Katman	1	2	3	4	5	Tsai-Wu Hasar Kriter Değeri
En Uygun Kombinasyonlar	Serim Açısı					
1.	90	0	0	0	90	0.0898
2.	90	0	90	0	90	0.899
3.	0	90	90	0	90	0.911

3.4. Optimizasyon kısım 4: levha genişliği ve destek eleman yüksekliği

En uygun açı oryantasyonunun bulunmasının ardından bu kısımda aynı oryantasyonda ve aynı katman kalınlığında en uygun levha genişliği ve destek eleman yüksekliği bulunmuştur. Bu kısımdaki optimizasyon kriteri daha önce belirtilen 0.9'un altındaki en yüksek Tsai-Wu hasar kriter değerini elde etmektir.

Başlangıç durumunda levha genişliği 400 milimetre, destek eleman yüksekliği ise 50 milimetredir. Bu kısımda levha genişliği 400 ile 740 milimetre, destek eleman yüksekliği ise 50 ile 30 milimetre değerleri arasında aynı anda optimize edilmiştir. 250 farklı kombinasyonun analiz edildiği bu kısımda en uygun olan levha genişlikleri ve destek eleman yükseklikleri Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. 4. kısım en uygun değerleri

En Uygun	Levha Genişliği (mm)	Destek Eleman Yüksekliği (mm)	Tsai-Wu Hasar Kriter Değeri	Hacim (cm^3)
1.	560	20	0.8859	16289
2.	500	20	0.7479	15089
3.	420	20	0.5491	13089
Başlangıç	420	50	0.1180	15460

3.5. Optimizasyon kısım 5: katman kalınlığı

Kısım 5 optimizasyonunda, kısım 4'ten bağımsız kalınmıştır. Başlangıç durumundaki levha boyutları ve kısım 4'te elde edilen en uygun açı oryantasyonu kullanılmıştır. Burada amaç 5 katmanın kalınlıklarını birbirlerine eşit olacak şekilde azaltarak Tsai-Wu hasar kriter değerinin 0.9'un altında kalması sağlanarak en ince yapıyı oluşturmaktır. Katman kalınlıkları, başlangıç değeri olan 4 mm'den 1 mm'ye kadar azaltılarak farklı kalınlıklarda analiz edilmiştir. 26 farklı analizin yapıldığı bu kısımda en uygun ola n katman kalınlıkları Tablo 12'de verilmiştir. Tabloda gösterildiği gibi sadece açı oryantasyonu optimize edilerek gerekli şartları sağlayan bir levha çok daha düşük hacimde de üretilebilmektedir.

Tablo 12. 5. kısım en uygun katman kalınlığı değerleri

En Uygun	1 Katmanın Kalınlığı (mm)	Toplam Kalınlık (mm)	Tsai-Wu Hasar Kriter Değeri	Hacim (cm^3)
1.	1.15	5.75	0.8907	4444
2.	1.2	6	0.8065	4638
3.	1.5	7.5	0.4939	5798
Başlangıç	4	20	0.1180	15460

4. Sonuçlar

Bu çalışmada bir motor yatın dip levhasında optimizasyon çalışması yapılmıştır. Levha cam elyaf takviyeli kompozitten üretilmiştir ve iki adet şapka tipi destek elemanı ile desteklenmektedir. Levhanın kısa kenarları gemi perdelerine bağlı olduğu için bu ke narlarda basit mesnet kabulü yapılmıştır. Levhaya etki eden kuvvetler Uluslararası Standardizasyon Teşkilatı'nın vermiş olduğu kurallar çerçevesinde 114 kPa olarak bulunmuştur.

Yapının belirtilen yük altındaki sonlu analizi ANSYS Mechanical APDL programı üzerinden yapılmaktadır. Analizler için program ile uyumlu kod yazılmıştır. Analiz sonuçlarında yapının maksimum Tsai-Wu değeri incelenmekte ve bu değer üzerinden optimizasyon yapılmaktadır.

Optimizasyonda ilk olarak en uygun oryantasyon açıları aranmıştır. 3 ayrı kısımda yapılan toplam 3700 farklı analiz sonucunda en uygun oryantasyonun, levhada ve destek elemanlarında aynı olmak üzere 90/0/0/0/90 olduğu bulunmuştur. Daha sonra en uygun oryantasyon kullanılarak levha genişliği ve destek eleman yüksekliği optimizasyonu ve katman kalınlığı yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda incelenen yapıda şu sonuçlara varılmıştır:

Bu levhanın belirtilen yük durumu için oryantasyonda ara açı değerleri yapının mukavemetini arttırmamaktadır. En uygun olan aç ılar X ekseni ile 0 ve 90 derece yapan açılardır.

Farklı oryantasyon açılarının hangi sırada dizildiği yapının mukavemeti açısından önemlidir.

Oryantasyon açılarını ve katman sırasını değiştirerek daha mukavim yapılar elde edilebilmektedir. Bu sayede ayrı bir işlem yapılmaksızın sadece oryantasyon optimizasyonu ile çok daha ucuz üretimler gerçekleştirilebilir.

Referanslar

Chen, N.-Z., & Guedes Soares, C. (2007). Longitudinal strength analysis of ship hulls of composite materials under sagging moments. Composite Structures, 77(1), 36-44.

Chen, N.-Z., & Soares, C. G. (2008). Ultimate Longitudinal Strength of Ship Hulls of Composite Materials. Journal of Ship Research, 52(03), 184-193.

Colombo, C., & Vergani, L. (2014). Influence of delamination on fatigue properties of a fibreglass composite. Composite Structures, 107, 325-333.

ISO. (2018). ISO 12215-5:2018—Small craft—Hull construction and scantlings—Part 5: Design pressures for monohulls, design stresses, scantlings determination.

Imran, M., Shi, D., Tong, L., & Waqas, H. (2019). Design optimization of composite submerged cylindrical pressure hull using genetic algorithm and finite element analysis. Ocean Engineering, 190, 106443.

Kai, Q., Renjun, Y., Wei, S., & Yaoyu, H. (2020). Research on the tens ion damage behavior of sandwich composite L-joints: Experiment and simulation. Composite Structures, 232, 111566.

Kharghani, N., Alizadeh, F., Soares, C. G., & Tsouvalis, N. G. (2019). Experimental and numerical study of a composite-to-steel joint under bending and torsion loads. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 233(3), 722-734.

Kharghani, N., & Guedes Soares, C. (2018). Experimental, numerical and analytical study of ben ding of

rectangular composite laminates. European Journal of Mechanics - A/Solids, 72, 155-174.

Khosravani, M. R., & Weinberg, K. (2017). Experimental investigations of the environmental effects on stability and integrity of composite sandwich T-joints. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 48(8), 753-759.

Khosravani, M. R., & Weinberg, K. (2018). Characterization of sandwich composite T-joints under different ageing conditions. Composite Structures, 197, 80-88.

Kolanu, N. R., Raju, G., & Ramji, M. (2018). Experimental and numerical studies on the buckling and post-buckling behavior of single blade-stiffened CFRP panels. Composite Structures, 196, 135-154.

Kutupoğlu, V., Akpınar, A., Bingölbali, B., & Çakmak, R. E. (2018). Marmara Denizi Üzerinde Ma ksimum Belirgin Dalga Yüksekliklerinin Alansal Dağılımları. İmo 9. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu Kasım 1, 2018.

Li, B., Gong, Y., Gao, Y., Hou, M., & Li, L. (2022). Failure Analysis of Hat -Stringer-Stiffened Aircraft Composite Panels under Four-Point Bending Loading. Materials, 15(7), Article 7.

Li, H., Yao, Y., Guo, L., Zhang, Q., & Wang, B. (2018). The effects of delamination deficiencies on compressive mechanical properties of reinforced composite skin structures. Composites Part B: Engineering, 155, 138-147.

Li, X., & Zhu, Z. (2020). Optimization Design of a Composite Hull Stiffened Panel Considering Structural Stability.

Mantari, J. L., & Guedes Soares, C. (2013). Finite element formulation of a generalized higher order shear deformation theory for advanced composite plates. Composite Structures, 96, 545-553.

Ma, L., & Liu, D. (2016). Delamination and fiber-bridging damage analysis of angle-ply laminates subjected to transverse loading. Journal of Composite Materials, 50(22), 3063-3075.

Mo, Y., Ge, D., & He, B. (2016). Experiment and optimization of the hat-stringer-stiffened composite panels under axial compression. Composites Part B: Engineering, 84, 285-293.

Morshedsolouk, F., & Karimirad, M. (2021). Postbuckling of Marine Stiffened Composite Pla tes with Initial Geometric Imperfections Using Progressive Failure Analysis. Journal of Marine Science and Application, 20(4), 694-705.

Mouring, S. E. (1999). Buckling and postbuckling of composite ship panels stiffened with preform frames. Ocean Engineering, 26(8), 793-803.

Raju, Prusty, B. G., & Kelly, D. W. (2013). Delamination failure of composite top -hat stiffeners using finite element analysis. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 227(1), 61-80.

Saraçoğlu, K. E., Yüksel, Y., Aydoğan, B., & Aydoğan, B. (2014). Marmara Denizi Dalga Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi. 8. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu Kasım 8, 2014.

Schilling, J. C., & Mittelstedt, C. (2022). Local postbuckling of omega-stringer-stiffened composite panels. Thin-Walled Structures, 181, 110027.

SudhirSastry, Y. B., Budarapu, P. R., Madhavi, N., & Krishna, Y. (2015). Buckling analysis of thin wall stiffened composite panels. Computational Materials Sci ence, 96, 459-471.

Zhang, X., Dai, W., Cai, B., Li, C., Huang, W., & Fang, C. (2022). Numerical and Experimental Investigation of Bearing Capacity for Compressed Stiffened Composite Panel with Different Stringer Section Geometries. Applied Composite Materials, 29(4), 1507-1535.

Zhao, W., Xie, Z., Wang, X., Li, X., & Hao, J. (2019). Buckling behavior of stiffened composite panels with variable thickness skin under compression. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 26(3), 215-223.

GMO Journal of Ship and Marine Technology
Issue: 223, June 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Journal homepage: http://www.gmoshipmar.org/
Research Article

Konteyner Limanlarında Geleneksel İstifleme Yöntemlerinin Kaynak Temelli Yaklaşım Bağlamında Bulanık AHP Yöntemiyle Analizi: Sistemsel Bir Öneri

Umur Bucak [1], Tarık Efe Kendir [2]

[1] Denizcilik İşletmeleri Yönetimi Bölümü, Denizcilik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye
[2] Araştırmacı

[1] (sorumlu yazar), umur.bucak@kocaeli.edu.tr , ORCID: 0000-0001-5112-8133
[2] efetarikendir@yahoo.com, 0000-0003-0412-2585

ÖZET

Konteyner trafiğinin her geçen gün artması ile konteyner sahalarına ve limanlarına olan ihtiyaç gün geçtikçe aynı oranda artmaktadır. Bu bağlamda, özellikle konteyner terminallerdeki geri saha problemleri liman kapasitelerini sınırlamaktadır. Bu nedenle, liman kapasite artışlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer taraftan, yeni limanların yer problemleri nedeni ile sanayi bölgelerinden daha uzak bölgelere inşa edilmesi durumları ortaya çıkmaktadır. Bu durum hem ulaşım maliyetlerini artırmakta hem de karbon emisyonları bakımından üretim tesislerini dezavantajlı duruma getirmektedir. Ayrıca, geri-depo sahalarında kapasiteler belirlenirken hava şartları, geri saha istif ekipman kat sınırlamaları ve konteynerlerin zati kaldırma kapasiteleri dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada geleneksel konteyner istifleme sistemlerinin darboğazlarını tanımlayan kriterler belirlenmiş ve Bulanık AHP yöntemi ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar en önemli kriterin 'Ekipman Sınırlamaları' olduğunu ortaya koymaktadır. Bu da liman kapasitesini belirleyen istifleme yüksekliğindeki sınırlamaya sebep olmaktadır. Bu nedenle, gelecekte ihtiyaç duyulması öngörülen kapasite artışına cevap verebilecek bir istifleme sisteminin uygun stratejik yaklaşımlarla belirlenmesi kaynak temelli yaklaşım açısından da en rekabetçi yaklaşım olması düşünülmektedir. Bu bağlamda, çok katlı konteyner istifleme sistemleri, kısıtlı liman sahasında yüksek istifleme kapasiteleri, yüksek operasyonel verimlilik, yeşil enerji üretimine olanak vermesi ve daha düşük karbon ayak izi gibi avantajları bakımından kapasite problemlerini gidermeye çalışan limanlar için rekabetçi avantaj getirecektir.

Anahtar kelimeler: Konteyner Limanları, Yüksek Katlı İstifleme Sistemleri, Kaynak Temelli Yaklaşım, Bulanık AHP

Makale geçmişi: Geliş 25/04/2023 – Kabul 01/08/2023

https://doi.org/10.54926/gdt.1286963

Gemi ve Deniz Teknolojisi
Sayı: 223, Haziran 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

An Analysis of Traditional Storage Methods in Container Ports by Fuzzy AHP Method in the Context of Resource-Based View: A Systematic Recommendation

Umur Bucak [1], Tarık Efe Kendir [2]

[1] Department of Maritime Business Administration, Maritime Faculty, Kocaeli University, Türkiye
[2] Researcher

[1] (corresponding author), umur.bucak@kocaeli.edu.tr , ORCID: 0000-0001-5112-8133
[2] efetarikendir@yahoo.com, 0000-0003-0412-2585

ABSTRACT

With the increase in container traffic day by day, the need for container fields and ports is increasing at the same rate. In this context, back-storage problems, especially in container terminals, limit port capacities. Therefore, port capacity increases are needed. On the other hand, there are cases where new ports were built in more distant areas from industrial zones due to location problems. This situation both increases transportation costs and puts production facilities at a disadvantage in terms of carbon emissions. In addition, while determining the capacities in the back-storage areas, weather conditions, backyard stacking equipment height limitations and the self-lifting capacities of the containers should be taken into account. In this study, criteria defining the bottlenecks of conventional container stacking systems were determined and analyzed. The results show that the most important criterion is 'Equipment Limitations'. This causes the limitation in the stacking height that determines the port capacity. For this reason, determining a stacking system that can respond to the anticipated capacity increase in the future with appropriate strategic approaches is considered to be the most competitive approach in terms of resource-based view. In this context, highbay container storage-stacking systems will bring competitive advantage to ports trying to solve capacity problems in terms of advantages such as high storage capacities in limited port areas, high operational efficiency, green energy production and lower carbon footprint.

Keywords: Container Ports, High Bay Container Storage Systems, Resource-Based View, Fuzzy AHP

Article history: Received 25/04/2023 – Accepted 01/08/2023

1. Giriş

Özellikle lojistik ağların konteynerize yüklere olan yönelimlerinin gün geçtikçe artması ve mevcut tesislerin güncel ihtiyaçlara dahi cevap veremez durumlara gelmesi (Akar and Esmer, 2015), lojistik ağlarda önemli darboğazlara neden olabilmektedir. Bu nedenle, Türkiye'deki limanların günümüzdeki en önemli problemlerinden biri liman tesislerinin kapasite yetersizlikleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kapasite problemin, gelecek projeksiyonlarda artan konteynerize yük eğilimleri göz önünde bulundurulduğunda, gelecek için de önemini koruyacağı düşünülmektedir (TÜRKLİM, 2022).

Diğer taraftan, limanların operasyonel verimliliği ise hem gemilere olan hizmet kalitesi, hem maliyetler hem de karbon emisyonu üretimleri bakımında oldukça önem arz etmektedir. Karbon emisyonlarının iklim krizi etkileri ile beraber gittikçe önem kazanması, limanlardaki operasyonel hızları ön plana çıkarmaktadır. Bu bağlamda, gemilerin limanlardaki kalış süresinin kısalığı emisyonların azaltılması bakımından limanları tercih edilebilir konuma getirmektedir. Bir gemi ne kadar az süre boyunca limanda kalırsa o kadar iyi bir yakıt ekonomisi üretebilir. Tesislerde oluşan her operasyonel kayıp, o gemi için ilave bir yakıt tüketimi olarak karşımıza çıkabilir. Bu nedenle, yüksek operasyonel hızlar vaat eden tesisler denizyolu tedarik zincirinde tercih edilebilmektedir.

Konteyner limanlarındaki geleneksel istifleme sistemleri, zaten yetersiz olan liman sahalarının kullanımında verimsizlik oluşturmaktadır. Bu noktada rıhtım kapasitelerinin artırılması, liman sahalarının genişletilmesi gibi projeler ilk akla gelirken, şehir içinde kalmış limanlar (İzmir Alsancak limanı, … gibi) için bu çözümler pek de mümkün olmamaktadır. Son zamanlarda ilgili literatürde yer alan çalışmalar, bu soruna çözüm olarak dikey istifleme sistemlerini önermektedir. Zaerpour vd. (2019) konteyner limanlarında dikey olarak yapılacak istifleme işlemlerinin finansal ve operasyonel fizibilitesini yapmışlardır. Buna göre bu istifleme sistemlerinin önemli bir kapasite artışı sağladığı ve %120 oranında elleçleme artışı yakalandığı ortaya konulmuştur. Alexandri vd. (2022) bir yüksek katlı konteyner istifleme sistemi olan BOXBAY projesini inceledikleri çalışmalarında limanların kapasite kısıtlarını aşmak amacıyla verimliliklerini artırmalarına odaklanmışlardır. BOXBAY projesinin verimliliği artırmanın yanında sürdürülebilirlik açısından da önemli çözümler ürettiğini vurgulamışlardır. Koroleva vd. (2020) konteyner limanlarının artan kapasite ihtiyaçlarının giderilmesi için dijital çözümlere odaklanmıştır ve bu çözümler içerisinde yüksek katlı konteyner istifleme sistemlerine de yer vermiştir. Literatürde geleneksel istifleme sistemlerinin zayıflıkları karşısında dikey olarak yükselen istifleme sistemlerinin faydaları çokça kez tartışılmıştır. Ancak limanlarda gelenek sel istifleme sistemleri sebebiyle ortaya çıkan sınırlandırmalar, dışsal etkenler karşısındaki zayıflıklar, elleçleme kayıpları gibi kapasite kullanımını verimsizleştiren faktörler detaylandırılmamıştır. Ayrıca alternatif bir istifleme sistemi olarak sunulan yüksek katlı sistemlerin (YKS) yalnızca alan kullanımına yaptığı katkılara değinilerek, çevreci yaklaşımlar bağlamındaki katkıları göz ardı edilmiştir. Son olarak, literatürdeki herhangi bir çalışmada limanlardaki istifleme sistemlerini analiz ederken herhangi bir yönetim teorisiyle ilişkilendirme yapılmadığı anlaşılmaktadır. Bu çalışmada ise konteyner limanlarındaki geleneksel istifleme sistemlerinden doğan sıkıntılar anlatılmış ve analiz edilmiş, ve bu sıkıntıları gidermek üzere kaynak temelli yaklaşım göz önünde bulundurularak var olan kaynakların etkin kullanımını vurgulayacak şekilde YKS önerilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde çalışmanın bakış açısının dayandırıldığı kaynak temelli yaklaşım tanımlanmış, üçüncü bölümde Türkiye'deki konteyner limanlarının kapasite kısıtları anlatılmış, dördüncü bölümde çalışmada kullanılan analiz yöntemi anlatılmış, beşinci bölümde çalışmanın uygulaması çalışmanın problemi tanımlanarak ve bulgular ifade edilerek gösterilmiş, altıncı bölümde

çalışmanın problemine getirilebilecek çözüm önerileri tartışılmış, son bölümde ise çalışmanın bulguları yorumlanmıştır.

2. Teorik Çerçeve

Günümüzde limanlar, çok çeşitli hizmetler sunarak müşterilerin memnuniyet düzeyini artırmaya ve yeni müşteriler kazanmaya çalışmaktadırlar. Anc ak bu noktada gelişen teknoloji verilen her hizmetin taklit edilebilirliğini mümkün kılmakta, dolayısıyla limanlar arasındaki rekabet düzeyi her geçen gün daha da artmaktadır. Sürdürülebilir bir rekabetçi avantaj yakalanması adına stratejik yönetim yazının da iki önemli görüş ön plana çıkmaktadır. Bunlardan ilki rekabet stratejilerini dış faktör paradigması çerçevesinde fırsat temelli bir bakış açısıyla değerlendiren pozisyon okulu, ikincisi ise rekabet stratejilerine içsel faktör paradigması çerçevesinde ya klaşan kaynak temelli görüştür (Özdemir ve Taşçı, 2020: 1019; Chakravarthy ve Doz, 1992: 6; Montgomery vd., 1989:192). Temellerini Penrose'un (1959) attığı kaynak temelli görüş, Ansoff (1965), Andrews (1971), Selznick (1975) ve Wernerfelt (1984) gibi yazarların katkılarıyla son halini almıştır (Bal, 2010: 269; Rangone, 1999: 233). Bu görüş bağlamında firmaların pazarda rekabetçi avantaj yakalamaları için iç dinamiklerini geliştirmeye odaklanmaları gerektiğini savunulmaktadır. Kaynak temelli görüşe göre işle tme kaynakları, işletme tarafından kontrol edilen yetenekler, örgütsel süreçler, firma özellikleri, bilgi, birikim gibi tüm varlıkları ifade eder (Barney, 1991) ve taklidi maddi veya manevi açıdan maliyetli olduğu için işletmelere rekabetçi avantaj sağlar (Karacaoğlu, 2006: 4).

Konteyner limanlarının tesisler, altyapı olanakları, operasyon sistemleri gibi çeşitli düzeylerde olmak üzere kendilerine özgü kaynakları bulunmaktadır. Bu kaynakların etkin kullanımı, limanlara rekabetçi avantaj getirir ve dolayısıyla yeni müşteriler kazandırabilir (Cho ve Kim, 2015). Limanlara rekabetçi avantaj getiren en önemli adımlardan bir tanesi değer zinciri üzerinde kontrol sağlamayı içerir. Bu noktada P&O Limanlarının Avustralya'da yükleme-boşaltma, depo faaliyetleri ve hinterlanda taşıma operasyonlarını entegre etmesini değer zincirinde elde edilmiş kritik bir varlık olarak görülmüştür (Robinson, 2002). Limanlar var olan kaynaklarını etkin bir şekilde kullanarak ve bu kaynakları değer zincirine entegre ederek rekabetçi avantaj yakalarlar. Öte yandan, limanların kendilerini diğer limanlardan ayıran baskın kaynaklarını belirlemesi ve bu kaynaklar özelinde stratejilerini şekillendirmesi de önemli bir rekabetçi avantaj getirecektir. Cho ve Ha (2009) kaynak temelli görüş bağlamında limanların stratejilerini eşsiz özelliklerini öne çıkaracak şekilde belirlemeleri gerektiğini savunmuşlardır. Buna göre Pohang-Yeongil limanının konum avantajı yerine hinterlant bağlantısını geliştirecek stratejilere odaklanması gerektiğini vurgulamışlar dır. Benzer şekilde, Gordon vd. (2005) Singapur Limanı'nın rekabetçiliğini değerlendirdikleri çalışmalarında, limanın kaynak temelli görüş bağlamındaki avantajlarının konumu, doğal rıhtımı, altyapı için sermayesi, bilgi teknolojileri ve operasyonel yetenekleri olduğunu savunmuşlardır. Çalışmada ayrıca ileri teknoloji kullanımı ve operasyonel etkinlik, kısıtlı olan liman sahasına karşı önemli çözümler olarak sunulmuştur. Magala (2004) limanların kendi kaynaklarını etkin kullanacak şekilde stratejiler üretmes i gerektiğini söylerken genişleme için uygun alan kazanımına ve etkin yük elleçleme ve istiflemeye vurgu yapmıştır (Subhan vd., 2008). Bu çalışmada, limanların kısıtlı elleçleme sahalarında kendilerine rekabetçi avantaj getirecek üstyapı ve ekipman çözümlerine odaklanılmıştır. Bu kapsamda geleneksel istifleme faaliyetlerinin ortaya çıkardığı darboğazlar analiz edilmiş ve bunların giderilmesine yönelik çözüm önerileri sunulmuştur.

3. Türkiye'deki Konteyner Limanlarında Kapasite Kısıtları

Türkiye'de liman sektörünün gelişimi dünya limanlarında olduğu gibi devlet tarafından limanların inşa edilmesi ve devlet tarafından işletilmesi ile başlamıştır. Zaman içinde bazıları özelleştirilmiştir. Bu limanların Türkiye'nin denizlerle çevrili üç tarafında, hinterlantlar gözetilerek önemli pozisyonlara konumlandırıldığı da görülmektedir. İskenderun, Mersin, İzmir, Haydarpaşa ve Trabzon gibi devlet limanlarının kuruluş yıllarına bakıldığında seçilen alanların Türkiye'nin 3 tarafını kapsayacak şekilde iyi öngörülerle belirlendiği yadsınamaz. Ancak, limanların kuruluş yılları üzerinden uzun yıllar geçmesi ve bu limanların şehirler içinde kalması, her ne kadar deniz dolguları ile kapasite artışları elde edilmeye çalışılsa da, kapasite problemlerini ortaya çıkarmaktadır. Bu limanlar, özel limanlarla karşılaştırıldığında, yine de önemli boyutlarda alanlara sahiptirler.

Ambarlı, Kocaeli ve İskenderun bölgesi özel limanları incelendiğinde, bu limanların genel yapıları itibari ile dar alanlarda inşa edildikleri ve bulundukları bölgelerde sıkıştıkları görülmektedir. Genelde genişleme olanakları ya kısıtlı ya da hiç yoktur. Kapasite kullanım oranları da gittikçe artmaktadır. Aynı zamanda, çoğunlukla ana trafik hatlarına ulaşım için yeterli genişlikte yollara da sahip olmadıkları görülmektedir.

Genel olarak, güncel şartlarda pik zamanlar hariç yeterli görülse de liman kapasitelerinin yakın zamanda ihtiyaçlara cevap veremeyecek hale gelmeleri muhtemeldir. TÜRKLİM'in (Türkiye Liman İşletmecileri Derneği) 'Vizyon 2050' kapsamında yaptığı çalışmadan da görüleceği üzere gerekecek kapasiteler artan trafikle beraber yakın gelecekte dar boğazlara neden olabilecektir (TÜRKLİM, 2022). Bu kapsamda, ivedikle projelendirilmiş limanların bir ana terminal gibi inşa edilerek devreye alınması yerinde olacaktır.

Diğer taraftan, 06.02.2023 Kahramanmaraş merkezli depremler silsilesinin İskenderun bölgesi limanlarını etkilemesi ve sonucunda bazı terminallerin kullanılamaz duruma gelmesi sonucu yüklerin Mersin limanına kayması ve bu limanın da kapasiteleri kaldıramaz duruma gelmesi önemli darboğazlara neden olmuştur. Bu durum, mevcut kapasitelerin istenmeyen durumlar için hazır olmadığını bir kez daha ortaya koymuştur. Aynı durumun, Marmara Bölgesi ve İzmir Bölgesi limanlarında da yaşanması olasıdır.

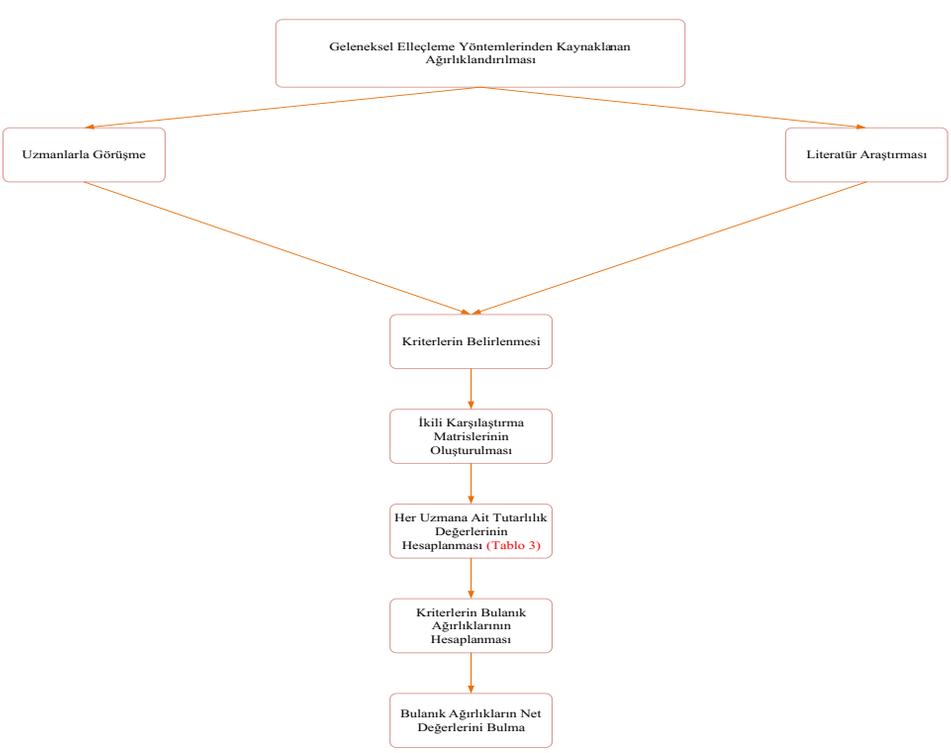
Dar alanlarda kurulu özellikle konteyner limanlarında geri saha kaynaklı kapasite problemleri gün geçtikçe artmakta ve liman idareleri tarafından çözüm yolları aranmaktadır. Bu kapsamda konteyner limanları, yük istifleme amacıyla kullanılan ekipmanlar olan Reach Stacker'lerden aynı amaçla kullanılan bir diğer ekipman olan RTG'lere (Rubber-Tyred Gantry Crane) geçmişlerdir. Bu değişim, yerine göre RTG kullanımı ile elde edilen istifleme kat artışı ile yaklaşık %20 gibi bir kapasite artışını karşılayabilmektedir. Bunun yanı sıra, bazı limanlarda faaliyette bulunan RTG'lerin mevcutta 5 kat üst üste istifleme yapabilirken bu kabiliyetlerinin 7 kat üst üste istiflemeye çıkarılması için çalışmalar yapıldığı görülmekte olup, ancak, bu eylem de Türklim Vizyon 2050 raporunda verilen bilgilere göre gelecekte gerekecek kapasiteler için de yeterli olmayacaktır (Türklim, 2022). Çünkü daha yüksek bir kapasite artışının günümüz ve gelecek için gerekli olacağı düşünülmektedir. Diğer taraftan, yeni liman projeleri (Çandarlı Limanı, Yumurtalık Bölgesi Liman Projeleri) genellikle mevcut sanayi bölgelerinden uzaktadır. Mevcut limanlar etrafına kümelenmiş sanayi bölgeleri firmaları için de bu durum ekstra maliyet ve emisyon üretim problemi olarak ortaya çıkmaktadır. Tamamen yeşil enerji kullanan nakliye araçlarının yakın gelecekte kullanılmasının çok olanak dahilinde olmaması nedeni ile, bu durumun karbon emisyonu üretimlerinin artışına neden olacağı öngörülebilir (Bozhilov, 2021). Bu durum, Avrupa Birliği ve IMO'nun (Dünya Denizcilik Örgütü) 2050 karbon emisyon hedefleriyle uyuşmamaktadır.

Bu kapsamda, dar alanda yüksek istif yapabilecek sistemlerin devreye alınması, alanların efektif ve verimli kullanılmasına, nakliye maliyetlerinde artışın engellenmesine ve karbon emisyon üretimlerinin azalmasına olumlu etkiler yapacağı düşünülmektedir.

4. Yöntem

Çalışmada limanlarda geleneksel istifleme faaliyetleri sebebiyle ortaya çıkan eksiklikler analiz edilmek istenmektedir. Bu kapsamda, geleneksel liman elleçleme sistemleri araştırılmış, ortaya çıkan eksiklikler literatür ve uzman görüşü yardımıyla ortaya konulmuştur. Daha sonra, bu eksiklikler birer kriter haline getirilip, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytic Hierarchy Process-AHP) yöntemi ile analiz edilmiştir. Bir problemdeki bazı faaliyetlerin durum unu karşılaştırarak bileşik karar verme problemini çözerken bulanıklık ve belirsizlik sıklıkla meydana gelir (Kim vd., 2022). Bu sebeple çalışmada daha geniş bir çerçevede karar verebilmek için ÇKKV yöntemlerinin bulanık sayılarla bütünleştirilmiş formu tercih edilmiştir. Bu kapsamda çalışmanın analizinde Bulanık AHP yönteminin Buckley (1985) tarafından geliştirilen versiyonu, ağırlıkları daha özenli bir şekilde dağıtması ve öznel yargıları daha iyi sansürleyebilmesi sebebiyle kullanılmıştır.

Bulanık AHP, karar verme sürecinde kriterleri sıralamak ve önceliklendirmek için kullanılan bir tekniktir. Yöntem, karar vericilerin değerlendirmelerindeki belirsizliği, tutarsızlıkları ve sübjektif değerlendirmeleri ortadan kaldırmak için bulanık sayıları kullanır (Demirel vd., 2018). Bulanık AHP, akademisyenlerin liman seçimi, yer seçimi, personel seçimi, emniyet, güvenlik ve rekabet edebilirlik evrimi gibi birçok farklı araştırma alanını dahil etmesine izin verdiği için yaygın olarak kullanılmakta ve kabul edilmektedir (Baştug vd., 2022; Li vd. 2020; Mollaoglu vd., 2019; Balci vd., 2018; Çelik ve Akyüz, 2018; Lirn vd., 2015; Nazemzadeh ve Vanelslander, 2015; Tseng ve Cullinane, 2015). Buckley (1985) ikili karşılaştırma matrisleri; her uzman için tutarlılık oranı hesaplamaları; üçgen bulanık sayılar; bulanık matrisler oluşturma; bulanık ağırlıkların hesaplanması ve durulaştırma gibi beş ana adımdan oluşan bir Bulanık AHP süreci önermiştir (Gümüş vd., 2013).



Şekil 1. Yöntemsel Model

Adım 1: İkili Karşılaştırma Matrisleri

Bu adımda uzmanların dilsel değerlendirmelerine göre karşılık gelen üçgensel bulanık sayılar dikkate alınarak (Tablo 1) ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmuştur.

Tablo 1. Üçgen Bulanık Sayılar

Gerçek Sayılar	Dilsel Değişkenler	Üçgen Bulanık Sayılar	Ters Üçgen Bulanık Sayılar
1	Eşit önemli	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
3	Orta Derecede Önemli	(2, 3, 4)	(1/4, 1/3, 1/2)
5	Güçlü Derecede Önemli	(4, 5, 6)	(1/6, 1/5, 1/4)
7	Çok Güçlü Derecede Önemli	(6, 7, 8)	(1/8, 1/7, 1/6)
9	Aşırı Derecede Önemli	(8, 9, 9)	(1/9, 1/9, 1/8)

Adım 2: Her Uzmanın Tutarlılık Değerlerinin Hesaplanması

Nesne kümesi X = $\{X_1, X_2, \dots X_n\}$ ve hedef kümesi $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ olarak temsil edilirse, her bir nesne alınır ve kapsam analizi için her hedef Qi sırasıyla gerçekleştirilir. M_{gi}^1 , M_{gi}^2,….,M_{gi}^m , i= 1, 2,…,n. birer nesne ve her bir M_{gi}^j (j = 1, 2,…,m) sayısı birer üçgensel bulanık sayı olmak üzere analizler yürütülür. i'inci nesneye göre bulanık sentetik kapsamın (Si) değeri şu şekilde tanımlanır:

$$Si = \sum_{j=1}^{m} M_{gi}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^j\right]^{-1} \quad (1)$$

$\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^j$ 'nin değeri, aşağıdaki gibi bir matristen m kapsam analizi değerlerinin bulanık toplama işlemi gerçekleştirilerek bulunabilir:

$$\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^j = \left(\sum_{j=1}^{m} l_i, \sum_{j=1}^{m} m_j, \sum_{j=1}^{m} u_j\right), \; i = 1, 2, \dots n$$

Bu denklemi hesaplamak için, $\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^j\right]^{-1}$ m sayıda genişletilmiş analiz değerinin bulanık toplanması yapılır.

$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^j = \left(\sum_{i=1}^{n} l_i, \sum_{i=1}^{n} m_i, \sum_{i=1}^{n} u_i\right)$ ve $M_{gi}^j (j = 1,2, \dots, m)$ Bu denklem için bulanık toplama yapılır. Bundan sonra,

$\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^j\right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^{n} u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} l_i}\right)$ bu vektörü hesaplamak için

$\left(\sum_{i=1}^{n} l_i, \sum_{i=1}^{n} m_i, \sum_{i=1}^{n} u_i\right)$ vektörün tersi alınır.

Adım 3: Olasılık Derecesi Hesaplama

$M_2 = (l_2, m_2, u_2) \geq M_1 = (l_1, m_1, u_1)$'nun olasılık derecesi

$$V(M_2 \geq M_1) = \sup_{x \geq y}\left[min\left(\mu_{m_1}(x), \mu_{m_2}(y)\right)\right], \quad (2)$$

yukarıda tanımlanmıştır ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$V(M_2 \geq M_1) = hgt(M_1 \cap M_2) = \mu_{m_2}(d)$

$V(M_2 \geq M_1) = 1, m_2 \geq m_1$

$V(M_2 \geq M_1) = 0, l_1 \geq u_2$

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/

$V(M_2 \geq M_1) = hgt\ (M_1 \cap M_2) = \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)}$ diğer koşullar.

d değeri, μ_{m_2} ve μ_{m_1} arasındaki en yüksek kesişme noktasıdır.

Adım 4: Bulanık Matrisler Oluşturma ve Bulanık Ağırlıkları Hesaplama

Bir dışbükey bulanık sayının k dışbükey bulanık sayıdan ($M_i\ (i = 1,2, \ldots., k)$) büyük olma derecesi şu şekilde tanımlanabilir:

$V(M \geq M_1, M_2, \ldots, M_k) = V[(M \geq M_1), \ldots., (M \geq M_k)] = \min V\ (M \geq M_i)$

Daha önce ölçülen olasılık dereceleri,

$d'(A_i) = \min V\ \ (S_i \geq S_k)$ bu şekilde ifade edilirse,

$k = 1,2, \ldots., n,\ k \neq i, W'$ ağırlık vektörü aşağıdaki gibi verilir,

$W' = \left(d'(A_1), d'(A_2), \ldots, d'(A_n)\right)$ T ve burada n elemandan oluşur.

Adım 5: Durulaştırma

Ağırlık vektörü normalize edildikten sonra karar öğelerinin önem düzeyi ortaya çıkar ve aşağıdaki gibi temsil edilir:

$$W = \left(d(A_1), d(A_2), \ldots., d(A_n)\right) \mathrm{T} \quad (3)$$

5. Uygulama

Bu bölümde konteyner limanlarında kullanılan geleneksel istifleme sistemlerinin ortaya çıkardığı darboğazlar incelenmiştir. Bu kapsamda ortaya çıkan darboğazların analizi yapılmış, hangi darboğazların diğerlerine göre ön plana çıktığı ortaya konulmuştur. Geleneksel istifleme sistemlerinden doğan darboğazlar çalışmada görüşüne başvurulan uzmanlarla yapılan ön görüşmeler neticesinde elde edilmiştir. Buna göre ilgili darboğazlar birer kriter olarak ele alınmış ve Tablo 2'de tanımlanmıştır. Ardından ilgili kriterler ikili karşılaştırma yapmaya uygun bir veri toplama aracına yerleştirilmiştir. Bu veri toplama aracı Tablo 3'te profil bilgileri paylaşılan uzmanların görüşüne sunulmuştur. Elde edilen verilen Bulanık AHP yöntemi ile analiz edilmiştir.

Aşağıdaki tabloda çalışma kapsamında görüşüne başvurulan uzmanların yeterlik düzeylerini gösteren bilgiler ve kriterlere dair yaptıkları değerlendirmelerin tutarlılık oranları gösterilmiştir. Buna göre seçilen uzmanların limancılık sektöründe ortalama 19,50 yıllık deneyime sahip oldukları görülmektedir. Her bir uzmanın en az bir departman müdürlüğü yaptığı yine tabloda görülmektedir. Çalışma kapsamında uzman görüşü sunan departman müdürleri ve direktörlerin %42,86'sının lisansüstü eğitim aldıkları belirlenmiştir. Bu durum uzmanların yaptıkları değerlendirmelerin akademik açıdan da analizin geçerlilik düzeyinin artırdığı düşünülmektedir. Ayrıca yapılan ikili karşılaştırmaların tutarlılık oranı 0,10'un altında olmalıdır ki sonuçlar tutarlı olarak analiz edilebilsin. Bu noktada her bir uzmanın yaptığı değerlendirmelerin tutarlılık oranı 0,10 değerinin altında hesaplanmıştır.

5.1. Bulgular

Çalışma kapsamında konteyner limanlarındaki geleneksel istifleme sistemlerinden kaynaklanan darboğazlar belirlenmiş, ilgili darboğazlar birer kriter olarak tanımlanmış, analiz edilerek önceliklendirilmiştir. Tablo 4'te yapılan analiz sonuçları sunulmuştur. Buna göre, çalışmada görüşüne başvurulan uzmanların değerlendirmelerine göre K6 'Ekipman Sınırlamaları' 0,18486 puan ile en

yüksek önceliklendirme değerine sahip olan kriter olmuştur. Onu K3 'Zorunlu idari elleçleme kayıpları' 0,18061 puan ile izlemiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda en düşük öncelik değerine sahip olan kriter, 0,14597 puan ile K4 'İklim şartları' olmuştur.

Tablo 2. Geleneksel İstifleme Sistemlerinden Doğan Darboğazlar

Kod	Kriter Adı	Tanım
K1	Konteyner zati kaldırma kapasite sınırlamaları	Konteyner zati kaldırma kapasitelerinin limitleri nedeni ile üst üste istif kısıtlılığıdır.
K2	Saha inşa kısıtları	Sahanın inşası esnasında zemin yapıları ve kabul edilen kat planları nedeni ile tasarım ve yapım esnasında kabul edilen inşa kriterlerini (Genelde sahalar 6 veya 7 kat istif planı üzerinden inşa edilirler) tanımlar.
K3	Zorunlu idari elleçleme kayıpları	Müşteri (yük iptali, tespit veya fotoğraf çekme vs.), gümrük (tam tespit, numune alma veya kapak açma vs.) veya acente kaynaklı (beyanname problemi, yük iptali, gemi veya tahliye liman değişimi) yapılması zorunlu olan idari hareketlerdir.
K4	İklim şartları	İstif sahasının bulunduğu bölgedeki iklim şartları kaynaklı istif sınırlamalarını tanımlar. Örneğin, yüksek rüzgar hızlarına maruz kalan bir bölgede yüksek istif katlarına çıkılamaz. Aynı zamanda, fırtına ihbarlarında saha istif katlarında indirgemelere gidilmek üzere ya da blokların düzeltilmesi için elleçlemeler yapılır.
K5	Depremler	Depremler ile oluşan yer değişimleri sonucu istif bloklarında devrilmeler oluşabilir.
K6	Ekipman Sınırlamaları	Kullanılan ekipman cinsine göre istif kat sayıları belirlenir. Reach Stacker'lar için normalde 5, RTG ve RMG'ler için 6 veya maksimum 7 kat istife izin verilebilir.

6. Tartışma

Doğal afetler, pandemiler ve savaşlar gibi istenmeyen durumlar gösteriyor ki, lojistik ağlar ne kadar sağlam temeller üzerine inşa edilirse, insanoğlu o kadar güvenli yaşam alanları oluşturabilir ve yaşamlarını rahat bir şekilde sürdürebilirler.

Pandemi (Covid-19) sürecinde ekipmana, bileşenlerine ve yedek parçalarına ulaşımın ne kadar zor olduğu tecrübe edilmiştir. Herhangi bir yaptırım durumunda da operasyonlar benzer şekilde çıkmaza girecektir. Geçmiş olaylar göstermiştir ki, yeri geldiğinde en ufak bir yedek parça tedariğindeki aksama, ekipmanları devre dışı bırakabilmekte, bunun sonucunda da domino taşı etkisi ile tüm zincir etkilenmektedir. Yine limanlarda yaşanan yığılmalar, kapasite sorunlarını ortaya çıkarmış, limanların çalışamaz hale gelmelerine neden olabilmişlerdir. Otonom olmayan yapılarda da personel problemleri oluşmuş, bunun sonucunda da indirgenmiş vardiyalara gidilmiştir. Bu gelişmeler, tedarik zincirlerine önemli darbeler vurmuştur.

Yukarıdaki nedenler kapsamında, lojistik ağların güçlü bir şekilde yönetilebilmesi, ancak, doğru sistem ve ekipman seçimleri ile gerçekleşebilir. Zaten kıt olan alanların efektif bir şekilde kullanılabilmesi için güncel şartlarda en iyi çözüm yüksek katlı istifleme sistemleri (YKS) olarak gözükmektedir. Limanla rdaki

en önemli kıt kaynak olarak alan (saha) kısıtları görülmektedir. Bu kaynakları etkin kullanabilmek adına uygulanabilecek alternatifler olarak kara limanları kullanımı, açık denizde yüzer elleçleme sahaları inşası, yüklerin devinimini hızlandırmak ve dikey depolama sistemleriyle alan genişletmek ön plana çıkmaktadır. Bu noktada limanların şehirlerin içinde kalması sebebiyle var olan alan kısıtlılığı durumunda tüm limanların hinterlant alanına doğru genişlemesi pek mümkün gözükmemektedir. Yine, liman içindeki yük akışını hızlandırmak adına birçok strateji üretilse de (yük çekilmesi için verilen teşvikler gibi) bu akışın hızına etki eden birçok faktör (döviz kuru dalgalanmaları, gemi geliş zamanının aksaması, vb.) bulunmaktadır. Tüm bu gelişmeler değerlen dirildiğinde YKS'nin limanların dikey olarak genişleyerek bu alan kısıtlamalarına en iyi çözüm olduğu düşünülmektedir.

Tablo 3. Seçilen Uzmanların Yeterlik Düzeyleri

Uzman Kodu	Unvanı	Öğrenim Durumu	Mesleki Tecrübesi	Tutarlılık Oranı
Uzman-1	Teknik Departman Direktörü	Ön Lisans	25 yıl	0,0285
Uzman-2	Liman Müdürü	Doktora	20 yıl	0,0334
Uzman-3	Teknik Müdür	Lisans	27 yıl	0,0464
Uzman-4	İş Makineleri ve Bakım Müdürü	Doktora	18 yıl	0,0801
Uzman-5	Dijital Ürünler Müdürü	Lisans	19 yıl	0,0300
Uzman-6	Teknik Hizmetler Müdürü	Lisans	12 yıl	0,0718
Uzman-7	Pazarlama Müdürü	Yüksek Lisans	25 yıl	0,0104
Uzman-8	Operasyon Müdürü	Yüksek Lisans	15 yıl	0,0103
Uzman-9	Teknik Müdür	Yüksek Lisans	17 yıl	0,0733
Uzman-10	Teknik Müdür	Lisans	6 yıl	0,0058
Uzman-11	Ticaret Direktörü	Lisans	15 yıl	0,0120
Uzman-12	Liman Direktörü	Yüksek Lisans	25 yıl	0,0428
Uzman-13	Bakım Onarım Müdürü	Lisans	27 yıl	0,0287
Uzman-14	Gemi Trafik Müdürü	Lisans	22 yıl	0,0291

Tablo 4. Bulanık AHP Analiz Sonuçları

Kriter Kodu	Kriter Adı	En İyi Bulanık Olmayan Performans (BNP)	Öncelik Sıralaması
K1	Konteyner zati kaldırma kapasite sınırlamaları	0,16599	4
K2	Saha inşa kısıtları	0,16626	3
K3	Zorunlu idari elleçleme kayıpları	0,18061	2
K4	İklim şartları	0,14597	6
K5	Depremler	0,15631	5
K6	Ekipman Sınırlamaları	0,18486	1

Bilinen ilk yüksek katlı sistemin uygulandığı Japonya'nın OHİ terminalinde kendi saha kapasitelerine göre yaklaşık olarak %67 daha fazla kapasite kullanım oranı ve operasyonel hızlarda ise, yaklaşık olarak %33 daha yüksek hız elde edildiği bildirilmektedir (JFE Engineering Corporation, 2023). Bu sistemlerde, geleneksel istifleme sistemlerinde yapılması zorunlu idari operasyonel hareketlere gerek kalmamaktadır. YKS sistemleri dar alanda yüksek istif katı ile yüksek kapasiteye ve her konteynere direk erişim kabiliyeti nedenleri ile kapasitelerin tam olarak kullanmasına olanak vermektedir. YKS'lerin rijit yapıları sayesinde insanın çalışma sahalarından çıkarılması ile yüksek operasyonel hızlar elde edilebilmekte ve rahatlıkla otonom sistemler uygulanabilmektedir. Bu avantaj, sistemin her konteynere doğrudan erişim olanağı vermesi kabiliyeti ile elde edilebilmekte ve de böylelikle %100 kapasite kullanım oranına ulaşılabilmektedir. Diğer taraftan, çatısının güneş panelleri ile kaplanması ile yeşil enerji kullanımı sağlanarak enerji üretimleri ve kazanımları elde edilebilmekte ve de karbon emisyon üretimleri azaltılabilmektedir. Böylelik le sistem, yüksek hız ve düşük enerji tüketimleri ile ön plana çıkmıştır (Tokyo Port Terminal Corporation, 2023). Daha sonra, YKS'leri atası sayılabilecek Multilevel Container Warehouse Sistem'e benzer, fakat bazı tasarım farklılıklarına sahip olan diğer bir sistemin ilk prototopi, DP World ve SMS Demag iş birliği ile Dubai Jebel Ali Terminal'inde inşa edilerek 2021 yılında devreye alınmıştır. Boxbay'in bu prototopi, 11 katlı olarak konteyner istiflemesi gerçekleştirebilme ve %75'lere varan alan tasarrufu sağlayabildiği belirtilmektedir. Aynı zamanda, iskele vinçleri verimliliğinde %20 oranına varan bir artış öngörmektedirler (BOXBAY, 2023).

Bu noktada YKS'nin iklim şartlarından etkilenme olasılıklarının düşüklüğü, uygulanabilecek sismik izolatörler ile depremlerden istifleri koruması, dar alanda yüksek istifleme kapasitesi, yüksek operasyonel hızlar sağlaması, tam otonom uygulama kolaylığı, sürdürülebilirlik ve yeşil enerji kullanımına olanak vermesi gibi çeşitli avantajlarıyla geleneksel istifleme sistemlerinin ortaya çıkardığı darboğazların giderilmesi noktasında önemli bir çözüm sunduğu görülmektedir.

7. Sonuç

Konteyner limanları, son yıllarda artan gemi boyutları, gemi trafiğinin özellikle bazı rotalarda yoğunlaşması, konteynerize ürün yelpazesinin günden güne çeşitlenmesi, vb. birçok sebeple kapasite baskısıyla yüzleşmektedir. Var olan kapasiteler bugünün ürün tedariğinde bile aksamalara sebep olurken, gelecekte daha da artacak ihtiyaçlar, gemi boyutları, vb. karşısında limanların operasyonlarının sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir. Bu çalışmada konteyn er limanlarının içsel süreçlerinde kapasite sınırlamalarını tehdit eden durumlar incelenmiş ve geleneksel konteyner istifleme sistemlerinin oluşturduğu darboğazlar analiz edilmiştir. Geleneksel konteyner istifleme sistemleri, liman sahasının etkin kullanılmasını engellemekte, iklim şartlarından kolay etkilenmekte, ekipmanlarla koordinasyonunda kapasiteyi sınırlamakta ve depremler karşısında dayanaksız kalmaktadır. Bunun yerine konteynerler, YKS'lerde yüksekliği 50 metreye kadar çıkabilen on bir katlı bir rafta depolanabilmekte, bu da geleneksel bir konteyner terminalinden yüzde 200 daha fazla kapasite sağlayabilmekte veya aynı kapasiteyi geleneksele göre üçte birinden daha az alan kullanarak sunabilmektedir (Schuler, 2018). Ayrıca hektar başına 3.000 TEU'nun üzerinde alan kullanımı sağlayan YKS, bir RTG'ye kıyasla hektar başına yıllık alan verimini %300'ün üzerinde artırmaktadır (BOXBAY, 2023). Bu çalışma kapsamında geleneksel konteyner istifleme sistemlerinin ortaya çıkardığı bu darboğazların özellikle hangilerinin liman kapasitelerini daha fazla tehdit ettiği analiz edilmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan analiz sonucunda "Ekipman Sınırlamaları" kriterinin ankete katılan taraflar tarafından en önemli kriter olarak ortaya konulması ekipman seçiminin önemini gözler önüne sermektedir. Limanlarda istif kat yüksekliğinin hem maliyet hem de istif güvenliği açısından sınırlandırılması, liman kapasitesini en fazla tehdit eden durum olarak değerlendirilmiştir. Ekipman

sınırlamaları kapsamında liman içerisinde yük istifi yapan araçların kapasitelerinin sınırlı olması sonucu depo kapasitelerinin kısıtlanması ifade edilmektedir. Liman kapasitesini doğrudan etkileyen bu duruma çözüm olarak dikey genişleme veya kara limanı kullanılması önerilebilir. Limanların var olan alan kısıtları düşünüldüğünde kara limanı kullanılmasının çok da mümkün olmadığı söylenebilir. Bu noktada, YKS'lerin çok katmanlı depolama yapabilme kabiliyetleri bu darboğazın çözümünde faydalı olabilecektir. İkinci en büyük öneme sahip olan kriter ise "Zorunlu İdari Elleçleme Kayıpları" olmuş, bu durum da doğrudan ekipman sınırlamaları ile ilişkilidir. Çünkü mevcut geleneksel istifleme sistemlerinde konteynerlere doğrudan erişim kabiliyeti olmaması nedeni ile idari operasyonel elleçlemelerden kaçınılamamaktadır. Zorunlu idari elleçleme kayıplarının azaltılmasının bir yöntemi ise istif yüksekliğinin azaltılmasıdır ki, bu durumun uygulanması ise önemli bir kapasite kaybına neden olacaktır.

Ayrıca yapılan analiz sonucunda tüm kriterlerin birbirine yakın skorlara sahip olması, konteyner limanlarında geleneksel istifleme sistemlerinin birçok yönden ciddi şekilde kapasite sınırlamalarına sebep olduğunu gözler önüne sermektedir. Bu noktada liman sahalarının ve rıhtımların genişletilmesi, limanların yüzer konteyner elleçleme sistemleri ile donatımı, geri saha istifleme sahaları (Off Dock-kara limanı) kullanımı gibi kapasite artırıcı çözümler üretilse de, uzun yıllardır piyasada hizmet veren ve bu sayede kurumsal hafızası güçlü limanlar, artık şehirlerin içinde kalmaları sebebiyle bu çözümlerden tam anlamı ile verimli bir şekilde faydalanamamaktadır. İmkânı olan limanlar için de arazi genişleme çalışmaları birçok bürokratik kısıtla karşılaşmaktadır (Örneğin Pire Limanı). Yine, kara limanı vasıtasıyla kapasite artışı için ayrı bir organizasyon kurulmasını, ana limanla kara limanı arasındaki koordinasyonun sağlanmasını gerektirmekte, bu da ekstra iş yükü, operasyonel zaman kaybı, maliyet olarak dönmektedir. Mega gemilerin etkili bir şekilde elleçlenmesi için önerilen çözümlerden biri de 'Açık Deniz Liman Sistemleri (ADLS)'dir (Kurt vd., 2023). Bu sistem, uzun yıllardır yüksek hacimli kuru yüklerin elleçlenmesinde kullanılsa da, konteyner taşımacılığında mega gemi kullanımının yaygınlaşmasıyla beraber artan tek seferde elleçlenecek yük miktarı, bu sistemi konteyner limanlarının bu kapasiteyi karşılamaları için önemli bir alternatif yapmaktadır (Baird ve Rother 2013). ADLS, daha güvenli bir seyir, boyutsal kısıtlamaları aşacak şekilde gemileri mega gemileri elleçleme kabiliyeti, görece düşük yatırım maliyeti, operasyonel etkinlik ve tasarruf, düşük çevresel etki gibi önemli avantajlar sunmaktadır (Baird ve Rother 2013; Pachakis vd. 2017; Kurt vd. 2021). Kim ve Morrison (2012) sistemi teknik yönden analiz etmiş ve ADLS'nin hızlıca konuşlandırılabilme, sökülme, yeniden konumlandırma ve genişletilebilme; deniz tabanı koşullarından minimum düzeyde etkilenme; temel kazma işleri gerektirmeme; birçok yerde kurulabilme; zemin çökmesi riski taşımama; ve çevre üzerinde düşük bir etkiye sahip olma gibi avantajları olduğundan bahsetmiştir. Öte yandan, ADLS'nin teknik fizibilite, yatırım uygunluğu, uygulanabilirlik ve yapısal güvenlik ve operasyonel sürdürülebilirlik açısından belli zorluklarla karşılaştığı görülmektedir (Kurt vd., 2021). Ayrıca, ADSL hava koşullarına duyarlıdır; şiddetli dalgalardan zarar görebilir; demirleme veya stabilizasyon sistemleri gerektirir; ve kısa ömür döngüleri ve şişirilmiş işletme maliyetleri vardır (Kim ve Morrison, 2012). Bu kapsamda, bu ekipman sınırlamalarını, zorunlu idari elleçleme kayıplarını ve diğer kriterleri elimine edebilecek ve de güncel şartlarda zaten kıt olan alanların efektif bir şekilde kullanılabilmesine olanak sağlayabilecek sistem olarak dar alanda yüksek istif kapasiteleri veren YKS'ler çalışma kapsamında önerilmektedir. Diğer taraftan, YKS'lerin deprem etkileri göz önüne alınarak tasarlanması diğer geleneksel sistemlere göre daha dayanıklı ve daha avantajlı olarak görülmektedir. Çünkü çelik yapıları ve konteynerlerin üst üste istiflenmemesi nedenleri ile istiflerden devrilme olasılıkları çok düşüktür. Ayrıca, sismik izolatörlerin uygulanması ile sistem daha katı bir şekilde depremlere dayanıklı bir yapı oluşturabilecektir. Bunun y anı sıra, elde edilecek yüksek kapasitelerin karşılanması için özellikle tesis giriş ve çıkışlarında trafik akışlarını sağlayacak alt yapılar da bu kapsamda hazır edilmelidir. Aksi takdirde, tesislerin bulunduğu alanlardaki yollarda oluşan trafik,

kapasiteleri kaldıramayacak ve aşırı sıkışıklara neden olarak operasyonların önemli derecede aksamasına neden olabilecektir. Öte yandan, YKS'lerin kullanımı limanlar için ek bir yatırım maliyeti oluşturmakta, üst üste konteyner depolama konusunda yasal mevzuata eklemeler yapılması gerekliliğini doğurmaktadır. Bu gibi dezavantajlı durumları elimine edebilmek ve gelecekteki muhtemel yüksek kapasiteleri karşılamak adına politikaların uyumlaştırılması oldukça önemlidir.

Çalışma teorik olarak konteyner limanlarının kapasite problemlerine kaynak temelli yaklaşımı getirmiştir. Bu bağlamda limanların kendi kaynaklarını daha efektif kullanarak kapasite problemini çözmeleri doğrultusunda ilgili literatüre katkı sağlanmıştır. Ça lışmanın uygulama noktasındaki katkıları ise iki yönlüdür. İlk olarak, limanlarda geleneksel konteyner istifleme sistemlerinin ortaya çıkardığı darboğazlardan kapasiteyi en fazla tehdit eden unsurlara dikkat çekilmiş, böylece uygulamaya dönük olarak doğru ekipman kullanımının önemi vurgulanmıştır. İkinci olarak ise, geleneksel istifleme sistemlerine alternatif üretilmiş ve YKS'nin konteyner liman kapasite kullanımına yapacağı katkı tartışılmıştır. Uygulamanın Türkiye limanlarının yöneticileriyle yürütülmesi ve verilerin 2023 Maraş depremleri sonrasında toplanması, çalışmanın kısıtları olarak gösterilebilir. Gelecek çalışmalar için, ilgili kriterler detaylı literatür taramasıyla artırılabilir, bu kriterler farklı ÇKKV yöntemlerinden biriyle analiz edilebilir.

Referanslar

Akar, O. And Esmer, S. (2015). Cargo Demand Analysis of Container Terminals in Turkey. Journal of ETA Maritime Science, 3 (2), 117-122.

Alexandri, I. O., Yuan, M., Zhou, C., ve Xue, L. (2022). Efficiency Analysis of a High-bay Container Storage System–BoxBay. Paper Presented in IEEE 18th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Mexico City, Mexico, August 20-24, 2022.

Baird, A. J. (2002). The economics of container transhipment in Northern Europe. International Journal of Maritime Economics, 4(3), 249-280.
Balcı, G., Cetin, I. B., ve Esmer, S. (2018). An evaluation of competition and selection criteria between dry bulk terminals in Izmir. Journal of Transport Geo graphy, 69, 294-304.

Barney, J. (1991). Firm resources and sustained competitive advantage. Journal of Man agement 17 (1), 99–120.

Baştuğ, S., Haralambides, H., Esmer, S., ve Eminoğlu, E. (2022). Port competitiveness: Do container terminal operators and liner shipping companies see eye to eye?. Marine Policy, 135, 104866.

BOXBAY (2023). High Bay Storage System, https://www.boxbay.com/boxbay -high-bay-storage [Çevrimiçi] [Erişim Tarihi: 02.04.2023]

Bozhilov, N. (2021). The Potential Power Struggle Behind Logistics Electrification, The Logistics Point, http://www.thelogisticspoint.com/2021/02/15/the-potential-power-struggle-behind-logistics-electrification/[Çevrimiçi] [Erişim Tarihi: 30.05.2023]

Buckley, J. J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. Fuzzy sets and systems, 17(3), 233-247.

Çelik, E. ve Akyuz, E. (2018). An interval type-2 fuzzy AHP and TOPSIS methods for decision-making problems in maritime transportation engineering: the case of ship loader. Ocean engineering, 155, 371-381.

Cho, H. ve Kim, S. (2015). Examining container port resources and environments to enhance competitiveness: a cross-country study from resource-based and institutional perspectives. The Asian journal of shipping and logistics, 31(3), 341-362.

Cho, H. ve Ha, Y. (2009). Determinants of FDI inflow in regional port with resource-based view and institutional theory: a case of Pohang-Yeongil port. The Asian journal of shipping and logistics, 25(2), 305-331.

Demirel, H., Balın, A., Çelik, E., ve Alarçin, F. (2018). A fuzzy AHP and ELECTRE method for selecting stabilizing device in ship industry. Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike, 69(3), 61-77.

Gordon, J. R., Lee, P. M., ve Lucas Jr, H. C. (2005). A resource-based view of competitive advantage at the Port of Singapore. The Journal of Strategic Information Systems, 14(1), 69-86.

Gümüş, A. T., Yayla, A. Y., Çelik, E., ve Yildiz, A. (2013). A combined fuzzy-AHP and fuzzy-GRA methodology for hydrogen energy storage method selection in Turkey. Energies, 6(6), 3017-3032.

JFE Engineering Corporation (2023). Container Hangar, chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.tptc.co.jp/cms/corporate/file/file2015/ContainerHangar.pdf. [Erişim Tarihi: 18.07.2023].

Kim, A. R., Lee, S. W., ve Seo, Y. J. (2022). How to control and manage vessels' ballast water: The perspective of Korean shipping companies. Marine Policy, 138, 105007.

Kim, J., & Morrison, J. R. (2012). Offshore port service concepts: classification and economic feasibility. Flexible Services and Manufacturing Journal, 24, 214-245.

Koroleva, E., Sokolov, S., Makashina, I., ve Filatova, E. (2020). Digital maritime container terminal-An element of digitalization of container transportation systems. Paper presented in E3S Web of Conferences, Blagoveshchensk, Russia, September 23-24, 2020.

Kurt, I., Aymelek, M., Boulougouris, E., & Turan, O. (2021). Operational cost analysis for a container shipping network integrated with offshore container port system: A case study on the West Coast of North America. Marine Policy, 126, 104400.

Kurt, I., Boulougouris, E., & Pachakis, D. (2023). Comparative technical-economic evaluation of offshore container port systems. Ships and Offshore Structures, 1-13.

Li, K. X., Lin, K. C., Jin, M., Yuen, K. F., Yang, Z., ve Xiao, Y. (2020). Impact of the belt and road initiative on commercial maritime power. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 135, 160-167.

Lirn, T. C., Thanopoulou, H. A., Beynon, M. J., ve Beresford, A. K. (2015). An application of AHP on transhipment port selection: a global perspective. Port Management, 314-338.

Magala, M. (2008). Modelling opportunity capture: a framework for port growth. Maritime Policy & Management, 35(3), 285-311.

Mollaoğlu, M., Bucak, U., ve Demirel, H. (2019). A quantitative analysis of the factors that may cause occupational accidents at ports. Journal of ETA Maritime Science, 7(4), 294-303.

Nazemzadeh, M., ve Vanelslander, T. (2015). The container transport system: Selection criteria and business attractiveness for North-European ports. Maritime Economics & Logistics, 17(2), 221-245.

Pachakis, D., Libardo, A., & Menegazzo, P. (2017). The Venice offshore-onshore terminal concept. Case studies on transport policy, 5(2), 367-379.

Robinson, R. (2002). Ports as elements in value-driven chain systems: the new paradigm. Maritime Policy & Management, 29(3), 241-255.

Schuler (2018). High Bay Storage System Could 'Revolutionize' Container Handling in Ports, https://gcaptain.com/high-bay-storage-system-could-revolutionize-container-handling-in-ports/. [Erişim Tarihi: 30.05.2023]

Subhan, M., Bashawir, A. ve Ghani A. (2008). Analyzing growth opportunity of port from the resource-based perspective. Gadjah Mada International Journal of Business, 10(3), 353-373.

Tseng, P. H., ve Cullinane, K. (2018). Key criteria influencing the choice of Arctic shipping: a fuzzy analytic hierarchy process model. Maritime Policy & Management, 45(4), 422-438.

TÜRKLİM (2022). Türkiye Limancılık Sektörü 2022 Raporu: Vizyon 2050. TÜRKLİM Yayınları: İstanbul.

Tokyo Port Terminal Corporation (2023). Enhancements of Terminal Functions (Development of innovative Container Hanger at Ohi Container Terminal No6), https://www.tptc.co.jp/cms/corporate/file/file2015/ContainerHangar.pdf [Çevrimiçi] [Erişim Tarihi: 02.04.2023]

Zaerpour, N., Gharehgozli, A., ve De Koster, R. (2019). Vertical expansion: A solution for future container terminals. Transportation Science, 5 3(5), 1235-1251.

Gemi ve Deniz Teknolojisi
Sayı: 223, Haziran 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

Denizaltı Gövdesinden Türetilen Bir Formun Boyutsuz Hidrodinamik Katsayılarının Belirlenmesi

Gökhan BUDAK

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

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

ÖZET

Bir deniz aracının gövde formu, bir veya birden fazla amaç için optimize edilebilir. Özellikle geminin akışkan kaynaklı direnç değerinin azaltılması amacıyla en uygun formu elde etmek temel amaçlardan biridir. Çünkü, enerji verimliliği söz konusu olduğunda, geminin formunu direnç açısından optimize etmek, daha az yakıt tüketimi anlamına gelmektedir. Bu amaçla daha önceki çalışmada yalın bir denizaltı formu ve bu denizaltının baş ve kıç formlarında çeşitli değişiklikler yapılarak elde edilen yeni denizaltı formları kıyaslanmıştı. Fakat, direnç açısından optimize edilen formun deniz aracındaki diğer dinamiklere etkisinin de araştırılması gerektiği düşünülmektedir. Bu sebeple, önceki çalışmada türetilen formlar arasında direnç açısından en uygun form ile denizaltı modeli farklı yazılım programları kullanıldığı için manevra açısından bir değerlendirme yapılması düşünülmüştür. Fakat önceki çalışmada hesaplamalar için kullanılan program bu çalışmadan kullanılan programdan farklı olduğu için ilgili denizaltı formlarının boyutsuz direnç katsayıları bu çalışmada tekrar elde edilmiştir. Çeşitli hızlar için elde edilen bu boyutsuz direnç katsayıları birbirleriyle ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın ana amacı manevra açısından denizaltı formlarını kıyaslamak olduğu için çeşitli baş açıları için kuvvet ve moment değerleri elde edilmiştir. Böylece elde edilen değerlerden faydalanılarak her iki denizaltı yalın formuna ait Y_v', Y_{vvv}', N_v' ve N_{vvv}' boyutsuz hidrodinamik katsayıları hesaplanmıştır. Böylece hem denizaltı yalın gövdesinin hem de bu denizaltından türetilmiş yeni formun manevra açısından değerlendirilebilmesi mümkün olacaktır.

Anahtar kelimeler: Darpa Suboff, Manevra, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), Statik sürüklenme

Makale geçmişi: Geliş 01/06/2023 – Kabul 18/06/2023

https://doi.org/10.54926/gdt. 1308809

GMO Journal of Ship and Marine Technology
Issue: 223, June 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Journal homepage: http://www.gmoshipmar.org/
Research Article

Non-dimensional Hydrodynamic Coefficients Determination of a Derived-Submarine Bare Hull Form

Gökhan BUDAK

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

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

ABSTRACT

The hull of the marine vehicle can be optimized based on the target one or more purposes. One of the most frequent purposes is the form optimization to obtain the most suitable form in terms of resistance. When it comes to energy efficiency, optimizing the vessel's form in terms of resistance means less fuel consumption. However, it is thought that the effect of the optimized form on other dynamics in the marine vehicle should also be investigated. Resistance coefficients were obtained for this purpose by constructing various bow and stern forms for a simple submarine form. The resistance coefficients of both the submarine and the form derived from this submarine were validated again in this study since different software programs were used in the previous study. These dimensionless resistance coefficients obtained for various velocities were compared to each other and the experimental data. Furthermore, the static drift analyses are performed to obtain the sway force and yaw moment at various attack angles. The dimensionless hydrodynamic coefficients, such as Y_v' and N_v', have been calculated with fitting a curve to the values of sway forces and yaw moments. The non-dimensional hydrodynamic coefficients differences calculated for the submarine and derived bare hull are close to each other when compared in terms of maneuvering derivatives.

Keywords: DARPA Suboff, Sway force, Yaw moment, Maneuvering derivatives, Static drift.

Article history: Received 01/06/2023 – Accepted 18/06/2023

1. Introduction

Obtaining a suitable hull form in terms of less resistance is one of the most important parameters while designing marine vehicles. For this reason, the created suitable form in terms of resistance during the design directly affects the needed amounts of fuel to reach the desired speed. Since the lower the resistance of the marine vessel, the higher speeds can be achieved depending on the thrust force. For this purpose, in some ships, such as planing hulls, it is tried to obtain forms that will create minimum resistance in order for the ship to reach the desired high speeds. One of the goals is to reduce the wetted area while optimizing the form to reduce resistance, especially in planing hulls. However, it is not possible to reduce the wetted area in commercial ships, such as tankers, container ships, and planing hulls due to the decrease in the usage area. For this reason, to reach the desired cruise speed thanks to the current thrust force, forms that increase the resistance for bare hull are avoided.

Since the wetted area of a submarine could not be changed in fully submerged condition, the resistance value only changes with the speed of submarine. However, the resistance value for the surface vessel depends on both the wetted area of the submerged part and the speed of surface vehicles. As a result, it is even more important to design the form so that it does not disrupt the flow, thereby reducing resistance.

It is the most dependable method for developing models and conducting resistance experiment for each form. However, in terms of time and cost, it is not preferable to create a model of all forms and conduct experiments on these forms. For this reason, Computational Fluid Dynamics (CFD) method may be selected to calculate the resistance and/or self-propulsion of the marine vessel due to the obtaining the faster results and less expensive. For example, the resistance and self-propulsion analyses of the DARPA Suboff with propeller were performed using CFD, considering the propeller-hull interaction (Sezen et al., 2018). Similarly, a numerical study of the resistance and self-propulsion performances of the DARPA Suboff hull was studied under various conditions using CFD (Lungu, 2022). Another study, the resistance and self-propulsion parameters of the container ship model were obtained using CFD and compared to available experimental data (Lungu, 2020). In addition to these studies, different methods based on CFD approach can be chosen to determine the resistance and self-propulsion characteristics of a marine vessel (Delen et al., 2021).

The first experimental data of DARPA Suboff submarine is provided in the literature by Roddy (1990). This study includes not only static drift tests but also Planar Motion Mechanism (PMM) tests for various DARPA Suboff forms, such as bare hull, bare hull with sail, fully appended etc. Later, researchers made various experiments based on original DARPA Suboff form. For example, Lin et al. (2018) used a half-scale of DARPA Suboff form including various types, such as bare hull, bare hull with sail etc., in the experiments to determine the maneuvering derivatives. Other researchers, Efremov, and Milanov (2019) carried out experiments for DARPA Suboff form with various sailing conditions to investigate its course stability and hydrodynamic derivatives. In addition to the experimental studies, the CFD method is usually preferred by researchers to investigate the maneuvering derivatives. The maneuvering derivatives of DARPA Suboff submarine were obtained using the CFD method and compared to available experiment results (Duman et al.2018). CFD method was also used to get information about the scale effect on resistance and propulsion (Sezen et al., 2021; Dogrul, 2022), the horizontal maneuvering derivatives (Kahramanoglu, 2023), and the performance of propulsion (Kinaci et al. 2018). Other studies, obtaining the effect of the forward speed of a ship on the side translation and yaw moment are measured using CFD method (Kahramanoglu, 2021), and the turning and course-keeping abilities are evaluated for a submarine using direct CFD method (Delen and Kinaci, 2023).

The purpose of this research is to compare the newly derived form to the DARPA Suboff bare hull in terms of maneuverability. In the previous study, the dimensionless resistance coefficients of derived form at different speeds were obtained, and it was emphasized that it was a more suitable form than the DARPA Suboff form. However, the verification and validation studies are necessary in this study since the mesh structure and domain are created in a different program than in the previous study. The resistance coefficients were obtained for different speeds to validate the mesh structure and calculations because of this requirement. After the validation of the generated domain was shown, and thus sway force and yaw moment are calculated using static drift analyses performed same computational domain to determine the maneuvering derivatives. As a result, dimensionless hydrodynamic coefficients were determined for the obtained force and moment values using CFD method, and both forms were evaluated in terms of maneuvering.

2. Numerical Modelling

Since the simulations performed in the present study is time independent, the flow was assumed as steady in all numerical analyses. In addition to this, the flow around the submarine was presumed as 3D, fully turbulent, and incompressible. To model the fully turbulent model, k-epsilon turbulence model was selected. Similar to the relevant studies in the literature (Marshallsay and Erikksson, 2012; Kahramanoglu, 2023), the governing equations was conservation of momentum (RANS) and conservation of mass (continuity). The detailed information about the physical modelling and turbulence model can be investigated in the study (Wilcox, 2016).

2.1. Geometric Description

DARPA Suboff bare hull and different bow and stern form derived from its form, namely Form 13, were obtained, and evaluated in terms of the resistance for various velocities in previous study (Budak and Beji, 2016). The basic dimensions of the DARPA Suboff bare hull and Form 13 are given in Table 1.

Table 1. The main dimensions of DARPA Suboff

Main Dimension		DARPA Suboff	Form 13
Length Overall	L_{OA} **(m)**	4.356	4.356
Diameter	***D*** **(m)**	0.508	0.508
Wetted Area	***S*** **(m^2)**	5.98	6.036
Longitudinal Center of Gravity	***LCG*** **(m)**	0.169	0.166

The geometries for DARPA Suboff bare hull and Form 13 are shown in Figure 1. The overall length (L_{OA}) and the maximum diameter (D) are the same for DARPA Suboff bare hull and Form 13. Although the wetted area of DARPA Suboff bare hull is 5.98 m^2, Form 13 has 6.036 m^2 wetted area. Moreover, the longitudinal center of gravity of Form 13 is 0.166 m.

2.2. Computational Domain and Boundary Conditions

A rectangular computational domain was created in viscous based solver to investigate the hydrodynamic characteristics of DARPA Suboff and Form 13. The domain extended 1.5 L_{OA} in front of the submarine, 5.0 L_{OA} behind the submarine, 5.0 L_{OA} between left side and right side of the submarine. The depth of the computational domain was determined as 5.0 L_{OA}. The details can be

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

seen in Figure 2. Since the flow passed through the computational domain in negative x direction, the right side of the computational domain was selected as velocity inlet while the left side of it was pressure outlet. All other boundaries, such as bottom, top etc., were selected as velocity inlet. The submarine forms were selected as no-slip wall to satisfy the kinematic boundary condition.

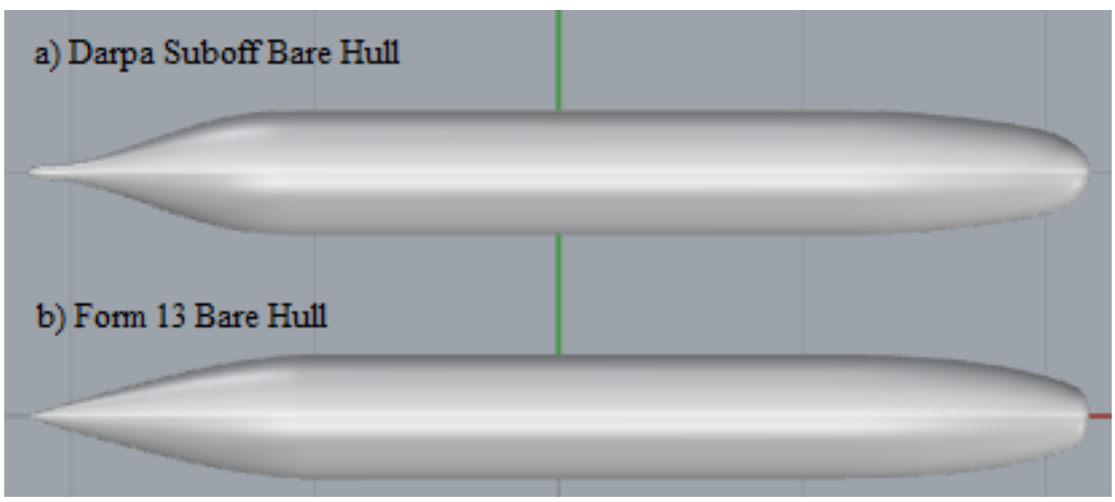


Figure 1. The geometries a) DARPA Suboff Bare Hull, b) Form 13 Bare Hull

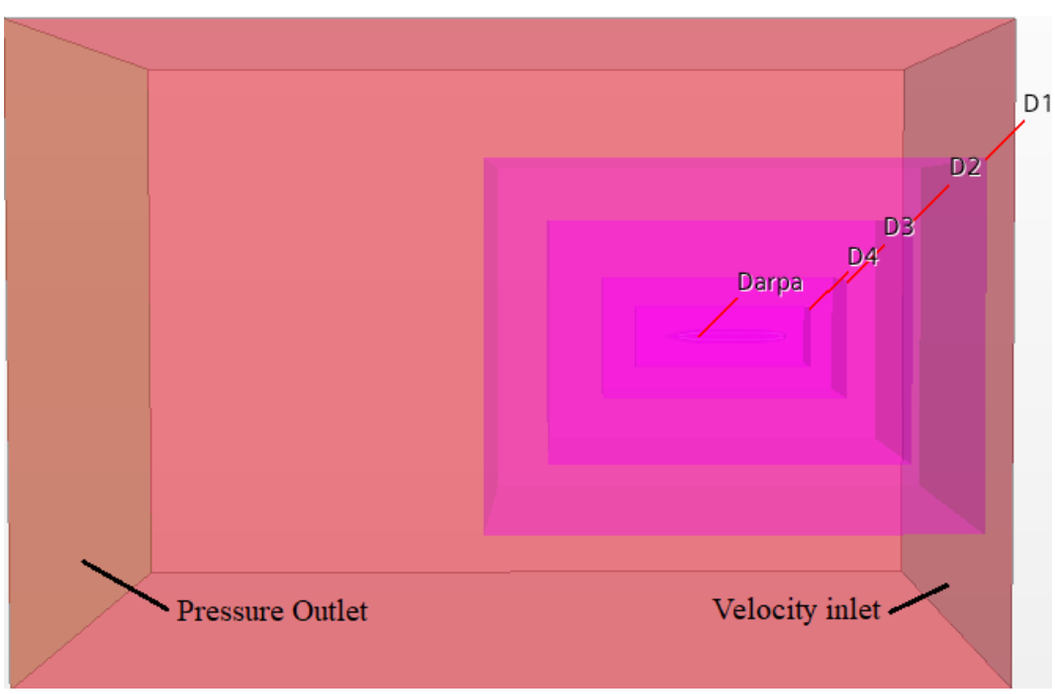


Figure 2. The determined computational domain

2.3. Grid Structure and Physical Modelling

The computational domain was divided into small cells by using hexahedral elements. The grid structure was refined towards the submarine forms while it was enlarged in far zone to reduce the computational time. The grid structure used in the present study can be seen in Figure 3.

GMO Journal of Ship and Marine Technology
Issue: 223, June 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Journal homepage: http://www.gmoshipmar.org/
Research Article

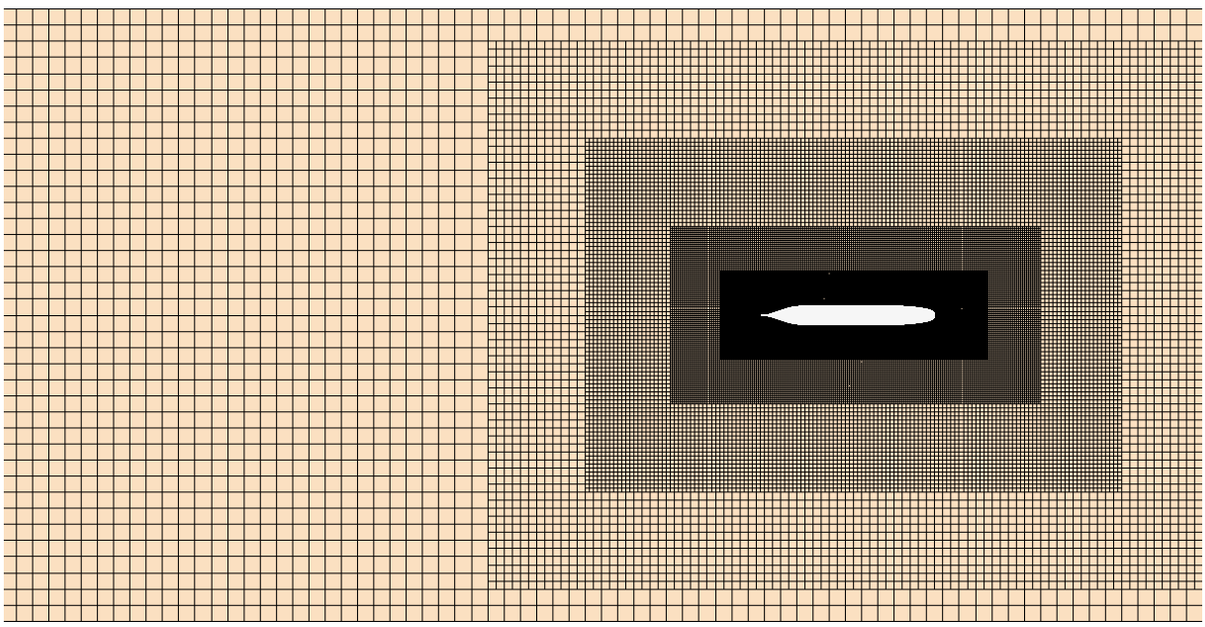


Figure 3. The transition of mesh structure around the geometry

The views of mesh structures shown both near and on geometry are given in Figure 4.

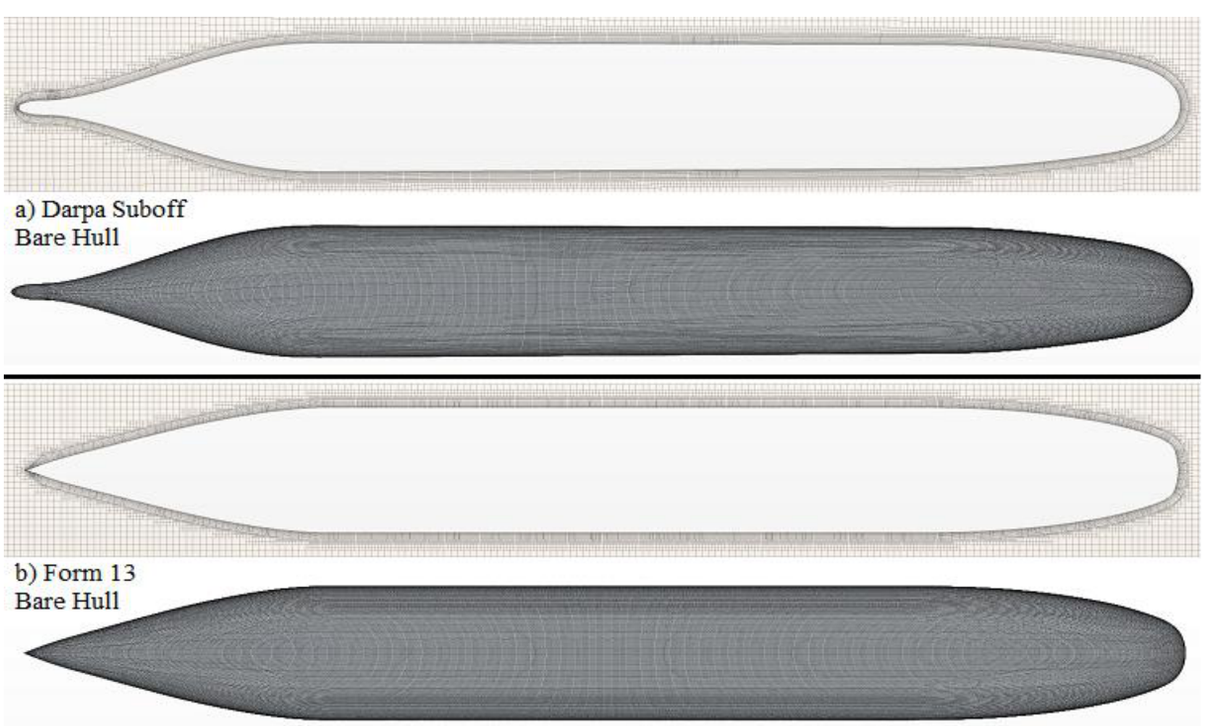


Figure 4. The view of mesh structures at y=0, a) DARPA Suboff Bare Hull, b) Form 13 Bare Hull

3. Results

In this study, Form 13, which is a more suitable form with a lower resistance coe cient, was evaluated in terms of maneuver. In order to reach this aim, the first part of the study is the towing tank analyses of DARPA Suboff bare hull, and the results were compared with the available experimental data. The

second part of this study is the oblique towing tank simulations conducted both for DARPA Suboff and Form 13 and the results were compared with each other.

3.1. Verification and Validation

In the previous study, the resistance values for various velocities of submarine were validated for the DARPA Suboff bare hull. However, since a different software program was used in this study, it was thought that the verification and validation studies should be done again. The computational analyses for three different element numbers, namely coarse, medium, and fine, have been performed for a selected velocity to verify the mesh structure. The methodology presented by Celik et al. (2008) was followed to implement Grid Converge Index (GCI) method based on Richardson Extrapolation (1910) for the verification study. The element numbers of the mesh structure created for the defined computational domain are given in Table 2. The converged resistance value depending on the element numbers is given in Figure 5.

Table 2. The element numbers in computational domain.

	Element Number
Coarse	1.33×10^5
Medium	2.66×10^5
Fine	6.51×10^5

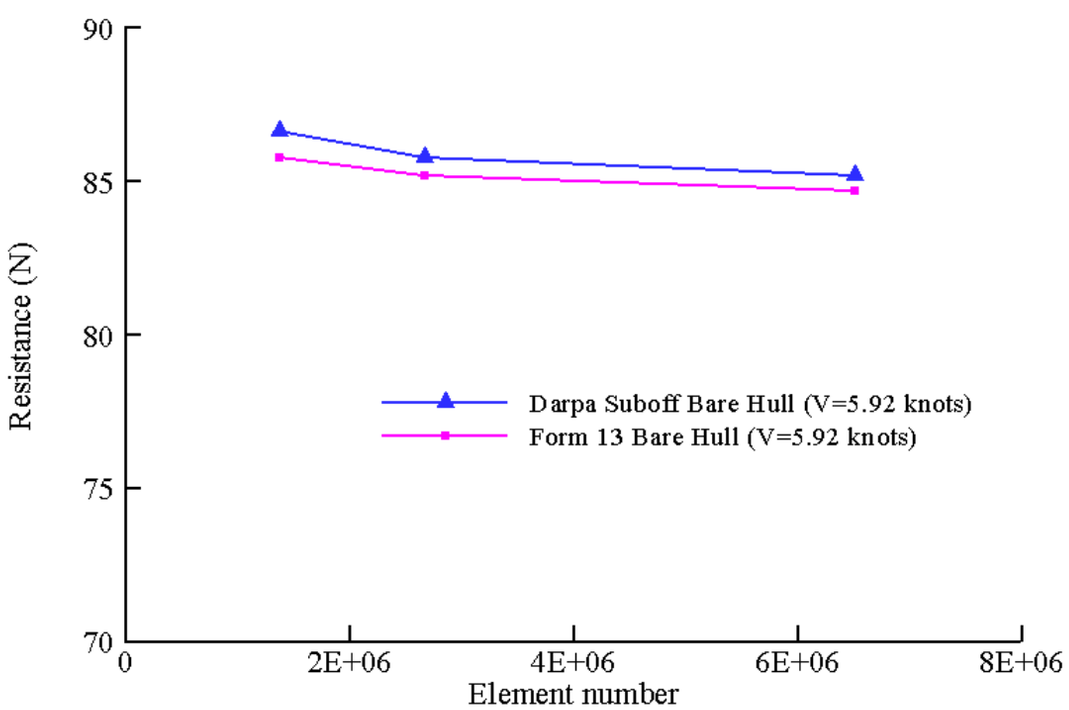


Figure 5. The results of the total resistance depending on element number

The uncertainty values in terms of resistance for DARPA Suboff bare hull and Form 13 bare hull are presented in Table 3. The differences between experimental data and CFD result for Fine mesh structure is 2.54 %. According to the Table 3, the grid spacing has monotonic convergence regime

(0<R<1) and the uncertainty values are within acceptable levels. The parameters, r: refinement factor; R: the convergence factor; p: apparent order; U%: uncertainty value.

Table 3. Uncertainty assessment

		DARPA Suboff	Form 13
Total Resistance (N)	**Fine**	85.18	84.68
	Medium	85.76	85.17
	Course	86.61	85.78
	EFD	87.40	-
The parameters	**r**	1.414	1.414
	p	1.107	0.617
	R	0.682	0.807
	U %	1.831	3.059

3.2. Resistance Results

The first part of this study includes the calculation of the resistance values of a submarine for various speeds using Computational Fluid Dynamics (CFD) method. The experimental resistance value at each known speed and the obtained resistance value are given in Table 4. When the experimental and CFD results are compared, the errors for the low and high velocity values are lower than the errors obtained for the other velocity values.

Second part of this study, the dimensionless resistance coefficients obtained for the DARPA Suboff bare hull were calculated using $R_T = \frac{1}{2} C_T \rho S V^2$ equation. Where, ρ is the density of water, S is the wetted area of submarine hull, V is the velocity of submarine. Similarly, the dimensionless coefficients of Form 13 bare hull were calculated for various velocities using both same computational domain and same mesh structure used for DARPA Suboff bare hull resistance analyses. The dimensionless resistance coefficients obtained for each velocity value are given in Table 5. Additionally, these dimensionless resistance coefficients depending on velocity of submarine is shown in Figure 6. According to the Figure 6, the resistance coefficients obtained using the CFD method for the proposed form at each velocity are lower than the resistance coefficients of DARPA Suboff bare hull.

Table 4. The comparison of resistance values for DARPA Suboff bare hull

Velocity (knots)	**Resistance (N)**		**Error (%)**
	Exp.	**CFD**	
5.92	87.4	85.18	2.54
10.00	242.2	227.04	6.26
11.84	332.9	311.41	6.46
13.92	451.5	421.55	6.63
16.00	576.9	547.06	5.17
17.99	697.0	681.27	2.26

3.3. Oblique Towing Tank Simulations

The values of sway forces and yaw moments obtained for various drift angle at V=6.5 knots using CFD method and available experimental results for DARPA Suboff bare hull are given in Table 6. The

differences of sway forces values between EFD and CFD results of DARPA Suboff bare hull are higher than differences of the longitudinal forces and yaw moments.

Table 5. The dimensionless resistance coefficients for DARPA Suboff and Form 13.

V (knots)	DARPA Suboff C_T *10^3 (EFD)	DARPA Suboff C_T *10^3 (CFD)	Form 13 C_T *10^3 (CFD)
5.92	3.161	3.081	3.035
10.00	3.070	2.878	2.837
11.84	3.011	2.816	2.776
13.92	2.954	2.758	2.719
16.00	2.857	2.709	2.672
17.99	2.730	2.669	2.632

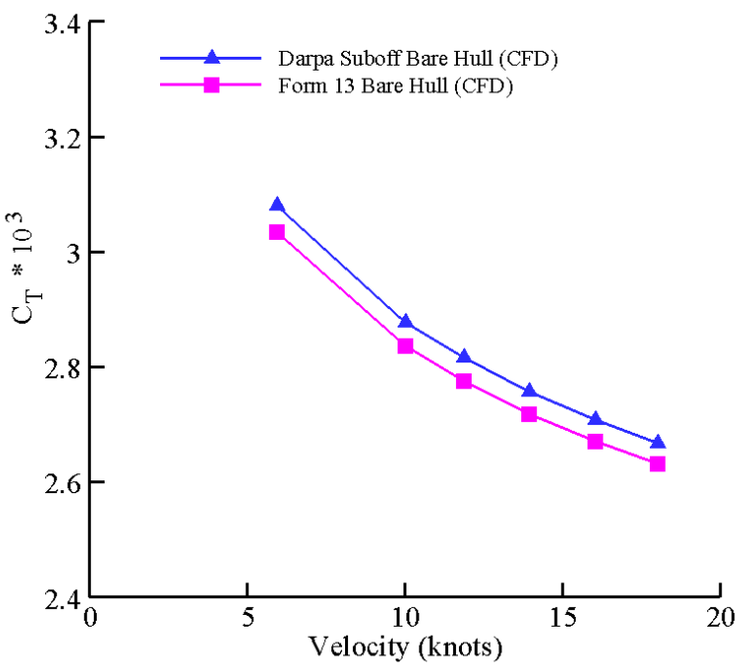


Figure 6. Non-dimensional resistance coefficient versus velocity.

Table 6. The comparison between experimental data and CFD results at V=6.5 knots.

Drift	Darpa Suboff Bare Hull (EFD)			Darpa Suboff Bare Hull (CFD)		
Angle	Long.	Sway	Yaw	Long.	Sway	Yaw
β (°)	Force (N)	Force (N)	Moment (Nm)	Force (N)	Force (N)	Moment (Nm)
4.07	-107.47	45.43	429.81	-101.77	47.46	417.51
6.03	-107.26	89.74	597.74	-102.08	80.50	591.88
8.00	-108.28	155.58	737.14	-102.43	125.90	758.10
10.05	-106.25	248.15	866.62	-102.15	190.31	940.11
12.03	-100.68	350.65	977.97	-99.85	268.06	1080.77
13.94	-92.56	464.50	1083.70	-95.01	351.32	1213.00

The sway forces and yaw moments results for FORM 13 bare hull were obtained using same computational domain to compare the DARPA Suboff bare hull in terms of maneuvers. The results of CFD analyses are presented in Table 7.

Table 7. The forces and moments for Form 13 bare hull.

	Form 13 Bare Hull (CFD)		
Drift Angle β (°)	**Longitudinal Force (N)**	**Sway Force (N)**	**Yaw Moment (Nm)**
4.07	-101.18	49.63	417.10
6.03	-101.46	83.51	604.89
8.00	-101.73	129.42	779.11
10.05	-101.28	193.36	942.21
12.03	-98.77	270.16	1085.61
13.94	-93.84	353.12	1219.87

When the results obtained with the CFD method for both bare hulls, Darpa Suboff and Form 13, are compared with each other, it is seen that there are small differences in both sway force and yaw moment values.

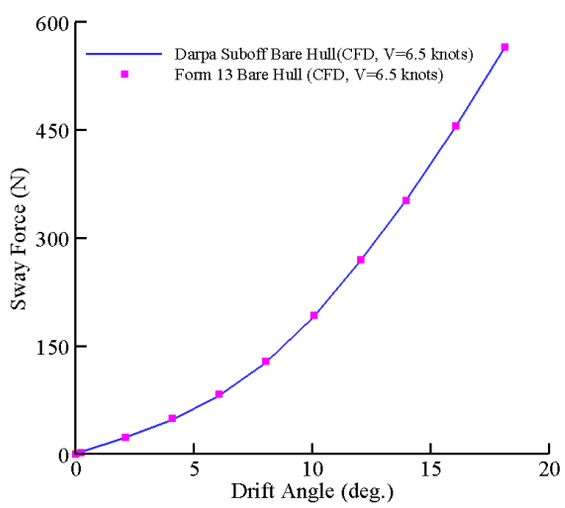


Figure 7. The comparison of the obtained sway forces.

The hydrodynamic derivatives of DARPA Suboff bare hull and Form 13 bare hull are calculated using Equation 1.

$$Y = Y_v v + Y_{vvv} v^3 \qquad (1)$$
$$N = N_v v + N_{vvv} v^3$$

where, v is the sway velocity.

The dimensional coefficients given in Equation 1 are converted to non-dimensional coefficients by the use of conversion factors given in Table 8.

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

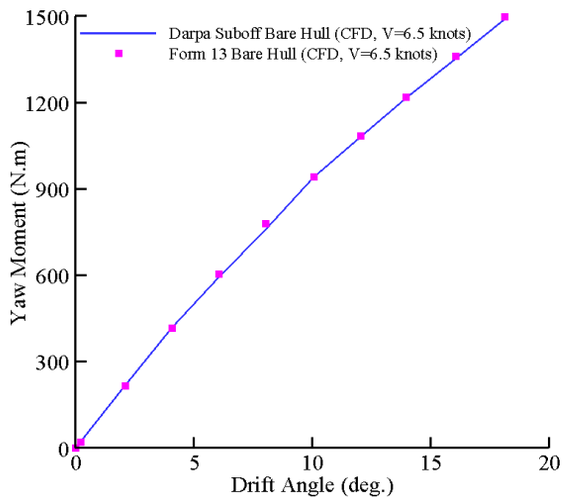


Figure 8. The comparison of the obtained yaw moments.

Table 8. Non-dimensioning factors.

Y	$1/2\rho L^2V^2$
N	$1/2\rho L^3V^2$
v	V

The non-dimensional hydrodynamic coefficients have been obtained by fitting a polynomial curve to the graphs of sway force and yaw moment, shown in Figure 7, and Figure 8, respectively. The details of how these dimensionless hydrodynamic coefficients are calculated can be found in the thesis of Yoon, H. (2009). The comparison of the non-dimensional hydrodynamic coefficients between experimental data found in the study of Roddy (1990) and the obtained results are given in Table 9.

Table 9. The non-dimensional hydrodynamic coefficents.

	Darpa Suboff EFD.	**Darpa Suboff CFD**	**Form 13 CFD**
Y'_v	-0.0059	-0.0073	-0.0075
Y'_{vvv}	-	-0.1138	-0.1120
N'_v	-0.0127	-0.0131	-0.0132
N'_{vvv}	-	0.0215	0.0226

4. Conclusion

The form, namely Form 13, including the most suitable bow and stern forms derived from DARPA Suboff bare hull in terms of resistance was proposed in the previous study. This form, which has the lowest resistance coefficient compared to the original submarine hull, is also considered to be evaluated in terms of maneuvering. Firstly, the created computational domain and mesh structure were verified to analyse the resistance of two forms, DARPA Suboff and Form 13. Secondly, resistance values were obtained for different velocities with the verified mesh structure and these results were compared with

the available experimental results to validate the obtained results from analyses. Sway forces and yaw moments were measured for various drift angles to get information about the DARPA Suboff bare hull and Form 13 in terms of maneuvering. According to obtained results, sway force value for Form 13 at small angles (β≤10°) has an average of 3.48% higher compared to DARPA Suboff bare hull. However, this ratio at large angles (β>10°) is 0.53%. In addition, when the drift angle value increases, the sway force difference between the two models decreases. Similarly, the yaw moment difference at large drift angle is lower when compared to difference at small angles. Within the scope of this study, the results obtained at V=6.5 knots are considered the first step to obtaining the dimensionless hydrodynamic coefficients. Minor differences are observed between the maneuvering derivatives measured according to the sway force and yaw moment obtained for DARPA Suboff bare hull and Form13 bare hull. In this case, the more suitable Form 13 in terms of resistance may be preferred, but a more accurate interpretation can be made after other maneuvering derivatives are determined. For this reason, other dimensionless hydrodynamic coefficients may be obtained to evaluate the maneuvering performance of Form 13 in future studies.

References

Budak,G. and Beji, S., 2016. Computational Resistance Analyses of a Generic Submarine Hull Form and Its Geometric Variants. *Journal of Ocean Technology* 11 (2), 2016.

Celik, I.B., Ghia, U., Roache, P.J., Freitas, C.J., Coleman, H., Raad P.E., 2008. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. J. Fluid Eng., 130 (7) (2008), pp. 78001-78004, 10.1115/1.2960953.

Delen, C., Can, U. and Bal, S., 2021. Prediction of Resistance and Self-Propulsion Characteristics of a Full-Scale Naval Ship by CFD-Based GEOSIM Method. *Journal of Ship Research*. 65. 346-361.

Delen, C. and Kinaci, O. K., 2023. Direct CFD simulations of standard maneuvering tests for DARPA Suboff. *Ocean Engineering*, Volume 276, 114202.

Dogrul, A., 2022. Numerical prediction of scale effects on the propulsion performance of Joubert BB2 submarine. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike,* 73(2), 17-42. https://doi.org/10.21278/brod73202.

Duman, S., Sezen, S. and Bal, S., 2018. Propeller Effects on Maneuvering of a Submerged Body. 3rd International Meeting - Progress in Propeller Cavitation and its Consequences: *Experimental and Computational Methods for Predictions* 15th – 16th November 2018, Istanbul, Turkey.

Efremov, D.V., Milanov, E.M., 2019. Hydrodynamics of DARPA SUBOFF submarine at shallowly immersion conditions. *The Int. J. Marine Navigat. Safety Sea Transport*, 13 (2), 337–342.

Kahramanoglu, E., 2021. The Effect of Forward Speed on Sway Force and Yaw Moment for Planing Hulls. *GMO Journal of Ship and Marine Technology*, Volume 220, December 2021.

Kahramanoglu, E., 2023. Numerical investigation of the scale effect on the horizontal maneuvering derivatives of an underwater vehicle. *Ocean Engineering*, Volume 272, 113883.

Kinaci, O. K., Gokce, M. K., Alkan, A. D., Kukner, A., 2018. On Self-Propulsion Assessment of Marine Vehicles. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, 69(4), 29–51. https://doi.org/10.21278/brod69403.

Lin, Y.H., Tseng, S.H., Chen, Y.H., 2018. The experimental study on maneuvering derivatives of a submerged body SUBOFF by implementing the Planar Motion Mechanism tests. *Ocean Eng*., 170, 120–135.

Lungu, A., 2020. Numerical Simulation of the Resistance and Self-Populsion Model Tests. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 142(2):1-37, DOI: 10.1115/1.4045332.

Lungu, A., 2022. A DES-based study of the flow around the self-propelled DARPA Suboff working in deep immersion and beneath the free-surface. *Ocean Engineering*, Volume 244, 2022, 110358.

Marshallsay, P. G. and Eriksson, A. M., 2012. Use of Computational Fluid Dynamics as a Tool to Assess the Hydrodynamic Performance of a Submarine. *18th Australasian Fluid Mechanics Conference*, 3-7 December 2012, Launceston, Australia.

Richardson, L. F., 1910. The Approximate Arithmetical Solution by Finite Differences of Physical Problems Involving Differential Equations, with an Application to the Stresses in a Masonry Dam. Philos. *Trans. R. Soc. Lond*., vol. 210, 307-357.

Roddy, R. F., 1990. Investigation of the Stability and Control Characteristics of Several Configurations of the DARPA Suboff Model (DTRC Model 5470) from Captive- Model Experiments. Ship Hydromechanics Department Departmental Report, David Taylor Research Center, Departmental Report DTRC/SHD-1298-08, Sep. 1990.

Sezen, S, Delen, C., Dogrul, A. and Atlar, M., 2021. An investigation of scale effects on the self-propulsion characteristics of a submarine. *Applied Ocean Research*. 113. 10.1016/j.apor.2021.102728.

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

Wilcox, D. C., 2016. Turbulence Modeling for CFD, third ed. DCW Industries, La Canada, California.

Yoon, H., 2009. Phase- Averaged Stereo-PIV Flow Field and Force/Moment/Motion Measurements for Surface Combatant in PMM maneuvers. Doctoral Thesis in Mechanical Engineering in the Graduate College of The University of Iowa, December 2009.

GMO Journal of Ship and Marine Technology
Issue: 223, June 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Journal homepage: http://www.gmoshipmar.org/
Research Article

Baş-Kıç Vurma ve Dalıp-Çıkma Hareketinin HAD Yöntemi Kullanılarak İncelenmesi

Yavuz Hakan Özdemir [1], Taner Çoşgun [2]

[1] Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Gemi İnşaatı Programı, Deniz Teknolojileri Meslek Yüksekokulu, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi
[2] Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye

[1] (sorumlu yazar), yhozdemir@comu.edu.tr, ORCID: 0000 -0002-0406-0532
[2] tanercosgun@gmail.com, 0000-0002-1364-0133

ÖZET

Bu çalışmada bir geminin iki serbestlik dereceli baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma hareketleri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yardımıyla incelenmiştir. Sayısal çözümlerde bir savaş gemisinin farklı Froude sayıları ve dalga genliklerindeki davranışı RANS denklemleri kullanılarak modellenmiştir. HAD analizleri STAR CCM+ ticari kodu ile gerçekleştirilmiş hem modelleme yöntemi hem de elde edilen sayısal sonuçların işlenme teknikleri her aşamada ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Sonuçlar zamana bağlı yer değiştirmeler, hareketlerin frekans cevapları, baskın genlikler, transfer fonksiyonları ve serbest yüzey deformasyonları yönünden incelenmiş, ayrıca geminin rezonans durumu da tespit edilerek incelemeye dahil edilmiştir. HAD analizlerinden elde transfer fonksiyon ları dilim teorisinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak kullanılan yöntemlerin uyumu incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Gemi hareketleri, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Fourier analizi, türbülans, sonlu hacimler yöntemi

Makale geçmişi: Geliş 24/06/2023 – Kabul 03/08/2023

https://doi.org/10.54926/gdt.1319499

Gemi ve Deniz Teknolojisi
Sayı: 223, Haziran 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

Investigation of Pitch and Heave Motion by Using CFD

Yavuz Hakan Özdemir [1], Taner Çoşgun [2]

[1] Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies , Shipbuilding Program, Marine Technology Vocational School, Çanakkale Onsekiz Mart University, Türkiye
[2] Deparment of Naval Architecture And Marine Engineering, Naval Architecture And Maritime Faculty, Yıldız Technical University, Türkiye

[1] (corresponding author), yhozdemir@comu.edu.tr, ORCID: 0000 -0002-0406-0532
[2] tanercosgun@gmail.com, 0000-0002-1364-0133

ABSTRACT

This study investigates a ship's two degrees of freedom pitch and heave motion with the aid of Computational Fluid Dynamics (CFD). The behavior of a surface combatant for varying Froude numbers and wave amplitudes modelled using RANS equations. The commercial CFD solver Simcenter Star CCM+ was utilized in computations. The solution methodology and the evaluation process of the numerical results was presented in detail. The results was investigated in terms of time varying displacements, frequency responses of the motions, dominant amplitudes, transfer functions and the free surface deformations. Furthermore, the resonance case of the ship was determined. The transfer functions obtained from CFD analyzes were compared with those of the strip theory, and the compatibility of the methods was examined.

Keywords: Ship motion, computational fluid dynamics, Fourier analysis, turbulence, finite volume method

Article history: Received 24/06/2023 – Accepted 03/08/2023

1.Giriş

Tekne tasarımı gerçekleştirilirken teknenin hidrodinamik özellikleri başka bir ifadeyle denizciliği dikkate alınmalıdır. Teknenin hareket genliklerinin ve ivmelerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olup olmadığı tespit edilmeli ve gerekiyor ise form da düzenlemeye gidilmelidir. Bir teknenin hareket analizlerinin gerçekleştirilmesi için en güvenli yöntem deneysel çalışma olmakla birlikte günümüzde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemleri de kabul görmüş analiz yöntemlerindendir Özdemir, (2014). Akış alanın çözümlenmesi ile gemi hareketlerinin modellenmesine dair ilk çalışmalar potansiyel akış denklemlerinin frekans düzleminde çözümü ile başlamıştır Havelock ve T.H., (1928), Lewis and F.M., (1929), Ursell F., (1949), Frank, (1967). Potansiyel teorinin viskoziteyi kullanmaması ve nonlineer gemi hareketlerini modelleme de zorlanması en önemli eksikliğidir. Bunun yanında potansiyel teoriye dayalı yöntemler hızlı çözüm üretmesi ve uygulanışının kolay olması sebepleri ile günümüzde de kullanılmaktadır. Konuyla ilgili detaylı literatür taraması Özdemir, (2014) tarafından verilmiştir.

Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte RANS denklemlerinin çözümü hız kazanmıştır. Viskozitenin ve türbülansın analize dâhil edilmesi ve özellikle nonlineer hareketleri modelleyebilmesi sayesinde günümüzde en çok kullanılan sayısal analiz yöntemleridir. Sato vd., (1999) Seri 60 tipi bir modelin baş-kıç vurma ve dalıp çıkma bileşik hareketini RANS ile modellemişler ve bu alanda ilk çalışmalardan bir tanesini gerçekleştirmişlerdir. Carrica vd, (2011), Ozdemir ve Barlas, (2017) yüzey eğriliği çok fazla olan KVLCC2 teknesinin bileşik hareketlerini RANS ile incelemiş ve sonuçlarını deneysel verilerle karşılaştırarak. RANS çözücülerin özellikle hareket genliklerine ait harmonikleri tahmin etmede başarılı olduğunu belirtmişlerdir. Castiglione vd., (2011) katamaran tipi bir teknenin düzenli dalgalar içerisindeki hareketini modelleyerek hareketin transfer fonksiyonlarını deneylerle karşılaştırıp çözümlemenin doğruluğunu göstermişlerdir.

Bu makalede günümüzde çok yaygın bir şekilde kullanılan ticari bir yazılım olan STAR CCM+ RANS çözücü yardımıyla türbülanslı akış ortamında iki serbestlik dereceli gemi hareketi modellenmiştir. Bu çalışmanın amaçlarından biri RANS denklemleri kullanılarak iki serbestlik dereceli baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma bileşik gemi hareketinin modelleme yönteminin gösterilmesi bir diğer amacı ise RANS çözümler ile elde edilen nonlineer hareketlere ait verilerin çözümleme tekniğinin sunulmasıdır. Analizler sonucunda elde edilen transfer fonksiyonları gemi hareketlerini lineer kabul altında çözümleyen dilim teorisinin sonuçları ile beraber sunularak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Sunulan bu makale çalışması kapsamında 2. bölümde kullanılan tekne geometrisi ve sayısal deneyin koşulları tanıtılmış, 3. bölümde matematiksel model anlatılmış, 4. bölümde analiz sonuçlarının sunumu ve 5. bölümde genel değerlendirme yapılmıştır.

2. Geometri ve Koşullar

Bu çalışmada Fırkateyn tipi bir savaş gemisinin hareket analizleri gerçekleştirilmiştir. HAD analizleri gerçekleştirilecek olan FFG gemisinin tasarımı Y.T.Ü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü'nde Şener, (2012) tarafından doktora tez çalışması kapsamında tasarlanmıştır. Bu formun direnç tespiti için model deneyleri ve HAD analizleri takıntılı ve takıntısız durum için Özdemir, (2014) tarafından doktora tezi çalışmasında gerçekleştirilmiş olup sonuçlar Özdemir vd., (2013), Özdemir ve Barlas, (2018) makale çalışmalarında ayrıntılı olarak yayınlanmıştır. İlgili referanslarda form ve model ile ilgili ayrıntılı bilgi mevcuttur.

Geliştirilen tekne formunun modeli İ.T.Ü Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'nın model imalat

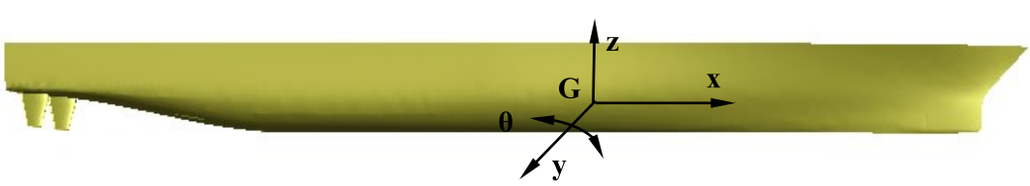
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

atölyesinde 1/36 ölçekli M 367 kod numarası ile imal edilmiş ve direnç deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. FFG gemisine ait ana boyutlar ve model boyutları

	Sembol	FFG Gemi	M 367 Model
Ölçek	λ	1	36
Dikeyler arası boy	$L_{BP}(m)$	139	3.861
Su hattı boyu	$L_{WL}(m)$	139.07	3.863
Genişlik (maks)	$B\ (m)$	18.20	0.506
Draft	$T\ (m)$	5.050	0.140
Derinlik	$D(m)$	11.20	0.311
Deplasman hacmi	$\nabla(m^3)$	5768.24	0.124
Islak yüzey alanı	$A_{WS}(m^2)$	2442.56	1.884
Blok katsayısı	C_B	0.489	0.489
Prizmatik katsayı	C_P	0.605	0.605
Orta kesit alan katsayısı	C_M	0.810	0.810
Su hattı alan katsayısı	C_{WP}	0.793	0.793
Hacim merkezinin boyuna yeri	$LCB\ (m)\ (+baş)$	-7.013	-0.195
Yüzme merkezinin boyuna yeri	$LCF\ (m)\ (+baş)$	-11.817	-0.328
Baş-kıç vurma jirasyon yarıçapı	K_{yy}/L_{PP}	0.25	0.25
Yan öteleme jirasyon yarıçapı	K_{zz}/L_{PP}	0.25	0.25
Yalpa jirasyon yarıçapı	K_{xx}/B	0.37	0.37
Servis hızı	$V_S(knot)$	18	3.0

Bu çalışmada direnç deneyleri ve HAD analizleri yapılan bu tekne formunun hareket analizleri takıntısız olarak model ölçeğinde gerçekleştirilmiştir. Geminin ana boyutları ve model boyutları Tablo 1'de analiz için hazırlanan takıntısız tekne formunun 3B CAD modeli Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. FFG takıntısız CAD modeli

Burada G geminin ağırlık merkezini, z dikey yönü, pozitif x gemi başını, y yatay ekseni göstermektedir. Dalıp çıkma hareketi z ekseni boyunca, baş-kıç vurma hareketine sebep olan dönme ise y ekseni etrafında meydana gelmektedir. Hareket analizleri gerçekleştirilirken dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketinin dışında diğer tüm hareketler kısıtlanmıştır. Tekne formunu harekete zorlamak için tekne üzerine baştan düzenli sinüzoidal dalgalar gönderilmiştir ve analizler farklı Froude (Fr) sayılarında gerçekleştirilmiştir. Baş-Kıç vurma ve dalıp-çıkma bileşik hareketine ait test şartları Tablo 2'de verilmiştir. Analizler model ölçeğinde yapılmış olup burada U_c modelin hızını, ζ dalga genliğini, f dalga frekansını, f_e karşılaşma frekansını ve λ dalga boyunu göstermektedir. Baştan gelen düzenli dalgalarda f_e aşağıdaki formülle verilmektedir LLoyd, (1989):

$$f_e = \sqrt{\frac{g}{2\pi\lambda}} + \frac{U_c}{\lambda}. \qquad (1)$$

Tablo 2. Baştan gelen düzenli dalgalarda farklı Fr sayılarında dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketi için test şartları

NO	Fr	U_c (m/s)	ζ (mm)	L_{BP}/λ	f (Hz)	f_e (Hz)
1	0.264	1.625	55	0.125	0.225	0.277
2	0.264	1.625	55	0.25	0.318	0.423
3	0.264	1.625	55	0.50	0.449	0.660
4	0.264	1.625	55	0.75	0.550	0.866
5	0.264	1.625	55	1.00	0.636	1.056
6	0.322	1.982	55	0.125	0.225	0.289
7	0.322	1.982	55	0.25	0.318	0.446
8	0.322	1.982	55	0.50	0.449	0.706
9	0.322	1.982	55	0.75	0.550	0.935
10	0.322	1.982	55	1.00	0.636	1.149
11	0.418	2.050	55	0.125	0.225	0.308
12	0.418	2.050	55	0.25	0.318	0.484
13	0.418	2.050	55	0.50	0.449	0.782
14	0.418	2.050	55	0.75	0.550	1.050
15	0.418	2.050	55	1.00	0.636	1.301
16	0.543	3.343	55	0.125	0.225	0.333
17	0.543	3.343	55	0.25	0.318	0.534
18	0.543	3.343	55	0.50	0.449	0.882
19	0.543	3.343	55	0.75	0.550	1.199
20	0.543	3.343	55	1.00	0.636	1.501

3. Matematik Formülasyon

3.1. Temel Denklemler

Bir geminin kütle merkezinin öteleme hareketine ait denklem;

$$m\frac{dV}{dt} = f, \tag{2}$$

ile verilmektedir. Burada m geminin kütlesini, f gemi üzerine etki eden toplam kuvveti, V kütle merkezinin hızını göstermektedir. Gövdeyle ilişkilendirilmiş koordinat eksenine göre teknenin açısal momentum denklemi ise aşağıdaki verilmektedir Fossen, (1996);

$$M\frac{d\omega}{dt} + \omega \times M\omega = n, \tag{3}$$

burada M atalet tensörünü, ω teknenin açısal hızını, n tekne üzerine gelen toplam momenti göstermektedir. HAD yardımıyla gemi etrafındaki akış alanı problemi çözüldükten sonra gemiyi harekete zorlayan kuvvet ve momentler elde edilir. Geminin dönme ve öteleme hareketi elde edilen bu kuvvet ve moment değerleri kullanılarak hesaplanır Panahi vd., (2009), Ozdemir and Barlas, (2017).

Akış alanının modellenebilmesi için Zaman Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri kullanılmıştır. Akış zamana bağlı, üç boyutlu ve sıkışamaz kabul edilmiştir. Bu durumda süreklilik denklemi ve momentum denklemleri Kartezyen koordinatlarda aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = 0, \tag{4}$$

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

ile süreklilik denklemi,

$$\frac{\partial \mathrm{U_i}}{\partial \mathrm{t}}+\frac{\partial\left(\mathrm{U_i U_j}\right)}{\partial \mathrm{x_j}}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{x_i}}+\frac{\partial}{\partial \mathrm{x_j}}\left[\nu\left(\frac{\partial \mathrm{U_i}}{\partial \mathrm{x_j}}+\frac{\partial \mathrm{U_j}}{\partial \mathrm{x_i}}\right)\right]-\frac{\partial\left(\overline{\mathrm{u_i' u_j'}}\right)}{\partial \mathrm{x_j}}, \tag{5}$$

ile momentum denklemleri verilir. Burada U_i ortalama hızı, u_i' çalkantı bileşenini, P basıncı, ρ akışkanın yoğunluğunu ve ν kinematic viskoziteyi göstermektedir. Reynolds gerilmeleri Boussinesq yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır Wilcox, (1998):

$$\overline{\mathrm{u_i' u_j'}}=\nu_\mathrm{t}\left(\frac{\partial \mathrm{U_i}}{\partial \mathrm{x_j}}+\frac{\partial \mathrm{U_j}}{\partial \mathrm{x_i}}\right)+\frac{2}{3}\delta_{\mathrm{ij}}\mathrm{k}, \tag{6}$$

burada v_t eddy viskozitesini, k türbülans kinetic enerjisini göstermektedir ve:

$$\nu_\mathrm{t}=\mathrm{C_\mu k^2}/\varepsilon, \tag{7}$$

denklemini sağlar. $C_\mu = 0.09$ olup kapama katsayısı, ε viskoz sönüm katsayısıdır. Türbülans özellikleri olan k ve ε iki denklem modeli olan $k-\varepsilon$ türbülans modeli kullanılarak elde edilmiştir. Mühendislik uygulamalarında iki denklem modelleri içerisinde en popüler olan türbülans modelidir. Launder ve Spalding, (1974) tarafından önerilen bu model iki tane transport denklemi içermektedir:

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\frac{\partial\left(kU_j\right)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+P_k-\varepsilon, \tag{8}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+\frac{\partial\left(kU_j\right)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{\varepsilon 1}\mathrm{P}_k\frac{\varepsilon}{k}-C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k}, \tag{9}$$

$$\mathrm{P}_k=-\overline{u_i' u_j'}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}. \tag{10}$$

Transport denklemlerine kullanılan kapama katsayıları:

$$C_{\varepsilon 1}=1.44, C_{\varepsilon 2}=1.92, \sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3, \tag{11}$$

ile verilir. Duvar fonksiyonu olarak yüksek ve düşük y^+ değerleri için aşağıda verilen formül kullanılmıştır:

$$u^*=\sqrt{g\nu u/y+(1-g)C_\mu^{1/2}k}. \tag{12}$$

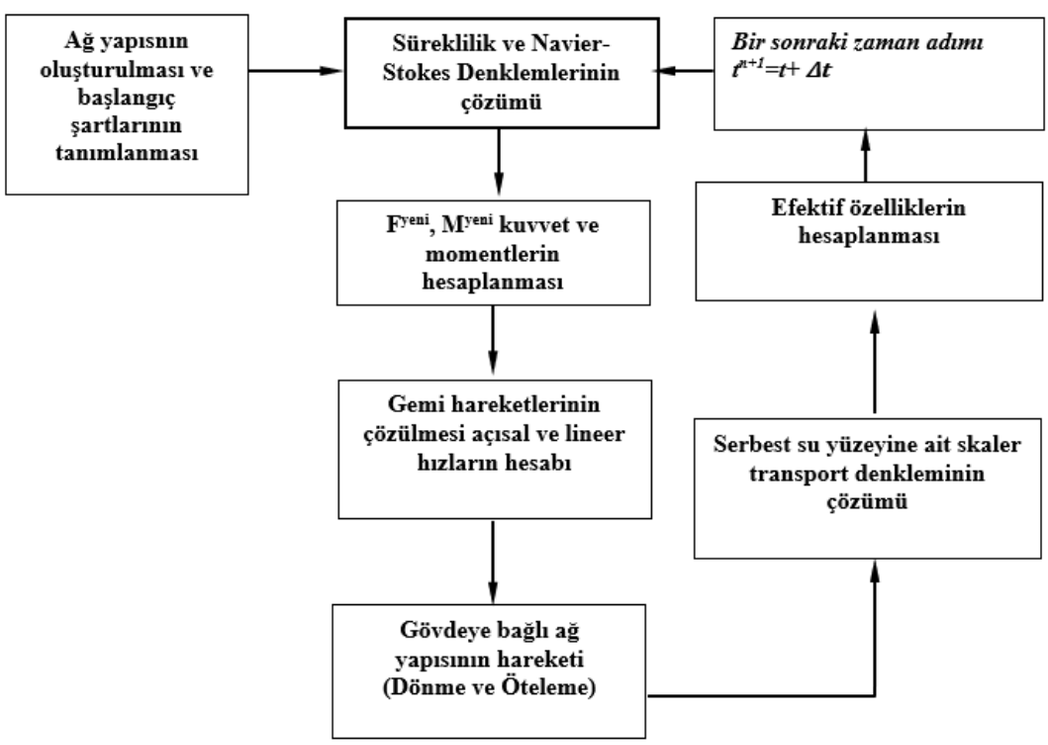
Verilen bu denklemde k türbülans kinetik enerjisini göstermektedir. Burada g fonksiyonu ise aşağıdaki formüllerle ifade edilmiştir:

$$g=\exp\left(-\frac{\mathrm{Re}_y}{11}\right), \mathrm{Re}_y=\sqrt{k}\,y/\nu \tag{13}$$

Bu çalışmada ticari bir yazılım olan STAR CCM+ kullanılarak sayısal modelleme yapılmıştır. RANS denklemleri sonlu hacimler yöntemine göre ayrıklaştırılmış ikinci dereceden ileri fark yöntemi kullanılmıştır. Serbest su yüzeyinin modellenmesi volume of fluid (VoF) Hirt and Nichols, (1981) metodu ile gerçekleştirilmiştir.

Momentum denklemlerinin ve süreklilik denkleminin çözümü sırayla gerçekleştirilir. Momentum

denklemlerinin ayrıklaştırılarak hız ve basınç alanlarının elde edilmesinden sonra süreklilik denklemi çözülür ve elde edilen çözümlerin süreklilik denklemini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilerek değerler güncellenir. Bu çalışma için çözüm hem zamana ve hem de konuma bağlıdır dolayısıyla analizler zamana ve konuma bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Analizler gerçekleştirilirken temel diferansiyel denklemler basınç alanından dolayı her bir zaman adımında Patankar ve Spalding, (1972) tarafından önerilmiş olan SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations) algoritması kullanılarak çözümlenmiştir. Diferansiyel denklemler sırayla çözülerek ayrılmış çözücü kullanılmıştır. Konuyla ilgili ayrıntılı bilgi W. Versteeg ve Malalasekera, (1996)'da bulunmaktadır. Akış alanının elde edilmesinden sonra hareketin modellenmesi gövdeye bağlı ağ yapısı algoritmasına göre yapılmıştır Özdemir, (2014). Gövdeye bağlı ağ yapısı algoritmasına göre yapılan çözümün aşamaları Şekil 2'de gösterilmiştir.

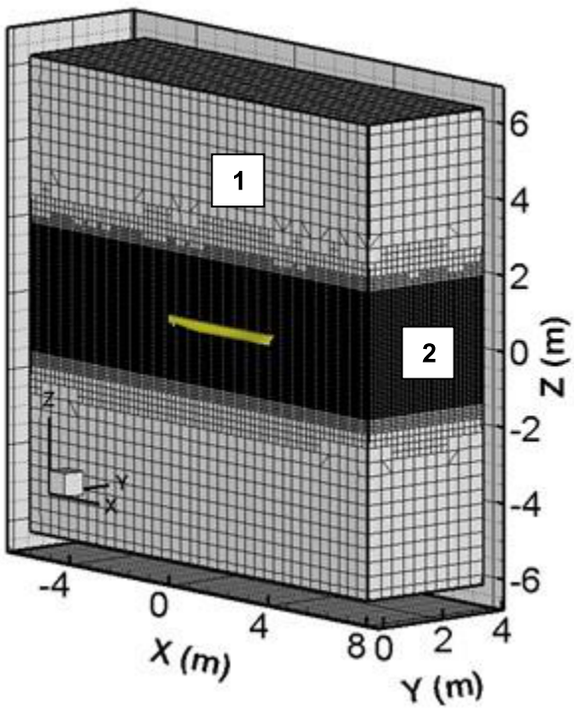


Şekil 2. Gemi hareketlerinin HAD ile çözümü için kullanılan yöntem

3.2. Hesaplama Hacmi ve Ağ Yapısı

Hesaplama hacminin oluşturulmasının büyük ölçüde kullanıcıya bağlı olup, oluşturulacak hesaplama hacmi boyutları ağ sayısını ve yapısını etkileyecektir Özdemir, (2014). Şekil 3'te hareket analizleri için oluşturulan hesaplama hacmi gösterilmiştir. Dalıp-çıkma, baş-kıç vurma bileşik hareketi incelenirken hesaplama hacmi tekne geometrisi ile beraber Z yönünde ilerleme ve Y ekseni etrafında dönme hareketi yapacaktır. Bu durum göz önüne alındığında analiz bölgesi Z ekseni boyunca uzatılmış ve dönme etkilerinin daha kolay görülebilmesi için Y ekseni boyunca kısaltılmıştır. Formun simetrik olması sebebiyle teknenin yarısı modellenmiş ve etrafındaki akış incelenmiştir. Bu sayede ağ sayısından ve hesaplama süresinden tasarruf edilmiştir. Hesaplama hacminin yüksekliği $3.0xL_{BP}$, genişliği $1xL_{BP}$, hacmin teknenin başına olan uzaklığı $1.0xL_{BP}$ ve teknenin kıçına olan uzaklığı $1.0xL_{BP}$ olarak tasarlanmıştır. Analizlerde düzgün olmayan altı yüzlü (hexahedral) ağ yapısı kullanılmıştır. Tekne geometrisinin etrafında ve serbest su yüzeyinin meydana geleceği su hattı düzleminde hacmin geneline oranla daha sık ağ yapısı kullanılmıştır.

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi



Şekil 3. HAD analizi için oluşturulan hesaplama hacmi ve ağ yapısı

Özellikle su hattı düzleminde dalga deformasyonlarının meydana gelmesi kullanılan hacim elemanı sayısının artmasına sebep olmuş olup toplamda 7462161 hacim elemanı kullanılmıştır. Oluşturulan her bir blok elemanına ait ağ yapısının boyutları Tablo 3'te verilmiştir.

3.3. Sınır Şartları ve Zaman Adımı

Şekil 4'te hareket analizlerinde kullanılan sınır şartları gösterilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde giriş sınır şartı için sinüzoidal dalga formu çıkış sınır şartı hidrostatik basınç tanımlanmıştır.

Şekil 4'te verilen ayrıntı resminde başlangıç sınır şartı için tanımlanmış olan sinüzoidal dalga formu görülmektedir. Analizlerde tekne formu eksenel simetriktir ve sadece yarısı modellenmiştir. Giriş, çıkış ve simetri sınır şartlarının dışında kalan sınırlar kaygan duvar olarak tanımlanmıştır. Zaman adımı ITTC ITTC, (2011) ve Kahramanoğlu vd., (2020) tarafından tavsiye edilen yöntem kullanılarak $T_s = 0.01\ s$ seçilmiştir.

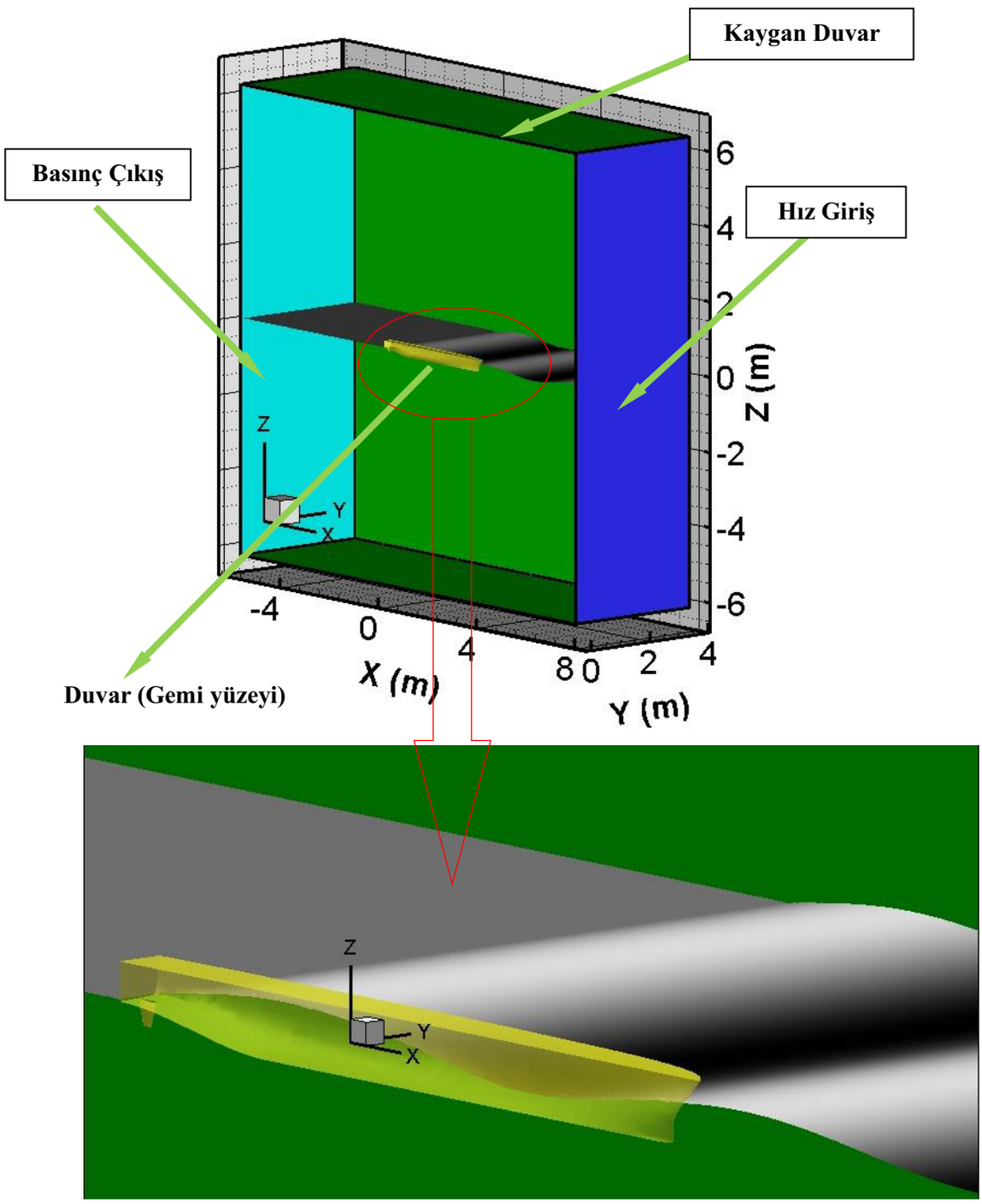
Tablo 3. Hareket analizi için oluşturulan ağ yapıları

Blok No	Blok Adı	Ağ Boyutu
1	Kontrol hacminin geneli	0.06 L_{BP}
2	Serbest su yüzeyi düzeltmesi	0.007 L_{BP}
3	Gemi etrafı için düzeltme	0.007 L_{BP}
TOPLAM		7462161

4. Sayısal Sonuçlar ve Tartışma

Bölüm 2'de belirtildiği gibi tekne formunu hareket analizleri baştan gelen düzenli sinüzoidal dalgalarda farklı Fr sayıları için gerçekleştirilmiş olup bu bölümde analiz sonunda elde edilen sonuçlar

sunulmuştur.



Şekil 4. Sınır şartları

4.1. Sayısal doğrulama

Mevcut literatürde baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma hareketlerini konu alan deneysel veri kısıtlıdır. Çalışmada kullanılan gemi geometrisi için de bu tarz bir deneysel çalışma bulunmamaktadır. Mevcut çalışmada kullanılan sayısal yaklaşım, söz konusu deneysel verilerin bulunduğu KVLCC2 teknesi için daha önce uygulanmış ve ayrıntılı olarak doğrulaması gerçekleştirilmiştir (Ozdemir ve Barlas, (2017)). Özdemir ve Barlas, (2017) çalışmalarında HAD yöntemi ile KVLCC2 teknesinin baş-kıç vurma ve dalıp-

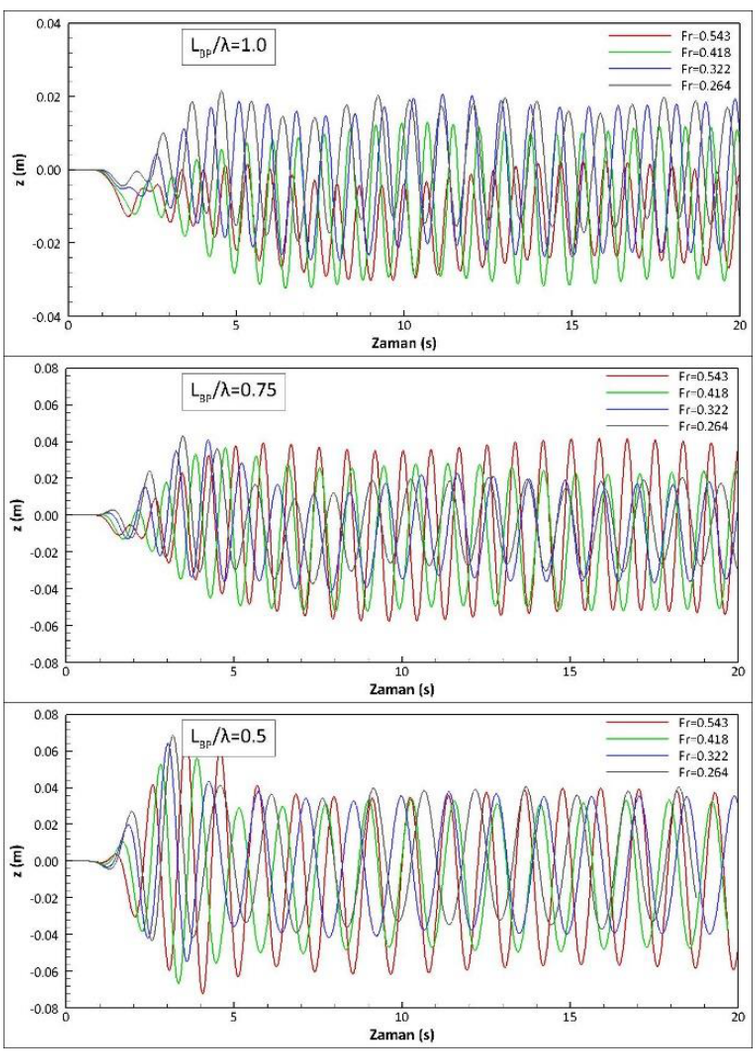
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

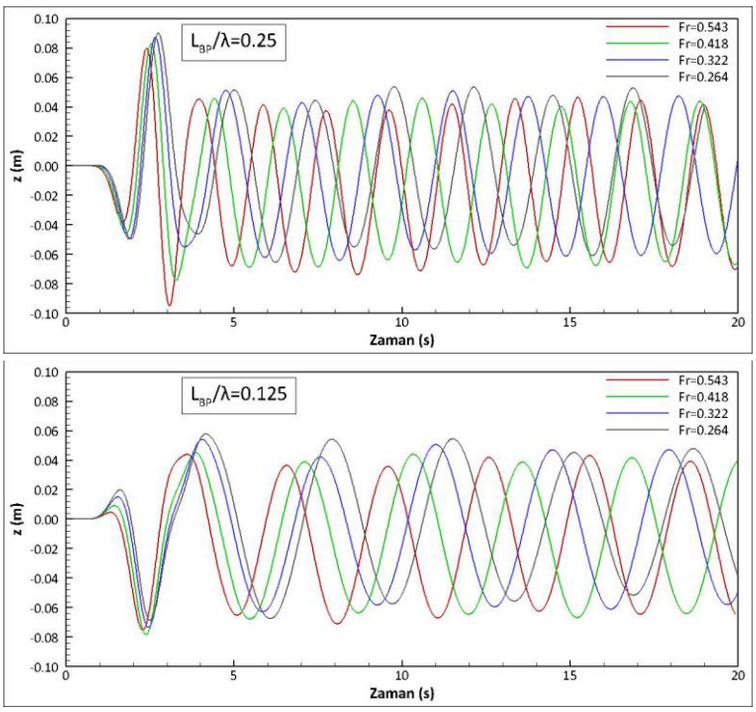
çıkma hareketini modellemişler ve elde ettikleri sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırarak yöntemin geçerliliğini göstermişlerdir. Çalışmada uygulanan çözüm yöntemi (örn. sınır şartları, ağ yapısı ve çözüm algoritmaları vb.) bu çalışmada kullanılmıştır. Ayrıca, sayısal sonuçların doğrulamasını genişletmek amacıyla, elde edilen sonuçlar dilim teorisi kullanılarak da hesaplanmış ve kıyaslamalı olarak ilerleyen bölümlerde sunulmuştur.

4.2. Sayısal sonuçlar

HAD analizlerinin gerçekleştirilmesi sonucunda elde edilen dalıp-çıkma çıkma hareketinin zamanla değişim genlikleri Şekil 5'te ve baş-kıç vurma hareketinin zamanla değişimi Şekil 6'da gösterilmiştir.

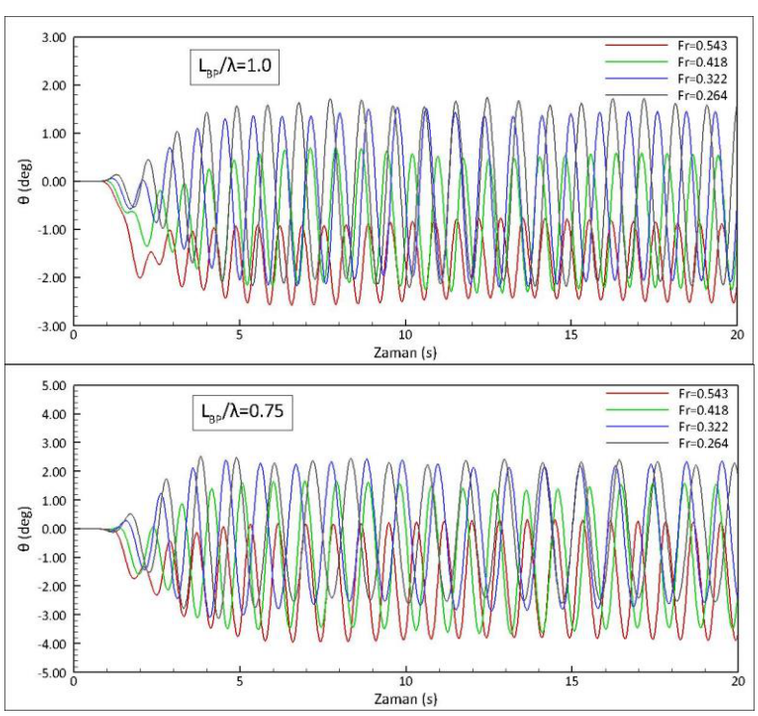
Şekil 5 incelendiğinde düşük dalga frekansının olduğu yüksek dalga boylarında dalıp-çıkma hareket genliğinin neredeyse dalga genliğine eşit olduğu görülebilir. Yüksek dalga frekansının olduğu düşük dalga boylarında ise dalıp-çıkma genliğinin ve baş-kıç vurma açısının azaldığı görülebilir. Ayrıca yüksek dalga boylarında hareketin lineer düşük dalga boylarında ise nonlineer olduğu görülmektedir. Gemi boyunun dalga boyuna oranı $L_{BP}/\lambda=0.5$ den itibaren Fr sayısının artmasıyla birlikte dalıp-çıkma hareketinin genliğinin arttığı ve $L_{BP}/\lambda=0.75$ den itibaren genliklerin Fr=0.543 ile birlikte tekrar azaldığı görülmektedir ve bu durum ileride detaylı bir şekilde irdelenecektir.



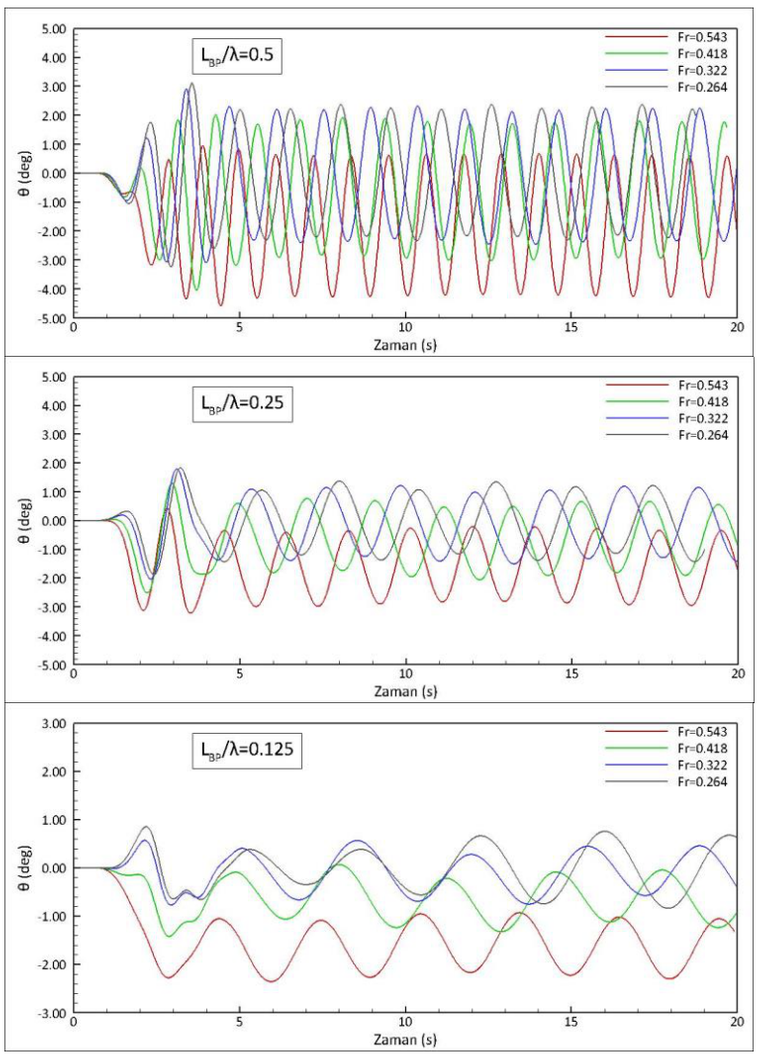


Şekil 5. Farklı Fr sayılarında HAD analizlerinden elde edilen dalıp-çıkma hareketine ait zamana bağlı yer değiştirmeler

Tekne modelinin hareketi 0-1 s arasında sabit tutulmuştur. Akış simülasyonu başladığında akış özelliklerinin tam olarak yerleşebilmesi için dinamik analize geçilmemiş ilk 1 *s* hareket kısıtlanmıştır. HAD analizlerinin hemen hemen tamamında ilk 2-3 periyot boyunca dalıp-çıkma, baş-kıç vurma hareketlerine ait geçici cevabın devam ettiği ve hareket genliklerinin arttığı görülmektedir. Harekete ait daimi cevap 2-3 periyot sonunda elde edilmektedir ve frekans analizleri gemi hareketinin daimi duruma geçtiği ilk 3 periyodun dışında kalan değerler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/



Şekil 6. Farklı Fr sayılarında HAD analizlerinden elde edilen baş-kıç vurma hareketine ait zamana bağlı yer değiştirmeler

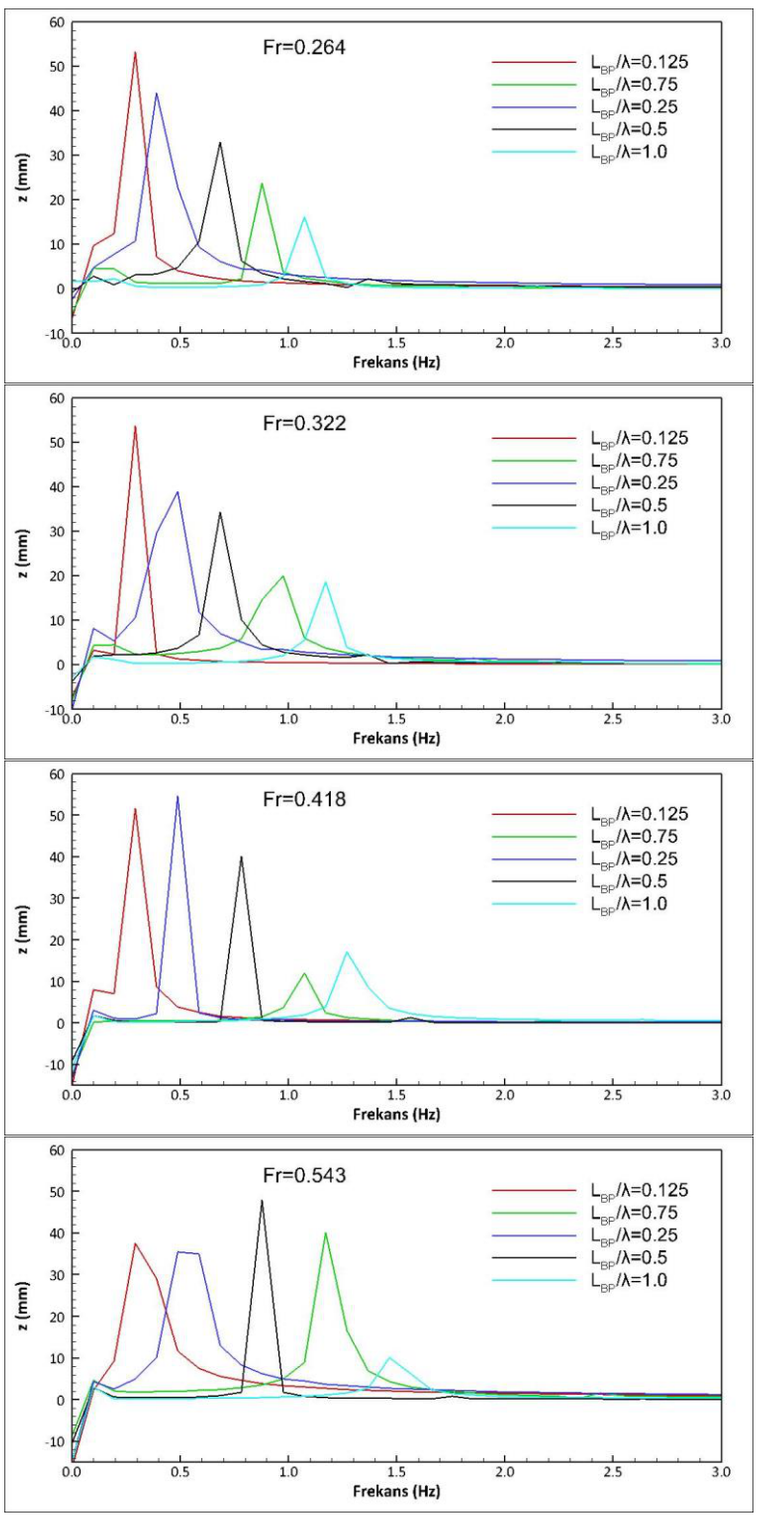
Zamanla değişen periyodik sinyaller Fourier serisi yaklaşımı kullanılarak sinüzoidal fonksiyonların toplamı olarak ifade edilebilir. Zaman düzleminde periyodik olarak değişen sinyalin Fourier analizinin gerçekleştirilmesi sonucunda elde edilen frekans cevabı ile bu sinyali oluşturan sinüzoidal sinyallerin frekans ve genlik değerleri elde edilebilir. Analiz sonucunda elde edilen en büyük genlikli sinüzoidal sinyal baskın sinyali ve bu sinyalin frekansı ise baskın frekansı gösterir. Frekans düzleminde meydana gelen her bir bileşen harmonik olarak isimlendirilir ve Fourier analizinde sıfırıncı harmonik sinyalin ortalama değeridir.

Nonlineer gemi hareketlerinde baskın olan frekansın ve bu frekanstaki genliğin elde edilebilmesi için zamana bağlı bu yer değiştirmelerin ayrık zamanlı Fourier serisine (DTFT) açılması gerekmektedir Irvine vd., (2008). Baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma hareketine ait yer değiştirmelerin Fourier serisi açılımı Irvine vd., (2008):

$$z_I(t) = z_{I0} + z_{I1}\cos(2\pi f_e t + \gamma_{z1}) + z_{I2}\cos(4\pi f_e t + \gamma_{z2}) + z_{I3}\cos(6\pi f_e t + \gamma_{z3}), \quad (14)$$

$$\theta_I(t) = \theta_{I0} + \theta_{I1}\cos(2\pi f_e t + \gamma_{\theta1}) + \theta_{I2}\cos(4\pi f_e t + \gamma_{\theta2}) + \theta_{I3}\cos(6\pi f_e t + \gamma_{\theta3}), \quad (15)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada z_{In} ve θ_{In} hareketlerin genliğini γ_{zn} ve $\gamma_{\theta n}$ ise hareketlerin faz farkını göstermektedir ($n = 1, 2, 3$).



Şekil 7. Farklı Fr sayıları için HAD analizlerinden elde edilen dalıp-çıkma hareketinin frekans cevabı

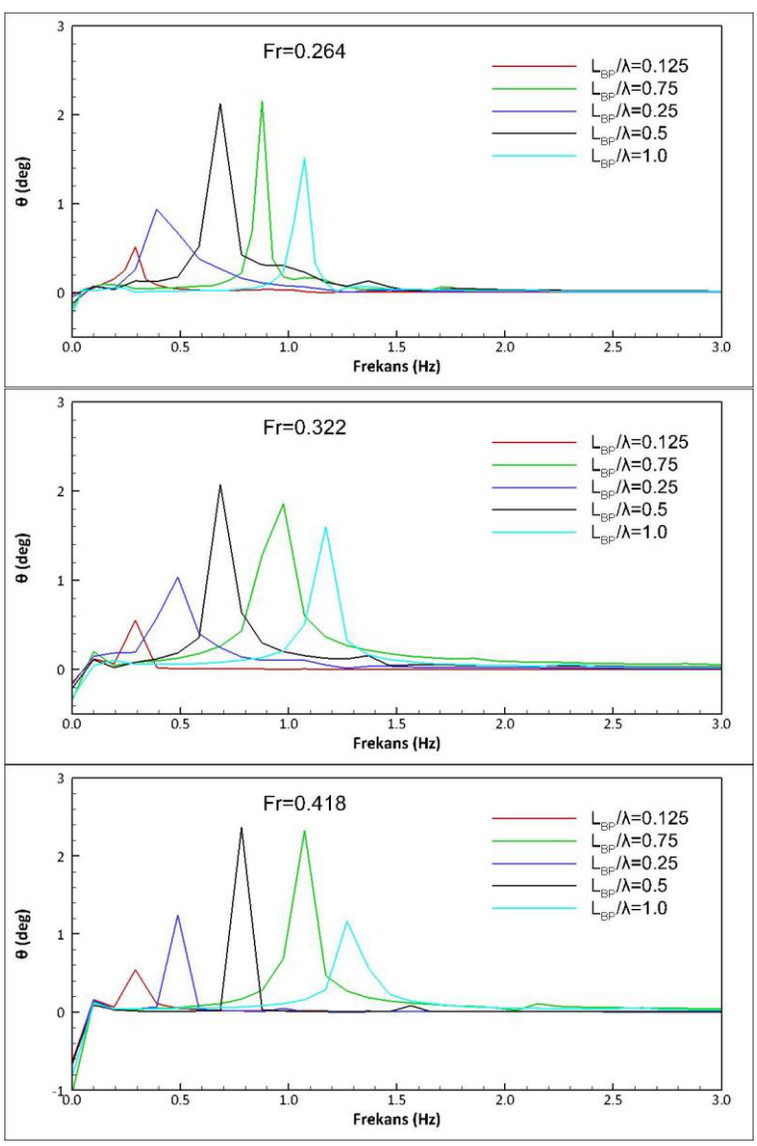
Herhangi ayrık zamanlı bir sinyalin Fourier ve ters Fourier dönüşümü aşağıdaki gibi verilir Özdemir, (2014):

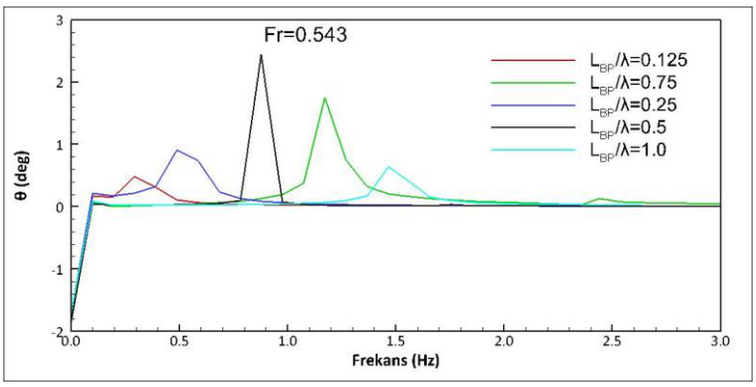
$$x(n)=\sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j(2\pi/N)kn}, \tag{16}$$

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

$$X_k = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} x(n) e^{-j(2\pi/N)kn}, \tag{17}$$

burada $x(n)$ ayrık zamanlı sinyali, X_k ayrık zamanlı sinyalin Fourier dönüşümünü, N örnek sayısını göstermektedir. Frekans analizlerinde kullanılan örnekleme periyodu hareket analizlerinde tanımlanan zaman adımıdır ($T_S = 0.01\ s$). Analizlerden elde edilen frekans cevaplarına genlikler dalıp-çıkma hareketi için Şekil 7'de ve baş-kıç vurma hareketi için ise Şekil 8'de gösterilmiştir. Gerçekleştirilen frekans analizleri sonucunda elde edilen karşılaşma frekansı değerleri ve bu frekans da meydana gelen 0. harmoniğe ve 1. harmoniğe ait genlik değerleri dalıp –çıkma hareketi için Tablo 5 ve baş-kıç vurma hareketi için Tablo 6'da verilmiştir.





Şekil 8. Farklı Fr sayıları için HAD analizlerinden elde edilen baş-kıç vurma hareketinin frekans cevabı

Şekil 7 ve Şekil 8 incelendiğinde frekansın artmasıyla dönme açısı artmakla birlikte dalıp-çıkma hareketinin genliğinin azaldığı görülebilir. Harmoniklerin verildiği Tablo 5 ve Tablo 6'da sıfırıncı harmonik değerleri dalıp-çıma hareketi için geminin suya batma miktarını baş-kıç vurma hareketi için kalıcı trim miktarını vermektedir Wackers et al., (2011).

Tablo 5. Farklı Fr sayılarında dalıp-çıkma hareketi için frekans analizleri sonucunda elde edilen harmonikler

TEST ŞARTLARI					HAD			
NO	**Fr**	**ζ (mm)**	**L_{BP}/λ**	**f_e (Hz)**	**f_e (Hz)**	**z_{I0} (mm)**	**z_{I1} (mm)**	**z_{I1}/ζ**
1	0.264	55	0.125	0.277	0.292	-6.576	53.186	0.967
2	0.264	55	0.25	0.423	0.390	-2.414	43.928	0.799
3	0.264	55	0.50	0.660	0.683	-0.684	32.939	0.599
4	0.264	55	0.75	0.866	0.878	-5.491	23.652	0.430
5	0.264	55	1.00	1.056	1.074	1.608	16.118	0.293
6	0.322	55	0.125	0.289	0.292	-7.129	53.630	0.975
7	0.322	55	0.25	0.446	0.488	-9.979	38.988	0.709
8	0.322	55	0.50	0.706	0.683	-3.782	34.370	0.625
9	0.322	55	0.75	0.935	0.976	-8.055	19.914	0.362
10	0.322	55	1.00	1.149	1.172	-2.900	18.666	0.339
11	0.418	55	0.125	0.291	0.292	-15.047	51.640	0.939
12	0.418	55	0.25	0.450	0.488	-13.276	54.719	0.995
13	0.418	55	0.50	0.715	0.781	-9.011	40.064	0.728
14	0.418	55	0.75	0.948	1.074	-11.440	27.425	0.499
15	0.418	55	1.00	1.166	1.270	-10.820	17.071	0.310
16	0.543	55	0.125	0.333	0.292	-16.409	37.582	0.683
17	0.543	55	0.25	0.534	0.488	-14.735	35.574	0.647
18	0.543	55	0.50	0.882	0.878	-10.938	48.363	0.879
19	0.543	55	0.75	1.199	1.171	-8.636	40.125	0.730
20	0.543	55	1.00	1.501	1.513	-14.785	10.406	0.189

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

Düzgün sinüzoidal bir dalganın etkisiyle harekete zorlanan bir geminin baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma hareketine ait boyutsuzlaştırılmış transfer fonksiyonları Özdemir, (2014), Irvine vd., (2008);

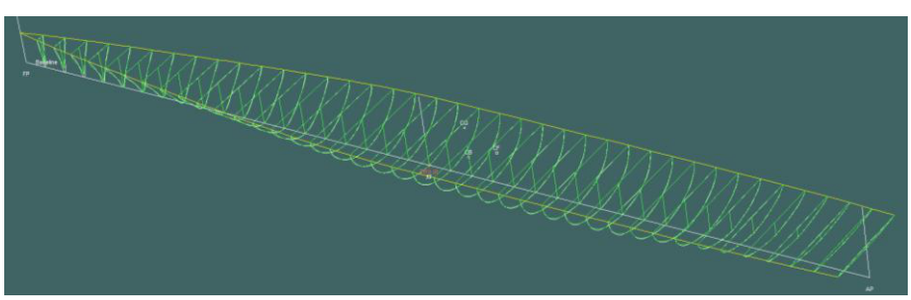
$$TF_z = \frac{z_{I1}}{\zeta}, \tag{18}$$

$$TF_\theta = \frac{\theta_{I1}}{k\zeta}, \tag{19}$$

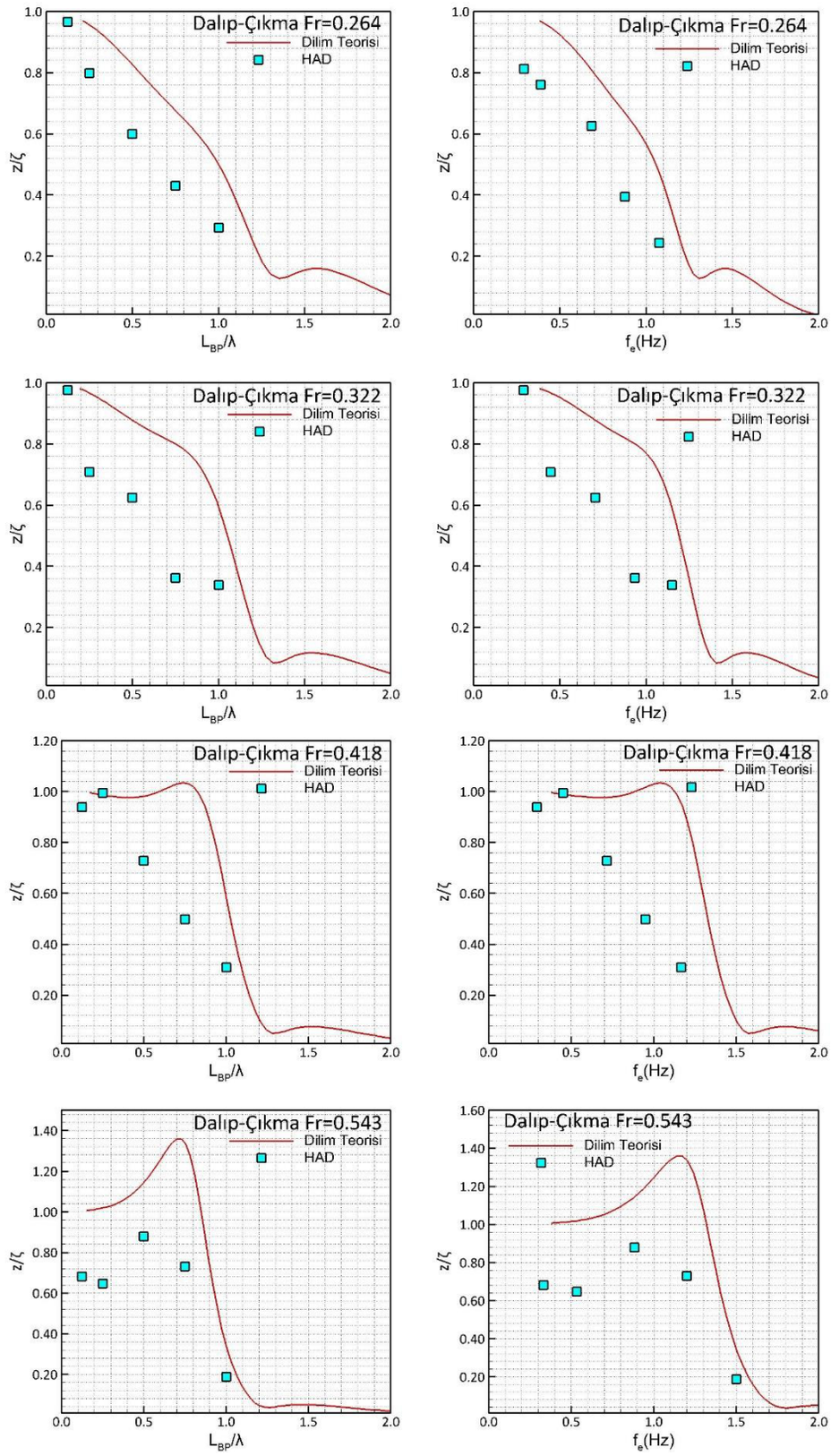
formülleriyle verilir ve burada k dalga sayısını ($\frac{2\pi}{\lambda}$) göstermektedir.

Tablo 6. Farklı Fr sayılarında baş-kıç vurma hareketi için frekans analizleri sonucunda elde edilen harmonikler

TEST ŞARTLARI					HAD			
NO	**Fr**	**ζ (mm)**	**L_{BP}/λ**	**f_e (Hz)**	**f_e (Hz)**	**θ_{I0} (°)**	**θ_{I1} (°)**	**$\theta_{I1}/k\zeta$**
1	0.264	55	0.125	0.277	0.293	-0.043	0.501	0.782
2	0.264	55	0.25	0.423	0.391	0.022	1.038	0.810
3	0.264	55	0.50	0.660	0.684	-0.136	2.046	0.798
4	0.264	55	0.75	0.866	0.879	-0.212	2.355	0.689
5	0.264	55	1.00	1.056	1.074	-0.279	1.776	0.347
6	0.322	55	0.125	0.289	0.292	-0.146	0.552	0.862
7	0.322	55	0.25	0.446	0.488	-0.167	1.033	0.806
8	0.322	55	0.50	0.706	0.684	-0.211	2.073	0.809
9	0.322	55	0.75	0.935	0.977	-0.336	1.859	0.544
10	0.322	55	1.00	1.149	1.172	-0.312	1.601	0.313
11	0.418	55	0.125	0.291	0.293	-0.622	0.544	0.849
12	0.418	55	0.25	0.450	0.488	-0.666	1.240	0.968
13	0.418	55	0.50	0.715	0.781	-0.648	2.366	0.923
14	0.418	55	0.75	0.948	1.074	-1.063	2.327	0.681
15	0.418	55	1.00	1.166	1.270	-0.810	1.163	0.227
16	0.543	55	0.125	0.333	0.293	-1.668	0.480	0.750
17	0.543	55	0.25	0.534	0.488	-1.680	0.911	0.711
18	0.543	55	0.50	0.882	0.879	-1.823	2.443	0.954
19	0.543	55	0.75	1.199	1.172	-1.848	1.746	0.511
20	0.543	55	1.00	1.501	1.465	-1.663	0.643	0.125



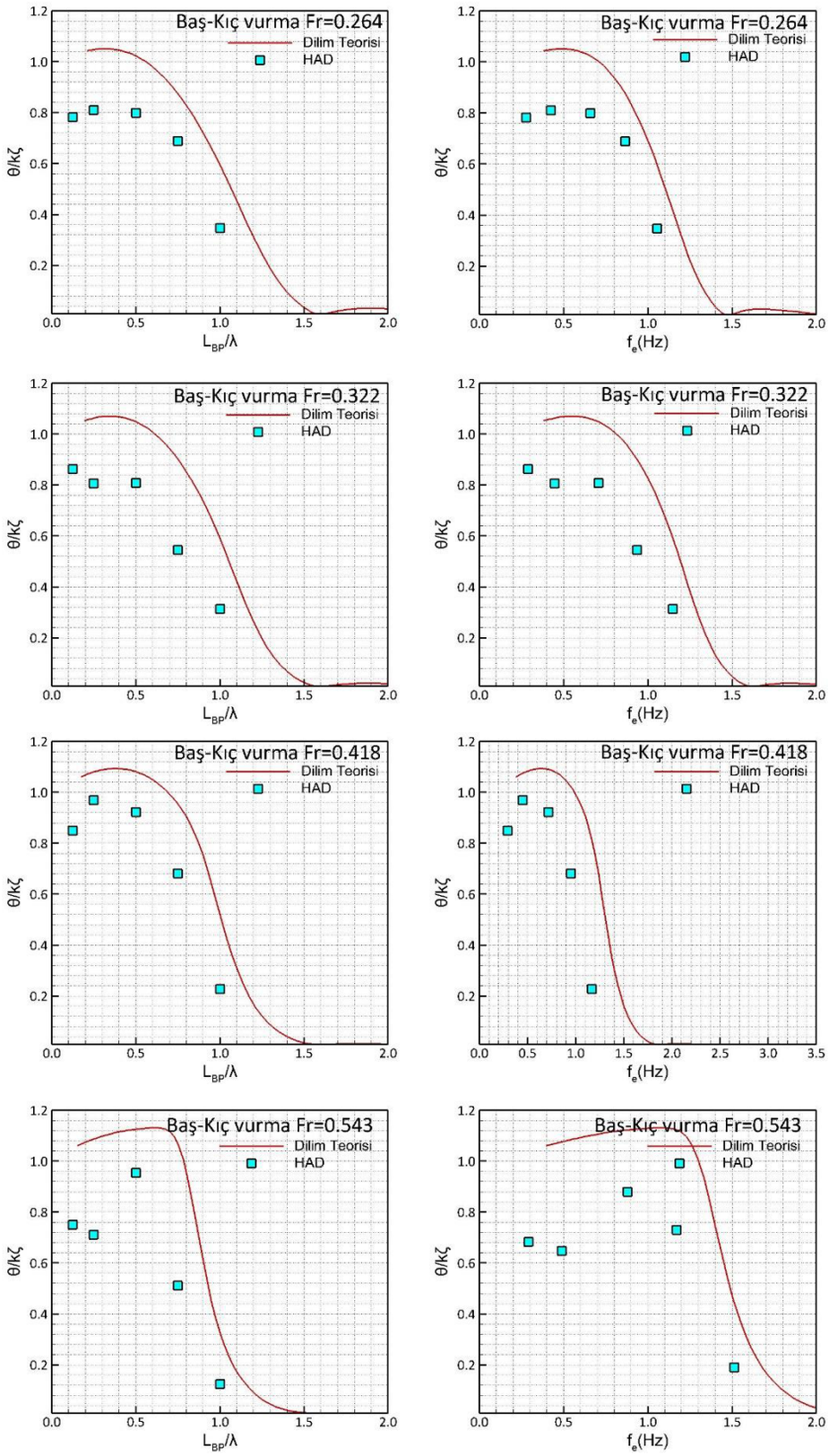
Şekil 9. Dilim teorisi yaklaşımı için Maxsurf programında hazırlanan kesitler



Şekil 10. Farklı Fr sayılarında dalıp-çıkma hareketine ait transfer fonksiyonları

RANS analizlerinden elde edilen transfer fonksiyonları dilim teorisi sonuçları ile beraber verilerek yöntemin lineer yaklaşımla karşılaştırılması sunulmuştur. Şekil 9'da dilim teorisi için kullanılan gemi kesitleri gösterilmiştir. Dilim teorisi analizleri Maxsurf programı kullanılarak 20 kesit üzerinden gerçekleştirilmiştir. Baştan gelen düzenl i dalgalarda gemi kesitlerinin karşılaşma frekansı ile salınım

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/

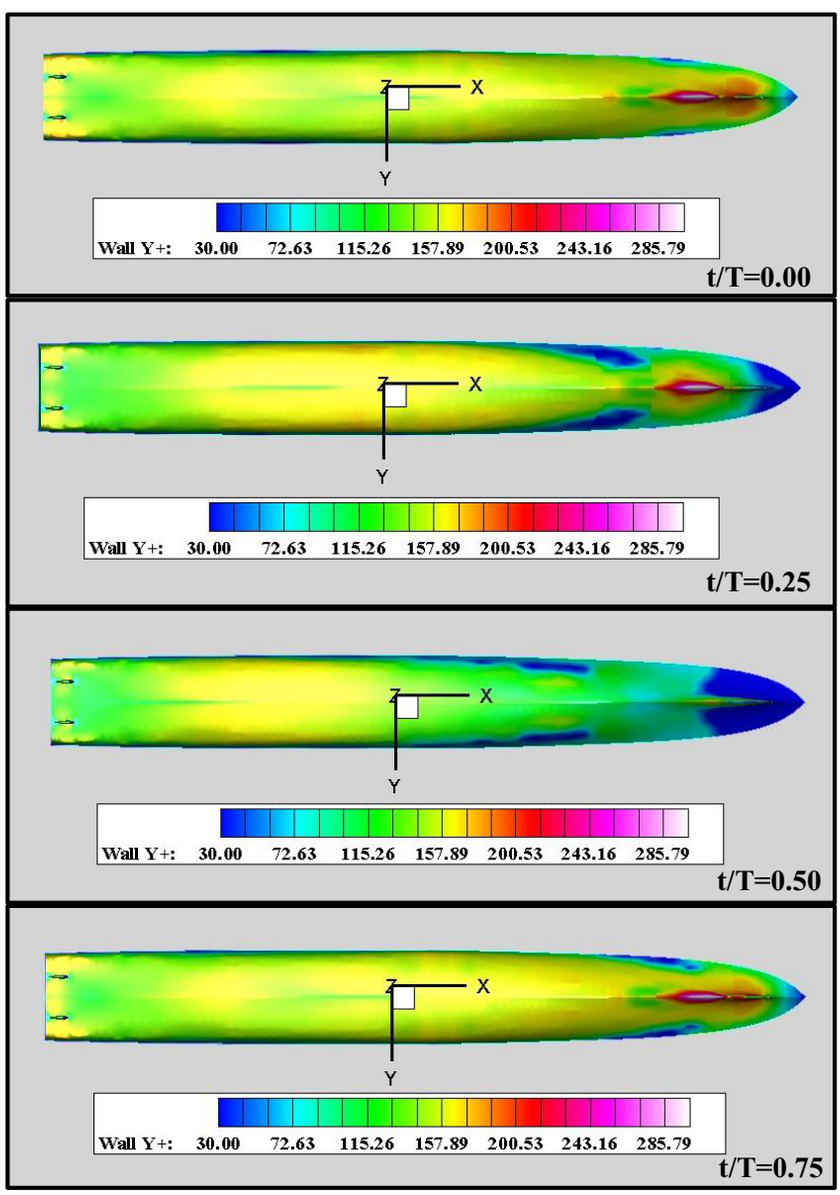


Şekil 11. Farklı Fr sayılarında baş-kıç vurma hareketine ait transfer fonksiyonları

hareketi yaptığı kabul edilir. Belirlenen bir frekans da salınım hareketi yapan bir silindirin ek su kütlesi ve sönüm katsayısı Ursell (1949) tarafından hesaplanmıştır. Bu çalışmada kullanılan Maxsurf programı multipole teorisi ile çözümleme yapmış olup silindir için elde edilen sonuçlar konform dönüşümler

yardımıyla gemi kesitlerine uyarlanmıştır Journee, (1992).

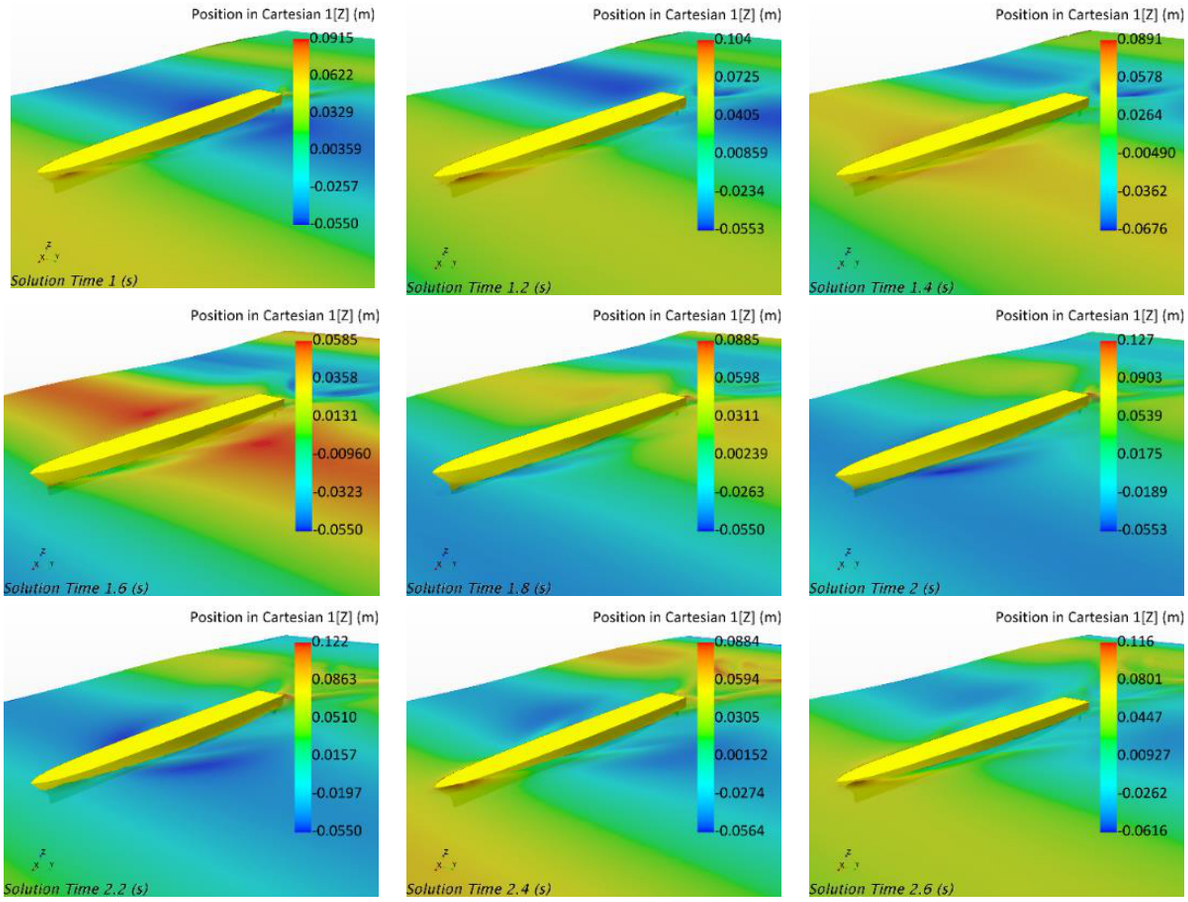
Dilim teorisinin hareketi lineer kabul etmesi ve viskoziteyi ihmal eden potansiyel teoriyi kullanması yöntemin en önemli eksikliğidir fakat yöntem hızlı çözüm üretmektedir. RANS analizlerinden ve dilim teorisinden elde edilen transfer fonksiyonları dalıp-çıkma hareketi için Şekil 10'da ve baş-kıç vurma hareketi için Şekil 11'de gösterilmiştir.



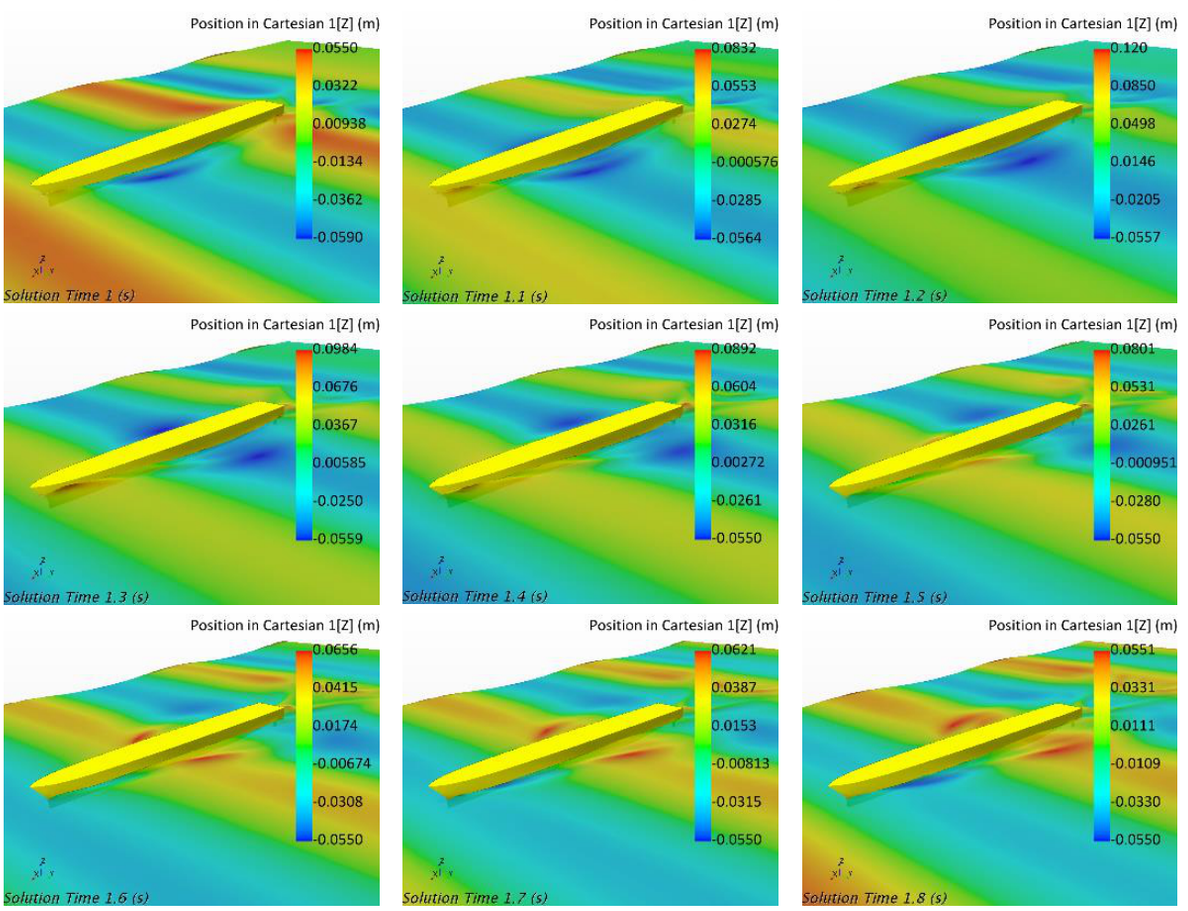
Şekil 12. Fr=0.418 için tekne üzerinde bir periyot içerisinde meydana gelen y+ değerleri

Şekil 10 incelendiğinde dalga boyu arttıkça transfer fonksiyonlarının birim değere yaklaştığı görülmektedir ve bu beklenen bir sonuçtur Irvine et al., (2008). Hareketin lineer olduğu yüksek dalga boylarında dilim teorisinin sonuçları ile RANS sonuçları uyumludur. Gemi boyunun dalga boyuna oranı L_{BP}/λ=0.5 den itibaren Fr sayısının artmasıyla birlikte dalıp-çıkma hareketinin genliğinin arttığı ve L_{BP}/λ=0.75 den itibaren genliklerin Fr ile birlikte tekrar azaldığı görülmektedir hem RANS çözümlerden hem de dilim teorisinin sonuçlarından rahatlıkla görülebilir. LLoyd, (1989), Lewis, (1989), Journee, (1992), Pablo M. Carrica et al., (2011) bir geminin rezonansa girmesi için gerekli şartlardan birinin L_{BP}/λ=0.75 olması gerektiğini belirtmişlerdir. Tekne geometrisine bağlı olarak bu boy oranı aralığı 0.60-1.00 aralığında değişir. Irvine et al., (2008) ise dalga boyu

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

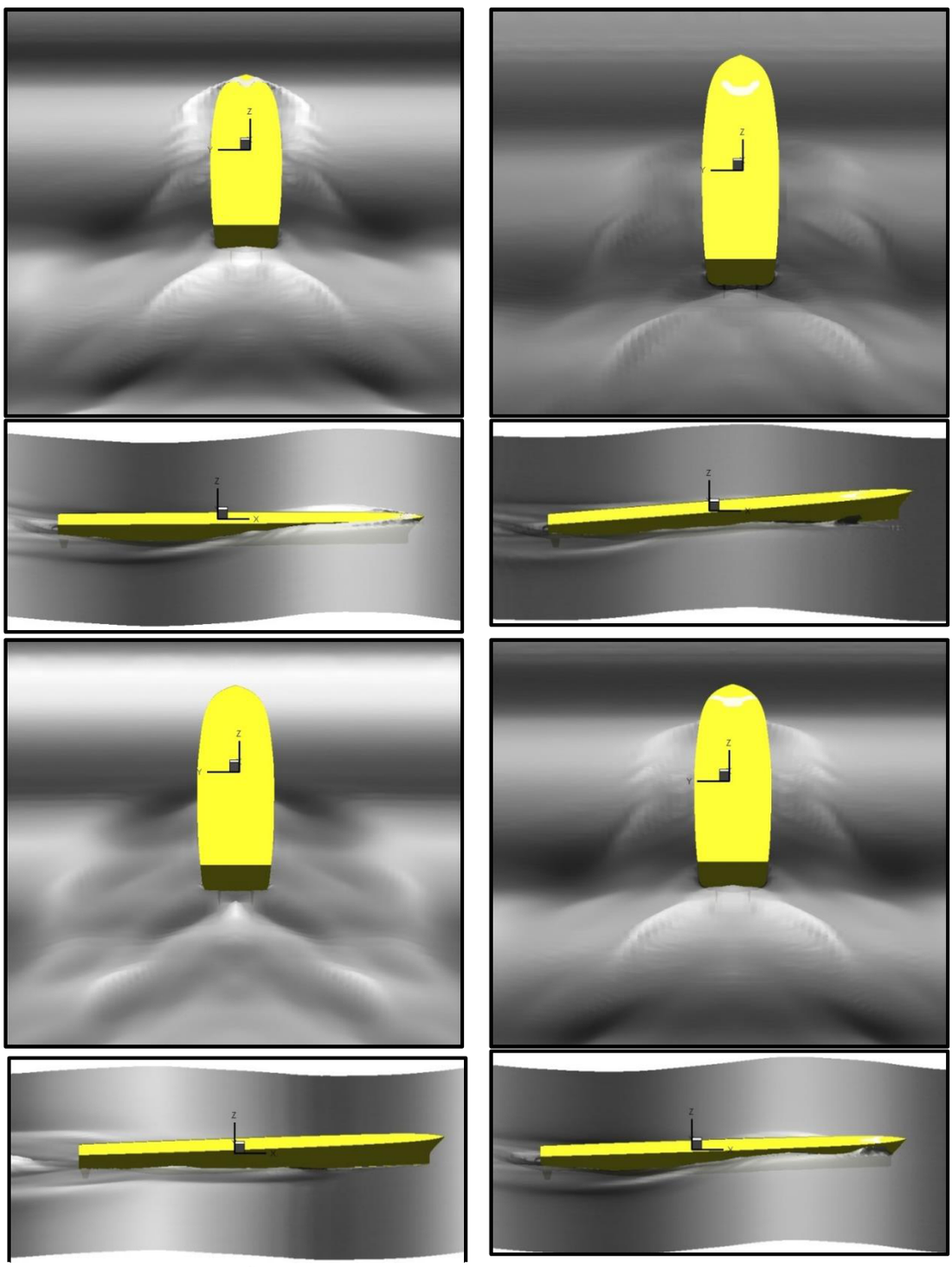


Şekil 13. Fr=0.418 L_{BP}/λ=0.5 için dalga deformasyonları



Şekil 14. Fr=0.418 L_{BP}/λ=1.0 için dalga deformasyonları

şartının sağlanması ile birlikte rezonans oluşması için karşılaşma frekansının da geminin doğal frekansı ile çakışması gerektiğini belirtmiştir. Şekil 10 incelendiğinde L_{BP}/λ=0.5-0.75 aralığında tekne hızının artmasıyla birlikte dalıp-çıkma hareketi genliklerinin arttığı görülmüştür. Dilim teorisine göre Fr=0.543 için L_{BP}/λ=0.75 dalga boyunda ve f_e=1.2 Hz karşılaşma frekansında tekne rezonansa girmektedir. RANS çözümler ise rezonans dalga boyunu L_{BP}/λ=0.60 ve doğal frekansı ise f_e=1.0 (Hz) olarak tahmin etmiştir. D alıp-çıkma hareketinde belirtilen dalga boyu ve karşılaşma frekansında rezonansın meydana gelme durumu baş-kıç vurma hareketinin transfer fonksiyonlarının verildiği Şekil 11'den de rahatlıkla görülebilir.

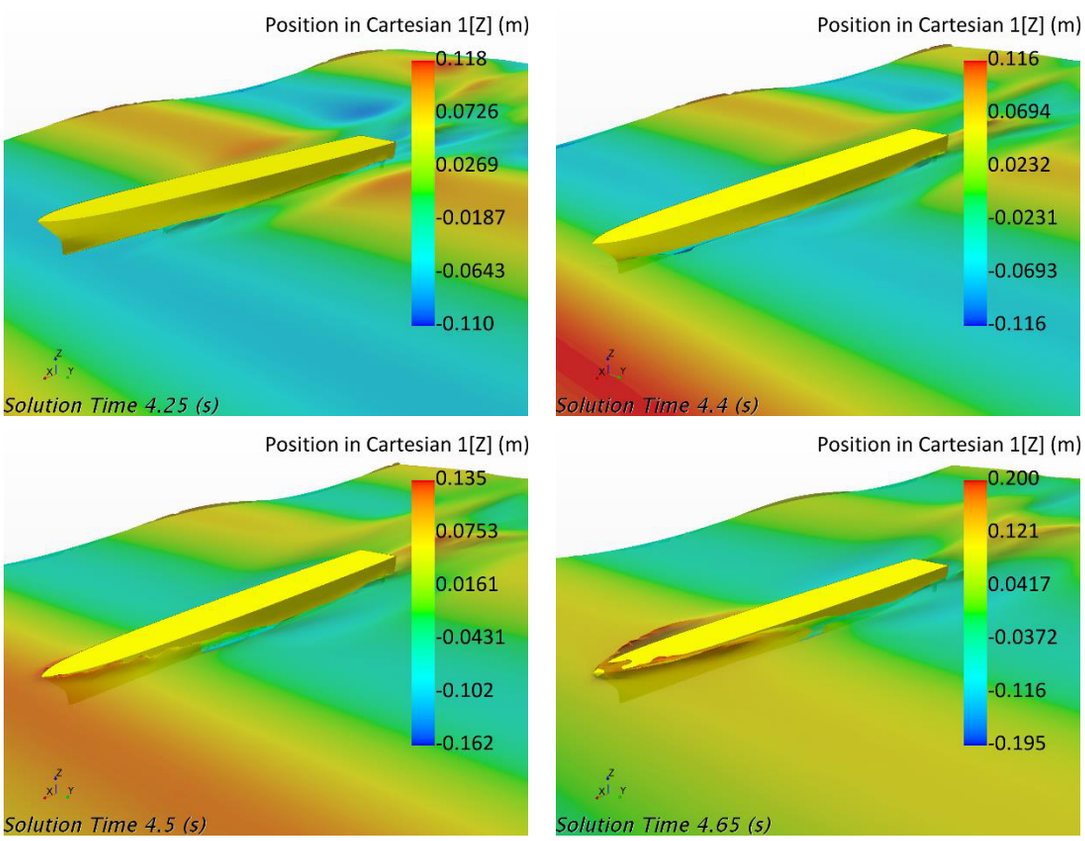


Şekil 15. Fr=0.418 L_{BP}/λ=0.75 için tekne üzerinde meydana gelen güverte ıslanmasının ve gemi hareketinin periyodik olarak değişiminin görünümü

ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

Akış alanı içerisindeki gemi hareketlerinin doğru modellenebilmesi için duvar üzerinde (gemi yüzeyi) meydana gelen y+ değerlerinin doğru hesaplanması gerekmektedir. Altbölüm 3.1'de kullanılan duvar fonksiyonu tanımlanmış olup bu fonksiyon göre değerlerin 30<y+<300 arasında olması gerekir. Hareketin çözümü daimi hale geldikten sonra bir periyot içerisinde meydana gelen meydana gelen y+ değişimleri Şekil 12'de Fr=0.418 için gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde y+ şartının sağlandığı görülebilir. Ağ sıklığının azaldığı teknenin baş formunda y+ değerleri genele göre artış göstermekle birlikte 300 değerinin altında kalmış olup istenilen aralıktadır.

Fr=0.264 L_{BP}/λ=0.5 için Şekil 13'te, Fr=0.264 L_{BP}/λ=1.0 Şekil 14'te dalga deformasyonlarının değişimi gösterilmiş olup teknenin hareketi sebebiyle sinüzoidal dalgada meyd ana gelen bozulmalar Şekil 15'ten rahatlıkla görülebilir. Fr=0.264 L_{BP}/λ=0.5 için Şekil 13'te, Fr=0.264 L_{BP}/λ=1.0 Şekil 14'te dalga deformasyonlarının değişimi gösterilmiş olup teknenin hareketi sebebiyle sinüzoidal dalgada meyd ana gelen bozulmalar Şekil 15'ten rahatlıkla görülebilir.



Şekil 16. Fr=0.543 L_{BP}/λ=0.5 için meydana gelen dövünme

Gemi hareketlerinin modellenmesi ile yer değiştirmelerin elde edilmesinin yanı sıra tekne güvertesinin ıslanıp ıslanmadığı HAD ile elde edilebilir. Tekne güvertesinin ıslanmasıyla birlikte seyahat konforu olumsuz etkilenecek ayrıca güverte üzerinde ek bir su yükü meydana gelecektir. Şekil 15'te Fr=0.418'de ve Şekil 16'da Fr=0.543'te meydana gelen güverte ıslanması ve dövünme gösterilmiştir.

5. Sonuç ve Değerlendirmeler

Bu çalışmada baştan gelen düzenli dalgalar içerisinde baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma bileşik hareketi incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar özetlenecek olursa:

- Baştan gelen düzenli dalgalarda teknenin gerçekleştirilen analizlerde düşük frekanslarda hareketin lineer, yüksek frekanslarda ise nonlineer olduğu görülmektedir. Dalga boyunun artmasıyla birlikte hareketlerin lineerleştiği görülmektedir.
- Frekans analizlerine göre tüm analizlerde bileşenlerden en büyük genlikli sinyalin frekansı (baskın olan frekans) ile karşılaşma frekansının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir ve bu beklenen bir durumdur.
- Tablo 5, Tablo 6 ve Şekil 10 incelendiğinde yüksek frekans yani düşük dalga boylarında teknenin hareket genliği düşüktür ve kütle terimleri baskındır. Dalga boyunun çok uzun olduğu düşük frekans bölgesinde ise teknenin hidrostatik geri getirme kuvvetinin baskın olduğu görülmektedir.
- Karşılaşma frekansının değeri arttıkça hareketlerde harmoniklerin oluşmaya başladığı görülebilir.
- Şekiller 10 ve 11 incelendiğinde dalga boyunun artmasıyla birlikte boyutsuzlaştırılmış transfer fonksiyonlarının değerlerinin de arttığı görülmektedir.
- Ağ yapısı sıklaştırılarak analiz sonuçları iyileştirilebilir. Kullanılan zaman adımının azaltılması ve daha gelişmiş türbülans modellerinin kullanılması sonuçları iyileştirecektir.
- Baştan gelen düzenli dalgalarda meydana gelen ek dalga direncini tespit etmek için ayrı bir çalışma yapılması planlanmaktadır.
- Doğal frekansın ve ek direncin hesaplaması için bu çalışmanın devamı olan ayrı bir makale hazırlanarak tahmin yöntemleri tartışılacaktır.
- Analiz süresinin uzunluğu yöntemin en önemli eksikliğidir. Bununla birlikte analiz edilecek formun CAD modelinin hazırlanması, uygun ağ yapısının tespiti çalışmaları da hesaplama süresini uzatmaktadır.

Referanslar

Carrica, Pablo M, Fu, H., Stern, F., (2011). Computations of self-propulsion free to sink and trim and of motions in head waves of the KRISO Container Ship (KCS) model. Appl. Ocean Res. 33, 309–320. https://doi.org/10.1016/j.apor.2011.07.003

Carrica, Pablo M., Fu, H., Stern, F., (2011). Computatio ns of self-propulsion free to sink and trim and of motions in head waves of the KRISO Container Ship (KCS) model. Appl. Ocean Res. 33, 309–320. https://doi.org/10.1016/j.apor.2011.07.003

Castiglione, T., Stern, F., Bova, S., Kandasamy, M., (2011). Numeric al investigation of the seakeeping behavior of a catamaran advancing in regular head waves. Ocean Eng. 38, 1806–1822. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.09.003

Fossen, T.I., (1996). Guidance and control of ocean vehicles. Automatica. https://doi.org/10.1016/0005-1098(96)82331-4

Frank, (1967). Oscillation of Cylinders in or Below the Free Surface of Deep Fluids.

Havelock, T.H., S., (1928). The Wave Pattern of a Doublet in a Stream. Procs. R. Soc. 121, 515–523.

Hirt, C.W., Nichols, B.D., (1981). Volu me of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. J. Comput. Phys. 39, 201–225. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5

Irvine, M., Longo, J., Stern, F., (2008). Pitch and heave tests and uncertainty assessment for a surfa ce

combatant in regular head waves. J. Sh. Res. 52, 146–153. https://doi.org/10.5957/jsr.2008.52.2.146

ITTC, (2011). Practical Guidelines for Ship CFD Applications. ITTC – Recomm. Proced. Guidel. ITTC 1–8.

Journee, J.M.J., (1992). Experiments and Calculations on Four Wigley Hullforms.

Kahramanoğlu, E., Çakıcı, F., Doğrul, A., (2020). Numerical prediction of the vertical responses of planing hulls in regular head waves. J. Mar. Sci. Eng. 8, 1–18. https://doi.org/10.3390/jmse8060455

Launder, B.E., Spalding, D.B., (1974). The Numerical Computation of Turbulent Flows. Compt. Methods Apply. Mech. Eng. 3, 269–289.

Lewis, F.M., (1929). No Title. Trans. Soc. Nav. Archit. Mar. Eng. 27, 1 –20.

Lewis, E. V., (1989). Principles of Naval Architecture. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York.

LLoyd, A.R.J.M., (1989). Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Water. Chichester, UK.

Özdemir, Y.H., (2014). Gemi Direncinin ve Hareketlerinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Kullanılarak İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi.

Ozdemir, Y.H., Barlas, B., (2017). Numerical study of ship motions and added resistance in regular incident waves of KVLCC2 model. Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng. 9, 149–159. https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2016.09.001

Özdemir, Y.H., Barlas, B., (2018). Free Surface Flow Simulation Around an Appended Hull. BRODOGRADNJA 69, 25–41.

Özdemir, Y.H., Barlas, B., Yilmaz, T., Bayraktar, S., (2013). Numerical and Experimental Study of Turbulent Free Surface Flow for a Fast Ship Model. BRODOGRADNJA 65, 39–54.

Panahi, R., Jahanbakhsh, E., Seif, M.S., (2009). Towards simulation of 3D nonlinear high-speed vessels motion. Ocean Eng. 36, 256–265. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.11.005

Patankar, S. V., Spalding, D.B., (1972). A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-dimensional Parabolic Flows. Int. J. Heat Mass Transf. 15, 17–87.

Sato, Y., Miyata, H., Sato, T., (1999). CFD simulation of 3-dimensional motion of a ship in waves : application to an advancing ship in regular heading waves 108–116.

Şener, B., (2012). Fırkateyn Tipi Tekne Serisi Geliştirilmesi ve Hidrodinamik form Optimizasyonu. Yıldız Teknik Üniversitesi.

Ursell, F., (1949). On the heaving motion of a circular cylinder in the surface of a fluid. Quart. J. Mech. Appl. Math 2, 218–231.

Versteeg, H.K., Malalasekera, W., (1996). An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume MethodNo Title. Longman Scientific and Technical, London UK.

Wackers, J., Koren, B., Raven, H.C., van der Ploeg, A., Starke, A.R., Deng, G.B., Queutey, P., Visonneau, M., Hino, T., Ohashi, K., (2011). Free-Surface Viscous Flow Solution Methods for Ship Hydrodynamics. Arch. Comput. Methods Eng. 18, 1–41. https://doi.org/10.1007/s11831-011-9059-4

Wilcox, D.C., (1998). Turbulence Modeling for CFD, 2nd ed. ed. La Canada Flintridge,CA, USA, DCW Industries Inc.

Gemi ve Deniz Teknolojisi
Sayı: 223, Haziran 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Dergi ana sayfası: http://www.gmoshipmar.org/
Araştırma Makalesi

DÜZELTME

Yorulmaz, M., Öztürk, M.A., Tersanelerde Yüksekte Çalışma Risklerinin AHP Tabanlı PROMETHEE ile Analiz Edilmesi, Gemi ve Deniz Teknolojisi (222), 107-125. DOI: 10.54926/gdt. 1177108)
adlı makale üzerinde yayın döneminde Teknik Editörümüz tarafından tam metinde yer alan yazım eksiklikleri 13.01.2023 tarihinde not olarak bildirilmiş, Madde 1'de yer alan konu Sorumlu Yazar tarafından 19.01.2023 tarihinde not olarak cevaplandırılmış, aynı yazar tarafından diğer bir not iletişimi Madde 2'deki yazar isim sırası ile ilgili olarak 20.01.2023 tarihinde gerşekleştirilmiştir. Konu basım esnasında yazarlar tarafından takip edilmediğinden aşağıdaki düzeltmeler bu sayıda yayınlanmaktadır.

1. Yazarlar Bölüm 3.1 (Sayfa 111) ve Bölüm 3.2 (Sayfa 112) tam metinde eksik olan tablo atıflarını aşağıdaki gibi eklenmesini talep etmişlerdir.

   Sayfa 111, Bölüm 3.1:

   AHP Aşamaları
   Adım 1: Hiyerarşik Yapının Oluşturulması: Problemin çözümüne yönelik amaç belirlenir. Bu amaca ulaşabilmek için kriterler ve alternatifler belirlenerek hiyerarşik yapı oluşturulur (Tablo 1).

   Adım 5: Tutarlılığın Hesaplanması: Bu aşamada değerlendirme sonuçlarının tutarlılığı hesaplanır. Sonuçların tutarlı olduğunu bu değerin 0.1'den küçük olmasıyla anlarız. Bu durum sağlanmazsa değerlendirme tekrar gözden geçirilmelidir (Özdemir, 2020). Tutarlılık indeks değerleri Tablo 3'de verilmiştir.

   Sayfa 112, Bölüm 3.2:

   PROMETHEE Uygulama Adımları
   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 (Tablo 4).
   Adım 2: Kriterler için tercih fonksiyonları tanımlanır (Tablo 5).
   Adım 3: Tercih fonksiyonları ile alternatif çiftleri için ortak tercih fonksiyonları belirlenir (Tablo 6).

2. Yazarlar tarafından dergi editörlüğüne iletilen yazılı talebine istinaden yazarların isim sırasının aşağıdaki gibi değiştirilmesi dergi yayın kurulu tarafından onaylanmıştır.

Murat Yorulmaz[1], Mehmet Arif Öztürk[2]

[1] Denizcilik İşletmeleri Yönetimi Bölümü, Denizcilik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye
[2] İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli University, Kocaeli, Türkiye

[1] murat.yorulmaz@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5736-9146
[2] (Corresponding author) marifozturk@hotmail.com, ORCID: 0000-0002-0410-1752

GMO Journal of Ship and Marine Technology
Issue: 223, June 2023
ISSN: 1300-1973, e-ISSN: 2651-530X, Journal homepage: http://www.gmoshipmar.org/

ERRATUM

Referencing the following paper written in Turkish (Yorulmaz, M., Öztürk, M.A., Analyzing The Risks of Working at Height in Shipyards with AHP-Based PROMETHEE, Gemi ve Deniz Teknolojisi (222), 107-125. DOI: 10.54926/gdt.1177108) the following corrections in Item 1 were requested by our Technical Editor on 13.01.2023 and replied by the corresponding author on 19.01.2023. A further communication established by the authors on 20.01.2023 about Item 2. As the corrections were not checked out by the authors the corrections are given in this issue.

1. The authors sent the following corrections on Section 3.1 (Page 111) and Section 3.2 (Page 112) where the missed table citations have been made-up as follows:

Page 111, Section 3.1:

Paper language is Turkish.

AHP Aşamaları
Adım 1: Hiyerarşik Yapının Oluşturulması: Problemin çözümüne yönelik amaç belirlenir. Bu amaca ulaşabilmek için kriterler ve alternatifler belirlenerek hiyerarşik yapı oluşturulur (Tablo 1).

Adım 5: Tutarlılığın Hesaplanması: Bu aşamada değerlendirme sonuçlarının tutarlılığı hesaplanır. Sonuçların tutarlı olduğunu bu değerin 0.1'den küçük olmasıyla anlarız. Bu durum sağlanmazsa değerlendirme tekrar gözden geçirilmelidir (Özdemir, 2020). Tutarlılık indeks değerleri Tablo 3'de verilmiştir.

Page 112, Section 3.2:

PROMETHEE Uygulama Adımları
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 (Tablo 4).
Adım 2: Kriterler için tercih fonksiyonları tanımlanır (Tablo 5).
Adım 3: Tercih fonksiyonları ile alternatif çiftleri için ortak tercih fonksiyonları belirlenir (Tablo 6).

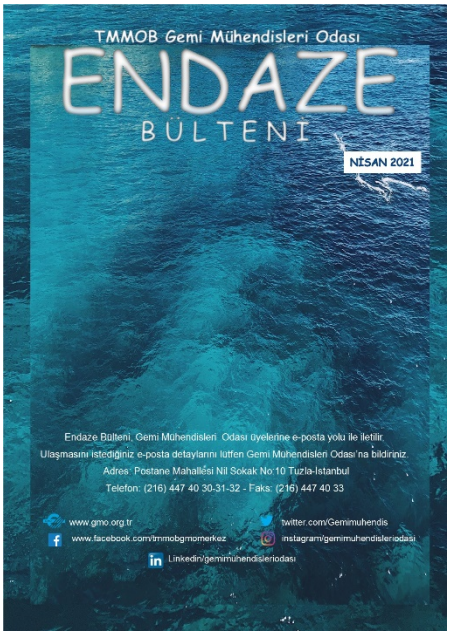
2. After the written request of the authors to the journal editorial board, the change of author name order was approved by the journal editorial board.

Murat Yorulmaz[1], Mehmet Arif Öztürk[2]

[1] Maritime Faculty, Kocaeli University, Kocaeli, Türkiye
[2] Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Occupational Health and Safety, Kocaeli University, Kocaeli, Türkiye

[1] murat.yorulmaz@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5736-9146
[2] (Corresponding author) marifozturk@hotmail.com, ORCID: 0000-0002-0410-1752

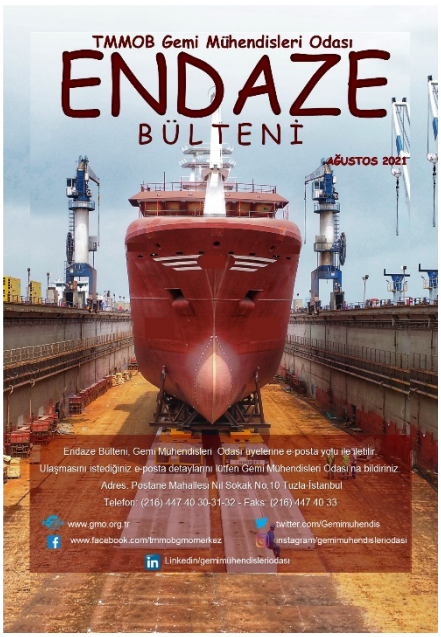
TMMOB Gemi Mühendisleri Odası
ENDAZE
BÜLTENİ
MART 2021
Endaze Bülteni, Gemi Mühendisleri Odası üyelerine e-posta yolu ile iletilir.
Ulaşmasını istediğiniz e-posta detaylarını lütfen Gemi Mühendisleri Odası'na bildiriniz.
Adres: Postane Mahallesi Nil Sokak No:10 Tuzla-İstanbul
Telefon: (216) 447 40 30-31-32 - Faks: (216) 447 40 33
www.gmo.org.tr
twitter.com/Gemimuhendis
www.facebook.com/tmmobgmomerkez
instagram/gemimuhendisleriodasi
Linkedin/gemimühendisleriodası


TMMOB Gemi Mühendisleri Odası
ENDAZE
BÜLTENİ
NİSAN 2021
Endaze Bülteni, Gemi Mühendisleri Odası üyelerine e-posta yolu ile iletilir.
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
twitter.com/Gemimuhendis
www.facebook.com/tmmobgmomerkez
instagram/gemimuhendisleriodasi
Linkedin/gemimühendisleriodası

TMMOB Gemi Mühendisleri Odası
ENDAZE
BÜLTENİ
MAYIS 2021
Endaze Bülteni, Gemi Mühendisleri Odası üyelerine e-posta yolu ile iletilir.
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
twitter.com/Gemimuhendis
www.facebook.com/tmmobgmomerkez
instagram/gemimuhendisleriodasi
Linkedin/gemimühendisleriodası

TMMOB Gemi Mühendisleri Odası
ENDAZE
BÜLTENİ
HAZİRAN 2021
Endaze Bülteni, Gemi Mühendisleri Odası üyelerine e-posta yolu ile iletilir.
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
twitter.com/Gemimuhendis
www.facebook.com/tmmobgmomerkez
instagram/gemimuhendisleriodasi
Linkedin/gemimühendisleriodası

TMMOB Gemi Mühendisleri Odası
ENDAZE
BÜLTENİ
TEMMUZ 2021
Endaze Bülteni, Gemi Mühendisleri Odası üyelerine e-posta yolu ile iletilir.
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
twitter.com/Gemimuhendis
www.facebook.com/tmmobgmomerkez
instagram/gemimuhendisleriodasi
Linkedin/gemimühendisleriodası


TMMOB Gemi Mühendisleri Odası
ENDAZE
BÜLTENİ
AĞUSTOS 2021
Endaze Bülteni, Gemi Mühendisleri Odası üyelerine e-posta yolu ile iletilir.
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
twitter.com/Gemimuhendis
www.facebook.com/tmmobgmomerkez
instagram/gemimuhendisleriodasi
Linkedin/gemimühendisleriodası

TMMOB Gemi Mühendisleri Odası
ENDAZE
BÜLTENİ
EYLÜL 2021
Endaze Bülteni, Gemi Mühendisleri Odası üyelerine e-posta yolu ile iletilir.
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
twitter.com/Gemimuhendis
www.facebook.com/tmmobgmomerkez
instagram/gemimuhendisleriodasi
Linkedin/gemimühendisleriodası

TMMOB Gemi Mühendisleri Odası
ENDAZE
BÜLTENİ
EKİM 2021
Endaze Bülteni, Gemi Mühendisleri Odası üyelerine e-posta yolu ile iletilir.
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
twitter.com/Gemimuhendis
www.facebook.com/tmmobgmomerkez
instagram/gemimuhendisleriodasi
Linkedin/gemimühendisleriodası

TMMOB Gemi Mühendisleri Odası
ENDAZE
BÜLTENİ
KASIM 2021
Endaze Bülteni, Gemi Mühendisleri Odası üyelerine e-posta yolu ile iletilir.
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
twitter.com/Gemimuhendis
www.facebook.com/tmmobgmomerkez
instagram/gemimuhendisleriodasi
Linkedin/gemimühendisleriodası

TÜRKİYE'NİN TEKNOLOJİDE ÖNCÜ LİDER KLAS KURULUŞU

Bağımsız, Tarafsız, Güvenilir, Uzman

60 yıl

TÜRK LOYDU

#60YıldırGüvenle