



SAKARYA UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

JOIN MET

JOURNAL OF MARINE AND ENGINEERING TECHNOLOGY

Volume: 5 | Issue: 01 | Year: 2025 | e-ISSN: 2791-7134



Journal of Marine and Engineering Technology

June 2025

Volume : 5 | Issue : 01

e-ISSN: 2791-7134

Hakkında - About

Journal of Marine and Engineering Technology is in the category of peer-reviewed, online and open access international journal published by Sakarya University of Applied Sciences (SUBU) Scientific Publications Coordinatorship (BIYAK) SUBU, published half annually (June/December) and founded in 2021, is a multidisciplinary journal which covers broad and interdisciplinary aspects of marine and ocean engineering. The journal spans the disciplines of civil, mechanical, electrical, material, petroleum, coastal and oceanographic engineering, applied oceanography and meteorology and applied mathematics to bridge the gap between the design process and operation. JoINMET accepts scientific and technological contributions on several related topics including, but not limited to: maritime business, maritime transportation engineering, marine engineering, supply chain management, logistics, logistics engineering, maritime education, maritime law, marine tourism, and all relevant fields of transport and maritime which have not been published before regarding its publication policy. JoINMET is an international refereed journal and publishes manuscripts in Turkish/English. In all submitted articles, a double-blind peer-review system is used. JoINMET is indexed by ASOS index, Asian Science Citation Index (ASCI), Scilit, and CrossRef.

Dil / Language

Türkçe - İngilizce / Turkish - English

Yayın Periyodu / Publication Period

Yılda iki kere yayınlanır / Haziran - Aralık
Published twice a year / June - December

İndeksler - Indexes



İletişim

Contact

SUBU Denizcilik MYO, Alandere Mahallesi Karadeniz Sahil Yolu Caddesi No:213/1, Sakarya, Türkiye

Tel: +90 264 616 17 02

Web: dergipark.org.tr/tr/pub/joinmet

E-mail: joinmet@subu.edu.tr

Journal Board

İmtiyaz Sahibi / Owner

Prof. Dr. Mehmet SARIBIYIK, Sakarya University of Applied Sciences

Baş Editör / Editor-in-Chief

Prof. Dr. Nuri AKKAŞ, Sakarya University of Applied Sciences

Editörler - Editors

Assoc. Prof. Dr. Hüseyin ELÇİÇEK, Yıldız Technical University

Assist. Prof. Dr. S. M. Esad DEMİRCİ, Sakarya University of Applied Sciences

Dr. Refik CANIMOĞLU, Sakarya University of Applied Sciences

Editör Kurulu / Editorial Board

Prof. Dr. Metin ÇELİK, Istanbul Technical University

Prof. Dr. Emre AKYÜZ, Istanbul Technical University

Prof. Dr. Behbood ISSA-ZADEH, University of Gibraltar

Prof. Dr. Lotfi BENSAHLA-TALET, University Orani Ahmed Benbella

Prof. Dr. Blagovest BELEV, Nikola Vaptsarov Naval Academy

Assoc. Prof. Dr. Kadir ÇİÇEK, Istanbul Technical University

Assoc. Prof. Dr. Görkem KÖKKÜLÜNK, Yıldız Technical University

Assoc. Prof. Dr. Mehmet ÖNAL, İzmir Katip Çelebi University

Assoc. Prof. Dr. Ertuğrul AYYILDIZ, Karadeniz Technical University

Asst. Prof. Dr. Arda TOYGAR, Ordu University

Asst. Prof. Dr. Kumaran PACHAIYAPPAN, Vinayaka Missions Research Foundation

Asst. Prof. Dr. Hüseyin AGGÜMÜŞ, Sırnak University

Asst. Prof. Dr. Ahmed SAQR, Mansoura University

Asst. Prof. Dr. Fatih OKUMUŞ, Mersin University

Asst. Prof. Dr. Halil İbrahim SÖNMEZ, Van Yüzüncü Yıl University

Dr. Ali AVCI, Hakkari University

Dr. Nyayu AISYAH, Universitas Gadjah Mada

Dr. Fatih SORGULU, Yıldız Technical University

Dr. Korhan KOR, Turkish Petroleum Offshore Technology Center

Dr. Burak Yunus ÇETİN, Stanford University

Dr. Saif Ali KADHIM, University of Technology

Dil Editörü / Language Editor

Assist. Prof. Dr. Orhan ATAMAN, Sakarya University of Applied Sciences

Mizanpaj Editörü / Layout Editor

Lect. Feyzullah DEMİRCİ, Sakarya University of Applied Sciences

Sekreterya / Secreteriat

Lect. Ömer Faruk DEMİROK, Sakarya University of Applied Sciences

Teknik Editörler / Technical Editors - Yayın Kurulu / Publication Board

Bilimsel Yayınlar Koordinatörlüğü, Sakarya University of Applied Sciences

Assoc. Prof. Dr. Hüseyin ELÇİÇEK, Yıldız Technical University

Assist. Prof. Dr. S. M. Esad DEMİRCİ, Sakarya University of Applied Sciences

Assist. Prof. Dr. Aylin BİLGİN, Sakarya University of Applied Sciences

İçerik / Content

Araştırma Makaleleri / Research Articles

Sayfa / Page

01

Düzenli Depolama Alanına Yönelik Yer Seçimi Kriterlerinin Değerlendirilmesi:
Sakarya İli Örneği

1 - 20

*Evaluation of Site Selection Criteria for Sanitary Landfills: The Case of Sakarya Province**Research Article / Araştırma Makalesi**Samet Furkan SAĞLAM, Sinan ESEN*

02

Investigation of Ballast Water Treatment System Selection Parameters and Cost
Analysis: Tanker Ship Application

21 - 37

*Ballast Suyu Arıtma Sistemi Seçim Parametrelerinin İncelenmesi ve Maliyet Analizi: Tanker Gemisi Uygulaması**Research Article / Araştırma Makalesi**Serkan BARIS, Sayit OZBEY, Ismet TIKIZ*

03

An Analytical Study of Ship Deficiencies Identified During Port State Control: A
Case Study of Kocaeli Port

38 - 49

*Liman Devleti Kontrolü Sırasında Belirlenen Gemi Eksiklikleri Üzerine Analitik Bir Çalışma: Kocaeli Limanı Örneği**Research Article / Araştırma Makalesi**Uğur AKBAS, Ozan Hikmet ARICAN*

04

Preventive Strategies for Risks During Pilot Transfer Operations: A Fuzzy
Analytical Approach with Expert-Driven Risk Criteria

50 - 60

*Kılavuz Kaptan Transfer Operasyonları Sırasındaki Risklere Yönelik Önleyici Stratejiler: Uzman Tabanlı Risk Kriterleriyle Bulanık Analitik Bir Yaklaşım**Research Article / Araştırma Makalesi**Mehmet DOĞRU, Umur BUCAK*

05

Karayolları Alttemel ve Temel Tabakalarının Abaqus Programı ile Modellemesi

61 - 75

*Modeling of highway subbase and base layers using Abaqus software**Research Article / Araştırma Makalesi**Sefade Beste ÇARICI, Jülide ÖNER*

Düzenli Depolama Alanına Yönelik Yer Seçimi Kriterlerinin Değerlendirilmesi: Sakarya İli Örneği

Samet Furkan SAĞLAM^{1*} , Sinan ESEN² 

¹ Uluslararası Ticaret ve Lojistik Programı, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye, 22502505012@subu.edu.tr

² Uluslararası Ticaret ve Lojistik Bölümü, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye, sinanesen@subu.edu.tr

ÖZ

Günümüzde nüfus artışı ve kentleşmeyle birlikte artan tüketim katı atık üretiminde belirgin bir artışa neden olmaktadır. Atıkların sağlıklı ve ekonomik bir şekilde yönetilmesi artan tüketim ve kentleşmeye bağlı olarak daha önemli hale gelmiştir. Çevre sorunu olarak karşımıza çıkan bu problemin çözülebilmesi için atıkların düzenli ve etkin bir şekilde bertaraf edilmesi gerekmektedir. Düzenli depolama, uygulanabilirliği ile yönetim kolaylığı açısından atıkların çevreye zarar vermeyecek şekilde depolanarak bertaraf edilmesini sağlayan ve en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Bu çalışmanın amacı, Sakarya ilinde mevcut düzenli depolama alanına alternatif yeni bir düzenli depolama alanı yapılması durumunda yer seçimi kriterlerinin değerlendirilmesidir. Sakarya ili özelinde daha önce benzer bir çalışmaya rastlanılmaması bu çalışmayı önemli kılmaktadır. Yer tespiti çalışmasında, literatürde ağırlıklı kullanılan kriterler dikkate alınmış ve düzenli depolama alanı yer seçimi amacıyla kriterler belirlenmiştir. Bu kriterlerden yararlanarak, BW (Best-Worst Method) yöntemine uygun olarak uzman görüşleri alınmıştır. Uzmanlardan, düzenli depolama alanı yer seçimini etkileyebilecek 5 ana ve 22 alt kriterin “En Önemli” ve “En Az Önemli” olanlarını belirlemeleri ve ardından diğer kriterler ile ikili karşılaştırma yapmaları istenmiştir. 12 farklı uzman görüşü alınarak sonuçların kendi içinde tutarlılığı test edilmiş ve sonuçların tutarlı olduğu belirlenmiştir. Uzman görüşleri alınarak yapılan çalışmanın sonucunda elde edilen bulgular doğrultusunda, en önemli kriter “yeraltı ve yüzey suları”, en az önem derecesine sahip kriter ise “kamu kurumlarıyla işbirliği” olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Düzenli depolama alanı, atık yönetimi, BW yöntemi, yer seçimi kriterleri

*Sorumlu Yazar e-postası: 22502505012@subu.edu.tr

Cite as: Sağlam S.F. & Esen, S. (2025). Düzenli Depolama Alanına Yönelik Yer Seçimi Kriterlerinin Değerlendirilmesi: Sakarya İli Örneği, *Journal of Marine and Engineering Technology*, 5(1), 1-20. <https://doi.org/10.58771/joinmet.1611887>

Evaluation of Site Selection Criteria for Sanitary Landfills: The Case of Sakarya Province

ABSTRACT

In contemporary times, population growth and urbanization have significantly contributed to an increase in consumption, resulting in a substantial rise in solid waste production. The management of waste in a healthy and economical manner has become increasingly important due to this growing consumption and urbanization. The solution to this pressing environmental issue lies in the systematic and effective disposal of solid waste. Among the most widely adopted methods is sanitary landfill disposal, which ensures the containment and elimination of waste in an environmentally safe manner, offering practical applicability and ease of management. The objective of this study is to evaluate the site selection criteria for a potential alternative sanitary landfill in Sakarya Province, should a new site be required. The absence of a similar study in Sakarya highlights the significance of this research. During the site selection process, criteria commonly utilized in the literature were considered, and specific criteria were established for the purpose of sanitary landfill site selection. Expert opinions were collected using the (BWM) Best Worst Method approach. Experts were asked to identify the "Most Important" and "Least Important" factors among five main criteria and 22 sub-criteria that could influence landfill site selection. They were also requested to conduct pairwise comparisons of these criteria. The consistency of the results was tested based on inputs from 12 different experts, and the findings were deemed consistent. According to the results of the study, informed by expert evaluations, the most critical criterion was identified as "groundwater and surface water," while the least important criterion was determined to be "cooperation with public institutions."

Keywords: Sanitary landfill, waste management, BWM method, site selection criteria

1 Giriş

Kentleşme ve hızlı nüfus artışıyla birlikte atık miktarlarında göze çarpan artışlar meydana gelmektedir. Bu durum, atıkların ekonomik ve sağlıklı bir şekilde yönetilmesi konusunu geçmiş yıllara kıyasla daha önemli bir hale getirmektedir. Atık miktarlarındaki artışla beraber ciddi bir çevre problemi de ortaya çıkmaktadır. Bu çevre sorununun çözülebilmesi için katı atıkların düzenli ve etkin bir şekilde bertaraf edilmesi gerekmektedir. Uygulanabilirliği ve yönetim kolaylığı açısından bertaraf yöntemlerinden en yaygın kullanılanı düzenli depolama yöntemidir.

Düzenli depolama alanları, atıkların insan ve çevre sağlığına zarar vermeden depolanmasını sağlayan, özel şartlar altında tasarlanan ve yönetilen alanlardır. Düzenli depolama alanları, atıkların geri dönüştürülemediği ve diğer yöntemler ile bertaraf edilemediği durumlarda tercih edilen bir yöntem olduğundan dolayı her geçen gün düzenli depolama ihtiyacı artmaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu' nun (TÜİK) 2022 yılı verilerine göre, Türkiye' de kişi başı günlük atık miktarı 1,03 kg olarak belirtilmiştir. Sakarya ili için bu değer 0,91 kg' dır. TÜİK verilerine göre, atık bertaraf ve geri kazanım tesislerinde 2020 yılında 127,4 milyon ton atık işlenmiştir. Bu miktarın 77,8 milyon tonu düzenli depolama alanlarında, 570 tonu yakma tesislerinde bertaraf edilmiş, 49,1 milyon tonu geri kazanım tesislerinde işlenerek geri kazanılmıştır. 2022 yılında atık bertaraf ve geri kazanım tesislerinde 133,2 milyon ton atık işlenmiştir. Bu miktarın 81 milyonu düzenli depolama alanlarında, 450 tonu yakma tesislerinde bertaraf edilmişken, 51,7 milyon tonu geri kazanım tesislerinde işlenerek geri kazanılmıştır (TÜİK, Atık İstatistikleri, 2023). 2024 yılında miktarlardaki artışlardan da görüleceği üzere her geçen gün düzenli depolama alanı ihtiyacı artmaktadır. Sakarya ili özelinde, günlük ortalama 441 ton katı atık toplanmakta ve depolama sahasında bertaraf edilmektedir. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024 yılı

ilk çeyreğinde düzenli depolama tesisi sayısını 94' e çıkardıklarını ve 1248 belediyede 75,9 milyon kişiye hizmet sağladıklarını belirtmiştir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024). TÜİK verilerine göre, atık bertaraf ve geri kazanım tesislerinde 2022 yılında 133,2 milyon ton atık işlenmiştir. Bu miktarın 81,4 milyonu düzenli depolama alanlarında, 450 tonu yakma tesislerinde bertaraf edilmişken, 51,7 milyon tonu geri kazanım tesislerinde işlenerek geri kazanılmıştır (TÜİK, Atık İstatistikleri, 2023). Düzenli depolama alanlarının seçiminde ve yönetiminde dünya çapında ve ülke genelinde farklı mevzuat ve yönetmelikler bulunmaktadır.

Türkiye'de çevre koruma açısından temel mevzuat olan 2872 Sayılı Çevre Kanunu (1983) çıkarılarak bütün canlıların ortak varlığı olan çevrenin, sürdürülebilir çevre ve sürdürülebilir kalkınma ilkeleri doğrultusunda korunması amaçlanmıştır. 3030 Sayılı Büyükşehir Belediyesi Kanunu (1984) ile atıkların toplanması, toplanma yerlerinin belirlenmesi, değerlendirilmesi ve imha işlemi için gerekli tesislerin kurulması, işletilmesi veya işletirilmesi işleri ile ilgili büyükşehir belediyeleri görevlendirilmiştir. 2010 yılındaki Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik ile atıkların düzenli depolama yöntemi ile bertarafı amaçlanmıştır. Türkiye, Avrupa Birliği (AB) üyelik sürecinde çevre yönetimi ve atık politikaları alanında bazı yasal düzenlemelerde değişiklik yapmıştır. Bunlardan en önemlileri 5491 sayılı Çevre Kanunu'nda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun (2006) ve 2872 sayılı Çevre Kanunu'nda (1983) kapsamlı değişiklikler yapılmasıdır.

Türkiye, 2019 yılında yürürlüğe giren Sıfır Atık Yönetmeliği ile atık yönetimi konusunda önemli bir adım atmıştır. Sıfır atık projesinin uygulamaya koyulmasından itibaren; %13 olan geri kazanım oranı 2023 yılı itibariyle %34,92 oranına yükselmiştir, toplamda yaklaşık 59,9 milyon ton atık işlenerek geri kazanılmıştır, toplanan ve geri kazanılan atıklardan toplamda 185 milyar TL ülke ekonomisine kazanç sağlanmıştır. Ayrıca; 2,6 milyar kWh enerji tasarrufu, 819 milyon metreküp su tasarrufu, 104 milyon metreküp depolama alanından tasarruf sağlanmış, 5,9 milyon ton sera gazı salınımı önlenmiş, 498 milyon ağaç kurtarılmış, 127 milyon varil petrolden tasarruf edilmiştir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2024).

Düzenli depolama alanları ile ilgili dünya çapında, her ülkenin kendi ihtiyaçları doğrultusunda mevzuat, yönetmelik ve uygulamalar bulunmaktadır. Avrupa Birliği; yayınladıkları Atık Yönetim Çerçeve Direktifinde, atıklar ve düzenli depolama alanları için zorunlu teknik şartlar getirerek atıkların düzenli depolanması sebebiyle çevre üzerinde oluşabilecek olumsuz etkileri azaltmayı amaçlamıştır (Veral & Yiğitbaşıoğlu, 2018). Amerika Birleşik Devletleri'nde; Kaynak Koruma ve Kurtarma Yasası (Resource Conservation and Recovery Act, RCRA) ile düzenli depolama alanlarının tasarımı, işletmesi ve kapatma şartları belirlenmiştir (Chemwatch, 2024). Kanada; Çevre Koruma Yasası ile düzenli depolama alanlarının yer seçimi, inşası ve işletilmesi ile ilgili standartlar belirlemiş ve geri dönüşümü teşvik ederek atık yönetimini desteklemiştir (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2019).

Dünya çapında ve ülke genelinde düzenli depolama alanı yer seçimi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Yer seçimleri tek seferlik yapıldığından dolayı genel olarak süreçler uzun sürmektedir. Düzenli depolama alanları ile ilgili yapılan çalışmaların genellikle çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleriyle ele alındığı gözlenmiştir. Son zamanlarda yer seçimlerine ilişkin yapılan çalışmalarda kriter ağırlıklarını belirlemek amacıyla BWM (Best Worst Method) yöntemi kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada da BWM yöntemi tercih edilmiş, yöntemin diğer yöntemlere göre üstünlükleri ve avantajları ilerleyen bölümlerde açıklanmıştır.

Güler (2016) tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında, İstanbul ilinde alternatif düzenli depolama alanlarını belirlemek amacıyla CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) ve AHY (Analitik Hiyerarşi Süreci) yöntemlerini kullanmıştır. Güler çalışmasında; arazi kullanımı, jeoloji, yerleşim alanları, yüzey

suları, nüfus yoğunluğu, havalimanları ve korunan alanlar çevresel faktörler; eğitim, katı atık aktarma istasyonları, arazi değerleri ve karayolları ekonomik faktörler olarak belirlemiştir. Bu faktörler ile düzenli depolama alanlarının çevresel etkileri ve yer seçim sürecinde ekonomik etkiler değerlendirilmiştir. Yıldırım (2011) tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında, İzmir ili için düzenli depolama alanı yer seçiminde CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) ve AHY (Analitik Hiyerarşi Süreci) yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmada; çevresel, demografik, ekonomik ve lojistik kriterler ana kriterler olarak değerlendirilerek düzenli depolama alanı yer seçimi yapılmaya çalışılmıştır. Wang, Qin, Li ve Chen (2009) Pekin'deki düzenli depolama alanı yer seçimi çalışmasında mekânsal bilgi teknolojilerini ve AHP' yi kullanmışlardır. Bu çalışmada, gerçek koşullar doğrultusunda ekonomik faktörler göz önünde bulundurularak AHP yöntemi ile faktörlerin ağırlıkları hesaplanmıştır. Kriter ağırlıklarına bağlı olarak 'en iyi, 'iyi' ve 'uygun olmayan' depolama alanları belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, çalışma bir konumlandırma metodolojisi ve temel atık yönetimi sorununun çözümünde karar vericiye destek vermiştir. Aydemir (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada; çevresel, ekonomik, sosyal ve zeminsel kriterler Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) kullanılarak Ankara ili ve çevresi için potansiyel katı atık depolama tesisi yerleri değerlendirilmiştir. Çalışmada Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevresel Etki Değerlendirme (ÇED) İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü'nden yedi, Ankara'daki mevcut depolama alanını yöneten firmadan iki uzman ile görüşülmüş ve toplamda dokuz uzmandan farklı görüşler alınmıştır. Çalışma sonucunda kriterlerin ağırlıkları belirlenmiş ve düzenli depolama alanı için en uygun yer önerileri tespit edilmiştir. Sheoran ve Parmar (2020), gerçekleştirdikleri çalışmada, Yeni Delhi'nin Gurugram şehrinde düzenli depolama sahasının belirlenmesi için Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) kullanmışlardır. Yol ağları, su kütlelerinin varlığı, yerleşim yerleri ve yer altı su tablalarının derinliği gibi kriterler belirlenerek bu kriterlerin ağırlıkları hesaplanmıştır. İlk aşamada, Gurugram bölgesinde AHP yöntem analizi esas alınarak düzenli depolama alanı için beş farklı alan belirlenmiştir. Ardından çalışma sonucunda, çalışılan yerel kurumlara yakın olmaları ve yol ağının uygun olması sebebiyle iki farklı bölge, düzenli depolama alanı için potansiyel bölge olarak gösterilmiştir. Ali ve Ahmad (2020) tarafından yapılan çalışmada, Hindistan'ın Kolkata şehri için alternatif uygun düzenli depolama alanı yer seçimini amaçlamışlardır. Çalışmada, 20 farklı kriter kullanılarak kriterlerin ağırlıkları bulanık analitik hiyerarşi süreci ile hesaplanmıştır. Çalışma alanında ilk aşamada 16 farklı alternatif alan belirlenmiştir. Bu alanlardan 13'ü mevcut arazi kullanımı, halkın kabulü, ulaşım ve yerel çevresel sorunlar sebebiyle depolama sahası kullanımı için uygun görülmemiştir. Geriye kalan 3 farklı alternatif alan değerlendirilebilir konum olarak çalışma sonunda tavsiye edilmiştir. Hanine vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, Fas'ın Kazablanka bölgesinde düzenli depolama alanı yer seçimi üzerine çalışılmıştır. Çalışmada, depolama sahası için uygun yerlerin belirlenmesi amacıyla politik, ekonomik, çevresel ve sosyal faktörler dikkate alınmıştır. Bu kriterlerin ağırlıkları analitik hiyerarşi süreci (AHP) ve bulanık düzen tekniği kullanılarak değerlendirilmiştir. Alternatif alanlar ise TOPSIS yöntemi ile sıralanmıştır. Çalışma sonucunda, gelecekte yapılacak olan bir başka çalışmada, ÇKKV'nin MACBETH, ELECTRE ve VIKOR gibi diğer tekniklerde kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması tavsiye edilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar değerlendirildiğinde, tesis yeri seçimi problemlerinin genellikle çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleriyle ele alındığı gözlenmiştir. Özellikle bu tür yer seçimi konularında en yaygın olarak kullanılan yöntemler sırasıyla; AHP, CBS, TOPSIS ve Bulanık sistemlerdir.

2 Metodoloji

Genel olarak bazı seçenekler arasından alternatiflerin belirlenmesi ve ilgili alternatiflerden en uygun olanının seçilmesi süreci karar verme olarak tanımlanmaktadır. Bu süreçte, özellikle alternatiflerin değerlendirilmesi ve seçilmesinde Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri sıklıkla tercih edilmektedir. ÇKKV yöntemleri, karar verme süreçlerinde farklı bakış açılarına dayalı olarak kriterlerin

belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca, ÇKKV yöntemleri bu süreçleri daha şeffaf ve anlaşılır bir hale getirerek, alınan kararların daha tutarlı ve anlamlı olmasına katkıda bulunmaktadır. Son zamanlarda literatürde BWM yöntemi sıklıkla tercih edilmektedir. Bu çalışmada da kriter ağırlıklarını belirlemek ve değerlendirmek için BWM yöntemi tercih edilmiştir. BWM yönteminin bu çalışmada tercih edilmesinin nedeni diğer yöntemlere göre bazı üstünlükleri ve avantajlarının olmasıdır. Bu bağlamda;

- Karşılaştırma sayıları açısından BWM yönteminde sadece en iyi ve en kötü kriterler karşılaştırılırken; diğer yöntemlerde tüm kriterler arasında karşılaştırma yapılmaktadır.
- Tutarlılık açısından, BWM yönteminde daha az karşılaştırma yapıldığından dolayı tutarlılık oranı diğer yöntemlere göre daha yüksektir.
- Hesaplama yükü açısından, BWM yöntemi hesaplama ve uygulama süreci olarak diğer yöntemlere kıyasla çok daha basit ve kısa sürelidir (Çakır & Can, 2019; Bayrakçı-Arslan, 2022; Ahmad vd., 2017).

BWM yöntemini, özellikle AHP yöntemi ile kıyasladığımızda belirgin bazı özellikleri öne çıkmaktadır. Bu özelliklerden bazıları;

- Karşılaştırma sayıları açısından BWM yöntemi AHP yöntemine göre sadece en iyi ve en kötü kriterleri karşılaştırmaktadır. Bu durum daha az sayıda karşılaştırma yapılmasına olanak sağlamaktadır.
- BWM yönteminde daha az karşılaştırma yapıldığından dolayı AHP yöntemine kıyasla tutarsızlık oranı daha düşüktür.
- En iyi ve en kötü kriterlere dayalı bir kıyaslama yapıldığından AHP yöntemine göre daha az veri girişi yapılmaktadır.
- BWM yönteminde değerlendirme süreci AHP yöntemine göre daha kısa olduğundan, hesaplama daha hızlı ve daha az karmaşıktır.
- BWM yöntemi, özellikle kriter sayısının fazla olduğu durumlarda AHP yöntemine göre daha kullanışlı ve pratiktir.
- BWM yönteminde ağırlıklar tutarlılık sınırları içerisinde hesaplandığından dolayı AHP yöntemine kıyasla daha doğru sonuçlar ortaya koymaktadır (Çakır & Can, 2019; Bayrakçı-Arslan, 2022; Ahmad vd., 2017).

BWM 2015 yılında Jafar Rezaei tarafından geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntem, kriterlerin ve alt kriterlerin ağırlıklarını elde etmek için kullanılan karşılaştırmalı bir yöntemdir. BWM, en iyi (best) ve en kötü (worst) kriterleri belirleyerek, bu iki kriterle yapılan karşılaştırmalar üzerinden diğer kriterlerin ağırlıklarını hesaplamaktadır. BWM yönteminin formülünü ve adımlarını şu şekilde özetleyebiliriz (Rezaei, 2015):

Adım 1: Bir dizi karar kriteri tanımlanır. Karar verici, tüm kriterler arasından bir tanesini en iyi ve bir tanesini de en kötü kriter olarak seçer. Bu aşamada karar vericinin seçenekler hakkında karar verebilmesi için bir dizi n kriterini Eşitlik (1)' de olduğu gibi tanımlaması gerekir.

$$C=\{C_1, C_2, \dots, C_n\} \quad (1)$$

Adım 2: En iyi ve en kötü kriterler tanımlanır. Bu aşamada, karar vericiden kriterlerin önem derecesine göre en iyi ve en kötü kriteri belirlemesi istenir.

Adım 3: Seçilen en iyi kriterin diğer kriterlere göre tercih edilmesi ve 1 ile 9 arasında bir sayının kullanılarak belirlenmesi aşamasıdır. Bu aralıkta bir sayı kullanılarak diğer tüm kriterlere kıyasla en iyi kriterin tercihi belirlenmektedir. Bu adımda, karar verici En İyi-En Kötü adlı bir vektörü Eşitlik (2)' de olduğu gibi belirler.

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, a_{B3}, \dots, a_{Bn}) \quad (2)$$

Burada a_{Bj} , en iyi B kriterinin j kriterine göre tercihini gösterir ve $a_{BB}=1$ olduğu sonucuna varılır.

Adım 4: Bu aşamada 1 ile 9 arasında bir sayı kullanılarak, tüm kriterlerin tercih edilen en kötü kriterle göre tercih oranı belirlenir. Bu aşamada, diğer kriterlerin en kötü kriter üzerindeki önemi karar verici tarafından 1 ile 9 arası bir sayının kullanılmasıyla belirlenmektedir. Tüm kriterlerin (j) en kötü kriter W' 'ye göre tercihleri Eşitlik (3)' teki gibi tanımlanır.

$$A_W = (a_{1W}, a_{2W}, a_{3W}, \dots, a_{nW})^T \quad (3)$$

Burada A_{jW} , j ölçütünün en kötü ölçüt W' 'ye olan tercihidir ve değeri 1 ile 9 arasında bir tam sayıdır.

Adım 5: Bu son aşamada en ideal çözüm belirlenir. Yani her bir kriter için en ideal ağırlığın belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için, ulaşılan ağırlıklar ve karar vericinin görüşü arasındaki boşlukları minimuma düşürecek bir çözüm bulunmalıdır.

BWM' nin amacı, her j mutlak boşluğu için optimal ağırlık vektörünü bulmaktır. Kriterler için en uygun ağırlık $|w_j / w_B - a_{jW}|$ ve $|w_B / w_j - a_{Bj}|$ minimuma düşürmektir. Bu amaca ulaşmak için aşağıdaki min-max modeli geliştirilmiştir. BWM son modeli olan Eşitlik (4)' te belirtilen modele dönüşmektedir.

min ξ_L

Kısıtlarının altında;

$$\begin{aligned} |w_B - a_{Bj}w_j| &\leq \xi_L & \forall j = 1, 2, \dots, n \\ |w_j - a_{jW}w_W| &\leq \xi_L & \forall j = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n w_j &= 1 & w_j \geq 1 & \forall j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (4)$$

Problemi çözerek, orjinal bir çözüme ulaşmayı ve w^* ve ξ_L^* çözerek en ideal ağırlıkların elde edilmesi amaçlanmaktadır. ξ_L^* karşılaştırmaların tutarlılığının bir göstergesi olarak da kabul edilebilir. Düşük değerler daha yüksek tutarlılığı ve anlamlılığı ifade etmektedir.

Tüm bu model tamamlanıp çözümlenmesiyle birlikte tutarlılık oranı hesaplanır. Bu kısım son aşama olup, Tablo 1' de verilen ξ ve tutarlılık endeks değerleri ile Eşitlik (5)' ten yararlanılarak tutarlılık oranı hesaplanır.

Tablo 1: Tutarlılık endeks değerleri

aBW	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TE	0,00	0,44	1,00	1,63	2,30	3,00	3,73	4,47	5,23

$$\text{Tutarlılık Oranı (TO)} = \xi / \text{Tutarlılık Endeks Değeri} \quad (5)$$

Tutarlılık endeksi değerini belirlerken kullandığımız *aBW* en iyi kriterin en kötü kritere göre tercih seviyesini gösterir ve hesaplanan bu tutarlılık oranı ne kadar düşükse sonuç o kadar güvenilir ve tutarlı olur.

Düzenli depolama alanları ile ilgili yetkinliği olan uzmanlar ile BWM yöntemine uygun bir şekilde yapılan çalışmamızda toplam 12 uzmandan görüş alınmıştır. Uzmanların alanları incelendiğinde tamamı atık yönetimi alanında uzman iken, bunlardan üçü; enerji üretimi, arıtma teknolojileri ve çevre alanlarında da uzmanlığa sahiptir. Çalışmaya katılan uzmanlardan üçü 10 yıl tecrübeye, beşi 11-20 yıl arası tecrübeye, üçü 21-30 yıl arası tecrübeye ve biri 30 yıl üzeri tecrübeye sahiptir.

Çalışmada kullanılan kriterler literatürde ilgili konuda yapılan çalışmalardan elde edilmiştir. Kullanılan kriterlerin kaynakları aşağıdaki Tablo 2’de gösterilmiştir. Bu bağlamda 5 ana ve 22 alt kriter analizlere dahil edilmiştir. Ana ve alt kriterler şu şekildedir: Çevresel ana kriterine bağlı alt kriterler; arazi kullanımı, yeraltı ve yüzey suları, yerleşim alanlarına yakınlık, turizm merkezlerine yakınlık, koruma altındaki alanlara yakınlıktır. Ekonomik ana kriterine bağlı alt kriterler; işçilik maliyeti, ulaşım maliyeti, işletme maliyeti, arazi fiyatıdır. Sosyal ana kriterine bağlı alt kriterler; halk sağlığı, halkın kabulü, bölge nüfusu/nüfus yoğunluğu, kamu kurumları ile iş birliğidir. Lojistik ana kriterine bağlı alt kriterler; yol ve ulaşım imkanları, havaalanları ve demiryollarına yakınlık, atık üretim/aktarma merkezlerine yakınlık, gelişmekte olan bölgelere yakınlıktır. Zeminsel ana kriterine bağlı alt kriterler; arazi eğitimi, toprak geçirgenliği, fay hattına yakınlık, sel/erozyon/heyelan durumu, arazinin depolama kapasitesidir.

Tablo 2: Çalışmada kullanılan kriterler

Ana Kriterler	Ana Kriter Sembolü	Alt Kriterler	Alt Kriter Sembolü	Kaynaklar
Çevresel	A	Arazi kullanımı	A1	Ciritci ve Türk (2019); Güler (2016); Erdoğan (2019); Yıldırım (2011); Armanuos vd. (2023); Wang vd. (2009); Senkiio vd. (2022); Jalilian vd. (2022); Zarin vd. (2021); Ferretti (2011); Azizi vd. (2016); Saleh vd. (2020); Hanine vd. (2016); Kara vd. (2022); Gorin vd. (2014);
		Yeraltı ve yüzey suları	A2	Güler (2016); Yıldırım (2011); Aydemir-Karadag (2019); Armanuos vd. (2023); Wang vd. (2009); Senkiio vd. (2022); Mirakovski vd. (2013); Sheoran vd. (2020); Ferretti (2011); Mozaffari vd. (2023); Jalilian vd. (2022); Saleh vd. (2020); Bronja vd. (2013); Khorsandi vd. (2019); Hanine vd. (2016); Angilella vd. (2015); Gorin vd. (2014); Zarin vd. (2021); Azizi vd. (2016); Mahmood vd. (2021); Kuru vd. (2021)
Çevresel	A	Yerleşim alanlarına yakınlık	A3	Ciritci ve Türk (2019); Güler (2016); Erdoğan (2019); Kabadayı vd. (2020); Aydemir-Karadag (2019); Armanuos vd. (2023); Wang vd. (2009); Senkiio vd. (2022); Jalilian vd. (2022); Gorin vd. (2014); Zarin vd. (2021); Ferretti (2011); Mahmood vd. (2021); Hanine vd. (2016); Mirakovski vd. (2013); Sheoran vd. (2020); Azizi vd. (2016); Bronja vd. (2013); Khorsandi vd. (2019); Kuru vd. (2021);

Tablo 2: Çalışmada kullanılan kriterler (devamı)

		Turizm merkezlerine yakınlık	A4	Erdoğan (2019); Yıldırım (2011); Özkan (2018); Mirakovski vd. (2013); Mozaffari vd. (2023);
		Koruma altındaki alanlara yakınlık	A5	Güler (2016); Erdoğan (2019); Yıldırım (2011); Senkiio vd. (2022); Jalilian vd. (2022); Mirakovski vd. (2013); Gorin vd. (2014); Ferretti (2011); Mozaffari vd. (2023); Jalilian vd. (2022); Saleh vd. (2020); Kuru vd. (2021); Mahmood vd. (2021)
Ekonomik	B	İşçilik maliyeti	B1	Kabadayı vd. (2020); Mirakovski vd. (2013); Gaur vd. (2022)
		Ulaşım maliyeti	B2	Güler (2016); Kabadayı vd. (2020); Yıldırım (2011); Senkiio vd. (2022); Jalilian vd. (2022); Mirakovski vd. (2013); Gorin vd. (2014); Ferretti (2011); Hanine vd. (2016); Mirakovski vd. (2013); Gaur vd. (2022); Bronja vd. (2013)
		İşletme maliyeti	B3	Angilella vd. (2015); Gaur vd. (2022); Hanine vd. (2016); Mirakovski vd. (2013)
		Arazi fiyatı	B4	Güler (2016); Kabadayı vd. (2020); Aydemir-Karadag, (2019); Wang vd. (2009); Mirakovski vd. (2013); Gaur vd. (2022); Hanine vd. (2016); Kara vd. (2022)
Sosyal	C	Halk sağlığı	C1	Gaur vd. (2022); Mirakovski vd. (2013)
		Halkın kabulü	C2	Yıldırım (2011); Aydemir (2019); Mirakovski vd. (2013); Hanine vd. (2016); Gaur vd. (2022)
		Bölge nüfusu/Nüfus yoğunluğu	C3	Güler (2016); Erdoğan (2019); Yıldırım (2011); Angilella vd. (2015); Zarin vd. (2021); Ferretti (2011)
		Kamu kurumları ile işbirliği	C4	Aydemir-Karadag (2019); Bronja vd. (2013)
Lojistik	D	Yol ve ulaşım imkanları	D1	Güler (2016); Erdoğan (2019); Yıldırım (2011); Aydemir-Karadag (2019); Özkan (2018); Armanuos vd. (2023); Wang vd. (2009); Senkiio vd. (2022); Gezgini vd. (2022); Hanine vd. (2016); Mirakovski vd. (2013); Angilella vd. (2015); Sheoran vd. (2020); Gorin vd. (2014); Zarin vd. (2021); Azizi vd. (2016); Mozaffari vd. (2023); Mahmood vd. (2021); Saleh vd. (2020); Khorsandi vd. (2019); Kuru vd. (2021); Gado vd. (2023)
Lojistik	D	Havaalanlarına ve demiryollarına yakınlık	D2	Güler (2016); Erdoğan (2019); Kabadayı vd. (2020); Yıldırım (2011); Aydemir-Karadag (2019); Armanuos vd. (2023); Wang vd. (2009); Jalilian vd. (2022); Gezgini vd. (2022); Zarin vd. (2021); Azizi vd. (2016); Ahmad vd. (2020); Mahmood vd. (2021); Saleh vd. (2020); Gado vd. (2023)
		Atık üretim/aktarma merkezlerine yakınlık	D3	Güler (2016); Yıldırım (2011); Wang vd. (2009); Mirakovski vd. (2013); Ferretti (2011); Mahmood vd. (2021);

Tablo 2: Çalışmada kullanılan kriterler (devamı)

Lojistik	D	Gelişmekte olan bölgelere yakınlık	D4	Yıldıran (2011)
Zeminsel	E	Arazi eğimi	E1	Ciritci ve Türk (2019); Güler (2016); Erdoğan (2019); Barnabas vd. (2023); Yıldıran (2011); Aydemir-Karadag (2019); Özkan (2018); Armanuos vd. (2023); Wang vd. (2009); Senkiio vd. (2022); Jalilian vd. (2022); Gorin vd. (2014); Zarin vd. (2021); Ferretti (2011); Azizi vd. (2016); Mozaffari vd. (2023); Jalilian vd. (2022); Saleh vd. (2020); Kuru vd. (2021); Kara vd. (2022); Mahmood vd. (2021); Khorsandi vd. (2019); Gado vd. (2023)
Zeminsel	E	Toprak geçirgenliği	E2	Aydemir-Karadag (2019); Armanuos vd. (2023); Senkiio vd. (2022); Gezgini vd. (2022); Mirakovski vd. (2013); Gorin vd. (2014); Zarin vd. (2021); Azizi vd. (2016); Bronja vd. (2013)
		Fay hattına yakınlık	E3	Erdoğan (2019); Aydemir-Karadag (2019); Senkiio vd. (2022); Gezgini vd. (2022); Jalilian vd. (2022); Azizi vd. (2016); Saleh vd. (2020); Özkan vd. (2019); Khorsandi vd. (2019)
		Sel/erozyon/ heyelan durumu	E4	Erdoğan (2019); Aydemir-Karadag (2019); Özkan (2018); Senkiio vd. (2022); Ferretti (2011); Khorsandi vd. (2019); Kuru vd. (2021)
		Arazinin depolama kapasitesi	E5	Aydemir-Karadag (2019); Barnabas vd. (2023); Mirakovski vd. (2013)

3 Bulgular

Çalışmaya katılan uzmanlardan, düzenli depolama alanı yer seçimini etkileyebilecek 5 ana ve 22 alt kriterin “En Önemli” ve “En Az Önemli” olanlarını belirlemeleri ve ardından diğer kriterler ile ikili karşılaştırma yapmaları istenmiştir. 12 farklı uzman görüşü alınarak yapılan analizler neticesinde elde edilen bulguların sonuçları aşağıda açıklanmıştır.

BWM yönteminin analizine ilk olarak ana kriterlerin değerlendirilmesiyle başlanmıştır. Uzman görüşlerine dayanan analiz sonuçlarında en önemli ve en az önemli ana kriterler ağırlık dereceleri hesaplanarak belirlenmiştir. Ana kriter ağırlıklarının belirlenmesinin ardından, her bir ana kritere ait alt kriterin değerlendirilmesi ayrı ayrı yapılmıştır. Her bir alt kriterin ağırlığı, tutarlılık oranı ve eşik değerleri hesaplandıktan sonra tüm alt kriterlerin genel ağırlıkları en yüksekte en düşüğe doğru sıralanmıştır. Bu sıralama ile kriterlerin, uzman görüşlerine göre en önemli ve en az önemlileri belirlenmiş ve değerlendirmeleri yapılmıştır.

Çalışmaya katılan uzmanların belirlediği “En Önemli” kriterler incelendiğinde %66,7 ile “çevresel” kriter en önemli kriter olarak belirlenmiştir. Bunu, %16,7 ile “lojistik”, %8,3 ile “ekonomik” ve “zeminsel” kriterler takip etmektedir. Uzmanlar tarafından seçilen “En Önemli” kriterin diğer kriterlere göre ikili karşılaştırmasına aşağıdaki Tablo 3’te yer almaktadır.

Tablo 3: *En önemli kriterin ikili karşılaştırması*

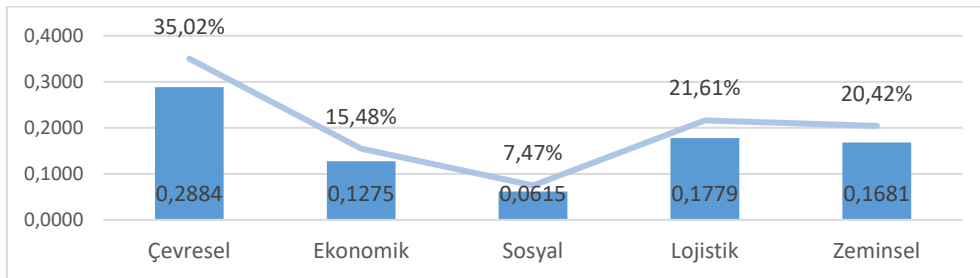
Uzman Numarası	En Önemli Kriterler	Ana Kriterler				
		Çevresel	Ekonomik	Sosyal	Lojistik	Zeminsel
Uzman 1	Çevresel	1	2	9	3	4
Uzman 2	Çevresel	1	6	5	9	3
Uzman 3	Lojistik	7	9	6	1	8
Uzman 4	Çevresel	1	3	8	6	5
Uzman 5	Çevresel	1	7	8	4	5
Uzman 6	Zeminsel	7	5	9	3	1
Uzman 7	Çevresel	1	8	6	3	4
Uzman 8	Çevresel	1	8	8	4	2
Uzman 9	Çevresel	1	3	8	4	6
Uzman 10	Çevresel	1	7	9	6	4
Uzman 11	Ekonomik	6	1	8	3	5
Uzman 12	Lojistik	6	5	8	1	3

Ayrıca, uzmanlar tarafından “En Az Önemli” kriter olarak %75’i oran ile “sosyal” kriteri belirlenmiştir. Ayrıca, %16,7 ile ekonomik, %8,3 ile lojistik kriterler sırasıyla en az önemli olarak belirlenmiştir. Uzmanlar tarafından seçilen “En Az Önemli” kriterin diğer kriterlere göre ikili karşılaştırmasına aşağıdaki Tablo 4’te yer almaktadır.

Tablo 4: *En az önemli kriterin ikili karşılaştırması*

Uzman Numarası	En Az Önemli Kriterler	Ana Kriterler				
		Çevresel	Ekonomik	Sosyal	Lojistik	Zeminsel
Uzman 1	Sosyal	9	8	1	6	7
Uzman 2	Lojistik	9	2	6	1	5
Uzman 3	Ekonomik	4	1	5	9	3
Uzman 4	Sosyal	2	7	1	4	4
Uzman 5	Sosyal	8	3	1	6	4
Uzman 6	Sosyal	3	4	1	5	8
Uzman 7	Ekonomik	8	1	3	6	5
Uzman 8	Sosyal	8	2	1	5	7
Uzman 9	Sosyal	8	6	1	5	3
Uzman 10	Sosyal	9	4	1	4	7
Uzman 11	Sosyal	3	8	1	7	4
Uzman 12	Sosyal	4	4	1	8	6

Ana kriterler uzman görüşlerinden sonra önem sıralarına göre Şekil 1’ de sıralanmış ve buna göre; çevresel kriterler %35,02 ile en yüksek ağırlığa sahip kriter olarak gözükmemektedir. Lojistik kriterler %21,61 ile ikinci en yüksek ağırlığa sahip kriterdir. Ardından sırasıyla, %20,42 ile zeminsel, %15,48 ile ekonomik ve son sırada %7,47 ile sosyal kriterler gelmektedir.



Şekil 1: Ana kriter ağırlıklarının ortalaması ve yüzdelik dağılımı

Ana kriter ağırlıklarının belirlenmesinin ardından, her bir ana kriterin alt kriterlerine yönelik değerlendirmeler ayrı ayrı yapılmıştır. Burada, her bir alt kriterin ana kriter içerisindeki önemini ortaya koymak ve genel karar verme sürecinde alt kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

“Çevresel” ana kriterin alt kriterleri incelendiğinde, “Yeraltı ve yüzey suları” alt kriteri %31,38 ile en yüksek etkiye sahip kriter olmuştur. Ardından, %21,55 ile “Yerleşim yerlerine yakınlık” ikinci en yüksek etkiye sahip kriter olurken sonrasında %20,04 ile “Koruma altındaki alanlara yakınlık”, %14,41 ile “Turizm merkezlerine yakınlık” ve son olarak %12,61 ile “Arazi kullanımı” en düşük etkiye sahip kriter olmuştur. Uzmanların, “Çevresel” ana kriterinin alt kriterlerine ilişkin değerlendirmelerinin neticesinde hesaplanan ağırlıklar aşağıdaki Tablo 5’te yer almaktadır.

Tablo 5: Çevresel kriterinin alt kriterlerine ait ağırlıklar, tutarlılık oranları ve eşik değerleri

Çevresel Kriterler								
Uzman Numarası	Ana Kriter Ağırlığı	Alt Kriter1 (Arazi Kullanımı)	Alt Kriter2 (Yeraltı ve Yüzey Suları)	Alt Kriter3 (Yerleşim Alanlarına Yakınlık)	Alt Kriter4 (Turizm Merkezlerine Yakınlık)	Alt Kriter5 (Koruma Altındaki Alanlara Yakınlık)	Tutarlılık Oranı	Eşik Değeri
Uzman 1	0,409	0,035	0,175	0,421	0,263	0,105	0,292	0,306
Uzman 2	0,511	0,500	0,101	0,203	0,152	0,043	0,208	0,306
Uzman 3	0,108	0,047	0,212	0,106	0,127	0,507	0,292	0,306
Uzman 4	0,429	0,169	0,546	0,113	0,060	0,113	0,286	0,296
Uzman 5	0,545	0,482	0,121	0,201	0,151	0,045	0,286	0,296
Uzman 6	0,089	0,096	0,553	0,135	0,048	0,168	0,222	0,306
Uzman 7	0,500	0,049	0,108	0,519	0,162	0,162	0,286	0,296
Uzman 8	0,465	0,103	0,046	0,205	0,154	0,492	0,286	0,296
Uzman 9	0,500	0,100	0,500	0,150	0,050	0,200	0,286	0,296
Uzman 10	0,559	0,051	0,507	0,087	0,152	0,203	0,232	0,296
Uzman 11	0,106	0,104	0,518	0,125	0,046	0,208	0,222	0,306
Uzman 12	0,103	0,047	0,493	0,102	0,205	0,153	0,286	0,296

“Ekonomik” ana kriterin alt kriterleri incelendiğinde, “Ulaşım maliyeti” alt kriteri %33,52 ile en yüksek etkiye sahip kriter olmuştur. Ardından, %32,07 ile “İşletme maliyeti” ikinci en yüksek etkiye sahip kriter olurken sonrasında %17,74 ile “Arazi fiyatı” ve son olarak %16,67 ile “İşçilik maliyeti” en düşük etkiye sahip kriter olmuştur. Uzmanların, “Ekonomik” ana kriterinin alt kriterlerine ilişkin değerlendirmelerinin neticesinde hesaplanan ağırlıklar aşağıdaki Tablo 6’da yer almaktadır.

Tablo 6: Ekonomik kriterinin alt kriterlerine ait ağırlıklar, tutarlılık oranları ve eşik değerleri

Ekonomik Kriterler							
Uzman Numarası	Ana Kriter Ağırlığı	Alt Kriter1 (İşçilik Maliyeti)	Alt Kriter2 (Ulaşım Maliyeti)	Alt Kriter3 (İşletme Maliyeti)	Alt Kriter4 (Arazi Fiyatı)	Tutarlılık Oranı	Eşik Değeri
Uzman 1	0,257	0,091	0,212	0,636	0,061	0,208	0,268
Uzman 2	0,106	0,119	0,608	0,217	0,056	0,208	0,268
Uzman 3	0,053	0,068	0,112	0,156	0,664	0,232	0,252
Uzman 4	0,237	0,188	0,125	0,625	0,063	0,214	0,252
Uzman 5	0,097	0,183	0,146	0,610	0,061	0,214	0,252
Uzman 6	0,124	0,127	0,191	0,627	0,055	0,208	0,268
Uzman 7	0,050	0,227	0,578	0,136	0,059	0,214	0,252
Uzman 8	0,070	0,575	0,138	0,230	0,057	0,214	0,252
Uzman 9	0,200	0,061	0,610	0,146	0,183	0,214	0,252
Uzman 10	0,101	0,058	0,633	0,124	0,185	0,208	0,268
Uzman 11	0,509	0,100	0,200	0,075	0,625	0,214	0,252
Uzman 12	0,124	0,071	0,149	0,124	0,656	0,179	0,252

“Sosyal” ana kriterin alt kriterleri incelendiğinde, “Halk sağlığı” alt kriteri %54,51 ile en yüksek etkiye sahip kriter olmuştur. Ardından, %18,04 ile “Bölge nüfusu/Nüfus yoğunluğu” ikinci en yüksek etkiye sahip kriter olurken sonrasında %16,37 ile “Halkın kabulü” ve son olarak %11,07 ile “Kamu kurumları ile işbirliği” en düşük etkiye sahip kriter olmuştur. Uzmanların, “Sosyal” ana kriterinin alt kriterlerine ilişkin değerlendirmelerinin neticesinde hesaplanan ağırlıklar aşağıdaki Tablo 7’de yer almaktadır.

Tablo 7: Sosyal kriterinin alt kriterlerine ait ağırlıklar, tutarlılık oranları ve eşik değerleri

Sosyal Kriterler							
Uzman Numarası	Ana Kriter Ağırlığı	Alt Kriter1 (Halk Sağlığı)	Alt Kriter2 (Halkın Kabulü)	Alt Kriter3 (Bölge Nüfusu/Nüfus Yoğunluğu)	Alt Kriter4 (Kamu Kurumları ile İşbirliği)	Tutarlılık Oranı	Eşik Değeri
Uzman 1	0,034	0,654	0,131	0,157	0,058	0,222	0,268
Uzman 2	0,128	0,583	0,136	0,227	0,054	0,125	0,268
Uzman 3	0,126	0,664	0,156	0,112	0,068	0,232	0,252
Uzman 4	0,074	0,610	0,061	0,146	0,183	0,214	0,252
Uzman 5	0,051	0,549	0,052	0,171	0,228	0,232	0,252
Uzman 6	0,054	0,583	0,136	0,227	0,054	0,125	0,268
Uzman 7	0,100	0,569	0,142	0,236	0,054	0,232	0,252
Uzman 8	0,047	0,639	0,111	0,194	0,056	0,264	0,268
Uzman 9	0,050	0,109	0,191	0,636	0,064	0,232	0,252
Uzman 10	0,046	0,613	0,180	0,063	0,144	0,214	0,252
Uzman 11	0,048	0,125	0,625	0,063	0,188	0,214	0,252
Uzman 12	0,052	0,625	0,125	0,063	0,188	0,214	0,252

“Lojistik” ana kriterin alt kriterleri incelendiğinde, “Atık üretim/Aktarma merkezlerine yakınlık” alt kriteri %47,15 ile en yüksek etkiye sahip kriter olmuştur. Ardından, %23,77 ile “Yol ve ulaşım imkanları” ikinci en yüksek etkiye sahip kriter olurken sonrasında %16,32 ile “Gelişmekte olan bölgelere yakınlık” ve son olarak %12,76 ile “Havaalanları ve demiryollarına yakınlık” en düşük etkiye

sahip kriter olmuştur. Uzmanların, “Lojistik” ana kriterinin alt kriterlerine ilişkin değerlendirmelerinin neticesinde hesaplanan ağırlıklar aşağıdaki Tablo 8’de yer almaktadır.

Tablo 8: Lojistik kriterinin alt kriterlerine ait ağırlıklar, tutarlılık oranları ve eşik değerleri

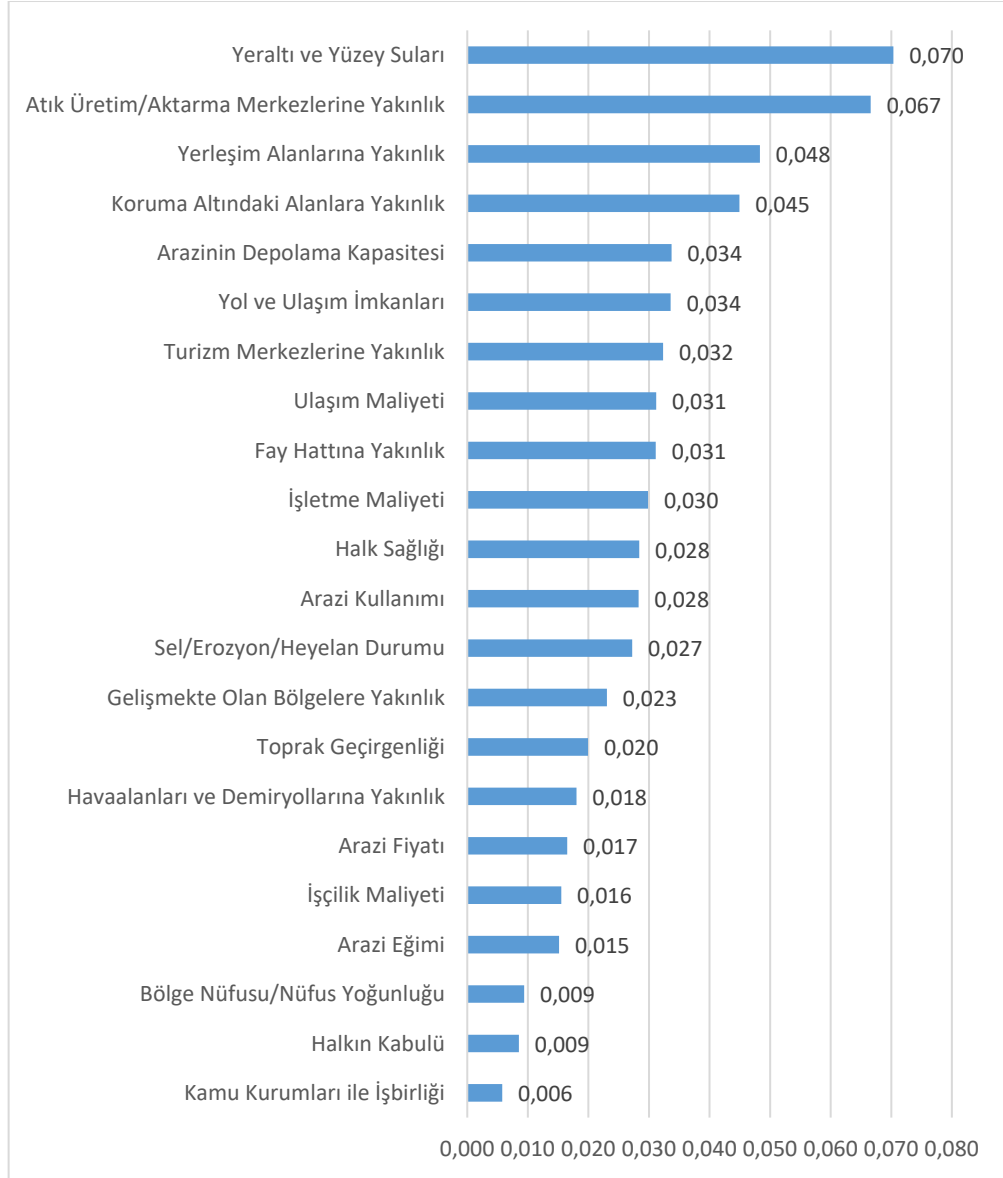
Lojistik Kriterler							
Uzman Numarası	Ana Kriter Ağırlığı	Alt Kriter1 (Yol ve Ulaşım İmkanları)	Alt Kriter2 (Havaalanları ve Demiryollarına Yakınlık)	Alt Kriter3 (Atık Üretim/Aktarma Merkezlerine Yakınlık)	Alt Kriter4 (Gelişmekte Olan Bölgelere Yakınlık)	Tutarlılık Oranı	Eşik Değeri
Uzman 1	0,172	0,627	0,055	0,191	0,127	0,208	0,268
Uzman 2	0,043	0,236	0,054	0,569	0,142	0,232	0,252
Uzman 3	0,618	0,125	0,063	0,625	0,188	0,214	0,252
Uzman 4	0,118	0,112	0,156	0,664	0,068	0,232	0,252
Uzman 5	0,170	0,146	0,068	0,603	0,182	0,214	0,252
Uzman 6	0,207	0,610	0,061	0,183	0,146	0,214	0,252
Uzman 7	0,200	0,059	0,227	0,578	0,136	0,214	0,252
Uzman 8	0,140	0,057	0,138	0,575	0,230	0,214	0,252
Uzman 9	0,150	0,136	0,227	0,578	0,059	0,214	0,252
Uzman 10	0,118	0,059	0,114	0,666	0,160	0,222	0,268
Uzman 11	0,211	0,636	0,064	0,109	0,191	0,232	0,252
Uzman 12	0,515	0,636	0,191	0,109	0,064	0,232	0,252

“Zeminsel” ana kriterin alt kriterleri incelendiğinde, “Arazinin depolama kapasitesi” alt kriteri %26,52 ile en yüksek etkiye sahip kriter olmuştur. Ardından, %24,48 ile “Fay hattına yakınlık” ikinci en yüksek etkiye sahip kriter olurken sonrasında %21,41 ile “Sel/Erozyon/Heyelan durumu”, %15,67 ile “Toprak geçirgenliği” ve son olarak %11,92 ile “Arazi eğimi” en düşük etkiye sahip kriter olmuştur. Uzmanların, “Zeminsel” ana kriterinin alt kriterlerine ilişkin değerlendirmelerinin neticesinde hesaplanan ağırlıklar aşağıdaki Tablo 9’da yer almaktadır.

Tablo 9: Zeminsel kriterinin alt kriterlerine ait ağırlıklar, tutarlılık oranları ve eşik değerleri

Zeminsel Kriterler								
Uzman Numarası	Ana Kriter Ağırlığı	Alt Kriter1 (Arazi Eğimi)	Alt Kriter2 (Toprak Geçirgenliği)	Alt Kriter3 (Fay Hattına Yakınlık)	Alt Kriter4 (Sel/Erozyon/Heyelan Durumu)	Alt Kriter5 (Arazinin Depolama Kapasitesi)	Tutarlılık Oranı	Eşik Değeri
Uzman 1	0,129	0,046	0,101	0,176	0,118	0,559	0,292	0,306
Uzman 2	0,213	0,125	0,045	0,517	0,104	0,209	0,222	0,306
Uzman 3	0,095	0,049	0,115	0,566	0,098	0,172	0,264	0,306
Uzman 4	0,142	0,084	0,524	0,169	0,169	0,053	0,286	0,296
Uzman 5	0,136	0,046	0,525	0,127	0,091	0,212	0,222	0,306
Uzman 6	0,527	0,052	0,116	0,558	0,100	0,174	0,286	0,296
Uzman 7	0,150	0,152	0,051	0,087	0,507	0,203	0,232	0,296
Uzman 8	0,279	0,151	0,045	0,121	0,482	0,201	0,286	0,296
Uzman 9	0,100	0,051	0,203	0,507	0,087	0,152	0,232	0,296
Uzman 10	0,176	0,152	0,051	0,087	0,507	0,203	0,232	0,296
Uzman 11	0,127	0,552	0,095	0,055	0,132	0,166	0,232	0,296
Uzman 12	0,206	0,052	0,206	0,103	0,124	0,515	0,214	0,296

Tüm bu karşılaştırmalı analizler ve her bir ana kriterin alt kriterlerinin kendi içerisinde sıralanması sonrasında, tüm alt kriterlerin genel ağırlıkları en yüksekten en düşüğe doğru sıralanmıştır. Bu sıralama, aşağıdaki Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2: Tüm alt kriterlerin sıralaması

4 Tartışma

Kriterlerin değerlendirilmesi açısından bulgular, literatürde yer alan mevcut çalışmalardan bazıları ile paralellik gösterirken bazıları ile zıtlıklar ortaya koymaktadır. Buna göre;

Erdoğan (2019), Samsun ili genelinde düzenli depolama alanı için alternatif yer seçimi ile ilgili yaptığı çalışmada sızıntı sularının önemine değinmiştir. Sızıntı suları, atıkların depolandığı alanlarda zamanla oluşan ve atıkların içeriğindeki kirletici maddelerle temas ederek çevreye yayılma riski taşıyan suyu ifade etmektedir. Bu tür suların yeraltı ve yüzey sularına karışma ihtimalinden dolayı çalışmamızda yer alan “yeraltı ve yüzey suları” kriterine benzerliği, kriterin önemini vurgulamaktadır. Erdoğan (2019), yaptığı çalışma sonucunda halkın görüşünün önemine de ayrıca değinmektedir. Bu durum, çalışmamızda en az öneme sahip ikinci kriter olan “halkın kabulü” kriteri ile uyuşmamaktadır.

Sakarya’da halkın kabulü en az öneme sahip ikinci kriter iken Samsun’da yapılan çalışmada elde edilen sonuç bunun tam tersi yönündedir.

Aydemir (2018) tarafından gerçekleştirilen Ankara ili ve çevresinde kurulabilecek düzenli depolama alanı alternatifleri ile ilgili çalışmada, bu çalışmadaki bulguya paralel olarak ana kriterler arasında çevresel kriterler en yüksek ağırlığa sahip kriter olarak belirlenmiş ve çevresel kriterlerin alt başlığı olan yeraltı ve yüzey sularına uzaklık ise üçüncü en önemli kriter olarak tespit edilmiştir. Ayrıca; Aydemir A. tarafından yapılan çalışmada, “yerleşim birimlerine uzaklık” kriteri en az öneme sahip kriter olarak belirlenirken, bu çalışmadaki “yerleşim alanlarına yakınlık” kriteri en önemli üçüncü kriter olarak belirlenmiştir. Bu zıtlığın, Aydemir A.’nın çalışmasında düzenli depolama alanının kesin konumunun belirlenmemiş olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Aydemir A.’nın çalışmasındaki diğer bir kriter olan "en yakın yerleşim alanının tepkisi", sosyal kriterler arasında en yüksek ağırlığa sahip kriter olarak değerlendirilmiş ve yer seçimi sürecinde önemli bir etkisi olduğu vurgulanmıştır. Bu kriter, düzenli depolama alanının bulunduğu bölgedeki halkın olası tepkilerini temsil etmektedir. Bu çalışmada ise “halkın kabulü” kriteri, bu çalışmadaki “en yakın yerleşim alanının tepkisi” kriteri ile eşdeğer kabul edilebilir olmakla birlikte, kıyaslandığında en az önem derecesine sahip ikinci kriter olarak tespit edilmiştir. Bu farklılıkların, karar vericilerin demografik ve coğrafi koşullara ilişkin farklı değerlendirmelerinden ya da kullanılan analiz yöntemlerinin önceliklendirme yaklaşımlarındaki farklılıklarından kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir.

Armanuos vd. (2023) tarafından gerçekleştirilen Mısır’ın Nil deltasının ortasında yer alan Al-Ghrabia bölgesinde düzenli depolama alanı için yapılan çalışmada, “yeraltı suyu derinliği” kriteri, çalışmamızda ele alınan "yeraltı ve yüzey suları" kriteri ile benzerlik göstermektedir. Her iki çalışmada da bu kriterin en yüksek öneme sahip kriter olarak belirlenmiş olması, bu kriterin düzenli depolama alanı yer seçimindeki kritik önemini vurgulamaktadır. Aynı çalışmada ele alınan “kentsel bölgelere uzaklık” kriteri, çalışmamızdaki “yerleşim alanlarına yakınlık” kriteri ile paralellik göstermektedir. Armanuos vd. (2023) çalışmasında “kentsel bölgelere uzaklık” kriteri en önemli ikinci kriter olarak öne çıkarken, çalışmamızda “yerleşim alanlarına yakınlık” kriteri en önemli üçüncü kriter olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, iki farklı çalışmada kullanılan kriterlerin benzer sonuçlar doğurması açısından dikkate değerdir. Bu bağlamda, söz konusu benzerlikler, düzenli depolama alanı yer seçim süreçlerinde kullanılan kriterlerin evrensel önemini ve geçerliliğini ortaya koymaktadır.

Barnabas vd. (2023) tarafından uygun düzenli depolama alanı belirlemeye yönelik yapılan çalışmada, yer seçimi sürecinde çevresel kriterlerin öncelikli olarak dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır. Bu bulgu, çalışmamızda en önemli ana kriter olarak tespit edilen “çevresel” kriterlerle paralellik göstermektedir. Her iki çalışmada da çevresel kriterlerin yer seçimi sürecinde kritik bir öneme sahip olduğu sonucuna ulaşılmaması, bu kriterlerin düzenli depolama alanı yer seçimindeki evrensel önemini bir kez daha ortaya koymaktadır.

Marjanovic vd. (2022) tarafından düzenli depolama alanı yer seçimi sürecinde belirlenen kriterlerin sıralanması amacıyla yaptıkları çalışmada; çevresel ekosistem, ekonomik faydalar ve toplum üzerindeki etkiler üzerine yoğunlaşmışlardır. Elde edilen bulgulardan olan çevresel ekosistem, çalışmamızda en önemli ana kriter olarak tespit edilen “çevresel” kriter ile uyum sağlamaktadır. Ekonomik faydalar açısından değerlendirildiğinde, çalışmamızda en önemli ikinci kriter olarak tespit edilen “atık üretim/aktarma merkezlerine yakınlık” kriteri ile ekonomik değerler açısından bir paralellik söz konusudur. Toplum üzerindeki etkisi açısından değerlendirildiğinde ise, çalışmamızda en önemli üçüncü kriter olarak tespit edilen “yerleşim alanlarına yakınlık” kriteri ile paralellik göstermektedir.

5 Sonuçlar

Günümüzde nüfus artışı ve kentleşmeyle birlikte artan tüketim katı atık üretiminde belirgin bir artışa neden olmaktadır. Bu durum, atıkların sağlıklı ve ekonomik bir şekilde yönetilmesi konusunu önemli bir hale getirmiştir. Çevre sorunu olarak karşımıza çıkan atıkların düzenli ve etkin bir şekilde bertaraf edilmesi gerekmektedir. Düzenli depolama, uygulanabilirliği ile yönetim kolaylığı açısından atıkların çevreye zarar vermeyecek şekilde depolanarak bertaraf edilmesini sağlayan ve en çok tercih edilen yöntemlerden biridir.

Düzenli depolama alanı yer seçimi süreci dünya ve ülke genelinde uzun vadeli ve stratejik kararlar gerektiren türde kapsamlı çalışmalardan biridir. Yer seçimi alanında yapılan çalışmalar, belirli kriterler ve yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Türkiye'de düzenli depolama alanları, katı atıkların bertaraf edilmesi için son yıllarda giderek yaygınlaşan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntemin yaygınlaşması ile birlikte, atıkların depolanması için yapılan yer seçimi, çevresel etkilerin en aza indirilmesi açısından stratejik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, dünya ve Türkiye genelinde yapılan çalışmaların kapsamlı bir literatür taraması yapılarak düzenli depolama alanında sıkça kullanılan 5 ana kriter ve 22 alt kriter belirlenmiştir. Uzmanlardan, bu kriterlerden “En Önemli” ve “En Az Önemli” olanları belirlemeleri ve ardından her bir ana kriterin ve alt kriterin kendi aralarında karşılaştırma yapmaları istenmiştir. Uzman görüşleri alındıktan sonra kriterlerin değerlendirmelerine başlanmıştır.

BWM yöntemi ile öncelikle ana kriterlerin değerlendirilmesine başlanmıştır. Yapılan analiz sonucunda en önemli ana kriter “Çevresel” kriterler olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, en az öneme sahip ana kriterin “Sosyal” kriterler olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, düzenli depolama alanı yer seçiminde çevresel kriterlerin öncelikli olarak değerlendirilmesi gerektiğini sonucunu ortaya koymaktadır.

Alt kriterler için değerlendirme yapıldığında, “Yeraltı ve Yüzey Suları” en yüksek ağırlığa sahip alt kriter olarak belirlenmiştir. Bu durum, literatürdeki birçok çalışmada da en önemli alt kriter olarak tespit edilmiştir. Bu durum, kriterin düzenli depolama alanı yer seçimi sürecindeki önemini açıkça ortaya koymaktadır.

Uzman görüşlerine dayalı yapılan değerlendirme sonucunda alt kriterlerin önem sıralamasında; “Atık Üretim/Aktarma Merkezlerine Yakınlık” kriteri ikinci, “Yerleşim Alanlarına Yakınlık” kriteri üçüncü, “Koruma Altındaki Alanlara Yakınlık” kriteri dördüncü ve “Arazinin Depolama Kapasitesi” kriteri ise beşinci en önemli alt kriter olarak tespit edilmiştir. Buna karşılık, “Kamu Kurumları ile İşbirliği” kriteri en az öneme sahip alt kriter olarak son sırada yer alırken, “Halkın Kabulü” kriteri en az öneme sahip ikinci alt kriter olarak belirlenmiştir.

Sakarya ili topraklarının %34'lük kısmı ovalardan oluşmaktadır. Bu ovalar genel olarak ülkemizin en uzun üçüncü nehri olan Sakarya nehrinin biriktirdiği alüvyonlardan oluşmaktadır. Bu alüvyon içerisinde yer altı suyu seviyesi oldukça yüksektir. Bunun yanında, Sakarya ili yeraltı su kaynakları açısından zengin bir coğrafyaya sahip olmakla birlikte irili ufaklı birçok sayıda göl, gölet ve baraja da sahiptir. Buna göre Sakarya ilinde yapılacak olan yeni bir düzenli depolama alanına yönelik yer seçimi kararında, çalışmamızda değerlendirilen en önemli kriter “yeraltı ve yüzey suları” konunun tüm paydaşları açısından dikkate alınmalıdır. Sakarya ilinin yeraltı ve yüzey suları açısından zengin olmasından ve çalışmamızda da en önemli kriterin “yeraltı ve yüzey suları” kriteri olarak tespit edilmesinden dolayı, sonraki çalışmalarda yeraltı ve yüzey suları haritası çıkartılarak ve zemin etüdü yapılarak düzenli depolama alanı için yer alternatifleri belirlenebilir.

Yapılan bu çalışma Sakarya ili üzerinde yapıldığından dolayı düzenli depolama alanı ve atık yönetimi konusunda Sakarya ilini tanıyan ve Sakarya ilinde tecrübe sahibi olmuş uzmanlar ile görüşülmüştür.

Çalışmanın sadece Sakarya ili sınırlarını kapsamaması ve Sakarya ilindeki 12 uzman ile görüşme yapılması çalışmanın kısıtlarıdır.

6 Beyanname

6.1 Çalışmanın Sınırlılıkları

Çalışma alanı Sakarya ili olduğundan dolayı atık ve düzenli depolama alanı yönetiminde, çalışma alanında değişiklik yapılması çalışma sonucunda önemli değişikliklere yol açabilir. Ayrıca, Sakarya ilindeki 12 uzman ile görüşülmüş olması da ayrı bir sınırlılıktır. Uzmanlarda ya da uzman sayısındaki değişikliklerde çalışma sonucunda değişikliklere yol açabilir.

6.2 Teşekkür

Bu çalışma, Samet Furkan SAĞLAM' ın yayımlanmamış yüksek lisans tez çalışmasından türetilmiştir.

6.3 Finansman Kaynağı

Bu araştırma için herhangi bir finansal destek alınmamıştır.

6.4 Çıkar Çatışması

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

6.5 Yazarların Katkıları

Samet Furkan SAĞLAM: Çalışma konusunun belirlenmesi, literatür taraması, bulgulara ulaşmak için yöntemlerin uygulanması ve verilerin düzenlenmesi, uzmanlar ile görüşmelerin yapılması, verilerin düzenlenmesi, bulguların mantık çerçevesinde açıklanması ve makaledeki imla ve dil bilgisi açısından hataların düzeltilmesi alanında katkı sağlamıştır.

Sinan ESEN: Çalışma konusunun belirlenmesi, yöntemin ve yönteme uygun uygulamanın nasıl olması gerektiğine karar verilmesi, çalışmadaki akademik eksiklerin giderilmesi ve makaledeki imla ve dil bilgisi açısından hataların düzeltilmesi alanında katkı sağlamıştır.

6.6 Etik Onay

Bu araştırma için etik kurul onayı E-26428519-050.99-156860 sayılı Etik Kurul Kararı 52/16 (Samet Furkan SAĞLAM) ile Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Etik Kurulu tarafından alınmıştır.

6.7 Bilgilendirilmiş Onam

Çalışma için tüm katılımcılardan çalışmaya katılmayı kabul ettiklerine dair bilgilendirilmiş onam formu alınmıştır.

Kaynakça

- Ahmad, W. N. K. W., Rezaei, J., Sadaghiani, S., & Tavasszy, L. A. (2017). Evaluation of the external forces affecting the sustainability of oil and gas supply chain using Best Worst Method. *Journal of cleaner production*, 153, 242-252.
- Ali, S. A., & Ahmad, A. (2020). Suitability analysis for municipal landfill site selection using fuzzy analytic hierarchy process and geospatial technique. *Environmental Earth Sciences*, 79(10), 227.

- Angilella, S., Bottero, M., Corrente, S., Ferretti, V., Greco, S., & Lami, I. M. (2016). Non additive robust ordinal regression for urban and territorial planning: An application for siting an urban waste landfill. *Annals of Operations Research*, 245, 427–456. <https://doi.org/10.1007/s10479-015-1980-8>
- Armanuos A. M., Elgaafary, K. A., & Gado, T. A. (2023). Landfill site selection using MCDM methods and GIS in the central part of the Nile Delta, Egypt. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(12), 1407.
- Aydemir-Karadag, A. (2019). Katı Atık Depolama Tesisi Yer Seçimi için Birleştirilmiş Hedef Programlama ve AHP Yaklaşımı. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, Vol:11, Sayı:1, Sayfa:211-225.
- Azizi Ghalaty, S., Taghizadeh, A., Heydarian, P., Farazmand, S., & Anvaripor, R. (2016). Using multi-criteria evaluation techniques of fuzzy analytic hierarchy process and fuzzy TOPSIS in locating waste sanitary landfill sites. *Journal of Research and Health*, 5(4), 13–24.
- Barnabas, G. S., Geethan, A. V., Ganesh, V. S., Karthikeyan, M. K. V., & Das, C. M. (2023). Application of decision making algorithms in the landfill site selection. *Environmental Engineering and Management Journal. Gheorghe Asachi Technical University of Iasi, Romania*. Vol.22, No.9.
- Bayrakçı-Arslan, M. (2022). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Akademik Personel Seçim Kriterlerinin Değerlendirilmesi.
- Bilgilioglu, S. S., & Gezgın, C. (2022). Nevşehir ili uygun katı atık depolama sahalarının coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve bulanık analitik hiyerarşi süreci (BAHS) yöntemlerinin entegrasyonu ile belirlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(4), 836–849. <https://doi.org/10.1007/s10067-023-11457>
- Bronja, H., & Bronja, H. (2014). A multi-criteria approach to selecting a landfill site with the aim of protecting the environment. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23(5).
- Chemwatch. (2024). RCRA (Resource Conservation and Recovery Act). <https://chemwatch.net/tr/resource-center/rcra-resource-conservation-and-recovery-act/>
- Ciritci, D., & Türk, T. (2019). Alternatif Katı Atık Depolama Alanlarının Analitik Hiyerarşi Süreci Ve Coğrafi Bilgi Sistemleri İle Otomatik Olarak Belirlenmesi: Sivas İli Örneği. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 6(1), 61-74.
- Çakır, E., & Can, M. (2019). Best-worst yöntemine dayalı ARAS yöntemi ile dış kaynak kullanım tercihinin belirlenmesi: Turizm sektöründe bir uygulama. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 23(3), 1273-1300.
- ÇBS. (1997). Çevre Bakanlığı, Çevresel Etki Değerlendirmesi ve Planlama Genel Müdürlüğü, 1997.
- ÇED. (2016). Sakarya Büyükşehir Belediyesi, Entegre Katı Atık Bertaraf Tesisi, Nihai ÇED Raporu.
- Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü. (2023). Sıfır atık ile geri kazanım oranı %35'e ulaştı. <https://cygm.csb.gov.tr/sifir-atik-ile-geri-kazanım-orani-35e-ulasti.-haber-286897>
- Erdoğan, B. B. (2019). Coğrafi Bilgi Sistemleri İle Katı Atık Düzenli Depolama Tesisi Yer Seçimi. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Samsun.
- Ferretti, V. (2011). A multicriteria spatial decision support system development for siting a landfill in the province of Torino (Italy). *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 18(5–6), 231–252. <https://doi.org/10.1002/mcda.451>
- Gaur, A., Prakash, H., Anand, K., Kumar, G., & Hussain, A. (2022). Evaluation of municipal solid waste management scenarios using multi-criteria decision making under fuzzy environment. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 6(2), 307–321. <https://doi.org/10.1007/s41660-021-00174-4>
- Gorin, S., & Radevski, I. (2014). Application of GIS and AHP for landfill site selection. In 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014 (pp. 437–444).

- Güler, D. (2016). Analitik Hiyerarşi Yöntemi Ve Coğrafi Bilgi Sistemleri İle Alternatif Katı Atık Düzenli Depolama Alanı Yer Seçimi: İstanbul Örneği. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Hanine, M., Boutkhoul, O., Maknissi, A.E., Tikniouine, A. & Agouti, T. (2016). Decision making under uncertainty using PEES–fuzzy AHP–fuzzy TOPSIS methodology for landfill location selection. *Environment Systems and Decisions*, 36, 351-367.
- Jalilian, S., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Monavari, S. M., & Lorestani, B. (2022). Landfill site suitability analysis for solid waste disposal using SWARA and MULTIMOORA methods: A case study in Kermanshah, West of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(12), 1175. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09929-9>
- Kabadayı, N., & Esen, T. E. Ç. (2021). Gri temelli TOPSIS yöntemi ile depo yeri seçimi. *Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 9(1), 169–184. <https://doi.org/10.18506/anemon.825628>
- Kara, M., Ercan, Y., Yumuşak, R., Cürebal, A., & Eren, T. (2022). Yenilenebilir hibrit enerji santrali uygulamasında tesis yer seçimi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 14(1), 208–227.
- Khorsandi, H., Faramarzi, A., Aghapour, A. A., & Jafari, S. J. (2019). Landfill site selection via integrating multi-criteria decision techniques with geographic information systems: A case study in Naqadeh, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7773-z>
- Kuru, A., Tok, E., Aktaş, M. G., Demir, H. H., Özcan, H. K., & Demir, G. (2021). GIS and multicriteria decision analysis for landfill site selection in Edirne Province, Turkey. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(2), 969–981.
- Mahmood, K. W., Khzr, B.O., Othman, R.M., Rasul, A., Ali, S.A., & Ibrahim, G.R.F. (2021). Optimal site selection for landfill using the boolean-analytical hierarchy process. *Environmental Earth Sciences*, 80, 1-13.
- Marjanovic, J., Zivkovic, B., & Dokic J. (2022). Decision Making Tools In Regional Sanitary Landfill Location Selection. *International Scientific Conference. Mitrovica, Kosova. Recycling and Sustainable Development*, 15(1), 97-108.
- Mirakovski, D., Peltecki, D., Despodov, Z., Bosev, Z., & Panov, Z. (2013). Selection of an optimal landfill location using multi-criteria decision analysis methods. *International Journal of Civil Engineering and Building Materials*, 3(1), 27–36.
- Mozaffari, M., Bemani, A., Erfani, M., Yarami, N., & Siyahati, G. (2023). Integration of LCSA and GIS-based MCDM for sustainable landfill site selection: A case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(4), 510. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-10852-1>
- Rezaei J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57.
- Saleh, S. K., Aliani, H., & Amoushahi, S. (2020). Application of modeling based on fuzzy logic with multi-criteria method in determining appropriate municipal landfill sites (Case study: Kerman City). *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05539-z>
- Senkio, C. S., Ramos, A. P. M., Simões, S. J. C., & Mendes, T. S. G. (2022). Multicriteria analysis and logistical grouping method for selecting areas to consortium landfills in Paraíba do Sul River Basin, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 81(8), 239. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10143-3>
- Sheoran K. S., ve Parmar V. (2020). Identification Of Alternative Landfill Site Using GIS In A Densely Populated Metropolitan Area. *Department of Computer Science and Engineering, Indira Gandhi University Meerpur, Rewari, India. Quaestiones Geographicae*, 39(3), 47-56.
- T.C. Ticaret Bakanlığı. (2019). Kanada, 2021’den itibaren çevreye zararlı tek kullanımlık plastikleri yasaklıyor. Erişim adresi: <https://ticaret.gov.tr/blog/ulkelerden-ticari-haberler/kanada/kanada-2021-den-ibaren-cevreye-zararli-tek-kullanimlik-plastikleri-yasakliyor>

- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2023). Atık istatistikleri, 2023. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2022-49570>
- Wang G. vd. (2009). Landfill site selection using spatial information technologies and AHP: A case study in Beijing, China. *Journal of Environmental Management*, Vol: 90, Issue: 8, Pages 2414-2421.
- Yiğit S. (2014). Kümelenme Teorisi: Kavramsal Bir Çerçeve. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, 9(2), 107-128.
- Veral, E. S., ve Yiğitbaşoğlu, H. (2018). Avrupa Birliği atık politikasında atık yönetiminden kaynak yönetimi yaklaşımına geçiş yönelimleri ve döngüsel ekonomi modeli. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 6(1), 1-19.
- Yıldıran L. (2011). İzmir İçin Atık Depolama Sahasının en uygun Yeri. Yüksek Lisans Tezi, İzmir Ekonomi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Lojistik Yönetimi Yüksek Lisans Programı, İzmir.
- Zarin, R., Azmat, M., Naqvi, S. R., Saddique, Q., ve Ullah, S. (2021). Landfill site selection by integrating fuzzy logic, AHP, and WLC method based on multi-criteria decision analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 19726-19741. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12285-w>



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Investigation of Ballast Water Treatment System Selection Parameters and Cost Analysis: Tanker Ship Application

Serkan BARIS¹ , Sayit OZBEY² , Ismet TIKIZ^{3*} 

¹ Maritime Transportation and Management Engineering, Kocaeli University, Kocaeli, Türkiye, serkanbarisb@gmail.com

² Marine Engineering, Kocaeli University, Kocaeli, Türkiye, sayit.ozbey@kocaeli.edu.tr

³ Marine Engineering, Kocaeli University, Kocaeli, Türkiye, ismet.tikiz@kocaeli.edu.tr

ABSTRACT

Ballast water is taken into the tanks of ships to ensure stability during voyages, but it also contributes to the spread of invasive species, causing ecological and economic damage. To address this problem, the International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments was introduced in 2017, which sets D2 standards to regulate the number and size of organisms in ballast water. The aim of this study is to identify the key factors in the selection of a ballast water treatment system and to calculate the costs associated with a tanker ship. Through a literature review, important parameters affecting the selection of ballast water treatment systems were identified. Based on these parameters, the most suitable system for a chemical tanker was determined and a cost analysis was performed. The study specifically focused on the hydrocyclone UV ballast water treatment system and evaluated both installation and operating costs. The findings show that the hydrocyclone UV system is the most suitable option for chemical tankers in accordance with international regulations. The research emphasises that the initial installation cost as well as operating costs should be considered in the decision-making process. The results provide valuable information to shipowners and operators in selecting an efficient and cost-effective ballast water treatment system that meets regulatory requirements.

Keywords: Ballast water, ballast water management, tanker ship, cost analysis

*Corresponding Author's e-mail: ismet.tikiz@kocaeli.edu.tr

Cite as: Barış, S., Ozbey, S. & Tikiz, I. (2025). Investigation of Ballast Water Treatment System Selection Parameters and Cost Analysis: Tanker Ship Application, *Journal of Marine and Engineering Technology*, 5(1), 21-37. <https://doi.org/10.58771/joinmet.1638809>

Balast Suyu Arıtma Sistemi Seçim Parametrelerinin İncelenmesi ve Maliyet Analizi: Tanker Gemisi Uygulaması

ÖZ

Balast suyu, seferler sırasında dengeyi sağlamak için gemilerin tanklarına alınır, ancak aynı zamanda istilacı türlerin yayılmasına katkıda bulunarak ekolojik ve ekonomik zarara neden olur. Bu sorunu ele almak için, balast suyundaki organizmaların sayısını ve boyutunu düzenlemek için D2 standartlarını belirleyen Gemilerin Balast Suyu ve Sedimanlarının Kontrolü ve Yönetimi için Uluslararası Sözleşme 2017 yılında uygulamaya konmuştur. Bu çalışmanın amacı, bir balast suyu arıtma sisteminin seçimindeki temel faktörleri belirlemek ve bir tanker gemisi ile ilgili maliyetleri hesaplamaktır. Literatür taraması yoluyla, balast suyu arıtma sistemlerinin seçimini etkileyen önemli parametreler belirlenmiştir. Bu parametrelere dayanarak, bir kimyasal tanker için en uygun sistem belirlenmiş ve bir maliyet analizi yapılmıştır. Çalışma özellikle hidrosiklon UV balast suyu arıtma sistemine odaklanmış ve hem kurulum hem de işletme maliyetlerini değerlendirmiştir. Bulgular, hidrosiklon UV sisteminin kimyasal tankerler için uluslararası yönetmeliklere uygun en uygun seçenek olduğunu göstermektedir. Araştırma, karar verme sürecinde ilk kurulum maliyetinin yanı sıra işletme giderlerinin de göz önünde bulundurulması gerektiğini vurgulamaktadır. Sonuçlar, mevzuat gerekliliklerini karşılayan verimli ve uygun maliyetli bir balast suyu arıtma sistemi seçme konusunda armatörlere ve operatörlere değerli bilgiler sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Balast suyu, balast suyu yönetimi, tanker gemisi, maliyet analizi

1 Introduction

Transportation is carried out by sea, air, road, rail, and pipelines (Battal Sal & Cubuk, 2022). Maritime transport has the largest share, with 90% of the transportation in the world (Özbay et al., 2024). This transportation is carried out by ships (Vural & Yonsel, 2015). Loading and unloading operations on ships require stability calculations. The main objective of ship owners is to sail the ship at full capacity. However, this is not always possible. Ships can depart from the port either without any cargo or with a small amount of cargo, without being loaded at full capacity. In cases where ships sail with no cargo or with little cargo, the ships receive ballast (which means additional cargo, i.e., sea water). This sea water is carried in tanks called “ballast tanks”. There are many kinds of living organisms in ballast tanks, which are transported through the tanks (Sanlier, 2019).

To ensure stability control, ships take in sea water, called ballast water, when they are not loaded. Because of ballast water, the stress on the ship structure is reduced, and the propeller is allowed to sink into the water (Başhan et al., 2016). When organisms are released in the ballast water into another ecosystem, this may disrupt the ecological balance. Species brought with ballast water can become invasive in their new environment. In addition, they cause economic losses. To prevent these problems, the Ballast Water Management (BWM) Convention was published by the (IMO) in 2004 and entered into force on September 8, 2017. After the entry into force of the BWM, ships are required to have a ballast water treatment system according to their gross tonnage, year of construction, and ballast capacity. 2018-2022 was a busy period for shipyards and ship owners for integrating ballast water treatment systems on board (Yonsel & Vural, 2017). It is important to select the ballast water treatment system by considering the ballast capacity of the ship and the key parameters of efficiency and utility.

Approximately 10 million tons of ballast water are transported from one location to another globally every year. Daily 7000 invasive species inhabit this ballast water. These invasive species pose a threat to human, animal and plant life (Satir, 2014). These organisms are large enough to pass through the ballast water system and pumps and have a wide range of sizes. Of the organisms that enter the ballast

tank, those that remain alive during their voyage can harm the new ecosystem they reach (Elcicek & Çakmakci, 2016). When these harmful aquatic organisms reside in new ecosystems, they disrupt the order of the food chain. After reproduction, these species can become invasive. These invasive species also disrupt the coastal economy by damaging fishing grounds. Apart from the economic impact, harmful viral pathogens and bacteria, such as *Vibrio cholerae* and *E. Coli*, which harm human and environmental health, can also be carried with ballast water (Güney, 2011).

As problems arising from ballast water have reached a serious level, the International Maritime Organization (IMO) initiated studies on this issue. On February 13, 2004, at the conference held by the IMO in London, BWM was completed and submitted for signature. For this convention to enter into force, ratification by 30 countries representing 35% of the world merchant fleet is required (Vural & Yonsel, 2015). On September 8, 2016, this condition was met, and the convention entered into force on September 8, 2017 (Bilgin Güney, 2018).

IMO BWM consists of 5 parts. The components include general provisions, standards for BWM, and control requirements for ships, special area requirements, and the measurement and certification of ballast water methods. The ballast water treatment rules are included in the section on standards for BWM (International Maritime Organization, 2017). The ballast water treatment sections are classified according to D1 and D2 standards. In the D1 standards, a ship is required to change the ballast water before entering the port (Tokus, 2019). In the D1 standards, the ship should empty the ballast water without using any augmentation system and replace it with fresh ballast water from the open sea. This method should be performed at a distance of 200 nautical miles from land and at a depth of 200 meters. The volume change should be 95%. Another method is the overflow method. In the flooding method, at least 3 times the volume of the ballast water in the tank should be replaced. The volumetric change must be 95%. In the D2 standards, if the size of the organisms in the ballast water is equal to or greater than 50 µm per cubic meter, the concentration must be less than 10 organisms per cubic meter. If the size of the organisms is less than 50 µm and greater than or equal to 10 µm, there should be fewer than 10 organisms per millilitre (Vural & Yonsel, 2015). According to IMO guidelines, D2 standards are required for ships as per BWM. To meet these standards, ballast water treatment systems have been developed using mechanical, physical and chemical methods (Tokus, 2019).

2 Literature Review

In the literature, there are various studies on ballast water treatment systems. Various treatment system techniques create alternatives for ship owners. The high costs of such technologies also increase freight rates. Other methods of cleaning the ballast water should be considered, considering the costs of the chemicals used in the treatment and their environmental impact. Research should also be carried out on methods to clean ballast water at the shore. The most suitable system is one in which different methods are used together economically (Balajt & Yaakob, 2011).

Ballast water discharge rules vary according to the IMO and the United States Coast Guard (USCG). According to the USCG, if ballast water is to be discharged into the sea, certain requirements must be fulfilled. These are: there should be less than 1 aquatic organisms in 100 m³, there should be less than 1 viable aquatic organisms in 100 ml, there should be less than 103 bacteria and less than 104 viruses in 100 ml (Albert et al., 2013)

The accumulated sludge should be cleaned from time to time because microorganisms from the sludge at the bottom of the ballast tank can cause the proliferation of microorganisms in the tank. Thanks to new ballast technologies, large volumes of ballast water can be treated by different methods such as UV

(ultraviolet) light, ozone, biocide, and filtration. Ballast treatment methods vary depending on the ship type and requirements (Gonçalves & Gagnon, 2012).

There are 69 treatment systems with IMO-type approval. When IMO-approved systems are analysed, filtration methods are mostly used in pretreatment. Current technology has enabled the widespread adoption of UV systems. While 41 of these systems used a single method in the second treatment, 21 of them used more than one treatment method. If active substances are used in the system, the UV method is not included; otherwise, it is included. The electrolysis/electro chlorination method is the second most used treatment method in 17 systems. The ballast water capacities of IMO-type pumps range from 20 m³/hour to 16,000 m³/hour. The area covered by these systems is 1 m²–12.4 m² for systems with a capacity of up to 500 m³/hour and 77.6 m² for systems larger than 500 m³/hour. Their height ranges from 1 to 3.9 meters. Glo En-Patrol Ballast Water Treatment System is the most widely sold system (Güney, 2017).

Every living organism has a temperature range in which it must exist. When the temperature range is exceeded, living organisms die. In the research conducted on MS Don Quijote, an attempt was made to clean ballast water using temperature. For this research, 4 starboard tanks, port tanks, and aft peak tanks of the ship with a total ballast capacity of 8075 MT were used. The water collected from these tanks was sent to a cleaning tank. Before being sent to the cleaning tank, the ballast water was passed through 50-micrometer filters. The water in the cleaning tank was heated using a steam circuit. The water in the cleaning tank was gradually heated from 55 °C to 80 °C. ballast water samples taken before heating were checked for the presence of zooplankton, plankton, and bacteria by dropping chemicals into them and their ratios were determined. After the water was sent to the heating tank, it was observed that some of the organisms in the water started to disappear at 55-60 °C. Samples taken from the tank heated to 80 °C were checked again. It was determined that 95% of the water was cleaned. However, although it met the IMO standards in terms of concentration, some plankton were larger than these standards. Although partial success was achieved in the study, the operation is difficult for ships on short voyages. In addition, the seawater temperature is important for effective treatment. Because heating the ballast water and performing the operation take time, vessels should account for this duration in their scheduling (Quilez-Badia et al., 2008).

For ships with a ballast capacity of 500-1500 m³ / h, the most appropriate among the filtered electrolysis, filtered deoxygenation, filtered UV, and filtered chemical treatment systems was selected. Cost is an important factor in selecting ballast water treatment systems. In the expert interviews and evaluations, it was concluded that UV treatment systems with filters are the most suitable systems (Yazır & Gedik, 2022). 52,376 deadweight tonnage (DWT) and 28,930 m³ ballast capacity of a dry cargo ship were investigated to determine the operating cost of a UV treatment system with filters. The USCG mode of the treatment system consumes more energy than the IMO mode. The fuel type used in energy-consuming generators also affects the cost. The purchase price of fuel varies by region. When the ship performs 16 ballast treatment operations per year, the operating cost ranges from at least USD 6039, to at most USD 20146, according to the variables affecting fuel expenditure and cost (Başhan & Kaya, 2022).

Tokus (2019) aimed to determine the most suitable ballast water treatment system for dry cargo ships. In the study, 15 criteria were developed based on basic technical and economic factors such as operational requirements of the ship, compliance with international standards, energy efficiency, costs, maintenance and environmental impacts. In this context, UV+filtration, electrolysis filtration and chemical filtration systems were compared. As a result of the evaluations, UV+filtration system was determined as the most suitable option in terms of low maintenance requirement, high energy efficiency

and environmental sustainability. The installation, design, and 20-year maintenance costs were calculated for ship A, which had a 28,500 DWT and a 9,500 m³ ballast capacity, and the cost was 389,300 Euros.

Ballast Water Management Convention (BWMC) has been signed by 81 countries as of January 9, 2020. Checking if the ports comply with the BWMC. In the D1 part of the Convention, control over the changes in water conditions is carried out by the port authority. However, it is not easy to understand whether the ships comply with the D2 rules or require further analysis. To ensure control of the spread of invasive species, it is obligatory to install BWTS on ships. The ballast water exchange method described in D1 could be used until 2021 for ships built before 2009. According to a Lloyds Register report in 2010, the area covered by the filtration/UV system was approximately 3.5–18 m². The ballast water treatment system requires energy for operation. These energy requirements increase fuel costs. Operation and maintenance costs;

- Filtration + UV 20 USD/1000 m³
- Filtration + chlorine dioxide, 80 USD/1000 m³
- Filtration + sodium hypochlorite: 50 USD/1000 m³ (Eleyadath et al., 2021)

3 Ballast Water Treatment Systems

The ballast water treatment systems are integrated into the ship. The primary objective of ballast water treatment systems is to neutralize the organisms present in the water. Mechanical, physical, and chemical methods are available for ballast water treatment. These methods were implemented using various techniques. A comparison of these treatment methods is presented in Table 1. Studies have shown that using a single treatment method is not effective for ballast water treatment. In treatment systems, large organisms are primarily retained by filtration, and in the second stage, another treatment method is used (Bilgin Güney, 2018).

3.1 Mechanical Treatment

The mechanical treatment involves ballast water before it enters the ballast tank. The aim of this study is to reduce the number of organisms in ballast water. Filtering and hydrocyclone separation are more prominent in this method. With this method, large organisms that enter the ballast tank are prevented from damaging the second treatment system (Güney, 2011). The UV method applied after filtration is one of the most effective methods for treating ballast water (Gonçalves & Gagnon, 2012).

3.2 Physical Treatment

In physical treatment, organisms are attempted to be destroyed by heating ballast water. As temperature increases, the duration of its effect on organisms decreases. More energy is required for thermal treatment (Aşıkoğlu, 2014). The UV method is an effective approach for cleaning organisms. Using the UV method, the structures in the DNA, RNA, and cell proteins of the organisms are disrupted, and the organisms are inactivated. It is recommended to use the UV light after effective pre-treatment. Because crustacean organisms and life forms are highly resistant, the use of UV radiation alone may not be sufficient for treatment. With the use of a pre-treatment system, adequate treatment levels can be achieved (Güney, 2017). With ultrasound technology, the vibration generated by high-frequency energy, introduced into the liquid, has physical and chemical effects (Joyce et al., 2003). As a result, the cell walls of the organisms are destroyed by the bursting of bubbles formed in the ballast water. However, when the ultrasonic system is not used with another system, it has been observed that its success remains

between 70% and 90% (Sanlier, 2019). While cavitation has advantages such as ease of use, small footprint, and lack of added chemicals in ballast water treatment, it has disadvantages such as high operating costs and safety risks (Bilgin Güney, 2018).

3.3 Chemical Treatment

To remove organisms via chemical methods, biocides, which are chemical substances, need to be added to ballast water. Biocides ensure that the organisms in the ballast water die. To avoid the harmful effects of biocides on the environment and humans, the type of biocide to be used should be carefully selected. Biocides are stored on board in liquid or solid form (Satir, 2014). chemical methods expose ship personnel to chemicals and corrodes ballast tanks (McCluskey & Holdø, 2009). The other chemical methods used to treat ballast water are electrochlorination (electrochemical) and deoxygenation. In the deoxygenation method, aquatic organisms are deprived of oxygen and are thus killed. However, deoxygenation is not effective in organisms living in oxygen-free environments. Electrochemical systems have a lethal effect on aquatic organisms by exploiting the impact of an electrical field (Sanlier, 2019). The disadvantage of this system is that the disinfectant is stored on the ship, occupying space and posing risks to personnel safety (Bilgin Güney, 2018). Ballast water treatment systems are given in Table 1.

Table 1: Treatment methods and comparisons

Treatment Type	Treatment Method	Description	Advantage	Disadvantage
Mechanical Treatment	a) Filtration	Use of discs or fixed screens	Effective for large particles	Not effective for small particles
	b) Sedimentation	Used to increase the particle size	Increased particle size	Additional water storage tank required
	c) Hydrocyclone	High-speed centrifugal force	Can be more effective than filtration	Effective for large particles
Physical Treatment	a) Ultraviolet (UV)	UV light disrupts the DNA structure of microorganisms	Effective against many types of microorganisms	More effective in clear water environments
	b) Deoxygenation	Reduces oxygen in the space above water, thereby suffocating microorganisms	Reduces corrosion as oxygen decreases	Takes 1-4 hours to suffocate microorganisms
	c) Heat	Achieved by heating ballast water	Ballast water is disinfected as it heats during its use as cooling water.	It requires a long time for effective heating
	d) Cavitation	Breaks the cell walls of microorganisms using gas or ultrasound	Effective as a pretreatment system	Not sufficient alone to kill all microorganisms
Chemical Treatment	a) Chlorination	Breaks down microorganism cell walls	Water disinfection systems for industrial and urban applications	Ineffective against cysts if used at concentrations lower than 2 mg/l
	b) Electro-Chlorination	Creates an electrolytic environment that oxidizes, breaking down microorganism walls and	Water disinfection systems for industrial and urban applications	Ineffective against cysts if used at concentrations lower than 2 mg/l

Table 1: *Treatment methods and comparisons (continue)*

Chemical Treatment	c) Peracetic Acid and Hydrogen Peroxide	Addition to water to break down microorganism cell walls	Can result in harmful byproducts	Requires a separate storage area for high doses
	d) Ozone	Ozone gas is introduced into water, reacting with other substances, and killing organisms	Effective against microorganisms	Not effective on large organisms
	e) Menadione and vitamin K levels	Invertebrates are toxic	It can be obtained through both natural and artificial methods. No harmful effects	The treated water must be neutralized before discharge.

4 Methodology

This study employs a mixed-methods approach, integrating qualitative and quantitative research methods to evaluate ballast water treatment systems comprehensively. The research design consists of two primary stages: systematic literature review and semi-structured expert interviews. The study starts with a systematic literature review to identify important factors in choosing ballast water treatment systems, like installation and operating costs. These parameters were then refined and expanded through semi-structured interviews with seven industry experts, including three authorized representatives from installation companies and four system users. 15 thorough selection criteria were developed by combining knowledge from the two sources to direct the treatment systems' comparative analysis. Firstly, the factors considered to be important in the selection of ballast water treatment systems were identified through a comprehensive review of the relevant literature. In this review, basic parameters such as installation and operating costs were particularly emphasised; however, it was understood that these parameters alone were not sufficient for selection. In order to overcome the deficiencies of the parameters obtained as a result of the literature review, 7 industry experts with experience in the field of application were interviewed. Out of the 7 industry experts consulted, 3 are authorized in the companies that installed ballast water treatment systems and 4 are ballast water treatment system users. Information about these people is presented in Table 2.

Table 2: *Information about industry representatives*

Expert	Industry	Role
Person 1	Representative of a treatment company	Purchasing department manager
Person 2	Representative of a treatment company	Purchasing department manager
Person 3	Representative of a treatment company	Treatment system installation manager
Person 4	Ship personnel (treatment system user)	Captain
Person 5	Ship personnel (treatment system user)	Captain
Person 6	Ship personnel (treatment system user)	First Officer
Person 7	Ship personnel (treatment system user)	Chief Engineer

4.1 Parameters to Consider When Choosing a Ballast Water Treatment System

Type Approval: Ballast water treatment systems must be of the IMO type approved to comply with the BWMC. This approval is given by the flag state or organizations authorized by the flag state (Kukner

& Yasa, 2018; Wang & Corbett, 2021). Ships operating in the United States of America (USA) waters must comply with the United States BWM regime. The US administration's testing and protocol requirements are more comprehensive and more stringent than IMO's type approval requirements. The ballast water treatment system of ships conducting ballast operations in US waters must have US Coast Guard (USCG) type approval. The US authorities have paid attention to this situation (Čampara et al., 2019).

- Installation and purchase costs: These include those of ballast water systems (Wang & Corbett, 2021).
- Operating costs: This is the cost that covers expenses such as spare parts, repair, maintenance, and consumed energy by the system (Tokus, 2019).
- Damage to the environment: There is a risk that the chemicals used, especially in chemical treatment methods, may harm the environment by creating harmful by-products with other chemicals in seawater (Güney, 2017).
- Usability in fresh and salt water: Some organisms can live in fresh water, whereas others can live in salt water. This problem can be solved by installing a desalination device on board (Vural & Yonsel, 2015).
- System footprint: While the planning of the area covered by the treatment system is done in advance for ships under construction, adding a ballast water treatment system to existing ships may pose a problem for the treatment system (Tokus, 2019). In systems using chemical treatments, the storage of chemicals occupies extra space on the ship (Bilgin Güney, 2018).
- Spare parts and service: The supply and installation of manufactured parts on the ships is performed by service providers. Companies producing ballast water treatment systems focus primarily on their production processes. Installation, maintenance, and repair require an international network. These services are mostly provided by providers. Ship owners use service providers to install and maintain the treatment system (Rivas-Hermann et al., 2015).
- Personnel safety and training: If a chemical treatment method is used, necessary training should be given on the use of chemical substances for personnel safety (Tokus, 2019).
- External disruptions: In the filtration method used in ballast water treatment, disk and membrane filters are generally used. One of the important problems encountered in filter systems is clogging by large organisms found in seawater. Cleaning of these filters is done by a backwashing system (Güney, 2017).

5 Results and Discussion

5.1 Ballast Water Treatment System Selection for Chemical Tankers

An attempt was made to select the most suitable ballast water treatment system for a chemical tanker. To identify the most appropriate system, the systems were compared based on the determined parameters. Using the selection criteria specified in the Methodology section for chemical tanker A, one of the following systems will be selected and integrated on board: a filtered electrolysis system, a filtered chemical system, a filtered UV system a UV system with hydrocyclone. The tanker details are given in Table 3. The 10 parameters to be used in the selection of 4 different types of ballast water treatment systems are listed in Table 4.

Table 3: *Chemical tanker information*

Ship Type	Chemical Tanker
Year Built	2012
Length Overall	135.6 m
Beam (Width)	20.6 m
Gross Tonnage	8,975
Maximum Summer Draft	8.51 m
Summer Deadweight (DWT)	12,933.2 tons
Ballast Water Capacity	4,857.81 m ³
Ballast Pump Capacity	2 x 500 m ³ /hours

Table 4: *Ballast water treatment system selection parameters*

Parameter	Description
Parameter 1	IMO type approval
Parameter 2	USCG type approval
Parameter 3	Purchase and installation costs
Parameter 4	Operating cost
Parameter 5	Environmental impact
Parameter 6	Usability of freshwater and saltwater
Parameter 7	Space occupied by the system
Parameter 8	Spare parts and service availability
Parameter 9	Personnel safety and training
Parameter 10	External disruptions

The parameters for selecting the most suitable ballast water treatment system were identified through a systematic literature review and semi-structured interviews with industry experts. These parameters were used to compare the filtered electrolysis treatment system, filtered chemical treatment system, filtered UV treatment system, and UV treatment system with hydrocyclone, as shown in Table 5. According to the comparison. Four systems compared according to parameters 1 and 2 were approved as IMO-type or USCG-type. According to Parameter 3, the installation cost of a chemical system with a filter is more advantageous than that of other treatment systems due to the efficient combination of the filter system and chemicals. The reason other systems were excluded for this parameter was that the filtered chemical system showed a more advantageous cost-benefit ratio due to the combination of chemical treatment and filtration. According to Parameter 4, the absence of a filtering system makes hydrocyclone systems more advantageous in terms of operating costs. The use of chemicals in treatment systems is disadvantageous in terms of operating costs. According to Parameter 5, the chemicals used in the filtered chemical system pose a greater risk to the environment, thus, making the other systems more advantageous. According to Parameter 6, all systems can operate efficiently in salty and fresh water. According to Parameter 7, in filtered chemical treatment systems, both the system and storage space are required on deck or in suitable spaces for storing chemicals. Therefore, other treatment systems are more advantageous than filtered chemical treatment systems. According to Parameter 8, UV systems with filters and UV systems with hydrocyclone are more frequently produced and preferred by ship owners, which makes these systems more advantageous in terms of spare parts and service. According

to Parameter 9, the chemical substances used in chemical treatment systems pose a risk to personnel safety. Personnel should be trained on the use of chemical substances. Since UV systems with filters and hydrocyclones are more widely used than other systems, ship personnel are more familiar with them. According to Parameter 10, UV systems that use hydrocyclones instead of filters are more advantageous than other systems. Marine organisms that are near the treatment system and manage to clog the filters cause operational delays. As a result of the evaluation, it was determined that the most suitable treatment system was a UV system, with hydrocyclones. UV systems with filters are an alternative to UV systems with hydrocyclones. To make a clearer choice between the two systems, the operating costs obtained from the sector will be compared, and a decision on which system to install on the chemical tanker ship will be made.

Table 5: Comparison of ballast water treatment systems

Parameters / Ballast Water Treatment Systems	Filtered Electrolysis System	Filtered Chemical System	Filtered UV System	Hydrocyclone UV System
Parameter 1	✓	✓	✓	✓
Parameter 2	✓	✓	✓	✓
Parameter 3		✓		
Parameter 4				✓
Parameter 5	✓		✓	✓
Parameter 6	✓	✓	✓	✓
Parameter 7	✓		✓	✓
Parameter 8			✓	✓
Parameter 9			✓	✓
Parameter 10				✓

The most widely used ballast treatment systems are those in which ballast water is treated with UV radiation after separating organisms larger than 50 µm from water via filtration, or hydrocyclone (Stehouwer, 2016). In the filtration system, backwashing is necessary to ensure filter cleanliness. Pressure drops caused by backwashing prolonged the ballast water intake time (Yonsel & Vural, 2017). The CIP module in the filtered UV systems cleans the equipment at the end of the treatment process. The CIP module contains a liquid, and its annual cost is 75 Euros (Tokus, 2019). The operating expenses of UV systems with filters and UV systems with hydrocyclones are compared in Table 6. As a result of the comparison, the decision was made to install a UV system with a hydrocyclone on the chemical tanker.

Table 6: Operating costs of the filtered and hydrocyclone UV systems

Equipment	Filtered UV System	Hydrocyclone UV System
Filter element	Present	Absent
Filter backwash system	Present	Absent
UV lamp cleaning	Present	Cost-free
UV lamp replacement	Present	Present
Quartz tube	Present	Present

5.2 Installation of Hydrocyclone-UV Ballast Treatment System and Costs for 10 Years

As a result of the market research, the company that installs the system has been determined. Since few companies have installed this system, it was easy to choose one. The prospective company was interviewed, and its official provided data on the hydrocyclone UV treatment system and costs for 2021. The parts of the UV treatment system to be installed with a hydrocyclone are shown in Figure 1. The treatment system includes a hydrocyclone, local control panel, UV supply panel, US module, and UV module.

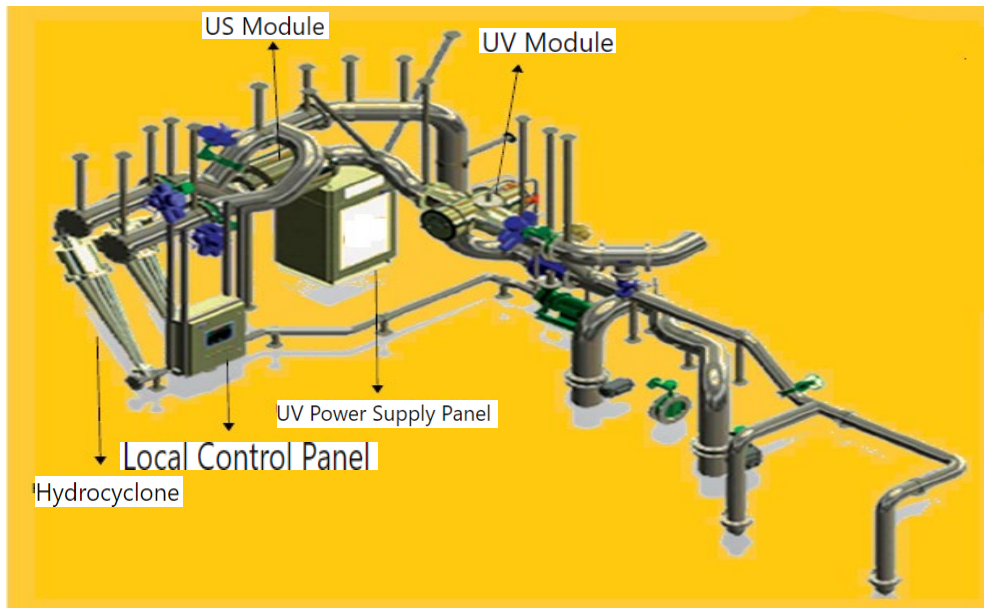


Figure 1: Isometric view of ballast water treatment system

In ships where there is not enough space, system equipment can be installed either separately, side by side, or on top of each other. There is only one rule to be followed in installation, and it is shown in Figure 2. According to this rule, the hydrocyclone unit can be placed with a maximum slope of 45° with respect to the ground. In this case, the pressure loss is only 0.6 bar or less.



Figure 2: Maximum angle of hydrocyclone system with ground

When there is not enough space for the treatment system, the installation company conducts a 3D scan and situates the system within the model drawing in the most appropriate and economical way. Sample 3D model is shown in Figure 3. The drawings will be submitted to the classification society for approval. Following class approval, the pipes and associated connection equipment to be used externally are listed

together with their technical specifications. After the preparation of the pipes and connection equipment, the system installation was completed, tested under the supervision of the classification society and authorized ship personnel, and then delivered.

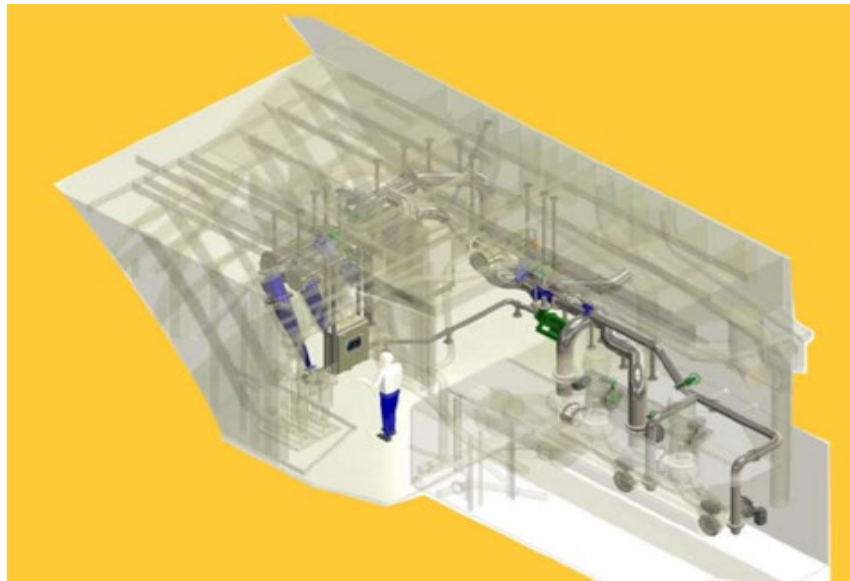


Figure 3: Demonstration of ballast water treatment system in a 3D model

The investment cost has the highest share among the costs of ballast water treatment systems (Tokus, 2019). For the investment cost, interviews were conducted with the authorized company, and the necessary information was obtained via email. The ship has two ballast pumps with a capacity of 500 m³/h. Therefore, the capacity of the treatment system to be integrated into the ship was 1,000 m³/h. Because the ship was a chemical tanker, an explosion-proof (gas tight) system was selected. Investment costs are handled in four different groups. These are the purchase cost of the product, the installation cost of the product, the 3D modeling design cost included in the documents to be submitted to the classification societies before installation, and the extra inspection and certification cost of the flag state and classification societies after installation. These costs are listed in Table 7.

Table 7: Cost of hydrocyclone-UV ballast treatment system

Investment Costs	Fees (USD)
Purchase cost	175,000
Installation cost	43,750
Model design cost	15,000
Certification cost	3,000
Total	236,750

Operating costs are calculated for two different groups. These are the operational and maintenance costs. When calculating the operational cost of the ballast water treatment system, the consumed energy by the ship was also calculated. It is assumed that the ship performs 20 operations per year. Ballast intake time is calculated as 10 and 12 hours. The annual ballast operation time was calculated as 440 hours. The energy cost per kilowatt (kW) was calculated as 0,1 USD. The energy costs of the 1000-m³/h capacity system are listed in Table 8. The amount of electrical energy consumed by the system for 10 years was 234,520 kWh, and the cost of the consumed energy was USD 23,452.

Table 8: *The consumed energy by the system and its cost*

Description	Value
Minimum-Maximum Power (KW)	36-82 kW
Average Power (KW)	53,3 kW
1-Year Electrical Consumption	23,452 kW
1-Year Electricity Cost	\$2,345
5-Year Electrical Consumption	117,260 kW
5-Year Electricity Cost	\$11,726
10-Year Electricity Consumption	234,520 kW
10-Year Electricity Cost	\$23,452

Ballast water treatment system equipment is maintained or replaced at regular intervals. The maintenance cost is required for the maintenance or replacement of the system equipment. Among the equipment that is maintained and replaced, the flow meter, UV, temperature, and pressure sensors are calibrated every year; the UV lamp is replaced every 3 years; the quartz wiper is maintained every 3 years; the quartz tube and ultrasonic boiler are replaced every 5 years; and electrical and solenoid valves are maintained every 5 years. There is also a service cost for the class. According to the data received from the manufacturer, the detailed maintenance costs are listed in Table 9 for the annual, 5-year, and 10-year periods.

Table 9: *Maintenance costs of hydro cyclone-UV ballast treatment system*

Equipment List	Maintenance or Replacement Time	Maintenance or Replacement Cost (USD)	1-Year Cost (USD)	5-Year Cost (USD)	10-Year Cost (USD)
Hydrocyclone	-	-	-	-	-
Flow Meter	Calibration / Annually	160	160	800	1600
Temperature & Pressure Sensors	Calibration / Annually	160	160	800	1600
UV Sensor	Calibration / Annually	160	160	800	1600
Drain Pump	Maintenance/ 5 Years	580	116	580	1160
UV Lamp	Replacement/ 3 Years	600 per unit	1200 (up to 250 m ³)	6000 (up to 250 m ³)	12,000 (up to 250 m ³)
Quartz Wiper	Maintenance Seal Set / 3 Years	100 per seal set	33	166	332
Quartz Tube	Replacement/ 5 Years	200 per unit	240 (up to 250 m ³)	1200 (up to 250 m ³)	2400 (up to 250 m ³)
Ultrasonic Boiler	Replacement/ 5 Years	8800	1760	8800	17,6
Electric Valves	Maintenance/ 5 Years	1000	200	1000	2000
Solenoid Valves	Maintenance/ 5 Years	200	40	200	400
Service for Class	Annually	300	300	1500	3000

UV lamps, ultrasonic boilers, and quartz tubes constitute a significant part of the maintenance cost. The number of these parts increases as the system capacity increases, in this case, the maintenance costs also increase. As the number of UV lamps in the system increases, the energy drawn by the system also increases. An excessive amount of energy drawn from energy systems causes increased usage, which

indirectly increases the maintenance cost. The annual 5-year and 10-year total maintenance and replacement costs obtained from the data on the ballast water treatment systems built on the 450 ships are listed in Table 10.

Table 10: *Total maintenance cost of the ballast water treatment system*

Capacity (m ³)	1-Year Total Cost	5-Year Total Cost	10-Year Total Cost
100-250	\$4,369	\$21,846	\$43,692
500-700	\$5,569	\$27,845	\$55,690
1000-1500	\$6,769	\$33,845	\$67,690

According to the data obtained, the annual maintenance and repair cost of the ballast water treatment system with a capacity of 1000 m³ is USD 6,769, the 5-year maintenance and repair cost is USD 33,845, and the 10-year maintenance and repair cost is USD 67,690. The 10-year total cost (CTM) of the ballast water treatment system, with a capacity of 1000 m³, is equal to the sum of the investment cost (CYM), 10-year operational cost (COM), and 10-year maintenance and overhaul cost (CBTM). The 10-year total cost is shown in Equation 1.

$$C_{TM} = C_{YM} + C_{OM} + C_{BTM} \quad (1)$$

According to the created equation;

$$C_{TM} = 236750 \text{ USD} + 23452 \text{ USD} + 67690 \text{ USD} \quad (2)$$

$$C_{TM} = 327892 \text{ USD} \quad (3)$$

In the study conducted, when examining the costs of the ballast water treatment system, it was found that the investment was the highest cost, amounting to 236,750 USD, followed by maintenance costs at 67,690 USD, and operational costs were the lowest at 23,452 USD. In proportional terms, 72% was attributed to investment costs, 21% to maintenance costs, and 7% to operational costs.

The findings of this study align with existing literature on ballast water treatment systems, particularly regarding system selection criteria and cost-effectiveness. Similar to previous studies (Bashan & Kaya, 2022; Vorkapić et al., 2018), UV-based treatment systems are favored for their low maintenance, high energy efficiency, and minimal environmental impact. While filtered chemical treatment systems may have lower installation costs, their higher operational expenses and environmental risks make them less favorable (Kato & Kansha, 2024). The literature also highlights the importance of space requirements, spare parts availability, and operational disruptions, which are consistent with this study's findings. Hydrocyclone-UV systems are advantageous due to their lack of filter backwashing, reducing operational delays. Cost evaluations show that while UV-based systems may have a higher initial investment, their long-term operational and maintenance costs are more manageable. Energy consumption and maintenance align with industry expectations, further supporting the practicality of hydrocyclone-UV systems for chemical tankers. Overall, the study emphasizes that the selection of a treatment system should consider the type of ship, operational needs, and compliance requirements, rather than focusing solely on cost.

6 Conclusions

Important parameters for the selection of ballast water treatment systems were determined, and information on the costs of such systems was obtained. This study aims to contribute to the sector by providing information to companies that will install this system on their ships. Within the scope of the study, a ballast water treatment system suitable for tanker A, with 12933 DWT, was selected, and the total cost of this system over 10 years was calculated. First, the treatment method must be selected. For this purpose, 10 selection parameters were created by reviewing the literature and interviewing experts. With the help of these parameters and expert opinions, the hydrocyclone / UV system was selected for ship A. The companies that are installing this system were identified. The number of companies installing hydrocyclone/UV treatment systems in our country is not very high. For the cost calculation, a company official was contacted to obtain the necessary information. The company and ship names were not disclosed due to commercial confidentiality. According to the received information, the total cost of the installation and 10-year operation of the hydrocyclone/UV system was USD 327,892. Of this cost, 72% is investment cost, 21% is maintenance cost, and 7% is operational cost. Although investment cost is primarily important for ship owners in ballast water treatment systems, maintenance and upkeep costs should be taken into consideration as well.

In this study, a chemical tanker ship was examined. The ballast intake and discharge capacity of oil tankers is higher than those of chemical tankers. In future studies, research can focus on issues related to crude oil tankers and similar vessels. In this way, it will be beneficial for the maritime sector if the owners of large-tonnage ships have an idea about this issue. Additionally, future research could explore advancements in treatment technologies, optimization strategies to reduce energy consumption, and regulatory changes affecting system selection.

7 Declarations

7.1 Study Limitations

There is no limitation.

7.2 Acknowledgements

There is no person or institution contributing to this research other than the authors.

7.3 Funding source

No financial support was received for this research.

7.4 Competing Interests

There is no conflict of interest in this study.

7.5 Authors' Contributions

Serkan BARIS: Developing ideas or hypotheses for the research and/or article, planning the materials and methods to reach the results, taking responsibility for the experiments, organizing and reporting the data, taking responsibility for the explanation and presentation of the results, taking responsibility for the literature review during the research, taking responsibility for the creation of the entire manuscript or the main part.

Sayit OZBEY: Organizing and reporting the data, taking responsibility for the explanation and presentation of the results, taking responsibility for the literature review during the research, taking responsibility for the creation of the entire manuscript or the main part, reworking not only in terms of spelling and grammar but also intellectual content or other contributions.

Ismet TIKIZ: Taking responsibility for the explanation and presentation of the results, taking responsibility for the creation of the entire manuscript or the main part, reworking not only in terms of spelling and grammar but also intellectual content or other contributions.

References

- Albert, R. J., Lishman, J. M., & Saxena, J. R. (2013). Ballast water regulations and the move toward concentration-based numeric discharge limits. *Ecological Applications*, 23(2), 289–300. <https://doi.org/10.1890/12-0669.1>
- Aşıkoğlu, B. (2014). *Alternative Methods For Removing Of Invasive Species Emanating From Ships' Ballast Water*. <http://hdl.handle.net/11527/13142>
- Balajt, R., & Yaakob, O. B. (2011). Emerging ballast water treatment technologies: A review. *Journal of Sustainability Science and Management*, 6(1), 126–138.
- Başhan, V., & Kaya, A. (2022). Operation cost analysis of UV-based ballast water treatment system used on a bulk carrier ship. *Environmental Research and Technology*, 5(4), 349–356. <https://doi.org/10.35208/ert.1191003>
- Başhan, V., Sönmez, H., & Gonca, G. (2016, December 9). Bir Yük Gemisinin Balast Operasyonunun Ekonomik ve Ekolojik Analizi. *1st International Congress on Ship and Marine Technology*.
- Battal Sal, O., & Cubuk, K. (2022). A fuzzy multi-criteria assessment model for feasibility studies of transportation projects. *Politecnical Journal*, 25(3), 1191–1199. <https://doi.org/10.2339/politeknik.881067>
- Bilgin Güney, C. (2018). Imo Balast Suyu Sözleşmesi'ne Göre Gemilerde Balast Suyu Yönetimi Ve Güncel Değişiklikler. *GİDB J.*, 2, 21–36.
- Čampara, L., Slišković, M., & Mrčelić, G. J. (2019). Key ballast water management regulations with a view on ballast water management systems type approval process. *Nase More*, 66(2), 78–86. <https://doi.org/10.17818/NM/2019/2.5>
- Elcicek, H., & Çakmakci, M. (2016). Detection of Fecal Indicator Bacteria in Ship Ballast Water. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 34(3), 307–315.
- Eleyadath, L., Machinchery, P., & Achari, V. (2021). An overview on the treatment of ballast water in ships. *Ocean & Coastal Management*, 199, 105296. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105296>
- Gonçalves, A. A., & Gagnon, G. A. (2012). Recent technologies for ballast water treatment. *Ozone: Science and Engineering*, 34(3), 174–195. <https://doi.org/10.1080/01919512.2012.663708>
- Güney, C. B. (2011). *Electrochemical Cell Application For Ballast Water Treatment*.
- Güney, C. B. (2017). *Balast Suyu Arıtım Sistemleri* (Issue March). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35475.78881>
- International Maritime Organization. (2017). International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments (BWM). [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Control-and-Management-of-Ships%27-Ballast-Water-and-Sediments-\(BWM\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Control-and-Management-of-Ships%27-Ballast-Water-and-Sediments-(BWM).aspx)
- Joyce, E., Phull, S. S., Lorimer, J. P., & Mason, T. J. (2003). The development and evaluation of ultrasound for the treatment of bacterial suspensions. A study of frequency, power and sonication time on cultured *Bacillus* species. *Ultrasonics Sonochemistry*, 10(6), 315–318. [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(03\)00101-9](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(03)00101-9)

- Kato, S., & Kansha, Y. (2024). Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(39), 51064–51097. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34584-0>
- Kukner, A., & Yasa, A. M. (2018). *Balast suyu aritma sistemlerinin mevcut durumu. February.*
- McCluskey, D., & Holdø, A. (2009). Optimizing the hydrocyclone for ballast water treatment using computational fluid dynamics. *The International Journal of Multiphysics*, 3(3), 221–234. <https://doi.org/10.1260/175095409788922310>
- Özbay, İ., Aksoy, C., Özbay, B., & Sayin, F. E. (2024). Port waste reception facilities in iron-steel industry: A case study from Türkiye. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 42(3), 845–853. <https://doi.org/10.14744/sigma.2024.00075>
- Quilez-Badia, G., McCollin, T., Josefsen, K. D., Vourdachas, A., Gill, M. E., Mesbahi, E., & Frid, C. L. J. (2008). On board short-time high temperature heat treatment of ballast water: A field trial under operational conditions. *Marine Pollution Bulletin*, 56(1), 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.09.036>
- Rivas-Hermann, R., Köhler, J., & Scheepens, A. E. (2015). Innovation in product and services in the shipping retrofit industry: A case study of ballast water treatment systems. *Journal of Cleaner Production*, 106(April 2014), 443–454. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.062>
- Sanlier, S. (2019). Ballast water regulations of IMO and USCG in international marine trade. *Eurasian Journal of Social and Economic Research (EJSER)*, 6(4), 54–66.
- Satir, T. (2014). Ballast water treatment systems: design, regulations, and selection under the choice varying priorities. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(18), 10686–10695. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3087-1>
- Stehouwer, P. (2016). Effects of various ballast water treatment methods on the survival of phytoplankton and bacteria. In *Royal Netherland Institute for Sea Research* (Issue June). <https://www.narcis.nl/publication/RecordID/oai%3Aimis.nioz.nl%3A259565>
- Tokus, M. (2019). Ballast Water Treatment System Integration and Life Cycle Cost Analysis for Dry Bulk Carrier. *Journal of Eta Maritime Science*, 7(3), 196–210. <https://doi.org/10.5505/jems.2019.69672>
- Vorkapić, A., Radonja, R., & Zec, D. (2018). Cost Efficiency of Ballast Water Treatment Systems Based on Ultraviolet Irradiation and Electrochlorination. *Promet-Traffic & Transportation*, 30(3), 343–348. <https://doi.org/10.7307/ptt.v30i3.2564>
- Vural, G., & Yonsel, F. (2015). Balast suyu aritim sistemlerinde mevcut durum. *GİDB Journal*, 4, 3–24.
- Wang, Z., & Corbett, J. J. (2021). Scenario-based cost-effectiveness analysis of ballast water treatment strategies. *Management of Biological Invasions*, 12(1), 108–124. <https://doi.org/10.3391/mbi.2021.12.1.08>
- Yazır, D., & Gedik, D. (2022). Ballast Water Treatment System Selection for Ships with 500- 1500 m³/h Ballast Discharge Capacity with Analytical Hierarchy Process and Fuzzy Analytical Hierarchy Process. *Mersin University Journal of Maritime and Logistics Research*, 4(2), 129–162. <https://doi.org/10.54410/denlojad.1116053>
- Yonsel, F., & Vural, G. (2017). KPI (Key performance indicators) application on ballast water treatment system selection. *Brodogradnja*, 68(3), 67–84. <https://doi.org/10.21278/brod68305>



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Research article

Journal of Marine and Engineering Technology (JOINMET) 5(1), 38-49, 2025

Received: 2-May-2025

Accepted: 27-May-2025

<https://doi.org/10.58771/joinmet.1689849>



SAKARYA UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

An Analytical Study of Ship Deficiencies Identified During Port State Control: A Case Study of Kocaeli Port

Uğur AKBAŞ¹ , Ozan Hikmet ARICAN^{2*}

¹ Maritime Transportation Engineering Department, Kocaeli University, Türkiye,
235116013@kocaeli.edu.tr

² Maritime Transportation Engineering Department, Kocaeli University, Türkiye,
ozanhikmet.arican@kocaeli.edu.tr

ABSTRACT

Maritime transport remains a fundamental pillar of international trade, and ship inspections are essential to ensure navigational safety and environmental protection. Port State Control (PSC) is a regulatory mechanism used to examine foreign-flagged vessels to verify their compliance with international maritime conventions. Among the various elements assessed during PSC inspections, a ship's type and age significantly influence the likelihood of identifying deficiencies. This study focuses on the PSC inspection data collected from the ports of Kocaeli, a major maritime hub in Türkiye. The objective is to analyze how vessel age and type correlate with the frequency and severity of recorded deficiencies. Using the Analysis of Variance (ANOVA) statistical method, the research compares deficiency rates across various ship categories and age brackets. Additionally, the study examines inspection frequency regarding the risk profiles of different vessels. Findings indicate that ships aged 12 years or older exhibit a higher number of deficiencies, with general cargo vessels being particularly prone to non-compliance. While the overall effectiveness of PSC inspections is evident, the study highlights the need for improved efficiency in inspection protocols. It is suggested that risk assessment models be refined to include more detailed criteria and that inspection strategies be adapted based on vessel characteristics. Furthermore, enhancing pre-inspection preparedness by ship operators may contribute to better compliance outcomes. The study aims to support safer maritime operations by offering targeted recommendations for optimizing PSC inspections at Kocaeli Port.

Keywords: International regulations, Kocaeli port, port state control, variance analysis, ship inspection.

*Corresponding Author's e-mail: ozanhikmet.arican@kocaeli.edu.tr

Cite as: Akbaş, U. & Arican O.H. (2025). An Analytical Study of Ship Deficiencies Identified During Port State Control: A Case Study of Kocaeli Port, *Journal of Marine and Engineering Technology*, 5(1), 38-49. <https://doi.org/10.58771/joinmet.1689849>

Limán Devleti Kontrolü Sürecinde Tespit Edilen Gemi Eksikliklerine Yönelik Analitik Bir İnceleme: Kocaeli Limanı Örneği

ÖZ

Deniz taşımacılığı, uluslararası ticaretin temel yapı taşlarından biri olmayı sürdürmekte olup, gemi denetimleri seyir güvenliği ve çevresel korumanın sağlanmasında hayati bir rol oynamaktadır. Liman Devleti Kontrolü (PSC), yabancı bayraklı gemilerin uluslararası denizcilik sözleşmelerine uygunluğunu denetlemek amacıyla uygulanan düzenleyici bir mekanizmadır. PSC denetimleri sırasında değerdendirilen çeşitli unsurlar arasında, geminin tipi ve yaşı, eksiklik tespit edilme olasılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu çalışma, Türkiye'nin önemli bir denizcilik merkezi olan Kocaeli limanlarından elde edilen PSC denetim verilerine odaklanmaktadır. Araştırmanın amacı, gemi tipi ve yaşının, kaydedilen eksikliklerin sıklığı ve ciddiyetiyle nasıl bir ilişki gösterdiğini analiz etmektir. Bu kapsamda, farklı gemi kategorileri ve yaş grupları arasında eksiklik oranlarının karşılaştırılması için Varyans Analizi (ANOVA) istatistiksel yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, gemilerin risk profillerine göre denetim sıklığı da değerdendirilmiştir. Elde edilen bulgular, 12 yaş ve üzeri gemilerin daha fazla eksiklik barındırdığını, özellikle genel kargo gemilerinin uyumsuzluk açısından daha riskli olduğunu göstermektedir. PSC denetimlerinin genel olarak etkili olduğu görülmekle birlikte, denetim protokollerinin verimliliğinin artırılması gerektiği vurgulanmaktadır. Bu bağlamda, risk değerdendirme modellerinin daha ayrıntılı kriterlerle yeniden yapılandırılması ve denetim stratejilerinin gemi özelliklerine göre uyarlanması önerilmektedir. Ayrıca, denetim öncesi hazırlıkların iyileştirilmesi, daha yüksek uyum düzeyine katkı sağlayacaktır. Bu çalışma, Kocaeli Limanı'ndaki PSC denetimlerinin optimize edilmesine yönelik hedef odaklı öneriler sunarak daha güvenli denizcilik faaliyetlerini desteklemeyi amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Uluslararası düzenlemeler, Kocaeli limanı, liman devleti kontrolü, varyans analizi.

1 Introduction

Maritime transport plays a crucial role in facilitating global commerce, ensuring the uninterrupted movement of goods and supporting international economic systems (Arıcan et al., 2023). Each year, vast quantities of cargo are transported via sea routes, making it essential to maintain high standards of safety, efficiency, and environmental responsibility (Arıcan et al., 2022). Regulatory compliance in the maritime sector is enforced through structured inspection systems, with Port State Control (PSC) being one of the most important instruments for overseeing foreign-flagged vessels. PSC inspections are carried out by national authorities to verify whether visiting ships meet internationally accepted maritime safety, environmental protection, and labor standards. These inspections cover critical areas such as safety procedures, pollution prevention mechanisms, crew welfare, and overall vessel condition. The International Maritime Organization (IMO) provides the legal and operational foundation for these evaluations, aiming to eliminate substandard ships and prevent accidents at sea (Unal et al., 2022). Türkiye holds a strategic geographical position, serving as a bridge between Europe and Asia. Kocaeli Port, located in the Marmara Region, is a major gateway for international shipping and experiences heavy maritime traffic. This makes the effectiveness of PSC enforcement at this port particularly significant. Data gathered from PSC inspections in Kocaeli offers valuable insights into the state of maritime safety and compliance practices in the region.

Numerous studies have examined Port State Control (PSC) inspections to identify effective targeting systems, risk indicators, and factors influencing ship detentions. Eyigün (2013) utilized survey data analyzed through SPSS to evaluate the efficiency of targeting systems for foreign-flagged vessels, concluding that the existing targeting factors adequately measure risk levels and offering improvement

suggestions. Similarly, Zhang, Gang, and Liu (2014) applied Principal Component Analysis (PCA) to identify common deficiencies leading to detentions, highlighting issues with certification validity, ship structure, and firefighting and lifesaving equipment. Further advancing statistical methods, Cariou and Wolff (2015) employed quantile regression to assess the likelihood of deficiencies causing detentions, emphasizing the need for improved vessel selection processes. Recent studies have explored the integration of artificial intelligence in enhancing the effectiveness of Port State Control inspections. Durlik et al. (2024) comprehensively reviewed AI applications in maritime safety and risk management, highlighting the potential for improved inspection protocols. Yan and Wang (2022) developed an AI model addressing data imbalance issues to predict detention probabilities, offering a novel approach to ship selection for inspections. Additionally, Sheriff et al., (202) conducted a bibliometric analysis of PSC-related research, identifying key trends and gaps in literature.

They identified that fire safety issues were prevalent among detained bulk carriers, general cargo, and reefer ships, particularly those over 30 years old. Meanwhile, Öztürk, Işık and Şanlıer (2016) compared inspection performances of Turkish ports under the Med and Black Sea MoUs using the Delphi method, determining that the lack of specialization among inspectors was a significant performance barrier. Im and Sin (2017) examined Tokyo MoU inspections over 36 months and identified poor preparedness for inspections as a major cause of detentions, particularly among bulk and general cargo vessels. Yang, Yang, and Yin (2018) proposed a Tree-Augmented Naive Bayes (TAN) model for predicting detention probabilities based on Paris MoU data, highlighting deficiencies, inspection type, ship age, and recognized organization as key factors (Ayhan, 2023). Wang, Yan, and Qu (2019) enhanced risk detection using a data-driven TAN classifier, outperforming traditional risk profiling by detecting 130% more deficiencies. Fu et al. (2020) utilized association rule mining and decision-quality-cost analysis to uncover correlations between ship types, tonnage, and specific deficiencies, providing practical insights for stakeholders (Doğanay et al., 2023). Later, Xiao et al. (2021) applied Super-SBM and Malmquist Index methods to assess global PSC regime efficiencies, ranking the Indian Ocean MoU highest. Kara (2022) evaluated flag state safety performance using TOPSIS and cluster analysis, revealing that nearly half performed below standard. Demirci and Çiçek (2023) introduced an intelligent ship inspection analytics (I-SIA) model that personalized inspections using fuzzy clustering and Apriori algorithms. Finally, Gezici (2024) used Bayesian networks and machine learning to analyze 2022 Med MoU inspection data, finding frequent deficiencies in fire detection, lifesaving equipment, and cleanliness, with general cargo vessels being the most affected.

By analyzing PSC data specific to Kocaeli Port, this research identifies key factors for improving inspection outcomes and reducing operational risks. The study serves as a resource for practitioners and scholars aiming to optimize maritime safety procedures.

This study aims to analyze the correlation between ship age and type and the number of deficiencies identified during Port State Control (PSC) inspections, using data collected from Kocaeli Port between 2020 and 2024. The scope of the research includes examining 1,834 ship inspections and applying statistical methods, specifically ANOVA, to determine whether these vessel characteristics significantly influence inspection outcomes. The primary purpose of this study is to investigate whether ship age and type have a statistically significant effect on the number of deficiencies identified during Port State Control inspections conducted at Kocaeli Port. By focusing on a major Turkish port within the Mediterranean Memorandum of Understanding (Med MoU) framework, the study offers localized insights with implications for improving risk-based inspection strategies and maritime safety protocols.

2 Methodology

Statistical analysis encompasses a comprehensive set of methods and techniques aimed at collecting, organizing, interpreting, and deriving conclusions from data. This discipline utilizes mathematical and statistical principles to interpret observed data sets, perform hypothesis testing, and reveal patterns or relationships within the data (Field, 2024). Statistical analysis plays a significant role across a wide range of fields, including social sciences, engineering, health sciences, and economics. In scientific research, the application of statistical analysis is essential for validating hypotheses, thereby enhancing the credibility and reliability of research findings (Hair et al., 2013).

Among various statistical methods, analysis of variance (ANOVA) is a widely employed technique that evaluates whether the mean values (dependent variable means) differ significantly across categories of one or more independent variables. The method investigates how the data points forming the means within each category are distributed. ANOVA is particularly suited for comparing the means of two or more groups and determines whether any statistically significant differences exist between them by accounting for both within-group and between-group variances (Field, 2024).

ANOVA is especially valuable in experimental and quantitative research designs, as it assesses the effect of an independent variable on a dependent variable. The analysis is based on two principal components:

- Within-group variability: Represents the individual variation within each group.
- Between-group variability: Indicates the variation in means between different groups.

The ANOVA procedure consists of five systematic steps:

- Checking assumptions: Verifying that the assumptions required for ANOVA are met (e.g., normality, homogeneity of variance).
- Calculating variance sources: Computing the sources of variance that form the basis for ANOVA.
- Computing the F-statistic: Calculating the F-ratio needed for hypothesis testing.
- Significance testing: Determining the significance by evaluating the p-value in relation to a predefined alpha level.

In this study, the Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) was employed to perform the ANOVA. SPSS is a Windows-based software program used for data entry, statistical analysis, and the generation of tables and graphs. It is capable of automatically conducting all statistical equations and assumption tests required for ANOVA, which makes it a suitable tool for the present research. Moreover, SPSS enhances the interpretation of results through its ability to generate explanatory outputs, well-organized tables, and visual representations (Pallant, 2020).

The current study focuses on port state control inspections carried out within the administrative jurisdiction of Kocaeli between 2020 and 2024. A total of 1,834 ships were inspected during this period, and the number of deficiencies identified by inspectors during these inspections was analyzed in relation to ship characteristics, specifically ship age and ship type. The data were retrieved from the THETIS-Med information system, developed by the European Maritime Safety Agency (EMSA), which serves to record port state control results conducted by member states of the Mediterranean Memorandum of Understanding (Med MoU).

Although the data were extracted using the THETIS-Med system, the analysis was not conducted based on Med MoU inspection criteria. Instead, the Paris MoU inspection standards were adopted. This decision was based on the compatibility between Paris MoU and Med MoU information systems, as

well as the alignment of Med MoU inspection procedures with those of Paris MoU through recent revisions.

To classify vessels into two distinct risk groups—High-Risk Ships (HRS) and Low-Risk Ships (LRS)—the study followed a simplified approach inspired by the Paris MoU and Med MoU targeting criteria. Ship age and ship type were the primary determinants of risk classification. Vessels older than 12 years and those known to have higher deficiency or detention rates in historical inspection data (such as general cargo, bulk carriers, and oil tankers) were categorized as high-risk (HRS). In contrast, newer ships and those typically associated with better compliance records (e.g., container ships and Ro-Ro vessels) were categorized as low risk (LRS). This binary risk classification facilitated a clearer statistical comparison of deficiency trends across ship profiles.

Ships in the dataset were classified by type and age, resulting in two distinct risk categories:

- HRS (High-Risk Ships)
- LRS (Low- Risk Ships)

The ship types included in the analysis are as follows:

- General Cargo Ship
- Ro-Ro Vessel
- Container Ship
- Chemical Tanker
- Oil Tanker
- Liquefied Gas Carrier

The ship ages included in the analysis are as follows:

- 12 years or less
- Older than 12 years

The stages of the study with the above data are given in Table 1.

Table 1: *Overview of the Methodology Process*

Steps	Process Description
1. Data Collection	THETIS-Med system used to collect inspection data for 1,834 ships (2020–2024) at Kocaeli Port.
2. Data Classification	Ships classified by type (7 categories) and by age (2 categories= into risk groups (LRS / HRS).
3. Variable Definition	Dependent Variable: Number of deficiencies. Independent Variables: Ship Type, Ship Age
4. Hypothesis Setup	H ₀ : No significant difference in deficiencies among ship types/ages. H ₁ : Significant difference exists.
5. Assumption Testing	Normality and homogeneity of variances tested using SPSS.
6. ANOVA Execution	One-way ANOVA performed using SPSS to analyze group differences.
7. Significance Analysis	F-statistic and p-value calculated. p < 0.05 interpreted as significant.
8. Interpretation	Results interpreted to identify relationships between ship characteristics and deficiencies.

3 Results

In accordance with the methodological criteria, inspection data for 1,834 ships operating under the jurisdiction of Kocaeli between 2020 and 2024 were extracted from the THETIS-Med system and organized for ANOVA analysis. A selected portion of this dataset is displayed in Table 2.

As previously mentioned, the independent variables in this study are ship type and ship age, while the dependent variable is the number of deficiencies identified during inspections. The impact of the independent variables on the dependent variable is presented in Table 3.

The findings reported in Table 3 clearly illustrate the significant influence of both ship type and age on deficiency levels. The overall average number of deficiencies is calculated as 1.47; however, a clear upward trend is observed with increasing ship age. Specifically, ships in the younger age group exhibit an average deficiency count of 0.79, whereas older ships show a substantially higher average of 1.78. This trend suggests that aging ships are more prone to deficiencies.

Table 2: *Deficiencies numbers based on risk based ship type and age*

Ship	Ship Type	Ship Age	Risk for Ship Age	Risk for Ship Type	Number of Deficiency
A	Oil Tanker	21	HRS	HRS	2
B	Liquefied Gas Carrier	19	HRS	HRS	1
C	Chemical Tanker	21	HRS	HRS	1
D	Bulk Carrier	22	HRS	HRS	2
E	General Cargo	14	HRS	LRS	3
F	Ro-Ro	12	LRS	LRS	2
G	Container	07	LRS	LRS	1

In terms of ship type, vessels categorized as lower type record an average of 1.80 deficiencies, compared to 1.13 for higher type vessels, indicating a meaningful relationship between ship type and deficiency frequency. When ship type and age are assessed together, the highest average deficiency count (2.03) is observed in older ships of lower type, while the lowest (0.83) is seen in younger ships of lower type. High-type young ships show the least deficiencies (0.77), whereas high-type older vessels report a moderately increased average of 1.41.

To determine whether the independent variables—ship type and ship age—have a statistically significant effect on the dependent variable, which is the number of deficiencies, the relationship between the variable groups is presented in Table 3.

Table 3: *Deficiencies numbers based on risk based ship type and age*

Ship Type	Ship Age	Mean	Std. Deviation	N
Low	Low	0.83	1.242	174
	High	2.03	2.021	761
	Total	1.80	1.956	935
High	Low	0.77	1.211	393
	High	1.41	1.830	506
	Total	1.13	1.619	899
Total	Low	0.79	1.220	567
	High	1.78	1.969	1267
	Total	1.47	1.830	1834

According to Table 4, two types of effects are identified. The first is the main effect, which refers to the individual impacts of ship type and ship age. The ANOVA results show that the main effect of ship type is statistically significant, with an F value of 28.817 and a p-value less than the critical threshold of 0.01. This indicates that ship type has a significant impact on the number of deficiencies, and there is a meaningful difference in deficiency counts across different ship types.

Table 4: Interaction results of ship type and age with the number of defects

Source	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F Value	p-value
Corrected Model	499.779	3	166.593	54.098	0.000
Intercept	3983.756	3983.756	1	3983.756	0.000
Ship Type	88.741	1	88.741	28.817	0.000
Ship Age	265.456	1	265.456	86.201	0.000
Ship Age*Ship Type	27.381	1	27.381	8.891	0.003
Error	5635.465	1830	3.079		
Total	10119.000	1834			
Corrected Total	6135.244	1833			

Ship age, with an F value of 86.201 and a p-value below 0.01, appears to be the variable with the most substantial effect on deficiency numbers. The second type of effect is the interaction effect, which refers to the combined impact of ship type and age. The interaction effect is also significant ($F = 8.891$; $p < 0.05$), indicating that the influence of ship type on deficiencies varies by ship age. These findings support the hypotheses proposed earlier in the study.

To visually compare group means and interpret both main and interaction effects, the Estimated Marginal Means plot generated via SPSS is presented in Figure 1.

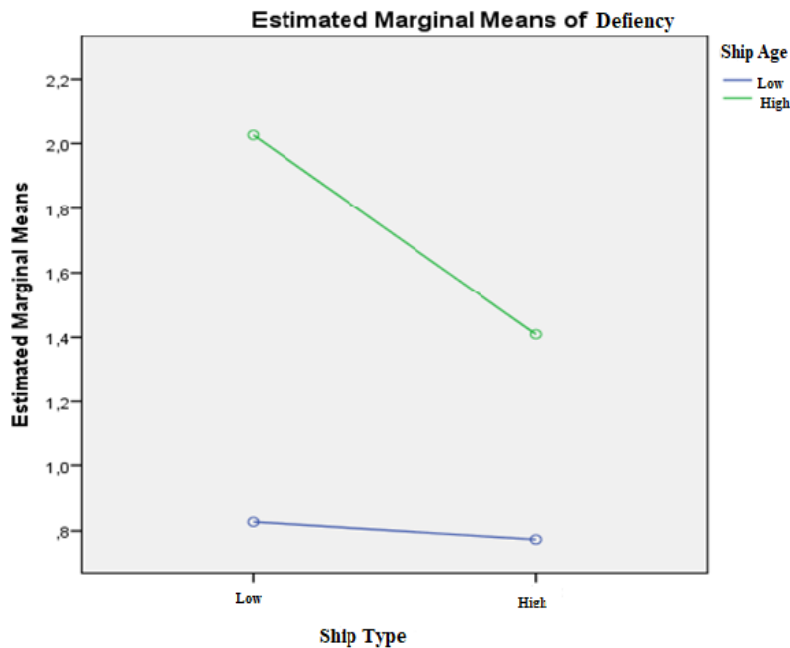


Figure 1: Estimated marginal means of deficiency

This figure illustrates a noteworthy finding: although ships categorized as high-risk would typically be expected to exhibit a higher number of deficiencies, the analysis reveals that ships classified as low-risk actually show a greater number of recorded deficiencies.

When examined by ship age, vessels under 12 years of age—considered lower risk—were associated with fewer deficiencies, whereas those aged 12 years and above demonstrated a substantially higher number of deficiencies.

Further analysis of the interaction between ship age and ship type indicates that the highest average number of deficiencies was observed in ships over 12 years old belonging to the low-risk type category. These were followed by ships over 12 years of age classified as high-risk. Among vessels under 12 years, although the differences were relatively small, low-risk ship types showed a slightly higher number of deficiencies compared to high-risk types.

4 Discussion

Port State Control (PSC) inspections are essential for ensuring the operational safety of ships, compliance with international maritime conventions, and the identification of substandard vessels. In order to enhance the efficiency and effectiveness of these inspections, it is crucial to analyze the deficiencies identified during PSC procedures with respect to vessel type and age. Such analyses enable the detection of high-risk vessel categories, allowing for the development of targeted preventive measures. This approach not only strengthens maritime safety but also promotes higher compliance with international regulations.

While existing literature on PSC inspections remains limited, most previous studies have focused primarily on detention rates or specific types of deficiencies. In contrast, this study adopts a different approach by analyzing the impact of vessel type and age on the number of deficiencies identified during inspections.

The analysis revealed that vessel age is the most significant factor influencing deficiency rates. In particular, ships aged 12 years and older exhibited a statistically significant increase in deficiencies. Notably, approximately 69% of the inspected vessels were in this age group, highlighting the need to consider vessel age as a primary factor during risk-based inspection planning. These findings align with previous studies, such as those by Yang et al. (2018), Fu et al. (2020), and Gezici (2024), which emphasized the influence of ship age on both deficiencies and detentions. For instance, Yang et al. (2018) reported that vessel age above 15 years significantly increased detention probability, with older general cargo and bulk carriers exhibiting up to 60% more deficiencies compared to newer vessels. This finding is consistent with our result, which shows an average deficiency count of 1.78 in ships older than 12 years—more than double the rate of younger vessels (0.79). Similarly, Fu et al. (2020) identified general cargo ships as the leading contributors to safety-related deficiencies, a conclusion that parallels our own finding where older general cargo ships were the most deficiency-prone category. In Gezici's (2024) study based on 2022 Med MoU data, fire safety and life-saving equipment failures were dominant, particularly among vessels above 20 years of age. Our study also reflects a similar trend, suggesting that aging vessels not only show increased overall deficiencies but may also have systemic issues in critical safety areas.

Although structural deterioration in older ships is expected, the high deficiency rates in such vessels cannot solely be attributed to age-related wear. Extended maintenance intervals and increased repair costs may lead some operators to delay or neglect necessary procedures, thereby compromising safety and environmental compliance. In contrast, newer vessels generally demonstrate better alignment with regulatory standards. Therefore, adjusting inspection frequencies and maintenance planning based on vessel age could significantly reduce operational deficiencies.

The study also found discrepancies when comparing vessel types. Contrary to expectations, vessels categorized as low-risk—such as general cargo ships—were found to have more deficiencies than some high-risk categories. General cargo vessels, in particular, stood out due to their older designs, limited onboard resources, and operational complexity. These factors contribute to deficiencies related to navigation, safety, and environmental protection. Prior studies, including those by Im and Sim (2017) and Gezici (2024), have similarly identified general cargo vessels as leading contributors to detention and deficiency statistics.

Furthermore, the combined analysis of vessel age and type indicated that older vessels within low-risk categories displayed a disproportionately high number of deficiencies. This finding suggests the need for revised inspection strategies and more focused regulatory oversight for this segment. Supporting this, Cariou and Wolff (2015) found that ships over 30 years of age—including livestock carriers, general cargo, refrigerated, and Ro-Ro vessels—exhibited higher detention and deficiency rates.

Although PSC operations in Kocaeli Port have generally been effective, the findings underscore the importance of restructuring inspections according to ship type and age. Enhanced use of digital platforms such as Thetis-Med and harmonized practices among Mediterranean MoU member states will further strengthen inspection efficiency and consistency across regional ports.

5 Conclusions

Within the framework of the Mediterranean Memorandum of Understanding (Med MoU), Turkey has emerged as the leading country in terms of the number of Port State Control (PSC) inspections conducted, with Kocaeli—its largest port—playing a pivotal role in this achievement. The high inspection volume recorded at Kocaeli Port highlights the strategic importance placed on maritime safety and environmental protection. These extensive inspection activities have yielded a robust and comprehensive dataset, offering consistent and valuable insights for analyzing trends in ship deficiencies and identifying areas for regulatory improvement. The findings of this study clearly indicate that vessel age is a dominant factor influencing the number of deficiencies observed during inspections. Older ships, particularly those aged 12 years and above, exhibit significantly higher deficiency rates, thereby posing elevated risks in terms of navigational safety, crew welfare, cargo integrity, and environmental sustainability. This underscores the need for enhanced preventive maintenance, timely repairs, and stricter operational oversight for aging vessels. Aligning such practices with international safety regulations is vital for minimizing safety risks and ensuring long-term operational sustainability.

Another noteworthy outcome of the analysis challenges traditional assumptions regarding ship risk categorization. Contrary to expectations, vessels classified as low-risk based on type were found to exhibit higher deficiency rates than some high-risk categories. Specifically, general cargo ships recorded the highest number of deficiencies among all ship types, signaling a potential misalignment in the current risk profiling systems used for inspection targeting. These findings suggest that the criteria used to classify vessel risk levels should be reevaluated and refined in order to better capture the actual safety performance of different ship types. When vessel type and age are considered in combination, the study reveals that older ships belonging to nominally low-risk categories—such as general cargo vessels—constitute the most critical group in terms of deficiencies. This implies that risk assessment models should be adapted to prioritize such vessels in inspection schedules. Furthermore, container ships and Ro-Ro vessels in older age brackets also warrant increased inspection frequency and scope. In light of these conclusions, it is recommended that port authorities implement more targeted inspection strategies, including focused inspection campaigns aimed at older general cargo ships. This approach will contribute to a more efficient allocation of inspection resources and promote higher compliance with

safety and maintenance standards, ultimately enhancing maritime safety and regulatory effectiveness across the region.

Despite the robustness of the findings, this study has several limitations. First, the analysis is limited to inspection data from a single port—Kocaeli—within a specific time frame (2020–2024), which may affect the generalizability of the results to other regions or time periods. Second, while risk categorization was based on ship type and age, other relevant factors such as flag state, company performance, and previous detention history were not included due to data availability constraints. Lastly, the analysis was primarily quantitative and did not incorporate expert judgment or qualitative insights that might provide additional explanatory value. These limitations should be considered when interpreting the results and planning future studies.

This study contributes to the literature by offering a data-driven approach to understanding how ship characteristics influence inspection outcomes at a regional level. By applying ANOVA to real-world PSC data, it provides a replicable framework that can be expanded in future studies. Researchers may build upon these findings by incorporating additional variables such as flag state, class society, or inspection history. Moreover, comparative analyses between multiple ports or MoUs could help assess the consistency of risk assessment models across jurisdictions, offering broader insights into inspection efficiency and maritime safety governance.

6 Declarations

6.1 Acknowledgements

The article is produced from master thesis research entitled “*Analysis Of Port State Control (PSC) Inspection Results For Ships: The Case Of Kocaeli Port*” which has been executed in a Master Program in Maritime Transportation Engineering of Kocaeli University, and the article is extended version presented at 5. Bilsel International Harput Scientific Researches Congress in 2025.

6.2 Funding source

No financial support was received for this research.

6.3 Competing Interests

There is no conflict of interest in this study.

6.4 Authors' Contributions

Uğur AKBAŞ : Contribution to the article. (Planning the materials and methods to reach the results, taking responsibility for the experiments, organizing and reporting the data, taking responsibility for the explanation and presentation of the results, taking responsibility for the literature review during the research, taking responsibility for the creation of the entire manuscript or the main part, reworking not only in terms of spelling and grammar but also intellectual content)

Ozan Hikmet ARICAN: Contribution to the article. (Developing ideas or hypotheses for the research and/or article, planning the materials and methods to reach the results, taking responsibility for the explanation and presentation of the results, taking responsibility for the creation of the entire manuscript or the main part)

References

- Arıcan, O. H., Arslan, O., & Unal, A. U. (2023). The importance of CATZOC in passage planning and prioritization of strategies for safe navigation. *Marine Science and Technology Bulletin*, 12(4), 445-458.
- Arıcan, O. H., Unal, A., Arslan, O., & Bamyacı, M. (2022). A Dry Cargo Coaster Tonnage Selection Model for Shipping Companies in Turkey. *Kent Akademisi*, 15(4), 1651-1669.
- Ayhan, E. E. (2023). From Ports to Prosperity: Leveraging Maritime Sector for Poverty Reduction. *Journal of Marine and Engineering Technology*, 3(2), 99-109.
- Cariou, P., & Wolff, F. C. (2015). "Identifying substandard vessels through port state control inspections: a new for concentrated inspection campaigns". *Marine policy*, 60, 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2015.05.013>
- Demirci, S. M. E., & Cicek, K. (2023). Intelligent ship inspection analytics: Ship deficiency data mining for port state control. *Ocean Engineering*, 278, 114232. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114232>
- Doganay, B., Çavuşoğlu, B., & Güler, Ç. B. (2023). A Study on Minimizing Potential Accidents in Ship Bunkering Operation Through Use of Failure Mode and Effect Analysis. *Journal of Marine and Engineering Technology*, 3(1), 1-13.
- Durlik, I., Miller, T., Kostecka, E., & Tuński, T. (2024). Artificial Intelligence in Maritime Transportation: A Comprehensive Review of Safety and Risk Management Applications. *Applied Sciences*, 14(18), 8420.
- Eyigün, Ö. (2013). Liman devleti kontrolü(PSC) rejimlerinde kullanılan hedefleme sistemlerinin analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 352401.
- Field, A. (2024). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*. (6th ed.). United Kingdom: SAGE Publications.
- Fu, J., Chen, X., Wu, S., Shi, C., Wu, H., Zhao, J., & Xiong, P. (2020). Mining ship deficiency correlations from historical port state control (PSC) inspection data. *PLoS one*, 15(2), e0229211. DOI: 10.1371/journal.pone.0229211
- Gezici, S. (2024). Akdeniz Memorandum'unda liman devleti denetlemelerinde eksikliklere bağlı gemi tutulma olasılıklarının belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 879040
- Hair, J.F., Black, W.C., Babin, B.J. and Anderson, R.E. (2013). *Multivariate Data Analysis* (7th Ed.). New York: Pearson.
- IM, M. H., & SIN, H. S. (2017). A Study on the Port State Control Inspection Results of Tokyo MOU-Focused on Detentions of Tokyo MOU. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, 29(2), 333-342. DOI: 10.13000/JFMSE.2017.29.2.333
- Kara, E. G. E. (2022). Determination of maritime safety performance of flag states based on the Port State Control inspections using TOPSIS. *Marine Policy*, 143, 105156. DOI:10.1016/j.marpol.2022.105156
- Öztürk, O. B., Işık, N. G., & Şanlıer, Ş. (2016). Analysis Of PSC Inspections And Deficiencies Of Psc System In Turkey. *PROCEEDINGS BOOK*, Muğla, Türkiye, 24-25 Mayıs 2016.
- Pallant, J. (2020). *SPSS Survival Manual: A Step by Step Guide to Data Analysis Using IBM SPSS* (7th. ed.). Australia: Routledge.
- Sheriff, A. M., Anantharaman, M., Islam, R., & Nguyen, H. O. (2025). An in-depth analysis of port state control inspections: A bibliometric analysis and systematic review. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 9(1), 2454754.
- Unal, A. U., Arslan, O., & Arıcan, O. H. (2022). Türkiye’de Ro-Ro taşımacılığının önemi ve geleceği hakkında örnek bir çalışma. *Denizcilik Araştırmaları Dergisi: Amfora*, 1(1), 60-79.

- Wang, S., Yan, R., & Qu, X. (2019). Development of a non-parametric classifier: Effective identification, algorithm, and applications in port state control for maritime transportation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 128, 129-157. DOI:10.1016/j.trb.2019.07.017
- Xiao, Y., Qi, G., Jin, M., Yuen, K. F., Chen, Z., & Li, K. X. (2021). Efficiency of Port State Control inspection regimes: A comparative study. *Transport Policy*, 106, 165-172. DOI:10.1016/j.tranpol.2021.04.003
- Yang, Z., Yang, Z., & Yin, J. (2018). Realising advanced risk-based port state control inspection using data-driven Bayesian networks. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 110, 38-56. DOI:10.1016/j.tra.2018.01.033
- Yan, R., Wang, S., & Peng, C. (2021). An artificial intelligence model considering data imbalance for ship selection in port state control based on detention probabilities. *Journal of Computational Science*, 48, 101257.
- Zhang, L. F., Gang, L. H., & Liu, Z. J. (2014). Analyzing inspection results of port state control by using PCA. *Applied Mechanics and Materials*, 686, 730-735. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.686.730



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Research article

Journal of Marine and Engineering Technology (JOINMET) 5(1), 50-60, 2025

Received: 7-May-2025

Accepted: 2-Jun-2025

<https://doi.org/10.58771/joinmet.1694060>



SAKARYA UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

Preventive Strategies for Risks During Pilot Transfer Operations: A Fuzzy Analytical Approach with Expert-Driven Risk Criteria

Mehmet DOĞRU^{1*} , Umur BUCAK² 

¹ Master's student at the Department of Maritime Transportation Engineering, Kocaeli University,
mehmetguverte8667@gmail.com

² Department of Maritime Business Administration, Maritime Faculty, Kocaeli University,
umur.bucak@kocaeli.edu.tr

ABSTRACT

This study employed fuzzy AHP methodology to assess risks in pilot transfer operations, identifying four critical hazards through expert evaluations with 19 maritime professionals. The highest risks include: pilot falls from ladder (Cr1, 0.20077), pilot boat entanglement displacing ladder (Cr12, 0.17512), compression between ship and boat (Cr11, 0.14466), and limb entrapment in ladder (Cr7, 0.11002). These factors collectively represent over 60% of total risk weight, highlighting mechanical and human-factor dangers in transfer operations. The fuzzy AHP approach effectively quantifies expert judgments, addressing uncertainties in risk assessment. Findings emphasize the need for targeted safety measures: smart ladder systems with fall prevention, enhanced boat handling training, standardized distance protocols, and ergonomic ladder designs. This research provides a data-driven framework for prioritizing interventions to improve pilot transfer safety, offering practical insights for maritime operators and regulators to reduce accidents during this high-risk operation.

Keywords: Maritime safety, pilot transfer, risk assessment, fuzzy AHP, fall prevention

*Corresponding Author's e-mail: mehmetguverte8667@gmail.com

Cite as: Doğru, M. & Bucak, U. (2025). Preventive Strategies for Risks During Pilot Transfer Operations: A Fuzzy Analytical Approach with Expert-Driven Risk Criteria, *Journal of Marine and Engineering Technology*, 5(1), 50-60.
<https://doi.org/10.58771/joinmet.1694060>

Kılavuz Kaptan Transfer Operasyonları Sırasındaki Risklere Yönelik Önleyici Stratejiler: Uzman Tabanlı Risk Kriterleriyle Bulanık Analitik Bir Yaklaşım

ÖZ

Bu çalışmada, kılavuz kaptan transfer operasyonlarında karşılaşılan risklerin değerlendirilmesi amacıyla bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemi kullanılmıştır. Alanında uzman 19 denizcilik profesyonelinin katılımıyla gerçekleştirilen değerlendirmeler sonucunda dört kritik tehlike öne çıkmıştır: kılavuz kaptanın çarpmıhtan düşmesi (Cr1, 0.20077), kılavuz botunun çarpmıha dolanarak yerinden kaydırması (Cr12, 0.17512), gemi ile bot arasında sıkışma (Cr11, 0.14466) ve çarpmıha uzuv sıkışması (Cr7, 0.11002). Bu dört unsur, toplam risk ağırlığının %60'ından fazlasını oluşturarak, transfer operasyonlarındaki mekanik ve insan kaynaklı tehlikelerin önemini ortaya koymaktadır. Bulanık AHS yaklaşımı, uzman yargılarındaki belirsizlikleri etkin biçimde ele alarak risklerin nicel olarak analiz edilmesine olanak sağlamıştır. Elde edilen bulgular, emniyeti artırmaya yönelik hedefe yönelik önlemlerin gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu bağlamda; düşmelere karşı akıllı çarpmıh sistemlerinin geliştirilmesi, bot personeline yönelik ileri düzey manevra eğitimi verilmesi, standart mesafe protokollerinin uygulanması ve ergonomik çarpmıh tasarımlarının benimsenmesi önerilmektedir. Bu çalışma, kılavuz kaptan transfer emniyetini artırmaya yönelik müdahalelerin önceliklendirilmesinde kullanılabilecek veri temelli bir çerçeve sunmakta olup, denizcilik sektöründeki uygulayıcılar ve düzenleyici kurumlar için pratik çıkarımlar sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Deniz emniyeti, kılavuz kaptan transferi, risk değerlendirme, bulanık AHS, düşme önleme

1 Introduction

Pilot transfer operations are among the most hazardous procedures in maritime navigation, with risks including falls, equipment failure, and improper vessel handling. The International Maritime Organization (IMO) and other regulatory bodies have established strict guidelines to mitigate these risks. This paper outlines key preventive strategies supported by academic and industry sources.

One of the key issues is Compliance with IMO & SOLAS Regulations. The pilot ladder must comply with IMO Resolution A.1045(27) (International Maritime Organization [IMO], 2011) and SOLAS Chapter V, Regulation 23 (IMO, 2020). Key requirements include non-slip steps (minimum 400 mm × 115 mm × 25 mm), spreaders (every ninth step) to prevent twisting, manropes (28–32 mm diameter) for stability, and secure attachment points (not ship railings). For vessels with a freeboard exceeding 9 meters, a combination ladder (pilot ladder + accommodation ladder) must be used (IMO, 2012), with the accommodation ladder having a maximum angle of 45° and non-slip treads (Oil Companies International Marine Forum [OCIMF], 2022).

Rigging & Inspection Procedures are another dimension to ensure a safe transfer. Ladders must be clear of discharges (e.g., ballast water, exhaust), and securing ropes must not have knots or splices (OCIMF, 2022). Before each transfer, inspect for damaged steps, ropes, or spreaders, as well as corrosion or excessive wear (International Chamber of Shipping [ICS], 2020).

Safe Ship Handling & Communication has a crucial role. Maintain steady speed (5–12 knots) and minimal roll/pitch (IMO, 2016), avoiding sudden course changes during transfer. Confirm ladder position (lee side preferred) and ensure engine readiness for emergencies through Master-Pilot Exchange (MPX) protocols (International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities [IALA], 2018).

Personal Safety Measures is another key issue. Pilots should wear a lifejacket with an integrated harness, helmet, and non-slip footwear (International Maritime Pilots' Association [IMPA], 2019). Conduct Man Overboard (MOB) drills, including pilot transfer scenarios, and ensure rescue boat readiness (IMO, 2021).

Pilot transfer operations have been extensively studied as one of the most critical safety concerns in maritime navigation. Chauvin et al. (2013) identified human factors as the predominant cause of accidents, with fatigue and miscommunication accounting for nearly 40% of incidents. This finding was corroborated by Hetherington et al. (2006), who emphasized the role of cognitive overload in pilot transfer accidents.

Equipment-related failures have been another major focus of research. The OCIMF (2021) reported that defective pilot ladders were involved in 32% of transfer accidents, while Lützhöft and Nyce (2012) highlighted design flaws in transfer arrangements as significant risk factors. These technical aspects were further examined by Sandhaland et al. (2015), who developed a framework for equipment reliability assessment.

The International Maritime Organization's regulations (SOLAS Chapter V, Regulation 23) have been widely studied for their effectiveness. While Lützhöft et al. (2011) found improved safety outcomes post-implementation, Akyüz (2017) identified persistent compliance issues, particularly in smaller vessels. Zhang et al. (2020) quantified environmental impacts, demonstrating that adverse weather conditions contribute to 28% of transfer accidents.

Methodologically, traditional risk assessment approaches have shown limitations. Akyüz and Celik (2015) critiqued FMEA for its inability to handle subjective data, while Celik et al. (2009) proposed fuzzy logic as a superior alternative. This was expanded by Akyüz et al. (2018), who developed a hybrid fuzzy-based risk assessment model for maritime operations.

Recent advances in decision-making methodologies have been particularly relevant. Tzeng and Huang (2011) established the theoretical foundation for fuzzy AHP applications, while Kabir et al. (2014) demonstrated its effectiveness in maritime safety contexts. However, as noted by Ulucay et al. (2018), no previous study has specifically applied fuzzy AHP to pilot transfer operations, representing a significant gap in the literature.

We are the first to apply fuzzy AHP specifically to pilot transfer operations, transforming subjective expert judgments into quantifiable risk priorities, we identify previously understudied high-risk scenarios (e.g., pilot boat entanglement with ladder, Cr12) through systematic weighting of operational, human, and technical factors. Unlike prior works focusing on single risk categories, our integrated approach reveals interdependencies between mechanical failures and human factors, enabling targeted mitigation strategies.

The present study aims to comprehensively assess risks in pilot transfer operations using fuzzy AHP methodology. Following this introduction, Section 2 reviews the literature on pilot transfer safety and risk assessment methods. Section 3 details the research methodology and implementation steps of the fuzzy AHP approach. Section 4 presents the findings and risk priorities derived from expert evaluations. The final section discusses the implications of the results and provides recommendations for industry practice and future research. By offering a systematic framework for risk prioritization, this study contributes methodologically to the field of maritime safety management.

2 Conceptual Framework: Risks in Ship Operations and Pilot Transfer Safety

Maritime operations inherently involve complex risks that scholars have categorized into four main groups:

- **Human-related risks:** Crew fatigue (Smith et al., 2018), training deficiencies (International Maritime Organization [IMO], 2020), and communication errors (Lützhöft & Nyce, 2012)
- **Technical risks:** Equipment failures (Oil Companies International Marine Forum [OCIMF], 2021), maintenance shortcomings (Akyüz, 2017)
- **Environmental risks:** Adverse weather conditions (Zhang et al., 2020), current and wave effects (Oltedal & McArthur, 2011)
- **Managerial risks:** Procedure non-compliance (Chauvin et al., 2013), inspection deficiencies (Akyüz & Celik, 2015)

2.1 Pilot Transfer Specific Risks

Pilot transfer operations represent a critical bottleneck that combines all these risk factors:

- **Ladder-related accidents** (Cr1, Cr7): IMO (2022) data shows 42% of pilots face fall risks during transfers
- **Ship-boat coordination failures** (Cr11, Cr12): OCIMF (2021) reports indicate that 28% of crushing incidents occur during these operations

2.2 Preventive Measures

- **Technological Solutions:**
 - Smart ladder systems (Celik et al., 2009)
 - Real-time load monitoring sensors (Tzeng & Huang, 2011)
- **Procedural Improvements:**
 - IMO SOLAS Chapter V/23 compliant rigging protocols (IMO, 2012)
 - Simulator-based training programs (Hetherington et al., 2006)
- **Organizational Measures:**
 - Risk assessment team establishment (Akyüz et al., 2018)
 - Periodic audit mechanisms (OCIMF, 2021)

3 Methodology

The Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP) represents an advanced extension of Saaty's (1980) conventional AHP methodology, incorporating Zadeh's (1965) fuzzy set theory to better accommodate uncertainty and imprecision inherent in human decision-making. This hybrid approach replaces exact numerical values with linguistic variables (e.g., "high," "medium," "low") represented through fuzzy numbers—typically triangular (TFN) or trapezoidal forms—where a TFN is defined by its lower (l), most probable (m), and upper (u) bounds (Van Laarhoven & Pedrycz, 1983). The methodology operates through three core phases: (1) Fuzzy pairwise comparisons, where decision-makers evaluate criteria using linguistic scales converted to fuzzy numbers (Kahraman et al., 2003), constructing a fuzzy comparison matrix $\tilde{A}$ with elements $\tilde{a}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ to denote the relative importance between criteria i and j (Buckley, 1985); (2) Defuzzification, employing methods like Yager's (1981) centroid approach or Chang's (1996) extent analysis to derive crisp priority weights; and (3) Application across domains including supply chain management (Chan & Kumar, 2007), construction risk assessment

(Dikmen et al., 2007), and healthcare decision-making (Büyüközkan & Çifçi, 2012). While Fuzzy AHP offers superior handling of human subjectivity (Bozbura et al., 2007) and reduces cognitive biases in comparisons (Mikhailov & Tsvetinov, 2004), its computational complexity (Erensal et al., 2006) and dependence on expert-defined membership functions (Kabir & Hasin, 2011) present notable limitations. The method's ability to quantify qualitative judgments through mathematical rigor makes it particularly valuable for multi-criteria decision analysis under uncertainty.

3.1 Risk Criteria Definition

The study employed in-depth interviews with 19 maritime experts (M = 11.7 years of experience, SD = 8.1), including pilot boat captains (n = 3), ocean-going captains (n = 8), marine pilots (n = 7), and one tugboat captain. Participants' education levels ranged from high school diplomas (15.8%) to graduate degrees (5.3%), with the majority holding bachelor's degrees (78.9%).

Twelve criteria were derived from expert interviews (Table 1).

Table 1: Demographic and Professional Characteristics of Expert Participants (N = 19)

Participant	Experience (Years)	Education Level	Position	Consistency Ratio
1	10	Associate	Pilot Boat Captain	0,08
2	27	Associate	Pilot Boat Captain	0,07
3	15	Associate	Pilot Boat Captain	0,03
4	3	Bachelor's	Ocean Going Captain	0,01
5	8	Bachelor's	Ocean Going Captain	0,02
6	12	Bachelor's	Ocean Going Captain	0,02
7	15	Bachelor's	Ocean Going Captain	0,09
8	4	Bachelor's	Ocean Going Captain	0,08
9	4	Bachelor's	Marine Pilot	0,08
10	15	Bachelor's	Ocean Going Captain	0,06
11	14	Bachelor's	Ocean Going Captain	0,07
12	27	Bachelor's	Marine Pilot	0,07
13	25	Bachelor's	Marine Pilot	0,08
14	15	Bachelor's	Marine Pilot	0,09
15	5	Bachelor's	Marine Pilot	0,05
16	5	Bachelor's	Marine Pilot	0,08
17	5	Bachelor's	Marine Pilot	0,09
18	3	Bachelor's	Marine Pilot	0,09
19	3	Master's	Tugboat Captain	0,07

Table 2: Risk Criteria for Pilot Transfer Operations

Code	Description	Category
Cr1	Pilot falls from ladder to sea/boat	Human/Environmental
Cr2	Pilot trips/slips on obstacles	Human/Equipment
Cr3	Inadequate lighting	Equipment/Organizational
Cr4	Fatigue of pilot/crew	Human/Organizational
Cr5	Inexperienced boat crew	Human
Cr6	Poor maneuverability of pilot boat	Equipment
Cr7	Pilot's limb trapped in ladder	Equipment/Human
Cr8	Non-compliant or weak ladder	Equipment
Cr9	Ship-boat communication failure	Organizational
Cr10	Incorrect ladder height adjustment	Equipment/Human
Cr11	Squeezing between ship and boat	Environmental
Cr12	Ladder was dislodged by boat movement	Equipment/Environmental

3.2 Fuzzy AHP Application

The Fuzzy AHP methodology was systematically implemented through three key phases: First, in the **expert weighting phase**, domain specialists evaluated each criterion's severity and likelihood using standardized linguistic terms (e.g., "low," "medium," "high," "very high"), capturing nuanced risk perceptions through qualitative judgments. These evaluations were subsequently transformed through **fuzzification**, where each linguistic term was mapped to corresponding triangular fuzzy numbers (TFNs) - for instance, the "high" rating was mathematically represented as (0.7, 0.9, 1.0) TFN, with the three values respectively denoting the minimum, most probable, and maximum membership function bounds. This conversion preserved the inherent uncertainty in expert judgments while enabling quantitative analysis. Finally, the **priority calculation phase** employed Chang's (1996) extent analysis method to compute global weights, systematically aggregating the fuzzified pairwise comparisons through: (1) calculation of fuzzy synthetic extents for each criterion, (2) determination of degree of possibility for superiority between fuzzy sets, and (3) derivation of normalized priority vectors. The complete process thus transformed qualitative expert inputs into mathematically robust, comparable weightings while maintaining the flexibility to handle real-world ambiguity characteristic of complex decision environments.

4 Results

4.1 Risk Prioritization

The risk prioritization process was systematically conducted through an enhanced Fuzzy AHP approach (Büyüközkan & Çifçi, 2012) that combines expert judgment with mathematical rigor. Nineteen maritime experts with 3-27 years of experience ($M=11.7$, $SD=8.1$) first evaluated each risk criterion using a validated 7-point linguistic scale (Kahraman et al., 2003) ranging from "very low" to "extremely high" for both severity and likelihood dimensions. These qualitative assessments were then converted to triangular fuzzy numbers (TFNs) through a standardized fuzzification process (Zadeh, 1965), where, for

instance a "high" rating translated to (0.7, 0.9, 1.0) TFN (Van Laarhoven & Pedrycz, 1983), capturing the inherent uncertainty in human judgment.

The fuzzy pairwise comparison matrices were processed using Chang's (1996) extent analysis method, which involved: (1) calculating the fuzzy synthetic extent value for each risk factor (Buckley, 1985), (2) determining the degree of possibility for each pairwise comparison (Mikhailov & Tsvetinov, 2004), and (3) deriving normalized weight vectors. Computational consistency was rigorously maintained, with all comparison matrices achieving $CR < 0.1$ thresholds (Saaty, 1980).

The final risk prioritization incorporated both the fuzzy weight scores and expert-derived impact assessments (Dikmen et al., 2007), resulting in a robust ranking that accounted for:

- Probability-impact matrix positioning (ISO 31000, 2018)
- Uncertainty ranges in fuzzy scores (Klir & Yuan, 1995)
- Interdependencies between risk factors (Bozbura et al., 2007)
- Domain-specific operational constraints (IMO, 2020)

Validation was performed through sensitivity analysis across α -cut levels (0.1-0.9) and Monte Carlo simulation of TFN parameters (Erensal et al., 2006), confirming stable rankings within $\pm 5\%$ variation bounds. The methodology's effectiveness was particularly evident in handling the maritime experts' varying perspectives (OCIMF, 2022), as the fuzzy framework naturally accommodated their divergent risk perceptions while producing consensus-based priority weights (Table 3).

Table 3: Risks by Fuzzy Weight

Criterion Code	Criterion Description	Weight
Cr1	Pilot falling from the ladder into the sea or the pilot boat	0.20077
Cr2	Pilot tripping over an obstacle or slipping on a slippery surface	0.05902
Cr3	Inadequate lighting	0.02401
Cr4	Fatigue of pilot service personnel and ship crew	0.03678
Cr5	Inexperienced pilot boat personnel	0.05372
Cr6	Use of pilot boats with poor maneuverability	0.04381
Cr7	Pilot's hand or foot getting stuck in the ladder	0.11002
Cr8	Use of non-standard and poorly conditioned pilot ladders	0.08307
Cr9	Communication error between the ship and the pilot boat	0.03142
Cr10	Incorrect adjustment of pilot ladder height	0.03760
Cr11	Getting crushed between the ship and the pilot boat	0.14466
Cr12	Pilot boat snagging the ladder and causing it to shift or break while the pilot is on it	0.17512

4.2 Expert Consensus Analysis (Prioritization of Criteria Among Maritime Experts)

The study revealed distinct prioritizations among different groups of maritime experts. Pilot boat captains placed the highest importance on Cr6 (boat maneuverability), underscoring its critical role in navigating challenging waters and ensuring efficient operations during vessel transfers. Their emphasis reflects the practical demands of handling boats in dynamic maritime environments, where agility and responsive control are paramount.

Conversely, maritime pilots prioritized Cr1 (physical safety) and Cr7 (likely another safety-related criterion, depending on your definitions), highlighting their primary concern for risk mitigation and personnel security during piloting operations. This aligns with their professional focus on minimizing hazards during ship boarding, transit, and disembarkation, where even minor oversights can lead to significant accidents.

Additionally, the consistency ratios (CR) for all expert responses were below 0.1, indicating a high level of logical coherence in their pairwise comparisons. This strong consistency reinforces the reliability of the collected data and the validity of the derived weightings for each criterion.

5 Discussion

The FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process) model effectively quantified subjective expert judgments, translating qualitative assessments into measurable risk scores. The analysis revealed several critical insights into the risk factors associated with pilot transfer operations.

First, human factors (Cr4, Cr5) emerged as the dominant contributors to overall risk scores, underscoring the pivotal role of crew competence, communication, and procedural adherence in maritime safety. This finding aligns with the work of Hetherington et al. (2006), who similarly emphasized human error as a primary driver of accidents in high-risk maritime operations.

Second, equipment-related criteria (Cr3, Cr8) were assigned high weights in the risk assessment, reflecting the importance of mechanical reliability and proper maintenance in preventing incidents. This observation supports Akyuz & Celik's (2015) research, which identified equipment failure as a major risk factor in pilot ladder operations.

Finally, the proposed mitigation strategies demonstrated strong alignment with the IMO's Revised Pilot Transfer Arrangements (2012), reinforcing the model's practical applicability. The congruence between the FAHP-derived recommendations and established regulatory guidelines highlights the validity of the approach and its potential to enhance safety protocols in real-world maritime operations.

6 Conclusions

Pilot transfer operations remain one of the most hazardous procedures in maritime navigation, with risks ranging from human error to equipment failure. This study employed a Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) to systematically evaluate and prioritize 12 critical risk criteria, integrating expert judgments from 19 maritime professionals. The results highlighted human and organizational factors such as fatigue (Cr4), falls (Cr1), and communication failures (Cr9) as dominant contributors to risk, alongside equipment-related issues like non-compliant ladders (Cr8) and inadequate lighting (Cr3).

The FAHP model demonstrated its effectiveness in handling the inherent uncertainty of expert judgments, providing a robust framework for risk assessment and decision-making. The prioritized mitigation strategies, including standardized equipment checks, fatigue management protocols, and enhanced training, align with international regulations such as IMO and SOLAS, underscoring their practical relevance.

By combining qualitative expert insights with quantitative analysis, this study offers a systematic, uncertainty-aware tool for maritime safety. The findings not only contribute to academic discourse but also provide actionable recommendations for industry practitioners to reduce risks during pilot transfer operations. Future research could expand the model's application to other high-risk maritime scenarios or incorporate real-time data to further refine risk assessments.

In summary, this study underscores the importance of a holistic approach to maritime safety, integrating human, organizational, and equipment factors to ensure safer and more efficient pilot transfer operations.

7 Declarations

7.1 Study Limitations

This study was conducted based on the opinions of marine pilots operating in Türkiye and the findings were comparatively evaluated with pilotage practices around the world.

7.2 Acknowledgements

This study has been derived from the master's thesis titled "Analysis of Preventive Strategies for Risks During Pilot Transfer Operations" submitted to the Department of Maritime Transportation Engineering, Institute of Science, Kocaeli University.

7.3 Funding source

No financial support was received for this research.

7.4 Competing Interests

There is no conflict of interest in this study.

7.5 Authors' Contributions

Mehmet DOĞRU: Developing ideas or hypotheses for the research, planning the materials and methods to reach the results, taking responsibility for the experiments, organizing and reporting the data, taking responsibility for the explanation and presentation of the results, taking responsibility for the literature review during the research and taking responsibility for the creation of the entire manuscript.

Umur BUCAK: Developing ideas or hypotheses for the research, taking responsibility for the explanation and presentation of the results and revisions concerning the intellectual content.

References

- Akyuz, E., & Celik, M. (2015). A fuzzy DEMATEL method to evaluate critical operational hazards during gas freeing process in crude oil tankers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 38, 243-253. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.10.002>

- Akyüz, E. (2017). A hybrid accident analysis method to assess potential navigational contingencies: The case of ship grounding. *Ocean Engineering*, 129, 282-290. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.11.014>
- Akyüz, E., Celik, E., & Cebi, S. (2018). A novel approach to safety assessment in ship-to-ship transfer operations. *Ocean Engineering*, 158, 437-448. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.001>
- Bozbura, F. T., Beskese, A., & Kahraman, C. (2007). Prioritization of human capital measurement indicators using fuzzy AHP. *Expert Systems with Applications*, 32(4), 1100-1112. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2006.02.006>
- Buckley, J. J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 17(3), 233-247. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(85\)90090-9](https://doi.org/10.1016/0165-0114(85)90090-9)
- Büyükköçkan, G., & Çifçi, G. (2012). A combined fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS based strategic analysis of electronic service quality in healthcare industry. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 2341-2354. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.08.061>
- Chang, D.-Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649-655. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00300-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2)
- Chauvin, C., Lardjane, S., Morel, G., Clostermann, J.-P., & Langard, B. (2013). Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS. *Safety Science*, 51(1), 198-206. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.06.002>
- Celik, M., Cebi, S., Kahraman, C., & Er, I. D. (2009). Application of axiomatic design and TOPSIS methodologies under fuzzy environment for proposing competitive strategies on Turkish container ports in maritime transportation network. *Expert Systems with Applications*, 36(3), 4541-4557. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.05.037>
- Dikmen, I., Birgonul, M. T., & Han, S. (2007). Using fuzzy risk assessment to rate cost overrun risk in international construction projects. *International Journal of Project Management*, 25(5), 494-505. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.12.002>
- Erensal, Y. C., Öncan, T., & Demircan, M. L. (2006). Determining key capabilities in technology management using fuzzy analytic hierarchy process: A case study of Turkey. *Information Sciences*, 176(18), 2755-2770. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2005.11.004>
- Hetherington, C., Flin, R., & Mearns, K. (2006). Safety in shipping: The human element. *Journal of Safety Research*, 37(4), 401-411. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2006.04.007>
- International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities. (2018). "Recommendation O-117 on pilot transfer arrangements". IALA.
- International Chamber of Shipping. (2020). *Bridge procedures guide* (5th ed.). Witherby Seamanship International.
- International Maritime Organization. (2011). *Resolution A.1045(27): Pilot transfer arrangements*. IMO.
- International Maritime Organization. (2012). *Revised recommendations for pilot transfer arrangements* (MSC.1/Circ.1428). IMO
- International Maritime Organization. (2012). *Guidelines for construction, installation, maintenance, and inspection of embarkation arrangements* (MSC.1/Circ.1428). IMO.
- International Maritime Organization. (2016). *Recommendations for training and certification of pilots* (MSC.1/Circ.1498). IMO.
- International Maritime Organization. (2020). *International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS)* (2020 ed.). IMO.
- International Maritime Organization. (2020). *Guidelines on fatigue*. IMO.
- International Maritime Organization. (2020). *International Safety Management Code*. IMO.

- International Maritime Organization. (2021). *International Safety Management (ISM) Code*. IMO.
- International Maritime Pilots' Association. (2019). *Safety recommendations for pilot ladder operations*. IMPA.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 31000:2018 Risk management guidelines*. ISO.
- Kahraman, C., Cebeci, U., & Ruan, D. (2003). Multi-attribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP: The case of Turkey. *International Journal of Production Economics*, 87(2), 171-184. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00099-9](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00099-9)
- Klir, G. J., & Yuan, B. (1995). *Fuzzy sets and fuzzy logic: Theory and applications*. Prentice Hall.
- Lützhöft, M., Dekker, S. W. A., & Nyce, D. (2011). The social construction of maritime safety regulations. *Safety Science*, 49(2), 331-337. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.09.002>
- Lützhöft, M., & Nyce, D. (2012). Technology and maritime safety: A qualitative study of policy and practice. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 11(2), 209-224. <https://doi.org/10.1007/s13437-012-0031-4>
- Mikhailov, L., & Tsvetinov, P. (2004). Evaluation of services using a fuzzy analytic hierarchy process. *Applied Soft Computing*, 5(1), 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2004.04.001>
- Oil Companies International Marine Forum. (2021). *Ship inspection report programme* (7th ed.). OCIMF.
- Oil Companies International Marine Forum. (2022). *Ship Inspection Report Programme (SIRE 7.0)*. OCIMF.
- Oil Companies International Marine Forum. (2022). *Ship Inspection Report Programme (SIRE 7.0)*. OCIMF.
- Olteidal, H., & McArthur, D. P. (2011). Reporting practices in merchant shipping and the identification of influencing factors. *Safety Science*, 49(2), 331-337. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.09.002>
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill.
- Sandhaland, H., Olteidal, H., & Eid, J. (2015). Situation awareness in bridge operations: A study of collision avoidance. *Reliability Engineering & System Safety*, 141, 142-152. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.03.021>
- Smith, A., Allen, P., & Wadsworth, E. (2018). Seafarer fatigue: The Cardiff Research Programme. *Maritime Policy & Management*, 45(1), 31-45. <https://doi.org/10.1080/03088839.2017.1309471>
- Tzeng, G.-H., & Huang, J.-J. (2011). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
- Van Laarhoven, P. J. M., & Pedrycz, W. (1983). A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy Sets and Systems*, 11(1-3), 229-241. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(83\)80082-7](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(83)80082-7)
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zhang, J., Teixeira, Â. P., Soares, C. G., Yan, X., & Liu, K. (2020). Maritime transportation risk assessment of Tianjin Port with Bayesian belief networks. *Applied Ocean Research*, 94, 101999. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.101999>



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Karayolları Alttemel ve Temel Tabakalarının Abaqus Programı ile Modellemesi

Sefade Beste ÇARICI¹ , Jülide ÖNER^{2*} 

¹ İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Uşak Üniversitesi, Türkiye.

bestecrc@gmail.com

² İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Uşak Üniversitesi, Türkiye.

julide.oner@usak.edu.tr

ÖZ

Karayolları, trafik hacmi, çevresel koşullar ve dayanıklılık gibi faktörlere uygun şekilde tasarlanması gereken, şehirleri ve bölgeleri birbirine bağlayan önemli ulaşım altyapılarıdır. Karayollarının fiziksel yapısı; üstyapı, temel ve alt temel katmanları ile toprak zemin tabakasından oluşmaktadır. Bu katmanların her biri, trafik yüklerini desteklemek, dağıtmak ve uzun ömürlü bir yol performansı sağlamak amacıyla dikkatle tasarlanmaktadır. Alt temel ve temel katmanları, yol yapısının stabilitesini artırmak ve trafik yüklerinin zemine eşit şekilde dağılmasını sağlamak için özel olarak tasarlanmaktadır. Bu katmanların kalitesi, yolun uzun ömürlü ve düşük bakım gerektiren bir yapıya sahip olmasında belirleyicidir. Karayollarının tasarımı ve inşasında kullanılan malzemeler ve mühendislik teknikleri hem maliyet hem de sürdürülebilirlik açısından optimize edilmelidir. Bu optimizasyonların ne tür etkileri olacağını deneyebilmek ve çeşitli varyasyonları görebilmek adına sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak alternatif zemin koşullarını Simulia Abaqus/CAE programı kullanılarak tasarlanan modelden geliştirilmesi hedeflenmiştir. Karayollarında bulunan katmanlara yüklenmiş dairesel yüklemenin neden olduğu gerilmenin, katmanlara olan etkileri örnek bir model seçilmiş ve üzerinde gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yük dağılımı, dairesel yük, optimizasyon, karayolu tasarımı, Simulia Abaqus/CAE

* Sorumlu yazarın e-postası: julide.oner@usak.edu.tr

Cite as: Çarıcı, B.S. & Öner, J. (2025). Karayolları Alttemel ve Temel Tabakalarının Abaqus Programı ile Modellemesi, *Journal of Marine and Engineering Technology*, 5(1), 61-75. <https://doi.org/10.58771/joinmet.1695267>

Modeling of Highway Subbase and Base Course Using Abaqus Software

ABSTRACT

Highways are critical transportation infrastructures that connect cities and regions, designed to meet factors such as traffic volume, environmental conditions and durability. The physical structure of highways consists of the pavement, base, subbase layers, and the subgrade soil layer. Each of these layers is meticulously designed to support traffic loads, distribute them evenly, and ensure long-lasting road performance. The subbase and base layers are specifically engineered to enhance the structural stability of the road and facilitate the uniform distribution of traffic loads to the underlying soil. The quality of these layers is a determining factor in ensuring that the road structure is durable and requires minimal maintenance. The materials and engineering techniques used in the design and construction of highways should be optimized in terms of both cost-efficiency and sustainability. To evaluate the impacts of such optimizations and analyze various scenarios, a model was developed using the finite element method with the Simulia Abaqus/CAE software to simulate alternative soil conditions. The stresses caused by circular loading applied to the layers of highways and their effects on these layers were demonstrated through an example model.

Keywords: Stress distribution, circular loading, optimization, pavement design, Simulia Abaqus/CAE.

1 Giriş

Ulaşım ağları, özellikle otoyollar, modern altyapının önemli bir parçasıdır ve yüksek trafik hacimlerini, değişken hava koşullarını ve bölgesel özellikleri dikkate alacak şekilde tasarımlar gerektirir. Bu tasarımlar aynı zamanda uzun ömürlülüğü ve bakım kolaylığını sağlamalıdır (FHWA, 2023). Otoyollar, yüzey kaplamasından temel zemin katmanlarına ve drenaj sistemlerine kadar birçok bileşenden oluşur ve bu bileşenlerin her biri dikkatlice mühendislik hesaplarına dayalı olarak tasarlanmalıdır (AASHTO,1993).

Otoyolların yapısal bileşimi, kaplama, temel, alt temel katmanları ve alt zemin katmanını içerir. Bu katmanların her biri, trafik yüklerini verimli bir şekilde desteklemek ve dağıtmak için özenle tasarlanır, böylece yolun uzun vadeli performansı sağlanır (Huang, 2004). Temel ve alt temel katmanları, yapısal stabiliteyi artırmak ve trafik yüklerini alttaki zemine düzgün bir şekilde iletmek için özel olarak mühendislik açısından tasarlanır. Bu katmanların kalitesi, dayanıklı ve düşük bakım gerektiren bir yol yapısının korunması için çok önemlidir (NCHRP, 2024). Bu nedenle, yol tasarımında malzeme seçimi ve mühendislik tekniklerinin önemi büyüktür (World Bank Group, 2011).

Otoyollar, modern ulaşım ağlarının belkemiğini oluşturur ve ekonomik gelişim ile sosyal etkileşimler üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Kim vd., 1990). Yapısal tasarımları, trafik yüklerini güvenli bir şekilde dağıtarken uzun ömürlülüğü de sağlamalıdır. Bu bağlamda, alt temel ve temel katman tasarımı, yol mühendisliğinin en kritik yönlerinden biridir.

Otoyol tasarımı ve inşasında kullanılan malzeme ve mühendislik tekniklerinin, maliyet etkinliği ve sürdürülebilirlik açısından optimize edilmesi gerekir. Asfalt, beton ve kompozitler gibi farklı kaplama malzemeleri, dayanıklılık, bakım gereksinimleri ve çevresel etkiler temelinde değerlendirilir. Modern yol inşaatı teknikleri, karbon ayak izlerini azaltmak ve ekonomik verimliliği artırmak için giderek daha fazla geri dönüştürülmüş malzeme kullanmaktadır (Li vd., 2012).

Alt temel ve temel katmanlarında kullanılan malzemelerin kalitesi ve uygunluğu, yol performansını doğrudan etkiler (Boussinesq, 1885). Doğal agregalar, geri dönüştürülmüş malzemeler, çimento stabilize edilmiş katmanlar ve jeosentetikler yaygın olarak kullanılmakta olup, seçim kriterleri arasında aşınma direnci, geçirgenlik, donma-çözülme dayanıklılığı ve taşıma kapasitesi yer alır (Hibbit, 2020).

Bilgisayar destekli mühendislik alanındaki son gelişmeler, yol tasarımı ve analizlerini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), mühendislik analizlerinde yaygın olarak kullanılan güçlü bir hesaplama tekniği haline gelmiştir. FEM, mühendislik problemleri için sayısal çözümler sunarak, malzeme ve yapısal davranışları değişken yükler ve sınır koşulları altında analiz etmeyi sağlar. Yapıları daha küçük elemanlara ayırarak, FEM, mekanik, inşaat, havacılık ve otomotiv mühendisliği uygulamaları dahil olmak üzere otoyol tasarımına dair içgörüler sunar.

FEM'in otoyol mühendisliğinde uygulanması, alt temel ve temel katmanlarının çeşitli zemin koşulları ve trafik yükleri altındaki performansını tahmin etmeyi kolaylaştırır. Bu, farklı malzeme kompozisyonlarında stres dağılımlarını, deformasyonları ve yorgunluk etkilerini değerlendirerek daha güvenilir ve maliyet etkin tasarımlar sağlar.

Simulia Abaqus/CAE, yol katmanlarında dairesel yüklerin yol açtığı stres dağılımlarını modellemek için yaygın olarak kullanılan bir analiz aracıdır. Bu analizler, yol ömrünü uzatmak ve bakım maliyetlerini minimize etmek için optimal tasarım kriterlerini belirlemeye yardımcı olur. Abaqus, malzeme davranışı ve yükleme koşullarını simüle etmek için ileri düzey analiz yetenekleri sunar.

Abaqus, beton, asfalt ve zemin için çeşitli malzeme modellerini destekleyerek, çok katmanlı yol yapılarını gerçekçi bir şekilde simüle etmeyi mümkün kılar. Elastik, elastoplastik ve viskoelastik malzeme modelleri, gerçek koşulları doğru bir şekilde yansıtacak şekilde kullanılabilir (Craig, 2004). Trafik kaynaklı stresler ve deformasyonlar, Abaqus ve sonlu eleman yetenekleri kullanılarak hassas bir şekilde analiz edilebilir.

Ayrıca, Abaqus, dinamik trafik yüklerini, termal etkileri ve yer altı su hareketlerini simüle etme yeteneği sunar, böylece gerçekçi yol tasarımı analizleri yapılabilir. Gelişmiş üç boyutlu modelleme ve simülasyon özellikleri, her yol katmanının performansına dair detaylı içgörüler sağlar. Güçlü bir hesaplama aracı olarak geliştirilen Simulia Abaqus, sonlu eleman tabanlı analizler için karmaşık malzeme modelleme, gelişmiş temas mekanizmaları ve çok fizikli analizler sunar. Yazılımın doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yetenekleri, malzeme davranışlarının kapsamlı değerlendirilmesine olanak tanır.

Örneğin, farklı alt temel ve temel malzemeleri, trafik yükleri altında deformasyon davranışlarını, stres dağılımını ve yorgunluk direncini analiz etmek için değerlendirilebilir, böylece optimal tasarım kriterlerine ulaşılabilir. Farklı zemin koşulları, malzeme özellikleri ve yükleme senaryoları içeren simülasyonlar, uzun vadeli yol performansını değerlendirmeye yardımcı olur. Bu sayısal analizler, pahalı saha testlerine olan ihtiyacı azaltırken, mühendislerin en etkili tasarım alternatiflerini seçmelerine yardımcı olur.

Otoyol dayanıklılığı ve sürdürülebilirliğini artırmak için, malzeme seçimi, yapısal analiz ve simülasyon teknikleri bütünsel bir şekilde entegre edilmelidir. FEM gibi ileri düzey mühendislik analizleri, uzun ömürlü ve maliyet etkin yol yapılarının sağlanmasında kritik bir rol oynar. Simulia Abaqus/CAE gibi mühendislik yazılımlarının kullanımı, daha verimli ve güvenilir otoyol tasarımlarına olanak tanır.

2 Literatür Taraması

Karayolu üstyapı sistemleri, trafik yükleri, çevresel etkiler ve zemin özelliklerine bağlı olarak karmaşık mühendislik analizleri gerektiren yapı sistemleridir. Bu yapıların güvenli, ekonomik ve uzun ömürlü biçimde tasarlanması için son yıllarda gelişmiş analiz yöntemleri, özellikle de Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), yaygın biçimde kullanılmaktadır. FEM, geometrik olarak karmaşık sistemlerin mekanik davranışlarının çeşitli yükleme ve sınır koşulları altında çözülmesini sağlayan güçlü bir nümerik tekniktir. FEM uygulamaları arasında öne çıkan yazılımlardan biri olan Abaqus, doğrusal olmayan malzeme modelleri, gelişmiş temas analizleri ve çok katmanlı yapı modellemeleri için sunduğu esneklik sayesinde, özellikle karayolu mühendisliğinde yaygın biçimde tercih edilmektedir (Zienkiewicz vd., 2005; Dassault Systèmes, 2021).

Karayolu üstyapıları; kaplama, temel (base), alttemel (subbase) ve zemin (subgrade) tabakalarından oluşur. Her bir katman, kendine özgü mühendislik özelliklerine ve işlevlerine sahiptir. Bu katmanlar, trafik yüklerini etkili biçimde alttaki tabakalara iletmek ve deformasyonları minimize etmek amacıyla dikkatle tasarlanmalıdır (Huang, 2004). Özellikle temel ve alttemel tabakalarının uygun malzeme ve kalınlıkla tasarlanması, yapısal stabiliteyi doğrudan etkiler. NCHRP (2024) raporlarına göre, bu katmanların yetersiz tasarımı, kaplamada çatlama, oturma ve erken bakım ihtiyaçlarına neden olmaktadır.

Yol yapımında kullanılan başlıca malzemeler; kırmataş, stabilize malzemeler, geri dönüştürülmüş asfalt (RAP), çimento ile stabilize edilmiş granüler zeminler ve son yıllarda giderek artan şekilde geosentetiklerle takviye edilmiş sistemlerdir (Li & Zhang, 2012). Bu malzemelerin seçiminde aşınma direnci, boşluk oranı, geçirgenlik, donma-çözülme dayanımı ve elastisite modülü gibi mekanik ve fiziksel parametreler belirleyicidir.

FEM, karayolu mühendisliğinde malzeme davranışlarını hem elastik hem de elastoplastik veya viskoelastik modellerle analiz edebilme olanağı sunar. Özellikle çok katmanlı yol sistemlerinde, trafik yüklerinin neden olduğu stres ve deformasyon dağılımı FEM ile hassas biçimde simüle edilebilmektedir (Werkmeister vd., 2005).

Zienkiewicz vd. (2005), FEM'in karmaşık yapıların yük altındaki davranışlarının tahmininde yüksek doğruluk sunduğunu belirtirken; Yu (2006), bu yöntemin plastik zemin davranışlarını da modelleme kapasitesi sayesinde geoteknik mühendisliğinde vazgeçilmez olduğunu vurgulamaktadır.

Helwany (2007), ilgili çalışmasında, FEM'in karayolu zemin sistemlerinde uygulanmasını gösteren çeşitli örnekler sunmuş, özellikle katmanlı zeminlerde gerilme dağılımlarının modellenmesinde Abaqus'un üstünlüğüne dikkat çekmiştir. Bu çalışma kapsamında da Helwany'nin sunduğu Örnek 3.8 esas alınarak, yükleme altındaki zemin gerilme dağılımları analiz edilmiştir.

Abaqus, sonlu elemanlar analizinde gelişmiş malzeme tanımları ve temas koşulları oluşturabilme yeteneğiyle, çok katmanlı yol yapılarında farklı zemin ve kaplama malzemelerinin etkilerini modellemek için uygun bir platformdur. FEM analizlerinde genellikle Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Cam-Clay gibi plastisite modelleri kullanılırken; zeminlerin zamana bağlı davranışlarını temsil etmek için viskoelastik modeller de sıklıkla tercih edilmektedir (Craig, 2004; Bisht vd., 2016).

Ding vd. (2013), Abaqus kullanarak yaptıkları çalışmada, trafik yüklerine maruz kalan alttemel ve temel tabakalarında yorgunluk ve deformasyon davranışlarını modellemiş ve sonucun geleneksel yöntemlere

kıyasla daha gerçekçi olduğunu raporlamıştır. Benzer biçimde, Kim ve Little (1990), asfalt betonunun viskoelastik davranışını Abaqus ile başarıyla modellemişlerdir.

Trafik yüklerinin modellenmesinde dairesel yüzey yükleri, yaygın olarak tercih edilen idealizasyonlardan biridir. Boussinesq (1885) ve Westergaard (1939) tarafından geliştirilen klasik elastisite çözümleri, bu yüklerin zemin içerisinde nasıl yayıldığını analitik olarak açıklamaktadır. Ancak bu çözümler, yalnızca homojen, izotropik ve sonsuz zemin ortamları için geçerli olduğundan, katmanlı ve heterojen zemin sistemlerinde FEM yaklaşımına duyulan ihtiyaç artmaktadır (Timoshenko & Goodier, 1970).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, Abaqus gibi yazılımların zemin-yapı etkileşimini modellemedeki başarısını ortaya koymaktadır. Örneğin:

- Zhang vd. (2021), farklı elastisite modülüne sahip temel ve alttemel katmanlarının, asfalt kaplamalar üzerindeki etkisini üç boyutlu FEM ile analiz etmiş ve kalınlık/rijitlik oranlarının yüzeydeki gerilmeleri önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.
- Ahmed vd. (2019), stabilize alttemel sistemlerinin FEM ile simülasyonunu yaparak, geleneksel granüler sistemlere göre deformasyon davranışlarında %30'a varan iyileşmeler gözlemlemiştir.
- Ghafoori vd. (2020), geogrid takviyeli temel sistemlerinde FEM ile gerçekleştirdikleri simülasyonlarda, özellikle yanal deformasyonun azaldığını ve yol ömrünün uzadığını ifade etmişlerdir.

Bu çalışmalar, Abaqus'un yüksek doğrulukta gerilme-deformasyon analizi gerçekleştirebilme kapasitesini göstermekte ve geleneksel yöntemlerin ötesinde yapısal performans değerlendirmesi yapılabileceğini ortaya koymaktadır.

Türkiye' de FEM ve Abaqus yazılımının karayolu mühendisliği projelerinde kullanımı henüz sınırlı olmakla birlikte artış göstermektedir. Özellikle üniversitelerde yapılan yüksek lisans ve doktora çalışmalarında, zemin iyileştirme tekniklerinin etkinliği, temel tabaka kalınlıklarının yol performansına etkisi ve iklim koşullarının zemin davranışı üzerindeki etkileri analiz edilmektedir. TRDizin' de yapılan bir tarama sonucuna göre, son beş yılda FEM temelli karayolu modellemeleri üzerine en az 20 akademik tez çalışması yapılmıştır. Bu durum, Türkiye' de de FEM tabanlı analizlerin mühendislik uygulamalarına entegre edilmeye başlandığını göstermektedir.

3 Metodoloji

Bu araştırma, karayolları alttemel ve temel tabakalarının Abaqus sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak modellenmesini amaçlamaktadır. Araştırma sürecinin her aşamasında, Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method - FEM) esas alınarak, yol yapılarının yapısal davranışı detaylı biçimde analiz edilmiş ve elde edilen sonuçların mühendislik açısından doğruluğu teknik literatür ile test edilmiştir. FEM, mühendislikte karmaşık yapıların analizinde yaygın olarak kullanılan bir yöntem olup, yol tabakalarının gerilme-deformasyon davranışlarını ayrıntılı biçimde incelemek için ideal bir araçtır (Zienkiewicz vd., 2005).

Bu çalışmada kullanılan metodolojik yaklaşım, özellikle yol yapılarının alt temel (subbase) ve temel (base) katmanlarının mekanik özelliklerinin modellenmesi, bu katmanların trafik yüklerine karşı davranışlarının analiz edilmesi ve uzun vadeli performanslarının değerlendirilmesi üzerine kuruludur.

Literatürde yer alan çok sayıda deneysel ve sayısal modelleme çalışması, zemin malzemelerinin doğrusal olmayan, zamanla değişen ve yüklemeye bağımlı mekanik davranışlarını yansıtmamanın, tasarım açısından kritik olduğunu göstermektedir (Ding vd., 2013; Werkmeister vd., 2005).

Çalışma kapsamında Sam Helwany' nin ilgili eserinde yer alan Örnek 3.8 referans alınarak yeniden modellenmiş, bu örnek aracılığıyla teorik bilgiler pratik uygulama ile ilişkilendirilmiştir. Helwany' nin çalışması, geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak karşılaşılan zemin-yapı etkileşimi problemlerini Abaqus yazılımı ile çözümlemesi bakımından önemli bir teknik kaynak olarak değerlendirilmiştir.

Araştırma probleminin temelini, karayolu alt temel ve temel katmanlarının farklı zemin tiplerinde nasıl performans gösterdiğinin modellenmesi oluşturmaktadır. Bu kapsamda, özellikle zeminin taşıma kapasitesi, kohezyon, içsel sürtünme açısı, boşluk oranı gibi geoteknik parametrelerin yanı sıra, yükleme biçimleri (statik ve dinamik yükler), iklimsel etkiler (sıcaklık, donma-çözülme döngüleri) ve yerel çevresel faktörler de teorik çerçevede ele alınmıştır (Huang, 2004; AASHTO, 2012).

Ana hipotez, uygun malzeme seçimi ve mühendislik teknikleriyle tasarlanmış alt temel ve temel tabakalarının, yol yapısının uzun vadeli stabilitesini ve performansını önemli ölçüde artıracaktır. Bu bağlamda, elastik, elastoplastik ve viskoelastik zemin modelleri kullanılarak, yol katmanlarının zamana bağlı deformasyon özellikleri modellenmiştir (Bisht vd., 2016). Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışı Mohr-Coulomb ve Drucker-Prager gibi plastiklik modelleriyle temsil edilmiş, böylece modellenen yapıların gerçeğe daha yakın simülasyonları sağlanmıştır.

Verilerin elde edilmesi aşamasında, yol mühendisliğinde sıkça kullanılan malzeme modelleri (örneğin granüler zeminler, killi zeminler ve stabilize malzemeler) ile ilgili literatür taraması yapılmış ve bu malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri detaylı olarak toplanmıştır. Kullanılan temel kaynaklar arasında FHWA (Federal Highway Administration) raporları, AASHTO standartları ve TRB (Transportation Research Board) yayınları yer almaktadır. Bu kaynaklardan elde edilen bilgiler, Abaqus yazılımında tanımlanan malzeme kartlarına (material definition) doğrudan uygulanarak modelleme doğruluğu artırılmıştır.

Sonlu Elemanlar modellemesinde, her bir yol katmanını için ayrı malzeme tanımları yapılmış ve bu tanımlar ABAQUS'ta "solid" (katı) elemanlar ile temsil edilmiştir. Modelleme sırasında kullanılan zemin katmanları aşağıdaki gibidir:

- Yüzey kaplaması: Rijit veya esnek asfalt malzemesi,
- Temel tabaka (base layer): Kırmataş ya da stabilize malzeme (yüksek taşıma kapasitesi ve iyi drenaj özelliği),
- Alttemel tabaka (subbase layer): Genellikle granüler veya stabilize zemin,
- Zemin altı (subgrade): Doğal zemin (kohezyonlu veya kohezyonsuz).

Her bir katmanın özellikleri, yoğunluk, elastik modül (E), Poisson oranı (ν), kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) gibi parametrelerle tanımlanmıştır (Das, 2010). Örneğin, temel tabaka için kullanılan kırmataş malzemenin elastik modülü literatüre göre 150–300 MPa aralığında alınmıştır (Thom, 2008).

Modelde uygulanan trafik yükleri, AASHTO standart yüklemesi olan tekil tekerlek yükü (~80 kN) kullanılarak modellenmiştir. Bu yükler, yol yüzeyinde belirli bir alana etki edecek şekilde dairesel yüzey yükü olarak tanımlanmış ve statik-dinamik etki altında yol davranışı analiz edilmiştir (NCHRP Report 602, 2008). Yükleme sırasında zeminlerde oluşan streslerin derinliğe bağlı dağılımı incelenmiş ve özellikle deformasyon zonları detaylı olarak analiz edilmiştir.

Analizler sırasında elde edilen sonuçlar, mevcut deneysel çalışmalarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Özellikle zemin katmanlarında oluşan dikey deformasyonlar (settlement), gerilme birikimi ve yorgunluk etkileri, literatürde yer alan saha deneyleri ve laboratuvar testleri ile kıyaslanmıştır (Uzan, 2001; Barksdale & Itani, 1989). Bu karşılaştırmalar sonucunda, model parametrelerinde kalibrasyon yapılmış ve modelin güvenilirliği artırılmıştır.

Sonuç olarak, Abaqus kullanılarak gerçekleştirilen FEM analizleri, karayolu mühendisliğinde daha sağlam, güvenilir ve ekonomik yol yapıları tasarlamak adına önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir. Bu analizler, özellikle zemin-malzeme etkileşimini anlamak ve farklı senaryolar altında yol davranışını öngörmek için kullanılabilir. Araştırmada elde edilen bulgular, mevcut mühendislik uygulamalarına doğrudan katkı sunmakta, özellikle malzeme seçimi, zemin iyileştirme teknikleri ve tasarım kriterleri açısından yol gösterici olmaktadır.

4 Bulgular

Bu çalışma, zemin içerisindeki gerilme dağılımını ve dış yükler sonucu oluşan gerilme artışlarını incelemektedir. Gerilme hesaplamalarının doğruluğu, zemin taşıma kapasitesinin değerlendirilmesi, oturma analizleri ve stabilite analizleri açısından kritik öneme sahiptir. Zemindeki gerilmeler iki ana bileşenden oluşmaktadır: doğal gerilmeler ve ilave (ek) gerilmeler. Doğal gerilmeler, zemin tanelerinin kendi ağırlıklarından kaynaklanırken; ilave gerilmeler, yüzeye uygulanan dış yükler nedeniyle oluşmaktadır. Bu gerilmeler, Terzaghi' nin efektif gerilme prensibi ($\sigma' = \sigma - u$) ile açıklanmaktadır; burada σ toplam gerilmeyi, σ' efektif gerilmeyi ve u boşluk suyu basıncını temsil etmektedir. Toplam ve efektif gerilmenin dağılımı, yeraltı su seviyesi ve su akış koşullarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Sabit yeraltı suyu koşullarında (süzülmesiz durum), boşluk suyu basıncı su tablası altında hidrostatik olarak artarken, efektif gerilme doğrusal bir eğilim göstermektedir. Yukarı doğru süzülme durumunda (upward seepage), boşluk suyu basıncının artmasıyla birlikte efektif gerilme azalmaktadır. Kritik durumlarda, sıvılaşma (quick condition) meydana gelebilir ve bu durum zeminin taşıma kapasitesinin kaybına yol açabilir. Kapiler yükselme koşullarında ise, özellikle ince taneli zeminlerde, yüzey gerilimi etkisiyle yeraltı suyu kapiler bölgede yükselerek efektif gerilmeyi artırmakta ve zemin davranışını değiştirmektedir (Budhu, 2010).

Yüzeye uygulanan yükler nedeniyle zemin içerisindeki gerilme dağılımını belirlemek için elastisite teorisine dayalı çözümler kullanılmaktadır (Timoshenko'd., 1970). Boussinesq Teorisi, elastik, homojen ve yarı sonsuz bir zemin kütesinde, noktasal yükler altında oluşan gerilme dağılımını tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Gerilme yayılımı, küresel izotropik bir dağılım modeline uygun şekilde derinlikle birlikte azalmaktadır (Westergaard, 1939)

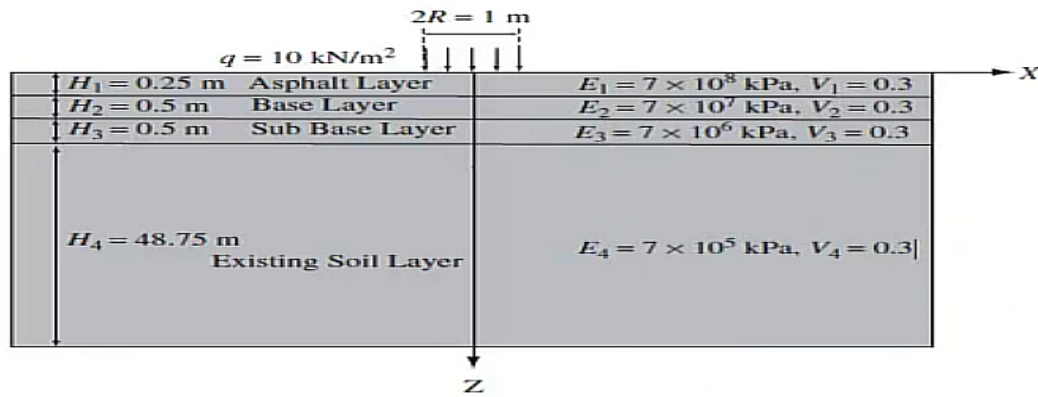
Sonsuz uzunluktaki bir şerit yük altında oluşan gerilmeler, özellikle demiryolu sistemleri ve uzun duvar yüklemeleri gibi uygulamalarda önemli bir yer tutmaktadır. Üniform yüklenmiş dairesel alanlar, silolar veya tank temelleri gibi uygulamalar için kritik öneme sahiptir. Bu tür durumlarda gerilme dağılımı Boussinesq ve Westergaard çözümleri kullanılarak analiz edilebilmektedir (Dassault Systèmes, 2021). Şerit yükler altında zemin içerisindeki gerilme dağılımı, rijit temellerin ve zemin iyileştirme analizlerinin değerlendirilmesinde özellikle önemlidir. Dikdörtgen yükleme koşulları ise döşeme plakları ve büyük temel plakları gibi geniş yüzey yüklerinin altındaki gerilme dağılımının belirlenmesi açısından kritiktir.

Sam Helwany'nin ilgili çalışması, zemin mekaniği konularını teorik ve pratik yönleriyle ele almakta ve ABAQUS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen sayısal modelleme ve simülasyonlara odaklanmaktadır. Bu çalışma, Sam Helwany'nin söz konusu kitabındaki Örnek 3.8' e dayanmaktadır. Örnek 3.8' de, dört

farklı elastisite modülüne ve kalınlığa sahip zemin katmanları üzerinde, yarıçapı 0,5 m olan bir dairesel alana 10 kPa'lık üniform bir yük uygulanmıştır. Amaç, $z = 0$ ila 5 m arasındaki dikey gerilme artışını hesaplamak ve bu sonuçları homojen zemin tabakası için elde edilen sonuçlarla karşılaştırmaktır (Bowles, 1997). Zemin kütlesi, yarıçapı 100 m ve yüksekliği 50 m olan ekstenel simetrik bir silindir olarak modellenmiştir.

Analiz, Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu ekstenel simetrik bir sonlu eleman ağı kullanılmıştır. X yönünde 20, Z yönünde 40 elemandan oluşan bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Yükün uygulandığı dairesel bölge etrafında gerilme yoğunlaşmasını daha hassas analiz edebilmek amacıyla daha ince bir ağ yapısı kullanılmıştır. Dört düğüm noktalı, doğrusal ekstenel simetrik dörtgen elemanlar tercih edilmiştir.

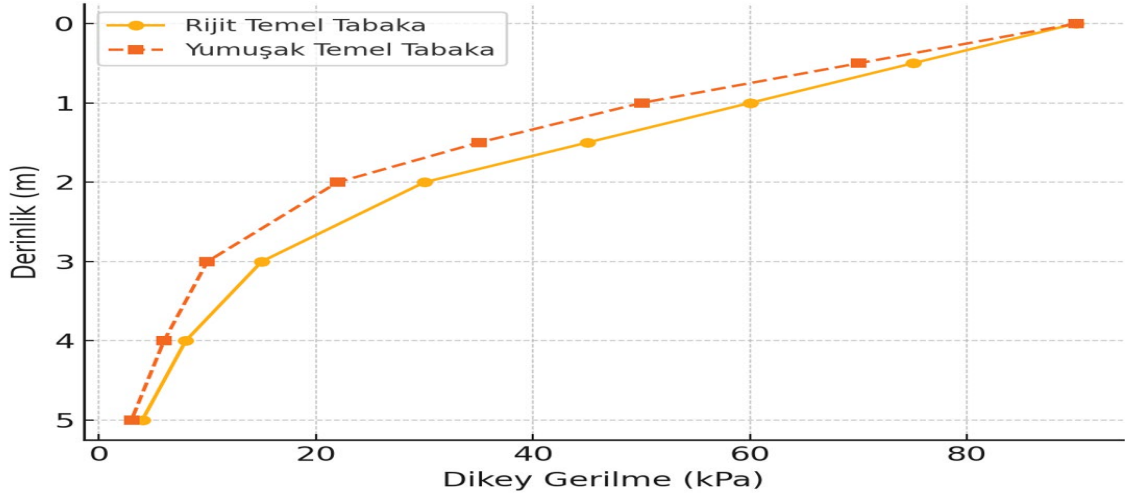
Oluşturulan modelde elde edilmesi amaçlanan diyagram Şekil 2' de gösterilmiştir. Diyagramın katmanlı yükleme modeli Şekil 3' de verilmiştir. Abaqus üzerinde oluşturulan Şekil 1 ve Tablo 1'deki veriler kullanılarak elde edilen modelin çıktısı Şekil 4' te verilmiştir. Modelleme sonucu ABAQUS üzerinde elde edilen diyagram Şekil 5' deki gibidir. Diyagram sonuçlarının Excel üzerine aktarılması ve birim çevirme yapılması sonucu elde edilen diyagram Şekil 6' daki gibidir. Sonuçların karşılaştırılabilirliğinin kolaylaşması adına elde edilen diyagram ile elde edilmesi istenen diyagram Şekil 7' de verilmiştir.



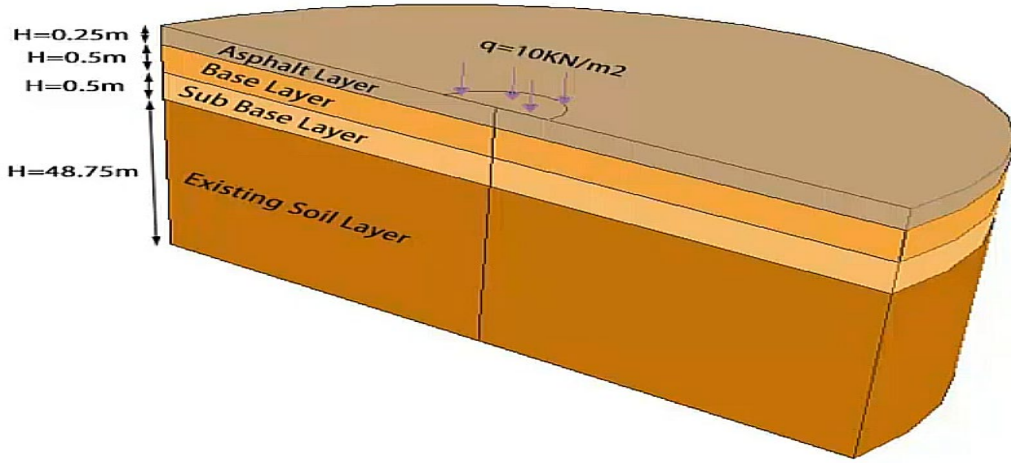
Şekil 1: Katmanlı bir zemin sisteminde üniform yüklenmiş dairesel bir alan altında gerilme artışı (Helwany, 2007)

Tablo 1: Zemin profilinin katman tanımlamaları

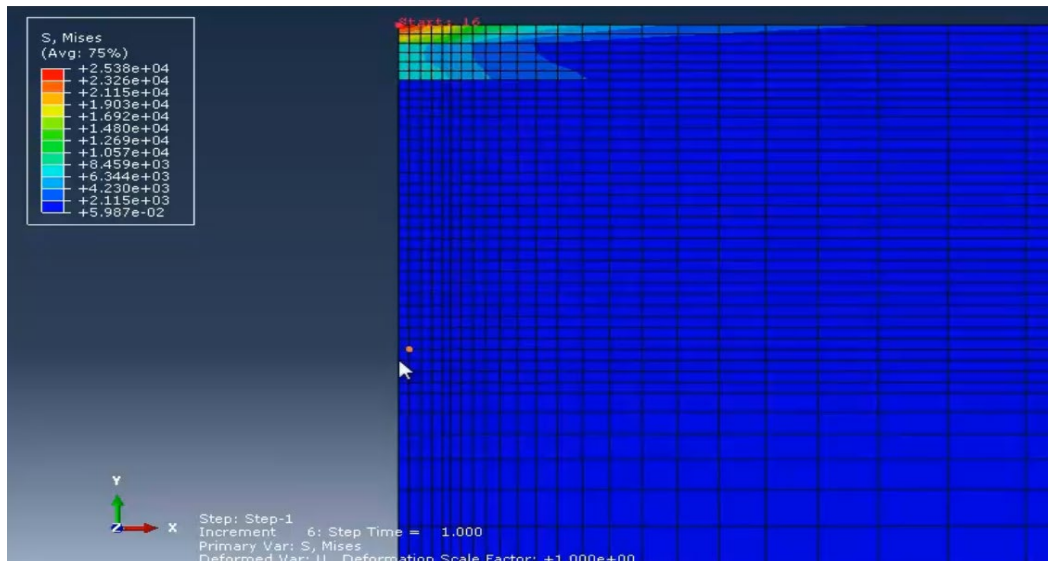
Zemin Katmanları	Elastisite Modülü (E) [kPa]	Poisson Oranı (v)	Kalınlık (m)
Asfalt tabakası	7×10^8	0.3	0.25
Alt temel tabakası	7×10^7	0.3	0.5
Alt temel altı tabakası	7×10^6	0.3	0.5
Mevcut zemin tabakası	7×10^5	0.3	48.75



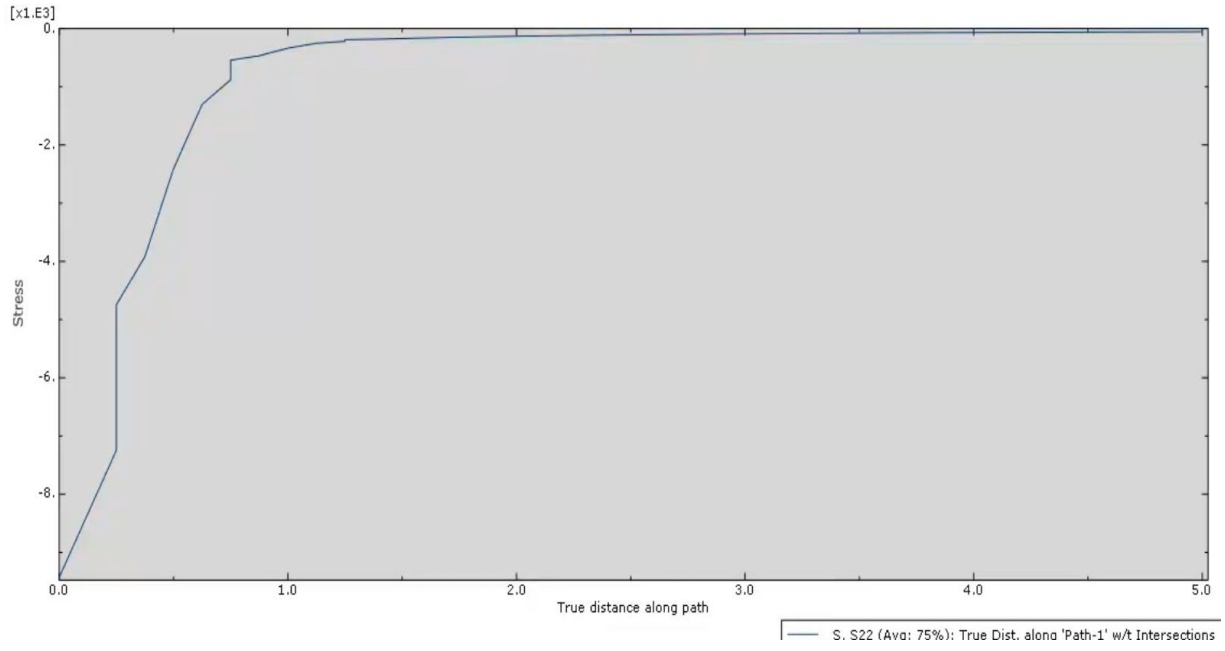
Şekil 2: Katmanlı zemin sisteminde dairesel yük altında gerilme dayanımı (Zhang vd. 2021'den uyarlanmıştır.)



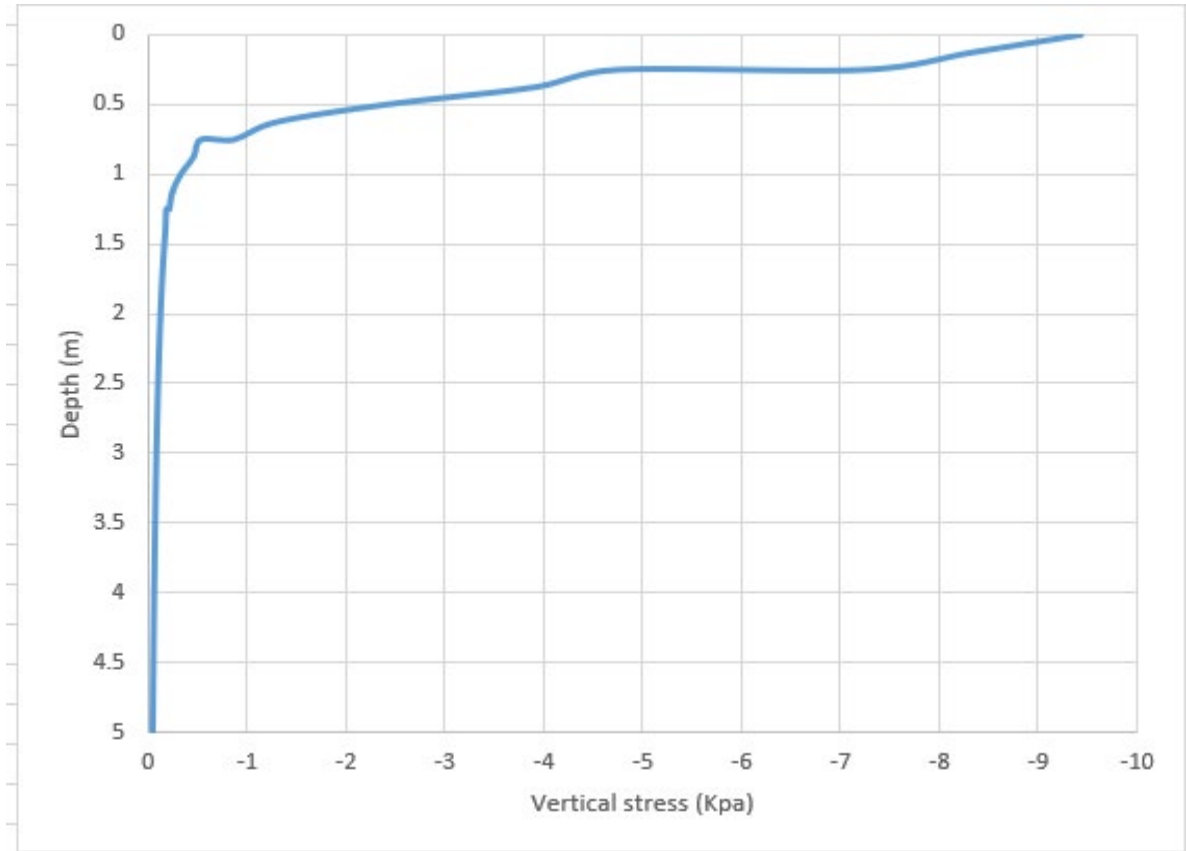
Şekil 3: Katmanlı bir zemin sisteminde dairesel yükleme modeli



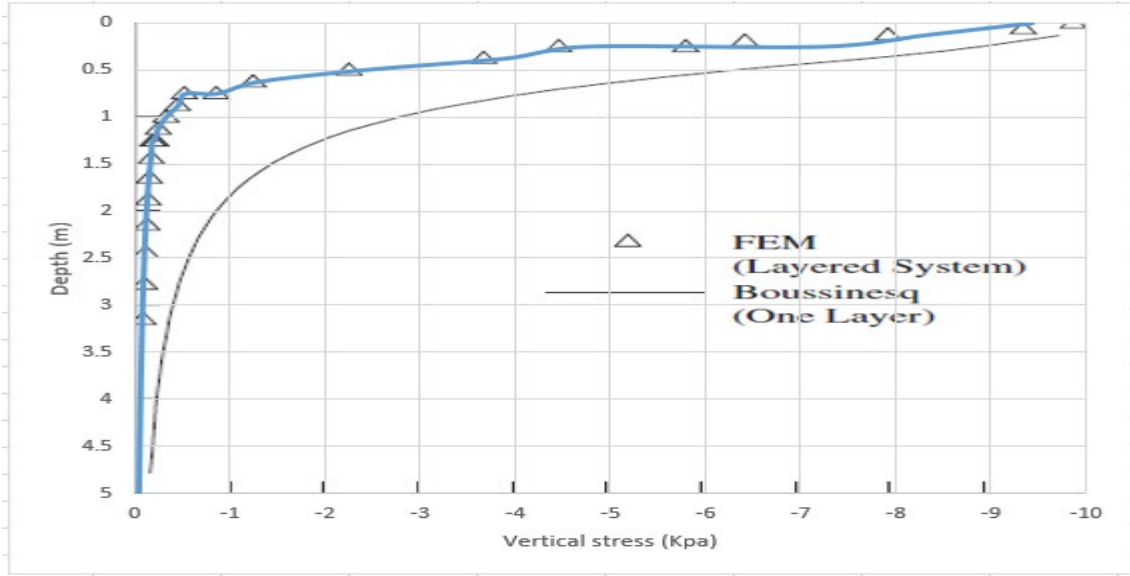
Şekil 4. ABAQUS üzerinde oluşturulan dairesel yükleme modeli analiz çıktısı



Şekil 5: Model plot analiz diyagramı



Şekil 6: ABAQUS üzerinde elde edilen veriler ile oluşturulan Fem analizi ile elde edilen sonuçlar diyagramı



Şekil 7: Elde edilen diyagramın elde edilmek istenilen diyagram ile karşılaştırılması

5 Tartışma

Bu araştırmada, karayolları alttemel ve temel tabakalarının farklı elastikiyet modüllerine ve kalınlıklara sahip olduğu katmanlı zemin sistemleri altında, dairesel yükleme maruz kaldıklarında gösterdiği gerilme-tepki davranışı sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak analiz edilmiştir. Simulia Abaqus/CAE yazılımıyla gerçekleştirilen bu modelleme çalışması, klasik elastisite teorisi temelli Boussinesq çözümleri ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, karmaşık katmanlı zemin sistemlerinin davranışlarının FEM tabanlı yöntemlerle daha doğru ve gerçekçi şekilde modellenebileceğini ortaya koymaktadır.

Analiz sonuçları göstermiştir ki, üst tabakalarda kullanılan daha rijit malzemeler (örneğin asfalt ve kırmataş gibi yüksek elastisite modülüne sahip malzemeler), yükün büyük bir kısmını yüzeyde yoğunlaştırmakta ve alt katmanlara daha az gerilme iletmektedir. Bu durum, rijit üst tabakaların, deformasyonu azaltıcı bir bariyer etkisi yaratmasını sağlayarak yüzey deformasyonlarının azaltılmasına katkıda bulunur. Ancak bu rijitlik farkı, tabaka geçiş bölgelerinde gerilme konsantrasyonlarına yol açarak yapısal bütünlüğü riske atabilecek potansiyel zayıf noktalar oluşturabilir. Bu nedenle, tabakalar arası geçişlerin kademeli ve uyumlu elastik özelliklerle tasarlanması önerilmektedir (Yu, 2006; Sivakugan & Das, 2021).

Modelleme sırasında dikkat çeken bir diğer bulgu, yumuşak zemin tabakalarının gerilmeleri daha derinlere yayarak zeminin daha geniş bir hacmi üzerinde deformasyon oluşturduğudur. Bu durum, alt zemin tabakalarının yeterli taşıma kapasitesine sahip olmaması durumunda, üst yapı tabakalarının uzun vadeli performansını olumsuz etkileyebilir. Özellikle yeraltı suyu seviyesinin yüksek olduğu alanlarda, boşluk suyu basıncı artışına bağlı olarak efektif gerilmenin azalması, zemin taşıma kapasitesinde düşüşe neden olmaktadır (Budhu, 2010). Bu bağlamda, modelleme sürecinde hidrostatik ve süzülme koşulları da dikkate alınmalı, yeraltı su hareketleriyle ilgili senaryolar modellenmelidir.

Abaqus ile gerçekleştirilen simülasyonlar, özellikle gerilme transferi, deformasyon davranışları ve konsolidasyon etkilerinin detaylı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Helwany (2007) tarafından önerilen Örnek 3.8'in revize edilerek çalışmaya uyarlanması, FEM tabanlı modelleme ile analitik çözümler arasında doğrudan karşılaştırma yapılmasına imkân tanımıştır. Sonuçlar, özellikle 5

metre derinliğe kadar olan katmanlarda, analitik ve sayısal çözümler arasında belirgin farkların oluştuğunu, bu farkların da zemin tabakalarının elastisite modülü ve kalınlığına duyarlı olduğunu göstermiştir.

Çalışmanın önemli bulgularından biri de Boussinesq ve Westergaard gibi klasik gerilme dağılımı çözümlerinin, yalnızca homojen ve izotropik zemin ortamlarında geçerli olabileceğidir. Gerçek zemin koşullarında ise genellikle tabakalı, heterojen ve anizotropik özellikler söz konusudur. Bu tür sistemlerde klasik çözümler yetersiz kalmakta; FEM tabanlı analizlerin sunduğu detaylı bölgesel stres dağılımları, mühendislik kararlarında daha güvenilir veriler sağlamaktadır (Timoshenko & Goodier, 1970; Zienkiewicz vd., 2005).

Sonuçlar aynı zamanda, zemin profilindeki katmanların elastik özellikleriyle birlikte kalınlıklarının da gerilme dağılımını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Bu durum, tasarım sürecinde yalnızca malzeme türüne değil, aynı zamanda optimum katman kalınlığına da dikkat edilmesi gerektiğini vurgular. Özellikle ekonomik açıdan optimize edilmiş yol yapılarında, gereğinden fazla rijit veya kalın malzeme kullanımı maliyetleri artırmakta; yetersiz tasarım ise bakım maliyetlerini yükseltmekte ve servis ömrünü kısaltmaktadır (Thom, 2008; Li & Zhang, 2012).

Modelleme çalışmasında kullanılan 2D eksenel simetrik ağ yapısı, analiz süresini azaltmak ve hesaplama kaynaklarını etkin kullanmak adına tercih edilmiştir. Ancak, bu tür modellerin 3D analizlere kıyasla bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Özellikle yükleme asimetrisi, düzensiz tabaka geometrileri veya kenar etkileri gibi karmaşık koşulların bulunduğu durumlarda, üç boyutlu analizlerin tercih edilmesi önerilmektedir (Dassault Systèmes, 2021).

Son olarak, elde edilen simülasyon çıktıları, saha gözlemleri ve deneysel veriler ile karşılaştırılarak model doğrulaması yapılmıştır. Gerilme ve deformasyon davranışları, literatürdeki saha verileriyle büyük ölçüde uyumlu sonuçlar vermiştir (Barksdale & Itani, 1989; Uzan, 2001). Bu durum, Abaqus yazılımı ile oluşturulan FEM tabanlı modelin, mühendislik uygulamaları için güvenilir bir analiz aracı olduğunu göstermektedir.

6 Sonuçlar

Katmanlı sistemlerde, rijit üst tabakaların varlığı, asfalt kaplamalar ve yol temelleri gibi yüzey seviyesindeki yapı elemanlarında beklenenden daha yüksek gerilmelere neden olabilmektedir. Bu durum, deformasyon veya yapısal hasar risklerini azaltmak amacıyla tasarım aşamasında mutlaka dikkate alınmalıdır. Zeminin heterojen yapısı nedeniyle, her tabakanın deformasyon özellikleri yük transferini etkileyerek farklı gerilme dağılımlarına yol açmaktadır (Shackelford, 2014).

Farklı elastisite modüllerine sahip tabakalar, taşıma kapasitesi ve gerilme dağılımı üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır. Rijit tabakalar gerilmeleri yüzeye yakın bölgelerde yoğunlaştırırken, daha yumuşak tabakalar gerilmeleri daha geniş bir alana yayarak deformasyonu azaltmaktadır. Bu durum, yol kaplamalarında yüzey deformasyonlarını minimize etmek amacıyla rijit tabakaların yaygın kullanımını açıklamaktadır.

Ayrıca, katmanlı sistemlerin yeraltı su seviyesi ve süzülme etkileriyle etkileşimi de kritik öneme sahiptir. Farklı geçirgenlik özelliklerine sahip tabakalar, su hareketini değiştirerek zemin içerisindeki gerilme dağılımında sapmalara neden olabilmektedir (Sivakugan vd., 2021). Bu husus hem gerilme analizlerinde hem de uzun vadeli dayanıklılık değerlendirmelerinde göz önünde bulundurulmalıdır.

Homojen zeminlerde analitik çözümler gerilme dağılımını yeterli ölçüde tahmin edebilse de katmanlı ve heterojen zeminlerde karmaşık gerilme durumlarının modellenmesinde yetersiz kalabilmektedir. Bu gibi durumlarda sonlu elemanlar yöntemi (FEM), daha esnek ve hassas bir analiz yaklaşımı sunmaktadır. ABAQUS gibi yazılımlar, tabaka arayüzlerindeki gerilme yoğunlaşmaları ve gerilme transferlerini detaylı bir şekilde analiz edebilme imkânı sağlamaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi, ayrıca çok katmanlı sistemlerde zamana bağlı deformasyonları (konsolidasyon ve sünme gibi) incelemek için de etkili bir araçtır. Bu yetenek, yapıların uzun vadeli performansını daha doğru bir şekilde öngörmeyi mümkün kılmaktadır.

Katmanlı zemin sistemlerinde gerçekleştirilen bu tür analizler, özellikle yollar ve havaalanı pistleri gibi ağır yüzey yüklerinin bulunduğu uygulamalarda kritik bir öneme sahiptir (Coduto, 2010). Rijit kaplamaların altındaki yumuşak zemin tabakaları, aşırı deformasyon veya oturma riski taşıyabilmektedir. Bu nedenle, FEM tabanlı analizler, daha güvenli ve dayanıklı yapıların inşa edilmesi için gerekli veri ve içgörülerini sunmaktadır.

Ayrıca, bu tür analizler temel tasarımında da önemli rol oynamakta, özellikle çok katmanlı zeminlerde yük dağılımını optimize etmek ve oturma tahminlerini iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Zemin iyileştirme teknikleri veya takviye malzemelerinin uygulanmasından önce gerçekleştirilen bu analizler hem maliyet etkinliğini hem de yapısal güvenliği artırmaktadır.

Boussinesq çözümleri, homojen zeminler için yaygın olarak kabul görmüş analitik yaklaşımlar sunmaktadır. Ancak, gerçek zemin koşulları çoğunlukla heterojen olduğundan, bu analitik çözümler gerilme dağılımlarını tam olarak yansıtmayabilmektedir. Bu çalışma, Boussinesq çözümlerinin sınırlamalarını ortaya koymakta ve katmanlı sistemlerde daha doğru tahminler yapabilmek için FEM kullanımının gerekliliğini vurgulamaktadır.

Ayrıca, Boussinesq çözümleri sonsuz ve homojen bir zemin kütleli varsayımına dayandığından, uygulamada karşılaşılan katmanlı ve heterojen zemin koşullarında yanıltıcı olabilmektedir. FEM tabanlı analizler bu sınırlamaları ortadan kaldırarak daha gerçekçi ve uygulanabilir sonuçlar sunmaktadır (Yu, 2006).

Bu çalışma, katmanlı bir zemin sisteminde dairesel yüzey yükü altındaki dikey gerilme artışını araştırmakta ve FEM tabanlı çözümler ile analitik çözümleri karşılaştırmaktadır. Bulgular, katmanlı sistemlerin gerilme dağılımı üzerindeki önemli etkisini ve bu etkinin yapısal tasarımda dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, bu tür karmaşık sistemlerin analizinde daha doğru ve ayrıntılı sonuçlar sağlayarak geleneksel analitik yöntemlerin sınırlarını aşmaktadır.

Katmanlı zemin sistemlerinde detaylı çözümler, özellikle altyapı projelerinde kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle, geoteknik mühendislerin tasarım ve analiz süreçlerinde sonlu elemanlar yöntemlerini kullanmaları şiddetle tavsiye edilmektedir. Ayrıca, bu analizlerin saha verileri ile doğrulanması, modelleme doğruluğunu artıracak ve daha güvenilir mühendislik tasarımlarının elde edilmesini sağlayacaktır.

Gelecekteki çalışmalar, sonlu elemanlar modellerine dinamik yüklemeler, sıcaklık değişimleri ve uzun vadeli konsolidasyon etkileri gibi faktörlerin entegrasyonuna odaklanabilir. Bu tür ileri düzey modeller, zemin-yapı etkileşimlerini daha iyi anlamamıza katkıda bulunacak ve daha dayanıklı mühendislik çözümlerinin geliştirilmesine yardımcı olacaktır.

7 Beyanname

7.1 Çalışmanın Sınırlılıkları

Araştırma sonucunu önemli ölçüde etkileyebilecek sınırlılık bulunmamaktadır.

7.2 Teşekkür

Bu araştırma için, yazarlar dışında katkı yapan kişi veya kurum bulunmamaktadır.

7.3 Finansman Kaynağı

Bu araştırma için herhangi bir finansal destek alınmamıştır.

7.4 Çıkar Çatışması

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

7.5 Yazarların Katkıları

Sefade Beste ÇARICI: Literatür taraması ile ilgili sorumluluk almak, yöntem planlaması, verilerin düzenlenmesi, modellenmelerin yapılması, bulguların mantıklı açıklanması ve sunumu için sorumluluk almak, yazma-orijinal taslak hazırlama, inceleme.

Jülide ÖNER: Makale için hipotezin oluşturulması, yöntem planlaması, inceleme, düzenleme.

Kaynakça

Ahmed, A., Khan, R., & Al-Nageim, H. (2019). Performance evaluation of stabilized subbase layers using FEM modeling. *Construction and Building Materials*, 223, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.038>

American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO guide for design of pavement structures. Washington, D.C.: AASHTO.

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2012). AASHTO guide for design of pavement structures. Washington, D.C.: AASHTO.

Barksdale, R. D., & Itani, S. Y. (1989). Influence of aggregate shape on base behavior. *Transportation Research Record*.

Bisht, A., Ghosh, P., & Dey, A. (2016). Modeling viscoelastic behavior of bituminous materials using Abaqus. *Construction and Building Materials*, 121, 244–251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.114>

Boussinesq, J. (1885). *Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques*. Paris: Gauthier-Villars.

Bowles, J. E. (1997). *Foundation analysis and design* (5th ed.). New York, NY: McGraw-Hill.

Budhu, M. (2010). *Soil mechanics and foundations* (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Coduto, D. P. (2010). *Foundation design: Principles and practices* (2nd ed.). Boston, MA: Pearson.

Craig, R. F. (2004). *Craig's soil mechanics* (7th ed.). London: Spon Press.

Dassault Systèmes. (2021). ABAQUS documentation. Providence, RI: Dassault Systèmes.

Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering* (7th ed.). Stamford, CT: Cengage Learning.

- Ding, Y., Yang, J., & Yu, H. S. (2013). Modeling behavior of subgrade soils subjected to cyclic loading. *International Journal of Geomechanics*, 13(6), 823–831. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000273](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000273)
- Federal Highway Administration. (2023). Highway functional classification: Concepts, criteria and procedures. U.S. Department of Transportation.
- Ghafoori, N., Asadi, S., & Darvishan, E. (2020). Three-dimensional finite element modeling of geogrid-reinforced pavements under cyclic loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(5), 567–577. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.02.005>
- Helwany, S. (2007). *Applied soil mechanics with Abaqus applications*. Hoboken, NJ: Wiley.
- Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc. (2020). *ABAQUS theory manual*. Providence, RI: Dassault Systèmes.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (2nd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Kim, Y. R., & Little, D. N. (1990). Application of viscoelasticity to modeling asphalt concrete behavior. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2(4), 223–239.
- Li, N., & Zhang, J. (2012). Effect of subbase materials on pavement performance. *Journal of Transportation Engineering*, 138(3), 358–366. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000313](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000313)
- National Cooperative Highway Research Program. (2024). Reports. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- NCHRP Report 602. (2008). Verification of structural capacity of pavement foundation layers. Transportation Research Board.
- Shackelford, C. D. (2014). *Introduction to environmental soil physics*. Hoboken, NJ: Wiley.
- Sivakugan, N., & Das, B. M. (2021). *Geotechnical engineering: Principles and practices*. Boston, MA: Cengage Learning.
- Thom, N. H. (2008). *Principles of pavement engineering*. London: ICE Publishing.
- Timoshenko, S. P., & Goodier, J. N. (1970). *Theory of elasticity* (3rd ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Uzan, J. (2001). Characterization of granular materials. *Transportation Research Record*.
- Werkmeister, S., Dawson, A. R., & Wellner, F. (2005). Permanent deformation behavior of granular materials under repeated loading. *Transportation Research Record*, 1913, 73–81.
- Westergaard, H. M. (1939). Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis. *Public Roads*, 20(1), 1–25.
- World Bank Group. (2011). *Transport infrastructure and economic growth*. Washington, D.C.: World Bank Publications.
- Yu, H. S. (2006). *Plasticity and geotechnics*. Berlin: Springer.
- Zhang, Y., Wang, L., & Chen, Q. (2021). Finite element analysis of pavement structures with varying base layer stiffness. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(4), 467–480. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1717961>
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2005). *The finite element method: Its basis and fundamentals* (6th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)