

YAYINCI
PUBLISHER



MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ ve TASARIM DERGİSİ

**JOURNAL OF ENGINEERING
SCIENCES AND DESIGN**

e-ISSN: 1308-6693

Cilt/Volume: 12 Sayı/Issue : 1 Mart/March 2024



İmtiyaz Sahibi / Owner

Deanery of Engineering Faculty, Suleyman Demirel University, Isparta, TURKIYE

Editörler / Editors

Gultekin OZDEMİR

Suleyman Demirel University, Isparta
(Baş Editör / Editor-in-Chief)

Sehnaz Sule KAPLAN BEKAROĞLU

Suleyman Demirel University, Isparta
(Editör Yrd. / Co-Editor)

Fatih Ahmet SENEL

Suleyman Demirel University, Isparta
(Editör Yrd. / Co-Editor)

Karani KURTULUS

Suleyman Demirel University, Isparta
(Editör Yrd. / Co-Editor)

Ali AGCAL

Suleyman Demirel University, Isparta

Caglayan BALKAYA

Suleyman Demirel University, Isparta

Atilla BAYRAM

Van Yuzuncu Yil University, Van

Sehnaz Sule KAPLAN BEKAROĞLU

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Ali BELEN

Artvin Coruh University, Artvin

Ahmet CAGLAR

Akdeniz University, Antalya

Habib GURBUZ

Suleyman Demirel University, Isparta

Baris GUREL

Suleyman Demirel University, Isparta

Tahir Serkan IRMAK

Kocaeli University, Kocaeli

Mesud KAHRIMAN

Suleyman Demirel University, Isparta

Ayberk KAYA

Recep Tayyip Erdoğan University, Rize

Şemsettin KILINCARSLAN

Suleyman Demirel University, Isparta

Alper KUSCU

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Onur OLGUN

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet OZCELİK

Suleyman Demirel University, Isparta

Muhammed Maruf OZTURK

Suleyman Demirel University, Isparta

Savas OZUN

Suleyman Demirel University, Isparta

Yunus PAMUKOĞLU

Suleyman Demirel University, Isparta

Olcay POLAT

Pamukkale University, Denizli

Hakan TONGAL

Suleyman Demirel University, Isparta

Volkan UZ

Izmir Institute of Technology, Izmir

Ali YALCIN

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Ali YALCINKAYA

Kırşehir Ahi Evran University, Kırşehir

Kerim YAPICI

Suleyman Demirel University, Isparta

Demet YILMAZ

Suleyman Demirel University, Isparta

Turgay AYDOĞAN

Suleyman Demirel University, Isparta

Danışma Kurulu / Editorial Advisory Board

Michael G. KAY
North Carolina State University, USA

Bedri TUC
Baskent University, Ankara, TR

Yun-Chia LIANG
Yuan Ze University, Taoyuan, TW

Erol TUTUMLUER
University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA

Alice E. SMITH
Auburn University, Auburn, USA

Fatma YALCINKAYA
Technical University of Liberec, Liberec, Czech Republic

Ravi SANKAR
University of South Florida, Florida, USA

Gerhard-Wilhelm WEBER
Poznan University of Technology, Poznan, PL

Yayın Editörleri / Technical Editors

Ayşe BIYIKLI
Suleyman Demirel University, Isparta

Yasemin SIMSEK TURKER
Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet KIR
Suleyman Demirel University, Isparta

Onur Mustafa UZUM
Suleyman Demirel University, Isparta

Sıla YAMAN
Suleyman Demirel University, Isparta

Yabancı Dil Editörü / Foreign Language Editor

Ahmet UNAL
Suleyman Demirel University, Isparta

Dizin ve İndeksler / Abstracting & Indexing

/ TR-DIZIN / EBSCOhost / SCILIT / ROAD / EuroPUB / SOBIAD /
/ Google Scholar / CrossRef

Duyurular / Announcements

Dergiye 01 Haziran 2022 tarihinden itibaren özgün "Araştırma Makalesi" türü dışındaki başvurular kabul edilmemektedir.

As of 01 June 2022, submissions other than the original "Research Paper" type will not be submitted.

İçindekiler / Contents

Araştırma / Research	Sayfa / Pages
1. FARKLI TÜRBÜLATÖRLERE SAHİP DAİRESEL BİR KANALDA TERMAL PERFORMANSIN SAYISAL ANALİZİ <u>Selma AKÇAY*</u>	1-15
2. SEDIMENTATION ANALYSIS ON SEYHAN DAM RESERVOIR USING LONG TERM BATHYMETRY DATA <u>Mehmet Ali AKGÜL Şerife Pınar GÜVEL* Hakan AKSU</u>	16-33
3. POSITION CONTROL OF A QUADCOPTER WITH PID AND FUZZY-PID CONTROLLER <u>Ozan POLAT* Aziz SEZGİN</u>	34-48
4. EFFECT OF THE CURVATURE PARAMETER AND ITS CLASSİFICATION ON LANDSLİDES <u>Seda ÇELLEK*</u>	49-63
5. PLC BASED SCADA SYSTEM DESIGN FOR INSTANT MONITORING AND EARLY WARNING MECHANISM OF TOXIC GASES IN UNDERGROUND MINES <u>Erdem İLTEN* Mehmet Emin ÜNSAL</u>	64-74
6. KÜÇÜK ÖLÇEKLİ, TEK EKLEMLİ MANYETİK SARKAÇ MEKANİZMASININ BİLGİSAYAR DESTEKLİ BENZETİMİ VE PID KONTROLÜ <u>Hüseyin YILDIZ*</u>	75-87

- [7. THE MICROSTRIP ARRAY ANTENNA WITH REFLECTOR at 1.4 AND 2.4 GHz for RADARS APPLICATIONS](#) 88-97
Abdülkadir ÇILDIR*
- [8. HASTANE ATIKSUYUNA ÖN OKSİDASYON UYGULAMALARI \(O₃, O₃/H₂O₂\): İLAÇ ETKEN MADDELER VE KLASİK KİRLETİCİLERİN AKİBETİ](#) 98-108
Havva ATEŞ* Mahammad MANSIMLI
- [9. TAM KAPALI ORGANİK ÇÖZGENLİ VE SULU KUMAŞ YIKAMA SİSTEMLERİNİN EKONOMİK VE ÇAPRAZ MEDYA ETKİ ANALİZİ](#) 109-117
Meltem BALKAN* Emrah ÖZTÜRK Mehmet KİTİŞ
- [10. KAPALI ALANDA BEACON TABANLI NAVİGASYON UYGULAMASI](#) 118-131
Recep ÇAKIR* Murat TANRIVERDİ Behlül SARIKAYA Fatmana ŞENTÜRK Serkan DOĞANALP
- [11. A STUDY ON DETERMINATION OF TOTAL PHENOLIC AND PROTEIN AMOUNTS OF WASTE GREEN ALGAE OF MAMASIN DAM LAKE \(AKSARAY-TURKEY\)](#) 132-139
Behlül KOÇ BİLİCAN* Audrius Sigitas MARUŠKA
- [12. ŞIRNAK İLİ JEOTERMAL KAYNAKLARI VE ÖZELLİKLERİ](#) 140-155
Ayşen DAVRAZ* M Tahir NALBANTÇILAR Gökhan KADIRHAN Aysen ERCAN İŞTİN Sedat ÇELİK
- [13. TASARIM, SÜREÇ YENİLİĞİ VE DİJİTAL DÖNÜŞÜM İLE TOPLAM VERİMLİLİĞİN ARTTIRILMASINA İLİŞKİN ÖRNEK BİR UYGULAMA](#) 156-175
Erhan ÖZKAN*
- [14. SWEEP SİNYALİ PARAMETRE SEÇİMİNDE ÖNERİLEN TEST ATIŞLARI, FARKLI KAYAÇ TÜRLERİ ÜZERİNDE YAPILAN BİR UYGULAMANIN PERSPEKTİFİNDEN VİBROSİSMİK PARAMETRELERİ İÇİN BİR METODOLOJİ](#) 176-189
Attila AYDEMİR* Türker KARAKAŞ Funda BİLİM

- [15. SENTETİK ATIKSULARDAN REAKTİF SARI 145 BOYASININ UZAKLAŞTIRILMASI: YER FISTIĞI KABUKLARININ ADSORBAN OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ](#) 190-204
Hakan ÇELEBİ* İsmail BİLİCAN İsmail ŞİMŞEK Tolga BAHADIR Şevket TULUN
- [16. ÖN-EĞİTİLMİŞ DERİN SINIR AĞLARI KULLANILARAK ULTRA GENİŞ BANT RADAR TABANLI EL HAREKETİ TANIMA](#) 205-216
Nurullah ÇALIK*
- [17. ANTALYA BÖLGESİNDEKİ KONAKLAMA TESİSLERİNDE DOĞRUDAN SU KULLANIMININ İNCELENMESİ](#) 217-229
Handan ŞAHİN Bülent TOPKAYA Gökhan CİVELEKOĞLU*
- [18. GÜL İŞLEME ATIK SUYUNUN SU BÖRÜLCESİ \(SALVANIA NATANS\) BİTKİSİ İLE ARITIMI](#) 230-240
Özlem SELÇUK KUŞÇU* Perihan KÜÇÜK
- [19. MERMER ATIKLARININ PARKE TAŞI ÜRETİMİNDE AGREGA OLARAK KULLANILMASI](#) 241-254
Ayşe BÜYÜKÜNSAL* Bilgen AKKUŞ
- [20. ENDÜSTRİYEL ATIKSULARIN KİLLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ](#) 255-264
Ömür ÇİMEN* Ebru YALVAÇ



FARKLI TÜRBÜLATÖRLERE SAHİP DAİRESEL BİR KANALDA TERMAL PERFORMANSIN SAYISAL ANALİZİ

Selma AKÇAY*

¹ Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Çankırı, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Türbülator,
Dairesel Kanal,
Isı Transferi,
Termal Performans,
Sürtünme Faktörü.

Öz

Bu çalışmada, içerisinde farklı türbülatorlere sahip dairesel kesitli kanal akışlarının termal performansı sayısal olarak analiz edilmiştir. Simülasyonlar, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tabanlı Fluent programı ile çözülmüştür. Çalışmada, dik ve eğik bölmelerden oluşan yedi farklı türbülator yapısı kullanılmıştır. Bu türbülatorler kanalın merkezine yerleştirilmiş ve türbülatorleri içeren kanal dış yüzeyleri sabit sıcaklık ($T_w=350K$) şartlarında korunmuştur. İki farklı Reynolds sayısı ($Re=5000$ ve $Re=10000$) için Nusselt sayısı (Nu), sürtünme faktörü (f) ve termal performans faktörü (TPF) hesaplanmıştır. Sayısal çözümler, önceki çalışma sonuçları ve ampirik bağıntılar ile karşılaştırılmıştır. Türbülatorlerin akış ve ısı transferi üzerindeki etkilerini gözlemleyebilmek için kanal içinde akış ve sıcaklık görüntüleri elde edilmiştir. Yapılan çalışma, aynı zamanda türbülatorsüz kanal akışı ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, kanal içine eklenen türbülatorlerin ısı transferini iyileştirdiğini ve türbülatorsüz kanala göre Nu 1,38 kat arttığını göstermiştir. Ayrıca kanal giriş hızının artması ile ısı transferi artmıştır. En yüksek ısı transferi $Re=10000$ 'de Kanal 8 durumunda $Nu=27,17$ olarak bulunmuş ve en yüksek TPF $Re=5000$ 'de Kanal 8'de $TPF=1,08$ olarak elde edilmiştir.

NUMERICAL ANALYSIS OF THERMAL PERFORMANCE IN A CIRCULAR DUCT WITH DIFFERENT TURBULATORS

Keywords

Turbulator,
Circular Channel,
Heat Transfer,
Thermal Performance,
Friction Factor.

Abstract

In this study, the thermal performance of circular cross-section duct flows with different turbulators was numerically analyzed. The simulations were solved with the Computational Fluid Dynamics (CFD) based Fluent program. In the study, seven turbulator structures consisting of vertical and inclined baffles were used. These turbulators were placed in the center of the duct and the duct surfaces containing the turbulators were maintained at constant temperature ($T_w=350K$) conditions. Nusselt number (Nu), friction factor (f), and thermal performance factor (TPF) were calculated in two different Reynolds numbers ($Re=5000$ and $Re=10000$). Numerical solutions were compared with previous study results and correlations. To observe the effects of turbulators on flow and heat transfer, flow and temperature contours were obtained inside the duct. The study was also compared with the smooth duct flow. The findings showed that the turbulators added in the duct improved the heat transfer and the Nu increased 1.38 times compared to the duct without turbulator. In addition, the heat transfer increased with increasing the duct inlet velocity. The highest heat transfer was found to be $Nu=27.17$ in the case of Duct 8 at $Re=10000$ and the highest TPF was obtained to be $TPF=1.08$ at $Re=5000$ in the Duct 8.

Alıntı / Cite

Akçay, S., (2024). Farklı Türbülatorlere Sahip Dairesel Bir Kanalda Termal Performansın Sayısal Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(1), 1-15.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

S. Akçay, 0000-0003-2654-0702

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	09.11.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	05.09.2023
Kabul Tarihi / Accepted Date	06.03.2024
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: selmaakçay@karatekin.edu.tr, +90-376-218-9532

A NUMERICAL ANALYSIS OF THERMAL PERFORMANCE IN A CIRCULAR DUCT WITH DIFFERENT TURBULATORS

Selma Akçay^{1†}

Çankırı Karatekin University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Çankırı, Türkiye

Highlights

- The thermal performance in a duct with different turbulator arrangements was numerically analyzed
- Seven different turbulator designs consisting of vertical and inclined baffles were used
- Turbulators added in the duct improved the heat transfer 1.38 times compared to without turbulator
- The highest thermal performance factor was obtained to be TPF=1.08 at Re=5000 in the case of Duct 8

Graphical Abstract

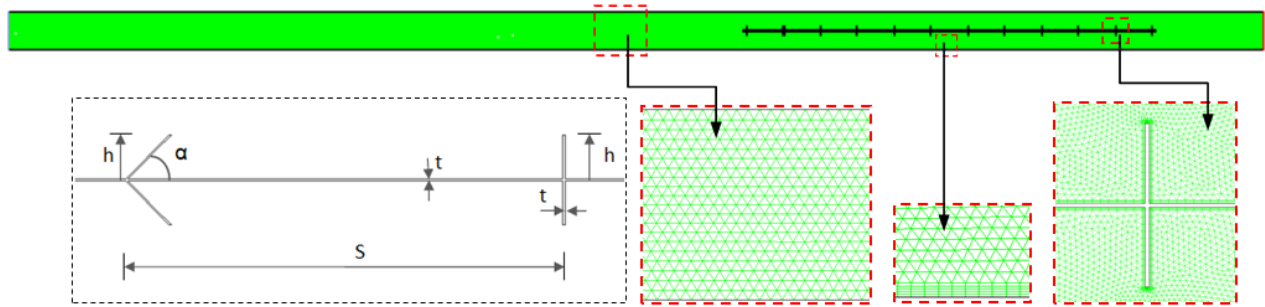


Figure. Geometric Details Of The Turbulator And The Mesh Structure Of Channel 2

Purpose and Scope

In this study was numerically analyzed the thermal performance of a smooth duct with different turbulator arrangements to use energy more effectively in thermal devices.

Design/methodology/approach

The study conducted with the Computational Fluid Dynamics (CFD) based Fluent program. In the study, seven turbulator structures consisting of vertical and inclined baffles were used and these turbulators were placed in the center of the duct. Nusselt number (Nu), friction factor (f), and thermal performance factor (TPF) were calculated in two different Reynolds numbers (Re=5000 and Re=10000). To observe the effects of turbulators on flow and heat transfer, flow and temperature contours were obtained inside the duct. The study was also compared with the smooth duct flow.

Findings

The main findings showed that the turbulators added in the duct improved the heat transfer and the Nu increased 1.38 times compared to the duct without turbulator. In addition, the heat transfer increased with increasing the Reynolds number. The highest heat transfer was found to be about Nu=27.17 in the case of Duct 8 at Re=10000. The highest thermal performance factor was obtained to be about TPF=1.08 at Re=5000 in the case of Duct 8.

Practical implications

The baffle angle and the in-line and staggered arrangement of the baffles in the turbulators added to the duct affect the flow and heat transfer. High heat transfer and turbulent kinetic energy were obtained in the case of ducts with vertical baffles and in-line arrangement. However, the friction within the duct increased slightly. In turbulator cases with inclined baffles and staggered arrangement, low heat transfer and turbulent kinetic energy were obtained, but the frictions in the ducts decreased.

Originality

The effects of different turbulator designs on the performance factor were investigated for channel designers.

[†] Corresponding author: Selma Akçay: selmaakcay@karatekin.edu.tr, +90-376-218-9532

1. Giriş (Introduction)

Son yıllarda yaşanan küresel enerji krizi, enerjinin daha etkin kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Her geçen gün artan enerji ihtiyacının kıt kaynaklarla temin edilmesi enerji verimliliği araştırmalarını ön plana çıkarmıştır. Gerek endüstri sektöründe gerek domestik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemlerindeki termal cihazların daha verimli şekilde kullanılması amacıyla uzun süredir çalışmalar yürütülmektedir (Akdağ vd., 2014; Akçay, 2022a). Termal cihazlarda, ısı transferini artırmak için kullanılan pasif yöntemler enerji ve maliyet tasarrufu sağladığından sıklıkla tercih edilmektedir. Bu yöntem, dalgalı kanal geometrileri ve kanal içerisine eklenen vorteks üreten düzenlemeleri kapsamaktadır (Alam vd., 2014; Ajarostaghi vd., 2022). Dalgalı kanal geometrileri sınırlı ısı transferi iyileşmesi sağlarken basınç kaybını artırmaktadır. Bunun yerine düz kanallar tercih edilerek kanal içerisine bölme, kanatçık veya bükülü bant gibi düzenlemeler eklenmektedir (Sriromreun vd., 2012; Promvonge vd., 2015; Sun vd., 2020). Türbülötör veya vorteks üreteçleri olarak bilinen bu düzenlemeler, akış karışımını iyileştirmeyi ve ısı transfer alanı artırmayı amaçlamaktadır. Kanal içerisine ilave edilen bu türbülötörlerin farklı geometrilerde, açılarda ve düzenlemelerde yerleştirildiği ve elde edilen termal performansın bu parametrelerden oldukça etkilendiği görülmektedir (Akçay ve Akdağ, 2018; Ajarostaghi vd., 2022). Türbülötörler, kanal içerisinde akan akışın yönünü değiştirerek akışta döngüler meydana getirmektedir. Bu döngüler, kanal içinde artan türbülans etkileri nedeniyle akış karışımını iyileştirir. Ayrıca kanal yüzeylerinde sınır tabaka oluşumunu önleyerek ısı direncin azalmasına neden olur ve ısı direncin azalması sonucu ısı transferinde iyileşme meydana gelir. Bu nedenle türbülötörler, ısı transferi iyileşmesinde önemli bir potansiyele sahiptir. Ancak kanal içerisine eklenen bu uygulamalar her ne kadar ısı transferini artırsa da sürtünme kayıplarını da artırdığı için pompalama gücünde bir artış kaçınılmazdır. Kanal akışlarında pompalama maliyetlerini çok fazla artırmadan en iyi termal performans sağlayan türbülötörlerin belirlenmesi halen güncel araştırma konuları arasındadır (Akçay, 2023).

Yapılan bu çalışma ile dairesel bir kanalda farklı türbülötörlerin akış ve ısı transferi üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Bugüne kadar yapılan çalışmaların kısa bir özetini veren kaynak araştırmasından sonra, ilk olarak çalışmada kullanılan matematiksel model ve sayısal model açıklanmış, farklı türbülötörleri içeren kanal şekilleri tanımlanmıştır. Sonra sayısal çözüm yöntemi açıklanmış ve kullanılan sınır şartlar tariflenmiştir. Daha sonra ise termal performans analizinde kullanılan eşitlikler verilmiş ve çalışmanın önceki çalışmalarla karşılaştırması yapılmıştır. Son olarak çalışma sonucunda elde edilen akış ve sıcaklık dağılımları paylaşılmış, tüm türbülötör düzenlemeleri için ısı transferi, sürtünme faktörü, termal performans grafikleri ve yerel TKE dağılımı elde edilmiş ve bu sonuçlar detaylı olarak analiz edilmiştir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Önceki yapılan çalışmalarda, ısı transfer alanını artırması ve kendiliğinden akış dalgalanmaları oluşturması nedeniyle pasif yöntemler arasında yer alan dalgalı yüzey geometrileri yaygın olarak kullanılmıştır (Kurtulmuş ve Şahin, 2019; Krishnan vd., 2021). Yapılan çalışma sonuçları ile dalgalı yüzeylere sahip kanalların düz kanallara göre ısı transferini artırdığı bildirilmiştir (Zhang ve Che, 2011; Mehta vd., 2022; Alfellag vd., 2022). Choudhary vd. (2022) gerçekleştirdiği sayısal çalışmalarında düz, dalgalı ve oluklu kanalların hidrodinamik ve termal davranışını karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, kanal giriş hızının artması ile türbülans etkilerinin ve basınç düşüşünün arttığını, ayrıca düz kanallara göre dalgalı kanallarda daha yüksek ısı transferinin ve yüzey sürtünme katsayısının elde edildiğini bildirmişlerdir.

Dalgalı yüzey geometrilerinin kullanıldığı uygulamalarda, ısı transferi iyileşmesi sınırlı kalmaktadır ve daha yüksek ısı transferi hedeflenen durumlarda yenilikçi yöntemler araştırılmaktadır. Araştırmacılar, kanallara eklenen farklı şekillere ve düzenlemelere sahip türbülötörlerin ısı transfer performansına etkilerini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir (Ajeel vd., 2021a; Ajeel vd., 2021b; Li vd., 2022). Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar, kanal içerisine ilave edilen bölme, kanatçık gibi uzatılmış yüzeylerin daha yüksek ısı transfer oranı sağladığını kanıtlamıştır (Kumar vd., 2016; Inan vd., 2022). Sriromreun vd. (2012) Z şeklinde türbülötörlere sahip dikdörtgen bir kanalda ısı transferi iyileşmesini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlar ve düz kanallara göre Z tipi türbülötörlerin ısı transfer iyileşmesinde önemli bir potansiyele sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Turgut ve Kızılırmak (2015) bölmelere sahip bir kanalda $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ bölme açılarında akış ve ısı transferini sayısal olarak incelemişler ve en iyi termal performansın 150° bölme açısında elde edildiğini bulmuşlardır. Promvonge vd. (2015) deneysel çalışmalarında, at nalı şeklinde eğimli bölmeler içeren bir kanalda Nusselt sayısının düz kanallara göre %92-208 oranında arttığını ve basınç kaybının ise 1.76- 6.37 kat arttığını göstermişlerdir. Skullong vd. (2016) delta şeklinde kanatçıklı vorteks üreteçleri içeren bir kanal akışında hidroluk ve termal performans analiz etmişlerdir. Sahel vd. (2016) sayısal çalışmalarının sonucunda dikdörtgen bir kanalda bölmelerin kullanılması ile ısı transferinin %65 arttığını bildirmişlerdir. Modi ve Rathod (2019) $400 \leq Re \leq 1000$ Reynolds sayısı aralığında dalgalı bir kanalda eliptik eğimli dikdörtgen kanatçıklardan oluşan

vorteks üreteçlerinin etkilerini farklı parametreler için sayısal olarak incelemişler ve termal performansın vorteks üreteçlerinin şeklinden oldukça etkilendiğini belirtmişlerdir.

Sun vd. (2020) dairesel bir ısı değiştiricisinde çoklu dikdörtgen kanatçıklardan oluşan vorteks üreteçlerinin akış ve ısı transfer davranışını analiz etmişlerdir. Promvonge vd. (2020) ayrı V kanatçıklar içeren bir ısı değiştiricisinde ısı transferi ve basınç düşüşü üzerinde farklı kanatçık adımı, kanatçık yüksekliği ve kanatçık düzenlemelerinin etkisini türbülanslı akış şartlarında deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda belirli bir kanat yüksekliği için en düşük kanatçık uzunluğunda en yüksek ısı transferinin ve basınç kaybının elde edildiğini bildirmişlerdir. Menni vd. (2020) V şeklinde çoklu kanatlara sahip güneş hava kanalında kanat açısının, kanat uzunluğunun ve akış oranlarının termal performansa etkilerini analiz etmişler ve çalışma sonucunda, en iyi termal performansın 40° kanat açısında ve $Re=2163$ değerinde elde edildiğini bildirmişlerdir. Nakhchi vd. (2021) ısı değiştiricilerinde eliptik türbülötörlerin etkilerini araştıran deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Ajeel vd. (2021a) L-şeklinde bölmelerin termal performansını incelerken, El-Habet vd. (2021) delikli bölmelerin kademeli ve sıralı düzenlemelerinin ısı transfer davranışını araştırmışlardır. Ajeel vd. (2021b) E şeklinde bölmeler ile eğimli bir kanalda ZnO-su nanoakışkan akışında hidrolik ve termal performansı araştırmışlar ve bölmelerin ısı transferini iyileştirdiğini belirterek sürtünme faktörü ve Nusselt sayısı ile ilgili bir bağıntı önermişlerdir. Akçay (2021) dik bölmeler içeren zigzag bir kanalda nanoakışkanların daimî akışının ısı transferine etkisini $200 \leq Re \leq 1600$ için sayısal olarak araştırmış ve en iyi termal performansın $Re=1400$ değerinde yaklaşık 1,15 olarak elde edildiğini bildirmiştir. Bir diğer çalışmada, Akçay (2022b) üst yüzeyinde bölmeler içeren ve alt duvarı trapez oluklu bir kanalda farklı bölme yüksekliğinin ısı transferine etkisini sayısal olarak incelemiş ve bölme yüksekliği arttıkça ısı transferinin iyileştiğini ancak sürtünme faktörünün de arttığını rapor etmiştir. Ayrıca $Re=400$ değerinde ve $t=2H/3$ bölme yüksekliğinde termal performansın bölmesiz kanala göre 1,95 kat arttığını bildirmiştir. Menni vd. (2021) bölmelere sahip bir ısı değiştiricisinde türbülanslı akış için bölme açılarının termal iyileşme faktörü üzerindeki etkilerini araştırmışlar ve en yüksek termal performansın yüksek Reynolds sayısında ve dik bölmelerin olduğu durumda elde edildiğini bildirmişlerdir.

Salhi vd. (2021) ısı değiştiricilerinde uzunlamasına yerleştirilen bölmelerin akış ve ısı transferine etkilerini araştıran sayısal bir çalışma yürütmüşlerdir. Bir başka çalışmalarında, Salhi vd. (2022) düz kanallarda farklı şekillerdeki eğimli bölmelerin akış ve ısı transferine etkilerini türbülanslı akış için incelemişler ve üçgen bölmelerde %32,37, dikdörtgen bölmelerde %44,37 oranında termal performansın iyileştiğini göstermişlerdir. Al Habet vd. (2022) dikdörtgen bir kanalda delik bölmelerin sıralı ve kademeli yerleşiminin hidrolik ve termal performansa etkilerini incelemiş ve termo-hidrolik performansın akış yapısına, kanal geometrisine, bölme şekline, bölme yerleşimine ve bölme açısına bağlı olarak değiştiğini rapor etmişlerdir. Hassani vd. (2022) deneysel ve sayısal çalışmalarında dikdörtgen bir kanalda dairesel, dikdörtgen ve elmas şeklindeki eğimli türbülötörlerin farklı düzenlemelerinin akış ve ısı transferine etkilerini araştırmışlar ve en iyi termal performansın dairesel eğimli türbülötör durumunda sağlandığını bildirmişlerdir. Khan vd. (2022) farklı türbülötör düzenlemeleri ile mikrokanal ısı atıcısında laminer akış için sürtünme faktörünü ve ısı transferini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Özellikle artan Reynolds sayılarında ısı transferinin önemli derecede iyileştiğini ve Nusselt sayısının türbülötörlü kanalda düz kanala göre daha yüksek elde edildiğini bildirmişlerdir. Çalışmalarında, en yüksek ısı transferini $Re=800$ 'de $Nu=21.8$ olduğunu bulmuşlar ve ısı transferi ile basınç düşüşünün kanal genişliğinden ve türbülötör düzenlemesinden oldukça etkilendiğini belirtmişlerdir. Feng vd. (2022) trapez bölmelere sahip üçgen bir kanalda ısı transferini araştırmışlardır. Trapez bölmelerin, akış karışımını iyileştirerek ısı transferini artırdığını gözlemlemişler ve bölmesiz kanala göre trapez bölmelerin Nusselt sayısını 1.7 kat, sürtünme faktörünü 3.5 kat ve performans faktörünü %30 oranında artırdığını bildirmişlerdir. Ajarostaghi vd. (2022) ısı transferini artırmak için uygulanan pasif yöntemleri içeren bir derleme çalışması sunmuşlardır. Akçay (2023a) zigzag bir kanal içinde akış yönünde eklenen V şeklindeki kanatçıkların ısı transferine etkisini sayısal olarak incelemiş ve kanatçıkların ısı transferi iyileşmesinde önemli katkı sağladığını bildirmiştir. Kanala eklenen kanatçıkların, termal performansı $Re=400$ değerinde yaklaşık 2,12 kat artırdığını bildirmiştir.

Literatürde yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar, kanal içerisine eklenen türbülötörlerin ısı transferini önemli ölçüde iyileştirdiğini bununla birlikte basınç kaybının da arttığını göstermektedir. Basınç düşüşünü kabul edilebilir bir seviyede tutarak ısı transfer iyileşmesini artıran kanal tasarımları halen araştırılmaktadır. İncelenen parametrelerin sayısının çok olması nedeniyle bu konuda yeni araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada dairesel bir kanalda farklı türbülötörlerin akış ve ısı transferine etkileri, farklı Reynolds sayılarında sayısal olarak araştırılmıştır. Çalışmada yedi farklı türbülötör tasarımının termal performansa etkisi analiz edilmiştir. Bu çalışma ile termal performans açısından optimum türbülötör seçiminde kanal tasarımcılarına yol gösterici olması hedeflenmiştir.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Çalışmada kullanılan akışkan, Newtoniyen tip, tek fazlı ve sıkıştırılmaz özelliklerdedir. Kanaldaki akış daimî akış koşullarında ve türbülans rejiminde akmaktadır. Radyasyonla ısı transferi ve yerçekimi etkileri dikkate alınmamıştır. Akışkan özelliklerinin değişmediği kabul edilmiştir. Bu varsayımlara göre iki boyutlu korunum denklemleri ve ilgili parametreler Eşitlik (1)-(10) ile sunulmuştur (Zontul vd., 2021).

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (2)$$

Enerji denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\Gamma + \Gamma_t) \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) \right] \quad (3)$$

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = (\mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \quad (8)$$

$$\Gamma = \frac{\mu}{Pr} \quad (9)$$

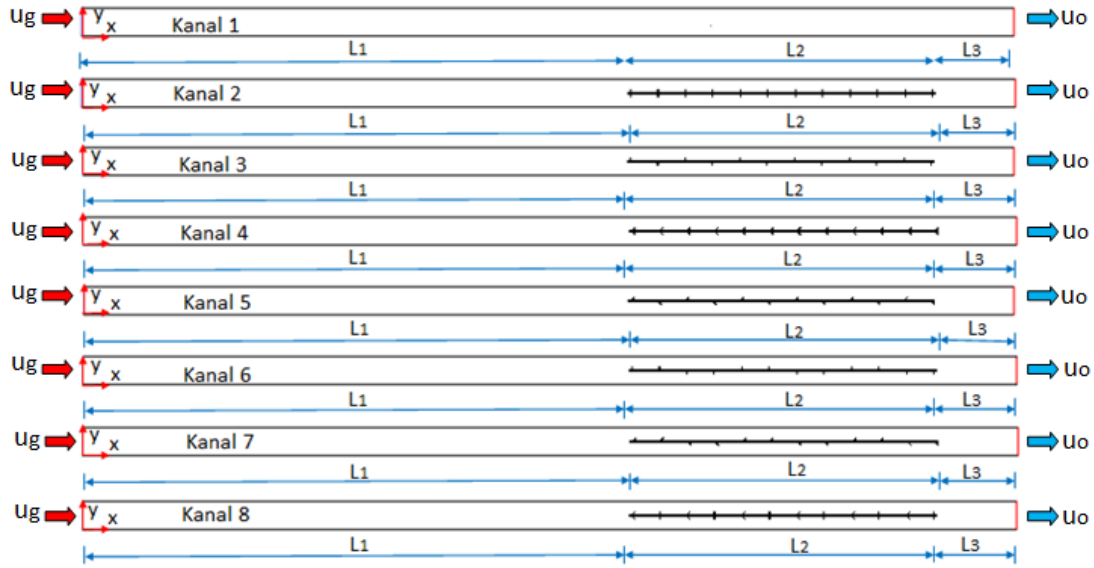
$$\Gamma_t = \frac{\mu_t}{Pr_t} \quad (10)$$

Standart k-ε türbülans modeli için kullanılan sabitlerden $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, $Pr_t=0.9$ ve $C_\mu=0.09$ olarak alınmıştır (Zontul vd., 2021).

3.2. Sayısal Model (Numerical Model)

Çalışmada kullanılan farklı türbülatorlerden oluşan kanal yapılarının geometrisi Şekil 1 ile verilmiştir. Kanallar, $D=10\text{mm}$ dairesel kesit alanına sahiptir. Kanal girişinde $L_1=20D$ ve çıkışında $L_3=3D$ uzunluğunda ısıtılmamış düz bir bölüm vardır. Farklı düzenlemelerdeki türbülatorler, $L_2=11D$ uzunluğundaki bölüme kanalın merkezine yerleştirilmiştir. Türbülatorleri ihtiva eden kanal yüzeyleri sabit sıcaklık şartlarında korunmuştur. Türbülatorler kanal içerisine dik ve akış yönünde eğimli bölmeler olarak sıralı ve kademeli düzenlemede yerleştirilmiştir. Eğimli bölmelerin açısı $\alpha=45^\circ$, tüm bölmelerin yüksekliği $h=1\text{mm}$ ve kalınlığı $t=0,05\text{mm}$ olarak alınmıştır. Her iki bölme arasındaki mesafe $S=10\text{ mm}'dir$.

Kanal içerisinde kullanılan türbülatorlerin düzenlemesine göre kanal sınıflandırması ve türbülatorlerin şematığı Tablo 1'de açıklanmıştır.



Şekil 1. Türbülantörlü Kanalların Geometrijleri (Geometries Of The Channels With Turbulator)

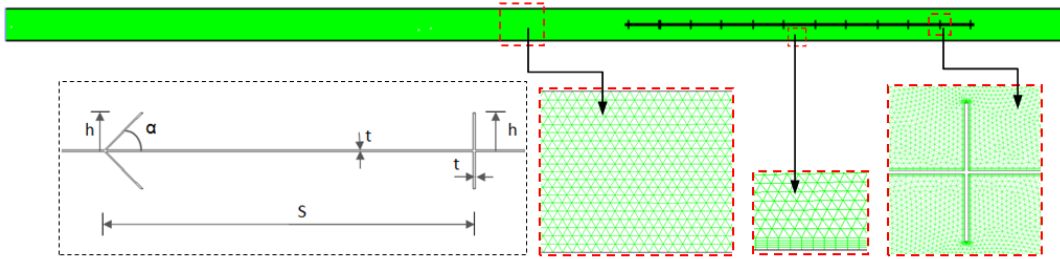
Tablo 1. Türbülantör Şekline Göre Kanal Sınıflandırmaları (Channel Classifications According To Turbulator Structures)

SİMGE	TÜRBÜLATÖR TANIMI	TÜRBÜLATÖR ŞEMATİĞİ
Kanal 1	Türbülantörsüz kanal	-
Kanal 2	90° b6lmeli sıralı düzen	
Kanal 3	90° b6lmeli kademeli düzen	
Kanal 4	45° b6lmeli sıralı düzen	
Kanal 5	45° b6lmeli kademeli düzen	
Kanal 6	90° b6lmeli 2'li kademeli düzen	
Kanal 7	45° b6lmeli 2'li kademeli düzen	
Kanal 8	45° ve 90° b6lmeli sıralı düzen	

3.3. Sayısal Yöntem (Numerical Method)

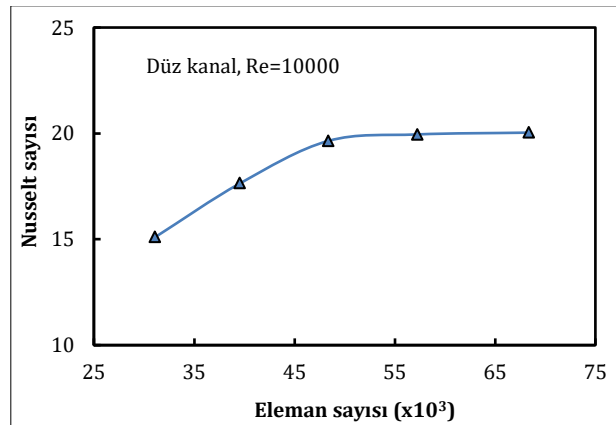
Sayısal modelin iki boyutlu geometrisi ve ağ yapısı Gambit programı ile oluşturulmuştur. Ağ yapısında üçgen eleman yapıları tercih edilmiştir. Kanal giriş ve çıkışındaki düz bölümler için daha seyrek eleman sayıları tercih edilirken ısıtılmış duvar yüzeyleri ile türbülantörlerin yüzeylerinde daha yüksek eleman sayıları kullanılmıştır ($y^+ < 1$ şartını sağlamak için). Şekil 2'de bölmelere ait geometrik detaylar verilmiş ve Kanal 2'nin ağ yapısı gösterilmiştir.

Sayısal çözümler, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı olan Fluent 6.3 (2010) programı ile gerçekleştirilmiştir. Taşınım terimlerinin ayrıklaştırılmasına ikinci dereceden ileri fark şeması kullanılmıştır. Çözümlerde, basınç ve hız arasındaki ilişki SIMPLE (semi-implicit pressure-linked equation) algoritması ile ele alınmıştır. Zontul vd. (2021) yaptıkları deneysel ve sayısal çalışmalarında, oluklu ve düz bir kanalda ısı transferini ve sürtünme faktörünü hesaplamışlar ve standart $k-\epsilon$ türbülans modelinde elde ettikleri sonuçların deneysel sonuçlara daha yakın olduğunu bildirmişlerdir. Bu nedenle bu çalışmada standart $k-\epsilon$ türbülans modeli tercih edilmiştir. Türbülans yoğunluğu %5 kabul edilmiştir. Bu konuda detaylı bilgi, Akçay (2023b) çalışmasında verilmiştir. Hesaplamalarda, yakınsama kriteri olarak süreklilik denkleminde 10^5 , momentum eşitliklerinde 10^7 ve enerji eşitliğinde 10^9 değerleri ayarlanmıştır. Tüm çözümlerde iterasyonlar, bu değerlere ulaşana kadar devam etmiştir.



Şekil 2. Bölmelere Ait Geometrik Detaylar Ve Kanal 2'nin Ağ Yapısı (Geometric Details Of The Turbulator And The Mesh Structure Of Channel 2)

Hesaplamlarda, çözümlerin eleman sayılarından etkilenmediğini belirlemek için ağ bağımsızlık testi uygulanmıştır. Bunun için türbülatorsüz kanalda (Kanal 1) $Re=10000$ için farklı eleman sayılarında (31098, 39560, 48362, 57246, 68384) Nusselt sayıları elde edilmiştir. 48362 eleman sayısından sonra Nusselt sayıları arasındaki farkın %1,6'dan düşük olduğu tespit edilmiş ve bu eleman sayısının sayısal çözümler için yeterli olduğu düşünülmüştür. Kanal 2, Kanal 3, Kanal 4, Kanal 5, Kanal 6, Kanal 7 ve Kanal 8 için eleman sayıları sırasıyla 54032, 54980, 54822, 54356, 53506, 54510 ve 53164 olarak seçilmiştir. Kanal 1 için $Re=10000$ değerinde farklı eleman sayılarında hesaplanan Nusselt sayıları Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Eleman Sayıları İle Nusselt Sayısının Değişimi (Variation Of Nusselt Number Versus Element Number)

3.4. Sınır Şartları (Boundary Conditions)

Akışkan kanala, sabit ortalama bir hız (u_g) ile $T_i=300K$ sıcaklığında girmektedir. Kanal girişinde, $Re=5000$ ve $Re=10000$ olmak üzere iki farklı hız giriş şartı tariflenmiştir. Kanal girişinde hızın ve sıcaklığın üniform olduğu kabul edilmiştir. Kanal girişinde, L_1 ve çıkışında, L_3 uzunluğundaki bölümler adyabatiktir. Türbülatorleri içeren L_2 uzunluğundaki duvar yüzeyleri, $T_w=350K$ sabit sıcaklık şartlarında tutulmuştur. Türbülatorlerin adyabatik şartlarda olduğu kabul edilmiş ve tüm duvar yüzeyleri için kaymaz sınır şartları tariflenmiştir. Akışkan "dışa akış" sınır şartı ile kanalı terk etmiştir. İş yapan akışkan olarak su (H_2O) tercih edilmiş ve akışkanın termofiziksel özellikleri için programda varsayılan değerler alınmıştır.

3.5. Termal Performans Analizi (Thermal Performance Analysis)

Sunulan çalışmada, farklı türbülatorlere sahip kanal akışlarında $Re=5000$ ve $Re=10000$ için akış ve ısı transfer hesaplamaları yapılmıştır. Çalışmada performans analizi için kullanılan ana parametreler Reynolds sayısı (Re), Nusselt sayısı (Nu) ve sürtünme katsayısı (f) ve termal performans faktörü (TPF)'dür. Reynolds sayısı Eşitlik (12) ile hesaplanmıştır:

$$Re = \frac{\rho u_o D_h}{\mu} \quad (12)$$

Burada, u_o kanal giriş hızı, ρ akışkan yoğunluğu, D_h hidrolik çap ve μ dinamik viskozitedir.

Yerel Nusselt sayısı Eşitlik (13) ve ortalama Nusselt sayısı Eşitlik (14) ile hesaplanmıştır:

$$Nu_x = \frac{h D_h}{k} \quad (13)$$

$$Nu = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx \quad (14)$$

Isı taşınım katsayısı (h), Eşitlik 15 ile logaritmik sıcaklık farkı (ΔT_{log}) Eşitlik (16) ile bulunmuştur (Akçay 2023b):

$$h = \frac{q''}{\Delta T_{log}} \quad (15)$$

$$\Delta T_{log} = \frac{(T_i - T_o)}{\ln \left(\frac{T_w - T_i}{T_w - T_o} \right)} \quad (16)$$

Burada k ısı iletim katsayısını, q'' birim alan için ısı akısını, L kanal uzunluğunu, T_w kanal yüzey sıcaklığını, T_i ve T_o akışkanın kanala giriş ve çıkış sıcaklığını göstermektedir.

Türbülantörlü kanalda elde edilen Nusselt sayısının ($Nu_{türbülantörlü}$), türbülantösüz kanalda elde edilen Nusselt sayısına ($Nu_{türbülantösüz}$) oranı, ısı transfer iyileşmesini (ε) göstermektedir (Eşitlik 17).

$$\varepsilon = \frac{Nu_{türbülantörlü}}{Nu_{türbülantösüz}} \quad (17)$$

Kanal içinde türbülantörlerin sebep olduğu sürtünmeleri tespit etmek için Eşitlik (18) ile sürtünme faktörü (f) tanımlanmıştır.

$$f = \frac{2\Delta P D_h}{\rho L u_o^2} \quad (18)$$

Burada, ΔP kanalın giriş ve çıkışı arasındaki basınç kaybını göstermektedir.

Türbülantörlü kanalda elde edilen sürtünme faktörünün ($f_{türbülantörlü}$), türbülantösüz kanalda elde edilen sürtünme faktörünün ($f_{türbülantösüz}$) oranı, relative sürtünme faktörünü (f_{rel}) göstermektedir (Eşitlik 19).

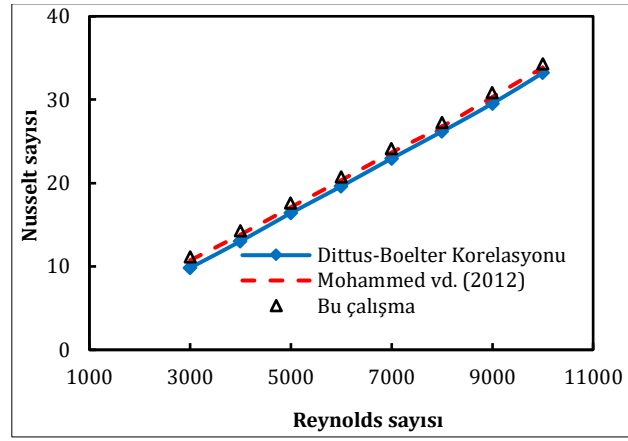
$$f_{rel} = \frac{f_{türbülantörlü}}{f_{türbülantösüz}} \quad (19)$$

Isı transfer iyileşmesi ve relatif sürtünme faktörüne bağlı olarak termal performans faktörü (TPF) Eşitlik (20) ile hesaplanmaktadır.

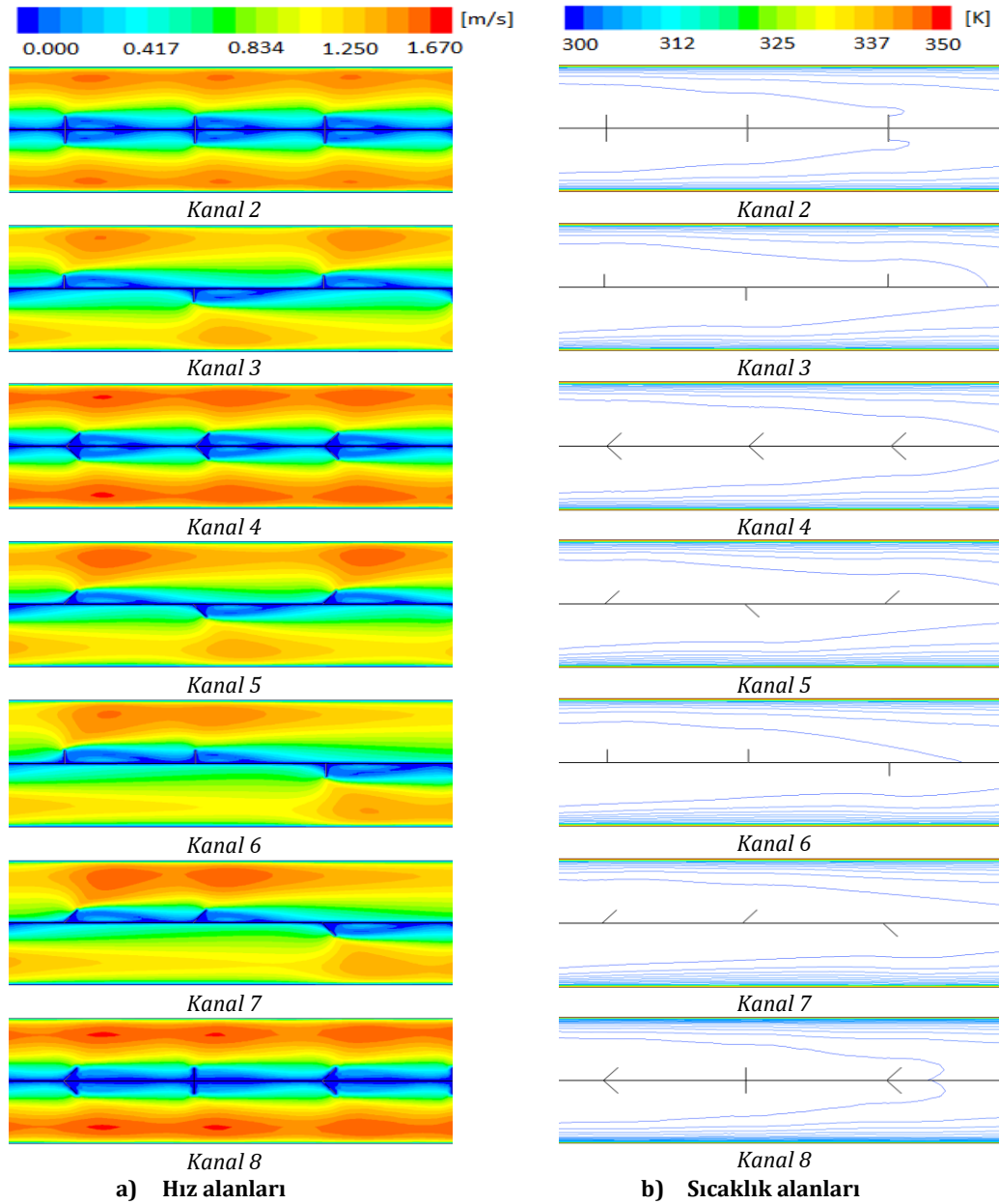
$$TPF = \frac{\varepsilon}{f_{rel}^{1/3}} \quad (20)$$

4. Sayısal Sonuçlar (Numerical Results)

Sayısal çözümler Mohammed vd. (2012) tarafından yapılan çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Referans çalışmada, aynı hidrolik çapa sahip dairesel bir boru geometrisi kullanılmış ve bu çalışmada kullanılan Reynolds sayısı aralığı ($3000 \leq Re \leq 10000$) için Nusselt sayıları hesaplanmıştır. Dolayısı ile Referans çalışmada (Mohammed vd. 2012) aynı boru geometrisi, aynı hidrolik çap değeri ve aynı akış rejimi kullanılarak doğrulama gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sayısal çözümler, $3000 \leq Re \leq 10000$ aralığındaki Reynolds sayılarında Dittus-Boelter korelasyonu ile elde edilen ampirik bağıntı sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Mohammed vd. (2012)'in sonuçları ve ampirik bağıntı sonuçları ile bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, Şekil 4'te sunulmuştur.



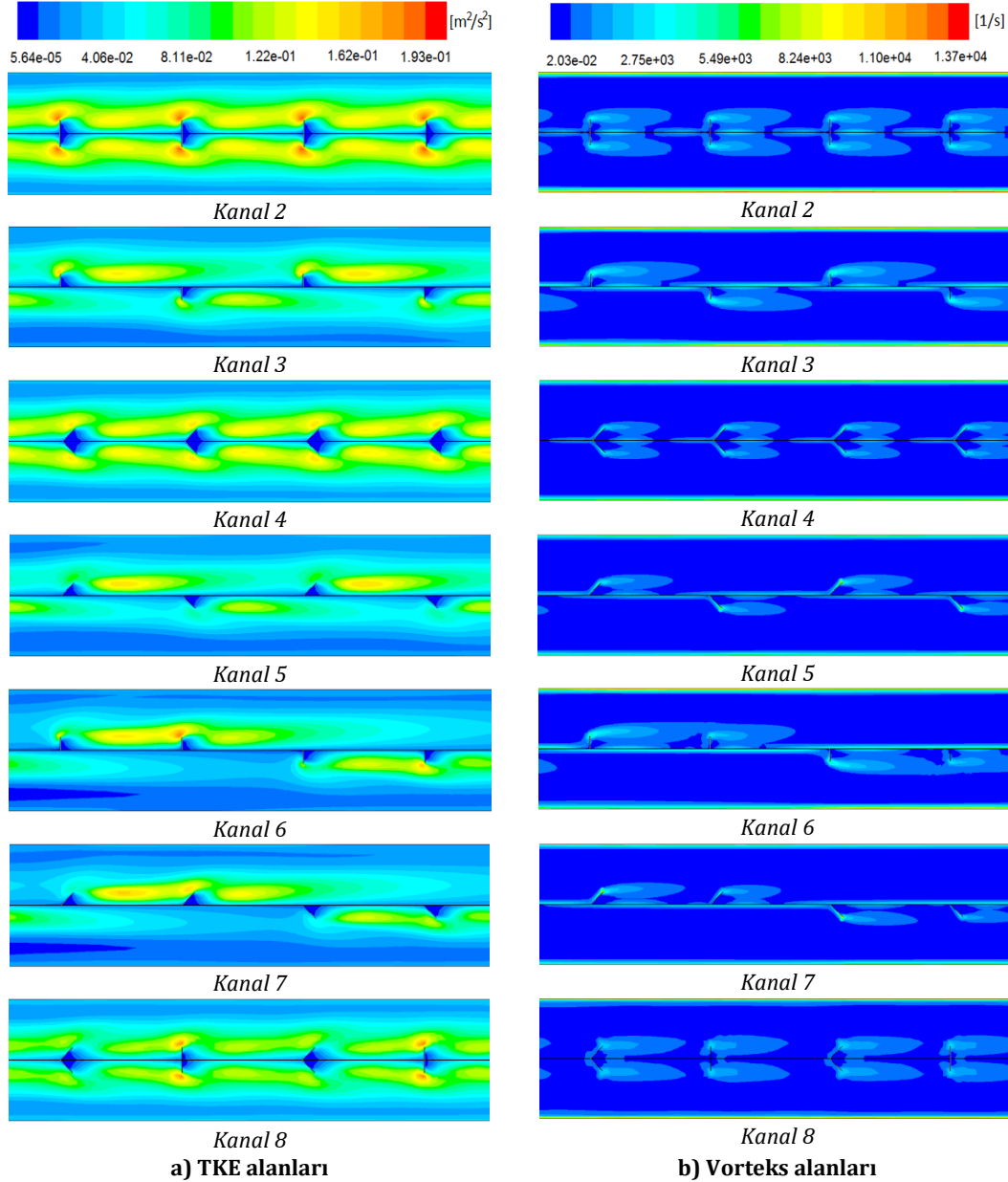
Şekil 4. Sayısal Çözümlerin Doğrulanması (Verification Of The Numerical Solutions)



Şekil 5. Re=10000 'de Farklı Türbülötörler İçin Hız Ve Sıcaklık Alanları (Velocity And Temperature Fields For Different Turbulators At Re=10000)

Bu çalışmada, farklı türbülötör yapılarının akış ve ısı transfer davranışını incelemek için kanal içinde hız, sıcaklık, TKE ve vorteks yapıları elde edilmiştir. Tüm akış ve sıcaklık görüntüleri için türbülötörün ortasındaki 4 bölmenin görüntüsü alınmıştır. Şekil 5'de tüm türbülötör düzenlemeleri için Re=10000'de hız alanları (a) ve sıcaklık

dağılımları (b) verilmiştir. Hız alanlarından (Şekil 5a), türbülator düzenlemesinin akış yapısını oldukça etkilediği görülmektedir. Bölmelerin sıralı dizilişi ile elde edilen türbülator düzenlemelerinde (Kanal 2, Kanal 4 ve Kanal 8) akışın salınımlı bir şekilde kanal yüzeylerine doğru yönlendiği gözlenmektedir. Bu kanallarda, kanal yüzeylerine yakın akışkan tabakasının hızı artmıştır. Türbülatorü oluşturan bölmelerden önce kısa, bölmelerden sonra ise daha uzun durgun akışkan bölgeleri oluşmuştur. Bölmelerin kademeli olarak yerleştirildiği türbülator düzenlemelerinde (Kanal 3, Kanal 5, Kanal 6 ve Kanal 7) hız alanları birbirlerine yakın elde edilmiş ve akıştaki salınımların azaldığı gözlenmiştir. Bu kanal yapılarında, kademeli yerleşim nedeniyle bölmelerden sonra oluşan durgun akışkan bölgesi küçülmüştür. Ayrıca eğik bölmelerin kademeli yerleşiminde (Kanal 5 ve Kanal 7) türbülator etrafındaki akışın kademeli dik bölmelere (Kanal 3 ve Kanal 6) göre daha ince olduğu ve akış salınımlarının azaldığı görülmüştür. Kanal akışlarında hız alanlarında meydana gelen değişimler, kanal yüzey sıcaklıklarını etkilemektedir. Akıştaki salınımların artması kanal yüzeyinde oluşan sınır tabakanın bozulmasına ve ısıl direncin azalmasına yardımcı olmaktadır. Dolayısı ile Kanal 2, Kanal 4 ve Kanal 8 durumunda kanal yüzey sıcaklıkları diğer kanal yapılarına göre daha düşük elde edilmiştir (Şekil 5b).

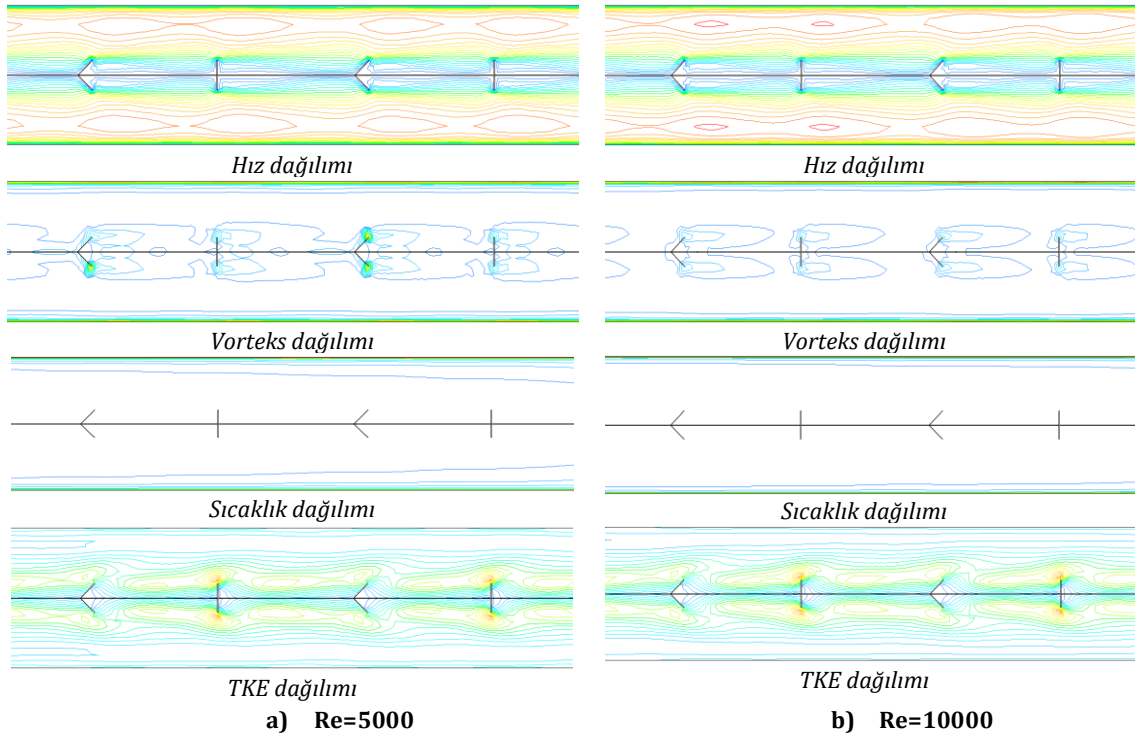


Şekil 6. Re=10000'de Farklı Türbülatorler İçin TKE Ve Vorteks Dağılımları (TKE And Vortex Distributions For Different Turbulators At Re=10000)

Şekil 6'da tüm kanal yapıları için Re=10000'de türbülans kinetik enerji (TKE) dağılımları (a) ve vorteks alanları (b) gösterilmiştir. Şekil 6a'dan, TKE dağılımlarının türbülator düzenlemelerinden etkilendiği açıkça gözlenmiştir. Kanal 2 durumunda TKE etkilerinin en fazla olduğu, bunu sırasıyla Kanal 4 ve Kanal 8 durumlarının takip ettiği belirlenmiştir. Kanal 5 durumunda TKE etkileri en az olurken, Kanal 6 ve Kanal 7 durumlarında ise bu etkilerin

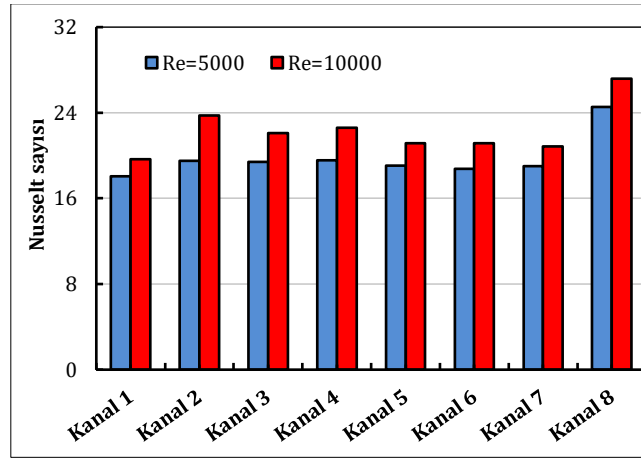
birbirlerine yakın olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5a'da sıralı düzenlemeye sahip kanallarda (Kanal 2, Kanal 4 ve Kanal 8) görülen hız dağılımlarındaki dalgalanmaların türbülans etkilerini artırdığı açıktır. Şekil 6b'de farklı türbülantörlerin oluşturduğu vorteks yapıları verilmiştir. Vorteks yapıları, kanal içindeki akış döngülerini artıran ve akış karışımını iyileştiren yapılardır. Kanal içerisine eklenen türbülantörler, TKE ve vorteks yapılarını artırmayı hedefler. Tüm kanal durumları için bölmelerin etrafında akış yönünde uzunlamasına vorteks yapılarının şekillendiği görülmektedir. Kanal 2, Kanal 3, Kanal 6 ve Kanal 8 durumlarında bu yapıların daha büyük olduğu, Kanal 4, Kanal 5 ve Kanal 7 durumlarında ise daha küçük olduğu gözlenmiştir.

Şekil 7'de Kanal 8 durumunda $Re=5000$ (a) ve $Re=10000$ (b) için hız, sıcaklık, TKE ve vorteks yapıları gösterilmiştir. Burada farklı kanal giriş hızlarının akış ve sıcaklık alanlarına etkileri incelenmiştir. Reynolds sayısının artması ile artan momentum etkileri nedeniyle akıştaki salınımların arttığı ve kanal yüzeylerine yakın çekirdek bölgelerinin oluştuğu gözlenmiştir. Düşük Reynolds sayısında bölmelere yakın vorteks yapılarının oluştuğu ve bu yapıların diğer bölme kadar uzandığı görülmüştür. Artan Reynolds sayısında ise bölmelerin etrafındaki vorteks yapılarının kısaldığı ve kanal yüzeylerine yakın vorteks çizgilerinin azaldığı tespit edilmiştir. Reynolds sayısının artması ile kanal yüzeylerindeki sıcaklık gradyanının azaldığı ve türbülans kinetik enerjinin arttığı görülmüştür.



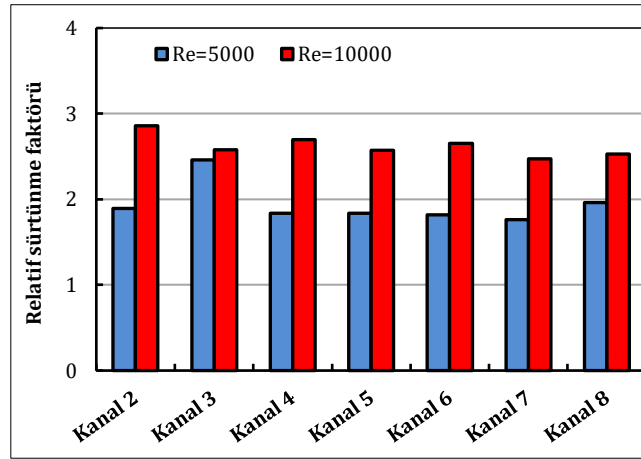
Şekil 7. Kanal 8 İçin Farklı Re'de Hız, Sıcaklık, Vorteks Ve TKE Alanları (Velocity, Temperature, Vorticity, And TKE Fields İn Different Re For Channel 8)

Şekil 8, farklı türbülantörlere sahip kanallarda $Re=5000$ ve $Re=10000$ için elde edilen Nusselt sayılarını göstermektedir. Ayrıca sonuçlar türbülantörsüz düz kanal akışı ile karşılaştırılmıştır. Tüm kanal yapılarında Reynolds sayısının artması ile Nusselt sayısı artmıştır. En yüksek Nusselt sayısı $Re=10000$ 'de Kanal 8 durumunda yaklaşık $Nu=27,17$ olarak bulunmuştur. Bunu yaklaşık $Nu=23,73$ olarak Kanal 2 durumu takip etmiştir. Kanal 3 ve Kanal 4 durumunda elde edilen Nusselt sayıları birbirlerine yakın değerdedir. Yine Kanal 5 ve Kanal 6 durumunda da benzer ısı transferi sağlanmıştır. Tüm türbülantörlü kanal yapılarında elde edilen Nusselt sayılarının düz kanala göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Kanal içine eklenen türbülantörler, düz kanala göre ısı transferini $Re=10000$ 'de yaklaşık 1,38 kat iyileştirmiştir.



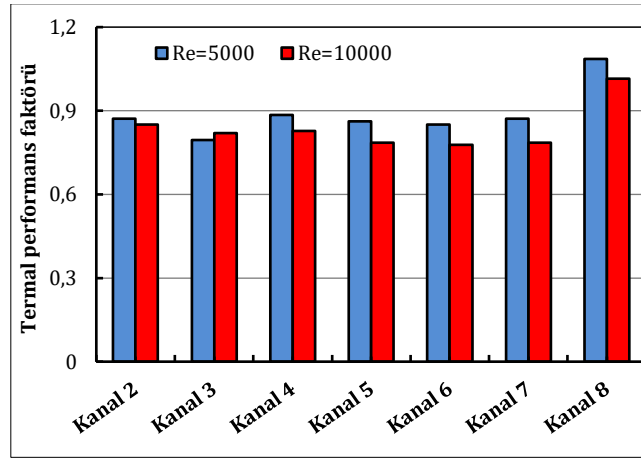
Şekil 8. Farklı Kanal Yapıları İçin Nusselt Sayısının Değişimi (Variation Of Nusselt Number For Different Channel Structures)

Şekil 9, farklı türbülator yapılarına sahip kanallarda Re=5000 ve Re=10000 için elde edilen relatif sürtünme faktörünü vermektedir. Tüm kanal yapılarında elde edilen relatif sürtünme faktörlerinin Reynolds sayısı ile arttığı gözlenmiştir. Kanal 3 durumunda, her iki Reynolds sayısında elde edilen relatif sürtünme faktörleri arasındaki farkın azaldığı tespit edilmiştir. Tüm türbülator tasarımlarında, bölme yükseklikleri birbirlerine eşittir, dolayısıyla dik açıda yerleştirilen bölmelerin uzunluğu açılı yerleştirilen bölmelerin uzunluğundan daha düşüktür. Dolayısıyla Kanal 3'te kullanılan türbülatorde bölmelerin kademeli yerleşimi, bölmeler arasındaki mesafenin fazla olmasına neden olmuştur. Ayrıca Kanal 3'te bölme uzunluğu açılı bölmelerden daha küçüktür. O nedenle akışta oluşan direnç diğer bölmelere göre daha azdır. Bu durum, relatif sürtünme faktörünün Reynolds sayılarından daha az etkilenmesine neden olduğu şeklinde yorumlanabilir. Re=5000'de ise Kanal 4 ve Kanal 5 durumunda yaklaşık benzer relatif sürtünme faktörü elde edilmiştir. En yüksek relatif sürtünme faktörü Re=10000'de ve Kanal 2 durumunda yaklaşık $f_{rel}=2,86$ olarak elde edilmiştir. En düşük relatif sürtünme faktörü Re=5000'de ve Kanal 7 durumunda yaklaşık $f_{rel}=1,76$ olarak bulunmuştur.



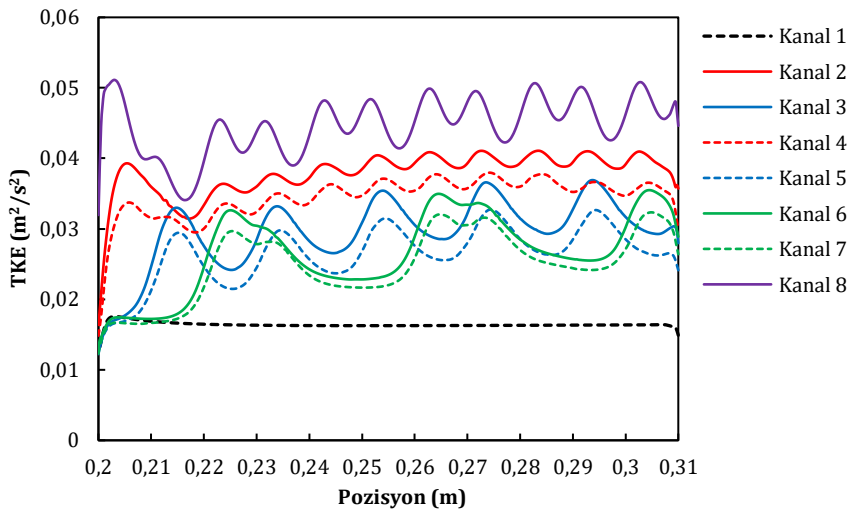
Şekil 9. Farklı Kanal Yapıları İçin Relatif Sürtünme Faktörünün Değişimi (Variation Of Relative Friction Factor For Different Channel Structures)

Şekil 10, farklı kanal yapılarında Re=5000 ve Re=10000 için hesaplanan TFP değerlerini göstermektedir. Tüm kanal yapılarında elde edilen performans faktörlerinin Kanal 3 durumu hariç, Re=5000 değerinde daha yüksek, Re=10000 değerinde ise daha düşük olduğu görülmektedir. Yüksek Reynolds sayısında TPF değerinin azalmasının nedeni sürtünme faktöründeki artışın Nusselt sayısındaki artıştan daha yüksek olmasıdır. Ancak Kanal 3 durumunda ısı transferindeki artışın sürtünme faktöründeki artıştan daha yüksek olması nedeniyle Re=10000'de THP, Re=5000'den daha yüksek bulunmuştur. Her iki Reynolds sayısında da en yüksek TPF Kanal 8 durumunda sağlanmıştır. Her iki Reynolds sayısında da Kanal 5 ve Kanal 6 durumunda birbirine yakın TPF değerleri bulunmuştur. En yüksek TPF değeri Re=5000'de ve Kanal 8 durumunda yaklaşık $TFP=1,08$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 10. Farklı Kanal Yapıları İçin TPF Değişimi (Variation Of TPF For Different Channel Structures)

Şekil 11, farklı kanal yapılarında $Re=10000$ için yerel TKE (m^2/s^2) değişimini göstermektedir. Türbülantörlü kanallarda yerel TKE değerleri sinüzoidal eğriye benzeyen bir değişim sergilemektedir. Kanal yapıları içerisinde en yüksek yerel TKE değeri Kanal 8 durumunda elde edilmiştir. Kanal 2 ile Kanal 4 durumlarında, Kanal 3 ile Kanal 5 durumlarında ve Kanal 6 ile Kanal 7 durumlarında TKE eğrilerinin yapısının birbirlerine oldukça benzer olduğu gözlenmiştir. Türbülantör üzerindeki bölmelerin yerleşiminde benzer düzenlemelerin benzer etki gösterdiği tespit edilmiştir. Bölmelerin dik yerleşiminde eğimli yerleşime göre daha yüksek TKE elde edildiği gözlenmiştir.



Şekil 11. Farklı Kanal Yapıları İçin Yerel TKE Değişimi (Variation Of Local TKE For Different Channel Structures)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, dairesel bir kanal içine eklenen farklı türbülantör yapılarının akış ve ısı transferine etkileri sayısal olarak iki farklı Reynolds sayısı için düz kanal ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Farklı türbülantörlerin akış ve ısı transfer davranışını gözlemlemek için hız, sıcaklık, vorteks ve TKE dağılımları elde edilmiştir. Çalışma sonucunda farklı türbülantör tasarımları için Nusselt sayısı, sürtünme faktörü ve termal performans faktörü hesaplanmıştır.

Yapılan çalışma, kanal içerisine ilave edilen türbülantörlerde bölmelerin sıralı ve kademeli yerleşiminin ve bölme açısının akış ve ısı transferini etkilediğini göstermiştir. Dik bölmeli ve sıralı düzenlemeye sahip kanal durumunda daha fazla ısı transferi ve TKE elde edilmiştir. Ancak kanal içindeki sürtünmeler de bir miktar artmıştır. Eğik bölmeli ve kademeli düzenlemeyi içeren kanal durumlarında daha az ısı transferi ve TKE elde edilmiş ancak kanal içindeki sürtünmeler azalmıştır. Bölmelerin sıralı yerleşimi ile dik ve eğimli bölmelerin birlikte kullanımı ısı transferini artırmıştır.

Reynolds sayısının artması ile Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü değerlerinde artış görülmüştür. Tüm türbülantör yapılarında elde edilen Nusselt sayısının ve sürtünme faktörünün düz kanala göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. Türbülantörler ısı transferini, $Re=10000$ 'de türbülantörsüz kanala göre en fazla yaklaşık 1,38 kat iyileştirmiştir. En yüksek Nusselt sayısı, $Re=10000$ 'de ve Kanal 8 durumunda yaklaşık $Nu=27,17$ olarak elde edilmiştir. Türbülantörler, sürtünme faktörünü $Re=10000$ 'de türbülantörsüz kanala göre en fazla yaklaşık 2,86 kat

artırmıştır. Her iki Reynolds sayısında da en yüksek TPF Kanal 8 durumunda elde edilmiştir. En yüksek TPF değeri $Re=5000$ 'de ve Kanal 8 durumunda yaklaşık $TPF=1,08$ olarak bulunmuştur. Kanal yapıları içerisinde en yüksek yerel TKE değeri Kanal 8 durumunda elde edilmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Ajarostaghi, S.S.M., Zaboli, M., Javadi, H., Badenes, B., Urchueguia, J.F., 2022. A Review of Recent Passive Heat Transfer Enhancement Methods. *Energies*, 15, 986. <https://doi.org/10.3390/en15030986>.
- Ajeel, R.K., Sopian, K., Zulkifli, R., 2021a. Thermal-Hydraulic Performance and Design Parameters in a Curved-Corrugated Channel with L-Shaped Baffles and Nanofluid. *Journal of Energy Storage*, 34, 101996.
- Ajeel, R.K., Sopian, K., Zulkifli, R., 2021b. A Novel Curved-Corrugated Channel Model: Thermal-Hydraulic Performance and Design Parameters with Nanofluid. *International Communications in Heat Mass Transfer*, 120, 105037.
- Akçay, S. 2021. Investigation of Thermo-Hydraulic Performance of Nanofluids in a Zigzag Channel with Baffles. *Adiyaman University Engineering Sciences Journal*, 15, 525-534.
- Akçay, S., 2022a. Numerical Analysis of Heat Transfer Improvement for Pulsating Flow in a Periodic Corrugated Channel with Discrete V-Type Winglets. *International Communications in Heat Mass Transfer*, 134, 105991.
- Akçay, S., 2022b. İçerisinde Dik Bölmeler Bulunan Trapez bir Kanalda Bölme Yüksekliğinin Akış ve Isı Transferine Etkisinin İncelenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11 (2), 479-490.
- Akçay, S., 2023a. Numerical Analysis of Hydraulic and Thermal Performance of Al₂O₃-Water Nanofluid in a Zigzag Channel with Central Winglets. *Gazi University Journal of Science*, 36 (1), 383-397.
- Akçay, S., 2023b. Numerical Study of Turbulent Heat Transfer Process in Different Wavy Channels with Solid and Perforated Baffles. *Heat Transfer Research*, 54 (18), 53-82.
- Akçay, S., Akdag, U., 2018. Parametric Investigation of Effect on Heat Transfer of Pulsating Flow of Nanofluids in a Tube Using Circular Rings. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24 (4), 597-604.
- Akdag, U., Akçay, S., Demiral, D., 2014. Heat Transfer Enhancement with Laminar Pulsating Nanofluid Flow in a Wavy Channel. *International Communications in Heat Mass Transfer*, 59, 17-23.
- Alam, T., Saini, R.P., Saini, J.S., 2014. Use of Turbulators for Heat Transfer Augmentation in an Air Duct—A Review. *Renewable Energy*, 62, 689-715.
- Alfella, M.A., Ahmed, H.E., Jehad, M.G., Farhan, A.A., 2022. The Hydrothermal Performance Enhancement Techniques of Corrugated Channels: A Review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147, 10177-10206.
- ANSYS Inc., 2010. ANSYS Fluent User Guide & Theory Guide- Release 6.3, USA.
- Choudhary, T., Sahu, M.K., Shende, V., Kumar, A., 2022. Computational Analysis of a Heat Transfer Characteristic of a Wavy and Corrugated Channel. *Material Today: Proceedings*, 56, 263-273.
- El Habet, M.A., Ahmed, S.A., Saleh, M.A., 2021. Thermal/Hydraulic Characteristics of a Rectangular Channel with Inline/Staggered Perforated Baffles. *International Communications in Heat Mass Transfer*, 128, 105591.
- El Habet, M.A., Ahmed, S.A., Saleh, M.A., 2022. The Effect of Using Staggered and Partially Tilted Perforated Baffles on Heat Transfer and Flow Characteristics in a Rectangular Channel. *International Journal of Thermal Sciences*, 174, 107422.
- Feng, C-N., Liang, C-H., Li, Z-X., 2022. Friction Factor and Heat Transfer Evaluation of Cross-Corrugated Triangular Flow Channels with Trapezoidal Baffles. *Energy & Buildings*, 257, 111816.
- Hassani, S.M., Khoshvaght-Aliabadi, M., Feizabadi, A., Rehman, S., Alimoradi, A., 2022. Experimental and Numerical Analysis of Curved Turbulators in Different Arrangements Through a Rectangular Channel. *Experimental Heat Transfer*, 35 (1), 22-44.
- Inan, A.T., Korten, H., Kartal, M.K., 2022. Experimental Comparison and CFD Analysis of Conventional Shell and Tube Heat Exchanger with New Design Geometry at Different Baffle Intervals. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, DOI:10.1080/10407782.2022.2101801.
- Khan, M., Shuja, S.Z., Yilbas, B.S., Al-Qahtani, H., 2022. A Case Study on Innovative Design and Assessment of a Microchannel Heat Sink with Various Turbulators Arrangements. *Case Studies in Thermal Engineering*, 31, 101816.
- Krishnan, E.N., Ramin, H., Guruabalan, A., Simonson, C.J., 2021. Experimental Investigation on Thermo-Hydraulic Performance of Triangular Cross-Corrugated Flow Passages. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 122, 105160.
- Kumar, R., Kumar, A., Chauhan, R., Sethi, M., 2016. Heat Transfer Enhancement in Solar Air Channel with Broken Multiple V-Type Baffle. *Case Studies Thermal Engineering*, 8, 187-197.
- Kurtulmus, N., Sahin, B., 2019. A Review of Hydrodynamics and Heat Transfer Through Corrugated Channels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 108, 104307.
- Li, Z-X., Sung, S-Q., Wang, C., Liang, C-H., Zeng, S., Zhong, T., Hud, W-P., Feng, C-N., 2022. The Effect of Trapezoidal Baffles on Heat and Flow Characteristics of a Cross-Corrugated Triangular Duct. *Case Studies in Thermal Engineering*, 33, 101903.
- Mehta, S.K., Pati, S., Ahmed, S., Bhattacharyya, P., Bordoloi, J.J., 2022. Analysis of Thermo-Hydraulic and Entropy Generation Characteristics for Flow Through Ribbed-Wavy Channel. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 32 (5), 1618-1642.
- Menni, Y., A.J. Chamkha, M. Ghazvini, M.H. Ahmadi, H. Ameur, A. Issakhov, and M. Inc, Enhancement of the Turbulent Convective Heat Transfer in Channels Through the Baffling Technique and Oil/Multiwalled Carbon Nanotube Nanofluids. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2021. 79(4): p. 311-351.

- Menni, Y., M. Ghazvini, H. Ameer, M.H. Ahmadi, M. Sharifpur, M. Sadeghzadeh, 2020. Numerical Calculations of the Thermal-Aerodynamic Characteristics in a Solar Duct with Multiple V-Baffles. *Engineering Application of Computational Fluid Mechanics*, 14(1), 1173-1197.
- Modi, J. A., Rathod, M. K., 2019. Comparative Study of Heat Transfer Enhancement and Pressure Drop for Fin-and-Circular Tube Compact Heat Exchangers with Sinusoidal Wavy and Elliptical Curved Rectangular Winglet Vortex Generator. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 141, 310-326.
- Mohammed, H.A., Al-Shamani, A.N., Sheriff, J.M., 2012. Thermal and Hydraulic Characteristics of Turbulent Nanofluids Flow in a Rib-Groove Channel. *International Communications in Heat Mass Transfer*, 39, 1584-1594.
- Nakhchi, M.E., Hatami, M., Rahmati, M., 2021. Experimental Investigation of Performance Improvement of Double-Pipe Heat Exchangers with Novel Perforated Elliptic Turbulators. *International Journal of Thermal Science*, 168, 107057.
- Promvong, P., Promthaisong, P., Skullong, S., 2020. Experimental and Numerical Heat Transfer Study of Turbulent Tube Flow Through Discrete V-Winglets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 151, 119351.
- Promvong, P., Tamna, S., Pimsarn, M., Thianpong, C., 2015. Thermal Characterization in a Circular Tube Fitted with Inclined Horseshoe Baffles. *Applied Thermal Engineering*, 75, 1147-1155.
- Sahel, D., H. Ameer, R. Benzeguir, Y. Kamla, Enhancement of Heat Transfer in a Rectangular Channel with Perforated Baffles. *Applied Thermal Engineering*, 2016. 101: p. 156-164.
- Salhi, J.E., Zarrouk, T., Hmidi, N., Salhi, M., Salhi, N., Chennaif, M., 2022. Three-Dimensional Numerical Analysis of the Impact of the Orientation of Partially Inclined Baffles on the Combined Mass and Heat Transfer by a Turbulent Convective Airflow. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40095-022-00505-5>.
- Salhi, J.E., Zarrouk, T., Salhi, N., 2021. Numerical Study of the Thermo-Energy of a Tubular Heat Exchanger with Longitudinal Baffles. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7306-7313.
- Skullong, S., Promvong, P., Thianpong, C., Pimsarn, M., 2016. Thermal Performance in Solar Air Heater Channel with Combined Wavy-Groove and Perforated-Delta Wing Vortex Generators. *Applied Thermal Engineering*, 100, 611-620.
- Sriromreun, P., Thianpong, C., Promvong, P., 2012. Experimental and Numerical Study on Heat Transfer Enhancement in a Channel with Z-Shaped Baffles. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(7), 945-952.
- Sun, Z., Zhang, K., Li, W., Chen, Q., Zheng, N., 2020. Investigations of the Turbulent Thermal-Hydraulic Performance in Circular Heat Exchanger Tubes with Multiple Rectangular Winglet Vortex Generators. *Applied Thermal Engineering*, 168, 114838.
- Turgut, O., Kızıllırmak, E., 2015. Effects of Reynolds Number, Baffle Angle, and Baffle Distance on 3-d Turbulent Flow and Heat Transfer in a Circular Pipe. *Thermal Science*, 19(5), 1633-1648.
- Zhang, L., Che, D., 2011. Turbulence Models for Fluid Flow and Heat Transfer Between Cross Corrugated Plates. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 60, 410-440.
- Zontul, H., Hamzah, H., Kurtulmuş, N., Şahin, B., 2021. Investigation of Convective Heat Transfer and Flow Hydrodynamics in Rectangular Grooved Channels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 126, 105366.



SEDIMENTATION ANALYSIS ON SEYHAN DAM RESERVOIR USING LONG TERM BATHYMETRY DATA

Mehmet Ali AKGÜL¹, Şerife Pınar GÜVEL^{2*}, Hakan AKSU³

^{1,2} General Directorate of State Hydraulic Works, 6th Regional Directorate, Information Technologies Department, Adana, Türkiye

³ Özdemir Bayraktar Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Meteorological Engineering, Samsun University, Samsun, Türkiye

Keywords

*Seyhan Dam,
Seyhan River Basin,
Bathymetric Survey,
Reservoir Operation*

Abstract

In this study, sedimentation in the Seyhan Dam reservoir was investigated by analyzing a long-term bathymetric survey dataset. The focus was on understanding how reservoir capacity changes impact reservoir operation rules. The findings revealed that sedimentation from the main branch of the Seyhan River has largely stopped since the construction of the Çatalan Dam, but sedimentation from the Çakıt branch continues. Furthermore, the study observed changes in the upper basin between 1990 and 2018 based on the CORINE Land Cover (CLC) dataset. The forest area increased from 23.71% to 24.36%, and water bodies expanded from 0.3% to 0.9%. This increase in forest and water bodies contributed to a reduction in sediment flow into the Seyhan Dam reservoir. The researchers used regression analysis and found a high correlation ($R^2=0.96$) between water storage capacity changes and time (in years) at a 67.5-meter water level in the Seyhan Dam Reservoir. Overall, the study's results suggest that the decrease in sediment entering from the main branch of the Seyhan River has significantly improved the sedimentation issue.

UZUN DÖNEM BATİMETRİ VERİLERİ KULLANILARAK SEYHAN BARAJ REZERVUARINDA SEDİMENTASYON ANALİZİ

Anahtar Kelimeler

*Seyhan Barajı,
Seyhan Nehir Havzası,
Batimetrik Ölçüm,
Baraj İşletmesi.*

Öz

Bu çalışmada Seyhan Barajı rezervuarındaki sedimantasyon durumu uzun vadeli bir batimetrik ölçüm veri seti analiz edilerek araştırılmıştır. Çalışmanın odak noktası, rezervuar kapasitesi değişikliklerinin rezervuar işletme kurallarını nasıl etkilediğini anlamaktır. Bulgular, Seyhan Nehri'nin ana kolundaki sediment birikiminin Çatalan Barajı'nın inşasından bu yana büyük ölçüde durduğunu, ancak Çakıt kolundaki sediment birikiminin devam ettiğini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca çalışmada, CORINE Arazi Örtüsü (CLC) veri setine dayanılarak 1990 ile 2018 yılları arasında üst havzadaki değişiklikleri gözlemlenmiştir. Orman alanı %23,71'den %24,36'ya, su kütleleri ise %0,3'ten %0,9'a yükselmiştir. Orman ve su kütlelerindeki bu artış, Seyhan Barajı rezervuarına sediment akışında azalmaya katkıda bulunmuştur. Araştırmacılar regresyon analizini kullanarak Seyhan Baraj Gölü'ndeki 67,5 metre su seviyesinde su depolama kapasitesi değişiklikleri ile zaman (yıl) arasında yüksek bir korelasyon ($R^2=0.96$) bulmuştur. Genel olarak bu çalışmanın sonuçları, Seyhan Nehri'nin ana kolundan giren sediment miktarının azalmasının, sedimantasyon sorununu önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir.

Alıntı / Cite

Akgül, M.A., Güvel, Ş.P., Aksu, H., (2024). Sedimentation Analysis on Seyhan Dam Reservoir Using Long Term Bathymetry Data, Journal of Engineering Sciences and Design, 12(1), 16-33.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M.A. Akgül, 0000-0002-5517-9576
Ş.P. Güvel, 0000-0002-3175-5938
H. Aksu, 0000-0003-4686-7446

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	01.09.2023
Revizyon Tarihi / Revision Date	04.12.2023
Kabul Tarihi / Accepted Date	24.12.2023
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: spinar.guvel@dsi.gov.tr, +90-322-459-0590

SEDIMENTATION ANALYSIS ON SEYHAN DAM RESERVOIR USING LONG TERM BATHYMETRY DATA

Mehmet Ali AKGÜL¹, Şerife Pınar GÜVEL^{2†}, Hakan AKSU³

^{1,2} General Directorate of State Hydraulic Works, 6th Regional Directorate, Information Technologies Department, Adana, Türkiye

³ Özdemir Bayraktar Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Meteorological Engineering, Samsun University, Samsun, Türkiye

Highlights

- Investigation of reservoir sedimentation using long-term bathymetry data
- Investigation of impact of reservoir sedimentation on operation rules
- Estimation of reservoir capacity changes in future planning works

Purpose and Scope

In this study, a long-term bathymetric research dataset including 2019 bathymetry measurements were used to evaluate the sedimentation in the Seyhan Dam reservoir. The emphasis was on understanding how changes in reservoir capacity affect reservoir operation rules.

Design/methodology/approach

GIS is a powerful tool in this study for evaluating and maintaining the reservoir's bathymetry data, allowing for more effective and informed reservoir management and sedimentation analysis decisions.

Findings

This study examined the sedimentation in the Seyhan Dam reservoir using the long term bathymetric survey dataset within the scope of reservoir capacity changes and its impacts on reservoir operation rules. The results of this study will contribute operation-maintenance works of Seyhan Dam in terms of cost and labour savings.

Originality

An investigation of the impact of reservoir sedimentation on operation rules was conducted using 2019 bathymetry survey data of the Seyhan Dam reservoir.

[†] Corresponding author: spinar.guvel@dsi.gov.tr, +90-322-459-0590

1. Introduction

Over the past 4,500 years, dams have been constructed with the primary goal of storing excess water from rainy seasons to be utilized during dry periods, maintaining the fundamental purposes of reservoirs intact (Estigoni *et al.*, 2014). Among the critical factors influencing dam operation rules is the impact of sedimentation on reservoir water storage capacity. Monitoring the reduction in water storage capacity is crucial to ensure the fulfillment of water demands. For this purpose, bathymetry mapping has been employed to assess the current storage capacity in reservoirs and to study the effects of sedimentation on their capacity.

Diaconu *et al.* (2019) emphasized that determining the bathymetric properties of rivers, lakes, and reservoirs enables the identification of areas experiencing sedimentation or erosion. Over the years, bathymetric surveys and mapping have been extensively conducted to gather information about the bottom surfaces of reservoirs (Szatten *et al.*, 2018; Sandoval-Eraza *et al.*, 2018; Oladosu *et al.*, 2019; Lopes and de Araújo, 2019), oceans, and sea floors (Weatherall *et al.*, 2015), as well as rivers (Bandini *et al.*, 2018; Legleiter *et al.*, 2018), lakes (Gopakumar and Takara, 2009; Cross and Moore, 2014; Maina *et al.*, 2019), coastal areas (Salameh *et al.*, 2019), and other water bodies. These efforts aim to investigate water depths, changes in underwater topography, sediment accumulation, and potential environmental impacts. Traditional manual measurement techniques were initially used in these investigations. However, with the progress and advancements in measurement technologies for bathymetry mapping, echo sounders have been widely employed in bathymetric surveys for many years. Recently, remote sensing technology has also emerged as a valuable tool in bathymetry mapping alongside conventional techniques (Poliyapram *et al.*, 2017; Akgül *et al.*, 2018; Casal *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2022). For instance, Saito *et al.* (2021) studied sedimentation rates in a reservoir section in Viçosa, Brazil, for the years 2010, 2012, and 2016 using single-beam bathymetric survey techniques. In a separate study, Güvel *et al.* (2021a) investigated the feasibility of using remote sensing data to determine bathymetric water depths in the Berdan Dam reservoir.

Sedimentation is regarded as one of the most significant challenges for river ecosystems (Obialor *et al.*, 2019). Understanding the impact of reservoir sedimentation on dam functions is crucial to safeguarding the dam's lifespan and operational processes. Mueller *et al.* (2010) emphasized that erosion and sedimentation must be taken into account when analyzing and implementing long-term strategies for land use planning and water management. The study of sedimentation in dam reservoirs has become a prominent research topic due to its adverse effects on the original capacity of the dam and the rules governing reservoir operation. The trapping of sediment by a dam reservoir leads to problems of sediment accumulation and a loss of water storage capacity in the reservoir. Estimating the sedimentation rate and the useful operation period of a reservoir can be achieved using the trap efficiency approach (Garg and Jothiprakash, 2008). However, there have been some limitations in using trap efficiency to predict reservoir sedimentation (Mulu and Dwarakish, 2015). Given that stored water volume serves various purposes such as water supply, energy production, and irrigation, monitoring temporal and spatial changes in a reservoir becomes essential for effective operational planning. Regular monitoring of reservoirs enables the assessment of the amount and distribution of sediment trapped within the reservoir, as well as the decrease in storage capacity. Determining sediment distribution is crucial for analyzing its effects on hydraulic structures, ensuring dam safety, and adhering to reservoir operation rules. Accumulation of sediment near water intake structures and changes in the bottom topography can have adverse effects on operational efficiency. Schleiss *et al.* (2016) highlighted the significance of considering reservoir sedimentation during the early planning phases of dam and reservoir design. By addressing sedimentation concerns proactively, better design strategies can be implemented to mitigate its impacts on reservoirs and their functions.

Numerous bathymetric surveys conducted worldwide have identified significant decreases in reservoir storage capacities (Rowan *et al.*, 1995; Güvel *et al.*, 2017; Darama *et al.*, 2019; Shiferaw and Abebe, 2020; Ugwu *et al.*, 2021; Güvel, 2021; Güvel *et al.*, 2021b). Moreover, in recent years, researchers have increasingly utilized remote sensing data for bathymetry mapping and sedimentation assessment (Jagannathan and Krishnaveni, 2021; Skariah and Suriyakala, 2021). For instance, Taruya and Fuji (1997) conducted a study on reservoir sedimentation in irrigation dams in Japan, analyzing field data from 53 high dams. Estigoni *et al.* (2014) focused on the Lobo Reservoir in Brazil to investigate the impact of using different techniques to calculate water volume and reservoir sedimentation. In Australia, Cooper *et al.* (2018) explored the useful life of the Burdekin Falls Dam and discovered that over 24 years, 65 million m³ of sediment had accumulated in the reservoir. Sun *et al.* (2022) examined reservoir sedimentation in the Lancang reservoirs using empirical models and theoretical methods. They found that by 2019, the storage capacity loss in the Manwan and Jinghong reservoirs reached 51.4% and 1.54%, respectively. In Indonesia, Mardwiono *et al.* (2022) conducted a study on the sediment management of the Sengguruh Reservoir and Sutami Reservoirs. They evaluated that the storage capacity of the Sengguruh Reservoir could increase by 9.45% through flushing and dredging activities, along with the construction of a storage pond and an additional intake guide wall. Additionally, they assessed that dredging efforts at a volume of 400,000 m³/year could enable the utilization of the Sutami Reservoir for the next 135 years. Overall, these studies

emphasize the importance of monitoring reservoir sedimentation and employing various techniques to assess and manage sediment accumulation for the effective operation and longevity of reservoirs (Güvel and Yurtal, 2020; Özşahin, 2023).

Estimating sediment yield is crucial for research on reservoir sedimentation (Kothyari and Jain, 1997). Sediment yield variations in river basins can be influenced by natural and/or human-induced factors. In recent years, numerous methods have been developed and utilized for research purposes in sediment yield estimation (de Araújo and Knight, 2005; Jain *et al.*, 2010; Vemu and Pinnamaneni, 2012, Dutta, 2016; Colman *et al.*, 2018; Chalise *et al.*, 2019; Abdul Razad *et al.*, 2020; Patil *et al.*, 2021; Ayele *et al.*, 2021; Billi and Spalevic, 2022). These methods play a significant role in understanding and quantifying the sediment load in river basins, which is essential for managing and planning reservoirs and other water-related projects.

The Seyhan River Basin is located between 36° 30' and 39° 15' northern latitudes and 34° 45' and 37° 00' eastern longitudes in the southern part of Türkiye. The Ceyhan River Basin is to the east of the basin, the Konya and Berdan Basins are to the west, and the Develi Basin is to the north. It extends to the Mediterranean sea in the south. Seyhan Dam sediment yield is stated as 126.82 m³/km²/year (DSİ, 2014). The Seyhan River basin stretches from high-elevation mountainous regions to the Lower Seyhan Plain, which offers fertile lands vital for agricultural irrigation and plays a significant role in agricultural production in Türkiye. Covering a vast area, the Seyhan River Basin spans 22,035 km². Reports from previous years (IECO, 1966; DSİ, 2014) have elaborated on water resources planning and development studies in the Seyhan River Basin. To address the region's irrigation, energy production, and flood protection needs, the construction of the Seyhan Dam began in 1953 on the Seyhan River in Adana Province, and the dam became operational in 1956. The Seyhan Dam's drainage area encompasses 19,254 km². However, climate change projections indicate that, until 2100, many parts of the Seyhan River Basin will confront water scarcity (Selek *et al.*, 2016). This highlights the importance of prudent water resource management and the implementation of sustainable practices to address the potential challenges posed by climate change in the basin.

Over the years, the investigation of sedimentation and changes in the bottom profile of the Seyhan Dam reservoir since its operation has been a subject of interest for numerous researchers. Various techniques have been utilized to explore these aspects (İlter and Ağırlioğlu, 1987; Göğüş and Adıgüzel, 1991; Kırkgöz *et al.*, 1992; Kırkgöz *et al.*, 1993; Fakioğlu, 2005; Güvel, 2007; Güvel and Yurtal, 2020). In particular, Güvel (2007) conducted a study in which the sediment accumulation and water storage capacity loss in the Seyhan Reservoir were investigated using a GIS (Geographic Information System) environment. The research was based on bathymetry measurements taken until 2005, and sediment thickness maps were generated as part of the investigation. Such studies are crucial for understanding the long-term changes in reservoir capacity due to sedimentation, helping in the management and planning of reservoir operations.

In this study, the focus was on investigating sedimentation in the Seyhan Dam reservoir from the perspective of sustainable management, utilizing a long-term bathymetry dataset. The researchers assessed deforestation activities in the upper basin and analyzed sediment transport in the Seyhan River and its tributaries. Furthermore, they evaluated sedimentation on water structures and sediment yield in the region. The primary goal of the study was to examine sediment accumulation and the actual changes in water storage within the Seyhan Dam reservoir over the past years. To achieve this, the researchers utilized bathymetry survey data collected between 1966 and 2019, within the context of reservoir operation activities. By analyzing this comprehensive dataset, the study aimed to provide insights into the sedimentation patterns and potential impacts on water storage capacity, facilitating informed decision-making for sustainable reservoir management.

2. Material and Method

2.1. Study Area and Data

The Seyhan Dam is a multi-purpose dam with 19,254 km² drainage area and is located on the Seyhan River in Adana City, situated in the lower reaches of the Seyhan River Basin in the southern part of Türkiye (Figure 1). Seyhan Dam has the purposes of irrigation, energy production, and flood protection. (Table 1). Çatalan Dam was built and put into operation at the upstream of Seyhan Dam for drinking water supply and irrigation purposes. The study area experiences a Mediterranean climate, characterized by warm and rainy winters, as well as hot and dry summers. The Seyhan River is formed by the confluence of two streams: the Zamantı Stream, which stretches for 317 km, and the Göksu Stream, which extends for 198 km. As it descends from the Taurus Mountains towards the Mediterranean, the Seyhan River is joined by several other streams, including Eğlence, Körkün, Üçürge, and Çakıt, which contribute to its flow.

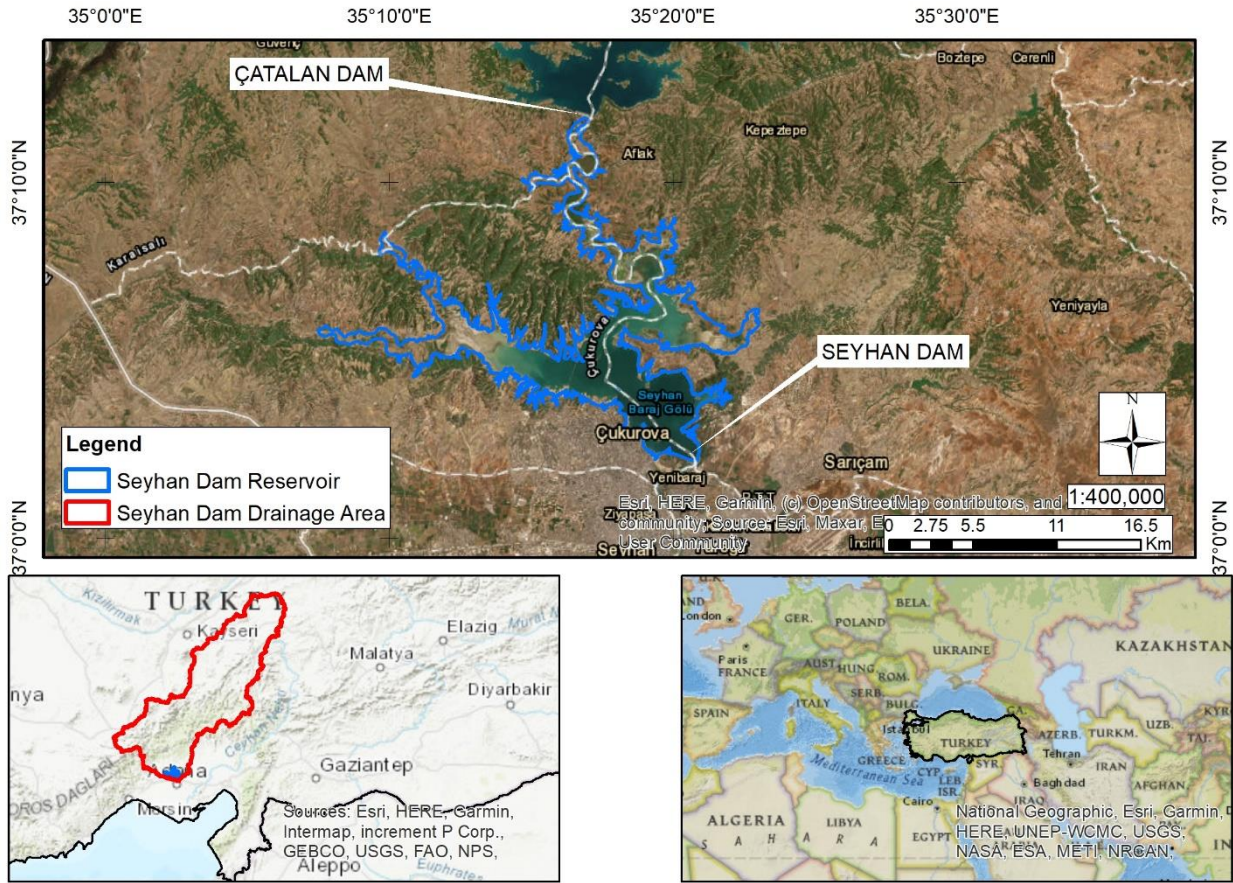


Figure 1. The Location Of Seyhan Dam in Türkiye

Table 1. Characteristics Of Seyhan Dam (DSİ, 2014)

CHARACTERISTICS	DATA
River basin	Seyhan
Purpose	Irrigation-Energy production-Flood control
Drainage area	19254 km ²
Type	Earthfill
Dam crest elevation	72,70 m
Dam crest length	1949 m
Installed capacity	54 MW
Date put into operation	1956
Stage	Operational

The Çukurova Plain, with its fertile lands, plays a vital role in contributing to the economic development of the region through agricultural production. Located downstream of the Seyhan Dam, the plain benefits from the water resources managed by the dam. To support and enhance agricultural activities on the plain, the Lower Seyhan Plain Irrigation project was developed in previous years. This comprehensive project comprises four stages. The construction of the first, second, and third stages was completed in 1968, 1975, and 1984, respectively. As of 2022, the fourth stage has been put into operation, further enhancing the irrigation and drainage capabilities of the region. As the demand for water in irrigation has increased over time, rehabilitation planning studies have been initiated (DSİ, 2022). These efforts aim to optimize water usage, ensure sustainable irrigation practices, and meet the growing water needs of the agricultural sector in the region. By continuously improving and managing the irrigation and drainage systems, the authorities seek to promote efficient and sustainable agricultural development in the Lower Seyhan Plain.

The storage capacity of the Seyhan Dam reservoir has been continuously monitored, given its significant role in water resources management as a multi-purpose dam. The monitoring results have been instrumental in establishing operation rule curves, which are essential for effectively managing the reservoir's water levels and releases. Bathymetric mapping has played a crucial role in assessing the reservoir's storage capacity and sediment accumulation over time. The first bathymetric map of the Seyhan Dam reservoir was prepared in 1966, providing valuable insights into the initial state of the reservoir (Güvel, 2007). Subsequent bathymetric mapping studies were conducted at various intervals to track changes in the reservoir's bottom profile and sedimentation patterns. The most recent bathymetric mapping of the Seyhan Dam reservoir was carried out in 2019, providing up-to-date information on the reservoir's current storage capacity and sediment distribution. This continuous monitoring and mapping process has contributed to informed decision-making in reservoir management and sustainable utilization of water resources for various purposes, including irrigation, energy production, and flood protection.

The reservoir's storage capacity and sedimentation analysis are crucial for understanding and maximizing the benefits provided by the Seyhan Dam Reservoir. To achieve this, reservoir monitoring works have been carried out through bathymetric surveys. Over the years, bathymetric surveys of the Seyhan Dam Reservoir have been conducted at regular intervals to track changes in its bottom profile and sedimentation levels. The surveys were performed in the years 1966, 1971, 1976, 1980, 1986, 1991, 2005, and 2019, providing valuable data at different time points. Field investigations for bathymetric maps are typically conducted during the summer months due to favorable weather conditions. For this study, the researchers utilized the standard topographic map of the Seyhan Dam reservoir area before the construction of the dam, alongside all the bathymetric maps of the reservoir. These comprehensive datasets were used to assess and analyze the updated sedimentation status in the reservoir. By comparing the bathymetric data from different periods, the study aimed to gain insights into the sediment accumulation and changes in the reservoir's storage capacity over the years. This information is essential for effective reservoir management and planning to ensure the sustained benefits of the Seyhan Dam Reservoir.

In this study, changes in forest areas in the upper river basin of the Seyhan Dam were investigated using data from the Coordination of Information on the Environment (CORINE) Land Use Cover. Specifically, the researchers utilized CORINE Land Cover (CLC) data from multiple years, including 1990, 2000, 2006, 2012, and 2018. The CORINE Land Cover data is an essential resource for monitoring and analyzing land use and land cover changes across Europe. The data is publicly available and can be accessed from the Copernicus Land Monitoring Service website (<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>). By using the CLC data for different periods, the study aimed to understand how forest areas in the upper river basin of the Seyhan Dam have changed over the years. Such information is crucial for assessing the impacts of land use changes on the environment, especially to water resources and reservoir management in the region.

2.2. Method

Estimating reservoir capacity loss resulting from sediment deposition can be achieved through the use of bathymetric maps. Using bathymetric maps, the volume of water stored in a reservoir at each elevation is calculated in GIS environment, and the difference between the two amounts is assessed as the sediment accumulation volume. Over the years, various methods, including traditional and advanced techniques, have been employed in the bathymetry mapping of dam reservoirs. In the case of the Seyhan Dam reservoir, traditional methods were predominantly used in the past to generate bathymetric maps. However, with advancements in technology and surveying techniques, new approaches have been adopted in the most recent measurements and mapping processes. These modern methods likely offer enhanced accuracy, efficiency, and data resolution, providing more detailed insights into the sedimentation patterns and changes in the reservoir's storage capacity. By utilizing both traditional and advanced approaches in bathymetry mapping, researchers and reservoir managers can obtain a comprehensive understanding of sedimentation trends make take more informed decisions related to reservoir operation and sediment management. This combination of techniques ensures a holistic assessment of the reservoir's condition and facilitates effective planning for sustainable reservoir management.

Making bathymetric maps of the reservoir bottom topography is the most reliable way for assessing sediment deposition in dam reservoirs. Because some of the sediment entering the reservoir is moved downstream of the dam, estimating the basin sediment yield and the sediment in the dam reservoir based on sediment yield is more challenging. Bathymetry map creation, on the other hand, is an expensive engineering task. If monitoring studies are delayed, it will have an impact on the present volume elevation table and dam operation activities.

Geographic Information System (GIS) is a powerful decision support tool that is utilized for data management and analysis, streamlining the decision-making process and increasing efficiency. GIS-based approaches have been widely employed in various research fields, including science, to aid in decision-making processes (Malczewski, 2006; Gharbia *et al.*, 2016; Shaikh *et al.*, 2021; Bwambale *et al.*, 2022; Hagos *et al.*, 2022; King *et al.*, 2022). By

creating digital models of spatial and temporal changes on the Earth's surface, GIS enables the evaluation of model outputs to address problems and make informed decisions.

The use of GIS techniques allows researchers and managers to study alternative scenarios in planning and management processes, leading to significant savings in labor, time, and costs. The computer-based systems offer the capability to analyze and visualize data in a spatial context, facilitating better understanding and decision-making.

In the specific context of this study, the researchers utilized ArcGIS software to analyze bathymetric survey data of the reservoir within a GIS environment. The study's flowchart, as depicted in Figure 2, outlines the step-by-step approach taken to conduct the analysis and draw conclusions based on the GIS-based evaluations. The application of GIS in this study serves as a valuable tool in examining and managing the reservoir's bathymetry data, enabling more effective and informed decisions related to reservoir management and sedimentation analysis.

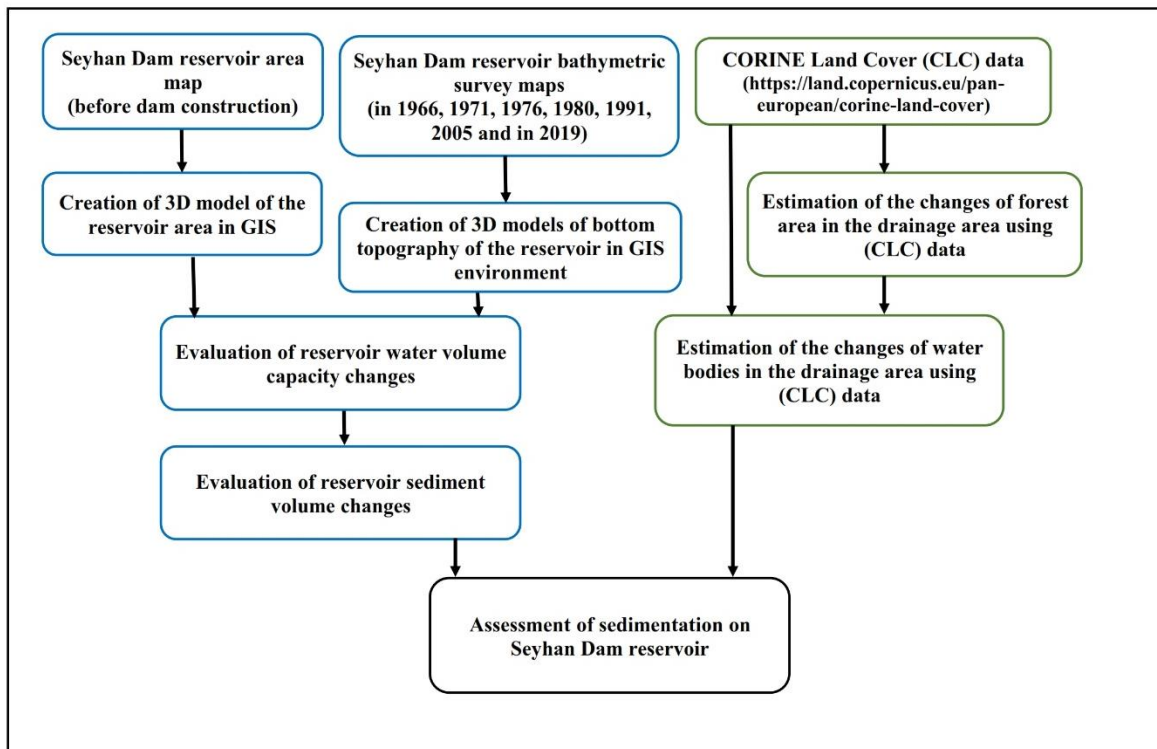


Figure 2. Flow Chart Of The Applied Methodology

3. Results and Discussions

In this study, the evaluation of changes in the Seyhan Dam reservoir's water storage capacity is conducted through a comparative analysis of volume-elevation data. The researchers compare the volume-elevation data of the reservoir before the dam's construction with the volume-elevation data obtained from bathymetric surveys conducted in the reservoir in previous years. To assess the sedimentation levels, the researchers analyze the volumetric difference at the same elevation data points. This difference represents the volume of sediment accumulated between the measurement years, and it is depicted in the graph of volume-elevation curves, as shown in Figure 3. By examining the volume-elevation curve in Figure 3, the sediment accumulation value between the pre-dam construction period and the years of the bathymetric surveys can be obtained. This information provides crucial insights into the changes in the reservoir's storage capacity over time due to sediment deposition.

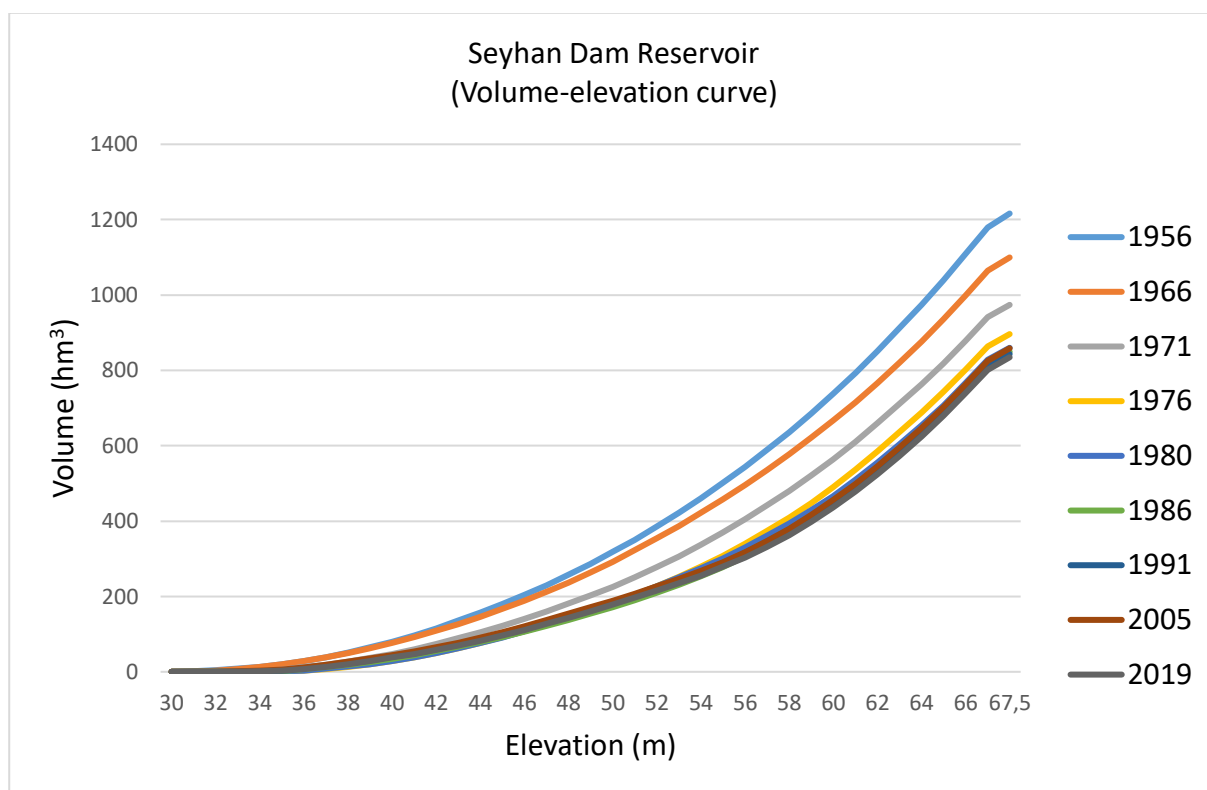


Figure 3. Seyhan Dam Volume-Elevation Curve

As depicted in Figure 4, the water storage capacity of the Seyhan Dam reservoir has experienced a significant and rapid decrease during the operation period, primarily due to the increase in sedimentation levels. However, the trend in sedimentation volume shows a tendency to become stationary as of the last three bathymetric surveys conducted up to 2019. The observed sedimentation patterns and the stability in sedimentation volume provide valuable insights for estimating future water and sediment volumes. Based on the formulation created by evaluating the results of bathymetric measurements, researchers and reservoir managers can develop predictive models to estimate future changes in water storage capacity and sediment accumulation in the reservoir.

As presented in Figure 4, the volume of the Seyhan Dam reservoir experienced a rapid change during the first 24 years after the dam's construction, primarily due to significant sediment accumulation. However, starting from 1980, there was a noticeable decrease in the rate of change in the reservoir volume over the last 39 years. Specifically, the change in the reservoir volume decreased by approximately 2.9% during this period. This finding suggests that the sedimentation rate has become more stable or slowed down significantly in recent decades, resulting in a relatively smaller impact on the reservoir's storage capacity compared to the earlier years.

This observation of a reduced change in reservoir volume over time can have implications for reservoir management and future planning. It indicates that sediment management strategies and reservoir operation practices implemented in recent years may have contributed to mitigating the impact of sediment accumulation on the reservoir's storage capacity. Understanding these trends is essential for making informed decisions regarding reservoir management and ensuring its sustainable use for various purposes.

Based on the data presented, it was estimated that during the first 24 years after the construction of the Seyhan Dam reservoir, the total storage volume loss in the reservoir was approximately 1.22% per year. This indicates a relatively rapid decrease in the reservoir's storage capacity during the initial operational period, primarily attributed to sediment accumulation.

However, in the subsequent 39 years, the storage volume loss in the reservoir significantly decreased to approximately 0.074% per year. This reduction in the rate of storage volume loss indicates a slower sedimentation rate or improved sediment management practices during this period.

The comparison between the two periods highlights the effectiveness of sediment management efforts or changes in reservoir operations that have helped to reduce the impact of sediment accumulation on the reservoir's storage capacity in recent years. This information is valuable for reservoir managers and decision-makers as it provides insights into the historical trends of sedimentation and the effectiveness of mitigation measures taken over time.

It can guide future management strategies to ensure the sustainable utilization of the Seyhan Dam reservoir for various purposes.

Regression analysis was applied to obtain the correlation between water storage and years at 67.5 meter water level in Seyhan Dam Reservoir and found as,

$$y = -0.003x^3 + 0.4739x^2 - 24.292x + 1238.8 \quad (1)$$

The results of the regression analysis indicate a high correlation between water storage capacity changes and the bathymetric survey years in the Seyhan Dam Reservoir. The correlation coefficient (R^2) value of 0.96 suggests a strong positive linear relationship between the two variables.

Furthermore, the statistical significance of this correlation was assessed using a t-test, which indicated that the correlation is significant at the 0.05 significance level. This means that the relationship observed between water storage capacity changes and the bathymetric survey years is not likely due to random chance but is statistically meaningful and reliable.

The high correlation and its statistical significance indicate that the bathymetric survey years can be used as a valuable indicator for understanding and predicting water storage capacity changes in the Seyhan Dam Reservoir. This information can aid in reservoir management and decision-making processes to ensure the optimal and sustainable utilization of the reservoir's water resources over time.

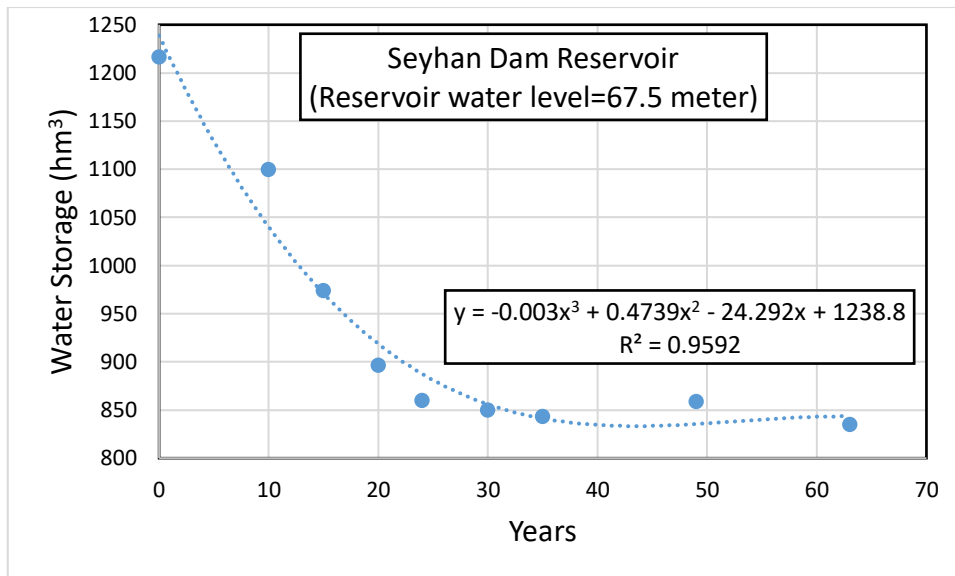


Figure 4. Water Storage Capacity Changes in Seyhan Dam Reservoir (Reservoir Water Level=67.5 Meter)

The investigation of changes in the reservoir storage capacity up to the dead volume upper elevation is depicted in Figure 5. The results show that the dead volume changes in the reservoir were estimated to be approximately 2.17% per year during the first 20 years after the dam's construction. In contrast, during the last 43 years, the dead volume changes in the reservoir were estimated to be significantly lower, at only around 0.022% per year.

Additionally, a regression analysis was conducted to determine the correlation between water storage and years at 49 meters water level in the Seyhan Dam Reservoir. However, the specific correlation coefficient value (R^2) resulting from this analysis was not provided in the given information. To fully interpret the correlation result, it is crucial to know the actual correlation coefficient value. This coefficient will indicate the strength and direction of the linear relationship between water storage and years at the specified water level in the reservoir.

$$y = -0.0012x^3 + 0.1876x^2 - 9.1312x + 300.17 \quad (2)$$

The regression analysis revealed a high correlation between water storage capacity changes and the bathymetric survey years in the Seyhan Dam Reservoir, with a correlation coefficient (R^2) value of 0.88. This strong positive linear relationship indicates that as the bathymetric survey years increase, the water storage capacity changes in the reservoir also tend to increase. The coefficient of determination (R^2) indicates that approximately 87.96% of the variability in water storage capacity changes can be explained by the changes in the bathymetric survey years.

Moreover, the statistical significance of this correlation was assessed, and it was found to be significant at the 0.05 significance level.

The high correlation and its statistical significance suggest that the bathymetric survey years are a robust indicator for understanding and predicting water storage capacity changes in the Seyhan Dam Reservoir. Based on the data from the last 6 bathymetric surveys, it is observed that sediment accumulation has significantly slowed down at the elevation of 49 meters, which is the upper dead volume elevation in the Seyhan Dam Reservoir. This finding suggests that sedimentation levels have decreased or become more stable in this particular region of the reservoir.

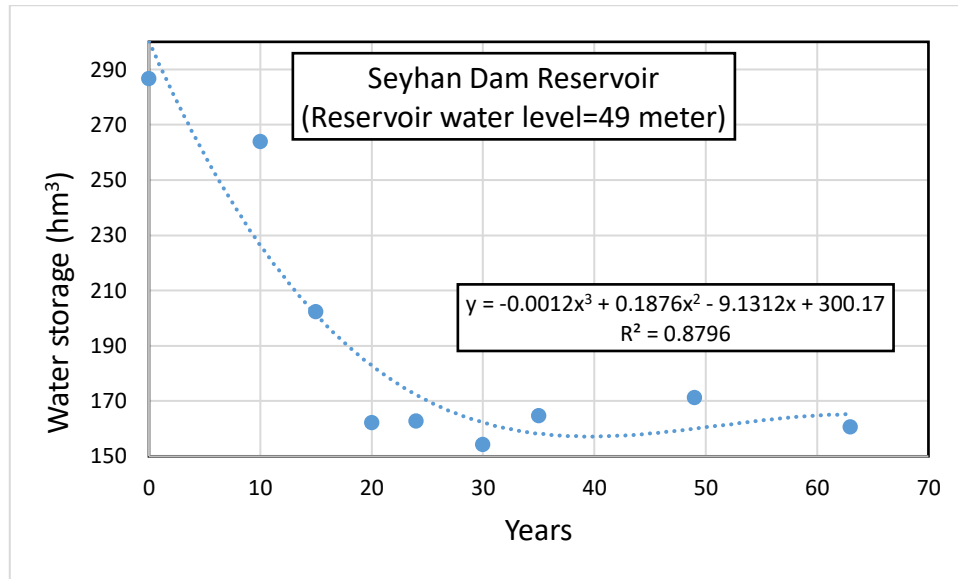


Figure 5. Water Storage Capacity Changes in Seyhan Dam Reservoir (Reservoir Water Level=49 Meter)

The slowdown in sediment accumulation at the upper dead volume elevation is a positive observation for reservoir management. It indicates that sediment management efforts or changes in reservoir operations have likely contributed to reducing the sedimentation rate in this part of the reservoir.

Understanding these trends is crucial for making informed decisions regarding sediment management strategies and ensuring the optimal utilization of the Seyhan Dam Reservoir's storage capacity. By focusing on areas where sedimentation has slowed down, reservoir managers can implement targeted measures to further mitigate sedimentation and optimize water storage for various purposes, such as irrigation, energy production, and flood protection.

In the study, the formulas (1) and (2) are used to represent specific water levels in the Seyhan Dam reservoir. These formulas likely provide mathematical relationships to estimate water levels at different stages of the reservoir operation based on various variables and factors.

To evaluate the necessity of conducting bathymetry measurements and to support planning studies for future research, it is recommended to perform regression analysis for each reservoir operation water level. This means carrying out separate regression analyses for different water levels within the reservoir's operational range.

Furthermore, such detailed regression analyses can aid in optimizing the frequency and timing of future bathymetric measurements, ensuring that resources are efficiently allocated to monitor critical areas of the reservoir and support effective planning studies for reservoir operation and sediment management.

The primary focus of the study is to investigate the impact of the increase in forest and land cover area on reservoir sedimentation accumulation. This is an important aspect as changes in land cover, especially forest cover, can influence sediment transport and deposition in the reservoir. Forests play a crucial role in stabilizing soil and reducing erosion, which, in turn, can affect sediment loads carried by rivers and streams that eventually reach the reservoir.

Additionally, the study aims to evaluate the impact of the increase in water bodies within the Seyhan River basin's drainage area. The presence of water bodies can influence sediment dynamics by altering flow patterns and sediment transport processes. Understanding the changes in water bodies and their potential influence on sediment accumulation is vital for predicting reservoir sedimentation and making informed decisions regarding

reservoir management.

By considering both the increase in forest and land cover area and the changes in water bodies, the study seeks to provide a comprehensive understanding of the factors influencing sediment accumulation in the Seyhan Dam reservoir. This knowledge can support effective reservoir management strategies and sediment control measures, ultimately contributing to the sustainable utilization of the reservoir's water resources and enhancing its multiple benefits such as irrigation, energy production, and flood protection.

The CORINE Land Cover (CLC) data analysis between 1990 and 2018 reveals significant changes in water bodies and forest areas in the upper basin of the Seyhan Dam reservoir.

As shown in Figure 6, there has been an increase in forest area over the 28 years, rising from 23.71% to 24.36%. This indicates that the upper basin has experienced a positive trend in afforestation or reforestation efforts, which can have beneficial effects on sediment control and erosion prevention. Forests play a critical role in reducing soil erosion, stabilizing slopes, and enhancing water infiltration, which can lead to a decrease in sediment runoff into the river system.

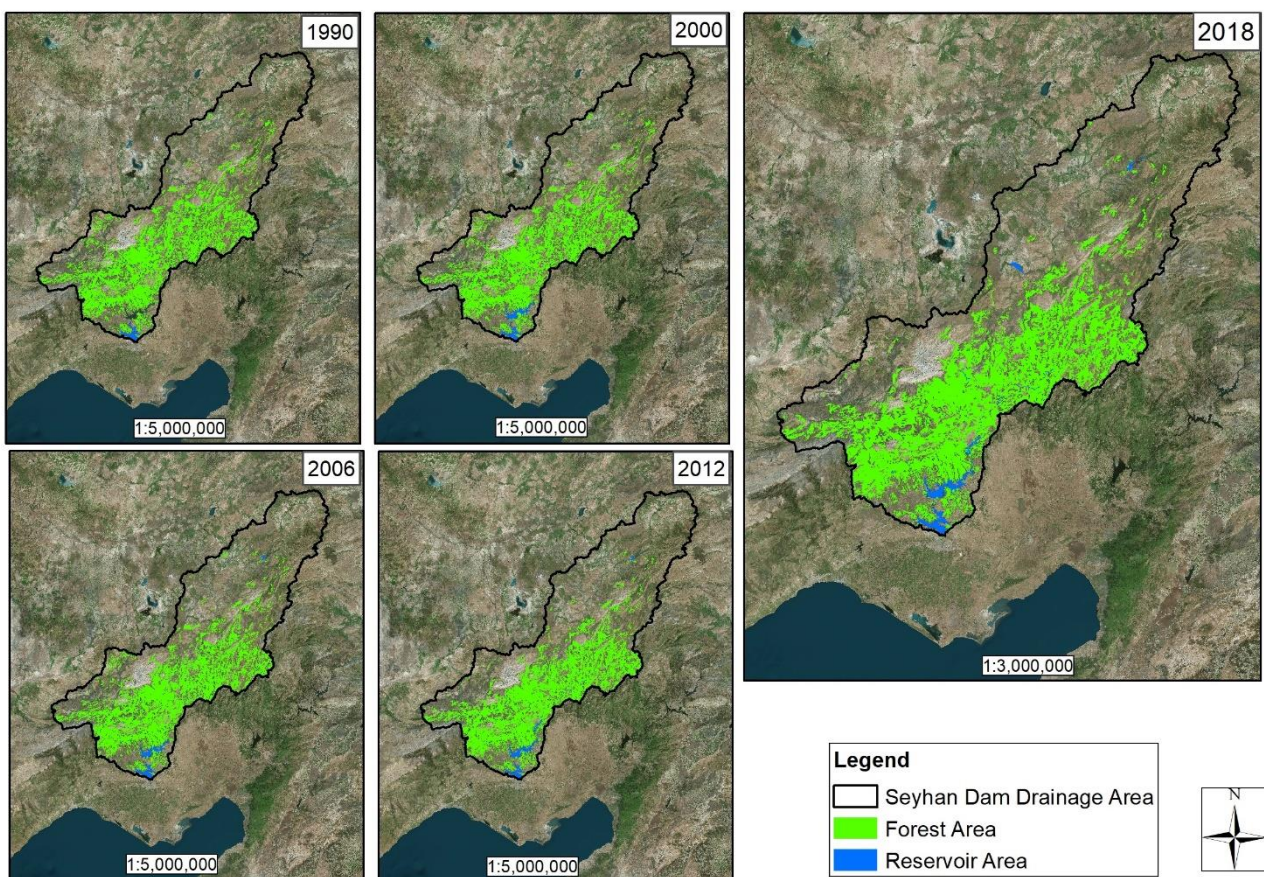


Figure 6. Seyhan Dam Drainage Area

Moreover, Figure 7 demonstrates a notable increase in water bodies within the upper basin during the same time frame. The water bodies' expansion from 0.3% to 0.9% suggests the creation or growth of natural or artificial water features in the region. The presence of water bodies can alter sediment transport patterns, potentially trapping sediment and reducing its transport downstream to the Seyhan Dam reservoir.

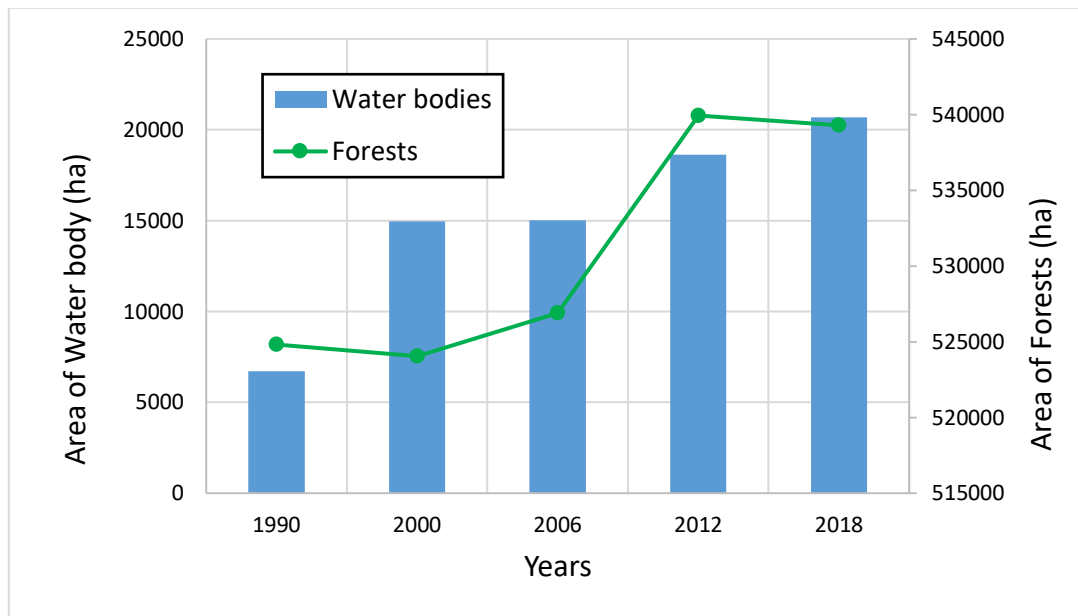


Figure 7. Water Bodies And Forests in Hectares in Seyhan Dam Drainage Area

The observed changes in forest areas and water bodies are crucial factors to consider when assessing sedimentation accumulation trends in the Seyhan Dam reservoir. These changes can have both positive and negative effects on sediment transport, and understanding their impact is vital for effective reservoir management and sediment control measures to ensure the sustainable utilization of the reservoir's water resources.

The previous studies have provided valuable insights regarding sedimentation patterns in the Seyhan River system (Fakıoğlu, 2005; Güvel and Yurtal, 2020). According to these studies, it was observed that sediment from the Çakıt Stream branch contributed significantly to sediment accumulation in the Seyhan Dam reservoir. This branch likely had higher sediment loads compared to the Seyhan main branch.

However, the construction and commissioning of the Çatalan Dam, located upstream, had a positive impact in reducing sedimentation from the Seyhan main branch. The presence of the Çatalan Dam likely acted as a sediment trap, preventing a significant amount of sediment from reaching the downstream Seyhan Dam reservoir.

The findings from these previous studies highlight the importance of understanding the sediment dynamics within a river system, particularly in multi-dam contexts. The interactions between different river branches and the presence of upstream dams can have varying effects on sediment transport and accumulation patterns. The study conducted in the Seyhan Dam reservoir provides valuable insights into the sediment accumulation and distribution over time. By comparing 3D models of the reservoir area before dam construction and the bathymetric survey years, the researchers were able to investigate spatial and temporal changes in bottom topography and sediment distribution, especially in the Çakıt Stream side.

At the 49-meter water level, it was observed that significant changes occurred along the Çakıt Stream branch and the reservoir area on this side (Figure 8). These changes were likely caused by high sediment transport from the upper basin side of Çakıt Stream, especially during the major flood disaster that occurred in the Seyhan River between 27 March and 6 April 1980 (DSİ, 1980). The flood event led to a large amount of sediment being transported from the Çakıt Stream branch into the reservoir, causing floor scours, slope collapses, and landslides.

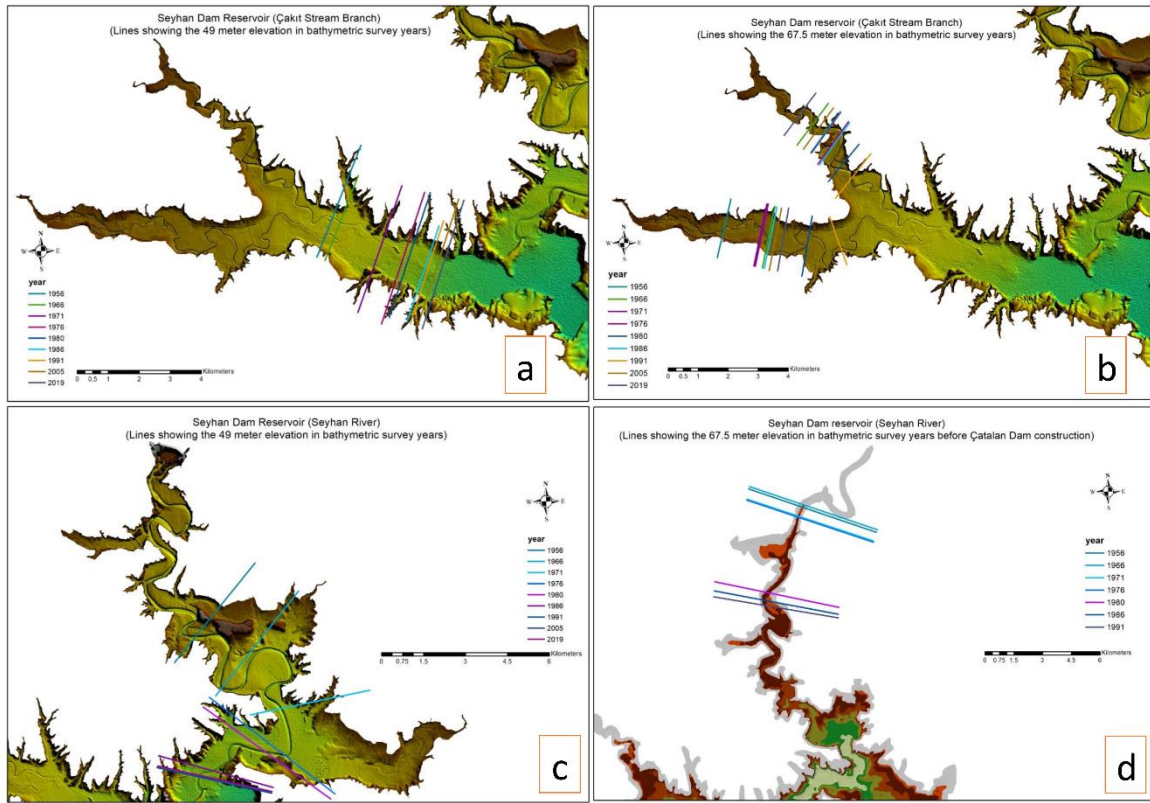


Figure 8. A- The Changes in Çakıt Stream Branch For 49 Meter Water Elevation, B- The Changes in Çakıt Stream Branch For 67.5 Meter Water Elevation, C- The Changes in Seyhan River Main Branch For 49 Meter Water Elevation, D- The Changes in Seyhan River Main Branch For 67.5 Meter Water Elevation Before The Construction Of Çatalan Dam.

However, after the construction of the Çatalan Dam, which was put into operation in 1997, the sediment accumulation and distribution in the Seyhan Dam reservoir were further investigated (Figure 9). Bathymetric measurements from 2005 and 2019 were used to evaluate the impact of the Çatalan Dam construction. Because these two maps were created after the Çatalan Dam was built, and it is necessary to have at least two maps for assessing the sediment effect. The results indicate that there were no significant changes in the Seyhan River main branch for the 49-meter and 67.5-meter water elevations in the years 2005 and 2019, respectively, after the construction of the Çatalan Dam. This suggests that the dam's presence likely acted as a sediment trap, reducing sediment transport downstream to the Seyhan Dam reservoir.

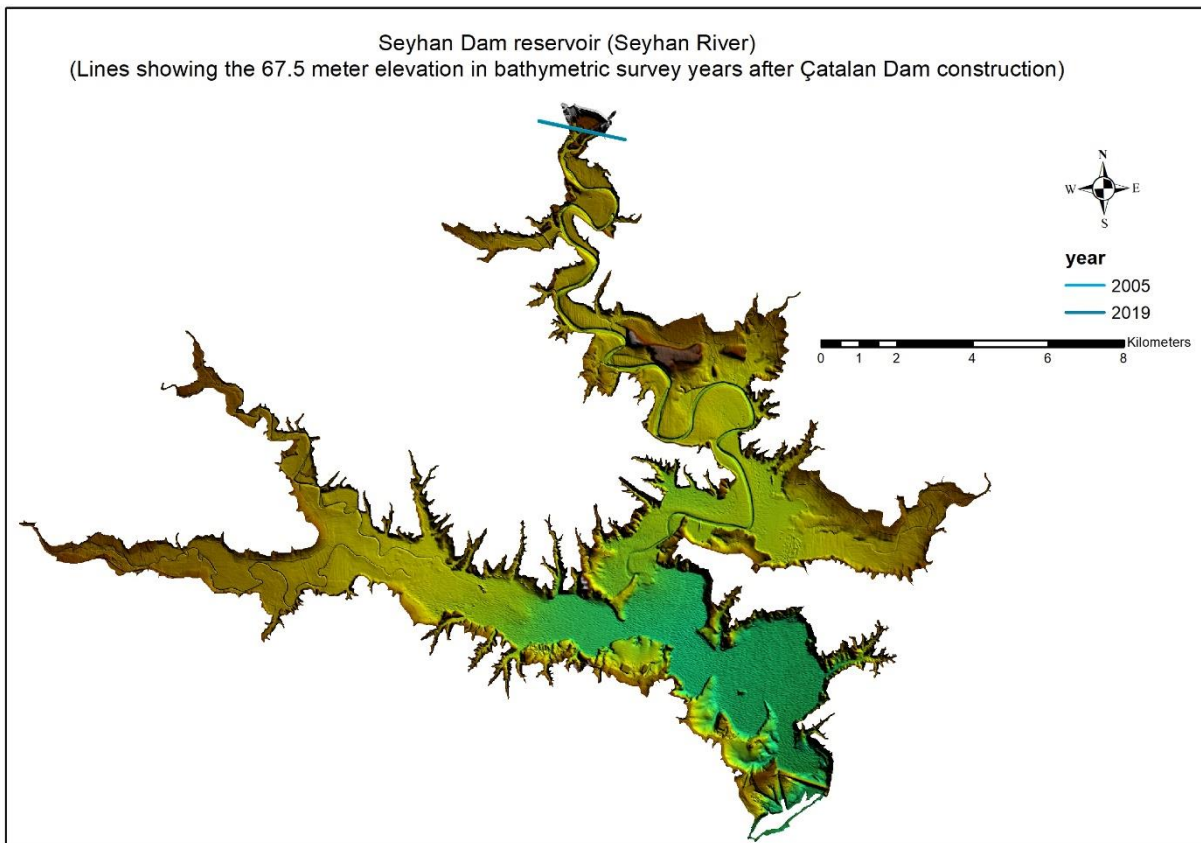


Figure 9. The Changes in Seyhan River Main Branch For 67.5 Meter Water Elevation After The Construction Of Çatalan Dam

Overall, the study provides important information on the effects of flood events and dam construction on sediment accumulation and distribution in the reservoir. Understanding these dynamics is crucial for effective reservoir management and sediment control strategies to ensure the long-term sustainability of the reservoir's water resources.

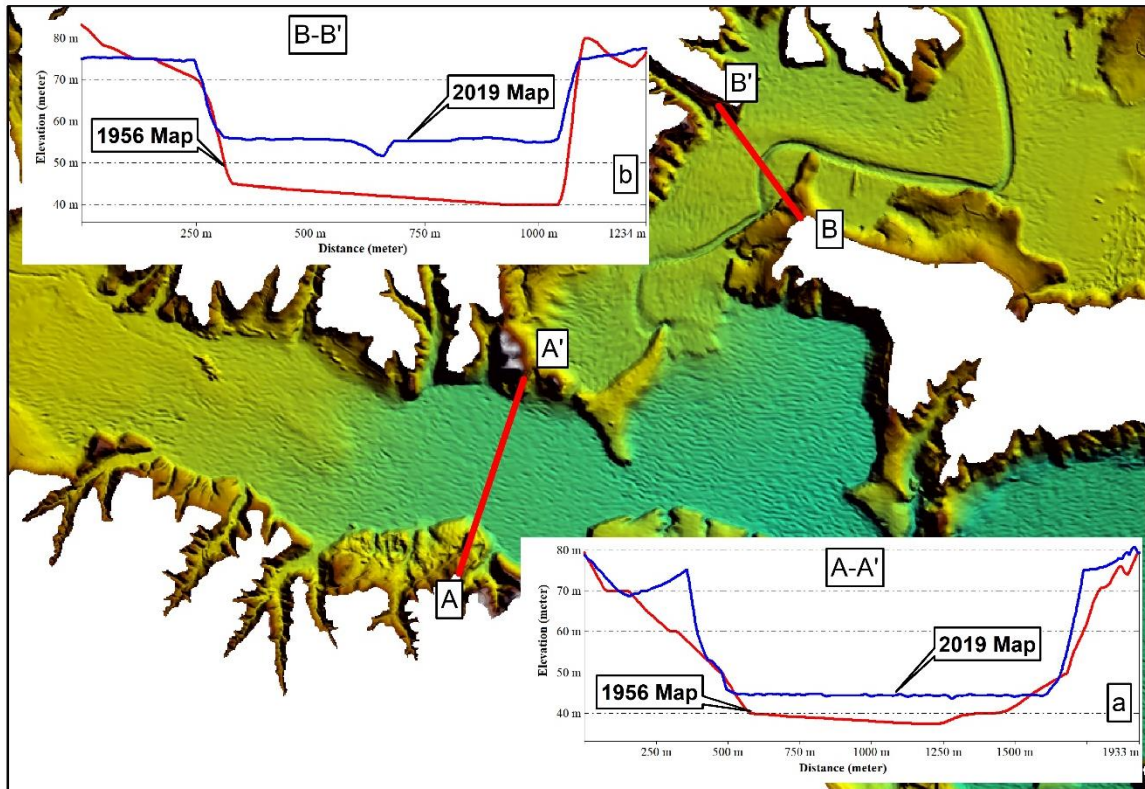


Figure 10. Sample Cross-Sections Showing Elevation Changes in The Seyhan Dam Reservoir Between 1956 And 2019.

Figure 10 depicts a sediment thickness map in Seyhan Dam Reservoir from 1956 to 2019 (with representative cross-sections in the model). To analyze areas of silt deposition and underwater erosion, representative cross sections were constructed. In order to investigate sediment deposition along the reservoir, 3D models of the reservoir area representing bathymetric years were also evaluated in GIS environment.

4. Conclusion

The findings from the investigation of storage capacity loss caused by sedimentation in the Seyhan Dam reservoir reveal important trends over time. The data indicate that in the first 24 years after the construction of the dam, the total storage volume loss was estimated at 1.22% per year, while in the last 39 years, this loss decreased to 0.074% per year. Similarly, the dead volume changes in the reservoir were estimated to be higher in the first 20 years (2.17% per year) compared to the last 43 years (0.022% per year).

Given the slowdown in sediment accumulation in the reservoir and the high cost and effort involved in preparing bathymetric maps, the study recommends using the formulas (1) and (2) to assess the necessity of bathymetry map production in the future. These formulas can provide valuable estimates of water storage capacity changes without the need for frequent bathymetric surveys, making the monitoring process more efficient.

Additionally, the study suggests evaluating the contribution of these formulas in planning studies before conducting bathymetric measurements. This approach can aid in decision-making and resource allocation for monitoring sedimentation in the reservoir.

The construction of the Çatalan Dam has had a significant impact in reducing sediment accumulation in the Seyhan Dam reservoir. This finding emphasizes the importance of considering upstream land and water management practices in sediment management strategies for the entire Seyhan River basin.

Furthermore, the increase in forest area and water bodies in the upper basin, as shown by the CLC data comparison between 1990 and 2018, is associated with a decrease in sediment flow into the reservoir. This highlights the positive role of forests and water bodies in mitigating sedimentation and underscores the significance of sustainable land and water management practices in the basin to ensure the long-term health of the reservoir and its water resources. The sedimentation should be monitored not only in dam reservoirs but also in streams concerning its impacts on environmental and social contexts.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Abdul Razad, A.Z., Samsudin, S.H., Setu, A., Abbas, N.A., Mohd Sidek, L., Basri, H. (2020) Investigating the Impact of Land Use Change on Sediment Yield for Hydropower Reservoirs through GIS Application, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 540 (2020) 012037.
- Akgül M.A., Dağdeviren M., Biroğlu İ. (2018) Satellite-derived bathymetry using multi-temporal satellite images. DSİ Technical Bulletin, Issue:127, January 2018, page:14-27. (in Turkish)
- Ayele, G. T., Kuriqi, A., Jemberrie, M. A., Saia, S.M., Seka, A. M., Teshale, E. Z., Daba, M. H., Ahmad Bhat, S., Demissie, S. S., Jeong, J. et al. (2021) Sediment Yield and Reservoir Sedimentation in Highly Dynamic Watersheds: The Case of Koga Reservoir, Ethiopia. *Water* 2021, 13, 3374. <https://doi.org/10.3390/w13233374>
- Bandini, F., Olesen, D., Jakobsen, J., Kittel, C.M.M., Wang, S., Garcia, M., Bauer-Gottwein, P. (2018) Technical note: Bathymetry observations of inland water bodies using a tethered single-beam sonar controlled by an unmanned aerial vehicle, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 4165–4181, 2018.
- Billi, P., Spalevic, V. (2022) Suspended sediment yield in Italian rivers, *Catena* 212 (2022) 106119. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106119>.
- Bwambale, E., Naangmenyele, Z., Iradukunda, P., Agboka, K.M., Houessou-Dossou, E.A.Y., Akansake, D.A., Bisa, M.E., Hamadou, A.H., Hakizayezu, J., Onofua, O.E., Chikabvumbwa, S.R. (2022) Towards precision irrigation management: A review of GIS, remote sensing and emerging technologies, *Cogent Engineering* (2022), 9: 2100573, DOI: 10.1080/23311916.2022.2100573.
- Casal, G., Harris, P., Monteys, X., Hedley, J., Cahalane, C., McCarthy, T. (2020) Understanding satellite-derived bathymetry using Sentinel 2 imagery and spatial prediction models, *GIScience & Remote Sensing*, 57:3, 271-286, DOI: 10.1080/15481603.2019.1685198.
- Chalise, D., Kumar, L., Spalevic, V., Skataric, G. (2019) Estimation of Sediment Yield and Maximum Outflow Using the IntErO Model in the Sarada River Basin of Nepal, *Water* 2019, 11, 952; doi:10.3390/w11050952.
- Colman, C.B., Garcia, K.M.P., Pereira, R.B., Shinma, E.A., Lima, F.E., Gomes, A.O., Oliveira, P.T.S. (2018) Different approaches to estimate the sediment yield in a tropical watershed, RBRH, Porto Alegre, v. 23, e47, 2018.
- Cooper, M., Lewis, S.E., Stieglitz, T.C., Smithers, S.G. (2018) Variability of the useful life of reservoirs in tropical locations: A case study from the Burdekin Falls Dam, Australia, *International Journal of Sediment Research* 33 (2018) 93–106.
- Copernicus, <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover> (Date of access: 06.07.2020).
- Cross, B.K., Moore, B.C (2014) Lake and reservoir volume: Hydroacoustic survey resolution and accuracy, *Lake and Reservoir Management*, 30:4, 405-411, DOI: 10.1080/10402381.2014.960115
- Darama Y, Selek Z, Selek B, Akgül MA, Dağdeviren M (2019) Determination of sediment deposition of Hasanlar Dam using bathymetric and remote sensing studies. *Natural Hazards* 97:211–227.
- de Araújo, J. C., Knight, D.W. (2005) A Review of the Measurement of Sediment Yield in Different Scales, *REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto*, 58(3): 257-265, jul.set.2005.
- Diaconu, D.C., Bretcan, P., Peptenatu, D., Tanislav, D., Mailat, E. (2019) The importance of the number of points, transect location and interpolation techniques in the analysis of bathymetric measurements, *Journal of Hydrology*, 570 (2019) 774-785.
- DSİ (1980) Seyhan Taşkın Raporu (27 Mart 1980-6 Nisan 1980), Ankara, 1980.
- DSİ (2014) State Hydraulic Works (DSİ), Seyhan River Basin Master Plan Report, prepared by Temelsu International Engineering Services Inc., Turkey (in Turkish)
- DSİ (2022) 2022 Yılı Program-Bütçe Toplantısı Takdim Raporu, DSİ 6.Bölge Müdürlüğü (in Turkish)
- Dutta, S. (2016) Soil erosion, sediment yield and sedimentation of reservoir: a review, *Model. Earth Syst. Environ.* (2016) 2:123.
- Estigoni, M.V., Matos, A.J.S., Mauad, F.F. (2014) Assessment of the accuracy of different standard methods for determining reservoir capacity and sedimentation, *J Soils Sediments* (2014) 14:1224–1234.
- Fakioğlu, M., (2005) Seyhan Barajı Hidrografik Harita Alımı Değerlendirilmesi ve Sonuçları, 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, İstanbul, 23-25 Kasım 2005.
- Garg, V., Jothiprakash, V. (2008) Estimation of useful life of a reservoir using sediment trap efficiency, *Journal of Spatial Hydrology*, Vol.8, No.2 Fall 2008.
- Gharbia, S.S., Alfatah, S.A., Gill, L., Johnston, P., Pilla, F. (2016) Land use scenarios and projections simulation using an integrated GIS cellular automata algorithms, *Model. Earth Syst. Environ.* (2016) 2:151.
- Gopakumar, R., Takara, K. (2009) Analysis of bathymetry and spatial changes of Vembanad Lake and terrain characteristics of Vembanad Wetlands using GIS, *Hydroinformatics in Hydrology, Hydrogeology and Water Resources (Proc.of Symposium JS.4 at the Joint IAHS & IAH Convention, Hyderabad, India, September 2009)*. IAHS Publ. 331, 2009.
- Göğüş, M., Adıgüzel, F., Türkiye’de Bulunan Rezervuarların Sedimentasyonu, Türkiye İnşaat Mühendisliği 11. Teknik Kongre Bildiriler Kitabı, 1, 369-383, 1991.
- Güvel, Ş.P. (2007) The Study on Sediment Accumulation of Seyhan Reservoir by Decision Support Systems, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Institute of Natural and Applied Sciences, Çukurova University, Adana (in Turkish)
- Güvel, Ş.P., Selek, B. Seçkin, G. (2017) Investigation of Sedimentation Effects on Dam Reservoirs: Berdan Dam Example, Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture, 32(1), pp. 89-97, March 2017. (in Turkish)
- Güvel, Ş.P. ve Yurtal, R. (2020) Investigation of sedimentation effects on Seyhan Dam Reservoir, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 35:2 (2020) 1015-1025. (in Turkish).
- Güvel, Ş.P. (2021) Investigation of Sediment Deposition in Dam Reservoirs, Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering, 36(4), pp. 869-878, December 2021.

- Güvel, Ş.P., Akgül, M.A., Yurtal, R. (2021a) Investigation of sediment accumulation in Berdan Dam Reservoir using bathymetric measurements and Sentinel-2 Data, *Arabian Journal of Geosciences*, (2021) 14:2723.
- Güvel, Ş.P., Akgül, M.A., Aksu, H. (2021b) Sediment Yield Analysis in Tahtaköprü Dam Basin, *European Journal of Science and Technology*, No. 27, pp. 995-1002, November 2021.
- Hagos, Y. G., Andualem, T.G., Mengie, M.A., Ayele, W.T., Malede, D.A. (2022) Suitable dam site identification using GIS-based MCDA: a case study of Chemoga watershed, Ethiopia, *Applied Water Science* (2022) 12:69.
- IECO (International Engineering Company Inc.) (1966) Water resources development Ceyhan Basin Projects, Seyhan Basin Projects, Berdan Project, Develi Project, Amik Project, Master Plan Report. (in Turkish)
- İlter, K., Ağralıoğlu, N., Baraj Göllerinde Sediment Hacminin Bulunması, *DSİ Teknik Bülteni*, 61, 3-15, 1987.
- Jagannathan, S., Krishnaveni, M. (2021) Longitudinal Sediment Profiling and Capacity Lost in Reservoir Using Multidate Sentinel-2 Images, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* (February 2021) 49(2):317–323.
- Jain, M.K., Mishra, S.K., Shah, R.B. (2010) Estimation of sediment yield and areas vulnerable to soil erosion and deposition in a Himalayan watershed using GIS, *Current Science*, Vol.98, No.2, 25 January 2010.
- Kırkgöz, M.S., Asaad, R., Özcan, Z., Türkiye'deki Bazı Baraj Haznelerinde Sediment Çökmesi Üzerine Bir İnceleme, *Ç.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 7 (2), 53-63, Aralık 1992.
- Kırkgöz, M.S., Asaad, R., Özcan, Z., Seyhan Barajı Haznesinde Taban Profilindeki Değişmelerin Hesabı, *Ç.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 8 (1), 155-164, Haziran 1993.
- Kothyari, U.C., Jain, S.K. (1997) Sediment yield estimation using GIS, *Hydrological Sciences Journal*, 42(6), 833-843, December 1997.
- Legleiter, C.J., Overstreet, B.T., Kinzel, P.J. (2018) Sampling Strategies to Improve Passive Optical Remote Sensing of River Bathymetry, *Remote Sens.* 2018, 10, 935; doi:10.3390/rs10060935.
- Lopes, J.W.B., de Araújo, J.C. (2019) Simplified Method for the Assessment of Siltation in Semiarid Reservoirs Using Satellite Imagery, *Water* 2019, 11, 998; doi:10.3390/w11050998.
- Maina, C.W., Sang, J.K., Raude, J.M., Mutua, B.M., Moriasi, D.N. (2019) Sediment distribution and accumulation in Lake Naivasha, Kenya over the past 50 years, *Lakes & Reserv.* 2019;24:162–172.
- Malczewski, J. (2006) GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature, *International Journal of Geographical Information Science*, 20:7, 703-726, DOI: 10.1080/13658810600661508
- Mardwiono, F., Sedyowati, L., Wibisono, G. (2022) Integrated Sediment Management as a Sustainable Effort of Reservoir Function: A Case Study on the Sengguruh and Sutami Reservoirs, *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, Volume 7, Issue 2, February - 2022.
- Mueller, E.N., Güntner, A., Francke, T., Mamede, G. (2010) Modelling sediment export, retention and reservoir sedimentation in drylands with the WASA-SED model, *Geosci. Model Dev.*, 3, 275–291, 2010.
- Mulu, A., Dwarakish, G.S. (2015) Different Approach for Using Trap Efficiency for Estimation of Reservoir Sedimentation. An Overview, *Aquatic Procedia* 4 (2015) 847 – 852.
- Obialor, C.A., Okeke, O.C., Onunkwo, A.A., Fagorite, V.I., Ehujuo, N.N. (2019) Reservoir Sedimentation: Causes, Effects and Mitigation, *International Journal of Advanced Academic Research, Sciences, Technology and Engineering*, ISSN: 2488-9849, Vol. 5, Issue 10 (October 2019).
- Oladosu, S.O., Ojigi, L.M., Aturuocha, V.E., Anekwe, C.O., Tanko, R. (2019) An investigative study on the volume of sediment accumulation in Tagwai dam reservoir using bathymetric and geostatistical analysis techniques, *SN Applied Sciences* (2019) 1:492, <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0393-8>.
- Özşahin, E. (2023) Climate change effect on soil erosion using different erosion models: A case study in the Naip Dam basin, Türkiye, *Computers and Electronics in Agriculture* 207 (2023) 107711.
- Patil, M., Patel, R., Saha, A. (2021) Sediment Yield and Soil Loss Estimation Using GIS Based Soil Erosion Model: A Case Study in the MAN Catchment, Madhya Pradesh, India. *Environ. Sci. Proc.* 2021, 8, 26. <https://doi.org/10.3390/ecas2021-10348>.
- Poliyapram, V., Raghavan, V., Metz, M., Delucchi, L., Masumoto, S. (2017) Implementation of Algorithm for Satellite-Derived Bathymetry Using Open Source GIS and Evaluation for Tsunami Simulation, *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2017, 6, 89; doi:10.3390/ijgi6030089.
- Rowan, J.S., Goodwill, P., Greco, M. (1995) Temporal Variability in Catchment Sediment Yield Determined from Repeated Bathymetric Surveys: Abbeystead Reservoir, U.K., *Phys. Chem. Earth*, Vol.20, No.2, pp.199-206, 1995.
- Saito, Y. K., Ferreira-Viana, L. J., Oliveira Ferreira, I., Gomes-Marques, E. A. (2021). Sedimentation in reservoirs. Case study: the reservoir of the São Bartolomeu stream, Viçosa, Minas Gerais, Brazil. *Earth Sciences Research Journal*, 25(2), 193-200. DOI: <https://doi.org/10.15446/esrj.v25n2.79584>
- Salameh, E., Frappart, F., Almar, R., Baptista, P., Heygster, G., Lubac, B., Raucoules, D., Almeida, L.P., Bergsma, E.W.J., Capo, S., De Michele, M., Idier, D., Li, Z., Marieu, V., Poupardin, A., Silva, P.A., Turki, I., Laignel, B. (2019) Monitoring Beach Topography and Nearshore Bathymetry Using Spaceborne Remote Sensing: A Review, *Remote Sens.* 2019, 11, 2212; doi:10.3390/rs11192212.
- Sandoval-Erazo, W., Toulkeridis, T., Morales-Sanchez, Á., Merizalde Mora, M.J. (2018) Sedimentological study of the reservoir of the Manduriacu hydroelectric project, northern Ecuador, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 191 (2018) 012119.
- Schleiss, A.J., Franca, M.J., Juez, C., De Cesare, G. (2016) Reservoir Sedimentation, *Journal of Hydraulic Research*, 54:6, 595-614, DOI: 10.1080/00221686.2016.1225320
- Selek, B., Yazıcı, D.D., Aksu, H. and Özdemir, A.D. (2016) Seyhan Dam, Turkey and climate change adaptation strategies. In: Tortajada, C. (Ed.) *Increasing resilience to climate variability and change*. New York, NY: Springer, pp. 205–232.
- Shaikh, U., Sapkal, A., Kolage, V., Nandre, T., Madake, A. (2021) Sedimentation Analysis of Dam Using GIS Techniques, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Volume:08, Issue:04, April 2021.
- Shiferaw, M., Abebe, R. (2020) Reservoir sedimentation and estimating dam storage capacity using bathymetry survey: a case study of Abrajit Dam, Upper Blue Nile basin, Ethiopia, *Applied Geomatics*, <https://doi.org/10.1007/s12518-020-00348-x>.

- Skariah, M. Suriyakala, C.D. (2021) Gauging of Sedimentation in Idukki Reservoir, Kerala (1974–2019), and the Impact of 2018 Kerala Floods on the Reservoir, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* (September 2021) 49(9):2103–2112.
- Sun, Z., Sun, L., Zheng, H., Li, Z. (2022) Estimation of sedimentation in the Manwan and Jinghong reservoirs on the Lancang river, *Water Supply* Vol 22, No 4, 4307 doi: 10.2166/ws.2022.051.
- Szatten, D., Habel, M., Pellegrini, L., Maerker, M. (2018) Assessment of Siltation Processes of the Koronowski Reservoir in the Northern Polish Lowland Based on Bathymetry and Empirical Formulas, *Water* 2018, 10, 1681; doi:10.3390/w10111681.
- Taruya, H., Fuji, H. (1997) Current Conditions of Reservoir Sedimentation in Irrigation Dams in Japan, *JARQ* 31, 29-34 (1997).
- Ugwu, S.J., Ajoge, H.N., Abdulsalam, B., Nwude, M.O. (2021) Bathymetry Study of the Siltation Level of Lugu Dam Reservoir in Sokoto State, Nigeria, *Nigerian Journal of Technological Development*, Vol.18, No.3, September 2021.
- Vemu, S., Pinnamaneni, U.B. (2012) Sediment Yield Estimation and Prioritization of Watershed Using Remote Sensing and GIS, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B8, 2012, XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia.
- Wang, D., Xing, S., He, Y., Yu, J., Xu, Q., Li, P. (2022) Evaluation of a New Lightweight UAV-Borne Topo-Bathymetric LiDAR for Shallow Water Bathymetry and Object Detection. *Sensors* 2022, 22, 1379. <https://doi.org/10.3390/s22041379>.
- Weatherall, P., K. M. Marks, M. Jakobsson, T. Schmitt, S. Tani, J. E. Arndt, M. Rovere, D. Chayes, V. Ferrini, and R. Wigley (2015), A new digital bathymetric model of the world's oceans, *Earth and Space Science*, 2, 331–345, doi: 10.1002/2015EA000107.
- Xing, Y., Chen, H., Liang, Q., Ma, X. (2022) Improving the performance of city-scale hydrodynamic flood modelling through a GIS-based DEM correction method, *Natural Hazards* (2022) 112:2313–2335.



POSITION CONTROL OF A QUADCOPTER WITH PID AND FUZZY-PID CONTROLLER

Ozan POLAT^{1*}, Aziz SEZGİN²

¹ İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Keywords

Drone,
Quadcopter,
PID,
Fuzzy,
Simulation.

Abstract

In this study, PID based efficient control systems are designed and compared for position control of a quadcopter in six degrees of freedom. The main goal is to get the quadcopter to the desired position in three-dimensional space. Firstly, the desired position for the quadcopter to reach is determined. Then, the physical model of the system is selected, and mathematical model is derived according to the physical model. Initially, all external disturbances like drag force and wind are neglected. However, various external disturbances are then applied to the system to measure robustness of the designed controllers. Firstly, PID controller is implemented to the quadcopter system. Secondly, Fuzzy-PID controller is used. Necessary pitch and roll angles are found and control forces are calculated by using both controllers. Also, angular velocities of the motors and current values which are needed to be supplied to each motor are calculated and compared to evaluate performance and applicability of the proposed controllers. According to the results, it is observed that both controllers worked successfully, quadcopter is able to reach the desired location in three-dimensional space. However, Fuzzy-PID controller gives faster response and smaller overshoot levels than basic PID controller. In addition, it is seen that the Fuzzy-PID controller is less affected by external disturbances, and it recovers faster against these changes.

BİR DÖRTPERVANELİNİN PID VE BULANIK MANTIK-PID KONTROLÜ İLE POZİSYON KONTROLÜ

Anahtar Kelimeler

İnsansız Hava Aracı,
Dörtpervaneli,
PID,
Bulanık Mantık,
Benzetim.

Öz

Bu çalışmada, bir dörtpervanelinin altı serbestlik derecesinde pozisyon kontrolü için PID tabanlı verimli kontrol sistemleri tasarlanmış ve karşılaştırılmıştır. Asıl amaç, dörtpervaneliyi üç-boyutlu uzayda istenen konuma getirmektir. İlk olarak dörtpervanelinin ulaşması istenen pozisyon belirlenmiştir. Sonra sistemin fiziksel modeli seçilmiştir ve matematiksel model, fiziksel modele göre türetilmiştir. Başlangıçta sürükleme kuvveti ve rüzgar gibi tüm dış etkiler yoksayılmıştır. Fakat, tasarlanan kontrolcülerin sağlamlığını ölçmek için çeşitli dış etkiler sisteme daha sonra uygulanmıştır. İlk olarak PID kontrolcü dörtpervaneli sistemine uygulanmıştır, ikinci olarak Bulanık Mantık-PID kontrolcü kullanılmıştır. Gerekli olan yunuslama ve yuvarlama açıları bulunmuş ve kontrol kuvvetleri her iki kontrolcü ile de hesaplanmıştır. Ayrıca motorların açılma hızı ve her bir motora sağlanması gereken akım değerleri, önerilen kontrolcülerin performansı ve uygulanabilirliğini ölçmek için, hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, her iki kontrolcünün de başarılı şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir, dörtpervaneli üç-boyutlu uzayda istenen konuma ulaşabilmektedir. Fakat, Bulanık mantık-PID kontrolcü, temel PID kontrolcünden daha hızlı ve daha az seviyede aşım ile cevap vermiştir. Ayrıca, Bulanık Mantık-PID kontrolcünün dış etkilerden daha az etkilendiği ve bu değişiklikler karşısında daha hızlı toparladığı görülmüştür.

Alıntı / Cite

Polat, O., Sezgin, A., (2024). Position Control of a Quadcopter with PID and Fuzzy-PID Controllers, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(1), 34-48.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

O. Polat, 0000-0001-9004-3896
A. Sezgin, 0000-0001-6861-5309

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	26.12.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	02.12.2023
Kabul Tarihi / Accepted Date	29.12.2023
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: ozan.polat@ogr.iuc.edu.tr, +90-537-317-1551

POSITION CONTROL OF A QUADCOPTER WITH PID AND FUZZY-PID CONTROLLER

Ozan Polat^{1†}, Aziz Sezgin²

¹ İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Highlights (At least 3 and maximum 4 sentences)

- Physical and mathematical model of the system were found,
- PID and Fuzzy PID controllers were designed for the quadcopters.
- Both controllers were implemented to the quadcopter system separately and simulated in the Simulink.
- Results for both controllers were obtained and compared. According to the results, controllers have highly satisfying results. However, Fuzzy logic increased the system's overall performance.

Purpose and Scope

The main purpose of this study is to design efficient control systems to get the quadcopter to the desired position in three-dimensional space. While doing this, it also compares two different control algorithms and shows the success of the controllers in complex 6-DOF system.

Design/methodology/approach

Physical model for the quadcopter was determined and then mathematical model of the system was derived according to free body diagram. Non-linear equations were linearized. DC Motor equations were used to find necessary current values for each motor. Disturbances were added to system to test robustness of the controllers. Both controllers were implemented to the system in Simulink and results were obtained.

Findings

According to the results, both control algorithm have successful results. PID controller can be used for such complex systems that have six degrees of freedom and it can be combined with Fuzzy logic to increase performance. Fuzzy-PID algorithm significantly increased the speed of the system and it has less overshoot than the regular PID. Disadvantage of the fuzzy method is that it will require more powerful motor and battery to reach higher speed and current.

Originality

This article presents simple and efficient way to control position of the quadcopters. The error founded in this study is very low. It is a comprehensive study not limited with just controller design in MATLAB-Simulink. DC motor, power consumption equations are also used to reach desired solution. Therefore, it can help readers for motor and battery selection for their own applications.

[†] Corresponding author: ozan.polat@ogr.iuc.edu.tr, +90-537-317-1551

1. Introduction

Drones or Unmanned Aerial Vehicles (UAV) are basically defined as aircraft without a human pilot which has been an increasingly preferred topic for academic researches and industrial applications. Although their popularity increased in recent years, researches about drones have started in the early 1900s. (Praveen and Pillai,2016). There are numerous applications of UAVs such as military applications, traffic and security, photography, shipping, mapping, health sector, agriculture and so forth. A quadcopter is one of the most commonly used type of drones driven by four electric motors. They have the ability to take off and land safely using the thrust force generated as a result of the rotation of their propellers (Bozkurt and Dandil,2020).

Quadcopters have important advantages such as the ability of vertical landing (VTOL), small size and maneuverability. Also, they have important mechanical design flexibilities and they are easier to manufacture. Therefore, it is possible to generate more productive and efficient models than the other types of UAVs. Despite the positive aspects of quadcopters, they are highly unstable systems and they have complex non-linear dynamics which make them difficult to analyze (Suiçmez and Kutay,2014).

Development in technology and control theory have become a strong factor in increasing the number of researches about the control of quadcopters. Different control strategies have been applied to the quadcopters to solve different problems like position control, velocity control, autopilot, path planning, object tracking, etc.

In this study, PID Controller and Fuzzy-PID controller were designed to control position of a quadcopter in three dimensional space. The main aim of this study is to compare the robustness and success of PID and Fuzzy-PID controllers on the quadcopter system. To achieve that, system model was designed on the Simulink and the success of both controllers in position control was compared. Also, some disturbances were added to the system to evaluate robustness of the controllers. Additionally, angular velocities of the motors and current values which are needed to reach these velocities were found. Motor selection can be done by using the approach that will be presented in this article. Mathematical model of the quadcopter was derived according to the chosen physical model. Then, MATLAB/Simulink model of the system was created and controllers were implemented to the system. Finally, performance of both controllers and simulation results were discussed. Results showed that an easy PID control algorithm became successful to control complicated system which has six degrees of freedom without error compared to some other similar studies. However, Fuzzy-PID controller improved the performance of the system with higher speed and less overshoot. In addition, Fuzzy-PID controller was less affected by the disturbances like mass increase and external forces, it had faster response and recovered faster than PID controller against external disturbances.

2. Literature Survey

Praveen and Pillai (2016) designed a remote-controlled quadcopter using PID, implemented PID with Ardupilot Mega board and tested quadcopter performance in MATLAB/Simulink. Romero, Pozo and Rosales (2014) used PID controller to arrange four movements of a quadcopter which are roll, pitch, yaw and altitude. They used necessary sensors to implement PID to their system and wireless interface to observe data during flight. According to the result of the study, PID became successful but disturbances affected its behavior and performance in a bad way. Zouaoui, Mohamed and Kouider (2018) used PID controller for tracking of UAVs and they suggested that PID is effective for trajectory guiding as a result of their MATLAB simulation. Cedro and Wiczorkowski (2019) worked on quadcopter dynamics and created a model to tune the PID controller gains. He and Zhao (2014) designed PD controller for simple attitude control of the quadcopter by using Ziegler-Nichols method to tune the PD parameters which provided highly robust control system. As a similar perspective research, Sabo and Cohen (2012) implemented Fuzzy Logic for motion planning problem in 2D and obtained a %3 failure rate which highlighted one of the advantages of the fuzzy method with maintaining low control effort. Prayitno, Indrawati and Trusulaw (2017) made a comparison of PID and fuzzy controller for position control of drones and emphasized that PID control gave better performance despite the overshoot. Rahimi, Hajighasemi and Sanaei (2014) made comprehensive research about vertical position control of UAVs by using three different control methods which are LQR, Fuzzy and PID. According to their MATLAB and Simulink models, using Fuzzy PID controller significantly improved the performance of control. Another study about trajectory and position control was made by Reizenstein (2017) by implementing LQ and PID controllers. Also, GPS and LIDAR were added to the system to measure position. As a result, both controllers became successful at controlling the quadcopter's position in all three dimensions. Li (2020) applied Fuzzy control algorithm to control the attitude of the quadcopter and to solve problems about slow response and poor robustness. PID, Cascaded PID and Fuzzy-PID controllers were designed in this research with step signal. Li's simulation results also showed that Fuzzy PID have the better result.

3. Material and Method

3.1. Mathematical Model

Dynamic model of the quadcopter was derived according to the physical model which can be seen in figure 1. In this model, two uniform rods having equal mass and length were attached perpendicular and symmetrical from their centers.

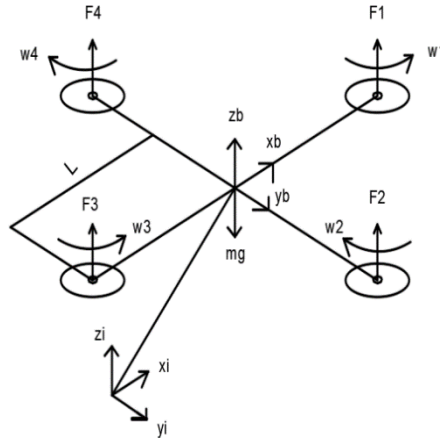


Figure 1. Physical Model

Quadcopters have six degrees of freedom (3 translational, 3 rotational). By changing the rotational speed of the motors, all these six motions can be achieved. Since there is no force in the x and y directions, quadcopters have to rotate to move in these directions because when it rotates, thrust force components will form in the x and y-axis. Two different coordinate systems were defined in the dynamic model, the body frame which is fixed to the center of gravity of the quadcopter and the ground (inertial) frame. These two coordinate systems were used to find the equations of motion of the model.

Gravity force must be balanced for quadcopters to stay in air. This balancing force comes from the thrust generated by the rotation of the motors. Motors 1 and 3 turn counterclockwise, while motors 2 and 4 turn clockwise as can be seen from the dynamic model of the system (Figure 1). Rotational speed difference between motors 2 and 4 causes rotation about x-axis. This maneuver is known as roll motion which is represented by angle ϕ . Similarly, speed difference between motors 1 and 3 causes rotation about y-axis known as pitch motion and θ represents the pitch angle. Finally, there is rotation about vertical axis z represented by yaw angle ψ .

The transformation matrix between the body frame and the ground frame can be defined by multiplying the three rotation matrices which result from the rotation of the body frame. By ignoring drag forces, there are only thrust forces on the body frame. These thrust forces were transferred to the ground frame by using rotation matrix resulting from equation 1. (Long and He ,2014)

$$F_G = R F_B$$

$$\begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & s_\phi s_\theta c_\psi - c_\phi s_\psi & c_\phi s_\theta c_\psi + s_\phi s_\psi \\ c_\theta s_\psi & s_\phi s_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & c_\phi s_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi \\ -s_\theta & s_\phi c_\theta & c_\phi c_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} \quad (1)$$

Result of Equation 1 defines the quadcopter's linear dynamics in x, y and z positions.

$$\ddot{x} = \frac{(\cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi) * F_z}{m} \quad (2)$$

$$\ddot{y} = \frac{(\cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi) * F_z}{m} \quad (3)$$

$$\ddot{z} = \frac{(\cos\phi \cos\theta) * F_z}{m} - g \quad (4)$$

Forces that are generated by the rotation of the propellers can be assumed as proportional to the square of the rotational speed.

$$Thrust = F = b * \omega^2 \quad (5)$$

where b is the thrust coefficient and ω is the rotational speed of the motors. Finally total thrust force can be written as below:

$$F_z = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = b(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \quad (6)$$

Rotational dynamics of the quadcopter can be analyzed in the body frame. Gyroscopic effect caused by the rigid body rotation and drag forces were neglected for simplicity. Also, velocities at the body frame and ground frame were considered as equal. Therefore, only thrust forces can produce torque on the quadcopter. Torque generated in the different axes can be found by taking moments according to the center of gravity of the quadcopter.

$$\tau_x = L(F_4 - F_2) = Lb(\omega_4^2 - \omega_2^2) \quad (7)$$

$$\tau_y = L(F_1 - F_3) = Lb(\omega_1^2 - \omega_3^2) \quad (8)$$

F_4 and F_1 create positive moment about x and y axis, respectively and F_2 and F_3 create negative moment about these axes. L is the distance between the center of gravity of the quadcopter and the motors. Moment in the z -direction is the net moment of the motors which is positive at counterclockwise and negative at clockwise directions.

$$\tau_z = d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \quad (9)$$

At equation 9, d is a new constant known as drag factor (Jiinec,2011). After finding moments from equations 7,8 and 9 angular accelerations can be written by Newton's laws of motion:

$$\ddot{\phi} = \frac{\tau_x}{I_x} \quad (10)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{\tau_y}{I_y} \quad (11)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{\tau_z}{I_z} \quad (12)$$

Generally, brushless DC motors are used for drone applications. Needed current values to reach desired angular velocities can be found theoretically by using brushless DC motor equations. Torque generated by each motor is defined by the equation below (Gibiansky):

$$\tau = K_t * (I - I_o) \quad (13)$$

where, τ is the torque generated by each motor, K_t is the torque constant, I is the current and I_o is the no load current. I_o has a small value, therefore it can be taken as zero. With no motor resistance, voltage of the motors can be written as:

$$V = K_v * \omega \quad (14)$$

where K_v is the electromotive force constant and ω is the angular velocity of the motor.

By using conservation of the energy, power of the motors can be calculated by multiplying thrust force and air velocity. Also, V_h (air velocity while hovering) can be found from momentum theory (Gibiansky).

$$P = T * V_h \quad (15)$$

$$V_h = \sqrt{\frac{F}{2\rho A}} \quad (16)$$

$$P = \frac{F^{3/2}}{\sqrt{2\rho A}} = \frac{(b * w^2)^{3/2}}{\sqrt{2\rho A}} \quad (17)$$

where ρ is the air density and A is the area swept out by the motor.

Finally, current values needed for each motor can be found by equation:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{P}{K_v * \omega} \quad (18)$$

3.2. PID Controller Design

PID controller is the most common control mechanism that can be used in many different systems. In this study, PID control was implemented to the system to get the quadcopter to desired position. Since there are four inputs to quadcopter, system is underactuated because there are six degrees of freedom to be controlled. Thrust force F_z and moments τ_x , τ_y and τ_z can be taken as control inputs and controlled by PID to solve this problem.

According to the equations 2, 3 and 4, linear position of the quadcopter is only controlled by the force F_z and rotational degrees of freedom are controlled by moments τ_x , τ_y and τ_z , respectively. Therefore, control inputs can be written as:

$$U_1 = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = b(w_1^2 + w_2^2 + w_3^2 + w_4^2) \quad (19)$$

$$U_2 = L(F_4 - F_2) = Lb(w_4^2 - w_2^2) \quad (20)$$

$$U_3 = L(F_1 - F_3) = Lb(w_1^2 - w_3^2) \quad (21)$$

$$U_4 = d(w_1^2 - w_2^2 + w_3^2 - w_4^2) \quad (22)$$

Output of the PID controller calculates the necessary force inputs, and then from equations 19, 20, 21 and 22 angular velocities of each motor can be found.

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{U_1}{3b} + \frac{U_3}{2Lb} + \frac{U_4}{4d}} \quad (23)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{U_1}{4b} - \frac{U_2}{2Lb} - \frac{U_4}{4d}} \quad (24)$$

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{U_1}{4b} - \frac{U_3}{2Lb} + \frac{U_4}{4d}} \quad (25)$$

$$\omega_4 = \sqrt{\frac{U_1}{4b} + \frac{U_2}{2Lb} - \frac{U_4}{4d}} \quad (26)$$

Simulation model of the system was created in MATLAB-Simulink. Rotational dynamics were modeled based on equations 10, 11 and 12 and linear dynamics were modeled after nonlinear equations of motions were linearized by assuming roll, pitch and yaw angles are small. Linear equations of motion can be seen below:

$$\ddot{x} = \frac{\theta * U_1}{m} \quad (27)$$

$$\ddot{y} = \frac{\phi * U_1}{m} \quad (28)$$

$$\ddot{z} = \frac{U_1}{m} - g \quad (29)$$

Assuming no external disturbances, if all motors turn with the same speed, quadcopter can only move up (in the z-direction) when the generated thrust force become higher than the weight of the quadcopter. Higher than the critical speed, quadcopter overcomes gravity force and starts moving upward. Also, quadcopters have thrust forces only in z-direction. Therefore, for quadcopter to move in x and y directions, pitch or roll movement (rotations) are needed. Pitch and roll angles must be calculated to find necessary control inputs. After finding desired angles, PID controller can be designed to calculate control inputs U_1 , U_2 , U_3 and U_4 .

Simulink model of the system can be seen at appendix (Figure 16). Desired positions were defined in 'Reference Path' subsystem. Both desired roll and pitch angles to move x and y directions were calculated from 'Angle Control' subsystem with PID controllers. Control inputs U_1 , U_2 , U_3 and U_4 were also calculated by PID controllers inside the 'Position Control' subsystem. 'Quadcopter Plant' subsystem consists of linear and rotational dynamics of quadcopter based on mathematical model. Finally, angular velocity and current values were calculated from simulation.

3.3. Fuzzy-PID Controller Design

Fuzzy logic is one of the most preferred intelligent control methods. Rather than traditional boolean logic which has 0 and 1 only, fuzzy logic design can have many values between 0 and 1. In this study, fuzzy logic was used to find PID controller gains, K_p , K_i and K_d . In this way, a hybrid controller was designed with PID as the main controller and fuzzy logic to tune the PID parameters.

The PID design presented in section 3.1 is still same and valid, but for controlling the roll, pitch, yaw angles and also altitude, PID gains were found by Fuzzy-logic for each degree of freedom. Error and its derivative were provided to fuzzy logic controller as inputs. Then, inputs were analyzed in the Fuzzy system with if-then logic and as a result, K_p , K_i and K_d were outputted from the controllers. With this approach, system will automatically tune the PID controller, gains will change according to time and an adaptive control will be provided to the system.

Designed Fuzzy-logic controllers have two inputs and one output. Inputs are error and its derivative and they have five membership functions namely Negative Large (NL), Negative Small (NS), Zero (Z), Positive Small (PS) and Positive Large (PL). Outputs also have five membership functions which are Very Small (VS), Small (S), Medium (M), Large (L) and Very Large (VL). In this study, Mamdani type Fuzzy system was used with centroid defuzzification method. Range of the outputs and inputs were determined separately for each degree of freedom and each gain for all Fuzzy systems. One example system can be seen in the figures below.

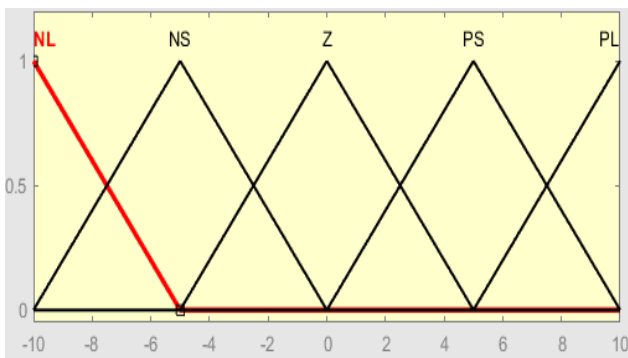


Figure 2a. Error Input

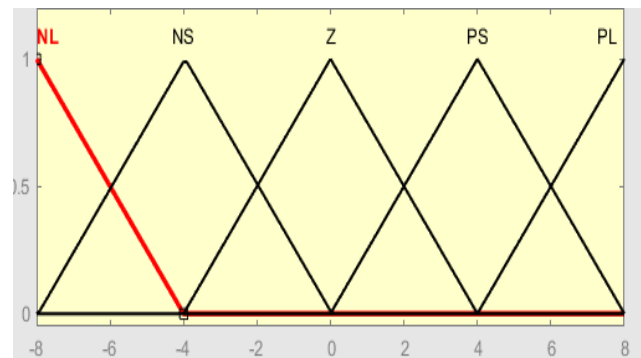


Figure 2b. Error Derivative Input

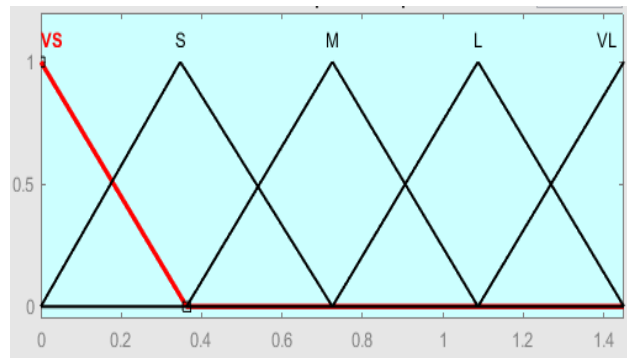


Figure 3. Kp Fuzzy Output

After defining inputs, outputs and their ranges, fuzzy control rules were defined based on if-then logic. Resulting rule table can be seen below.

Table 1. Fuzzy Rules

	NL	NS	Z	PS	PL
NL	M	L	VL	L	M
NS	S	M	L	M	S
Z	VS	S	M	S	VS
PS	S	M	L	M	S
PL	M	L	VL	L	M

4. Simulation Results

Main goal of the control systems is getting the quadcopter to desired position. This position was defined in three dimensional space as $x = 10$, $y=5$ and $z=20$. Error between these values and actual positions calculated by the model were given to PID controllers as an input. For Fuzzy-PID controllers, error and its derivative were given to Fuzzy system as an input.

After performing position control, angular velocities can be found from the simulation. Angular velocities are also necessary to find currents which are needed to supply to each motor. After simulation model was created, necessary outputs were sent to MATLAB workspace from Simulink and results were obtained for both controllers. Parameters used in this study can be seen from Table 4 at the appendix section (Lin et.al., 2016)

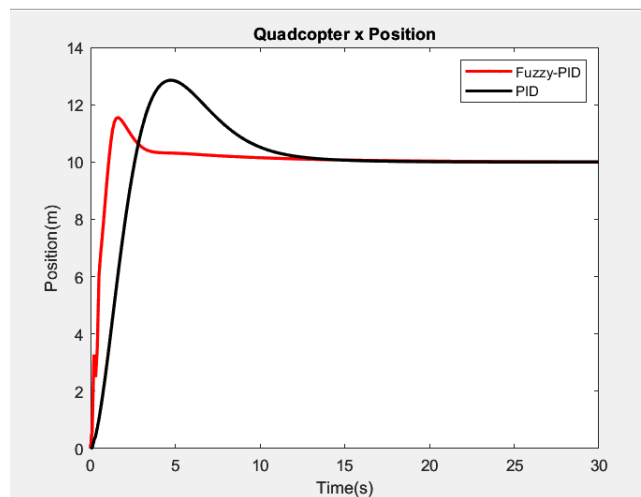


Figure 4. Quadcopter x Position

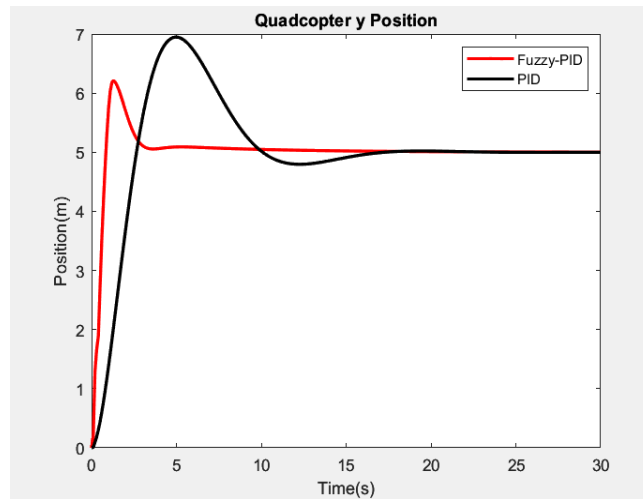


Figure 5. Quadcopter y Position

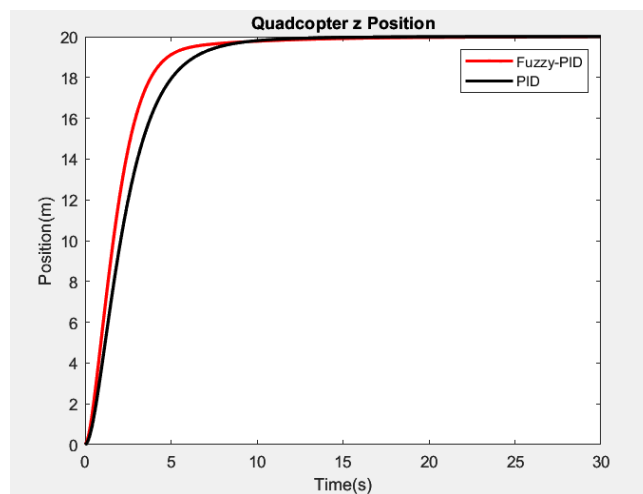


Figure 6. Quadcopter z Position

Figure 4 is the quadcopter’s position at x axis. U_2 controls the quadcopter’s position at this axis. Quadcopter’s position at y-axis is controlled with U_3 which can be seen in figure 5 above. Figure 6 shows the quadcopter altitude control. Both desired roll and pitch angles were calculated from the simulation before finding U_2 and U_3 . As can be seen from the figures 4,5 and 6, calculating PID gains with Fuzzy logic increased the system’s speed. Also, it had less overshoot than PID controllers. Actually, adaptive control is provided by Fuzzy logic with the time-dependent variation of the PID controller gains K_p , K_i and K_d .

Equations 23, 24, 25 and 26 were used to find angular velocities. Then, current values which are needed to supply to each motor were found by brushless DC motor equations.

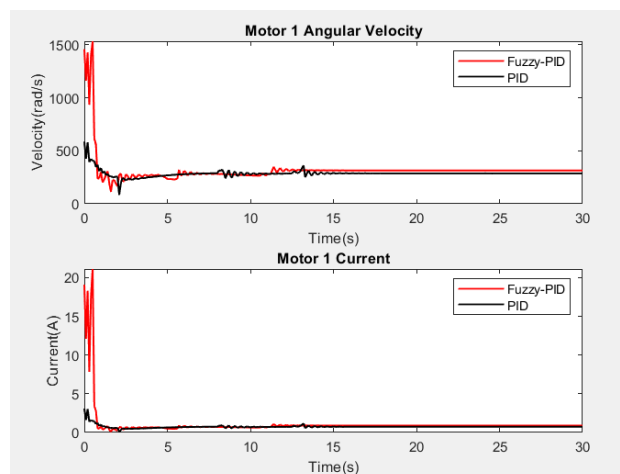


Figure 7. Motor 1 Velocity and Current

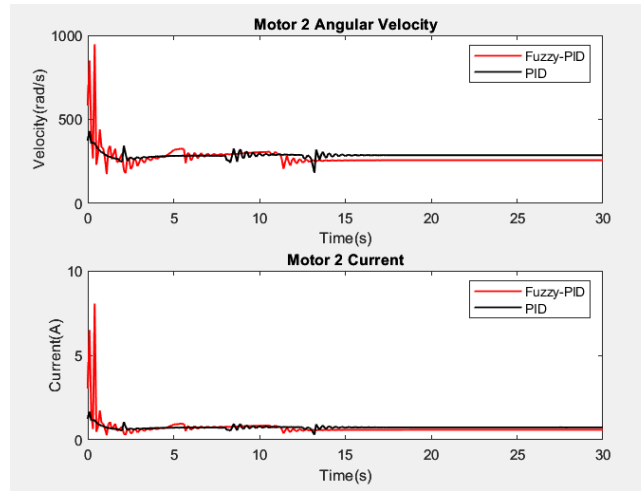


Figure 8. Motor 2 Velocity and Current

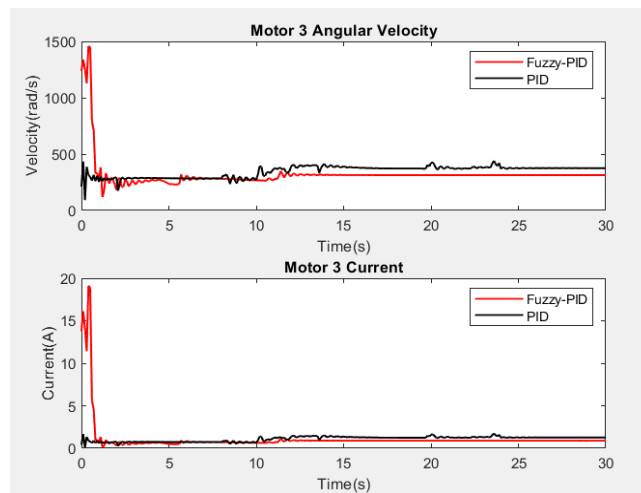


Figure 9. Motor 3 Velocity and Current

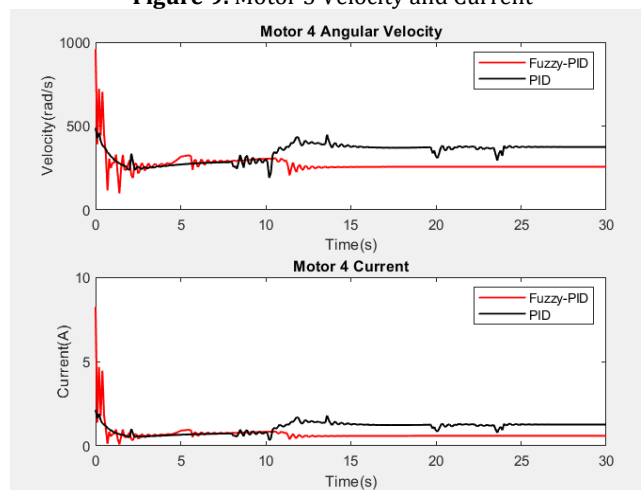


Figure 10. Motor 4 Velocity and Current

As a next step, some disturbances were applied to system to measure robustness of the proposed controllers. To compare the robustness of PID and Fuzzy-PID controllers, we added some effects for each direction. Firstly, in x and y directions 10 N extra force was applied to the system for 1.5 seconds. Applied disturbance can be seen below:

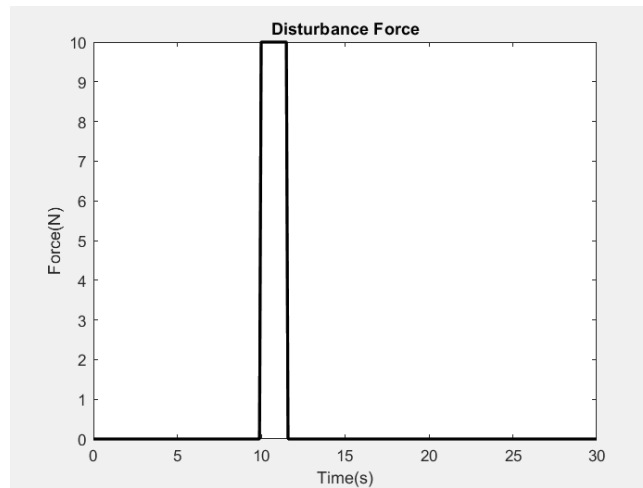


Figure 11. External Force

New results with disturbances can be seen below for both controllers in x and y directions.

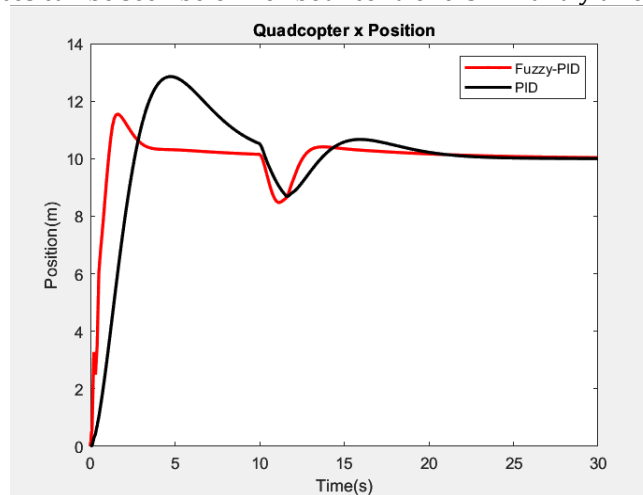


Figure 12. Quadcopter x Position with Disturbance

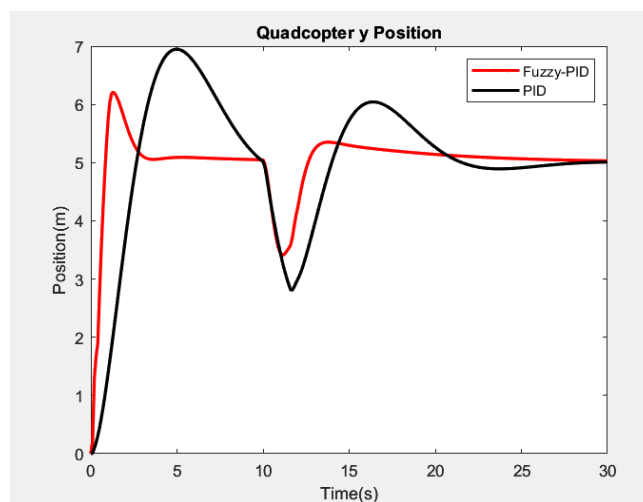


Figure 13. Quadcopter y Position with Disturbance

Figures 12 and 13 show the reaction of the controllers after external force application at 10th seconds. As can be seen, Fuzzy-PID controller was less affected by external disturbances. It also had faster response and recovered faster than PID controller. Fuzzy PID gave faster response since it is more robust than PID controller. It recovered faster with less overshoot and turned back to reference.

Secondly, to measure the performance of the controllers in z direction, mass of the quadcopter was increased from 1.05 kg to 1.8 kg at the 10th seconds. Mass increase did not create any effect on x and y directions.

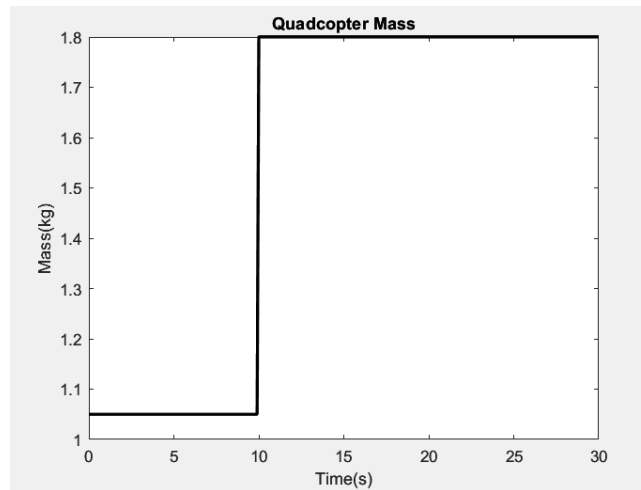


Figure 14. Mass Increase

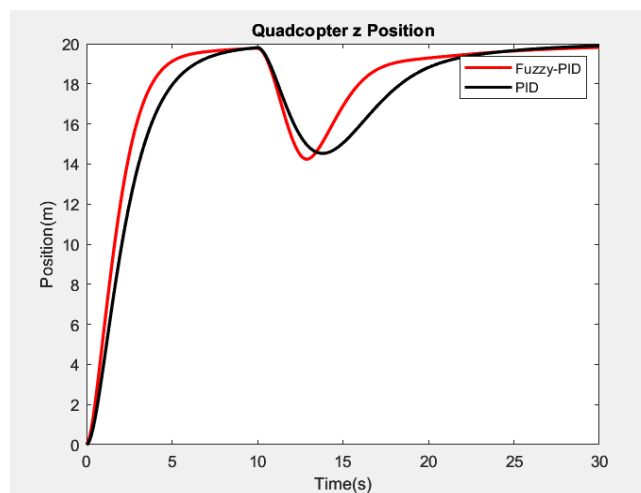


Figure 15. Quadcopter z Position with Disturbance

Similar behavior about the performance of the controllers can be seen also in figure 15. At 10th seconds, mass of the quadcopter was increased from 1.05 to 1.8 kg, Fuzzy-PID again adapted itself faster and tried to turn reference earlier than PID controller.

5. Conclusion and Discussion

In this study, PID and Fuzzy-PID control algorithms were developed to control position of the quadcopter in three-dimensional space. Firstly, simplified model for the quadcopter was selected and then free body diagram (FBD) of the model was obtained to find mathematical model of the quadcopter. Non-linear equations of motion were linearized before designing controller. Additionally, current values which must be supplied to each motor were calculated. DC motor can be selected by using this approach. Finally, some disturbances were added to model and robustness of the controllers was analyzed.

MATLAB and Simulink were used to simulate the system and obtain the results. Both controllers were implemented to the system in Simulink. PID parameters were found by trial and error method. In each trial, the model response was examined and the PID parameters were adjusted according to the system response. Increasing K_p caused more overshoot but less steady-state error. K_d was increased to control overshoot, also it helped system to adapt changes quicker, but increasing it too much caused instability problem. K_i value was used to reduce steady-state error. With Fuzzy-PID, gains were automatically adjusted according to the system response and adaptive control of the system was achieved.

According to the results, quadcopter can reach the desired altitude without error but with some overshoot for both controllers. However, fuzzy-PID algorithm significantly increased the speed of the system, also this approach has less overshoot than traditional PID method. Position error table with respect to time can be seen in table 2 for both controllers.

Table 2. Position-Error Table

Time (s)	PID X Error (m)	Fuzzy - PID X Error (m)	PID Y Error (m)	Fuzzy - PID Y Error (m)	PID Z Error (m)	Fuzzy - PID Z Error (m)
0	10.00	10.00	5.00	5.00	20.00	20.00
1	6.89	0.45	3.62	-0.73	16.01	14.43
2	2.23	-1.31	1.32	-0.70	10.34	7.90
3	-1.09	-0.53	-0.58	-0.11	6.17	3.79
4	-2.60	-0.33	-1.65	-0.06	3.58	1.76
5	-2.83	-0.31	-1.95	-0.09	2.07	0.88
6	-2.42	-0.28	-1.73	-0.09	1.21	0.54
7	-1.81	-0.24	-1.25	-0.07	0.73	0.40
8	-1.25	-0.20	-0.74	-0.06	0.45	0.32
9	-0.82	-0.17	-0.31	-0.06	0.29	0.27
10	-0.52	-0.15	-0.02	-0.05	0.19	0.22
11	-0.33	-0.13	0.14	-0.04	0.13	0.18
12	-0.21	-0.11	0.20	-0.04	0.09	0.15
13	-0.14	-0.09	0.19	-0.03	0.07	0.13
14	-0.09	-0.08	0.14	-0.03	0.05	0.11
15	-0.06	-0.07	0.09	-0.02	0.04	0.09

Detailed investigation of angular velocities and current values of motor 1 can be seen in table 3 below for both controllers. They are also in acceptable level and also relationship between them seemed true, for higher speeds more current is needed. According to table 3, disadvantage of the fuzzy method is that it requires higher speed and current to reach desired position. Therefore, more powerful motor and battery is required to apply this method.

Table 3. Current-Angular Velocity Relation

Time (s)	PID Current (A)	PID- Angular Velocity(rad/s)	Fuzzy-PID Current (A)	Fuzzy- PID Angular Velocity(rad/s)
0	3.09	586.54	19.08	1457.22
1	1.03	337.82	0.81	299.39
2	0.58	254.74	0.25	165.36
3	0.50	236.44	0.62	262.55
4	0.56	249.65	0.67	273.55
5	0.65	268.39	0.49	234.39
6	0.70	278.99	0.87	310.51
7	0.73	285.00	0.68	275.68
8	0.73	285.97	0.71	281.96
9	0.80	298.72	0.68	274.58
10	0.67	272.34	0.64	267.80
11	0.73	284.43	0.66	271.68
12	0.73	284.65	0.82	302.58
13	0.83	304.61	0.91	317.42
14	0.70	278.23	0.90	316.70
15	0.77	291.88	0.89	314.21

Finally, results showed that both control algorithms have highly satisfying results. Simple PID controller can be used for such complex systems that have six degrees of freedom and it can be combined with Fuzzy logic to increase performance. Today, quadcopters are very popular, and definitely their popularity will increase in the future. Therefore researches about controlling them will increase, too. This paper presents two simple and efficient ways to control quadcopter's position and to find necessary motor capacity. This method is easy to understand and also apply to real systems. It can be combined with other control algorithms like Sliding Mode Controller (SMC), convolutional neural networks (CNN) etc. In summary, it shows the power of the PID controller and its efficiency even in complex systems.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Gibiansky, A., 2012. Quadcopter Dynamics and Simulation. <https://andrew.gibiansky.com/blog/physics/quadcopter-dynamics/>
- Bouabdallah, S., Murrieri, P., Siegwart, R., 2004. Design and Control of an Indoor Micro Quadrotor. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004.
- Bozkurt, E., Dandil, B., Ata, F., 2020. Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracının Kayan Kipli Denetleyici ve Geri Adımlamalı Denetleyici ile Yönelim ve Yükseklik Denetimi. Fırat Üniversitesi Müh.Bil.Dergisi.
- Cedro, L., Wiczorkowski, K., 2019. Optimizing PID controller gains to model the performance of a quadcopter. 13th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport.
- He, Z., Long, Z., 2014. A Simple Attitude Control of Quadrotor Helicopter Based on Ziegler-Nichols Rules for Tuning PD Parameters. Hindawi Publishing Corporation The Scientific World Journal.
- Jirinec, T., 2011. Stabilization and Control of Unmanned Quadcopter. Luleå University of Technology Department of Computer Science, Electrical and Space Engineering.
- Li, D., 2020. Fuzzy PID Controller to control the attitude of Quadrotor UAV. Gyancity Journal of Engineering and Technology.
- Lin, X., Wang, Y., Liu, Y., 2019. Neutral-network based robust terminal sliding-mode control of quadrotor. School of Information and Control Engineering. Qingdao University of Technology, Shandong, China.
- Praveen, V., Pillai, A., 2016. Modeling and Simulation of Quadcopter using PID Controller. International Journal of Circuit Theory and Applications.
- Prayitno, A., Indrawati, V., Trusulaw, I., 2017. Comparison of PID and Fuzzy Controller for Position Control of AR Drone. International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics.
- Rahimi, M., Hajighasemi, S., Sanaei, D., 2013. Designing and Simulation for Vertical Moving Control of UAV System using PID, LQR and Fuzzy logic. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE).
- Reizenstein, A., 2017. Position and Trajectory Control of a Quadcopter Using PID and LQ Controllers. Department of Electrical Engineering, Linköping University.
- Romero, L. E., Pozo, D. F., Rosales, J. A., 2016. Quadcopter stabilization by using PID controllers. Maskana, 5, 175–186. Recuperado a partir de <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/585>
- Sabo, C., Cohen, K., 2012. Fuzzy Logic Unmanned Air Vehicle Motion Planning. Hindawi Publishing Corporation.
- Suiçmez, E., Kutay, A., 2014. Dört Rotorlu Bir İnsansız Hava Aracının Geri Adımlama Yöntemi ile Yol Takibi Kontrolü. Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi.
- Zouaoui, S., Mohamed, E., Kouider, B., 2018. Easy Tracking of UAV Using PID Controller. Periodica Polytechnica Transportation Engineering.

Appendix

Table 4. Parameters

Parameter	Value
I_x	0.0175 kgm ²
I_y	0.0165 kgm ²
I_z	0.0035 kgm ²
L	0.72 m
b	$3.13 \cdot 10^{-5}$ Ns ²
d	$3.13 \cdot 10^{-5}$ Ns ²
g	9.81 m/s ²
m	1.05 kg
ρ	1.225 kg/m ³
A	1.55 m ²
K_v	0.01 V/rad/sec
K_t	0.01 Nm/A

Table 5. PID Parameters

	Altitude	x	y	Roll	Pitch
P	1.2	1.5	1.5	0.3	0.45
I	0.2	0.02	0.02	0.1	0.1
D	2	0.6	0.6	0.5	0.6

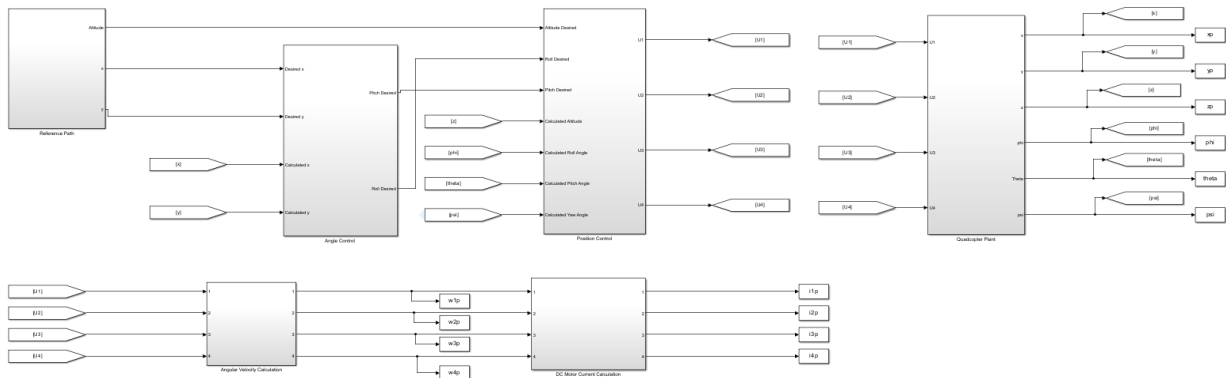


Figure 16. Simulink Model of the System



EFFECT OF THE CURVATURE PARAMETER AND ITS CLASSIFICATION ON LANDSLIDES

Seda ÇELLEK^{1*},

¹ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, Türkiye

Keywords

*Landslide Susceptibility,
Curvature,
Concave,
Convex,
Parameter.*

Abstract

The first question that generally comes to mind about the curvature parameter is whether this parameter is suitable for the study area. This question uses every parameter to be asked, but some effects that are implemented incorrectly, such as curvilinearity, raise question marks. As a result of technical errors and conceptual confusion regarding the parameter, the landslide area defined as concave by one researcher may be defined as convex by another researcher. For this reason, some researchers state that they contradict the literature and produce results contrary to their expectations. Due to such negativities, there is no consensus in the literature regarding curvilinearity parameters. This determination was used for 64 areas selected for curvature parameters in three different classes and the prices of their changes in total. By examining the maximum and minimum distributions in the landslide area, it was investigated what kind of change it caused in concave, convex and flat areas depending on the terrain. As a result of the analysis, it was revealed that class intervals that could not be determined correctly resulted in cracks in the landslide capacity proportional distributions. Thus, the study achieves the main goal that will facilitate the use of the curvature parameter.

EĞRİSELİK PARAMETRESİ VE SINIFLANDIRILMASININ HEYELANLARA ETKİSİ

Anahtar Kelimeler

*Heyelan Duyarlılık,
Eğrisellik,
Konkav,
Konveks,
Parametre.*

Öz

Eğrisellik parametresini seçerken akla gelen ilk soru, bu parametrenin çalışma alanına uygun olup olmadığıdır. Genellikle bu soru kullanılan her parametre için sorulur, ancak eğrisellik gibi uygulama hatası yapılan bazı parametreler soru işaretlerine neden olur. Parametre ile ilgili yapılan teknik hatalar ve kavram karmaşası sonucu, bir araştırmacı tarafından içbükey olarak tanımlanan heyelanlı alan, diğer bir araştırmacı tarafından dış bükey olarak tanımlanabilmektedir. Bu nedenle bazı çalışmalarda, araştırmacılar literatürle çelişmekte ve kendi alanlarının beklentilerinin aksine sonuçlar verdiğini belirtmektedir. Bu gibi olumsuzluklar nedeniyle, eğrisellik parametresi konusunda literatürde fikir birliği sağlanamamaktadır. Yapılan bu çalışmada seçilen 64 alan için üç farklı sınıftaki eğrisellik parametresi kullanılmış ve bunların toplamdaki değişimleri incelenmiştir. Heyelanlı alandaki maksimum ve minimum dağılımlar incelenerek bunun araziye göre içbükey, dışbükey ve düz alanlarda nasıl bir değişime neden olduğu araştırılmıştır. Analizler sonucunda, doğru belirlenmeyen sınıf aralıklarının, heyelan alanlarının oransal dağılımlarında farklılıklar çıkarttığı ortaya çıkmıştır. Böylece çalışma ana hedefine ulaşarak, eğrisellik parametresinin kullanımını kolaylaştıracak ip uçları vermiştir.

Alıntı / Cite

Çellek, S., (2024). Effect of The Curvature Parameter and Its Classification on Landslides, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(1), 49-63.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

S. Çellek, 0000-0001-9675-5691

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	16.11.2023
Revizyon Tarihi / Revision Date	12.01.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	12.01.2024
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: sedacellek@ahievran.edu.tr, +90-386-280 38 20

EFFECT OF THE CURVATURE PARAMETER AND ITS CLASSIFICATION ON LANDSLIDES

Seda Çellek^{1†},

¹ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, Türkiye

Highlights (At least 3 and maximum 4 sentences)

- There is no consensus on the parameter in the literature
- The first question that comes to mind is whether it is suitable for my field of study
- Some researchers use more than one curvature class and create a separate classification
- The most crucial error seen in the studies is encountered even in the most straightforward classification, concave, flat, and convex groupings

Graphical Abstract

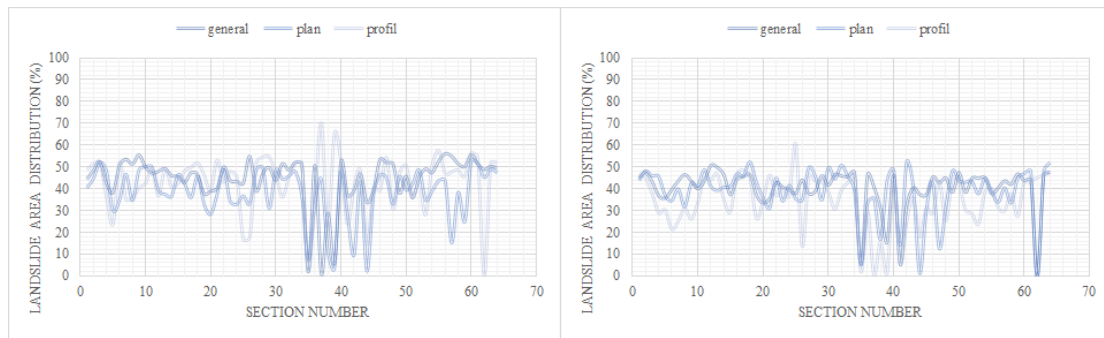


Figure. Perfect Classification and Automatic Classification C for % Distribution of Landslide Areas

Purpose and Scope

This study was prepared to find the cause of the problems encountered in the curvature parameter used in landslide susceptibility maps.

Design/methodology/approach

Parameter selection in landslide susceptibility studies is a difficult process. Creating subclasses of the selected parameter is an even more challenging process. The curvilinearity parameter, which has differences in its applications in the literature, was used in this study. In literature research, it has been seen that the parameter has different uses in different studies. For this purpose, 64 landslide maps with a scale of 1,25,000 were selected from Turkey. The program automatically classified and produced a secondary classification that was considered excellent. Error rates between both classifications were determined.

Findings

In the study, it was seen that some studies took the classifications incorrectly and made incorrect mapping as a result of this error.

Research limitations/implications

The study serves as a warning for future studies. It is highly recommended to take this article as a reference when creating subclasses of the curvilinearity parameter.

Practical implications

With this study, an attempt was made to eliminate the conceptual confusion in two of the three subclasses used in the curvilinearity parameter. Correct use of + and - markings in concave and convex classification is given.

Social Implications

In this article, the correct use of the curvilinearity parameter is given. Because there is information pollution in the literature due to incorrect use. As a result of a small number of articles produced with incorrect classification, incorrect map printouts were obtained. Taking this study as a reference will help prevent such mistakes.

Originality

Landslide susceptibility studies are produced in thousands of numbers annually, but studies on parameters are not carried out. It is a first and has a unique value because it is the first analysis study on the curvature parameter.

[†] Corresponding author: sedacellek@ahievran.edu.tr, +90-386-280 38 20

1. Introduction

Curvature, a three-dimensional property of a two-dimensional surface, represents the morphology of the slope. In this way, slope curvatures and slope shapes are revealed (Kornejady et al. 2017). The topography and the slope shape play an influential role in the emergence of landslides. The effect of the parameter on the landslide formation is examined by taking into account the changes in the curvature ratios (concave, convex, flat) and the water and sediment accumulation on the surface, slope, and aspect (Elmacı et al. 2017). These definitions indicate that the parameter has a significant effect on the occurrence of landslides. The confusing question is, why is there no consensus on its use in sensitivity maps when it is such a robust parameter? Or why, while some researchers defend the power of the parameter, some researchers find the parameter inconsistent and useless. In this research, the properties of the parameter were investigated, and a study was conducted on how the parameter could be transformed into a more robust form.

Literature research and application studies have shown that the underlying problem is the lack of understanding of the use of the parameter. Another problem is the errors in the concepts used. In addition, this confusion of the concepts poses a problem at that point when creating parameter classes. While there are class intervals that can be used more standard, confusion and lack of consensus cause chaos on this issue.

The biggest problem in the studies is the chosen curvature class. Again, the literature reveals definition errors in the base classes used. Some researchers confuse plan curvature with a different curvilinearity, and errors occur in the subclasses created. They (He or she) defines the concave area as convex in this way, and the landslide frequency ratios are wrong. Gökçeoğlu and Ercanoğlu (2001) and Özşahin (2015) emphasised that the evaluations regarding the parameter may cause some uncertainties.

Another mistake is in classification. Some researchers, who create three classes with automatic class selection, call these classes outer-inner and flat. This is the basis of the error. In the use of parameters, of course, as in other parameters, the selection of the land and the suitability of the parameter are the most fundamental issues. However, this does not constitute the main subject of errors in using the parameter.

2. Material and Method

2.1. Subclassing The Parameter And Errors Made

Since the parameters are produced directly from the topographic map, the reliability of the data is also sufficient. The main problem in parameters is the preparation of subclasses. Selected grade ranges should reflect terrain conditions as much as possible. The only issue with consensus in the literature on this subject is that the values of zero and around represent flat and near-flat areas. The point of difference of opinions is whether positive and negative values should be considered concave or convex. It is this distinction that is the starting point of errors. Based on this, what kind of curvature is used in the study. Because different curvature values make a different negative and positive classification, most studies use the curvature option of the ArcGIS program produced by ESRI for parameter generation. Plan and profile curvatures can also be made easily by using the same option (ArcGIS). For this reason, the classifications given on the company's page were taken as a basis (Url-1). Table 1 shows which sign is used for which curvature. As known, 0 and close values represent flat and near-flat areas (Figure 1)

When Table 1 is examined, it is seen that the Profile and Longitudinal curvatures have the same marking. It is seen that Plan, Tangential, Cross-Sectional, and General curvatures have opposite markings. Unlike these five curvatures, there is a graded classification from Low to High in total curvature since it is not based on calculation. After choosing the curvature type, classification is started. Classification intervals differ in different studies. In these classifications, especially in rigorous studies, the classifications are restructured and narrowed. The parameter is evaluated gradually in these sensitive studies, and a second classification is made. In such studies, areas without landslides are excluded from the classification.

The literature shows that the parameter is generally evaluated with a triple classification consisting of concave, flat, and convex. For example, in insensitive studies, gaps are reduced to two, and flat areas where landslides are rarely or never seen are excluded from this classification. It is thought that one of the problems encountered in this type of classification is experienced during the determination of the interval values of flat areas with zero values. Here, it is seen that there are differences in taking zero of flat areas, which is thought to be a consensus about the parameter in the literature. For example, El-fengour et al. (2021); used triple classification in the study areas and determined the limit values for flat areas between “-0.05 and 0.05”. There are tiny differences in the transitions between “-” and “+” values in the study areas, and the transitions between these values can show vast differences. The transitions between the “-” and “+” values of the land have a significant role in the errors occurring in the class value ranges.

In the literature, there are no four-class classifications. In general, classifications in parameters can be made as single or double. In the literature, at first glance, although it seems that no one uses it in 4-class classifications, as in the dual classification, some people use this classification by reclassifying them.

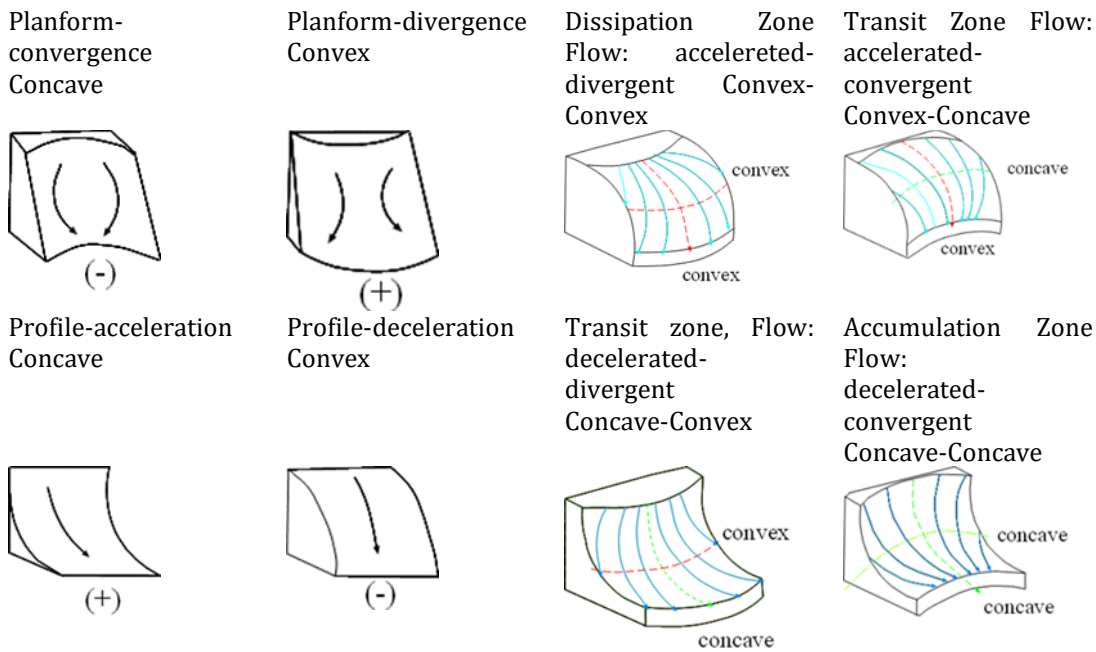


Figure 1. Plan and Profile Curvature

Its use is the same in all curvature classes. Unlike the others, the total curvature does not calculate; it makes the classification in the form of grading, from low to high.

Table 1. Concave and Convex Markings According to Curvature Types

Type	Concave	Convex
Profile	+	-
Plan	-	+
Tangential	-	+
Longitudinal	+	-
Cross-Sectional	-	+
General	-	+
Total	Low-High	

It is used in classifications created by giving value ranges, apart from the classification above. However, some are employed by naming them. In the literature, some studies prepare 5-class classifications using different names. Anis et al. (2019) used plan and profile curvature. He applied the same classification method for both of them separately. They were reclassified using a natural break from Jenks. He expressed the quintuple classification he created with numbers and names (very low, low, moderate, high, very high). Dahal (2014), on the other hand, used a different nomenclature from Anis et al. (2019) (Convex, semi-convex, planar, semi-concave, concave) despite using five classes. In their study, Posner and Georgakakos (2015) created five classes for tangential curvature planar, medium, and high values as positive and negative. Pimiento (2009); profile and plan curvatures are divided into five classes: strongly convex, weakly convex, flat, weakly concave, and strongly concave. However, it was reclassified later and reduced to 3 classes strongly concave, weakly convex, and flat classes.

In studies, concave and convex states can be classified into six classes (Özdemir and Altural 2013; Karaman 2019). Especially in the literature, the 6-class interval is widely used. For example, in Günini (2019), it is used six classes in his study and divided the -1 to 1 into four classes to balance the frequency ratios. He did not calculate the class ranges he changed and flat and near-flat areas (lakes), and he thought that this had a positive effect on the sensitivity map. Some researchers make the classification more precise.

Apart from these, while no study uses seven classifications, studies use 8 and 9 class intervals. For example, Costanzo et al. (2014) used 8-interval classification; Convex/concave, planar/concave, concave/convex, planar/planar, concave/planar, convex/convex, planar/convex, convex/planar. On the other hand, Li et al. (2021) has divided into nine classes for plan and profile curvature, using natural Jenks refraction. The point that draws

attention here is that it displays the plan and profile in a different class under a single parameter for those who use multiple classifications.

Another expression used when talking about landslide distribution in studies is balanced distribution. It is seen that this expression is generally used because the two classes are close to each other. Even if one class is slightly more, talking about a balanced distribution is possible. Instead, the expression of homogeneous distribution is frequently used. However, these expressions are commonly used in convex and convex distributions, although very rarely, flat class is also included in some studies. Klose et al. (2014) stated that landslides in the study areas occur in negative or flat areas (-1 to 0) and have a fairly stabilising effect. To stabilise the statistical data, they narrowed the class range in this way. Aras (2021) stated that in the study area, flat areas are more corrugated than others; however, landslides are evenly distributed and even more common on convex slopes. Conforti et al. (2014) determined that the convex and convex slopes are relatively homogeneously distributed in the study areas. Still, the concave (-) slopes' landslide index is higher than the plan curvature. Özşahin and Kaymaz (2013) observed that concave and convex areas are homogeneously distributed in the study areas, but flat areas are more. However, they determined that while flat areas are insensitive to landslides, the highest sensitivity is on convex slopes. In the study of Şahin (2017), landslide areas were sensitive to concave and convex topographies within three factors. After the results are obtained, it is impossible to judge which topographic structure can fully affect landslide susceptibility. For this reason, a more detailed investigation and discussion of the effects of these factors on landslide susceptibility will only be possible after the results of the feature selection algorithms. Çellek (2013), on the other hand, landslides occurring on concave and convex slopes are evaluated together.

Some studies have determined that although a specific class covers more area in the area, it has a low landslide frequency. Eker (2013), on the other hand, found that concave slopes have a higher landslide index, although convex curvature is more in the study area. It is also stated that there are very few flat areas in the study area, but landslides occur in almost all of them and that the landslide index is higher than the convex areas.

The given "+" and "-" values also vary. The "-" value denotes concave in profile curvature, while the "+" value in plan curvature denotes concave. In other words, the first stage of the chain of errors mentioned in the literature occurs here. Likewise, when the general definition is desired, the marking is as in the planform. Unfortunately, some studies ignore this. In general, the approach favours taking the concave as positive and the concave as negative. Kahyan (2021), on the other hand, accepted the opposite, that is, the negative as convex and the positive as concave, without specifying any curvature feature. As a result, he classified the most sensitive areas as convex and the ineffective ones as concave. The higher the negative value, the higher the probability of a landslide occurring. Yüksel (2007) and Taşkanat (2020), on the other hand, approached the subject differently and stated that the degree of saturation increased depending on the surface water drainage. The researcher used general curvature in his study and called (-) values convex. It is a contradictory statement to the general approach.

Another related mistake is that the deceleration-acceleration and divergence-convergence pairs are used for the wrong type of curvature. When the definition of curvature is incorrect, the "+" and "-" values are incorrect, and a researcher who tries to deduce the valley ridge from here interprets the basin entirely incorrectly.

2.2. Effect Of Parameter On Landslide

Slope morphology is one of the most critical factors in landslides. Whether the slope is concave or convex is influential in the formation of landslides (Çil 2009). The parameter controls the state of groundwater and surface waters (Ghobadi et al. 2017). Also, the effect on this hydrological cycle; is the primary determinant of groundwater in the field (Pradhan and Kim 2017), allowing drainage from the slope surface or enabling it to accumulate into the slope, controlling the acceleration or deceleration of the hydrological flow (Çellek 2013).

Irregularities on the slopes affect the stress distributions negatively, and the internal and external stresses of different topographic shapes are also different (Avcı 2016a). In addition, the parameter indirectly affects the geotechnical properties of the material forming the slope.

The parameter controls the state of the superficial materials. Controlling the water cycle increases microclimatic conditions and soil properties and affects the transport of sediments on the slope (Özşahin 2015). It is a very useful parameter in distinguishing the erosion and deposition sections of the land (Wilson and Gallanat 2000).

In the relationship between landslide occurrence and curvature, the more positive or negative a value is, the higher the probability of a landslide occurring. It was mentioned that landslides in 46 studies were concave, 24 studies convex, and 7 studies flat. Although landslides can be seen more frequently in an area other than today, it is generally said to be inhomogeneous mountains in seven studies. In these 75 studies, it can be said that landslides are more intense in two of some classes.

There are studies stating what type of landslides they encountered in which class in the studies reviewed. Table 2 was created with these data (Url-2).

Table 2. Landslides by Curvature Classes

	Flow	Slide	Circular	Rotary	Complex	Rockfall	Debris
Plan concave	X	X	X				
Profile convex	X						
Concav	X		X	X	X		X
Convex	X	X		X		X	
Flat	X	X					
Plan convex	X						

1. Flow, 2. Slide, 3. Circular, 4. Rotary, 5. Complex, 6. Rockfall, 7. Debris

When Table 2 is examined, it is seen that there are researchers who encounter flow-type movements in all kinds of slopes and all situations. Rockfall-like movements are seen primarily on convex slopes. Again, sliding-style movement can be seen in all three slope classes.

Since the morphology that develops after a landslide is concave, as, in every landslide mass, there is a general tendency that convex slopes are more prone to landslides than concave slopes (Hoek and Bray 1977; Jakob 2000). On the contrary, some argue that concave slopes are more susceptible to landslides (Görüm 2006; Çil 2009). Despite these two contrasting examples, many researchers used these parameters in their studies (Mazman 2005). For General and Plan Curvature, Negative values indicate concavity, and the more negative the value, the higher the probability of a landslide (Moradi and Rezaei, 2014). Özşahin (2015) determined that the frequency ratio of the slope shape is higher on concave slopes in the study area. Still, in some studies in the literature, he stated that convex slopes are more suitable for landslide.

For this reason, to eliminate the uncertainty, the Analytical Hierarchy Process (AHP) values of the parameter were assigned according to the frequency ratio result. On the contrary, Chen et al. (2017) and Hong et al. (2017), on the other hand, encountered landslides on convex slopes in the study area while expecting landslides to be on concave slopes and supporting this with literature and flow regime. Kayhan (2021), on the other hand, argues that the researchers do not have a complete consensus on the effect of the curvature parameter on the landslide, as in the same aspect map.

2.3. Landslides Occurring On Concave Slopes Effect Of Concave Slopes On Landslide

The main reason why more landslides are seen on concave slopes is that the morphology that develops after the landslide is concave, as in every landslide mass. The conditions before this landslide affected the concave old landslides in their renewed movement (Görüm, 2006).

In general, concave slopes are most sensitive as they relate to surface and subsurface flow (Zêzere et al. 2007). Many researchers explain this situation (slopes with concave upward surfaces) by retaining more and longer slope rainwater on slopes (Lee and Min 2001; Dai and Lee 2002). After a rain, ground cover on a concave slope can contain more water and retain it longer than on a convex slope (Jakob 2000; Moradi and Rezaei 2014). This process is known as runoff accumulation. Curvature is a measure of the area of land that contributes surface water to an area where water can accumulate on the surface. Therefore, water is more likely to seep into the slopes and thus trigger landslides (Dahal 2014). Poor drainage causes leakage in front of the ponding and accumulation zone on backward or concave slopes (Lee et al. 2003a). In general, concave slopes are potentially unstable as they concentrate water at the lowest point and contribute to adverse hydrostatic pressure developments (Kayastha 2015). Pore pressure can rise rapidly at the deposition point (Meinhardt et al. 2015). It increases the concentration (pressure) of the pore water (space water) and thus the saturation of the material (Komac 2006). Therefore, water overloads the slope, affecting shear stress (Chena et al. 2017). They are effective on landslides by affecting the groundwater conditions more or less at the rate of permeability of the ground (Görüm, 2006).

It is understood that the erosion power is much higher on concave slopes since the currents will move in the direction of approaching each other (Pradhan and Kim 2017). Therefore, material accumulates as unconsolidated colluvium at the base of the slope, making these areas highly susceptible to erosion and gully formation. This finding was corroborated in a study by Kakembo (1997), in which GIS applications showed that troughs and their debris cut approximately 85% of the accumulated colloid in the study. These areas are more susceptible to landslides since the surface waters on concave slopes have higher carving ratios than on convex slopes. (Çellek 2013). The concave portion of the slope will be susceptible to the accumulation of abrasive material. The deposition of slope materials from debris flows and shallow landslides indicates that transport is faster on concave slopes than on linear slopes (Afungang et al. 2017).

2.4. Effect of convex slopes on landslide

Flow-type landslides are more likely to develop on convex slopes (Harrison et al. 2008). The main reason here is the presence of a free surface in front of it and the potential for more effortless movement (Biber 2019). Since there is no obstacle to holding the material piled up on convex slopes due to gravity, excessive rain, slope, and other factors, it is thought that the accumulated material will gain momentum with these factors (Biber 2019). The velocity varies according to the amount of sediment transported and the linear structure of the slope where they are collected. However, the highest velocity was recorded with rockfalls on convex slopes (Afungang et al. 2017). Ermini et al. (2005) emphasised that slips on convex slopes were observed in the lower and middle parts of the heel. The heel part where the material accumulates (Ermini et al. 2005) and the part where the material breaks (Avci, 2016b) show a convex profile.

The convex part of the slope is more susceptible to erosion with varying topographic slopes. In heavily drained areas, the landslide mass curves outward. Mostly convex slope-shaped, rough surface topography and flow channel accumulation zone are evident (Aksoy 2010). In many places, convex slopes mark outcrops of strong bedrock in loose rock. (Moradi and Rezaei, 2014).

There are also studies stating that convex slopes are stable against landslides. For upwardly convex sloping faces, the situation will be the opposite of concave sloping (Ahmed et al. 2014). After precipitation events, water flows through areas of convex curvature and accumulates in areas of concave curvature. On the contrary, studies state that such slopes are more consistent. For example, convex slopes are more inclined than concave slopes. Therefore, soil moisture is relatively low on convex slopes due to the rapid movement of water. Convex slopes are more stable as they distribute the current more evenly (Kayastha 2015). Convex slopes allow drainage of surface waters. The convex disperses water better to neighbouring regions, resulting in a more consistent pore water pressure distribution (Meinhardt et al. 2015).

2.5. Effect Of Flat Areas On Landslide

There are very few studies that have encountered landslides in flat areas (Yüksel 2007; Ohlmacher 2007; Akıncı et al. 2010; Avci 2016b). Çelebi (2021), on the other hand, used the plan curvature and detected the landslides in the straight section. Again, Abe and Ziemer (1991) and Altürk (2019) detected landslides in flat and concave areas.

2.6. Negatives In Using Parameters

Some studies argue that the parameter is ineffective alone and will be more meaningful if used with specific parameters. This parameter is mainly evaluated with ground and surface waters. There are even studies that associate it with precipitation. In their research, Chena et al. (2017) recommend studying the soil texture parameter and this parameter. This is because the parameter does not come out in the expected values.

On the other hand, inclination angle and aspect effectively produce the parameter. It is thought to be associated with these parameters, albeit indirectly. It is even possible to think that the height can be effective in the material transport distance. The landslide susceptibility is high in concave and convex areas and is evaluated as the slope rather than the slope shape.

In some studies, the parameter was found to be ineffective, and it was stated with which parameters it was ineffective. Dai and Lee (2002) found that slope shape and proximity to drainage parameters were not influential in forming landslides in the study area (Yüksel, 2007). Altural (2012), it is evaluated that the slope rather than the slope shape is more effective in the high landslide susceptibility in concave and convex areas in the study area. Şahin (2017), in his study, determined that the plan and profile curvature and the drainage density factors were the minor weighty factors. The same feature draws attention in these two studies. Water is also ineffective in areas where the curvature is not effective either.

One of the most interesting details about the use of the parameter is the scale used. Although the parameter is not suitable for small scales, it provides more accurate results at large scales. In short, the parameter is more useful in high-scale field studies. Booth et al. (2009), in the study area, it is expected that irregularities in the landslide area, especially in the crown, wings, and accumulation zone, will be observed. Accordingly, concave and convex-shaped slope views will emerge. However, these changes are not distinctive for small-sized landslides and landslides that lose their shape over time (Aksoy 2010). This suggests that the smallest-scale variations of these parameters do not represent well the physical processes of landslide triggering, as indicated in some previous studies Freer et al. 2002; Tarolli and Tarboton 2006; Paudel et al. 2016).

Another issue is the naming of the parameter. Slope curvature can be included in the classification as slope geometry. This slope shape also includes curvature and length parameters (Hasekioğulları 2010). However, the correctest name for the parameter among these is slope curvature.

Again, one of the biggest problems with the parameter is the lack of a standard for the curvature parameter among researchers and other parameters (Başara 2021). The most significant limitation of the parameter is the absence of a generalisation to be used in classification. In the studies that do not pay attention to the curvature used, the subject is carried in different directions, creating an ineffective impression of the landslide. Although the slope shape parameter is not widely used in landslide susceptibility assessments, it is considered in some studies (Yüksel, 2007). Although there is a tendency in the literature that convex slopes are more susceptible to landslides than concave slopes, there are opinions on the contrary which argue that concave slopes are more susceptible to landslides. Başara (2021), in his study, showed that the curvature parameter was not suitable for the study area since all the methods he created were close to each other in the curvature classes.

Another difficulty encountered in the use of this parameter is that it becomes difficult to collect statistical data on this parameter because of the shape of the slopes changes after the landslide (Gökçeoğlu and Ercanoğlu 2001).

In the literature, it is seen that some curvatures are mismarked. For example, studies use the phrase that positive values in plan and profile curvatures indicate that the slope surface is convex (convex, peak), negative values indicate that the surface is concave (concave, pit), and a zero value indicates that the surface is linear. This contrasts with the program's markup because plan and profile Curvatures have opposite markings.

In order to examine the errors in the parameter classes in the study, parameter maps of general, plan, and profile curvature were created on 64 randomly selected landslide maps. The results are analysed comparatively. The study formed classification groups consisting of concave, convex, and flat.

According to the general plan and profile curvature, class ranges were prepared for 64 study areas. First, three classes were selected, and the graphs of the values prepared according to the automatic assignment were drawn. Next, these 3 class ranges are split into - and + values. The zero value is reduced to the most sensitive value possible. This new classification is called perfect classification. The ideal classification was prepared in the same way for the other groups created. The original and ideal classification for all fields is given in Figure 2.

When Figure 1 is examined, the percentage distributions of all areas show homogeneity in the flat area, while it shows different distributions for concave and convex. The differences in the distribution are due to the profile curvature. While the distribution for the general and plan curvatures shows similar characteristics, the profile curvatures are distributed on the opposite side of them. The biggest reason for this is that the plan and the general have the same marking, while the profile curvature has a different marking. There is a more homogeneous distribution than automatic in the percentages of distribution prepared for perfection. The classes showed close distribution in all curvatures according to the other classification. The values of all three classes show settlement in a particular area. If an evaluation is made between the original class and the perfect class, all classes have a different distribution. Percentage distribution changes in concave, flat, and convex areas presented remarkable differences. These class changes were clearly seen in all three curvatures.

In concave areas, the plan curvature has a distribution of around 50%, while this value has changed to values ranging from 0 to 60% for perfect classification. General and plan curvatures have lower and scattered values compared to the profile. In perfect classification, an increase is observed in the percentage values of these two curvatures.

When the distribution of flat areas according to curvature is examined, it is seen that they have an approximately homogeneous distribution according to all three curvature types within specific limit values, except for exceptional plots. However, when examined in perfect classification, there is a severe change in the % distribution of all areas. Areas with an overall distribution of between 20% and 60% were severely dispersed, and values ranged from 0 to 100.

Convex areas show an opposite distribution of convex areas. While the plan and general curvature were together again, they were located on the opposite side of the profile. Compared to the other two of the profile curvature, the result of the significant difference is also evident here. However, in the perfect classification, these contrasts disappeared, and a more homogeneous distribution was achieved in all three curvatures.

Concave areas showed a distribution as in all area % distribution charts. The profile curvature gave distributions on the opposite side to the plan and overall curvature, that is, at high values.

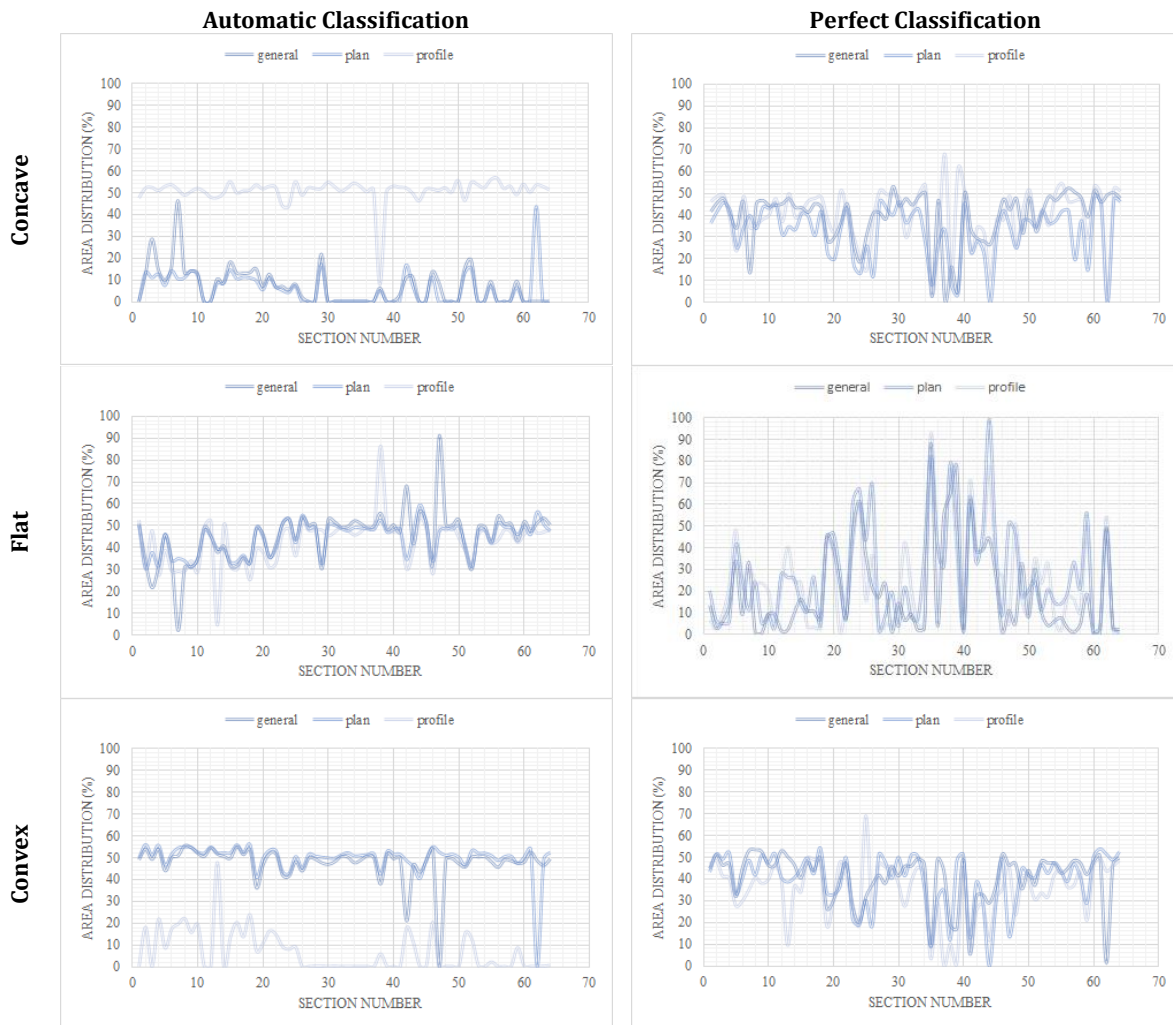


Figure 2. Perfect Classification and Automatic Classification Prepared for % Distributions of all Area

Strategy and general curvature values share lower percentage values. In concavity, which shows a homogeneous distribution in perfect curvature, the profile curvature, albeit slightly, gives slightly higher percentage values than the others.

When the distributions for flat areas are examined, the values varying between 30 and 60% show an approximately homogeneous distribution for all curvatures when the exceptions are ignored. In perfect classification, on the other hand, these values show a near homogeneous distribution in a different area between 0 and 50.

Finally, when the convex values are examined, it is seen that they have the opposite distribution of the concave. When the exceptional layouts are ignored, the distributions are around 50% in the plan and general curvature. When the profile curvature is examined, it is seen that these values are distributed around 10%. When the distributions for perfect classification are examined, it is seen that it gains homogeneity again. Still, half of this distribution is between 55% and 25%, and the other half has values ranging from 60% to 0%.

Landslide densities were calculated using the formula given below for the study area.

$$Landslide Area Density (\%) = \frac{Landslide Area of Parameter Subclass (km^2)}{Landslide Area (km^2)} \quad (1)$$

In Figure 3 the % distribution created for landslide areas is seen. Likewise, the original and perfect classifications were prepared within this group, and the opportunity for comparison was provided.

The most crucial issue for the studies already done is their distribution according to the landslide frequency, according to concave, flat, and convex areas. In Figure 4, distributions according to landslide densities are given.

While the % distributions prepared according to the concave slopes show a nearly homogeneous distribution in all three curvature types, the landslide distributions give a higher rate in the parameter of the general curvature.

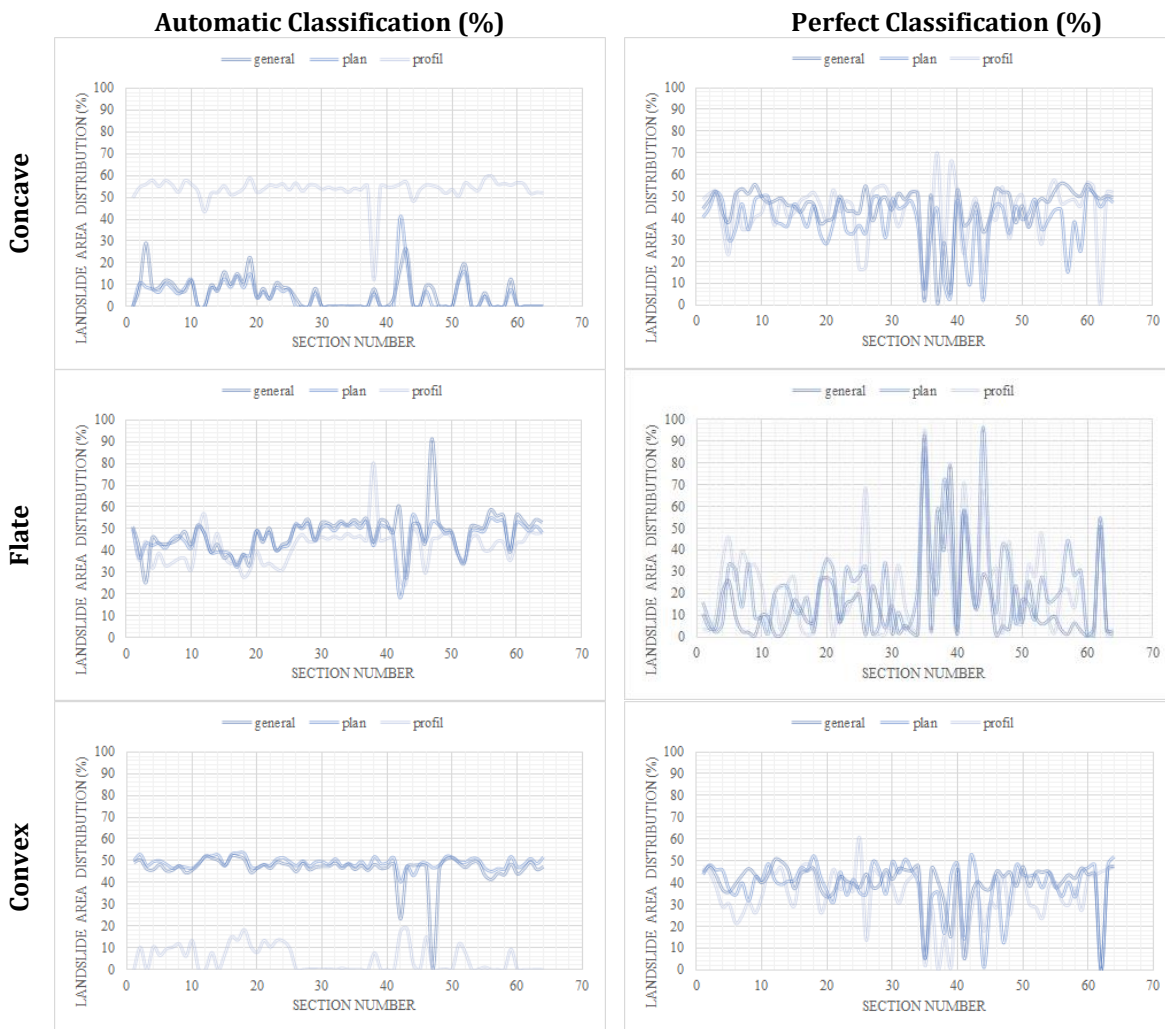


Figure 3. Perfect Classification and Automatic Classification for Percent Distribution of Landslide Areas

These rates take values ranging from 0 to 90%. When we look at the distributions in perfect classification, the distributions again show homogeneity. Similarly, high values give general curvature. However, except for a few areas, it is seen that the distributions take values varying between 10% and 50%.

When the landslide densities for flat areas are examined, it has been determined that these values vary between 10 and 60%, except for exceptional values, according to the automatic classification. Here again, it is seen that the general curvature gives the greatest concave values—this homogeneous distribution distortion between general and profiles curvature in perfect classification. In general, it is seen that the distribution takes values varying between 10 and 50%.

Finally, changes in convex areas were investigated. It is also seen here, although not as concave between the two classifications. When the automatic classification is examined, it is seen that the distribution is close to homogeneous, while the concave distribution is more in the curvature of the profile. The distribution percentages generally vary between 10 and 50% in convex areas of landslide densities. When their places in perfect classification are examined, it is seen that concave curvature values in a distribution close to homogeneous give greater results in profile curvature. Distributions are seen between 20% and 50%.

In the study, the % distributions of the total areas were also prepared for automatic sum and perfect classification. For this purpose, all concave, flat, and convex areas in 64 areas were collected (Figure 5).

For concave values, when viewed in automatic classification, plan and profile have the same percentage distribution, while overall curvature takes a smaller value. For perfect classification, this distribution changes completely. Plan curvature has a greater value even if the profile and overall curvature are close. The most striking aspect of this classification is that the profile curvature takes its value in the lowest %.

The distribution for flat areas lost its homogeneity in automatic classification and gave the highest overall and lowest profile curvature values. In perfect classification, the distribution showed a different distribution. Profile curvature has the highest value, while plan curvature has the lowest value.

Finally, the classification for convex areas is examined. It gave the same percentage distribution as the concave for automatic classification. The distribution was realised as the opposite of concave when evaluated for perfect classification. Plane and overall curvatures have the same percentage but show a similar but larger percentage distribution in the profile.

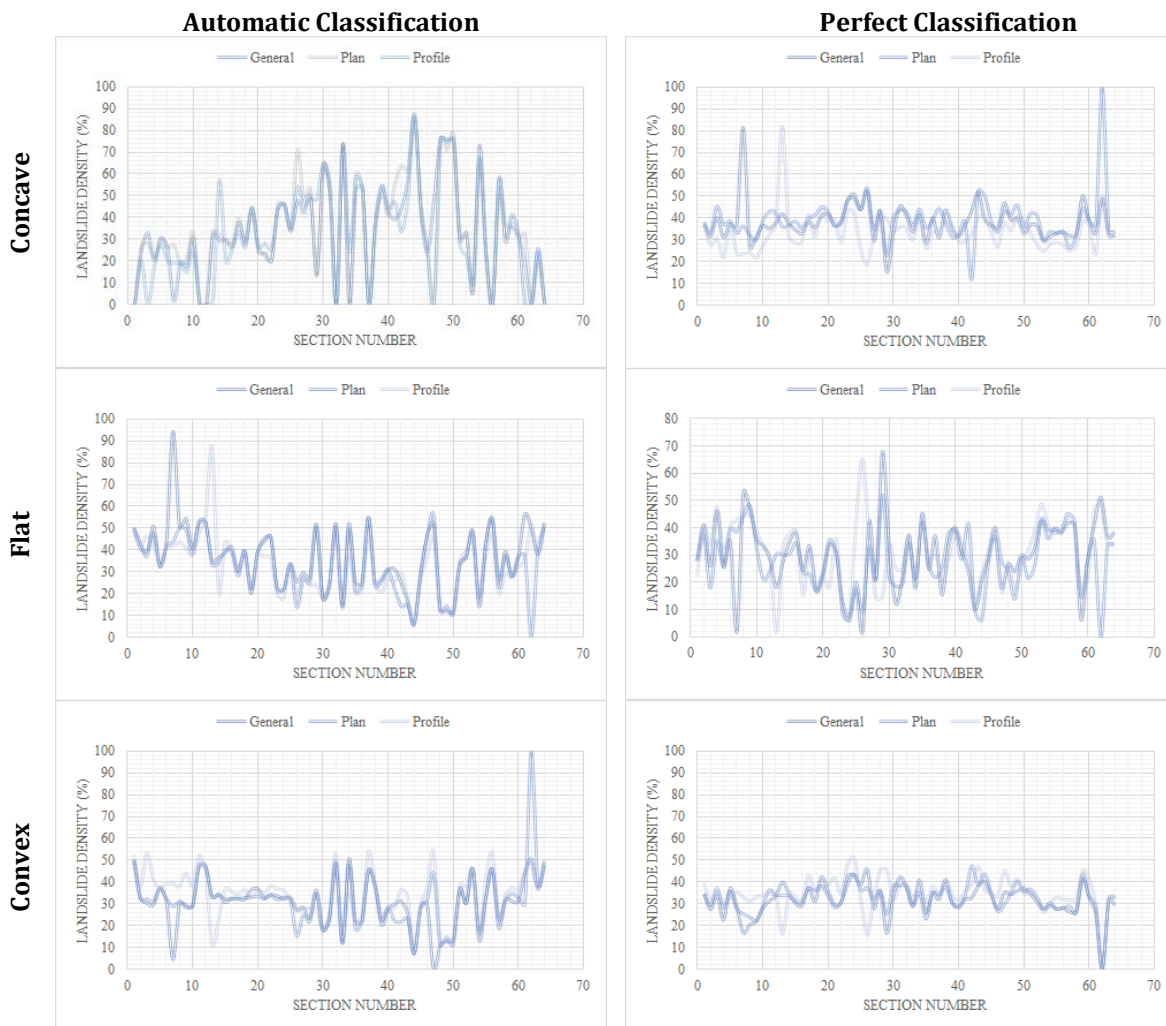


Figure 4. Perfect Classification and Automatic Classification Prepared for Percent distributions of Landslide Densities

3. Results

In the literature search, it was understood that the biggest problem experienced in not assigning subclasses of the parameter came from the marking. Differences in markings have led to different interpretations in studies. In A parameter that is easy to use and simple to implement has been tried by some researchers to make it more complex and incomprehensible by evaluating it from different perspectives.

On the other hand, some researchers misused the parameter, making it even more straightforward than it was. Few researchers have determined the type of curvature suitable for the study area and used it in its application. In addition, they approached the classification of the parameter more sensitively and found correct classification intervals by trial. On the other hand, many researchers use the parameter in the literature with hearsay information and quotations. A group of researchers, who analysed only through the program, ignored the classification parameters, found contradictory results, and contributed to the information pollution in the literature.

The basis of these errors is not based on the primary articles that reveal the use of the parameter but inspired by the researchers that used it in their studies. These main articles, which are constantly in circulation from one

language to another, evolve into a completely different article each time with the participating interpretation. After a while, the subject is assimilated and misinterpreted differently by some researchers

Again, one of the biggest mistakes encountered in the literature is the misidentification of "+" and "-" values. This definition also causes incorrect creation in prepared classes. Insufficient research or misinterpretation of the literature causes the areas that should be considered concave in some studies to be evaluated as convex areas.

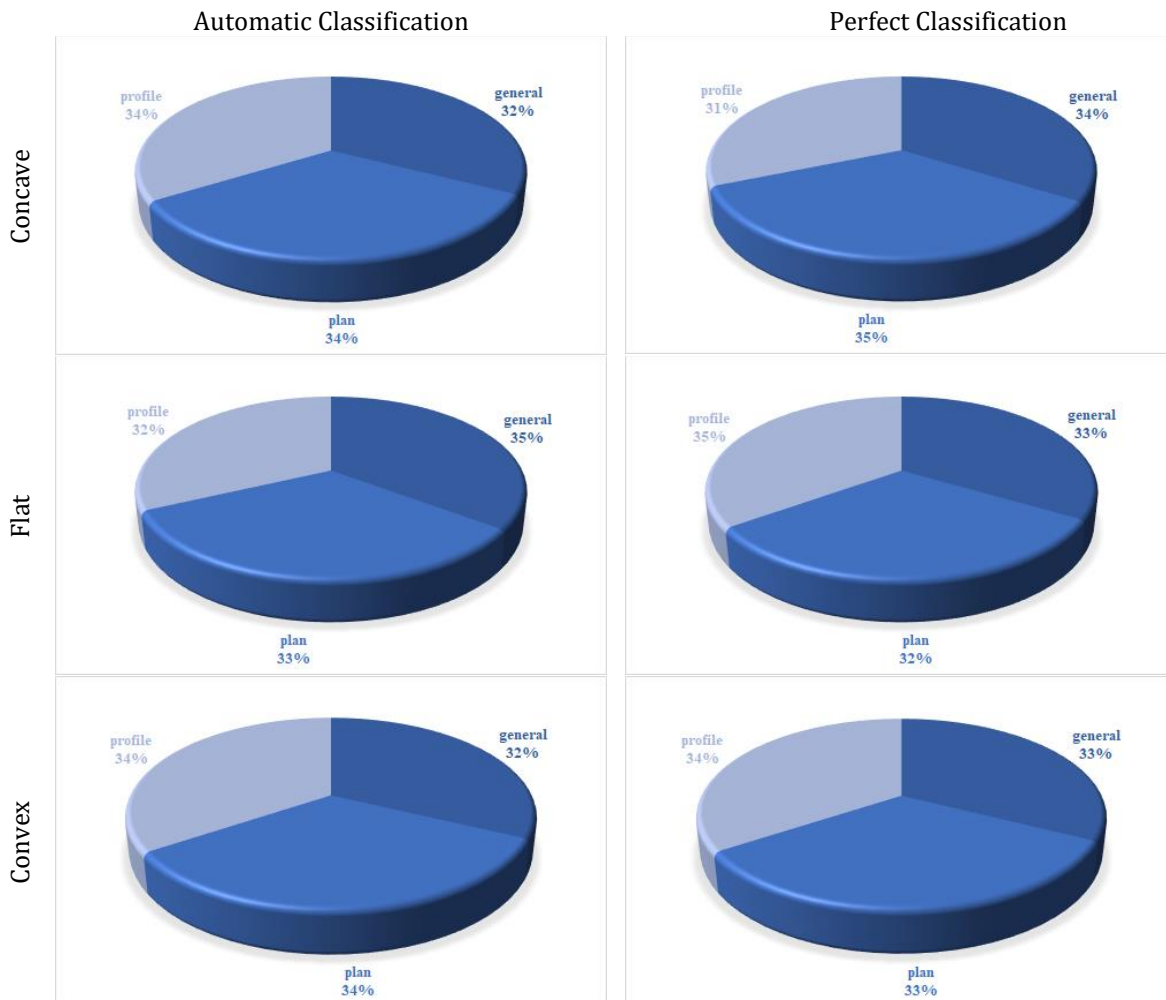


Figure 5. Representation of Percent Distribution Changes According to Total Areas in Original and Perfect Classification

4. Discussion And Conclusions

In the study, a detailed literature study was conducted to understand the cause of the problems experienced in the slope curvature parameter. An application was made on 64 selected landslide maps to reinforce this. In this study, which is the second part of the twin articles, the problems encountered in the subclasses of the parameter were examined.

The most crucial error seen in the studies is encountered even in the most straightforward classification, concave, flat, and convex groupings. The software makes assignments according to the desired class groups. Although this process differs for each land, it gives tremendous differences in areas with a high difference between "+" and "-" values. Even in such studies, there is no standard in limit values for flat areas, and areas considered concave or convex are still included in flat areas.

Again, the other issue that does not reach the standard value for the parameter or does not make any suggestions or recommendations is the class interval numbers. These numbers vary between 2 and 9. Some researchers use more than one curvature class and create a separate classification. Some researchers collect all of them under a single parameter and increase the number of classes. While some researchers prefer a graded classification, others increase the number of classes in the - or + direction, depending on the condition of the land. While some researchers take this approach as if the land is homogeneous, some researchers consider the difference between + and - values and create classification groups accordingly. Another approach encountered in class ranges is double

classification. Insensitive classifications, while some researchers eliminate areas that cannot be landslides with the second classification, some researchers narrow the range values and increase the frequency value in the resulting map.

As a result, there is no consensus on the parameter in the literature. In this study, it is revealed in this research that the issue of whether landslides should occur most frequently on concave or convex slopes is in vain trying to set a standard. It has been revealed that this parameter, like other parameters, has its values and that none of its steps can bring it to the standard. In conclusion, this is the place of the famous expression put forward in landslide susceptibility maps. Each study area has its characteristics. However, of course, the knowledge of the literature should be able to put us in expectations for some fields of study.

Practical studies have shown that if enough sensitivity is not shown in the selection of class ranges, changes occur in the results. Again, studies conducted for 64 fields indicate that the parameter does not have a standard. It is not helpful for every field, and the parameter does not mean that it is meaningless in different fields. With the twin studies, the intense information about the parameter in the literature was compiled and tried to be presented more straightforwardly and accurately as possible.

Declarations

This article does not contain any studies with human participants performed by any of the authors beyond that which is described in the text.

Conflict of interest

The author declares no competing interests.

References

- Abe, K., Ziemer, R. 1991. Effect of tree roots on shallow-seated landslide. XIV IUFRO World Congress, Montreal, Quebec, Canada.
- Afungang, R.N., Bateira, C.V. 2016. Temporal probability analysis of landslides triggered by intense rainfall in the Bamenda Mountain Region, Cameroon. *Environmental Earth Science*, 75:1032.
- Ahmed, M.F., Rogers, J.D., Ismail, E.H. 2014. A regional level preliminary landslide susceptibility study of the upper Indus river basin. *European Journal of Remote Sensing* 47:1, 343-373. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20144721>
- Akıncı, H., Doğan, S., Kılıçoğlu, C., Keçeci, S.B. 2010. Production of landslide susceptibility map of Samsun province center. *Electronic Journal of Map Technologies* 2:3, 13–27 (in Turkish).
- Aksoy, B. 2010. Determination of landslide locations by object-based image analyses: Western Black Sea region. Master Thesis, Hacettepe University Turkey (in Turkish).
- Altural, T. 2012. Landslide susceptibility assessment of vicinity of Akşehir (Konya) using geographic information systems. Selçuk University Master Thesis, Turkey (in Turkish).
- Altürk, G. 2019. Mapping landslide susceptibility by using machine learning and statistical methods in geographical information systems environment: Rize Taşlıdere basin sample. Master Thesis Gebze Teknik University Turkey (in Turkish).
- Anis, Z., Gallala, W., Vakhshoori, V., Smida, H., Gaied, M.E. 2019. GIS-based landslide susceptibility mapping using bivariate statistical methods in North-western Tunisia. *Open Geosciences* 11:1, 708–726. <https://doi.org/10.1515/geo-2019-0056>.
- Aras, Ö. 2021. Natural disaster risk analysis in Havza (Samsun) depression. Doctorate Thesis Ondokuz Mayıs University, Turkey (in Turkish).
- Avcı, V. 2016a. Analysis of landslide susceptibility of Manav Stream Basin (Bingöl). *The Journal of International Social Research* 42-49.
- Avcı, V. 2016b. Landslide susceptibility analysis of Esence Stream Basin (Bingöl) by weight- of- evidence method. *International Journal of Social Science* 287-310.
- Aydoğan, E. 2019. Landslide susceptibility analysis of upper Karasu watershed located between Aziziye-Aşkale part. Master Thesis Gümüşhane University, Turkey (in Turkish).
- Başara, A.C., 2021. production of landslide susceptibility maps by statistical methods and investigation of spatial susceptibility. Doctorate Thesis Ondokuz Mayıs University, Turkey (in Turkish).
- Biber, T.C. 2019. Comparison of the methods used to produce landslide susceptibility maps: instance of Şebinkarahisar district. Doctorate Thesis Karadeniz Teknik University, Turkey (in Turkish).
- Booth, A.M., Roering, J.J. and Perron, J.T., 2009. Automated landslide mapping using spectral analysis and high-resolution topographic data: Puget Sound lowlands, Washington, and Portland Hills, Oregon. *Geomorphology*, 109, 132-147.
- Bray, J.W. 1977. *Rock slope engineering* The Institution of Mining and Metal luy. Stephen Austin and Sons Hertford, 402.
- Chen, W., Pourghasemi, H. R., Kornejady, A., Zhang, N. 2017. Landslide spatial modeling: Introducing new ensembles of ANN, MaxEnt, and SVM machine learning techniques. *Geoderma* 314–327.
- Conforti, M., Pascale, S., Robustelli, G., Sdao, F. 2014. Evaluation of prediction capability of the artificial neural networks for mapping landslide susceptibility in the Turbolo River catchment (northern Calabria Italy). *Catena* 236-250.
- Çelebi, S. 2021. The assesment of integrated natural disaster susceptibility for Artvin province (Central district). Doctorate Thesis Karadeniz Teknik University Turkey (in Turkish).

- Çellek, S. 2013. Landslide susceptibility analysis of Sinop-Gerze region. Doctorate Thesis Karadeniz Teknik University, Turkey (in Turkish).
- Çil, E. 2009. Gis based landslide hazard assessment of the Erdemli (Mersin) region. Çukurova University, Turkey (in Turkish).
- Dahal, R.K. 2014. Regionalscale landslide activity and landslide susceptibility zonation in the Nepal Himalaya. *Environmental Earth Sciences* 71:12, 5145-5164.
- Dai, F.C., Lee, C.F. 2002a. Landslides on natural terrain physical characteristics and susceptibility mapping in Hong Kong. *Mountain Research and Development* 22:1, 40-47.
- Dai, F.C., Lee, C.F. 2002b. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology* 42, 213-228.
- Eker, R. 2013. Mapping landslide susceptibility using geographical information systems and its evaluation for forest roads in the Yığılca forest directorate. Master Thesis, Duzce University Turkey (in Turkish).
- El-fengour, A., Riskam, C.B., El motaki, H., Garcia, J.H. 2020. Landslide susceptibility assessment based on information value model in Amzaz Watershed in Northern Morocco. *Physis Terrae* 2:2, 3-19.
- Elmacı H, Tekin S, Ünsal N (2017) Geographical information systems based using logistic regression landslide susceptibility assessment of the çubuk-kalecik (Ankara) between Şabanözü (Çankırı) region. *The Bulletin of Mineral Research and Exploration*. 155:155, 175-186. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.306692>
- Ermini, L., Catani, F., Casagli, N. 2005. Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology* 66, 327-343.
- Freer, J., McDonnell, J.J., Beven, K.J., Peters, N.E., Burns, D.A., Hooper, R.P., Aulenbach, B., Kendall, C. 2002. The Role of bedrock topography on subsurface storm flow. *Water Resources Research* 38, 1269. <http://dx.doi.org/10.1029/2001WR000872>
- Ghobadi, M.H., Nouri, M., Saedi, B., Jalali, S.H., Pirouzinajad, N. 2017. The Performance evaluation of information value, density area, LNRF, and frequency ratio methods for landslide zonation at Miandarband Area, Kermanshah province, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 10: 430. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3202-y>
- Gökçeoğlu, C., Ercanoğlu, M. 2001. Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan parametrelere ilişkin belirsizlikler. *Hacettepe Yerbilimleri Dergisi* 23:189-206.
- Görüm, T. 2006. Landslide susceptibility analysis with geographic information systems and statistical methods: Melen Gorge and near vicinity. Master Thesis İstanbul University, Turkey (in Turkish).
- Günini, N.Ü. 2019. Assessment of landslide susceptibility in Van province using logistic regression analysis and frequency ratio method. Master Thesis Ondokuz Mayıs University, Turkey (in Turkish).
- Gibson, M., Forster, A., Entwisle, A.D., Wildman, G. 2008. GIS-based landslide assessment, Glasgow, Scotland.
- Hasekioğulları, G.C. 2010. Assessment of parameter effects in producing landslide susceptibility maps. Master Thesis Hacettepe University, Turkey (in Turkish).
- Hong, H., Iliia, I., Tsangaratos, P., Chen, W., Xu, C. 2017. A hybrid fuzzy weight of evidence method in landslide susceptibility analysis on the Wuyuan area, China. *Geomorphology* 290:1-16. doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.002
- Jakob, M. 2000. The Impacts of logging on landslide activity at Clayoquot Soun, British Columbia. *Catena* 38:279-300.
- Kayhan, H. 2021. Landslide susceptibility mapping of the Izmir metropolitan area. Master Thesis Dokuz Eylül University, Turkey (in Turkish).
- Kakembo, V. 1997. A reconstruction of the history of land degradation in relation to land use change and land tenure in peddie district, former ciskei. Master thesis Rhodes University Güney Afrika.
- Karaman, M.O. 2019 Landslide susceptibility mapping of Karaburun Peninsula with geographic information systems. Master Thesis Eskişehir Teknik University, Turkey (in Turkish).
- Kayastha, P. 2015. Landslide susceptibility mapping and factor effect analysis using frequency ratio in a catchment scale: A case study from Garuwa sub-basin, East Nepal. *Arabian Journal of Geoscience* 8:10, 8601-8613. doi.org/10.1007/s12517-015-1831-6
- Kayhan, H. 2021. Landslide susceptibility mapping of the Izmir metropolitan area. Master Thesis Dokuz Eylül University, Turkey (in Turkish).
- Klose, M., Highland, L., Damm, B., Terhorst, B. 2014. Estimation of Direct Landslide Costs in Industrialized Countries: Challenges, Concepts, and Case Study. *Landslide Science for a Safer Geoenvironment* pp 661-667 https://doi.org/10.1007/978-3-319-05050-8_10
- Komac, M. 2006. A Landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in Perialpine Slovenia. *Geological Survey of Slovenia* 74:17-28.
- Kornejady, A., Ownegh, M., Bahreman, A. 2017. Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods. *Catena*, 144-162.
- Lee, S., Min, K. 2001. Statistical Analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea *Environ. Geol.* 40:1095-1113.
- Lee, S., Ryu, J.H., Lee, M.J., Won, J.S. 2003b. Use of an artificial neural network for analysis of the susceptibility to landslides at Boun, Korea. *Environmental Geology* 44:820-833.
- Lee, S., Ryu, J.H., Min, K., Won, J.S. 2003a. Landslide susceptibility analysis using GIS and artificial neural network. *Earth Surface Processes and Landforms* 28:1361-1376.
- Li, B., Wang, N., Chen, J. 2021. GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping Using Information, Frequency Ratio, and Artificial Neural Network Methods in Qinghai Province, Northwestern China. *Hindawi Advances in Civil Engineering*, 14. <https://doi.org/10.1155/2021/4758062>
- Mazman, T. 2005. Landslide susceptibility assessment in Kumluca (se Bartın) watershed by geoeraphic information systems and statistical analysis methods. Master Thesis Çukurova University, Turkey (in Turkish).
- Meinhardt, M., Fink, M., Tünschel, H. 2015. Landslide susceptibility analysis in central Vietnam based on an incomplete landslide inventory: Comparison of a new method to calculate weighting factors by means of bivariate statistics. *Geomorphology* 234:80-97.

- Moradi, S., Rezaei, M.A. 2014. GIS-based comparative study of the analytic hierarchy process, bivariate statistics and frequency ratio methods for landslide susceptibility mapping in part of the Tehran metropolis. *Iran Journal of Geopersia*, 4:1, 45-61. doi:10.22059/jgeope.2014.51191
- Ohlmacher, G.C. 2007. Plan curvature and landslide probability in regions dominated by earth flows and earth slides. *Engineering Geology* 91:117-134.
- Özdemir, A., Altural, T. 2013. A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey. *J Asian Earth Sci* 180-197.
- Özşahin, E. 2015. Landslide susceptibility analysis by geographical information systems: the case of Ganos Mount (Tekirdağ). *Electronic Journal of Map Technologies* 47-63.
- Özşahin, E., Kaymaz, Ç.K. 2013. Landslide susceptibility analysis of camili (Macahel) Biosphere Reserve Area (Artvin, NE Turkey). *Turkish Studies - International Periodical for The Languages, Literature and History of Turkish or Turkic*, 471-493.
- Paudel, U., Oguchi, T., Hayakawa, Y. 2016. Multi-Resolution Landslide Susceptibility Analysis Using a DEM and Random Forest. *International Journal of Geosciences* 7:726-74. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2016.75056>
- Pimiento, E. 2009. Shallow Landslide Susceptibility Modelling and Validation. Master Thesis, Lund University, Sweden.
- Posner, A.J., Georgakakos, K.P. 2015. Normalized landslide index method for susceptibility map development in El Salvador. *Natural Hazards*, 79:1825-1845.
- Pradhan, A.M.S., Kim, Y.T. 2017. Spatial data analysis and application of evidential belief functions to shallow landslide susceptibility mapping at Mt. Umyeon, Seoul, Korea. *Bull Eng Geol Environ* 1263-1279.
- Şahin, E.K. 2017. Determination of effective factors using feature selection algorithms and production of landslide susceptibility maps. Doctorate Thesis İstanbul Teknik University, Turkey (in Turkish).
- Tarolli, P., Tarboton, D.G. 2006. A new method for determination of most likely landslide initiation points and the evaluation of digital terrain model scale in terrain stability mapping. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, 663-677. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-10-663-2006>
- Taşkanat, T. 2020. Production of landslide susceptibility maps using evolutionary algorithms. Doctorate Thesis Erciyes University, Turkey (in Turkish).
- url-1Curvature (Spatial Analyst) <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/curvature.htm>
- url-2Understanding curvature rasters <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/product/imagery/understanding-curvature-rasters/>
- Wilson, J.P., Gallant, J.C. 2000. Digital terrain analysis, Chapter 1. Terrain analysis: Principles and applications. New York, 1-27.
- Yüksel, N. 2007. Usage of statistical techniques and artificial neural networks in producing landslide susceptibility maps based on geographical information systems: Kumluca-Ulus (Bartın) region. Doktorate Thesis Hacettepe University, Turkey (in Turkish).
- Zeze, J.L., Garcia RAC, Oliveira SC, Reis E (2007) Probabilistic landslide risk analysis considering direct costs in the area North.



PLC BASED SCADA SYSTEM DESIGN FOR INSTANT MONITORING AND EARLY WARNING MECHANISM OF TOXIC GASES IN UNDERGROUND MINES

Erdem ILTEN^{1*}, Mehmet Emin UNSAL¹

¹Balikesir University, Faculty of Engineering, Department of Electrical-Electronics Engineering, Balikesir, Turkey

Keywords

PLC,
SCADA,
Underground Mines,
Toxic Gas Measurement,
Early Warning System.

Abstract

In this study, a real-time toxic gas measurement and early warning mechanism is proposed to prevent accidents that may occur in underground mining facilities. Temperature, oxygen (O₂), hydrogen sulfide (H₂S), methane (CH₄), carbon monoxide (CO) and dust density sensor data are read via Arduino Mega analog inputs. All sensor data is transferred to the PLC-SCADA (Programmable Logic Controller - Supervisory Control and Data Acquisition) system via ethernet in real time. Thanks to the designed SCADA screen, sensor values can be monitored instantly. In addition, it can be checked whether the system is alarm and whether the ventilation system works. According to the underground coal mine regulations, work cannot be done in places where the mine air contains less than 19% oxygen, more than 2% methane, more than 50 ppm (0.005%) carbon monoxide and other hazardous gases. The highest permissible hydrogen sulfur ratio for 8 hours of operation is 20 ppm (0.002%). An early warning mechanism was created with the algorithm written taking these limits into consideration. The tests of the designed system were carried out in a laboratory environment and successful results were observed.

YERALTI MADEN OCAKLARINDA ZEHİRLİ GAZLARIN ANLIK TAKİBİ VE ERKEN UYARI MEKANİZMASI İÇİN PLC TABANLI SCADA SİSTEMİ TASARIMI

Anahtar Kelimeler

PLC,
SCADA,
Yeraltı Maden Ocakları,
Zehirli Gaz Ölçümü,
Erken Uyarı Sistemi.

Öz

Bu çalışmada yeraltı maden tesislerinde oluşabilecek kazaların önüne geçilebilmesi için geliştirilen gerçek zamanlı zehirli gaz ölçümü ve erken uyarı mekanizması önerilmektedir. Sıcaklık, oksijen (O₂), hidrojen sülfür (H₂S), metan (CH₄), karbon monoksit (CO) ve toz yoğunluğu sensör verileri Arduino Mega analog girişleri üzerinden okunmaktadır. Tüm sensör verileri ethernet üzerinden PLC-SCADA (Programmable Logic Controller - Supervisory Control and Data Acquisition) sistemine gerçek zamanlı olarak aktarılmaktadır. Tasarlanan SCADA ekranı sayesinde sensör değerleri anlık olarak izlenebilmektedir. Ayrıca sistemin alarm durumuna geçip geçmediği ve havalandırma sisteminin çalışıp çalışmadığı da kontrol edilebilmektedir. Yeraltı kömür madeni yönetmeliğine göre maden havasında %19'dan az oksijen, %2'den fazla metan, 50 ppm'den (%0.005) fazla karbon monoksit ve diğer tehlikeli gazların bulunduğu yerlerde çalışma yapılamaz. 8 saatlik çalışma için izin verilen en yüksek hidrojen kükürt oranı 20 ppm'dir (%0.002). Bu sınırlar dikkate alınarak yazılan algoritma ile erken uyarı mekanizması oluşturulmuştur. Tasarlanan sistemin testleri laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş ve başarılı sonuçlar alındığı görülmüştür.

Alıntı / Cite

Ilten, E., Unsal, M. E., (2024). PLC Based SCADA System Design for Instant Monitoring and Early Warning Mechanism of Toxic Gases in Underground Mines, Journal of Engineering Sciences and Design,12(1), 64-74.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

E. Ilten, 0000-0002-9608-2148
M. E Unsal, 0000-0003-4879-8288

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	20.12.2023
Revizyon Tarihi / Revision Date	24.02.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	10.03.2024
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: erdemilten@balikesir.edu.tr, +90 266 612 11 94

PLC BASED SCADA SYSTEM DESIGN FOR INSTANT MONITORING AND EARLY WARNING MECHANISM OF TOXIC GASES IN UNDERGROUND MINES

Erdem ILTEN^{1†}, Mehmet Emin UNSAL¹

¹Balikesir University, Faculty of Engineering, Department of Electrical-Electronics Engineering, Balikesir, Turkey

Highlights

- Temperature, oxygen, hydrogen sulfide, methane, carbon monoxide and dust density are measured.
- All sensor data obtained Arduino Mega are sent to SCADA via ethernet to display in real-time.
- When sensor values exceed the limits in mining regulations, early warning mechanism is activated.

Graphical Abstract

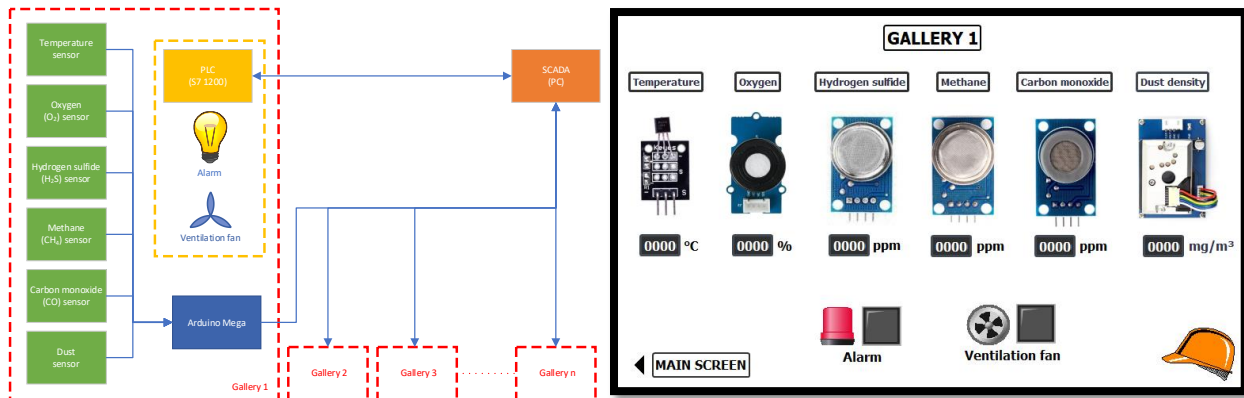


Figure. Graphical Abstract

Purpose and Scope

In this study, an early warning mechanism is developed to ensure the safety of employees by real-time measurement of toxic gases in underground mining facilities.

Design/methodology/approach

Temperature, oxygen, hydrogen sulfide, methane, carbon monoxide and dust density are measured from sensors by Arduino Mega analog inputs. The received sensor information is sent to the PLC-SCADA (Programmable Logic Controller - Supervisory Control and Data Acquisition) system over ethernet. All sensor values are displayed in real time on the designed SCADA screen. Thanks to the algorithm prepared by taking sensor values into consideration, conditions that will create a dangerous situation are immediately detected and the alarm and ventilation system is activated.

Findings

In laboratory tests, it is seen that all sensors are read with high accuracy, transferred to the SCADA system successfully and the early warning mechanism is activated at the right time.

Practical implications

The prepared experimental setup is suitable for testing in the field. It is planned to make this setup compact in order to start practical use.

Originality

The originality of this study is the ability to measure all gases, temperature and dust density on a single low-cost board, to transfer data to the SCADA system in real time, and to the early warning mechanism developed by taking into account the safety limits determined according to the mining regulations.

[†] Corresponding author: erdemilten@balikesir.edu.tr, +90 266 612 11 94

1. Introduction

Beneath the surface of the Earth lies a realm of industry and exploration that has shaped the course of human history for centuries - the world of underground mines. These subterranean labyrinths, carved into the depths to extract valuable minerals, ores, and resources, represent a testament to human ingenuity and perseverance. From the days of pickaxes and candlelight to the modern era of advanced machinery and safety protocols, underground mines have played a vital role in fueling economies, driving technological progress, and satisfying the ever-growing demands of our world (Hamrin *et al.*, 2001).

Underground mining is a vital industry that has played a crucial role in extracting valuable minerals and resources from the depths of the Earth for centuries. However, the pursuit of these riches often takes place in a challenging and hazardous environment (Tekin *et al.*, 2023). One of the most significant threats to the safety of miners in these underground settings is the presence of toxic gases (Li, Si, *et al.*, 2023). These invisible and potentially lethal substances pose a constant and silent danger, and understanding their sources, types, and management is of paramount importance for the well-being of those who work in these subterranean worlds.

In an age marked by industry, technology, and urbanization, the measurement of toxic gases has become an indispensable aspect of ensuring the health and safety of both the environment and the people who inhabit it (Rajakumar and Choi, 2023). The detection and quantification of hazardous gases are critical not only for the preservation of air quality but also for preventing potentially life-threatening incidents in various settings, including industrial, residential, and environmental contexts. These measurements are the cornerstone of proactive risk management and emergency response.

Safety is paramount in the world of underground mining, and early detection and response to potential risks are vital. To address this challenge, the concept of an "Early Warning Mechanism in Underground Mines" has emerged as a crucial innovation. This system leverages technology and expertise to proactively identify and communicate impending dangers, allowing miners to take necessary precautions and mitigate potential disasters (Li, Kong, *et al.*, 2023).

Early warning systems used in real mines today basically work on the principle of instant measurement of toxic gases and activating the warning-alarm mechanism at the right time. A significant portion of occupational accidents related to mine ventilation are caused by firedamp explosions, CO poisoning and fires inside the mine. The main reason for gas explosions that occur in the world and in our country, especially in coal mines, is the failure to detect in time that the gas concentrations in the environment are above the determined limit values (Mallı *et al.*, 2014). For this reason, the gas potential of each mine must be measured and if an early warning system is needed, it must be installed. The possibility of an accident can be minimized if all precautions are taken meticulously and in a timely manner.

In the realm of industrial automation, Programmable Logic Controllers (PLCs) are the unsung heroes that drive precision, reliability, and efficiency in countless processes (Alsabbagh and Langendörfer, 2023). These compact yet powerful digital computers have become the backbone of modern manufacturing, enabling the control and automation of intricate tasks with a level of speed and accuracy that was once unimaginable. From production lines in factories to the systems that manage critical infrastructure, PLCs play a pivotal role in ensuring that operations run smoothly and without error.

In the age of complex and interconnected industrial processes, Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems have emerged as the linchpin that facilitates the monitoring, control, and management of critical infrastructure (Melo *et al.*, 2023). These powerful systems serve as the eyes and ears of a diverse array of industries, from power plants to water treatment facilities, and from transportation networks to manufacturing plants. SCADA systems empower operators and engineers to oversee and manipulate processes in real-time, ensuring efficiency, safety, and responsiveness.

In the ever-evolving world of industrial automation and control, PLCs with SCADA systems has ushered in a new era of efficiency, responsiveness, and control (Tomar *et al.*, 2023). This powerful combination, often referred to as PLC-based SCADA systems, has become the backbone of modern industrial processes, enabling seamless monitoring (Kumru and Vural, 2023), control, and data acquisition in a wide range of applications.

The Arduino microcontroller stands as a beacon in the realm of open-source hardware and electronics prototyping. Developed with the aim of providing an accessible platform for enthusiasts, students, and professionals alike, Arduino has become synonymous with creativity and innovation in the world of embedded systems (McRoberts, 2013). At its core, an Arduino is a compact and versatile microcontroller board that

empowers users to bring their electronic ideas to life. Arduino, with its user-friendly interface and flexible architecture, provides an ideal platform for interfacing with various sensors to measure and interpret the physical world. Measuring sensors, also known as transducers, are devices that convert physical quantities such as temperature, light, pressure, or distance into electrical signals that can be interpreted by electronic circuits (Akal and Akan, 2022). When combined with Arduino, these sensors become powerful tools for collecting data, monitoring environments, and creating interactive projects.

In the study conducted by Bołoz in 2020, automation and robotic systems used in underground mines in Poland were examined (Bołoz and Biały, 2020). It has been emphasized that underground mining machines are of great importance for hard coal, which is underground and has the greatest market power in some countries. It has been stated that with the development of technology in hard coal mining, where production was mostly based on manpower in the early days of mining, safer and more economical results were achieved by operating the machines remotely or autonomously.

Yaman presented a study on the internet of things-based transformer monitoring system in 2019 (Yaman, 2019). In this study, the temperature of the windings, oil level, current-voltage values were monitored with various sensors placed on the transformer. When there is an overload on the transformers, the insulation value decreases due to the increase in the temperature in the windings, causing a malfunction in the transformer. In order to avoid an unexpected malfunction and to extend its service life, the transformer must be monitored instantly. With the designed prototype, it is aimed to detect possible faults in the transformer early and extend the service life of the transformer.

In the study presented by Dündar et al., work accidents and occupational diseases occurring in the mining sector in Turkey were analyzed (Dündar *et al.*, 2018). The mining sector is a sector that has guided and shaped civilizations from past to present. However, since the mining sector has harsh working environments, it is considered the riskiest working sector in the world in terms of occupational health and safety. In this study, it was concluded that the necessary systems regarding occupational health and safety, especially in underground mining, should be established, implemented and constantly inspected.

Kul worked on remote monitoring of 1500 kVA power generator sets and high voltage breakers with 6.3 kV output voltage using PLC-SCADA (Kul, 2009). A SCADA system was designed to control the currents, voltages, power factors and frequencies of the generator group used in this study from a single point. Vijeo Citect software was used for the SCADA system. With the designed SCADA system, oil pressure level, winding temperature and winding insulation value can also be monitored. It has been shown that the system can operate faster and more efficiently by predicting the malfunctions that may occur as a result of the study.

A study is presented by Bekiroglu about early detection of faults that may occur in transformers (Bekiroglu, 2009). In this study, it is aimed to reduce the cost of the business, provide a safe working environment and examine possible malfunctions. Fault situations such as decrease in insulation value, excessive current draw, phase-to-phase short circuit in transformers have been analyzed. A PLC-based SCADA system has been designed to detect and intervene in advance about malfunctions that may occur in the transformer. Thanks to this SCADA system, occupational safety in the enterprise is increased.

In this study, a mechanism is proposed to accurately measure toxic gases frequently encountered in underground mining facilities and provide early warning in case of danger. To achieve this, a PLC-based SCADA system is designed. The designed system has been tested in a laboratory environment.

This paper is organized as follows. Material and method are explained in Section 2. In Section 3, the experimental results are demonstrated, and Section 4 represents the result and discussion.

2. Material and Method

In the designed mine gas measurement system, temperature, oxygen, hydrogen sulfide, methane, carbon monoxide and dust density are measured. Block diagram of the measurement system is presented in Figure 1.

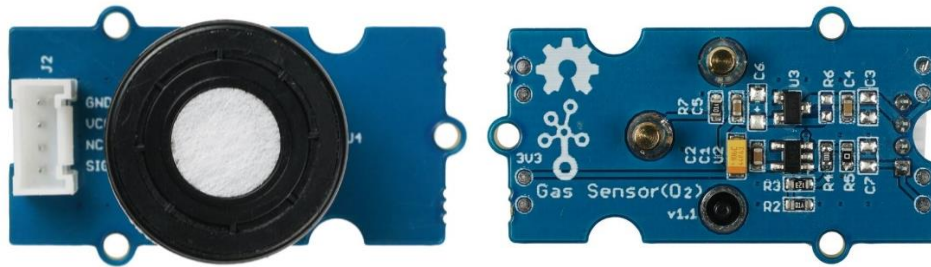


Figure 3. MIX8410 Electrochemical Oxygen Gas Sensor.

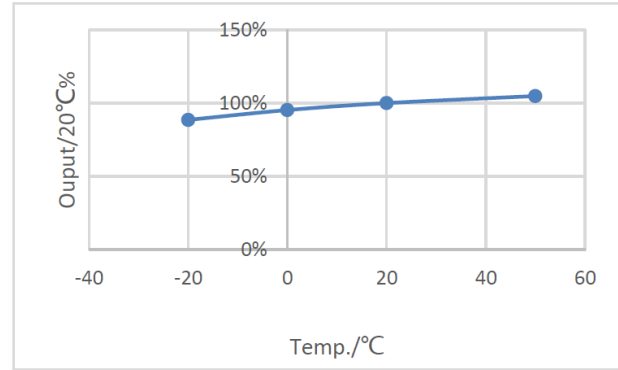
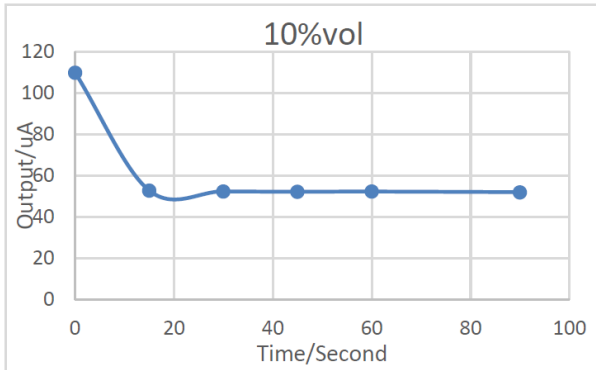


Figure 4. A) Sensitivity Characteristics (25°C, Linear Output), B) Temperature Dependency.

Hydrogen sulfide (H₂S) sensor: MQ-136 hydrogen sulfide gas sensor is used to measure the concentration of hydrogen sulfide. MQ-136 gas sensor is given in Figure 5. MQ-136 test circuit and sensitivity curve is illustrated in Figure 6 (Winsen, 2015).



Figure 5. MQ-136 Hydrogen Sulfide Gas Sensor.

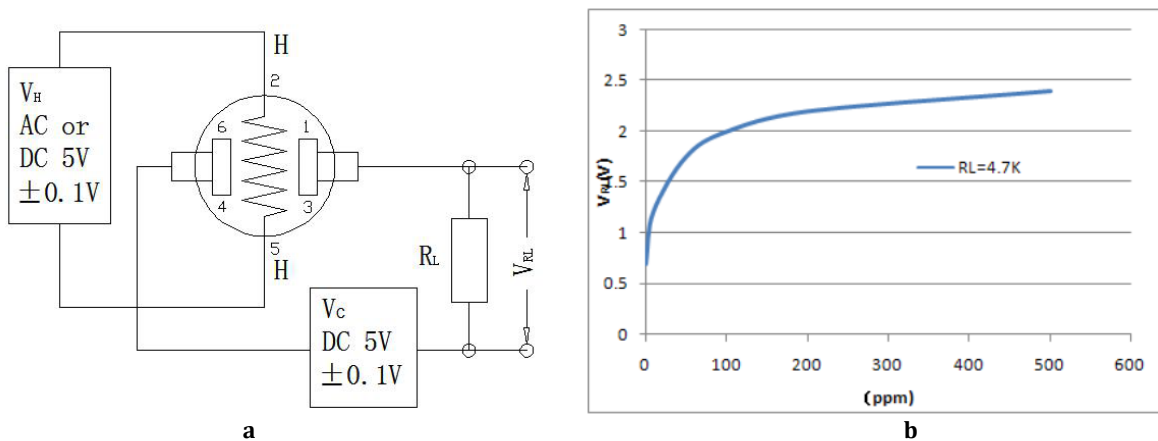


Figure 6. A) MQ-136 Test Circuit, B) MQ-136 Sensitivity Curve.

In Figure 6, V_H is the supply voltage, V_C is the circuit voltage, R_L is the load resistance and V_{RL} is the voltage of R_L . The concentration of Hydrogen sulfide can be measured between 0-200 ppm with MQ-136.

Methane (CH₄) sensor: MQ-4 flammable gas sensor is used to measure the methane concentration in galleries. MQ-4 is demonstrated in Figure 7. MQ-4 test circuit and sensitivity curve is illustrated in Figure 8 (Winsen, 2018).



Figure 7. MQ-4 Flammable Gas Sensor.

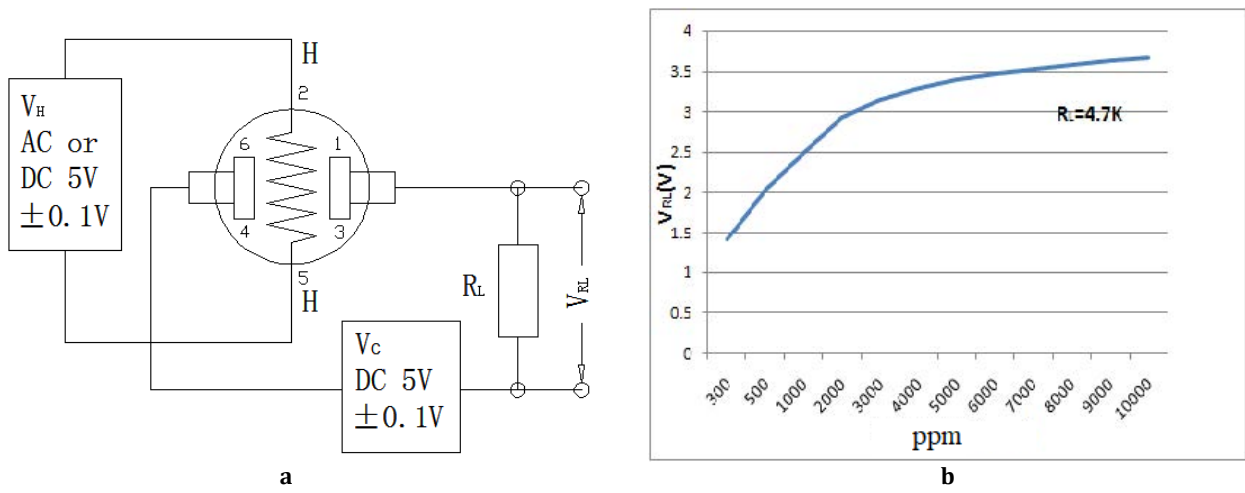


Figure 8. A) MQ-4 Test Circuit, B) MQ-4 Sensitivity Curve.

In Figure 8, V_H is the supply voltage, V_c is the circuit voltage, R_L is the load resistance and V_{RL} is the voltage of R_L . The concentration of methane can be measured between 300-10000 ppm with MQ-4.

Carbon monoxide (CO) sensor: MQ-7 toxic gas sensor is used to measure the carbon monoxide concentration in galleries. MQ-7 is presented in Figure 9. MQ-7 test circuit and sensitivity curve is illustrated in Figure 10 (Winsen, 2014).



Figure 9. MQ-7 Toxic Gas Sensor.

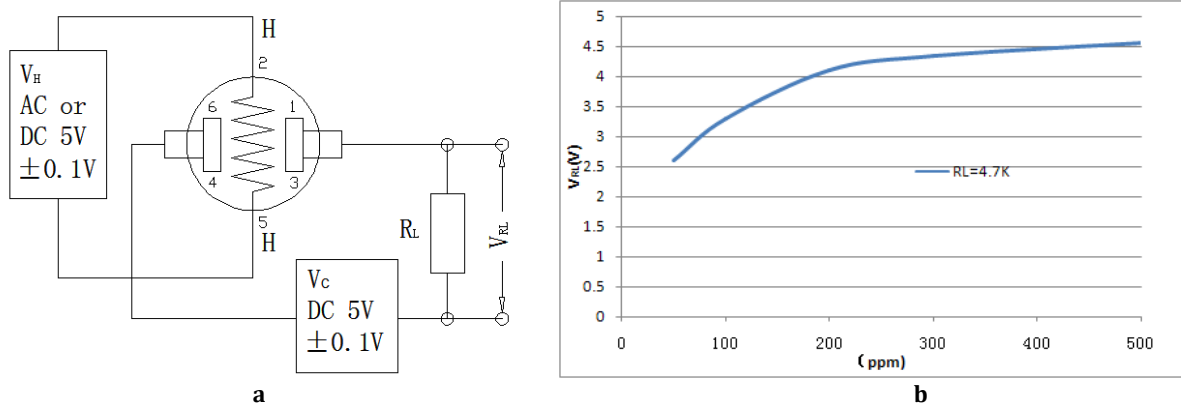


Figure 10. A) MQ-7 Test Circuit, B) MQ-7 Sensitivity Curve.

In Figure 10, V_H is the supply voltage, V_C is the circuit voltage, R_L is the load resistance and V_{RL} is the voltage of R_L . The concentration of carbon monoxide can be measured between 10-500 ppm with MQ-7.

Dust sensor: GP2Y1010AU0F optical dust sensor is used to measure the dust density in galleries. GP2Y1010AU0F is given in Figure 11 (Sharp, 2006). Output voltage vs. dust density curve is presented in Figure 12.



Figure 11. GP2Y1010AU0F Optical Dust Sensor.

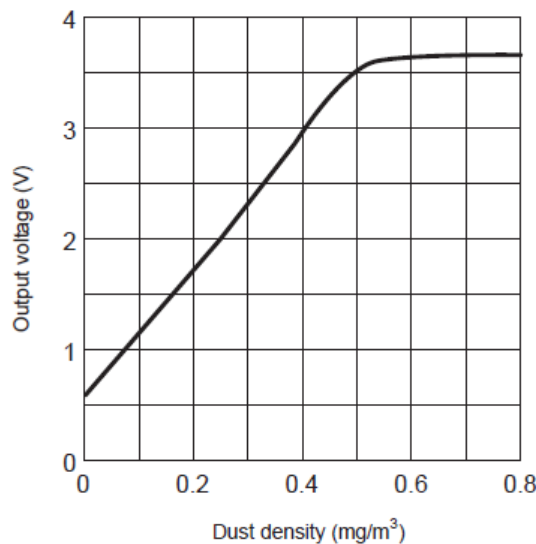


Figure 12. Output Voltage Vs. Dust Density Curve.

Dust density can be measured between 0-0.65 mg/m³ with GP2Y1010AU0F.

Arduino Ethernet Shield Module is used to transfer sensor data from Arduino Mega to the PC. The module is presented in Figure 13.

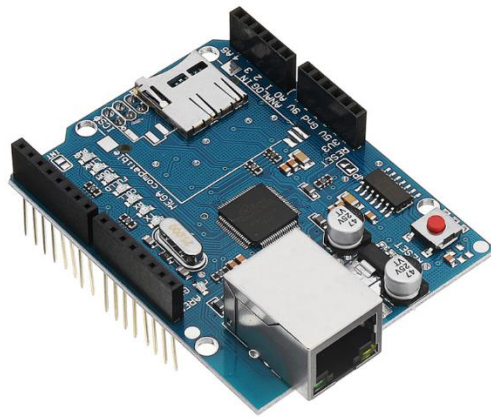


Figure 13. Arduino Ethernet Shield Module.

TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) method is used for communication. Arduino and PC devices are first connected to the same local network. Static IP addresses are defined for Arduino and PC. These addresses are 192.168.0.20 and 192.168.0.10 respectively. The port number is entered as 50000. Sent data size is [6x1]. Sensor data sent to the PC as a [6x1] package is displayed in real-time on the designed SCADA screen.

Alarm mechanism and ventilation fan control is carried out by PLC S7 1200 1214C CPU. A static IP (192.168.0.30) is also defined for the PLC and connected to the same local network. The data sent from Arduino to the PC is also sent to the PLC. Thanks to the algorithm written for the PLC using the TIA Portal program, the alarm and ventilation fan can be activated and deactivated according to the measured sensor values.

3. Experimental Results

The experimental setup of the measurement system is illustrated in Figure 14. The experimental setup consists of four temperature sensors, an oxygen sensor, a hydrogen sulfide sensor, a methane sensor, a carbon monoxide sensor, a dust sensor, an Arduino Mega board. Arduino board is connected to PC SCADA system via ethernet shield module. Sensors outputs are measured with analog inputs of Arduino board. Obtained voltages are converted the measured units with the written algorithms according to information from sensor datasheets. All measured data are sent to PC and displayed in real-time on the designed SCADA screens. Measurement SCADA screen for a gallery is presented in Figure 15. The flow chart of the early warning mechanism is illustrated in Figure 16.

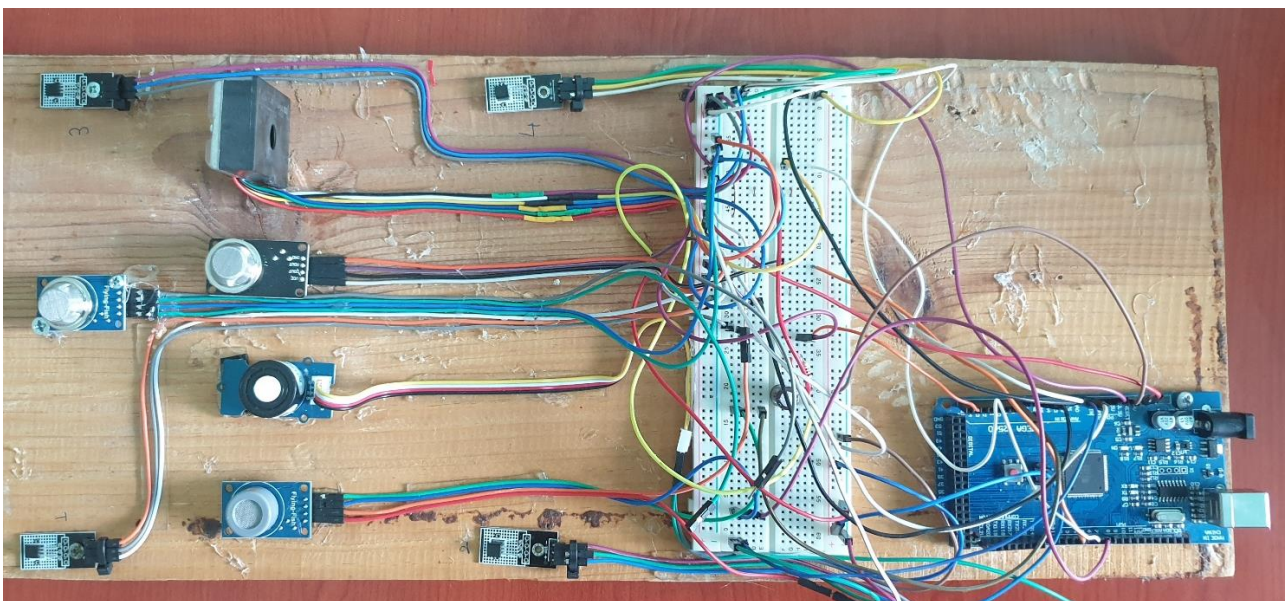


Figure 14. The Experimental Setup.

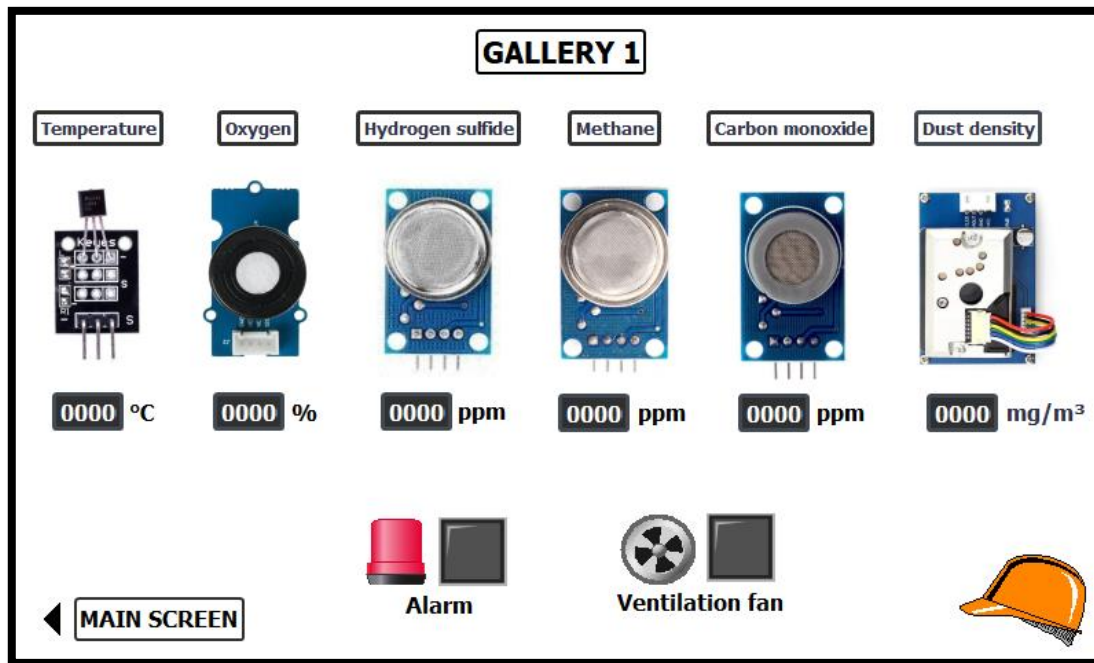


Figure 15. Measurement SCADA Screen For A Gallery.

TIA Portal / WinCC program is used to design the SCADA screen. On this screen, each sensor value is displayed separately in digital indicators. The operating status of the alarm and ventilation fan can be monitored with warning lamps displayed on the screen. There are no control elements on this screen that the user can intervene. The screen is used only for real-time monitoring of data. Activation of alarm and fan systems occurs automatically thanks to the written algorithm.

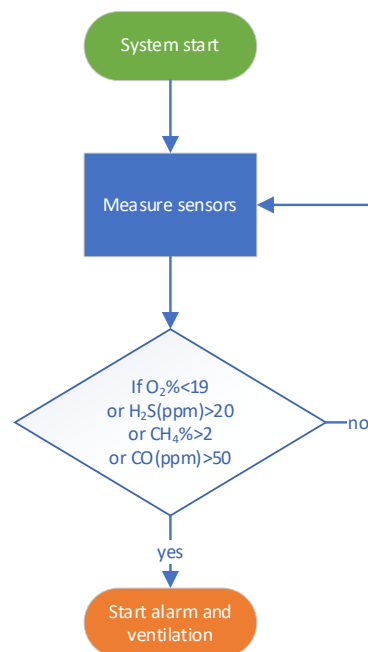


Figure 16. Flow Chart Of The Early Warning Mechanism.

According to the underground coal mine regulations, work cannot be done in places where the mine air contains less than 19% oxygen, more than 2% methane, more than 50 ppm (0.005%) carbon monoxide and other hazardous gases. The highest permissible hydrogen sulfur ratio for 8 hours of operation is 20 ppm (0.002%). Thanks to the algorithm prepared by taking these values into consideration, conditions that will create a dangerous situation are immediately detected and the alarm and ventilation system is activated as seen in Figure 15. Thanks to the alarm in this early warning mechanism, the evacuation of the employees is started, and the ventilation system is used to evacuate the toxic air.

4. Result and Discussion

In this study, measuring gas concentrations in underground mining facilities and developing an early warning mechanism for occupational safety were studied. Arduino Mega board is used to measure gases. Sensor values measured with Arduino are sent to the PLC-SCADA system via ethernet. Sensor data received with the PLC-SCADA system is evaluated and when dangerous conditions are detected, the alarm and ventilation mechanism is activated. Tests of reading sensor data, transferring data to SCADA, and operating alarm and ventilation systems were carried out in a laboratory environment. Experimental results showed that all sensors were read with high accuracy and transferred to SCADA, and alarm and ventilation systems were activated at the right time. In future studies, it is planned to make the measurement unit compact and to conduct field tests of the system.

Acknowledgement

This study was supported by Balıkesir University Scientific Research Projects Unit within the scope of project number BAP-2022/014.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Akal, D. and Akan, A.E. (2022), "Edirne iklim şartlarında çevre sıcaklığı ve rüzgar hızının polikristal fotovoltaik panel çıkış gücüne etkilerinin incelenmesi", *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Vol. 10 No. 1, pp. 91–102.
- Alsabbagh, W. and Langendörfer, P. (2023), "Security of Programmable Logic Controllers and Related Systems: Today and Tomorrow", *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, IEEE.
- Bekiroglu, E. (2009), "Transformatör Merkezlerinin Güvenlik Amaçlı Uzaktan İzlenmesi Ve Otomasyonu", *Engineering Sciences, E-Journal of New World Sciences Academy*, Vol. 4 No. 4, pp. 459–470.
- Bołoz, Ł. and Biały, W. (2020), "Automation and robotization of underground mining in Poland", *Applied Sciences*, MDPI, Vol. 10 No. 20, p. 7221.
- Dündar, S., Bilim, N. and Bilim, A. (2018), "Ülkemizdeki maden sektöründe meydana gelen iş kazası ve meslek hastalıklarının analizi", *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Bitlis Eren Üniversitesi, Vol. 7 No. 2, pp. 423–432.
- Hamrin, H., Hustrulid, W. and Bullock, R. (2001), "Underground mining methods and applications", *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*, SME Littleton, CO, pp. 3–14.
- Kul, N. (2009), *1500 KVA Gücünde 6.3 KV. Çıkış Gerilimli Generatör Grubu ve Yüksek Gerilim Kesicilerinin PLC-SCADA Ile Uzaktan İzlenmesi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kumru, C.F. and Vural, M.S. (2023), "Design and application of IoT based weather station for high voltage laboratories", *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, Süleyman Demirel University, Vol. 11 No. 3, pp. 1190–1201.
- Li, F., Kong, D., Li, Q., Shang, Y., Cheng, Z. and He, L. (2023), "Failure analysis and prediction of roof instability in end face under repeated mining using early warning system", *Scientific Reports*, Nature Publishing Group UK London, Vol. 13 No. 1, p. 8764.
- Li, L., Si, J. and Li, Z. (2023), "Characteristics of the spatial and temporal evolution of the environmental parameters for belt fire in underground coal mine roadway", *Case Studies in Thermal Engineering*, Elsevier, Vol. 49, p. 103346.
- Mallı, T., Kun, M. and Köse, H. (2014), "Yeraltı Kömür İşletmelerinde Gaz İzleme ve Erken Uyarı Sistem Teknolojisinin İş Kazalarının Önlenmesindeki Önemi", *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, Dokuz Eylül University, Vol. 16 No. 46, pp. 59–67.
- McRoberts, M. (2013), *Beginning Arduino*, Apress.
- Melo, J.J.R., Ishraque, M.F., Shafiullah, G.M. and Shezan, S.A. (2023), "Centralized monitoring of a cost efficient PLC-SCADA based islanded microgrid considering dispatch techniques", *The Journal of Engineering*, Wiley Online Library, Vol. 2023 No. 8, p. e12293.
- Mixsen. (2020), *MIX8410 Electrochemical Oxygen Gas Sensor*.
- Rajakumar, J.P.P. and Choi, J. (2023), "Helmet-mounted real-time toxic gas monitoring and prevention system for workers in confined places", *Sensors*, MDPI, Vol. 23 No. 3, p. 1590.
- Sharp. (2006), *GP2Y1010AU0F Optical Dust Sensor*.
- Tekin, A., Nalbant, M.O., Orhan, M., Tekin, F., Suvaydan, F., Berki, K., Gümüş, S., et al. (2023), "Statistical analysis of noise exposure of workers in the underground mining in the Soma basin of Turkey", *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, Süleyman Demirel University, Vol. 11 No. 2, pp. 449–458.
- Texas_Instruments. (2017), *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors*.
- Tomar, B., Kumar, N. and Sreejeth, M. (2023), "Real Time Automation and Ratio Control Using PLC & SCADA in Industry 4.0.", *Computer Systems Science & Engineering*, Vol. 45 No. 2.
- Winsen. (2014), *MQ-7 Toxic Gas Sensor*.
- Winsen. (2015), *MQ-136 Hydrogen Sulfide Gas Sensor*.
- Winsen. (2018), *MQ-4 Flammable Gas Sensor*.
- Yaman, O. (2019), *Nesnelerin İnterneti (IoT) Tabanlı Transformator İzleme Sistemi*, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.



KÜÇÜK ÖLÇEKLİ, TEK EKLEMLİ MANYETİK SARKAÇ MEKANİZMASININ BİLGİSAYAR DESTEKLİ BENZETİMİ VE PID KONTROLÜ

Hüseyin YILDIZ*

İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Mikro robot,
PID kontrol,
Manyetik kontrol,
Manyetik alan,
Optimizasyon.*

Öz

Sağlık ve biyomedikal cihaz teknolojileri günümüzün en önemli konuları arasında yer almaktadır. Son yıllarda teknolojiye yaşanan gelişmeler ile birlikte, mikro ve makro ölçekli robotik sistemlerinin ilaç dozajlama, hücre ve DNA dizilimi oluşturma, görüntüleme ve bölgesel müdahale sistemi olarak geliştirilmesi üzerine çalışmalar ön plana çıkmıştır. Çalışmada küçük ölçekli sistemlerde nesne taşıma, konum manipülasyonu vb. işlemlerde kullanılmak üzere doğrudan manyetik alan ile kontrol edilebilen tek serbestlik dereceli bir robot kol mekanizması (sarkaç) önerilmiştir. Sistemi yöneten elektrik ve mekanik denklem sistemi çıkartılmış, PID (Proportional Integral Derivative) kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Manyetik kuvvetlerin doğrusal olmayan davranışı nedeni ile Ziegler-Nichols metotları ile kontrolcü parametrelerinin belirlenemediği görülmüştür. PID kontrolcü parametreleri iteratif metotlar kullanılarak optimize edilerek elde edilmiştir. İterasyon algoritması 7 iterasyon sonucunda $-0,1788^\circ$ aşma, $0,1634$ s yerleşme ve $0,0298^\circ$ mutlak hata ortalaması ile en iyi sonuçlara ulaşmıştır. Ulaşılan PID parametreleri ise $k_p=5,353$, $k_d=0,2157$ ve $k_i=21,5987$ 'dir. Farklı dalga formlarında (basamak, üçgen ve sinüzoidal) kontrolcü davranışı incelenmiştir. Sistemde oluşan hatalar, kontrolcü gerilim çıkışı ve devrede oluşan akımlar görselleştirilerek detaylandırılmıştır. Çalışmada, 20A akım ile önerilen sarkaç modelinde pozisyon kontrolünün yapılabileceği gösterilmiştir.

COMPUTER AIDED SIMULATION AND PID CONTROL OF A SMALL SCALE SINGLE DOF MAGNETIC PENDULUM MECHANISM

Keywords

*Micro robot,
PID control,
Magnetic control,
Magnetic field,
Optimization.*

Abstract

Health and biomedical device technologies are among the most important issues of today. With the developments in technology in recent years, studies on the development of micro and macro-scale robotic systems such as drug dosing, cell and DNA sequencing, imaging and regional intervention systems have become more important. In this study, a single-degree-of-freedom robotic arm mechanism (pendulum) that can be directly controlled by a magnetic field is proposed to be used in small-scale systems for object handling, position manipulation, etc. The electrical and mechanical equations governing the system are obtained and a PID (Proportional Integral Derivative) controller is designed. It is found that the controller parameters cannot be determined by Ziegler-Nichols methods due to the chaotic behavior of the magnetic forces. PID controller parameters were obtained by optimization using iterative methods. The best results were obtained after 7 iterations with $-0,1788^\circ$ overshoot, $0,1634$ s settling time and $0,0298^\circ$ mean square error. The PID parameters obtained are $k_p=5,353$, $k_d=0,2157$ and $k_i=21,5987$. The controller behavior for different reference inputs (step, triangular and sinusoidal) was investigated. Errors in the system, controller voltage output and currents in the circuit are visualized and presented. It is observed that position control can be performed in the proposed pendulum model with 20A current.

Alıntı / Cite

Yıldız, H., (2024). Küçük Ölçekli, Tek Eklemlili Manyetik Sarkaç Mekanizmasının Bilgisayar Destekli Benzetiimi ve PID Kontrolü, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(1), 75-87.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H. Yıldız, 0000-0002-0575-3904

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	21.06.2023
Revizyon Tarihi / Revision Date	22.10.2023
Kabul Tarihi / Accepted Date	26.01.2024
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: huseyin.yildiz@iuc.edu.tr, +90-212-866-3700

COMPUTER AIDED SIMULATION AND PID CONTROL OF A SMALL SCALE SINGLE DOF MAGNETIC PENDULUM MECHANISM

Huseyin YILDIZ†

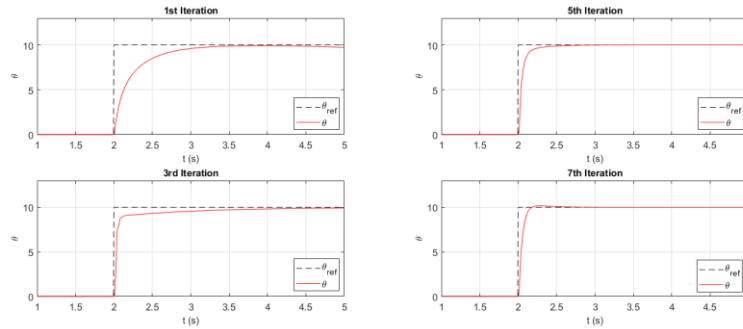
Istanbul University – Cerrahpasa, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Istanbul, Türkiye

Highlights (At least 3 and maximum 4 sentences)

- In this study, a single-degree-of-freedom robotic arm mechanism (pendulum) that can be directly controlled by a magnetic field is proposed to be used in small-scale systems for object handling, position manipulation, etc.
- PID controller parameters were obtained by optimization using iterative methods.
- The controller behavior for different reference inputs (step, triangular and sinusoidal) was investigated.
- It is shown that position control can be performed in the proposed pendulum model with 20A current.

Graphical Abstract

In this paper, electrical and mechanical equations of motion are obtained and real-time angle control is performed with a PID controller for a small size 1DOF robot arm. Figure A shows the control capability of the system at different iteration steps. The algorithm obtained the optimal parameters at the 7th iteration.



Şekil. A/ Figure. A Farklı iterasyon değerlerinde açılma değişimi (Angular response at different iteration values)

Purpose and Scope

This study aims to design a 1DOF robotic arm mechanism with direct magnetic field control for use in small-scale robotic systems.

Design/methodology/approach

A magnetic pendulum of length 37 mm is considered. The magnetic moment of the pendulum is assumed to be concentrated at the middle of the pendulum. Infinitely long filamentary wires were placed on both sides of the pendulum. Electrical and mechanical equations of motion were obtained. PID (Proportional Integral Derivative) controller is designed and control parameters are optimized by iterative shooting method. Simulations were performed in Matlab Simulink program.

Findings

The study showed that a small-scale robotic arm mechanism can be controlled using only two parallel wires. At the 7th iteration, the PID control coefficients $k_p=5,353$, $k_d=0,2157$ and $k_i=21,5987$ were obtained, giving the error value of $-0,1788^\circ$ overshoot, $0,1634s$ settling time and $0,02979^\circ$ MAE (Mean Absolute Error). It was observed that the PID controller gave good results for low frequency motions. However, due to the nonlinear nature of the system, more complex control algorithms are required.

Research limitations/implications (if applicable)

This study considered only 1DOF mechanism. Researchers can extend the results obtained in the paper with two or more arm mechanisms.

Practical implications (if applicable)

Usually, control parameters are determined by the Ziegler-Nichols method. However, this may not be possible in nonlinear systems as in this study. In these cases, the coefficients can be determined by optimization methods.

Originality

Robot arm mechanisms are usually designed for large-scale applications. There are few studies on small-scale arm mechanism designs.

† Corresponding author: huseyin.yildiz@iuc.edu.tr, +90-212-866-3700

1. Giriş (Introduction)

Son yıllarda biyoteknoloji alanında yaşanan teknolojik yenilikler küçük boyutlu işlevsel robotlar üzerine çalışmalara ilginin artmasını sağladı. Bu kapsamda, mikro ölçekli ilaç taşıma sistemleri, çeşitli görevleri yerine getirebilecek manipülatörler ve mikro ölçekli motor yapıları en çok çalışılan konular arasındadır. Çalışmalar mikro ölçekli robot sistemlerinin geleneksel motor mekanizmalarından farklı olarak doğrudan manyetik alan, ultrasonik veya lazer ışıkları ile kontrol edilebilir tasarımlar olduklarını göstermektedir (Magdanz vd, 2020; Yang, ve Wang, 2013).

Manyetik mikro robotlar biyomedikal alanda, non-invasif olarak hastalıkları görüntüleme, teşhis etme, ilaç verme, müdahale ile doku onarım ve tedavi metotlarının gelişmesinde büyük katkılar sağlamıştır (Magdanz vd, 2020; Yang, ve Wang, 2013). Bu robotlar tipik olarak manyetik alanlar tarafından kontrol edilir ve belirli yönlerde hareket edecek ve çok çeşitli işlevleri yerine getirecek şekilde tasarlanırlar (Jia vd., 2023). 2013 yılında Yang ve ekibi tarafından yayınlanan çalışmada, kanserli dokularda cerrahi operasyonların hasta kayıplarındaki durumu göze alınarak, meme kanserinde düşük girişimsel etkiye sahip nano teknoloji ilaç taşıyıcı robotik çalışmalar derlenmiştir. Çalışmada gelecekte ortaya konabilecek farklı yapılarıdaki nano teknolojik ilaç taşıyıcı robotik sistemler derlenmiştir (Yang, ve Wang, 2013). 2020 yılında Koleoso ve ekibi tarafından mikro/nano boyutlu manyetik robotların yer aldığı yayınlar derlenmiştir. Bu alandaki çalışmaların yıllara göre dağılımı, üretim metotları, malzeme yapıları, hareket kabiliyetleri, uygulama alanları bakımında farklılıkları gibi birçok farklı konu raporlanmıştır (Koleoso vd., 2020). Ceylan ve arkadaşları ise 2017 yılında biyomühendislik uygulamaları için bağlantısız mobil mikro robot çalışmalarına ait derleme yayınlamışlardır. Bu alandaki mikro robotların tasarımı, üretimi ve test edilmesindeki ön saflardaki gelişmeleri raporlamıştır. Çalışmada mobil mikro robotların harekete geçirilmesi, yapısal hareketlilikleri, algılama konuları, işlevsel yetenekleri ve en yeni stratejiler tartışılmıştır. Mikro robotların potansiyel avantajları ve dezavantajları değerlendirilmiş ve mikro ortamlarda biyobozunurluk, immünojeniklik, hareketlilik, algılama ve olası tıbbi müdahaleleri göz önünde bulundurarak gelecek çalışmalara yön vermek üzere öneriler sunulmuştur (Ceylan vd., 2017). Geleneksel cerrahi uygulamalarında hasta kayıpları ve komplikasyonları dikkate alındığında, ilaçları doğrudan kanser hücrelerine iletmek için manyetik mikro robotların kullanımı girişimsel yöntemlere göre avantajlar sağlamaktadır. Magdanz ve ekibi tarafından 2020 yılında mikro robotlar üzerine gerçekleştirilen çalışmada, doğrudan kanser hücreleri hedef alacak şekilde programlama yapılmış, sağlıklı hücrelere zarar vermeden yüksek dozda ilaç kanser hücrelerine yönlendirilmiştir. Böylelikle hasta açısından daha az yan etki ve başarılı tedaviler yapılabileceği gösterilmiştir (Magdanz vd., 2020). Manyetik kontrolcü ile gerçekleştirilen tasarımlarının dışında ultrasonik ve kızıl ötesi sinyaller kullanılarak mikro robot tasarımları gerçekleştirilebilmektedir. Ultrasonik manipülatör kullanılarak 1-2 milimetre boyutlarında mikro motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kızıl ötesi sinyallerin manipüle edilmesiyle 1-2 milimetre boyutlarda hareket kabiliyetine sahip mikro robotlar tasarlanabilmektedir (Lu vd.,2015; Mashimo ve Oba, 2022). İlaç taşıma sistemlerinin yanı sıra, optik cımbızlar ve mikro manipülatörler, manyetik mikro robot uygulamaları ile paralellik göstermektedir. Optik cımbızlar ve mikro manipülatörler hücre boyutunda düzenleme, yönlendirme ve kontrol gerektiği durumlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Mikroskobik düzeyde hücre araştırmalarında, hücrelerin düzenlenmesinde, yapay döllene, sperm ayrıştırma ve tüp bebek tedavilerinde kullanılabilirler. Zheng ve ekibi tarafından 2022 yayınlanan çalışmada optik cımbızlar ile etiketlenmiş tümör hücrelerinin analizi ve sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Mevcut yöntemlere göre daha basit ve başarılı bir şekilde tümör hücrelerini ayrıştırabilen sonuçlar ortaya konmuştur (Zheng vd.,2017; Yang vd., 2023). M. Abbas ve ekibi tarafından 2023 yılında gerçekleştirilen çalışmada insan iç kulağı hastalıklarında invazif uygulamalarının zorluğu nedeniyle manyetik nano partiküllerin koklea içinde istenilen konuma yönlendirilmesi için dört paralel yüzlü manyetik yapılar ile yönelim düzlemlerinde nano partiküllerin hareketini sağlanmıştır (Abbas vd., 2023).

Elektromanyetik teorinin her geçen gün gelişmesi, mikro robot kullanımlarına farklı bir bakış sunmaktadır. Bir taraftan mikro elektromekanik (MEMs) sistemlere kapı aralarken diğer taraftan da manyetik algılayıcılar ve uygulamaların geliştirilmesinde önem arz etmektedir (Özbey vd., 2014). Manyetik sarkaç sistemleri de bunlardan biridir. Manyetik sarkaç kontrol edilebilirliği göz önüne alındığında doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Diğer taraftan titreşim ve hareket değişimleri için hassas bir algılayıcı olarak kullanılabilir. Ayrıca basit bir elektrik makinası olarak (jiroskop) modellenmiştir (He vd., 2022). Manyetik sarkaç, doğrusal olmayan ve histerisiz etkisine sahip tepkiler ortaya koyması nedeniyle analitik olarak modellenmesi ve deneysel olarak çalışmalar yapılması açısından da zorlayıcı bir konudur. Yapılan çalışmaların, uzay, havacılık, navigasyon ve robotik alanlarında önemli katkılar sunması beklenmektedir (Nana vd., 2017). Bazı çalışmalarda mikro manyetik sarkaç modeli, farklı ve bağımsız bir ivme ölçüm yöntemi olarak çalışmıştır (Lu vd., 2015). Genel olarak, manyetik mikro robotların potansiyel uygulamaları çok geniş ve çeşitlidir. Araştırmacılar bu küçük makineleri programlamak ve kontrol etmek için yeni yollar geliştirmeye devam ettikçe, kullanım olasılıkları da artmaya devam edecek. Çeşitli görevleri yerine getirmek için tasarlanmış sayısız robot kol mekanizması vardır. Robot kol mekanizmaları genellikle büyük ölçekli ve hantal tasarımlara sahiptir (Vo-Duy ve Ta,2023). Her eksen için ayrı motor ve özel algılayıcı sistemler kullanılır. Bu sayede hassas, kontrol edilebilir ve hızlı tepki verebilirler. Ancak, kavramsal olarak mikro ölçekli bir robot kol mekanizması düşünüldüğünde motor ve algılayıcıların eklemlerde yer alması uygulanabilir değildir.

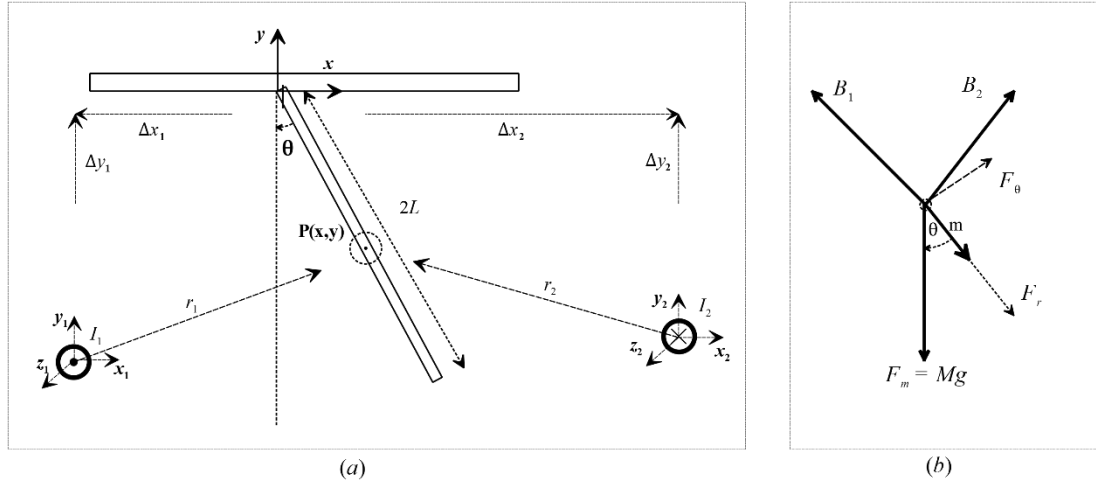
Robot kol hareketleri için manyetik alan veya ultrasonik titreşim ile doğrudan tahrik edilebilir tasarımlar zorunlu hale gelmektedir. Küçük boyutları ve dar çalışma alanları nedeni ile manyetik alanın oluşturduğu tork (τ) non-linear davranış gösterir. Basit, tek eksenli bir robot kol mekanizması (sarkaç) tasarlansa dahi, robot kolunun manyetik alan ile doğrudan kontrolü oldukça karmaşık ve doğrusal olmayan bir davranış gösterir.

Bu çalışmada, küçük ölçekli robot yapılarında kullanılmak üzere manyetik alanla çalışan tek eksenli bir robot kol mekanizmasının (sarkaç) geri beslemeli PID (Proportional Integral Derivative) kontrolü teorik olarak ele alınmıştır. Kavramsal tasarımı, matematik modeli ve bilgisayar destekli benzetimi yapılmıştır. İteratif metotlar ile PID katsayıları optimize edilmiş, farklı yol girişlerinde sistemin yapısı ve PID kontrolcü performansı incelenmiştir. İlk bölümde, literatür taraması ve genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümünde, problemin geometrik tanımlanması yapılmış olup, mekanik denklemler ve manyetik alan denklemleri sunulmuştur. Üçüncü bölümde, optimizasyon sonuçları ve benzetim sonuçları raporlanarak yorumlanmıştır. Dördüncü ve son bölümde, sonuçlar tartışılarak gelecekte yapılacak çalışmalar için tavsiyeler verilmiştir.

Çalışmamız, küçük ölçekli robot kol mekanizmalarının manyetik kontrolüne yönelik temel yapıları açıklamakta olup, elektromanyetik yapı, mekanik model ve kontrol sisteminin bir arada incelenmesi nedeni ile, henüz yeni çalışılmaya başlanan bu alanda, araştırmacılara derin ve geniş bir bilgi sunmaktadır. Bu nedenle çalışmamız, yeni araştırmalar ile genişletilerek gelecekte mini ve mikro ölçekli robot kol sistemlerinin tasarımı ve kontrolü alanlarında yol gösterici niteliktedir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Şekil 1a manyetik sarkaç sisteminin düzlemsel görünümünü vermektedir. $2L$ uzunluğunda sarkaç, x - y düzleminde dönme serbestliğine sahip olup y eksenine göre yaptığı açı θ 'dir. Sarkaç, manyettiktir. Sarkacın manyetik özelliği kütle merkezinde toplandığı kabul edilir ve manyetik dipol momenti \mathbf{m} ile temsil edilmektedir. Sarkacı kontrolü, $x_1y_1z_1$ ve $x_2y_2z_2$ noktalarına yerleştirilmiş olan sonsuz uzunlukta, çizgisel bobinler ile sağlanmaktadır. Bobinlerden I_1 ve I_2 akımları geçmektedir. M kütleli çubuk, koordinat merkezinden ($x=0, y=0$) dönme serbestliğine sahiptir. Çubuğun y eksenine göre yaptığı açı θ 'dir. Çubuğun, $(0,0)$ noktasına göre atalet momenti J dir.



Şekil 1. Problemin tanımı (a) Serbest cisim diyagramı (b) (Description of the problem (a) Free body diagram (b))

2.1. Manyetik etkilerin hesabı (Calculation of magnetic effects)

$$dB = \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \right) I_i \frac{dl \times \mathbf{r}}{r^2}$$

Cisme etki eden manyetik alanlar Biot Savart yasasından faydalanarak hesaplanır. Biot Savart yasası Eşitlik 1 ile verilmiştir.

$$d\mathbf{B}_i = \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \right) I_i \frac{dl \times \mathbf{r}_i}{r_i^2} \quad (1)$$

Burada, $d\mathbf{B}_i$; birim manyetik alan, dl ; birim uzunluk; \mathbf{r}_i ; çubuk merkezinin bobin merkezlerinde bulunan yerel koordinat eksenlerine göre konum vektörü (Eşitlik 2), μ_0 ($4\pi \times 10^{-7}$); boşluğun manyetik geçirgenlik katsayısı, I_i ; bobinlerden geçen akımları ifade etmektedir ($i=1,2$). $P(x, y)$ noktasında bulunan tek sargılı sonsuz uzunlukta ki telin oluşturduğu manyetik alan \mathbf{B}_i tel çevresi boyunda aynı büyüklüğe sahip olup, yalnızca \mathbf{e}_i bileşenine sahiptir (Eşitlik 3).

$$\mathbf{B}_i = \left(\frac{I_i \mu_0}{2\pi r_i} \right) \mathbf{e}_r \quad (2)$$

$$\mathbf{r}_i = (x - x_i)\mathbf{i} + (y - y_i)\mathbf{j} \quad (3)$$

$$\alpha_i = \frac{y - y_i}{x - x_i} \quad (4)$$

B_r^i ; manyetik alanın radyal doğrultuda ki bileşeni, α_i ; bobinin konum vektörünün x eksenine ile yaptığı açı, \mathbf{i} ve \mathbf{j} Kartezyen koordinatların birim vektörleri olmak üzere \mathbf{B}_i Kartezyen koordinatlarda Eşitlik 5 ile verilmiştir.

$$\mathbf{B}_i = B_r^i \sin(\alpha_i)\mathbf{i} + B_r^i \cos(\alpha_i)\mathbf{j} \quad (5)$$

Şekil 1b, cisme etki eden manyetik alanları ve kuvvetleri göstermektedir. Manyetik dipol momenti \mathbf{m}_i , silindirik ve Kartezyen koordinatlarda Eşitlik 6 ile verilmiştir.

$$\mathbf{m}_i = m_i \mathbf{e}_r = m_i \sin(\theta)\mathbf{i} - m_i \cos(\theta)\mathbf{j} \quad (6)$$

Bu durumda, $\boldsymbol{\tau}_i$; i. bobinin oluşturduğu döndürme momenti olmak üzere Eşitlik 7 ile hesaplanır.

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{m}_i \times \mathbf{B}_i \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\tau}_i = m_i (\sin(\theta)\mathbf{i} - \cos(\theta)\mathbf{j}) \times B_r^i (\sin(\alpha_i)\mathbf{i} + \cos(\alpha_i)\mathbf{j})$$

$$\boldsymbol{\tau}_i = m_i B_r^i (\sin(\theta)\cos(\alpha_i) + \sin(\alpha_i)\cos(\theta))\mathbf{k}$$

Gerekli matematiksel işlemler yapılır, yarım açı formüllerinden (Eşitlik 8) faydalanılır ise $\boldsymbol{\tau}_i$ en basit hali ile Eşitlik 9 kullanılarak hesaplanır.

$$\sin(A)\cos(B) = \frac{1}{2}(\sin(A+B) + \sin(A-B)) \quad (8)$$

$$\cos(A)\sin(B) = \frac{1}{2}(\sin(A+B) - \sin(A-B))$$

$$\boldsymbol{\tau}_i = \frac{m_i I_i \mu_0}{2\pi r_i} (\sin(\theta + \alpha_i))\mathbf{k} \quad (9)$$

2.2. Hareket denklemi (Equations of motion)

Cisme etki eden $\boldsymbol{\tau}_B$; cisme etki eden manyetik alanların oluşturduğu toplam moment, $\boldsymbol{\tau}_m$; mekanik kuvvetlerin oluşturduğu moment ve b yatak sürtünme katsayısı olmak üzere moment korunumu Eşitlik 10 ile verilmiştir.

$$\boldsymbol{\tau}_B + \boldsymbol{\tau}_m - b\dot{\theta} = J\ddot{\theta} \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\tau}_B = \boldsymbol{\tau}_1 + \boldsymbol{\tau}_2$$

$$\boldsymbol{\tau}_m = Mg \sin(\theta)$$

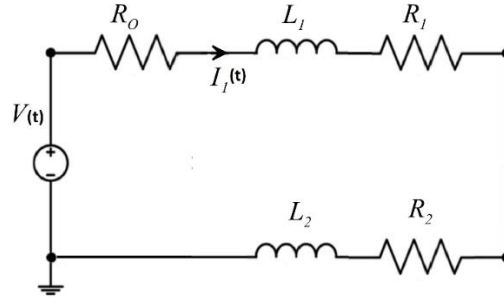
Eşitlik 10 düzenlenir ise manyetik sarkacın hareketini yöneten kısmi diferansiyel denklem elde edilir (Eşitlik 11). Eşitlik 11 ve Eşitlik 12 denklemlerinin birlikte çözümü sarkacın zamana bağlı davranışını vermektedir.

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{J} \left(\frac{m_1 I_1 \mu_0}{2\pi r_1} \sin(\theta + \alpha_1) + \frac{m_2 I_2 \mu_0}{2\pi r_2} (\sin(\theta + \alpha_2)) + Mg \sin(\theta) - b\dot{\theta} \right) \quad (11)$$

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} \quad (12)$$

2.3. Elektrik Devre Modeli (Electrical Circuit Model)

Ohm kanunu, Kirchhoff akım ve gerilim kanunları ve devre teoremleri elektrik devre analizlerinde kullanılan temel teoremlerdir. Ohm kanunu, bir devrede akan akımları belirlemek için Kirchhoff'un gerilim kanununun uygulamanın sistematik bir yöntemidir. Bu yöntemde, bir kapalı devre çevresinde, yükselen gerilimlerin düşen gerilimlere eşitliğinin yazılması ile ifade edilir. Metot devrede bulunan tüm kapalı çevrelere uygulanarak karmaşık devrelerin çözümlenmesini sağlar. Şekil 2'de $V(t)$ gerilim kaynağı (kontrol gerilimi), I_1 bobin döngü akımı, R_0 akım sınırlayıcı direnç, R_i ve L_i sarım eşdeğer direnci ve endüktansını ($i=1,2$) ifade etmektedir. 1 ve 2 numaralı bobinler seri olarak bağlanarak (ters kutuplanacak şekilde) manyetik etkiyi arttırması hedeflenmiştir.



Şekil 2. Elektrik devresi (Electrical circuit)

Devrede bulunan I_1 akımını çözümlmek için Kirchoff gerilim kanunu uygulanır. Şekil 2 ile verilen elektrik devresini temsil eden adi diferansiyel denklem Eşitlik 13 ile verilmiştir. Akımın zamana bağlı değişimini bulmak üzere Eşitlik 14'ün çözümü yapılması yeterli olacaktır. Birinci ve ikinci bobinler ters kutuplandığından oluşan akımları zıt olacaktır(Eşitlik 15).

$$-V(t) + (R_0 + R_1 + R_2)I_1(t) + (L_1 + L_2)\frac{dI_1(t)}{dt} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{dI_1(t)}{dt} = \frac{1}{(L_1 + L_2)}(V(t) - (R_0 + R_1 + R_2)I_1(t)) \quad (14)$$

$$I_2(t) = -I_1(t) \quad (15)$$

2.4. Kontrolcü tasarımı (Controller design)

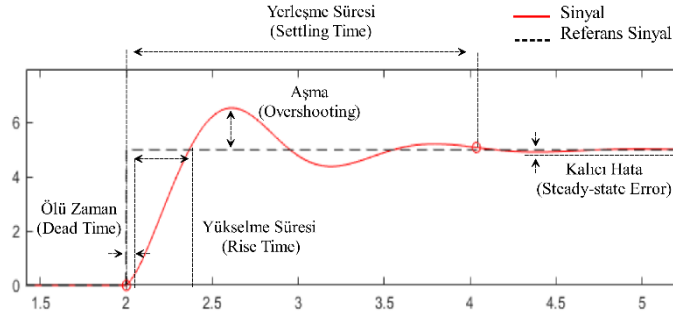
Mekanik sistemlerin kontrol yapıları için farklı türde kontrolcü tasarımları mevcuttur. PID kontrolcü, kullanım kolaylığı ve basit yapısı nedeni ile en yaygın ve olarak tercih edilen kontrol algoritmasıdır. Referans açı değeri θ_r ve sistemin mevcut açı değeri θ kullanılarak hata (e) Eşitlik 16 ile hesaplanır. Hata, hatanın türevi ve zamana bağlı olarak hatanın integrali farklı oranlarda hesaplara dahil edilerek kontrolcü çıkış gerilimi V hesaplanır (Eşitlik 17) (Yıldız vd., 2020; Yılmaz vd.,2012; Silva vd.,2023).

$$e = \theta_r - \theta \quad (16)$$

$$V = k_p e + k_d \frac{de}{dt} + k_i \int e dt \quad (17)$$

Burada, k_p ;oransal, k_i ;integral ve k_d ;türev kontrol katsayısı olarak tanımlanır ve kontrol sinyalinin karakteristiğini belirler. Kontrol katsayılarının belirlenmesinde genellikle Ziegler-Nichols metotları kullanılır. Ancak bazı durumlarda sistemin karakteristiği gereği katsayıları sistematik olarak tespit etmek mümkün olmayabilir. Bu durumda sezgisel olarak veya bir optimizasyon algoritması tarafından PID katsayıları tespit edilir. Bu çalışmada, PID parametreleri Shooting metodu kullanılarak optimize edilmiştir.

Şekil 3. Klasik bir PID kontrolcü çıkış sinyalinin basamak referans sinyaline karşı verdiği tepkiyi göstermektedir. Şekilde görüleceği üzere kontrolcü performansını veren beş temel parametre bulunur. Ölü zaman; sistemin ani değişimine tepki vermesi esnasında yaşanan gecikme. Yükselme Süresi; sistemin kararlı duruma çıkması için geçen süre. Aşma; gerçek sinyalin referans sinyalini aşma miktarı. Kalıcı hata; sistem kararlı hale geçtiğinde Referans sinyal ile gerçek sinyal arasında kalan fark. Yerleşme süresi; kontrol sinyalinin başlaması ile sistemin kararlı hale gelmesi arasında geçen süredir. Ziegler-Nichols metodunda olduğu gibi sadece oransal kontrolcü kullanıldığında bu parametrelerin tümü etkin olarak gözlenebilir. Ancak PID kontrolcü tüm bileşenleri ile sisteme uygulandığında Ölü zaman ve kalıcı hata genellikle ihmal edilecek kadar küçük olur. Ancak yükselme süresi, yerleşme süresi ve aşma önemli parametreler olarak kalmaya devam eder. Ayrıca Ortalama Kare Hata (Mean Squared Error (MSE)) ve Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error (MAE)) optimizasyon süreçlerinde genel hata parametresi olarak kullanılmaktadır (Yıldız vd.,2020).



Şekil 3. PID kontrolcü çıkış grafiği (PID controller output graph)

2.5. Shooting Yöntemi (Shooting Method)

Shooting metodu çeşitli matematik problemlerinde optimizasyon algoritması olarak kullanılır (Morrison vd.,1962; Osborne, 1969). Öncelikle optimize edilmek istenen parametreler için başlangıç değerleri tahmin edilir, probleme özgün kısıtlayıcı koşullar (integral, determinant veya denklem sistemi) hesaplanarak bilinen değerler ile kıyaslanır. Kıyaslama sonucunda elde edilen hata değerleri kullanılarak kısıtlayıcı koşulları sağlayan başlangıç değerleri tahmin edilmeye çalışılır. Bu işlemler tekrarlamalı (iteratif) olarak kısıtlayıcı koşullar istenilen hassasiyette sağlatılıncaya kadar devam edilir. Shooting metodunun daha ayrıntılı bir tartışması için referanslar (Al-Mdallal vd., 2010; Ha, 2001; Fang vd., 2023) farklı uygulama alanları için kapsamlı açıklama sunar.

x_m^r ; optimize edilmek istenen parametreler, $f_m^p(x_m^1, x_m^2, \dots, x_m^n)$ optimizasyon için gerekli kontrol fonksiyonları ($r=1,2,\dots,n$) olmak üzere, m ; iterasyon sayısı($1,2,\dots,\infty$), x_0^i ; tahmini başlangıç değer ve f_0^i ; bilinen amaç fonksiyonudur. Δx_m^r ; parametre artış oranı olmak üzere f_m^p fonksiyonunun x_m^r değişkenine göre kısmi türevlerinden ($\frac{\partial f_m^p}{\partial x_m^r}$) oluşan D matrisi Eşitlik 18 ile hesaplanır.

$$\frac{\partial f_m^p}{\partial x_m^r} = \frac{f_m^p(x_m^1, x_m^2, \dots, x_m^n) - f_m^p(x_m^1, x_m^2, \dots, x_m^n + \Delta x_m^r, \dots, x_m^n)}{\Delta x_m^r} \quad (18)$$

$$D = \frac{\partial f_m^p}{\partial x_m^r} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_m^1}{\partial x_m^1} & \frac{\partial f_m^1}{\partial x_m^2} & \frac{\partial f_m^1}{\partial x_m^3} \\ \frac{\partial f_m^2}{\partial x_m^1} & \frac{\partial f_m^2}{\partial x_m^2} & \frac{\partial f_m^2}{\partial x_m^3} \\ \frac{\partial f_m^3}{\partial x_m^1} & \frac{\partial f_m^3}{\partial x_m^2} & \frac{\partial f_m^3}{\partial x_m^3} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Amaç fonksiyonu ile fonksiyonun iterasyon değeri arasında ki fark df_m^p olmak üzere (Eşitlik 21-22) ile verilen lineer denklem sisteminin çözümü (Eşitlik 22) δX_m vektörünü verir. δX_m ; optimizasyon parametrelerinde yapılması gereken değişiklikler olarak tanımlanmaktadır.

$$\delta X_m = \begin{bmatrix} x_{m+1}^1 - x_m^1 \\ x_{m+1}^2 - x_m^2 \\ x_{m+1}^3 - x_m^3 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$df_m^p = F^p(x^1, x^2, \dots, x^n) - f_m^p(x_m^1, x_m^2, \dots, x_m^n) \quad (21)$$

$$\Gamma = df_m^p = \begin{bmatrix} df_m^1 \\ df_m^2 \\ df_m^3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$[D][\delta X] = [\Gamma] \quad (23)$$

x_{m+1}^r yeni iterasyon değeri olmak üzere Eşitlik 24 ile hesaplanır. Birden çok parametrelili sistemlerde parametrelerde ki değişiklikler sonucu beklenmedik şekilde etkileyebilir. Bu nedenle yeni iterasyon değeri hesaplanırken bir yaklaşım katsayısı dahil edilir. Eşitlik 24'te s yaklaşım katsayısı olarak bilinir ve 0-1 arasında bir değer alır.

$$[X_{m+1}] = [X_m] + s[\delta X_m] \quad (24)$$

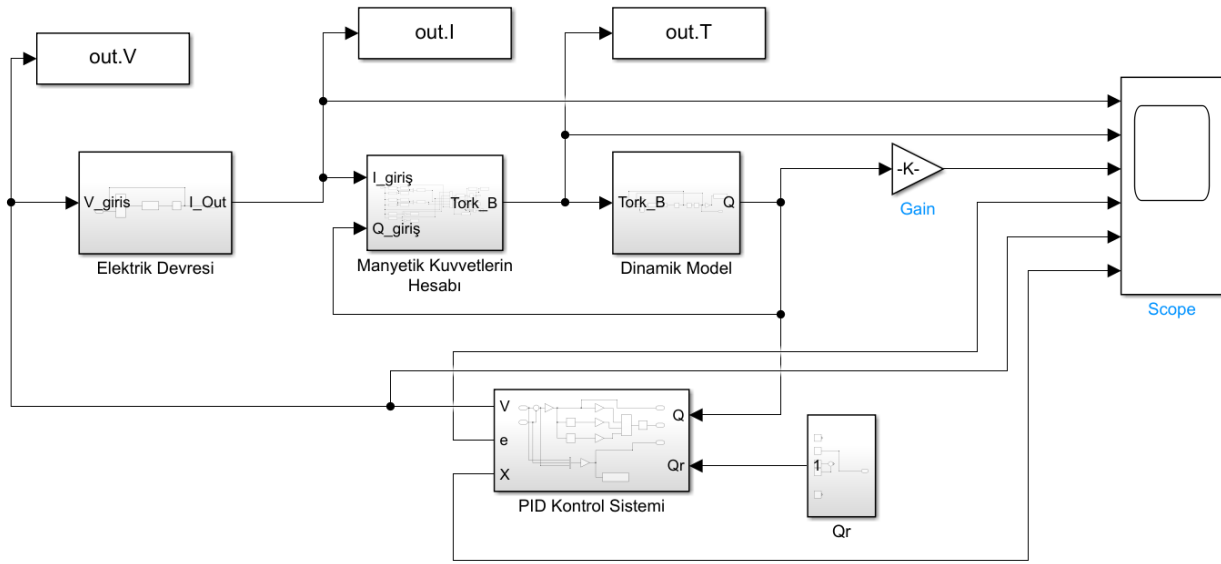
$$x_{m+1}^r = x_m^r + s\delta x_m^r$$

Çalışmada k_p , k_d ve k_i parametrelerini optimize etmek üzere aşma, yerleşme süresi ve ortalama mutlak hata (MAE) kısıtlayıcı fonksiyonlar olarak seçilmiştir. y_n ve \bar{y}_n sırası ile gerçek ve referans veriler olmak üzere 3060 örnek veri (T) kullanılarak MAE Eşitlik 25 ile hesaplanmaktadır.

$$MAE = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^T |y_n - \bar{y}_n| \quad (25)$$

3. Benzetim çalışmaları ve sonuçlar (Simulations and results)

Şekil 4'te benzetim programının matlab simulink ara yüzü görünümü verilmiştir. Program dört bileşenden oluşan bir yapıdan oluşmaktadır. Elektrik Devresi; bobinlerin elektrik devre benzetimini çözümlyerek giriş geriliminden anlık olarak çıkış akımını hesaplamaktadır. Manyetik kuvvetlerin hesabı, üretilen akıma bağlı olarak her iki telin manyetik sarkaç ile etkileşimini hesaplayarak üretilen manyetik tork değerini hesaplamaktadır. Dinamik model, zamana ve oluşan manyetik torka bağlı olarak sarkacın konumunu ve açısını hesaplamaktadır. Dinamik modelden elde edilen açısız değer referans açısı ile birlikte PID kontrol sistemini besler. Burada önceden tanımlanan katsayılar dikkate alınarak gerilim çıkışı hesaplanır ve tekrar elektrik devresi bloğuna giriş olarak verilir.



Şekil 4. Matlab simulink blok gösterimi (Matlab simulink block representation)

Benzetim çalışmalarında kullanılan fiziksel büyüklükler ve değerleri Tablo 1 ile verilmiştir. Benzetimler 20s boyunca 0.0033s sabit adımla gerçekleştirilmiş olup, integrasyon işlemleri için matlab kütüphanelerinde yer alan 4. derece Runge-Kutta metodu kullanılmıştır.

Tablo 1. Fiziksel büyüklükler (Physical parameters)

Sembol	Değer	Birim	Açıklama
L	0,0185	m	Manyetik çubuk uzunluğunun yarısı
m	0,15	Am ²	Manyetik dipol momentini
V _{max}	12	V	Uygulanabilir en yüksek gerilim
L ₁ =L ₂	1,0e-03	H	Bobin tellerinin öz indüktansı
R	0,5	Ω	Sistemin toplam direnci
Dx ₁	-5 e-03	m	1. bobinin x koordinatı
Dx ₂	5 e-03	m	2. bobinin x koordinatı
b	5 e-06	N.m.s/rad	Sürtünme kuvveti
μ ₀	4π e-07	H/m	Boşluğun manyetik geçirgenliği

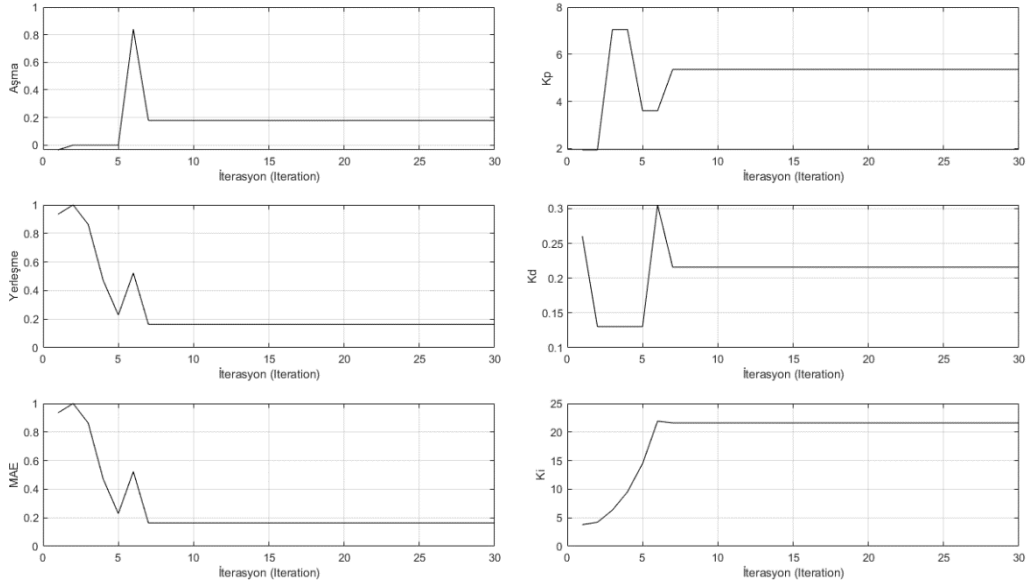
3.1. PID katsayılarının optimizasyonu (Optimization of PID coefficients)

Optimizasyon için ikinci saniyede sisteme $Q_{max} = 10^\circ$ olacak şekilde basamak girişi uygulanmıştır. Başlangıçta $k_p=0,48$, $k_d=0,0105$, $d_i=3,787$ olarak seçilmiştir. İterasyon yaklaşma oranı $s=0,5$ olarak alınmıştır. İlk 10 iterasyon için sayısal değerler Tablo 2 ile verilmiştir. En fazla 30 iterasyon için çalıştırılan optimizasyon algoritması ile elde edilen sonuçlar Şekil 5'te gösterilmiştir. İterasyon algoritması yedinci iterasyondan sonra en düşük hata değerlerine ulaşmıştır. En iyi sonuçlara ulaşıldığında aşma, yerleşme ve MAE hataları sırası ile $-0,1788^\circ$,

0,1634s ve 0,02979° olarak elde edilmiştir. Ulaşılan PID parametreleri ise $k_p=5,353$, $k_d=0,2157$ ve $k_i=21,5987$ 'dir (Tablo 1).

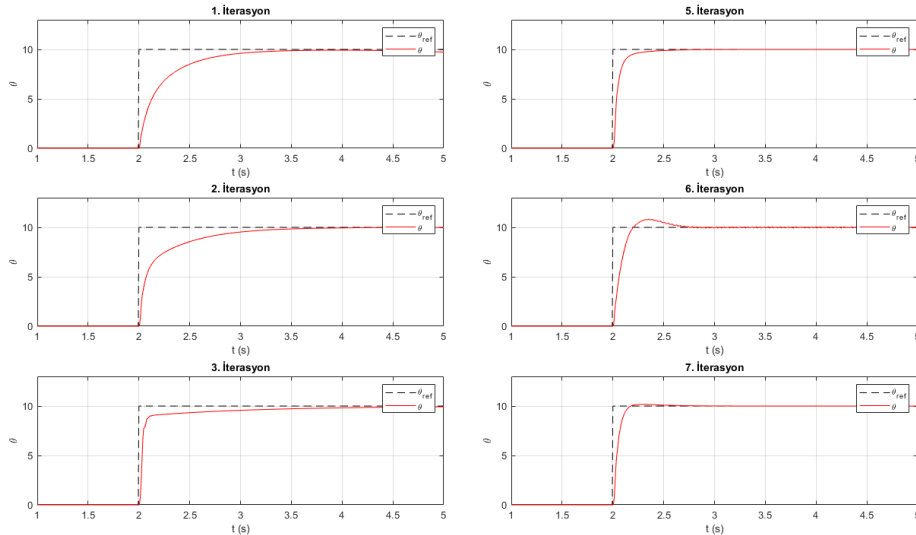
Tablo 2. Parametre ve hata tablosu (Parameters and error table)

İterasyon	k_p	k_d	k_i	Aşma (°)	Yerleşme Süresi (s)	MAE (°)
1	1,9373	0,2605	3,7923	-0,0348	0,9346	0,1789
2	1,9373	0,1304	4,2031	0,0000	1,0000	0,1145
3	7,0467	0,1304	6,3353	0,0000	0,8627	0,0763
4	7,0467	0,1304	9,5330	0,0000	0,4706	0,0511
5	3,6020	0,1304	14,4720	0,0000	0,2288	0,0340
6	3,6020	0,3054	21,9091	0,8402	0,5229	0,0776
7	5,3531	0,2158	21,5987	0,1787	0,1634	0,0298
8	5,3531	0,2158	21,5987	0,1787	0,1634	0,0298
9	5,3531	0,2158	21,5987	0,1787	0,1634	0,0298
10	5,3531	0,2158	21,5987	0,1787	0,1634	0,0298



Şekil 5. PID parametrelerinin iterasyon ile değişimi (Variation of PID parameters with iteration)

Şekil 6 ile farklı iterasyon değerleri için zamana bağlı olarak sarkacın açılma değişimi verilmiştir. İlk iterasyon için yerleşme süresi 2s iken, üçüncü iterasyonda hızla 0.5s'nin altına inmektedir. İterasyon değerleri arttıkça sistem aşma değerini de azaltmakta, aynı zamanda ortalama kare hata değeri de en düşük seviyede olacak şekilde onuncu iterasyonda kararlı hale gelmektedir.



Şekil 6. Farklı iterasyon değerlerinde açılma değişimi (Angular response at different iteration values)

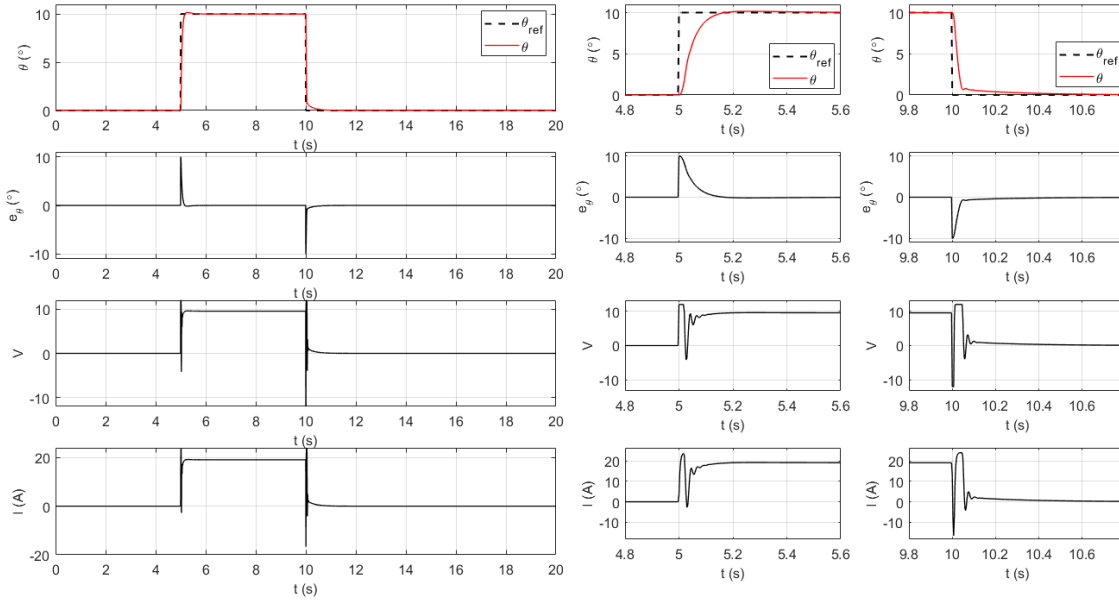
3.2. Yol takibi sonuçları (Path tracking results)

Optimizasyon sonucu elde edilen PID katsayıları kullanılarak sistemin farklı referans sinyali şekillerine verdiği tepkiler incelenmiştir. Öncelikle tek ve çift basamak sinyali uygulanarak sistemin ani hata değişimlerinde davranışı, üçgen ve sinüs formunda sinyaller ile sürekli değişen sinyallere tepkisi gözlemlenmiştir. Tablo 3, sinyal formları ve hata analizi sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 3. Farklı referans formlarında hata analizi (Error analysis on different reference forms)

	Basamak formu		Üçgen formu			Sinüs formu		
	Tek	Çift	p=20s	p=4s	p=2s	p=20s	p=4s	p=2s
MAE (°)	0,0506	0,0570	0,0848	0,4030	0,7063	0,0842	0,4166	0,7623
MSE(°)	0,2582	0,1268	0,0098	0,2162	0,6399	0,0139	0,2883	0,8213
e_{max} (°)	10,0000	5,0000	0,1628	0,7252	1,2002	0,2521	1,0065	1,5273

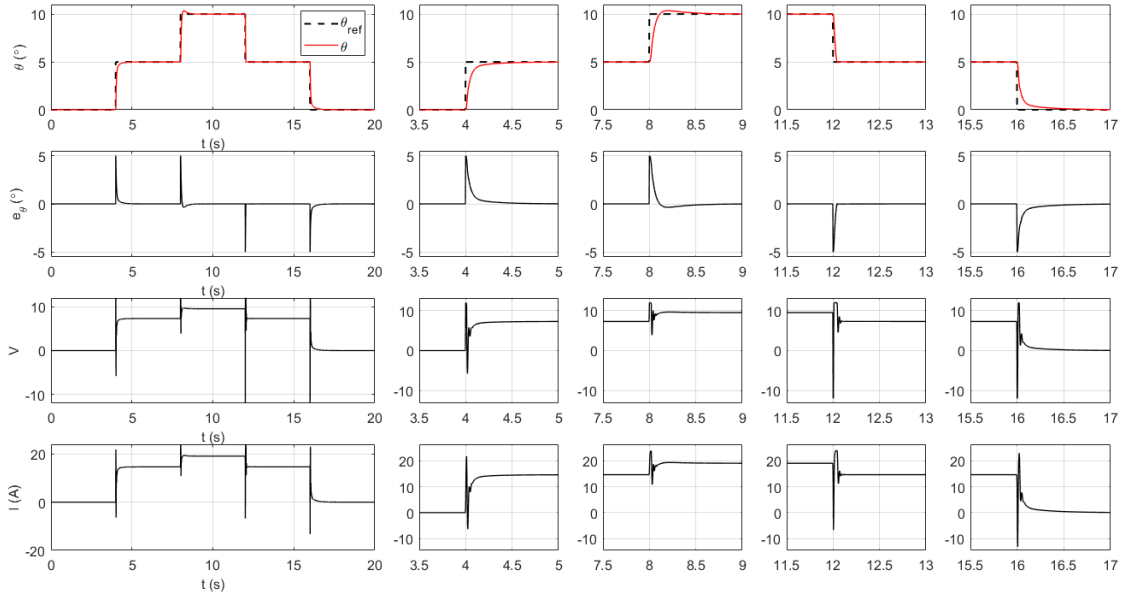
Şekil 7, 5s ile 10 s aralığında $Q_{ref} = 10^\circ$ basamak sinyalinde sistemin çalışmasını göstermektedir. Sinyal girişinde sistemin kararlı hale geçmesi 0.2s sürmektedir. Sistemin ortalama mutlak hata (MAE) değeri $0,0506^\circ$ 'dir. Hata ani değiştiğinden ilk sinyal girişinde en yüksek hata oluşmaktadır. Hatanın bir başka ölçütü de ortalama kare hata (MSE) ise $0,258^\circ$ olarak hesaplanmıştır. İlk hata girişlerinde sistem en yüksek gerilim (12V) sinyal üretmekte, kısa süre içinde gerilim 10V olarak kalıcı hale gelmekte. Sinyal çıkışında ise ani değişimden dolayı -12V sinyal üretilmekte, sistem dengeye geldiğinde sinyal çıkışı kapatılmaktadır.



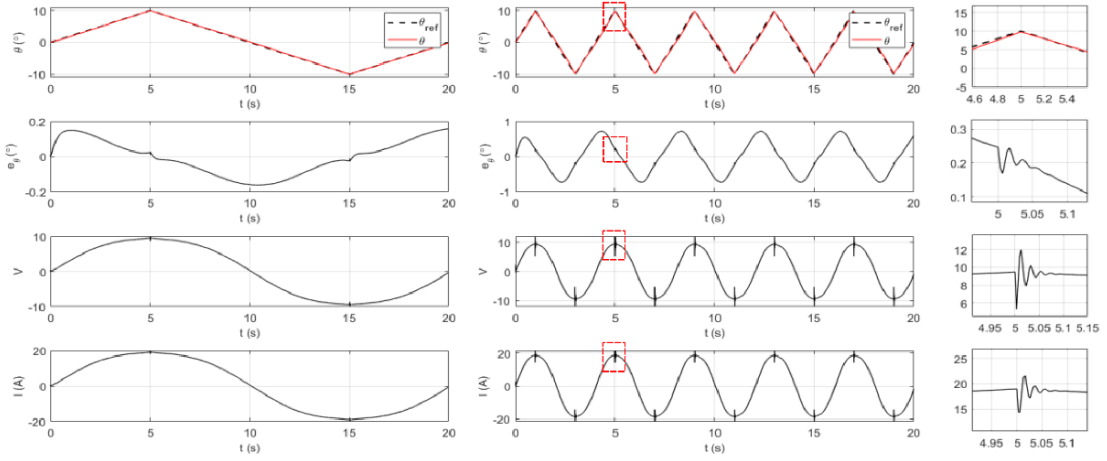
Şekil 7. Tek basamaklı sinyal sonuçları (Single-step reference signal results)

Şekil 8, 4s aralıklar ile değişen iki kademeli basamak sinyali sonuçlarını vermektedir. Kademenin artması ile referans genliği düştüğünden kontrolcünün hata değerlerinin de düştüğü gözlemlenmiştir. MAE değeri $0,0570^\circ$ iken MSE değeri $0,1268^\circ$ 'dir. Referansın aniden değiştiği köşe bölgelerinde sistemin daimi rejime ulaşmak için geçmesi gereken süre artmıştır.

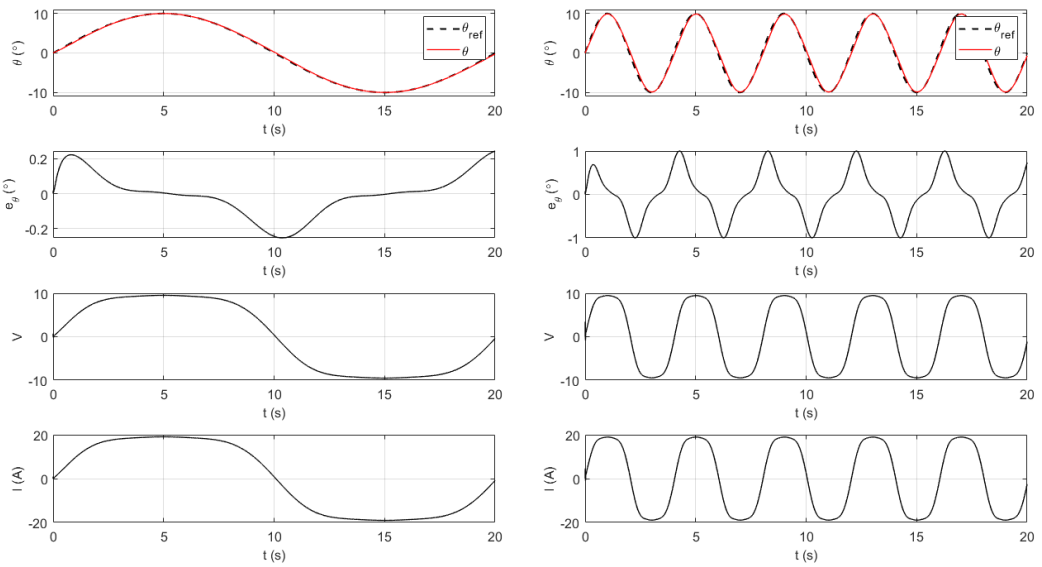
Şekil 9 ve Şekil 10, periyodu 20s ve 4s olan iki farklı referans sinyal sonuçlarını göstermektedir. Sistemin her iki periyotta oluşturulan sinyaller içinde kontrolü oldukça iyidir. En yüksek hatalar üçgen form için sırası ile $0,1628^\circ$ ve $0,4030^\circ$, sinüzoidal form için ise $0,0842^\circ$ ve $0,4166^\circ$ 'dir. En yüksek hatalar $Q_{ref} = 0^\circ$ dolaylarındadır. Bu durumun en temel nedeni buralarda kontrolcü gerilimlerinin 0 olması ve sistemin hatayı sıfırlaması nedeni ile kendini kapatmasıdır. Bir diğer sebep ise 0 noktasının bobinlere en uzak nokta olmasıdır. Bu bölgede oluşan manyetik alanlar diğer bölgelere oranla daha küçüktür. Bunun yanında periyot küçüldükçe sistemin hatası artmakta, kontrol kabiliyeti azalmaktadır. Her iki grafik incelendiğinde üçgen formda sinyallerin, sinüzoidal sinyale göre daha iyi takip edildiği görülmektedir. Sinüzoidal dalga formunda oluşan en yüksek hata, üçgen formunda dalgaya göre ortalama %28.2 oranında daha büyüktür (Tablo 3).



Şekil 8. Çift basamaklı referans sinyal sonuçları (Double-step reference signal results)



Şekil 9. Üçgen dalga formunda referans sinyal sonuçları (Reference signal results in triangular waveform)



Şekil 10. Sinüs dalga formunda referans sinyal sonuçları (Reference signal results in sine waveform)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Sağlık ve biyomedikal cihaz teknolojileri günümüzün en önemli konuları arasında yer almaktadır. Son yıllarda teknolojiye yaşanan gelişmeler ile birlikte, mikro ve makro ölçekli robotik sistemlerin ilaç dozajlama, hücre ve DNA dizilimi oluşturma, görüntüleme ve bölgesel müdahale sistemi olarak geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Çalışmada makro ölçekte manipülatör olarak kullanılması planlanan tek kollu bir robot kol (sarkaç) modeli önerilmiştir. Robot kolun kontrolünün, sonsuz uzunlukta bobin telleri kullanılarak yapılabileceği gösterilmiştir. Sistemin elektriksel modeli, mekanik modeli ve kontrol yapısı detaylı olarak açıklanmıştır. Her ne kadar basit bir yapıya sahip olsa da doğrudan manyetik kuvvet ile kontrol edilecek olması, küçük kuvvetler ile hareket sağlanıyor olması nedeni ile non-lineer bir model olduğu açıktır (Eşitlik 10-12). Elektrik modelin (Eşitlik 13-15) de non-lineer olduğu göz önünde bulundurulur ise matematik yapısı oldukça karmaşıktır. Elektrik ve manyetik sistemi yöneten denklem sistemleri MatLab simulink ara yüzü kullanılarak modellenmiştir. Manipülatör kontrol yapısı aç referansı dikkate alınarak PID kontrolcü tasarımı yapılmıştır. PID parametrelerinin belirlenmesi için Ziegler-Nichols metotları uygulanmıştır. Ancak sistemin doğrusal olmayan yapısı nedeni ile yalnızca oransal kontrolcü uygulandığında sistem çok hızlı kararsız hale geçtiğinden uygun kontrolcü parametrelerine ulaşamamıştır. Uygun kontrolcü parametrelerinin tespiti için, 10° basamak referans girdisi uygulanan sistem, iteratif optimizasyon tekniklerinden shooting metodu kullanılarak analiz edilmiştir. İterasyon algoritması 7. iterasyondan sonra en düşük hata değerlerine ulaşmıştır. En iyi sonuçlara ulaşıldığında aşma, yerleşme ve MAE hataları sırası ile $-0,1788^\circ$, $0,1634s$ ve $0,02979^\circ$ olarak elde edilmiştir. Ulaşılan PID parametreleri ise $k_p=5,353$, $k_i=0,2157$ ve $k_d=21,5987$ 'dir (Tablo 1). Elde edilen kontrol parametreleri kullanılarak kontrolcünün farklı referans sinyali altında (basamak, üçgen ve sinüzoidal) davranışı incelenmiştir. Sistemde oluşan hata değerleri, kontrolcü gerilim çıkışı ve devre akımı davranışları Şekil 7-10 ile verilmiştir. Sistemin basamak sinyal girişine tepkisinin hızlı ve kararlı olduğu görülmüştür. Ani yüklemelerde hızla hatayı düşürerek istikrarlı hale gelmektedir. Üçgen ve sinüzoidal formda sinyaller sürekli yük oluşturmaktadır. Oluşturulan kontrol algoritmasının yüksek periyotlarda kontrolcü performansının iyi olduğunu, ancak frekans yükseldikçe hata oranında kayda değer büyümeler olduğunu göstermiştir (Tablo 3).

Sonuç olarak çalışma, küçük ölçekli bir robot kol mekanizmasının yalnızca paralel iki tel kullanılarak kontrol edilebileceğini göstermiştir. Bu durum robot kol mekanizmalarının mikro ölçekli kullanılabileceklerinin bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Her ne kadar düşük frekanslı uygulamalarda PID kontrolcünün iyi sonuç verdiği görülse de kaotik yapısı nedeni ile, frekans yükseldiğinde bulanık mantık kontrolü (fuzzy logic control) ve kayan kipli kontrol (sliding mode control) metotlarının uygulanması daha iyi sonuçlar verebilir. Çalışma, yeni araştırmalar ile genişletilerek gelecekte mini ve mikro ölçekli robot kol sistemlerinin tasarımı ve kontrolü konusunda yol gösterici niteliktedir. Farklı kontrol metotlarının uygulanmasının yanında, çok kollu robot kol mekanizması olarak tasarımlar da geliştirilerek daha kararlı ve fiziksel kullanıma uygun yapılar elde edilmesi mümkün olabilir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmanın hazırlanması ve hesaplamalarının yapılmasında desteklerini esirgemeyen ve yanımda olan sayın Prof. Dr. Erol Uzal ve değerli çalışma arkadaşım Dr. Serdar Yılmaz'a teşekkürlerimi sunarım.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.
No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Alba, E., Dorronsoro, B., 2005. The Exploration/Exploitation Tradeoff in Dynamic Cellular Genetic Algorithms. IEEE, Transactions on Evolutionary Computation, 9, 26-142. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2005.843751>
- Altinel, İ.K., Öncan, T., 2005. A New Enhancement of the Clarke and Wright Savings Heuristic for the Capacitated Vehicle Routing Problem. Journal of the Operational Research Society, 56 (8), 954-961. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601916>
- Goldberg, D., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Reading, Boston: MA: Addison-Wesley Professional.
- Jaszkiewicz, A., Ishibuchi, H., Zhang, Q., 2012. Multiobjective Memetic Algorithms. F. Neri, C. Cotta, P. Moscato (Edt.), Handbook of Memetic Algorithms, içinde (s. 201-217). Berlin: Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

- Zhang, H., Liu, B., 2009. A New Genetic Algorithm for Order-Picking of Irregular Warehouse. *International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*, 1, 121-124. <https://doi.org/10.1109/ESIAT.2009.131>
- Abbes, M., Belharet, K., Souissi, M., Mekki, H., & Poisson, G., 2023. Design of a Robotized Magnetic Platform for Targeted Drug Delivery in the Cochlea. *IRBM*, 44(1), 100728. <https://doi.org/10.1016/j.irbm.2022.06.003>
- Al-Mdallal, Q. M., Syam, M. I., & Anwar, M. N., 2010. A collocation-shooting method for solving fractional boundary value problems. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15(12), 3814-3822. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2010.01.020>
- Zheng, B., Li, C. Y., Huang, S., Zhang, Z. L., Wu, Q. S., Pang, D. W., & Tang, H. W., 2022. Optical tweezers assisted analyzing and sorting of tumor cells tagged with fluorescence nanospheres in a microfluidic chip, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 368, 2022, 132173, ISSN 0925-4005, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.132173>.
- Ceylan, H., Giltinan, J., Kozielski, K., & Sitti, M., 2017. Mobile microrobots for bioengineering applications. *Lab on a Chip*, 17(10), 1705-1724. <https://doi.org/10.1039/C7LC00064B>
- Fang, L., Vandewalle, S., & Meyers, J., 2023. An SQP-based multiple shooting algorithm for large-scale PDE-constrained optimal control problems. *Journal of Computational Physics*, 477, 111927. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2023.111927>
- Ha, S. N., 2001. A nonlinear shooting method for two-point boundary value problems. *Computers & Mathematics with Applications*, 42(10-11), 1411-1420. [https://doi.org/10.1016/S0898-1221\(01\)00250-4](https://doi.org/10.1016/S0898-1221(01)00250-4)
- He, C.-H., Amer, T. S., Tian, D., Abolila, A. F., & Galal, A. A., 2022. Controlling the kinematics of a spring-pendulum system using an energy harvesting device. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 41(3), 1234-1257. <https://doi.org/10.1177/14613484221077474>
- Jia, Y., Zhu, Z., Jing, X., Lin, J., & Lu, M., 2023. Fabrication and performance evaluation of magnetically driven double curved conical ribbon micro-helical robot. *Materials & Design*, 226, 111651. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111651>
- Koleoso, M., Feng, X., Xue, Y., Li, Q., Munshi, T., & Chen, X., 2020. Micro/nanoscale magnetic robots for biomedical applications. *Materials Today Bio*, 8, 100085. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2020.100085>
- Lu, Y., Li, L., Hu, N., Pan, Y., & Ren, C., 2015. Measurement Method of Magnetic Field for the Wire Suspended Micro-Pendulum Accelerometer. *Sensors*, 15(4), 8527-8539. <https://doi.org/10.3390/s150408527>
- Magdanz, V., Khalil, I. S. M., Simmchen, J., Furtado, G. P., Mohanty, S., Gebauer, J., Xu, H., Klingner, A., Aziz, A., Medina-Sánchez, M., Schmidt, O. G., & Misra, S., 2020. IRONSperm: Sperm-templated soft magnetic microrobots. *Science Advances*, 6(28), eaba5855. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba5855>
- Mashimo, T., & Oba, Y., 2022. Performance improvement of micro-ultrasonic motors using the thickness shear mode piezoelectric elements. *Sensors and Actuators A: Physical*, 335, 113347. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.113347>
- Morrison, D. D., Riley, J. D., & Zancanaro, J. F., 1962. Multiple shooting method for two-point boundary value problems. *Communications of the ACM*, 5(12), 613-614. <https://doi.org/10.1145/355580.369128>
- Nana, B., Yamgoué, S. B., Tchitnga, R., & Wofo, P., 2017. Dynamics of a pendulum driven by a DC motor and magnetically controlled. *Chaos, Solitons & Fractals*, 104, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2017.07.027>
- Osborne, M. R., 1969. On shooting methods for boundary value problems. *Journal of mathematical analysis and applications*, 27(2), 417-433.
- Özbey, A. Uzal, E. Yıldız, H. Mutlu, A., 2014. Control of a Robot Arm Using Magnetic Forces. *Numerical Methods for scientific Computations and Advanced applications*, Bansko, Bulgaria.
- Silva, F., Batista, J., Souza, D., Lima, A., Dos Reis, L., & Barbosa, A., 2023. Control and identification of parameters of a joint of a manipulator based on PID, PID 2-DOF, and least squares. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(6), 327. <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04251-5>.
- Vo-Duy, T., & Ta, M. C., 2023. Fundamental design of electric motor control systems. *Çinde Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering* (ss. 428-453). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821204-2.00054-4>
- Yang, W., Wang, Z., Wang, X., Chen, Y., Ge, Z., & Yu, H., 2023. Bio-inspired propeller robot with controllable pitch driven by magnetic and optical coupling field. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 382, 133509. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133509>
- Yang, Y., Wang, H., 2013, Perspectives of nanotechnology in minimally invasive therapy of breast cancer, *J. Healthc. Eng.*, 4 (1) (2013), pp. 67-86, 10.1260/2040-2295.4.1.67. <https://doi.org/10.1260/2040-2295.4.1.67>
- Yildiz, H., Korkmaz Can, N., Ozguney, O. C., & Yagiz, N., 2020. Sliding mode control of a line following robot. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(11), 561. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02645-3>
- Yilmaz, S., Toker, O., Arslan, N., & Sedef, H., 2012. Optimal in vitro realization of pulsatile coronary artery flow waveforms using closed-loop feedback algorithms with multiple flow control devices. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 20(6), 1006-1030. <https://doi.org/10.3906/elk-1101-1024>



1.4 ve 2.4 GHz RADAR UYGULAMALARI İÇİN REFLEKTÖR MİKROŞERİT DİZİ ANTENİ

Abdulkadir ÇILDIR^{1*}

^{1*}Department of Electronic and Automation, Trakya University, Edirne, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Mikroserit anten, Radar, Yansıtıcı, Yüksek kazanç, HPBW.</i>	Bu çalışmada kısa menzilli radar çalışmaları için kazancı yüksek olan, reflektörlü E-şekilli dizi mikroserit anten tasarımı sunulmaktadır. Substratın üst yüzeyindeki E-şekilli dipoller, FR-4 substratının tabanı olan düzensiz bir mikroserit hattı ile temas ettirilmektedir. Anten kuaksiyel besleme ile uyarılmıştır. Alt tabaka malzemesi ve krom yansıtıcı birbirine Teflon malzeme ile tutturulmuştur. Önerilen anten, 1.4 ve 2.4 GHz rezonans frekanslarında sırasıyla 7.85 ve 9.62 dBi kazanç sunmaktadır. Bu anten ayrıca 15 dB'in üzerinde F/B oranına ve kısa mesafeler için kullanılabilir bir HPBW (half power beam width) değerine sahiptir.

REFLECTOR MICROSTRIP ARRAY ANTENNA for 1.4 AND 2.4 GHz RADARS APPLICATIONS

Keywords	Abstract
<i>Microstrip antenna, Radar, Reflector, High gain, HPBW.</i>	This study presents an E-shaped array microstrip antenna design with a reflector, which has a high gain for short-range radar studies. E-shaped dipoles at the top of the substrate are brought into contact with an irregular microstrip line, which is the bottom of FR-4 substrate. The antenna feed is excited using a coaxial cable. The substrate material and the chrome reflector are attached to each other with Teflon material. The proposed antenna provides 7.85 and 9.62 dBi gains at resonance frequencies of 1.4 and 2.4 GHz, respectively. This antenna also has an F/B ratio of over 15 dB and an HPBW (half power beam width) value able to be used for short-ranges.

Alıntı / Cite

Cildir, A., (2024). The Utilization of A Microstrip Array Antenna Featuring An Aperture Reflector at A Frequency Of 2.4 Ghz for Radar Applications, Muhendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(1), 88-97.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
A. Cildir, 0000-0003-1789-6088	Başvuru Tarihi / Submission Date	28.08.2023
	Revizyon Tarihi / Revision Date	12.01.2024
	Kabul Tarihi / Accepted Date	04.02.2024
	Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

* İlgili yazar/ Corresponding author: abdulcadircildir@trakya.edu.tr, +90 5352657282

REFLECTOR MICROSTRIP ARRAY ANTENNA for 1.4 AND 2.4 GHz RADARS APPLICATIONS

Abdulkadir Cildir^{1†}

¹Departement of Electronic and Automation, Trakya University, Edirne, Turkiye

Highlights (At least 3 and maximum 4 sentences)

- This study presents an E-shaped dipole array microstrip antenna design with a reflector
- This study has a high gain that can be used for short-range radar studies.
- This antenna also has an F/B ratio of over 15 dB and 38° HPBW value
- The antenna operates at 1.4 and 2.4 GHz resonant frequencies with 7 and 9.5 dBi gains.

Graphical Abstract

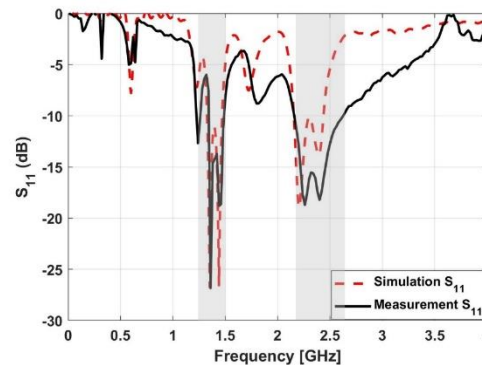


Figure. The return loss parameters of the proposed antenna

Purpose and Scope

Recommended for short-range radar applications, this antenna can be used in different application areas with its low cost, small dimension, and high gain.

Design/methodology/approach

The array antenna constructed with dimensions of 19×15×11.8 mm³ has been designed and simulated in CST studio. At the same, this design has been fabricated using PCB techniques.

Findings

The design has gains of 9 and 9.5 dBi at the resonance frequency of 1.4 and 2.4 GHz, respectively. It has also a 17 dB F/B ratio value and 38° HPBW value

Research limitations/implications (if applicable)

The array antenna constructed with dimensions of 19×15×11.8 mm³ has gains of 9 and 9.5 dBi at the resonance frequency of 1.4 and 2.4 GHz, respectively. It has also a 17 dB F/B ratio value and 38° HPBW value that make it easier signal processing.

Practical implications (if applicable)

In future research endeavors, there is potential to broaden the bandwidth even further. Exploring the possibility of achieving a more compact structure could also be pursued.

Originality

This study presents an E-shaped dipole array microstrip antenna design with a reflector that has a high gain that can be used for short-range radar studies. The proposed antenna provides 7 and 9.5 dBi gains at resonance frequencies of 1.4 and 2.4 GHz, respectively

[†] İlgili yazar/ Corresponding author: @trakya.edu.tr, +90 5352657282

1. Introduction

Doppler radar has enabled studies in many areas, from non-contact weather forecasting, vehicle speed detection, vehicle traffic monitoring, smart homes, baby monitoring, heartbeat, and breathing monitoring to tumor detection (Benchetrit, 2000; Gu, He, & Zhu, 2019; Huang, Hayward, & Lin, 2016; Javaid, Noble, Rosenberg, & Weitnauer, 2015; C. Li, Lubecke, Boric-Lubecke, & Lin, 2013; M. Li & Lin, 2017; J. Lin & Li, 2007; J. C. Lin, 1992; Naishadham, Piou, Ren, & Fathy, 2016; Soldovieri et al., 2012; Suryadevara & Mukhopadhyay, 2012; Watson-Watt, 1945).

Doppler radar has an active role in the non-contact monitoring of vital signs by being applied in healthcare areas. For this purpose, many studies observed in the literature the heartbeats and respirators for monitoring people's daily activities with Doppler radar (Benchetrit, 2000; Gu et al., 2019; Huang et al., 2016; Javaid et al., 2015; Karatay, Orcan, Özkal, & Yaman, 2019; Klavestad, Assres, Fagernes, & Grønli, 2020; M. Li & Lin, 2017; J. Lin & Li, 2007; Naishadham et al., 2016; Neebha & Nesasudha, 2018; Suryadevara & Mukhopadhyay, 2012). In one study, the movements of four different old people were followed with radar at the frequency of 2.4 GHz. This radar method eliminates the need for a health caregiver (Suryadevara & Mukhopadhyay, 2012).

Antennas are one of the most fundamental parts of radars that consist of many circuit elements. Different antenna types can be preferred according to the usage areas of radars. Among these antenna types, microstrip patch antennas are frequently used in short-range Doppler radars, especially in health following and observing with their advantages such as lightness, ease of production, and low production cost (Gu et al., 2019; Karatay et al., 2019; M. Li & Lin, 2017; Neebha & Nesasudha, 2018). In a study, respiratory and heartbeat, which are people's vital signs, were detected with radar measurements in the range of 60 cm at the frequency of 2.4 GHz. Also, a circular microstrip antenna with 2.6 dBi gain was used in this study (Gu et al., 2019). In a different study, two antenna designs were presented to increase the range and capability of the MIT-Coffee Can Doppler radar. In this study, the designs of an aperture-coupled Vivaldi-type transmitter patch antenna and a microstrip array patch antenna were proposed operating at the frequencies of 2.45 GHz. FR-4 substrate material was used in the production of these antennas, and they had gains of 3.23 and 5.63 dBi, respectively (Karatay et al., 2019). In another study, four different microstrip patch antennas were designed for radar applications in the 5-8 GHz span, and these antennas were compared to their reflection coefficients (Neebha & Nesasudha, 2018).

The disadvantages of microstrip antennas are that they have an average of 5% bandwidth and present low gain (Balanis, 2015). There are different studies on microstrip arrays (Kim & Kim, 2021; Y. Li & Luk, 2015; Midasala & Siddaiah, 2016; Yang, Geyi, & Sun, 2017) and microstrip reflectors (Debbarma & Bhattacharjee, 2019; Fernandes et al., 2019; Kim & Kim, 2021; Krishna, Shirisha, Isfahani, & Manisha, 2023; Mohammadi Shirkolaei & Engineering, 2020; Zhou, Cheng, Chen, & Luo, 2021) antennas to increase the gain and bandwidth of these antennas. Among the studies, E-shaped broadband microstrip antennas are one of them (Ge, Esselle, Bird, & Propagation, 2004; Rajagopalan, Kovitz, & Rahmat-Samii, 2012). There are different studies on reflector microstrip patch antennas in the literature. One of these studies presented a band-stop reflector antenna design and optimization for directivity and front-to-back (F/B) ratio. The designed antenna offered a bandwidth of 7 % at the resonance frequency of 2.4 GHz and 18.8 % at the resonance frequency of 5.8 GHz. Reportedly, gains of 7.54 dBi and 7.46 dBi were achieved at these respective frequencies (Fernandes et al., 2019). Another research study introduced a C-shaped reflector antenna design that showcased a gain of 5.5 dBi across the frequency span ranging from 1.5 to 2.8 GHz, as well as a gain of 5.7 dBi within the frequency span from 5 to 5.9 GHz (Rezvani & Mohammadi, 2018).

Antenna gain, F/B ratio and HPBW (half-power bandwidth) are among the important parameters in the antenna types used in short-range Doppler radars. (Chuang et al., 2011). However, it has been known that narrow HPBW has been preferred in different antenna types. In a study, the HPBW value of the microstrip array antenna operating in the 2.28-2.49 GHz frequency band is 26° (T. Tang, 2012). The HPBW value of another microstrip patch antenna designed for Doppler radar used at short ranges is 43° (Park, Li, & Lin, 2009). In a different study performed with a 10×16 microstrip patch array antenna, the HPBW is equal to 12° (Lan et al., 2016).

In this study, an E-shaped dipole microstrip array patch antenna with a reflector has been designed and manufactured. In this antenna design, it is aimed to obtain an E-form broadband frequency. Antenna gain is also desired to be increased with the array structure and reflector. This paper will present the structural design and analyses, followed by the presentation of its results and conclusions, in that order.

2. Antenna Design and Analysis

In Figure 1, the bottom patch, upper patch, FR4 substrate, vias, reflector layer, and feed point of the antenna placed across x- and y-axes are shown together. In the antenna design, FR4 substrate material with ϵ_r : 4.3, $\tan\delta$: 0.025, dimensions of $142 \times 187 \times 1.6 \text{ mm}^3$ has been used. This antenna's upper and bottom layers have been designed with lossy copper and united with the vias. Meanwhile, a 1 mm thick lossy chrome metal reflector has been used in this design.

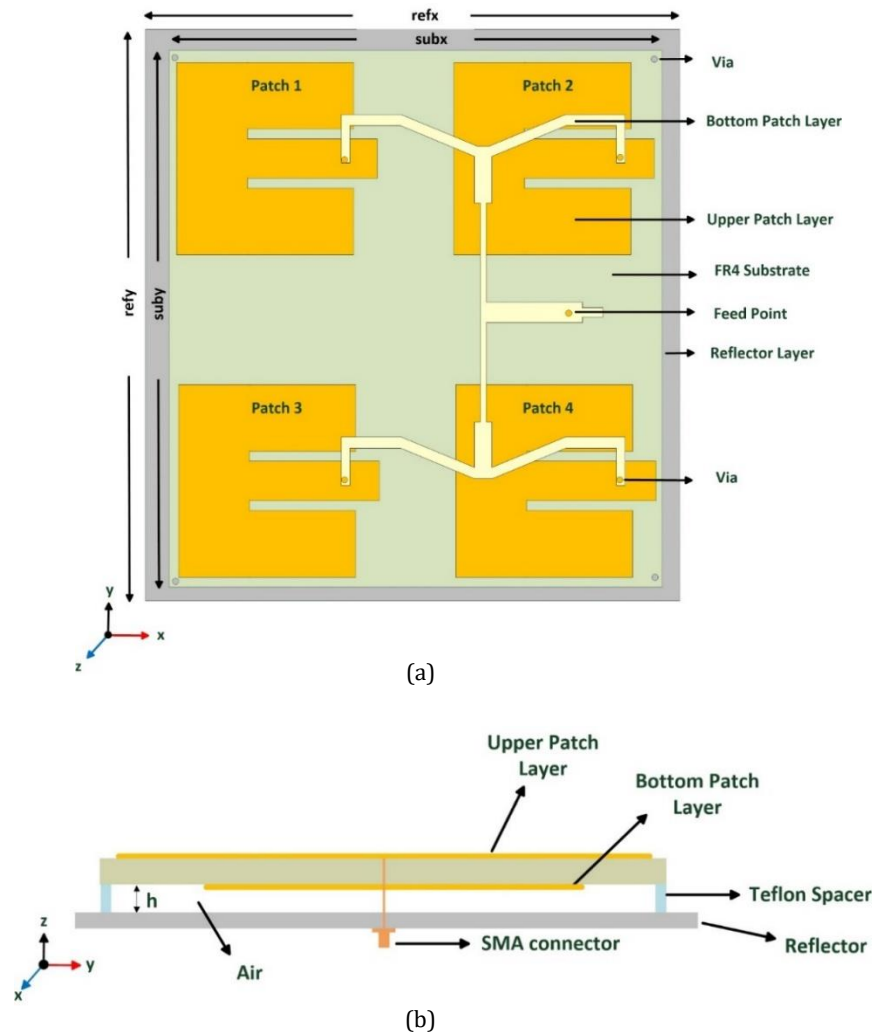


Figure 1. The proposed antenna is depicted in the following ways: (a) Front surface schematic diagram, (b) Side transparent diagram

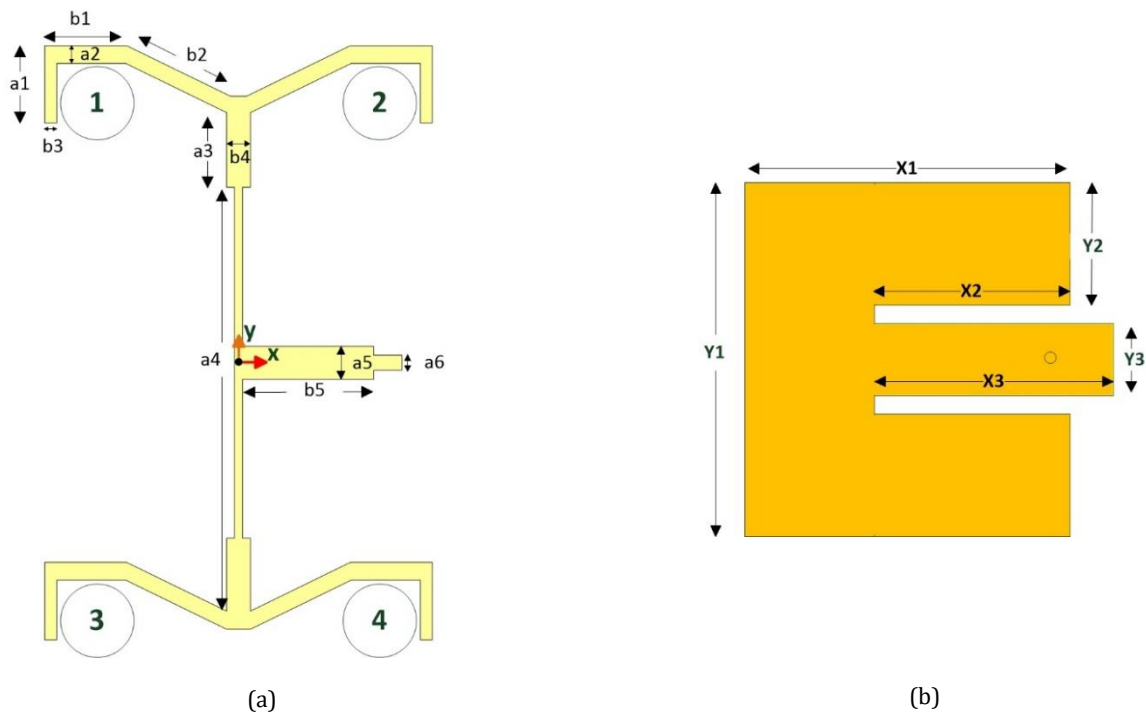


Figure 2. (a) Bottom schematic diagram, and (b) Geometry of the upper layer

Dimensions are refx: 192, refy: 153, subx: 142, suby:187, h: 9.2, a1: 16.7, a2:3.8, a3: 16.1, a4: 76, a5: 7.1, a6: 3.2, b1: 17.7, b2: 25, b3:2.5, b4: 5.1, b5:28.3, X1: 43.5, X2: 25, X3: 35, Y1:60.5, Y2: 22 (all in mm)

The side view of the designed antenna is given in Figure 1 (b). The geometry of the bottom patch layer is shown in four parts in Figure 2(a) in detail. Firstly, the part 1 geometry of these parts has been formed. Patch 2 has been constituted by getting the symmetrical y-axis of part 1. Patch 3 and Patch 4 have also been formed by the symmetry of the x-axis of Patch 1 and Patch 2.

All E-shaped on the upper patch layer have been designed in equal dimensions. An E-shaped geometry to belong to the upper patch layer is given in Figure 2(b) in detail.

The equivalent circuit of the proposed antenna is shown in Figure 3. As seen in this circuit, four L-C-R circuit elements of four E-shaped are given on the antenna. L inductances show the current detour on the antenna, R resistors indicate radiation resistors on the antenna, and C capacitances indicate fringing effects on the antenna (Garg, Bahl, & Bozzi, 2013). Cs represents the fringing effects of the Bottom patch layer and reflector, and Ls represents the current detours in the current detour of the bottom patch layer and reflector.

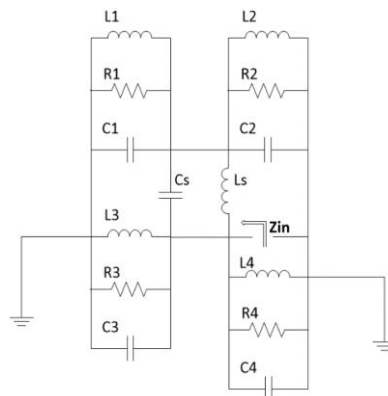


Figure 3. Antenna Circuit Equivalent

3. Results of Analysis and Discussion

The cross view of the performed antenna with its dimensions is given in Figure 4. S_{11} return loss measurements of the fabricated antenna have been performed with a Rohde and Schwarz FSH spectrum analyzer (Schwarz, 2007).

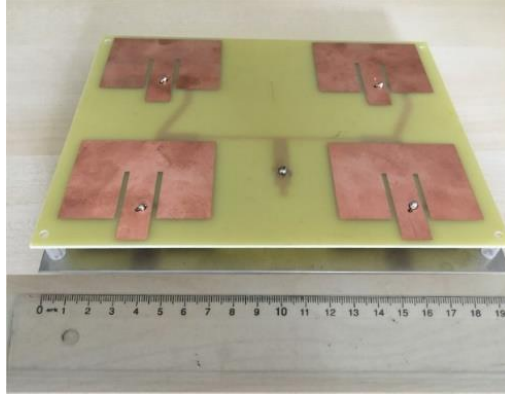


Figure 4. The cross view of the performed antenna

Return loss results of the simulation and measurement are given in Figure 5(a). This antenna works in two different frequency band spans, 1.3-1.5 GHz and 2.2-2.6 GHz. It is seen in Figure 5(a) that the results of the simulation and the measurement overlap with each other.

Figure 5 (b) displays the impact of the reflector on the return loss outcome in the designed antenna. It is understood from Figure 5 (b) that the proposed antenna works in two different broad frequency bands, while the antenna without the reflector operates in a narrow and single band.

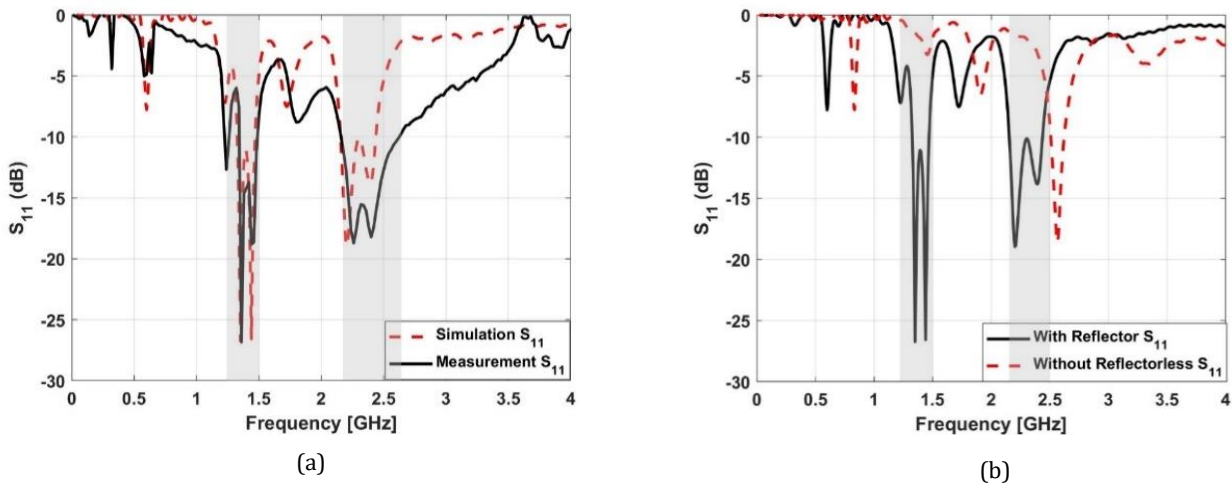


Figure 5. The proposed antenna: (a) The return loss parameters of the proposed antenna, (b) S_{11} simulations results of the antenna with reflector and without reflector

Figure 6 (a) illustrates the impact of the reflector on the gain of the presented antenna. As seen in these results that the antenna gain has been increased from 5 dBi to 10 dBi with the reflector structure.

Figure 6(b) presents the simulation values of the Front-to-Back (F/B) ratio for both the proposed antenna and the antenna without a reflector. The F/B ratio value with a reflector result has been increased from 0 dB to 15-20 dB span.

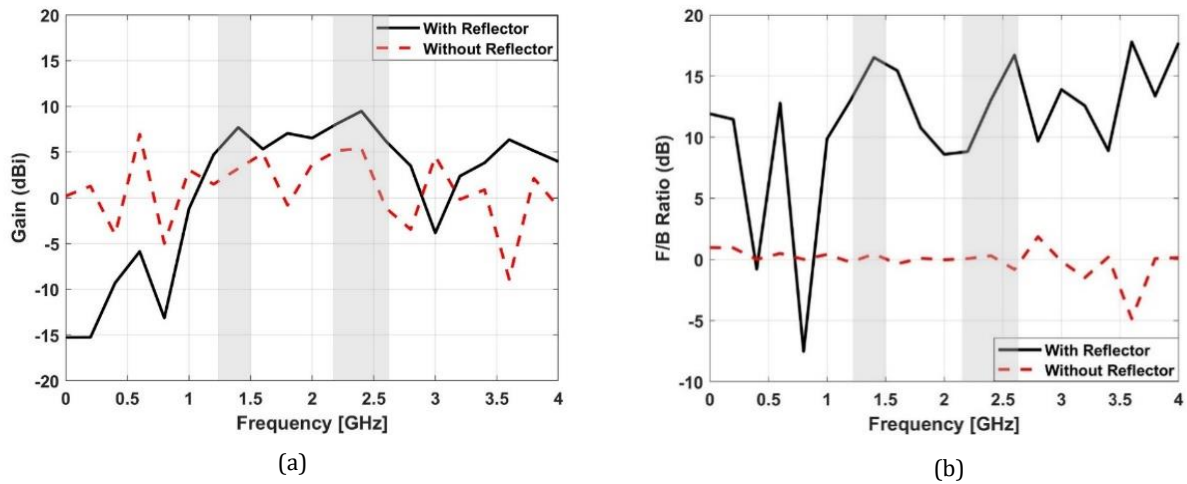


Figure 6. (a) Gain simulations of the antenna with reflector and without reflector, (b) The F/B ratio is being analyzed for both the antenna that includes a reflector and the one without a reflector.

The antenna pattern results of the designed structure are shown in Figure 7. In this figure, the main planes of $\phi=90^\circ$ and $\phi=0^\circ$ are given together at 1.4 and 2.4 GHz. These figures show that the proposed antenna has a radiation pattern focused in one direction and stability. The main radiation patterns are apparently better than the backward radiation thanks to the usage of a reflector plate. Also, the HPBW values of this antenna are 61° and 38° at the 1.4 GHz and 2.8 GHz frequencies, respectively. As seen in Figure 7, the main lobe magnitudes of the antenna change between 9-10 dB. This HPBW value proves that this antenna is directional.

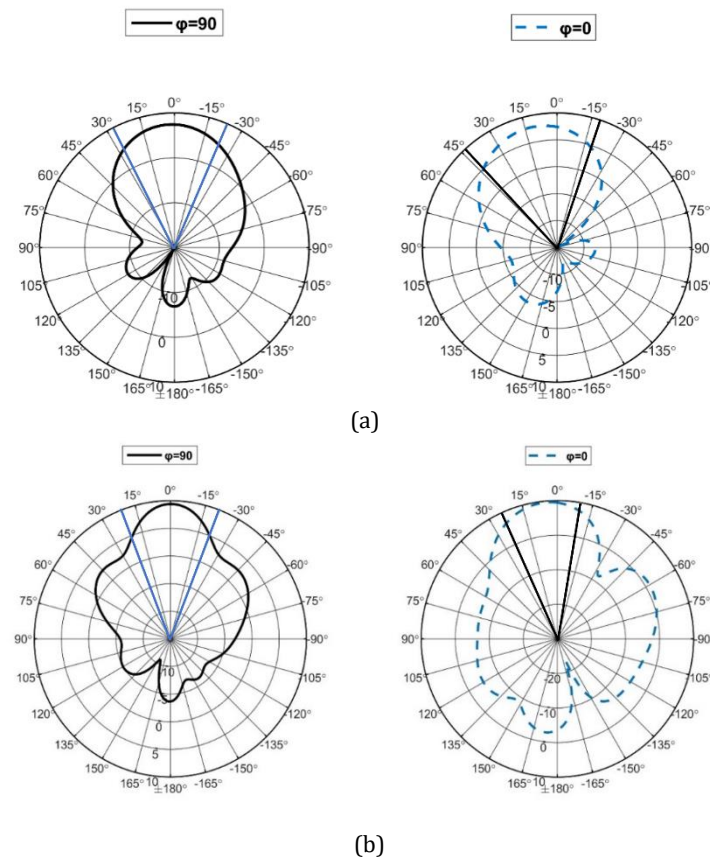


Figure 7. Simulation results of the proposed antenna pattern at (a) 1.4 GHz, (b) 2.4 GHz

Table 1 provides a comparison between the findings of this study and those of prior research. These antennas in this table have been examined in terms of frequency, substrate material, dimension, gain, and HPBW. In these comparisons, it has been paid attention to select the studies, which are similar in the resonance frequency and the substrate material. Thus, these antennas can be easily compared in terms of gain, size, and HPBW. It is also seen

from Table 1 that this study has an ideal dimension and a good HPBW value for Doppler radar at short ranges. In the 2nd study, the antenna designed for the Doppler radar has 36° HPBW and shows that narrow HPBW values are enough for Doppler radar studies. Narrow HPBW values facilitate signal processing. However, there are studies with high HPBW values such as the 5th and 7th studies. Since the antennas in these studies are designed for LTE base stations, it is normal for them to have high HPBW.

It is seen from Table 1 that the proposed antenna is superior to many other studies in terms of gain. This paper has a sufficiently high gain, approaching 10 dBi. higher gains are obtained, it is necessary to use better quality substrate material or increase the number of arrays as in the 6th study. However, it is taken into consideration that the substrates with less tangent loss require larger budgets.

Table 1. Comparison of the presented antenna with the previous studies in the literature

References	Freq. (GHz)	Substrate	Gain (dBi)	HPBW (deg)	Dimension (mm ³)
<i>This Study</i>	1.4 2.4	FR4 ϵ_r : 4.3, $\tan\delta$: 0.025 Thickness: 1.6 mm	9.5 7.5	61 38	191×153×11.8
1. (Gu et al., 2019)	2.4	FR4 ϵ_r : 4.4, $\tan\delta$: 0.025 Thickness: 3 mm	2.6	-	50×50×3
2. (Karatay et al., 2019)	2.45	FR4 ϵ_r : 4.3, $\tan\delta$: 0.025 Thickness: 1.5 mm	0	36	100×220×1.5
3. (Fernandes et al., 2019)	2.4 5.8	FR4 ϵ_r : 4.4, $\tan\delta$: 0.025 Thickness: 1 mm	7.54 6.8	-	40×12×1
4. (Zhou et al., 2021)	7 9 13	FR4 ϵ_r : 4.4, $\tan\delta$: 0.025 Thickness: 3 mm	4.5	-	24×20×1.6
5. (Rezvani & Mohammadi, 2018)	1.58-2.89 1.5-2.8 5-5.9	FR4 ϵ_r :4.4, $\tan\delta$: 0.02 Thickness:0.8 mm	~9 ~5.5 ~5.7	257 166 192 60	120×120×40
6. (Kaboutari, Zabihi, Virdee, & Salmasi, 2019)	9.97-11.9	Rogers RO4003 ϵ_r : 3.55, $\tan\delta$: 0.0027 Thickness: 0.8 mm	14.95	60.91	106×34×0.813
7. (Govindanarayanan & Rangaswamy, 2015)	1.7-2.7	FR4 ϵ_r :4.4, $\tan\delta$: 0.02 Thickness:0.8 mm	~7.5	>65	120×120×40

4. Conclusion

In this paper, a microstrip patch antenna study and chrome reflector have been performed in two different frequency bands. An array has been formed E-shaped on the substrate and these dipoles have been connected by an irregular microstrip layer bottom of the substrate. The array antenna constructed with dimensions of 19×15×11.8 mm³ has gains of 9 and 9.5 dBi at the resonance frequency of 1.4 and 2.4 GHz, respectively. In these resonance frequencies, the design has also 17 dB F/B ratio values and 61°, 38° HPBW values, respectively. This study distinguishes itself through its notable high antenna gain and front-to-back (F/B) ratio values. Suggested for

short-range radar applications, this antenna holds potential for diverse usage in various application domains with its low cost, small dimension, and high gain.

References

- Balanis, C. A. 2015. *Antenna theory: analysis and design*: John Wiley & sons.
- Benchetrit, G. 2000. Breathing pattern in humans: diversity and individuality. *Respiration physiology*, 122(2-3), 123-129.
- Chuang, H.-R., Kuo, H.-C., Lin, F.-L., Huang, T.-H., Kuo, C.-S., & Ou, Y.-W. 2011. 60-GHz millimeter-wave life detection system (MLDS) for noncontact human vital-signal monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 12(3), 602-609.
- Debbarna, K., & Bhattacharjee, R. 2019. Microstrip patch antenna feed for offset reflector antenna for dual band application. *International Journal of RF Microwave Computer-Aided Engineering*, 29(12), e21999.
- Fernandes, E. M. F., da Silva, M. W. B., da Silva Briggs, L., de Siqueira Campos, A. L. P., de Araújo, H. X., Casella, I. R. S., ... de Matos, L. J. 2019. 2.4–5.8 GHz dual-band patch antenna with FSS reflector for radiation parameters enhancement. *AEU-International Journal of Electronics Communications*, 108, 235-241.
- Garg, R., Bahl, I., & Bozzi, M. 2013. *Microstrip lines and slotlines*: Artech house.
- Ge, Y., Esselle, K. P., Bird, T. S. J. I. T. o. A., & Propagation. 2004. E-shaped patch antennas for high-speed wireless networks. 52(12), 3213-3219.
- Govindanarayanan, I., & Rangaswamy, N. 2015. Asymmetric folded dipole antenna with high front-to-back ratio for LTE base stations. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 15, 869-872.
- Gu, C., He, Y., & Zhu, J. 2019. Noncontact vital sensing with a miniaturized 2.4 GHz circularly polarized Doppler radar. *IEEE Sensors Letters*, 3(7), 1-4.
- Huang, T.-Y., Hayward, L., & Lin, J. 2016. *Adaptive harmonics comb notch digital filter for measuring heart rate of laboratory rat using a 60-GHz radar*. Paper presented at the 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS).
- Javaid, A. Q., Noble, C. M., Rosenberg, R., & Weitnauer, M. A. 2015. *Towards sleep apnea screening with an under-the-mattress IR-UWB radar using machine learning*. Paper presented at the 2015 IEEE 14th International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA).
- Kaboutari, K., Zabihi, A., Virdee, B., & Salmasi, M. P. 2019. Microstrip patch antenna array with cosecant-squared radiation pattern profile. *AEU-International Journal of Electronics Communications*, 106, 82-88.
- Karatay, A., Orcan, D., Özkal, C., & Yaman, F. 2019. Implementation and experimental verifications of microstrip antennas for angular scanning of a Doppler radar. *AEU-International Journal of Electronics Communications*, 101, 76-84.
- Kim, G., & Kim, S. 2021. Design and analysis of dual polarized broadband microstrip patch antenna for 5G mmWave antenna module on FR4 substrate. *IEEE Access*, 9, 64306-64316.
- Klavestad, S., Assres, G., Fagernes, S., & Grønli, T.-M. 2020. Monitoring Activities of Daily Living Using UWB Radar Technology: A Contactless Approach. *IOT*, 1(2), 320-336.
- Krishna, N. R. P. S., Shirisha, H., Isfahani, A. H., & Manisha, K. 2023. *Design of Dual Rectangular Slotted MicroStrip Patch Antenna for S-Band*. Paper presented at the 2023 4th International Conference for Emerging Technology (INCET).
- Lan, S., Duan, L., He, Z., Yang, C., Denisov, A., Ivashov, S., & Anishchenko, L. 2016, 2016. *A 77GHz bioradar antenna module design using microstrip arrays*. Paper presented at the 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Fajardo, PR, USA.
- Li, C., Lubecke, V. M., Boric-Lubecke, O., & Lin, J. 2013. A review on recent advances in Doppler radar sensors for noncontact healthcare monitoring. *IEEE Transactions on microwave theory techniques*, 61(5), 2046-2060.
- Li, M., & Lin, J. 2017. Wavelet-transform-based data-length-variation technique for fast heart rate detection using 5.8-GHz CW Doppler radar. *IEEE Transactions on microwave theory techniques*, 66(1), 568-576.
- Li, Y., & Luk, K.-M. 2015. 60-GHz substrate integrated waveguide fed cavity-backed aperture-coupled microstrip patch antenna arrays. *IEEE transactions on antennas propagation*, 63(3), 1075-1085.
- Lin, J., & Li, C. 2007. *Wireless non-contact detection of heartbeat and respiration using low-power microwave radar sensor*. Paper presented at the 2007 Asia-Pacific Microwave Conference.
- Lin, J. C. 1992. Microwave sensing of physiological movement and volume change: A review. *Bioelectromagnetics*, 13(6), 557-565.
- Midasala, V., & Siddaiah. 2016. Microstrip patch antenna array design to improve better gains. *Procedia computer science*, 85, 401-409.
- Mohammadi Shirkolaei, M. J. I. J. o. R., & Engineering, M. C. A. 2020. Wideband linear microstrip array antenna with high efficiency and low side lobe level. 30(11), e22412.
- Naishadham, K., Piou, J. E., Ren, L., & Fathy, A. E. 2016. Estimation of cardiopulmonary parameters from ultra wideband radar measurements using the state space method. *IEEE transactions on biomedical circuits systems*, 10(6), 1037-1046.
- Neebha, T. M., & Nesasudha, M. 2018. Optimized design of a microstrip patch antenna for radar applications. *International Journal of Vehicle Structures Systems*, 10(1), 24-29.
- Park, Z., Li, C., & Lin, J. 2009. A broadband microstrip antenna with improved gain for noncontact vital sign radar detection. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 8, 939-942.
- Rajagopalan, H., Kovitz, J., & Rahmat-Samii, Y. 2012. *Frequency reconfigurable wideband E-shaped patch antenna: Design, optimization, and measurements*. Paper presented at the Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation.
- Rezvani, M., & Mohammadi, P. 2018. Microstrip antenna with aperture reflector and C-shaped dipoles for LTE and wireless communications. *AEU-International Journal of Electronics Communications*, 94, 12-18.
- Schwarz, R. 2007. Rohde & Schwarz FSH6 Spectrum Analyzer 100kHz...6GHz. Retrieved from: <https://www.testequipmenthq.com/datasheets/Rohde-Schwarz-FSH6-Datasheet>

- Soldovieri, F., Catapano, I., Crocco, L., Anishchenko, L. N., Ivashov, S. I. J. I. J. o. A., & Propagation. 2012. A feasibility study for life signs monitoring via a continuous-wave radar. 2012.
- Suryadevara, N. K., & Mukhopadhyay, S. C. 2012. Wireless sensor network based home monitoring system for wellness determination of elderly. *IEEE Sensors Journal*, 12(6), 1965-1972.
- T. Tang, Y.-R. C., Ken-Huang Lin. 2012, 8-14 July. *A narrow beamwidth array antenna design for indoor non-contact vital sign sensor*. Paper presented at the Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, Chicago, IL, USA.
- Watson-Watt, R. J. N. 1945. Radar in war and in peace. 156(3959), 319-324.
- Yang, X., Geyi, W., & Sun, H. 2017. Optimum design of wireless power transmission system using microstrip patch antenna arrays. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 16, 1824-1827.
- Zhou, E., Cheng, Y., Chen, F., & Luo, H. 2021. Wideband and high-gain patch antenna with reflective focusing metasurface. *AEU-International Journal of Electronics Communications*, 134, 153709.



HASTANE ATIKSUYUNA ÖN OKSİDASYON UYGULAMALARI (O₃, O₃/H₂O₂): İLAÇ ETKEN MADDELER VE KLASİK KİRLETİCİLERİN AKİBETİ

Mahammad MANSIMLI¹, Havva ATEŞ^{2*}

¹ Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Lisans Üstü Eğitim Enstitüsü, Konya, Türkiye ²Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Hastane atıksuları,
İleri oksidasyon,
O₃/H₂O₂,
O₃,
İlaç etken maddeler.

Öz

Bu çalışmada psikiyatrik ilaç ve sinir uyarıcılardan dört (karbamazepin (CBZ), primidone (PRM), kafein (CAF), nikotin (NCT)) ve CBZ ve CAF'a ait altı metabolitin (karbamazepin-diol, karbamazepin 10,11-epoksid, 2-hidroksi karbamazepin ve 3-hidroksi karbamazepin, trans-3'-hidroksi kotinin ve N-formilnornikotin) hastane atıksularındaki varlığı ve ozonlama (O₃) ve perokson (O₃/H₂O₂) prosesleri ile akıbetleri araştırılmıştır. Bu kapsamda ilaçların analizi HPLC/MS-MS cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre düşük oranda (0,5 mg O₃/mg KOİ) sadece ozon dozunda dahi CBZ %99,7 oranlarında giderilirken, CAF için benzer giderim verimlilikleri daha yüksek ozon dozlarında (1,5 mg O₃/mg KOİ) elde edilmiştir. Perokson prosesinde ise CBZ giderim verimliliği nispeten artış gösterse de (%20), CAF giderimi için benzer pozitif etki gözlemlenmemiştir. İki prosesin mg KOİ başına oksijen oranları dikkate alındığında ozonlama prosesinin tespit edilen ilaçların gideriminde daha etkili bir proses olduğu belirlenmiştir. Ayrıca sadece ozonlama uygulaması ile 1,5 mg O₃/mg KOİ oranında %48 KOİ giderimi elde edilmiştir. Bu bağlamda, elde edilen sonuçlar hastane atıksularının ön oksidasyonunun hem KOİ hem ilaç yüklerinin atıksu arıtma tesislerinde arıtma süreçlerine girmeden önemli seviyelerde azaltılabileceğini göstermektedir.

PRE-OXIDATION APPLICATIONS TO HOSPITAL WASTEWATER (O₃, O₃/H₂O₂): FATE OF PHARMACEUTICAL ACTIVE COMPOUNDS (PhACs) AND CONVENTIONAL PARAMETERS

Keywords

Hospital wastewater,
Advanced oxidation,
O₃/H₂O₂,
O₃,
Pharmaceutical active compounds.

Abstract

In this study, the occurrence of four psychiatric drugs and nerve stimulants (carbamazepine (CBZ), primidone (PRM), caffeine (CAF) and nicotine (NCT)) and six metabolites belonging to CBZ and CAF (cbz-diols, carbamazepine 10,11-epoxide, 2-hydroxy carbamazepine, 3-hydroxy carbamazepine, trans-3'-hydroxy cotinine and N-formylnornicotine) in hospital wastewater and their fate in ozonation (O₃) and peroxon (O₃/H₂O₂) processes were determined. In this context, selected drugs analyzed with HPLC/MS-MS. According to obtained results, while removal efficiency of CBZ reached 99.7% in the only ozonation application even lower ozone dose (0.5 mg O₃/mg COD), the same removal efficiency for CAF was obtained in higher ozone dose (1.5 mg O₃/mg COD). Although peroxon process provided a relatively positive contribution for CBZ removal (%20), the results were not the same for CAF. Considering the oxygen ratios per mg COD of both processes, it was determined that the ozonation process was a more effective process for the removal of the detected drugs compared to peroxon. Additionally, removal efficiencies of COD were determined as 48% in the ratio of 1.5 mg O₃/mg COD with the only ozonation process. In this context, obtained results show that both COD and PhAC loads could decrease in important levels with pre-oxidation of hospital wastewater without being included to the treatment process in wastewater treatment plants.

Alıntı / Cite

Mansımlı, M., Ateş, H., (2024). Hastane Atıksuyuna Ön Oksidasyon Uygulamaları (O₃, O₃/H₂O₂): İlaç Etken Maddeler ve Klasik Kirleticilerin Akıbeti, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(1), 98-108.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Mansımlı, 0009-0002-9700-1087
H. Ateş, 0000-0001-7506-6811

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	27.04.2023
Revizyon Tarihi / Revision Date	21.01.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	07.02.2024
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

*İlgili yazar: hates@ktun.edu.tr, +90-332-205-1605

PRE-OXIDATION APPLICATIONS TO HOSPITAL WASTEWATER (O₃, O₃/H₂O₂): FATE OF PHARMACEUTICAL ACTIVE COMPOUNDS (PhACs) AND CONVENTIONAL PARAMETERS

Mahammad MANSIMLI¹, Havva ATEŞ^{2*}

¹Konya Technical University, Institution of Graduate Education, Department of Environmental Engineering, Konya, Türkiye

²Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Science, Department of Environmental Engineering, Konya, Türkiye

Highlights

- Pre-oxidation in hospital wastewater is important due to antimicrobial resistance.
 - Pharmaceutical active compounds can be detected up to mg/L in hospital wastewater.
 - Ozonation process for PhACs removal is more effective than peroxon.
-

Purpose and Scope

Hospital wastewater is an essential source of antimicrobial compounds and bacteria. The spread of these compounds to the environment causes to antimicrobial resistance of bacteria and viruses to these substances. Therefore, treatment at the source of PhACs has become important in recent years. In this context, this study aims to investigate the removal efficiencies of conventional and PhACs during the pre-oxidation of hospital wastewater with ozone and peroxone processes.

Design/methodology/approach

Although ozone has a high reactivity, its effectiveness in treatment depends on long reaction times due to its low solubility in water (Langlais, 1991). The hydrogen peroxide used in the peroxon process, which has become prominent in recent years, increases the solubility of ozone and creates hydroxyl radicals that persist in the environment for a long time. Although refractory pollutants can be removed more effectively with the peroxon process (Hörsh et al., 2003), it is stated that effectiveness and advantage of both processes according to matrix effects of wastewater could change (Olmez Hancı et al., 2020; Piras et al., 2020). In this study, the effectiveness of both processes was evaluated in different doses for pre-oxidation of hospital wastewater.

The capacity of used ozonation process in this study is 13g/h. Both ozonation and peroxon doses were determined according to mg COD. Ozonation experimental conditions were between 0.05-5.0 mg O₃/mg COD. Peroxon process experiments were done in constant ozone dose (0.1 mg O₃/mg COD) and variable hydrogen peroxide (35%) doses (0.2-1.0 mg H₂O₂/mg COD).

Findings

In the experimental study, while the removal efficiency for COD was negligible at the rates of 0.05 and 0.5 mg O₃/mg COD with only the ozonation process, it reached 50% levels by increasing the amount of ozone fed per mg of COD. BOD₅/COD ratio decreased from 0.41 to 0.2. Additionally, PhACs were effectively removed in low ozone doses. Removal efficiencies were determined as >%99 for CBZ (0.25 mg O₃/mg COD) and CAF (1.5 O₃/mg COD). Selected four metabolites of CBZ, which are frequently detected in high concentrations in domestic wastewater, remained below the detection value (0.5 ng/L) in hospital wastewater. Another aim of this study is to determine the efficiency of the peroxone process, therefore, the ozone ratio was selected as 0.1 for the peroxone process by considering the removal efficiencies obtained for the ozonation process. In this context, CBZ removal increased 20%. The increase in removal efficiency with the increase of hydrogen peroxide was not linear. This is due to the fact that hydroxyl radicals are not selective and react with other pollutants in hospital wastewater with high organic pollution.

Social Implications

Generally, hospital wastewater is discharged to urban wastewater infrastructure worldwide. On the other hand, on-site treatment is essential for increasing concern for human and environmental health. In this context, if an easily integrated process such as ozonation is built into the discharge points of the hospital wastewater infrastructure, the spread of antimicrobial substances and microorganisms can be decreased.

Originality

There is limited research about hospital wastewater in the literature. These researchers generally are on the complete treatment of hospital wastewater. However, it has been determined that PhAC loads could decrease with pre-oxidation according to this study's results.

*Corresponding Author: hates@ktun.edu.tr

1. Giriş (Introduction)

Hastane atıksuları teşhis sırasında oluşan ağır metaller, toksik kimyasallar, hastane ve araştırma laboratuvar atıkları, hasta vücudundan metabolize olmadan atılan farmasötikler ve mikroorganizmalar olmak üzere pek çok matris içermektedirler (Blanch vd., 2003; Kalakova vd., 2012; Kalakova vd., 2013). Dünya çapında genellikle hastane atıksuları evsel atıksu alt yapısına deşarj edilerek kentsel atıksu arıtma tesislerinde (AAT) beraber arıtılmaktadır. Bu bağlamda bu farmasötik aktif bileşenler hem çevre hem de insan sağlığı açısından artan bir endişe haline gelmektedir (Kalakova vd., 2013; Verlicchi vd., 2010). Endişenin kaynağı sadece mikrokirletici grubundan farmasötiklerin çevrede artan birikimi değil atıksu ortamlarında bulunan mikroorganizmaların direnç kazanmasıdır. Bu endişe sonucunda öncelikle dünyada sorumlu otoriteler tarafından antibiyotik kullanımına kısıtlama getirilmiştir. İkincil olarak son yıllarda artan şekilde özellikle kentsel AAT'lerde biyolojik sistemlerin farmasötik madde giderimi üzerine pek çok araştırma yapılmıştır (Golovko vd., 2014; Gracia-Lor vd., 2012; Nieto-Juarez vd., 2021).

Biyolojik kökenli arıtma proseslerinde bu grup kirleticilerin bir kısmı için etkin arıtma elde edilirken, diğer bazıları biyolojik arıtmaya önemli seviyelerde direnç göstermektedir. Bu proseslerde giderim mekanizması incelendiğinde ise büyük oranda adsorpsiyon, kısmi biyoparçalanma ve fotodegradasyon olduğu belirlenmiştir (Dolu ve Nas, 2023a; Nas vd., 2021). Dolayısıyla arıtma çamurları da yüksek konsantrasyonlarda farmasötik bileşikler içerebilmektedir (Dolu ve Nas 2023b). Arıtma çamurları iki şekilde bertaraf edilmektedir; bunlardan ilki ve en yaygın olanı belli katı madde muhtevasına ulaşmış arıtma çamurlarının çöp depolama sahalarında depolanması, ikincisi ise tarımda toprak iyileştirici ve gübre olarak kullanılmasıdır. İkinci uygulama hakkında hala ülkemizde ve dünyada önemli seviyede çekinceler olmakla birlikte örnek uygulamalar mevcuttur (Dolu, 2021). Dolayısıyla çamurda biriken farmasötiklerin depolama sahalarında sızıntı sularına geçerek tekrar döngüye girmesi kaçınılmazdır (Argun vd., 2020; Ates ve Argun, 2021). Bu bağlamda, bazı ülkelerde gerçek ölçekli arıtma tesislerine ön oksidasyon ve son oksidasyon işlemleri uygulanarak bu maddelerin akıbeti araştırılmıştır. Yapılan oksidasyon çalışmaları genellikle son yıllarda AAT'lerin farklı aşamalarına entegre edilmektedir (Altman vd., 2014; Prieto Rodríguez vd., 2013; Rosal vd., 2010). Antibiyotiklerin çevreye yayılımını önlemenin ana nedenlerinden biri de çevrede antibiyotik dirençli mikroorganizmaların oluşumunu ve artışını engellemektir (Schuts vd., 2021).

Evsel atıksu arıtma tesislerine gelen ham atıksularda bulunan ilaç etken maddelerin önemli bir miktarı hastane atıksulardan kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan, AAT'lerde yapılan çalışmalarda antibiyotik yükünün bazı antibiyotikler için oldukça yüksek olması AAT çıkış sularında sucul organizmalar için risk oluşturabilecek seviyelerde kalabilmektedir (Aydın vd. 2019). Konvansiyonel AAT'lerde kış ve yaz aylarında antibiyotik giderim verimlerinin farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu bağlamda suyun kompleksliği yanında sıcaklığının da bu kirleticilerin gideriminde önemli olduğu söylenebilir. Örneğin Aydın vd. (2019) bir kentsel AAT'de kış ve yaz ayları için toplam antibiyotik giderimlerini %76 ve %38 olarak belirlemişlerdir. Bu durum, kentsel AAT'ye gelen hem antimikrobiyal mikroorganizmaların hem de antimikrobiyal madde yüklerinin azaltılması için hastane atıksularının ön arıtımının gerekliliğini göstermektedir. Çin ve Japonya gibi ülkeler yüksek oranlarda enterik ve kanserli hastalık salgınları yaşamaları sonucunda patojenlerin yayılımını önlemek için kanalizasyon sistemine deşarj edilmeden önce hastane atıksularının yerinde ön arıtımını benimsemişlerdir. Avrupa ülkeleri ise yalnızca hastane atıksularının sahip olduğu risk hakkındaki farkındalık nedeniyle arıtım yapmaktadırlar.

Hastane atıksularının yerinde arıtımı üzerine başta Avrupa ülkeleri olmak üzere bazı ülkelerde pilot ve gerçek ölçekli çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmalarda doğal bazlı arıtma prosesleri, aktif çamur prosesleri (Azar vd., 2010; Yuan vd., 2013), membran biyoreaktörler (Casas vd., 2015; Karakaş vd., 2022; Ooi vd., 2018), çeşitli filtrasyon prosesleri (Ajo vd., 2018), kimyasal arıtım (Gupta vd., 2020; Lien vd., 2016) ve üçüncül arıtımı da içeren kombine sistemlerde (Chitnis vd., 2004; Kosma vd., 2010; Kovalova vd., 2013) hastane atıksularının arıtılabilirliği araştırılmıştır. Yapılan bazı pilot ve gerçek ölçekli arıtma tesislerinde ozonlama, klorlama ve UV ile dezenfeksiyon işlemi arıtmanın son basamağı olarak kullanılmıştır. Farmasötiklerin gideriminde ozonlama prosesi UV ve klorlamaya göre daha etkin olmasına rağmen (Kovalova vd., 2013) ozon ortamdaki diğer organik maddelerle de reaksiyona girdiği için ilaç etken maddelerin gideriminde benzer üstünlük yüksek temas sürelerinde elde edilebilmektedir (Zheng vd., 2017).

Ozon çok yüksek reaktifliğe sahip olmasına rağmen sudaki düşük çözünürlüğü nedeniyle arıtmadaki etkinliği uzun reaksiyon sürelerine bağlıdır (Langlais, 1991). Son yıllarda öne çıkan perokson prosesinde ise kullanılan hidrojen peroksit ozonun çözünürlüğünü artırarak uzun süre ortamda varlığını sürdüren hidroksil radikalleri oluşturmaktadır. Bu sayede perokson prosesi ile refrakter kirleticilerin daha etkin bir şekilde giderilebileceği belirtilse de (Hörsh vd., 2003) yapılan bazı çalışmalarda atıksuyun içerdiği matrise göre her iki prosesin etkinliğinin ve avantajının değişebildiği de ortaya konmuştur (Olmez Hancı vd., 2020; Piras vd., 2020).

Bu bilgiler ışığında, bu çalışmanın amacı; hastane atıksuyunun hem ozon hem de perokson prosesi ile ön arıtımı boyunca konvansiyonel ve ilaç etken madde giderim verimliliklerini araştırmaktır.

2. Materyal ve yöntem (Material and method)

2.1. Hastane atıksuyu numune alımı (Sampling of hospital wastewater)

Çalışmada kullanılan hastane atıksuyu Konya ilinde şehri temsil eden, pek çok bölümün bulunduğu bir üniversite hastanesinden sabah saatlerinde 2 saatlik kompozit olarak alınmıştır. Alınan numunelerin aynı gün klasik parametre analizleri, asitlendirme işlemi yapılarak muhafaza edilen numunelerin ilaç etken madde analizleri (ham ve arıtılmış numuneler) birkaç gün içerisinde yapılmıştır.

2.2. İlaç etken madde ve klasik parametre analizleri (Pharmaceuticals and conventional parameters analyses)

1 L numuneler 0,45 µm şırınga filtreler ile süzülmüştür. Katı faz ekstraksiyonu (SPE) işleminde HLB kartuşları kullanılmıştır. Ekstraksiyon adımları kısaca; kartuş 20 ml metanol ve 6 ml su ile şartlandırıldı (1), ardından 1L numune kartuştan geçirildi (2), ardından kartuş 10 ml su ile yıkandı (3) ve vakum altında kurutma işlemi 10 ml/dk hızla kurutulduktan sonra 10 ml metanol ile kartuştan solvente analitler elute edildi. Solvent 1 ml ye hafif nitrojen akışında deriştirilir (4) ve iç standart eklenerek HPLC-MS-MS (Agilent, 6460, HPLC seri 1200) cihazında EPA 1694 (Pharmaceuticals and Personal Care Products in Water, Soil, Sediment, and Biosolids by HPLC/MS/MS) metoduna göre analiz edilmiştir. Numunelerde 8 adet ilaç etken madde için analizler gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon eğrileri 10-2000 ng/L aralığında çizilmiştir. İlaçlar için dedeksiyon limiti 10 ng/L dir. HPLC/MS-MS için mobil faz akış hızı ve sıcaklığı sırasıyla 0,6 ml/dk ve 35 °C idi. Taşıyıcı gaz akış hızı ve sıcaklığı ise 10 ml/dk ve 325 °C ve enjeksiyon hacmi 30 µL dir.

KOİ ve fosfat gibi klasik kirletici analizleri APHA standart metoduna göre (APHA 2005), UV taramaları ise spektrofotometrik olarak Hach Dr-5000 cihazı ile yapılmıştır. pH ve iletkenlik ölçümleri Hach multi HQ40D cihazıyla ölçülmüştür. BOİ analizi ise WTW oxitop cihazı ile kullanıcı el kılavuzuna göre yapılmıştır.

2.3. Ozonlama prosesi (Ozonation process)

Çalışmada kullanılan ozonlama prosesi 13 g/sa kapasitesine sahip bir cihazdır. Ozon prosesinin önünde ozon üretimini artırmak için oksijen konsantratörü bulunmaktadır. Bu ön proses ile havanın oksijeni konsantre edilerek ozon jeneratörüne beslenmektedir. Ardından ozon jeneratöründe iki atomlu oksijen molekülü üç atomlu ozon gazına dönüştürülerek 2L lik kapalı reaktörlere beslenmektedir. Bu reaktörlerde istenen temas süresi boyunca sistemden atılan ozon miktarı %10'luk potasyum iyodür çözeltisinde tutularak titrimetrik olarak ölçülmektedir.

2.4. Kimyasallar ve reaktifler (Chemicals and reagents)

Çalışmada psikiyatrik ilaç grubundan karbamazepin (CBZ) ve Cbz-diol, karbamazepin 10,11-epoksid, 2-Hidroksi karbamazepin ve 3-Hidroksi karbamazepin dahil dört metaboliti, sinir uyarıcılar grubundan kafein, nikotin ve nikotinin metabolitlerinden trans-3'-hidroksi kotinin ve N-formilnornikotin ölçülmüştür.

2.5. Deneysel koşullar (Experimental Conditions)

Deneylerde öncelikle hastane atıksuyunun kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) analizi yapılarak sisteme beslenecek ozon ve/veya eklenecek H₂O₂ miktarları hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalarda ön oksidasyon çalışmaları yalnızca O₃ ve perokson (O₃/H₂O₂) ile gerçekleştirilmiştir. Ozonlama deneyleri 0,05, 0,1, 0,25, 0,5, 1,5, 3,0 ve 5,0 mg O₃/mg KOİ oranlarında, sırasıyla 30 sn, 1dk, 2,5 dk, 5 dk, 15 dk, 30 dk ve 50 dk temas sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Perokson deneyleri ise 0,1 mg O₃+0,2 mg H₂O₂/mg KOİ, 0,1 mg O₃+0,5 mg H₂O₂/mg KOİ ve 0,1 mg O₃+1,0 mg H₂O₂/mg KOİ oranlarında çalışılmıştır. Perokson deneyleri, atıksuya belirlenen miktarlarda H₂O₂ eklendikten sonra sabit ozon temas süresinde (1 dk) gerçekleştirilmiştir. Deneyler oda sıcaklığında ve atıksuyun doğal pH'sında gerçekleştirilmiştir.

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

3.1. Konvansiyonel parametrelerin ön ozonlama prosesi ile giderimleri (Removal of conventional parameters with pre-ozonation process)

Hastane atıksuları hem miktar hem de kalite açısından evsel atıksuya göre önemli seviyede değişkenlik göstermektedir. Bu bağlamda, hastane atıksuları evsel atıksu ile kıyaslandığında yüksek kirlilik yüküne sahip ve dirençli olarak nitelendirilmektedir (Kosma vd., 2010; Verlicchi vd., 2010). Hastane atıksuları için kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve toplam katı madde (TKM) konsantrasyonları sırasıyla 120-500 mg/L ve 150-160 mg/L aralığında

değiştirdiği belirtilmektedir (Kumari ve ark., 2020). Ancak, literatürdeki pek çok çalışma göz önüne alındığında, sunulan değer aralıkları oldukça değişkendir (Çizelge 1). Numune alma şekli, hastane içerisinde bulunan bölümler, hastanenin büyüklüğü vb. şartlar ve durumlar atıksu karakterizasyonu değişkenliğini etkileyen faktörlerdir. Hastane atıksularının ülkeden ülkeye karakterizasyonu farklılık göstermekle birlikte KOİ konsantrasyonu Asya kıtasındaki benzer olarak (590 mg/L) (Majumder vd., 2021) Türkiye’de ortalama 418±167 mg/L (Gönder vd., 2021) olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada ise KOİ değeri ortalama 767,1±232 mg/L ile daha yüksek konsantrasyonda tespit edilmiştir (Tablo 1). pH değeri hastane atıksularında oldukça geniş aralıklarda seyretmektedir (5,1-10,4), bunun nedeni yoğun dezenfektan kullanımı ile ilişkilendirilmektedir. Bu çalışmada da hastane atıksularının pH değerleri 6,8 ile 8,9 aralığında ölçülmüştür.

Sadece ozonlama uygulanan deneysel çalışmada 0,05 ve 0,5 mg O₃/mg KOİ oranlarında KOİ için giderim verimliliği önemsenmeyecek seviyelerde iken mg KOİ başına beslenen ozon miktarı stokiyometrik değer üzerinde olduğu durumda %50 seviyelerine ulaşmıştır (Tablo 2). Ham atıksu için BOİ değeri 560 mg/L iken 1,5 mg O₃/mg KOİ aşan çalışma şartlarında 108 mg/L seviyesine kadar düşmüştür. Diğer taraftan, giriş BOİ/KOİ oranı 0,41 iken arıtma çıkışlarında 0,20 değerine düşmüştür. Bu ozonlama süreciyle hastane atıksuyundaki daha kolay parçalanabilen organik maddeleri hızla parçaladığını göstermektedir. Diğer taraftan fosfat konsantrasyonları ozon miktarı arttıkça atıksuda artış göstermiştir. Bu durum organik fosfat ve polifosfatların oksidasyon süresince orta fosfolara dönüşümü ile ilişkilendirilebilir (Gonzalez, 2021). Azot gideriminin açısından değerlendirildiğinde yine düşük dozlarda azot giderimi oldukça düşük iken yüksek ozon dozunda %44 e ulaşmıştır (Tablo 2).

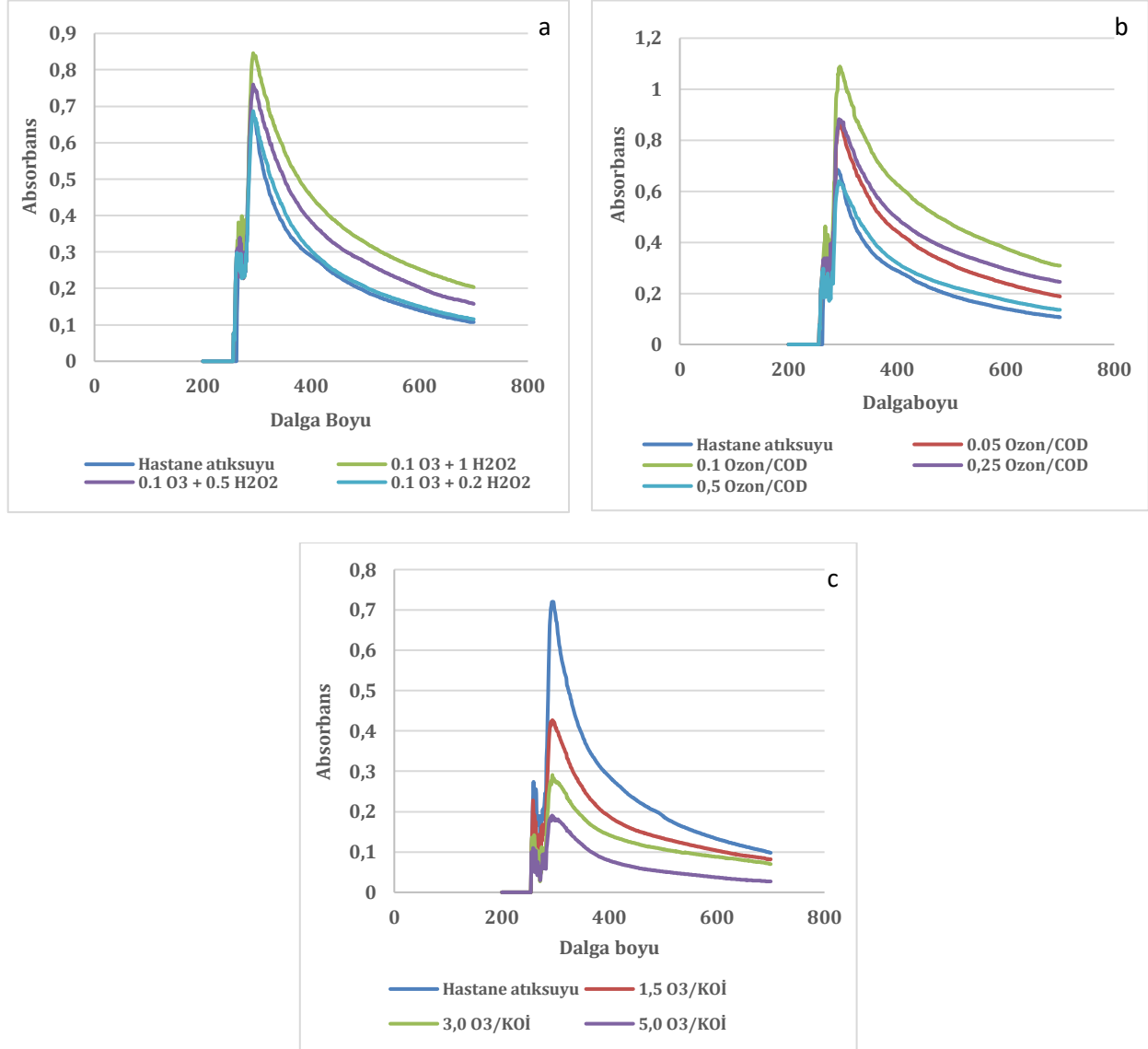
Çalışmada UV görünür bölge spektrometresi analizlerinde ozonlama sonrasında hemen hemen tüm çalışma koşullarında dalga boyu tarama eğrilerinde hastane atıksuyuna kıyasla artış görülmektedir. Görünür bölge spektrumlarında soğurma değerlerini etkileyen bazı faktörler bağlı grupların etkisi, konjugasyon etkisi, izomeri etkisi olarak sıralanabilir. Bu bağlamda oksidasyon esnasında kirleticilerin yapılarında bu etkilerin bir veya birkaçının meydana gelmiş olduğu düşünülmektedir (Ogava vd. 2020). Bu kapsamda O₃/H₂O₂ deneylerinde artan ozon ve hidrojen peroksit dozuyla spektrumların absorbans değerlerinin artış gösterdiği görülmektedir (Şekil 1a). Sadece ozonlama yapılan deneylerde ise 0,05-0,25 mg O₃/mg KOİ şartlarında artış gözlemlenirken 0,5 mg O₃/mg KOİ deneylerinde düşüş görülse de absorbans değerleri hala hastane atıksu absorbans değerlerinin üzerinde seyretmektedir. Ayrıca stokiyometrik oranın üstündeki deneysel koşullarda UV spektrumları belirgin şekilde düşüş eğilimi göstermiştir (Şekil 1b, Şekil 1c). Bu bağlamda renk giderimini gösteren UV₅₂₅ ve UV₆₂₀ absorbans değerleri referans alınarak hesaplanan renk giderim verimlilikleri en yüksek ozon dozu için %72 olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Hastane atıksuyu klasik kirletici karakterizasyonu (Conventional parameters characterization of hospital wastewaters)

KOİ	Çözülmüş organik karbon	BOİ	Azot türleri	Fosfat	pH	Kaynak
256 mg O ₃ /L					8,89	Ferre-Aracil vd., 2016
	5,1 mgC/L		NH ₄ ⁺ <6 µgN/L, NO ₂ 1 µgN/L, NO ₃ 4,2 µgN/L		8,5	Lee vd., 2014
	18 mg/L		NO ₃ ⁻ -N= 1,3 mg/L		8,2	Chen Lin vd., 2015
448 mg/L		140 mg/L			8,6	Souza vd., 2018
677 mg O ₃ /L					7	Khan vd., 2022
6-20 mg/L					5-9	Hansen vd., 2016
420 mg/L			NO ₃ ⁻ -N= 6,7 mg/L	13,9 mg/L	7	Souza vd., 2022
807±25 mg/L		387±197			8,1	Arslan vd., 2014
48 - 277,5 mg/L		20-55 mg/L	TN: 10,1 - 23,7 mg/L		6,2-7,1	Wen vd., 2004
490-1042 mg/L		220-410 mg/L	TN: 69-289 mg/L	TP: 4,8-13,4 mg/L	7,4-9,0	Arvaniti vd., 2023
332,8-1344,0 mg/L		100-560 mg/L	TN: 68 mg/L	3,97-8,86 mg/L	6,8-8,9	Bu çalışma

Tablo 2. Ozonlamanın klasik parametre giderimleri üzerine etkisi (The effects on conventional parameters removal of ozonation)

O ₃ /KOİ oranı	KOİ giderimi (%)	BOİ (mg/L)	Fosfat (PO ₄ -P mg/L)	Toplam azot (mg/L)	İletkenlik (µs/cm)
0,05	<10	-	7,34	62,2	6,26
0,1	<10	-	6,39	62,6	6,16
0,25	<10	-	6,19	49,6	6,26
0,5	<10	-	6,07	64,2	6,31
1,5	48	148	17,26	50,0	5,54
3,0	50	108	9,15	38,2	5,55
5,0	50	126	13,92	53,8	5,61

**Şekil 1.** Hastane atıksuyu ve arıtılmış numuneler için UV spektrumları (UV spectrum for hospital wastewater and treated samples)

3.1. İlaçların ön ozonlama prosesi ile giderimleri (Removal of pharmaceuticals with pre-ozonation process)

Hastane atıksularında tespit edilen başlıca ilaç etken maddeler; antibiyotikler ve psikiyatrik ilaçlardır ve konsantrasyonları 1,0 mg/L yi aşmaktadır (Pariante vd., 2022). Hastane atıksularının arıtımında dünya çapında yapılan çalışmaların pek çoğunda, membran biyoreaktör sistemlerinin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir (Nguyen vd., 2017, Chiarello vd., 2016, Prasertkulsak vd., 2016). Ancak yapılan çalışmalarda, bu sistemin ilaçların önemli bir kısmının gideriminde başarılı olmasına karşın özellikle psikiyatrik ve dirençli antibiyotikler için etkili olmadığı bildirilmektedir (Lee vd., 2014). Diğer taraftan ozonlama ile bu ilaçların etkili şekilde giderildiği belirtilmektedir. Bu kapsamda literatürde tek başına ozonlama ve ozonlama odaklı oksidasyon prosesleri ile

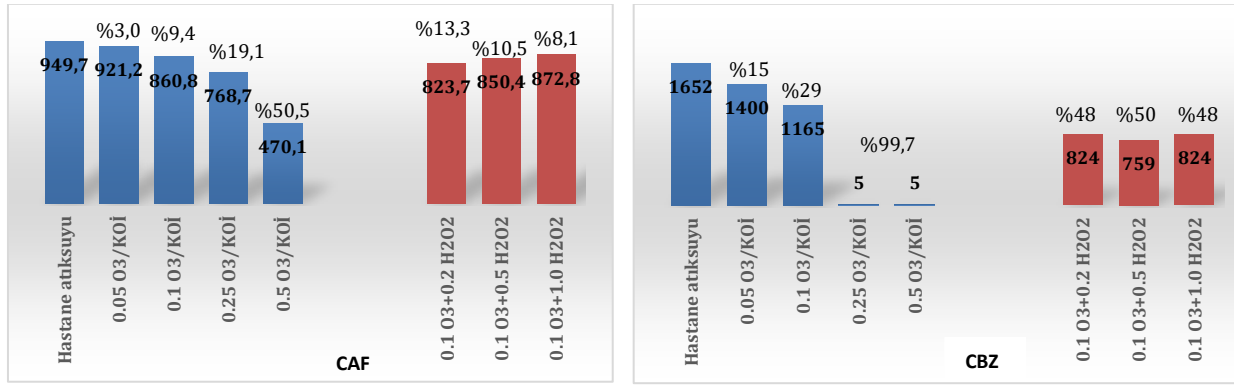
arıtımın yanı sıra birleşik arıtım içinde ozonlamanın arıtma etkinliğini artırma üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin; Khan ve diğerleri (2020) yaptıkları çalışmada CBZ'nin ozon ve perokson (O_3/H_2O_2) ile gideriminin 10 dakika temas süresi sonunda sırasıyla $>80\%$ ve $>85\%$ olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmada sisteme verilen ozon 1,0-7,0 mg/L-dk ve H_2O_2 2,5 mg/L (% 35 lik) olarak belirtilmiştir.

Bu çalışmada ise ozonlama kapasitesi daha yüksek olduğundan çok daha kısa reaksiyon sürelerinde çalışma tamamlanmıştır. Bu bağlamda psikiyatri grubu ilaçlardan CBZ atıksuda 1652 ng/L olarak tespit edilmiş ve ozonlama prosesinde stokiyometrik oranın altındaki ozon dozlarında dahi azımsanmayacak seviyelerde giderim gözlemlenmiştir (Tablo 3, Şekil 2). Öyleki 0,25 mg O_3 /mg KOİ oranında dahi CBZ konsantrasyonu tespit limit değerinin (5 ng/L) altında kalmıştır ve bu değere göre hesaplanan giderim verimliliği %99,7 olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan perokson prosesinde benzer olarak mg KOİ başına atıksuya beslenen O_3 sabit tutularak (0,1 mg O_3 /mg KOİ) değişen oranlarda H_2O_2 ilavesi yapılmıştır. Bu çalışmanın amaçlarından bir diğeri perokson prosesinin etkinliğini belirlemek olduğundan ozonlama prosesi için elde edilen giderim verimlilikleri dikkate alınarak ozon miktarı 0,1 mg O_3 /mg KOİ olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre H_2O_2 ilavesi yaklaşık %20 oranında ilave bir giderim sağlamış olmakla birlikte hidrojen peroksit artışıyla giderim verimliliğinin artışı doğrusal olmamıştır (Tablo 3, Şekil 2). Bunun nedeni hidroksil radikallerinin seçici olmaması nedeniyle yüksek organik kirliliğe sahip hastane atıksuyundaki diğer kirleticiler ile de reaksiyona girmesi ile ilişkilendirilmektedir. Benzer sonuçlar Khan vd. (2020) yaptığı çalışmada da gözlemlenmiştir. Kısa reaksiyon sürelerinde dahi ozonlama prosesi perokson prosesine göre ilaçların gideriminde daha etkili giderim sağlamıştır. pH, ozonun suda çözünürlüğü, önemli enerji tüketimi ve çeşitli faktörlere duyarlılığı gibi faktörler perokson işleminin verimliliğini önemli ölçüde sınırlamaktadır (Piras vd., 2020).

İnsan vücudundan kullanılan CBZ'nin yaklaşık %13'ünün değişmeden dışkı ve idrar yoluyla atıldığını bildirilmektedir (Nkoom vd., 2019). Bu bileşiğin biyoparçalanmaya karşı (0,005-0,389 L/gMLSS gün) oldukça dirençli olduğu bildirilmektedir (Tran ve ark., 2018). Diğer taraftan evsel atıksularda CBZ'nin yanısıra yüksek konsantrasyonlarda ve sıklıkla tespit edilen 4 metabolitinin hastane atıksularında ölçüm değerinin altında kaldığı görülmektedir. Özellikle CBZ-diolün evsel atıksularda CBZ bileşiğinden 5-10 kat daha yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu belirtilmektedir. Diğer taraftan CBZ-diolün CBZ'nin insan vücudunda oluşan önemli bir metaboliti olduğu bildirilmektedir (Ekpeghere ve ark., 2018). Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, evde tedavi için kullanılan bu ilacın kanalizasyon alt yapısında evsel atıksu arıtma tesisine ulaşana kadarki mikrobiyal dönüşümünden kaynaklanabileceğini de düşündürmektedir. Öyle ki, hastanelerde hastanın dışkılaması ve kanalizasyon sisteminde kalma süresi dikkate alındığında evsel atıksulara nispeten oldukça kısa sürelerle sahiptir. Aynı ilaç grubuna sahip PRM evsel atıksularda 100-420 ng/L (Wick vd., 2009, Ryu vd., 2014) aralığında tespit edilirken bu çalışmada kullanılan hastane atıksuyunda tespit limitinin altında kalmıştır. Bu da söz konusu ilacın yatan hasta tedavilerinden ziyade evde tedavi için kullanıldığını göstermektedir.

Sinir uyarıcılar grubundan NCT ve iki metaboliti tespit limitinin altında kalırken CAF 949,7 μ g/L ile oldukça yüksek konsantrasyonda tespit edilmiştir. Arvaniti vd. (2023) hastane atıksularında 220 öncelikli kirleticinin varlığını araştırdıkları çalışmalarında sigara ve kahve kökenli kafein ve nikotinin nispeten yüksek konsantrasyonlarda tespit ettiklerini bildirmişlerdir ve CAF ve NCT konsantrasyonları sırasıyla 193 μ g/L ve 162 μ g/L olarak tespit edilmiştir. Benzer olarak başka bir çalışmada CAF hastane atıksuyunda 11,27-83,21 μ g/L aralığında tespit edilmiştir (Gomez vd., 2007).

Ozonlama prosesinde CAF giderimi 0,5 mg O_3 /mg KOİ oranında %50 seviyelerinde giderilirken 1,0 mg O_3 /mg KOİ ve üzerindeki oranlarda giderim $>99,9\%$ olarak belirlenmiştir. Perokson ile oksidasyon çalışmalarında ise giderim verimliliği önemli seviyelerde artış göstermemiştir. 0,1 mg O_3 /mg KOİ oranında bile %9,4 olan CAF giderim verimliliği, 0,1 mg O_3 +0,2 H_2O_2 /mg KOİ şartlarında %13,3 olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan biyolojik arıtımda oldukça kolay giderilebilen CAF bileşiğinin (Zhou vd., 2010b) ozonlama prosesinde biyolojik arıtıma karşı oldukça dirençli olan CBZ'ye kıyasla daha düşük ozon dozlarında giderildiği gözlemlenmiştir. Sentetik çözeltilerinden CAF'ın ozonlama prosesiyle degradasyonunun araştırıldığı bir çalışmada ilk 15 saniyelik reaksiyon periyodunda parçalanmanın özellikle hızlı olduğu, ardından çok daha yavaş bir oranda azaldığı belirtilmiştir. Bu hız sabitindeki azalma hız kontrolünü sağlayan bir ara ürünün varlığı ile ilişkilendirilmiştir (Rosal vd., 2009).



Şekil 2. CAF ($\mu\text{g/L}$) ve CBZ (ng/L) bileşiklerinin ozonlama ve perokson proseslerinde giderim verimlilikleri (Removal efficiencies of CAF and CBZ in ozonation and peroxon processes)

Tablo 3. İncelenen psikiyatrik ilaçlar ve sinir uyarıcıların ham hastane atıksuyunda ve arıtılmış numunelerdeki konsantrasyonları (Occurrence concentrations of investigated psychiatric drugs and nerve stimulants in raw hospital wastewater and treated wastewater)

İlaç	HA	0,05 O ₃ /KOİ	0,1 O ₃ /KOİ	0,25 O ₃ /KOİ	0,5 O ₃ /KOİ	1,5 O ₃ /KOİ	3,0 O ₃ /KOİ	5,0 O ₃ /KOİ	0,1 O ₃ +0,2 H ₂ O ₂	0,1 O ₃ +0,5 H ₂ O ₂	0,1 O ₃ +1,0 H ₂ O ₂
CBZ	1652	1400	1165	<5	<5	<5	<5	<5	824	759	824
CBZ-diol	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
CBZ 10,11-epoxide	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
2-Hidroksi CBZ	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
3-Hidroksi CBZ	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
PRM	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
NCT	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Trans-3'-Hidroksi COT	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
F-NCT	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
CAF	949,7	921,2	860,8	768,7	470,1	<5	<5	<5	823,7	850,4	872,8

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Genellikle ileri oksidasyon proseslerinde kimyasal ihtiyacı, maliyet gibi kısıtlayıcılar göz önünde bulundurularak, pilot veya tam ölçekli arıtma tesislerinde bu prosesler arıtma sürecine dahil edilmemektedir. Ancak bu durum yüksek yüke sahip atık suyu arıtmak için proseslerin ölçeğini büyütmeyi zorunlu hale getirebilmektedir. Diğer taraftan; çevrede uzun süre kalıcı olan organiklerin yayılımını azaltmak için kaynağında arıtma uygulamaları önemlidir. Bu kapsamda; bu çalışmada önemli seviyelerde ilaç etken madde yüküne sahip hastane atıksuyunun ozonlama ve perokson proseslerindeki akıbetleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre uzun ozonlama dozları ile KOİ giderim verimliliği %50 seviyelerine ulaşılırken, incelenen ilaçların düşük ozon dozlarında dahi oldukça yüksek (>%99) seviyelerde giderilmiştir. Perokson prosesinin ise ozonlama prosesine kıyasla daha az etkili olduğu ancak arıtma verimliliğine katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda hastane atıksularının kanalizasyon alt yapısına deşarj edilmeden ön oksidasyonu ile ilaç yükünün önemli bir kısmının azaltılabileceği görülmektedir. İlaven, ilaç etken maddelerin son yıllarda gittikçe önem kazanan antimikrobiyal dirençli mikroorganizma oluşumuna ciddi bir katkı sunduğu göz önüne alınırsa hastane atıksularının kaynağında arıtımı gittikçe önem kazanan bir konu haline gelmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Mahammad Mansımlı'nın tez çalışmasının bir kısmıdır.

Kaynaklar (References)

- Altman, J., As, R., Zietzschmann, F., Jekel, M., 2014. Direct comparison of ozonation and adsorption onto powdered activated carbon for micropollutant removal in advanced wastewater treatment. *Water research*, 55, 185-193.
- Ajo, P., Preis, S., Vornamo, T., Manttari, M., Kallioinen, M., Louhi-Kultanen, M., 2018. Hospital wastewater treatment with pilot-scale pulsed corona discharge for removal of pharmaceutical residues. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6, 1569-1577.
- Argun, M.E., Akkus, M., Ates, H., 2020. Investigation of micropollutants removal from landfill leachate in a full-scale advanced treatment plant in Istanbul city, Turkey. *Science of Total Environment*, 748.
- Ates, H., Argun, M.E., 2021. Advanced oxidation of landfill leachate: Removal of micropollutants and identification of by-products. *Journal of Hazardous Material*, 413, 125326.
- Aydin, S., Aydin, M.E., Ulvi, A., Kilic H. 2019. Antibiotics in hospital effluents: occurrence, contribution to urban wastewater, removal in a wastewater treatment plant, and environmental risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 544-558.
- Arslan, A., Veli, S., Bingöl, D., 2014. Use of response surface methodology for pretreatment of hospital wastewater by O3/UV and O3/UV/H2O2 processes. *Separation and Purification Technology*, 132, 561-567.
- Arvaniti, O.S., Gkotsis, G., Nika, M.-C., Gyparakis, S., Manios, T., Thomaidis, N.S., Fountoulakis, M.S. and Stasinakis, A.S., 2023. Study on the Occurrence of Artificial Sweeteners, Parabens, and Other Emerging Contaminants in Hospital Wastewater Using LC-QToF-MS Target Screening Approach. *Water*, 15, 936.
- Azar, A., Jelogir, A., Bidhendi, G., Mehrdadi, N., Zaredar, N., Poshtegal, M., 2010. Investigation of optimal method for hospital wastewater treatment. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 8, 1199-1202.
- Blanch, A.R., Caplin, J.L., Iversen, A., Kuehn, I., Manero, A., Taylor, H.D., Vilanova, X., 2003. Comparison of enterococcal populations related to urban and hospital wastewater in various climatic and geographic European regions. *Journal of Applied Microbiology*, 94, 994e1002.
- Boillot, C., Bazin, C., Tissot-Guerraz, F., Droguet, J., Perraud, M., Cetre, J. C., Trepo, D., Perrodin, Y., 2008. Daily physicochemical, microbiological and ecotoxicological fluctuations of a hospital effluent according to technical and care activities. *Science of The Total Environment*, 403, 13-129.
- Casas, M.E., Chhetri, R.K., Ooi, G., Hansen, K.M.S., Litty, K., Christensson, M., Kragelund, C., Andersen, H.R., Bester, K., 2015. Biodegradation of pharmaceuticals in hospital wastewater by staged Moving Bed Biofilm Reactors (MBBR). *Water Research*, 83 (2015) 293-302.
- Chen-Lin, A.Y., Fang Hsueh, J.H., Andy Hong, P. K., 2015. Removal of antineoplastic drugs cyclophosphamide, ifosfamide, and 5-fluorouracil and a vasodilator drug pentoxifylline from wastewaters by ozonation. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 508-515.
- Chiarello, M., Minetto, L., Giustina, S.V.D., Beal, L.L., Moura, S., 2016. Popular pharmaceutical residues in hospital wastewater: quantification and qualification of degradation products by mass spectroscopy after treatment with membrane bioreactor. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, pages 16079-16089.
- Chitnis, V., Chitnis, S., Vaidya, K., Ravikant, S., Patil, S., Chitnis, D.S. 2004. Bacterial population changes in hospital effluent treatment plant in central India. *Water Research*, 38, 441-447.
- Dolu T., 2021. Farmasötiklerin İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisindeki Akıbetleri, Membran Prosesler İle Giderimleri Ve Farklı Tarımsal Uygulamalar İle Toprak Ve Bitkilere Geçişleri, Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Dolu, T. and Nas, B., 2023a. Dissemination of nonsteroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) and metabolites from wastewater treatment plant to soils and agricultural crops via real-scale different agronomic practices. *Environmental Research*, 227, 115731.
- Dolu, T., Nas, B., 2023b. Full-scale anaerobic digestion of sewage sludges: fate evaluation of pharmaceuticals and main metabolites. *Journal of Water Process Engineering*, 51, 103366.
- Ferre-Aracil, F., Valcárcel, Y., Negreira, N., López de Alda, M., Barceló, D., Cardona, S.C., Navarro-Laboulais, J., 2016. Ozonation of hospital raw wastewaters for cytostatic compounds removal. Kinetic modelling and economic assessment of the process, *Science of the Total Environment*, 556, 70-79.
- Golovko, O., Kumar, V., Fedorova, G., Randak, T. ve Grabic, R., 2014. Seasonal changes in antibiotics, antidepressants/psychiatric drugs, antihistamines and lipid regulators in a wastewater treatment plant. *Chemosphere*, 111, 418-426.
- Gonzalez, P., 2021. Understanding Phosphorus", Chemicals Incorporated 13560 Colombar Court, Fontana, CA 92337, <https://www.cheminc.com/post/understanding-phosphorus>, Access date: 16 Nisan 2023.
- Gomez, M.J., Agüera, A., Mezcuca, M., Hurtado, J., Mocholi, F., Fernandez-Alba, A.R., 2007. Simultaneous analysis of neutral and acidic pharmaceuticals as well as related compounds by gas chromatography-tandem mass spectrometry in wastewater. *Talanta*, 73, 314-320.
- Gönder, Z.B., Kara, E.M., Celik, B.O., Vergili, I., Kaya, Y., Altinkum, S.M., Bagdatli, Y., Yilmaz, G., 2021. Detailed characterization, antibiotic resistance and seasonal variation of hospital wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(13), 16380-16393.
- Gracia-Lor, E., Sancho, J. V., Serrano, R. ve Hernández, F., 2012. Occurrence and removal of pharmaceuticals in wastewater treatment plants at the Spanish Mediterranean area of Valencia. *Chemosphere*, 87 (5), 453-462.

- Hansen, K.M.S., Spiliotopoulou, A., Chhetri, R.K., Casas, M.E., Bester, K., Andersen, H.R., 2016. Ozonation for source treatment of pharmaceuticals in hospital wastewater – Ozone lifetime and required ozone dose. *Chemical Engineering Journal*, 290, 507-514.
- Hörsch, P., Speck, A., Frimmel, F.H., 2003. Combined advanced oxidation and biodegradation of industrial effluents from the production of stilbene-based fluorescent whitening agents. *Water Research*, 37(11), 2748-2756.
- Karakaş, İ., Kaya, Y., Vergili, İ., Özçelep, Z. B., Yılmaz, G., 2022. Hastane atıklarındaki mikrokirleticiler ve mikrokirleticilerin membran biyoreaktörlerde giderimi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(2), 722-739.
- Khan, N.A., Khan, A.H., Ahmed, S., Farooqi, I.H., Alam, S.S., Ali, I., Bokhari, A., Mubashir, M., 2022. Efficient removal of ibuprofen and ofloxacin pharmaceuticals using biofilm reactors for hospital wastewater treatment. *Chemosphere*, 298, 134243.
- Kosma, C. I., Lambropoulou, D. A., Albanis, T. A. 2010. Occurrence and removal of PPCPs in municipal and hospital wastewaters in Greece. *Journal of Hazardous Materials*, 179, 804-817.
- Kovalova, L., Siegrist, H., Singer, H., Wittmer, A., McArdell, C.S., 2012. Hospital wastewater treatment by membrane bioreactor: performance and efficiency for organic micropollutant elimination. *Environmental Science&Technology*, 46, 1536e1545.
- Kovalova, L., Siegrist, H., von Gunten, U., Eugster, J., Hagenbuch, M., Wittmer, A., Moser, R., McArdell, C.S., 2013. Elimination of micropollutants during post-treatment of hospital wastewater with powdered activated carbon, ozone, and UV. *Environmental Science&Technology*, 47, 7899e7908.
- Kumari, A., Maurya, N.S., Tiwari, B. 2020. Hospital wastewater treatment scenario around the globe. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, 549-570.
- Langlais, B., Reckhow, D. ve R. Brink, D., 1991. *Ozone in Water Treatment*, Lewis Publisher.
- Lee, Y., Kovalova, L., McArdell, C.S., von Gunten, U., 2014. Prediction of micropollutant elimination during ozonation of a hospital wastewater effluent. *Water Research*, 64, 134-148
- Nas, B., Dolu, T., Argun, M.E., Yel, E., Ates, H., Koyuncu, S., 2021. Comparison of advanced biological treatment and nature-based solutions for the treatment of pharmaceutically active compounds (PhACs): a comprehensive study for wastewater and sewage sludge. *Science of Total Environment*, 779, 146344.
- Nieto-Juárez, J. I., Torres-Palma, R. A., Botero-Coy, A. M. ve Hernández, F., 2021, Pharmaceuticals and environmental risk assessment in municipal wastewater treatment plants and rivers from Peru. *Environment International*, 155, 106674.
- Nguyen, T.T., Bui, X.T., Luu, V.P., Nguyen, P.D., Guo, W., Ngo, H.H., 2017. Removal of antibiotics in sponge membrane bioreactors treating hospital wastewater: comparison between hollow fiber and flat sheet membrane systems. *Bioresource Technology*, 240, 42-49.
- Majumder, A., Gupta, A.K., Ghosal, P.S., Varma, M., 2021. A review on hospital wastewater treatment: A special emphasis on occurrence and removal of pharmaceutically active compounds, resistant microorganisms, and SARS-CoV-2. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 104812.
- Ogawa, K., Umetsu, Y., Kamimura, K., 2020. Changes in the absorption spectra and colour of tetraphenylporphyrins after redox reactions, *Journal of Chemical Research*, 44(9-10), 613-61.
- Olmez-Hanci, T., Dogruel, S. Allar Emek, A. D., Eropak Yilmazer, C., Çınar, S., Kiraz, O., Citil, E., Koc Orhon, A., Siltu, E., Gucver, S. M., Karahan Ozgun, O., Tanik, A. and Yetis U. 2020. Performance of ozone and peroxone on the removal of endocrine disrupting chemicals (EDCs) coupled with cost analysis. *Water Science & Technology*, 82(4), 640-650.
- Ooi, G.T.H., Tang, K., Chhetri, R.K., Kaarsholm, K.M.S, Sundmark, K., Kragelund, C., Litty, K., Christensen, A., Lindholm, S., Sund, C., Christenson, M., Bester, K., Andersen, H. R., 2018. Biological removal of pharmaceuticals from hospital wastewater in a pilot-scale staged moving bed biofilm reactor (MBBR) utilising nitrifying and denitrifying processes. *Bioresource Technology*, 267, 677-687.
- Pariente, M.I., Segura, Y., Alvarez-Torrellas, S., Casas, J.A., dePedro, Z.M., Diaz, E., García, J., Lopez-Munoz, M.J., Marugan, J., Mohedano, A.F., Molina, R., Munoz, M., Pablos, C., Perdigon-Melon, J.A., Petre, A.L., Rodríguez, J.J., Tobajas, M., Martínez, F., 2022. Critical review of technologies for the on-site treatment of hospital wastewater: From conventional to combined advanced processes. *Journal of Environmental Management*, 320, 115769.
- Prasertkulsak, S., Chiemchaisri, C., Chiemchaisri, W., Itonaga, T., Yamamoto, K., 2016. Removals of pharmaceutical compounds from hospital wastewater in membrane bioreactor operated under short hydraulic retention time. *Chemosphere*, 150, 624-631.
- Piras, F., Santoro, O., Pastore, T., Pio, I., De Dominicis, E., Gritti, E., Caricato, R., Lionetto, M.G., Mele, G., Santoro, D., 2020. Controlling micropollutants in tertiary municipal wastewater by O₃/H₂O₂, granular biofiltration and UV₂₅₄/H₂O₂ for potable reuse applications. *Chemosphere*, 239, 124635.
- Prieto-Rodríguez, L., Oller, I., Klammerth, N. Agüera, A. Rodríguez, E.M., Malato, S., 2013. Application of solar AOPs and ozonation for elimination of micropollutants in municipal wastewater treatment plant effluents, *Water Research*, 47(4), 1521-1528.
- Rosal, R., Rodríguez, A., Perdígón-Melón, J.A., Petre, A., García-Calvo, E., Gómez, M.J., Agüera, A., Fernández-Alba, A.R., 2009. Degradation of caffeine and identification of the transformation products generated by ozonation, *Chemosphere*, 74, 825-831.
- Rosal, R., Rodríguez, A., Perdígón-Melón, J.A., Petre, A., García-Calvo, E., Gómez, M.J., Agüera, A., Fernández-Alba, A.R., 2010. Occurrence of emerging pollutants in urban wastewater and their removal through biological treatment followed by ozonation. *Water Research*, 44(2), 578-588.
- Schuts, E.C., Boyd, A., Muller, A.E., Mouton, J.V., Prins, J.M., 2021. The Effect of Antibiotic Restriction Programs on Prevalence of Antimicrobial Resistance: A Systematic Review and Meta-Analysis, *Open Forum Infectious Diseases*, 8(4).
- Souza, F.S., Da Silva, V.V., Rosin, C.K., Hainzenreder, L., Arenzon, A., Pizzolato, T., Jank, L., Féris, L.A. 2018. Determination of pharmaceutical compounds in hospital wastewater and their elimination by advanced oxidation processes. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 53(3), 213-221.
- Souza, D.M., Reichert, J.F., do Nascimento, V.R., Martins, A.F., 2022. Ozonation and UV photolysis for removing anticancer drug residues from hospital wastewater. *Journal Of Environmental Science and Health, Part A*, 57(8), 635-644.
- Wen, X., Ding, H., Huang, X., Lui, R., 2004. Treatment of hospital wastewater using a submerged membrane bioreactor. *Process Biochemistry*, 39, 1427-1431.

- Verlicchi, P., Galletti, A., Petrovic, M., Barcelo, D., 2010. Hospital effluents as a source of emerging pollutants: an overview of micropollutants and sustainable treatment options. *Journal of Hydrology*, 389, 416-428.
- Yuan, S., Jiang, X., Xia, X., Zhang, H., Zheng, S., 2013. Detection, occurrence and fate of 22 psychiatric pharmaceuticals in psychiatric hospital and municipal wastewater treatment plants in Beijing, China. *Chemosphere*, 90, 2520–2525
- Zheng J, Su C, Zhou J, Xu L, Qian Y, Chen H., 2017. Effects and mechanisms of ultraviolet, chlorination, and ozone disinfection on antibiotic resistance genes in secondary effluents of municipal wastewater treatment plants. *Chemical Engineering Journal*, 317, 309-316.



TAM KAPALI ORGANİK ÇÖZGENLİ VE SULU KUMAŞ YIKAMA SİSTEMLERİNİN EKONOMİK VE ÇAPRAZ MEDYA ETKİ ANALİZİ

Meltem BALKAN^{1*}, Emrah ÖZTÜRK², Mehmet KİTİS¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Aksu Mehmet Süreyya Demiraslan Meslek Yüksekokulu, Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Çözgen Sistem, Çapraz Medya Etki Analizi, Ekonomik Analiz, Sulu Sistem, Tekstil.</i>	Kumaş yıkama proseslerinde genellikle sulu sistem ve çözgen sistem olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. Bu çalışmada kumaş yıkama proseslerinde kullanılan sulu ve çözgen sistemler Ekonomik ve Çapraz Medya Etkiler Referans Dokümanında sunulan metodolojiden faydalanılarak analiz edilmiştir. Kumaş yıkama sistemleri çapraz medya metodolojisine göre beş farklı çevresel temada karşılaştırılmıştır. Sulu sistemin çözgen sisteme göre beşeri toksisite potansiyeli (BTP), küresel ısınma potansiyeli (KIP), asidifikasyon potansiyeli (AP) ve fotokimyasal ozon oluşturma potansiyeli (FOOP) değerlerinde sırasıyla 1,24, 1,22, 1,24 ve 1,23 kat daha fazla çevresel etkiye neden olduğu görülmüştür. Akuatik toksisite potansiyeli (ATP) açısından çözgen sistemin %100 daha düşük çevresel etkiye sahip olabileceği hesaplanmıştır. Maliyetleme metodolojisine göre ekonomik açıdan değerlendirilen sulu ve çözgen sistemin toplam yıllık maliyetleri sırasıyla 0,34 ve 0,29 USD/kg ürün olarak bulunmuştur. Maliyetleme metodolojisinden elde edilen sonuçlar çözgen sistemin %17 daha verimli olduğunu göstermiştir. Çözgen sistemin net bugünkü değer hesabında, indirgeme oranının %20 olduğu varsayılmıştır. Buna göre sistemin net bugünkü değeri 10.531 USD, yatırımın iç verim oranı ise %26 olarak bulunmuştur.

ECONOMIC AND CROSS-MEDIA IMPACT ANALYSIS OF FULLY CLOSED ORGANIC SOLVENT AND AQUEOUS FABRIC WASHING SYSTEMS

Keywords	Abstract
<i>Aqueous System, Cross Media Effect Analysis, Economics Analysis, Solvent System, Textile.</i>	Two methods are generally used in fabric washing processes, namely the aqueous system and the solvent system. In this study, the aqueous and solvent systems used in fabric washing were analyzed using the methodology presented in the Economic and Cross-Media Effects Reference Document. Alternative fabric washing systems were compared in five different environmental themes according to the cross-media methodology and it was found that the aqueous system caused 1.24, 1.22, 1.24, and 1.23 times more environmental impact than the solvent system in terms of human toxicity (HTP), global warming (GWP), acidification (AP), and photochemical ozone creation potentials (POCP) values, respectively. In addition, it was calculated that the solvent system could have almost 100% lower environmental impact in terms of aquatic toxicity potential (ATP) value. The total annual costs of the aqueous and the solvent systems, which were evaluated economically according to the costing methodology, were found to be 0.34 and 0.29 USD/kg product, respectively. The results from the costing methodology showed that the solvent system was 17% more efficient. In the net present value calculation of the solvent system, the reduction ratio was assumed to be 20%. Accordingly, the total net present value of the system was found to be 10,531 USD and the internal rate of return on the investment was found as 26%.

Alıntı / Cite

Balkan, M., Öztürk, E., Kitis, M., (2024). Tam Kapalı Organik Çözgenli ve Sulu Kumaş Yıkama Sistemlerinin Ekonomik ve Çapraz Medya Etki Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(1), 109-117.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Balkan, 0000-0001-7790-775X
E. Öztürk, 0000-0001-6421-6474
M. Kitis, 0000-0002-6836-3129

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	26.10.2023
Revizyon Tarihi / Revision Date	03.02.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	05.03.2024
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: meltembalkan@gmail.com, +90-246-211-1298

ECONOMIC AND CROSS-MEDIA IMPACT ANALYSIS OF FULLY CLOSED ORGANIC SOLVENT AND AQUEOUS FABRIC WASHING SYSTEMS

Meltem BALKAN^{1†}, Emrah ÖZTÜRK², Mehmet KİTİS¹,

¹ Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey

² Department of Environmental Protection Technologies, Aksu Mehmet Sureyya Demiraslan Vocational School, Isparta University of Applied Sciences, Isparta, Turkey

Highlights

- Aqueous and organic solvent systems used in textile fabric washing were compared according to the Economic and Cross-Media Effects (ECM) Reference Document
- The aqueous system caused 1.24, 1.22, 1.24, and 1.23 times more environmental impact than the solvent system in human toxicity (HTP), global warming (GWP), acidification (AP), and photochemical ozone creation potentials (POCP) values, respectively and the solvent system could have almost 100% lower environmental impact in terms of aquatic toxicity potential (ATP) value
- The costing methodology showed that the solvent system is 17% more efficient than the aqueous system

Purpose and Scope

The main purpose of this study was to analyze both fabric washing systems from economic and environmental aspects and to present a practical application of the methodology presented in the ECM BREF Document.

Design/methodology/approach

The ECM Reference Document presents a methodology in terms of different environmental themes and economics for evaluating and/or comparing BAT alternatives. The main environmental themes evaluated within the ECM Reference Document are HTP, ATP, GWP, AP, eutrophication potential (EP), ozone layer depletion potential (ODP), and POCP. The presented economic analysis methodology involves the real prices, total annual costs, net present values (NPV), and internal rate of return (IRR) of alternative BAT options.

Findings

HTP, ATP, GWP, AP, EP, and POCP values of the aqueous system were found to be 5.56×10^{-4} kg Pb eq., 9×10^3 m³, 1.32 kg CO₂ eq., 7.90×10^{-3} kg SO₂ eq., 1.98×10^{-1} kg PO₄ eq., 1.27×10^{-3} kg C₂H₄ eq., respectively. Also, HTP, ATP, GWP, AP, and POCP values of the solvent system were found to be 4.49×10^{-4} kg Pb eq., 1.09×10^{-5} m³, 1.08 kg CO₂ eq., 6.39×10^{-3} kg SO₂ eq., 1.04×10^{-3} kg C₂H₄ eq., respectively. Cross-media effects results showed that the solvent system was more efficient than the aqueous system in each environmental theme. The total annual costs of the aqueous and the solvent systems were found to be 0.34 and 0.29 USD/kg product, respectively. The costing methodology showed that the solvent system is 17% more efficient than the aqueous system. Thus, in terms of both environmental and economic aspects, the solvent system should be preferred over the aqueous system.

Originality

This paper contributes to the decision-making process for BATs as a practical application of the ECM Reference Document. It will serve as a guide to the practical application of ECM analysis for decision-makers, facilities and other researchers.

[†] Corresponding author: meltemmbalkan@gmail.com, +90-246-211-1298

1. Giriş (Introduction)

Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrolü Direktifi (Integrated Pollution Prevention and Control-IPPC), endüstriyel tesislerden kaynaklanan kirliliğin doğrudan kaynağında önlenerek ve/veya azaltılarak yüksek düzeyde bir çevre korunmasının sağlanması amacıyla 1996 yılında yayımlanmıştır (Doğan, 2008). IPPC Direktifi temelde, Avrupa'daki endüstriyel kaynaklı zararlı emisyonların, yeterli bir çevre koruma düzeyine indirilmesi mevcut en iyi tekniklerin (MET) uygulanması ile sağlamaktadır (Cikankowitz ve Laforest, 2013). MET'ler, genel olarak alternatif tekniklerin sağlayacağı çevresel faydaların ve ekonomik değerlendirmenin ardından belirlenen teknikler olarak tanımlanmaktadır. IPPC Direktifinin Ek 1'i kapsamındaki tesislerin, işletme izni alabilmeleri ve/veya çevresel performanslarını optimize edebilmeleri amacıyla işletmeye uygun MET'leri uygulayarak belirtilen yükümlülükleri yerine getirmeleri gerekmektedir (ÇŞİDB, 2023). Ancak, bu yükümlülükler yedi ayrı direktife dayanmakta olduğu için işletmeler açısından zorluk oluşturmaktadır (Demirel, 2019). Bu nedenle IPPC direktifinin yerini, MET'lerin rolünü genişleten ve güçlendiren Endüstriyel Emisyonlar Direktifi (Industrial Emission Directive-IED) almıştır (Evrard vd., 2016). Avrupa Komisyonu IPPC Bürosu tarafından, IPPC-IED Direktifi'nin ve MET'lerin endüstriyel tesislere uyumunu kolaylaştırmak adına çeşitli sektörel referans dokümanlar (BREF) yayımlanmıştır (Forés vd., 2013; Öztürk vd., 2016). 2006 yılında yayımlanan Ekonomik ve Çapraz Medya Etkiler (ECM) Referans Dokümanı da bu dokümanlardan birini oluşturmaktadır. ECM Dokümanı ile MET'lerin gerek çevresel gerekse ekonomik sonuçları değerlendirilmekte ve böylece endüstriyel tesisler özelinde MET'lere karar verme sürecinin kolaylaştırılması hedeflenmektedir (EC, 2006). ECM Referans Dokümanı temel olarak; (i) çapraz medya, (ii) maliyetleme, (iii) alternatiflerin değerlendirilmesi ve (iv) sektördeki ekonomik uygulanabilirlik olmak üzere dört temel metodolojiden oluşmaktadır (EC, 2006). ECM Referans Dokümanında çevresel etkiler, beşeri toksisite potansiyeli (BTP), akuatik toksisite potansiyeli (ATP), küresel ısınma potansiyeli (KIP), asidifikasyon potansiyeli (AP), ötrofikasyon potansiyeli (ÖP), ozon tabakası incelleme potansiyeli (OTİP) ve fotokimyasal ozon oluşturma potansiyeli (FOOP) olmak üzere yedi farklı temada değerlendirilmektedir (Cakir vd., 2020).

Kumaş yıkama proseslerinde genellikle sulu sistem ve çözgen sistem olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır (EC, 2003). Organik çözgenler, kumaş yıkama proseslerindeki teknik ve kalitatif problemlerin çözümünde suya göre daha avantajlıdır. IPPC Tekstil BREF'inde, çözgen sistemlerde yaygın olarak kullanılan perkloroetilenin (PER), özgül ısısının, buharlaşma gizli ısısının ve yüzey geriliminin sudan daha düşük olduğu belirtilmektedir. Ayrıca, buharlaşma için gerekli ısının da %90 daha az olduğu belirtilmektedir. Tüm bunlar çözgen sistemlerin kurutma sırasında hızlı ve ucuz buharlaşma ile zaman ve enerjiden tasarruf sağladığını gösterirken; liflere de daha hızlı tutunmasını ve nüfus etmesini sağlamaktadır (EC, 2003). Öte yandan çözgen sistemlerdeki PER kullanımının insanlar ve çevre üzerinde önemli problemlere neden olabileceği de bildirilmektedir (EC, 2003).

Bu çalışmada, kumaş yıkama proseslerinde kullanılan sulu ve çözgen sistemlerin ECM Referans Dokümanında sunulan metodoloji esas alınarak ekonomik ve çevresel açılardan analiz edilmesi ve karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda ECM Referans Dokümanında sunulan çapraz medya metodolojisine göre ilk olarak çalışmanın sistem sınırları belirlenmiştir. Ardından, kumaş yıkama sistemlerinin çevresel etkileri; BTP, ATP, KIP, AP, ÖP, OTİP ve FOOP olmak üzere yedi farklı çevresel temada karşılaştırılmıştır. ECM dokümanında sunulan maliyetleme metodolojisine göre her iki sistemin toplam yıllık maliyetleri hesaplanarak, net bugünkü değer (NBD) ve iç verim oranı (İVO) belirlenmiştir. Bu çalışmada incelenen kumaş yıkama sistemleri ekonomik ve çapraz medya etkiler açısından yazarların bilgi birikimine göre ilk kez bu detayda analiz edilmiştir. Bu yönüyle çalışma özgün değere sahiptir. Ayrıca bu çalışma ECM Referans Dokümanının pratik bir uygulaması olarak MET'lere ilişkin karar verme sürecine katkıda bulunmaktadır. Bu çalışma, temiz üretim uygulamalarındaki MET'lere karar verme süreçlerinde karar vericilere ve diğer araştırmacılara ECM analizinin pratik uygulamasını sunmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Çapraz Medya Etkilerin Hesaplanması (Calculation of Cross-Media Effects)

ECM Referans Dokümanında potansiyel çevresel etkiler temelde yedi farklı çevresel temada (BTP, KIP, ATP, AP, ÖP, OTİP ve FOOP) değerlendirilmektedir (Cakir vd., 2020). Bu çevresel temalar, kirleticilerin neden olma olasılığı en yüksek çevresel etkilere dayanmaktadır. Ayrıca, değerlendirilen alternatif seçeneklerin kendi özelinde neden olabileceği spesifik bir çevresel tema bulunması durumunda, ilgili çevresel tema da değerlendirmeye katılabilmektedir. Böylece hem farklı kirleticilerin birbirleriyle karşılaştırılması hem de kirleticilerin bir araya getirilerek toplam çevresel etki olarak ifade edilmesi sağlanmaktadır (EC, 2006). Kimyasallara maruz kalmanın doğrudan solunum yoluyla gerçekleştiği varsayılan BTP'de işçileri bu maruziyet riskinden korumak yüksek önceliklidir (McKone ve Hertwich, 2001; EC, 2006).

ECM Referans Dokümanına göre BTP, kg kurşun (Pb) eşdeğeri olarak ifade edilmektedir (EC, 006). KIP ise, belirli bir sera gazından kaynaklanan küresel ısınma etkisini, bir kg CO₂'in (toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %75'ini CO₂ oluşturmaktadır) etkisine kıyasla tahmin etmektedir (Lameh, 2022; USEPA, 2022). ECM Referans Dokümanına göre KIP, kg CO₂ eşdeğeri olarak ifade edilmektedir (EC, 2006). Sucul ortamlara yapılan deşarjların, toksisite eşik değerine ulaşana kadar seyreltilmesi için gerekli su hacmi ATP ile elde edilmektedir. ECM Referans Dokümanına göre ATP, m³ olarak ifade edilmektedir (EC, 2006). Genellikle kükürt dioksit (SO₂), amonyak (NH₃) ve azot oksitler (NO_x) gibi antropojenik hava kirleticilerin neden olduğu çevresel etkiyi hesaplayan AP, kg SO₂ eşdeğeri olarak ifade edilmektedir (EC, 2006; Kim ve Chae, 2016). ÖP ile, besi elementlerinin (N, P vb.) artmasından kaynaklı tatlı su ve deniz ekosistemlerinde meydana gelen çevresel etki hesaplanmaktadır (EC, 2006; Morelli vd., 2018). ECM Referans Dokümanına göre ÖP, kg fosfat (PO₄³⁻) eşdeğeri olarak ifade edilmektedir (EC, 2006). CFC-11 eşdeğeri olarak ifade edilen OTİP ile belirli bir zaman periyodu boyunca (genellikle 100 yıllık) ozon tabakası üzerindeki yıkıcı etkiler hesaplanmaktadır (Jungbluth, 2020). FOOP ile atmosfere salınan çeşitli uçucu organik bileşiklerin (UOB) genel etkisi tanımlanmaktadır (Forster vd., 2007). Etilen (C₂H₄), tüm UOB'lerin en güçlü ozon öncülerinden biridir (DEPA, 2022). Bu nedenle FOOP, kg C₂H₄ eşdeğeri olarak ifade edilmektedir (EC, 2006).

BTP ve ATP değerlerinin hesaplanmasında emisyon kütlesi, ilgili emisyonun toksisite faktörüne bölünerek emisyonu güvenli seviyelere indirgenmesi için gerekli olan hava veya su hacmi elde edilmektedir. KIP, AP, ÖP, OTİP ve FOOP değerlerinin hesaplanmasında ise emisyonun kütlesi ile ilgili emisyonun çarpım faktörü kullanılmaktadır. Böylece emisyonlar eşdeğer bir referans maddeye dönüştürülmektedir (EC, 2006). Çevresel temaların hesaplanması kapsamında varsayımsal bir toplam oluşturmak amacıyla kullanılan formüller aşağıda sunulmaktadır. Kirleticilerin ilgili çevresel temalardaki toksisite faktörleri, ECM Referans Dokümanının eklerinde (ECM Referans Dokümanının; Ek 1'inde BTP, Ek 2'sinde KIP, Ek 3'ünde PNEC, Ek 4'ünde AP, Ek 5'inde ÖP, Ek 6'sında OTİP, Ek 7'sinde FOOP faktörleri ve Ek 14'ünde ADP faktörleri) sunulmaktadır.

$$BTP_{(toplam)} = \sum \left(\frac{\text{Havaya salınan kirletici kütlesi}}{\text{Kirleticinin beşeri toksisite faktörü}} \right) \quad (1)$$

$$ATP_{(toplam)} = \sum \left(\frac{\text{Salınan kirletici kütlesi}}{\text{Kirleticinin PNEC değeri}} \right) \quad (2)$$

$$KIP_{(toplam)} = \sum (KIP_{(kirletici)} \times \text{Salınan kirleticinin kütlesi}) \quad (3)$$

$$AP_{(toplam)} = \sum (AP_{(kirletici)} \times \text{Salınan kirleticinin kütlesi}) \quad (4)$$

$$\text{ÖP}_{(toplam)} = \sum (\text{ÖP}_{(kirletici)} \times \text{Salınan kirleticinin kütlesi}) \quad (5)$$

$$\text{OTİP}_{(toplam)} = \sum (\text{OTİP}_{(kirletici)} \times \text{Salınan kirleticinin kütlesi}) \quad (6)$$

$$\text{FOOP}_{(toplam)} = \sum (\text{FOOP}_{(kirletici)} \times \text{Salınan kirleticinin kütlesi}) \quad (7)$$

ECM Referans Dokümanında çevresel etkilerin yorumlanmasına yönelik "basit karşılaştırma" ve "Avrupa toplamalarına göre normalizasyon" olmak üzere iki yöntem sunulmaktadır. Pratik ve kolay bir yöntem olan basit karşılaştırma yöntemine göre her bir alternatif seçenek önem derecesine göre sıralanmakta ve böylece karşılaştırmanın genel görüntüsü verilmektedir. Ancak, basit karşılaştırma yöntemi çevresel etkilerin boyutu hakkında bilgi vermemektedir (EC, 2006). Çevresel etkilerin boyutu ise Avrupa toplamalarına göre normalizasyon yöntemi ile belirlenmektedir (EC, 2006). Yaşam döngüsü değerlendirmesindeki "katkı analizi" adımına benzeyen bu yöntemde alternatif seçeneklerin çevresel etkileri, ortak bir referans değere göre normalleştirilmektedir. Ortak referans değer ise alternatif seçeneğin belirli bir toplam Avrupa yüküne yapacağı katkı olarak ifade edilmektedir (EC, 2006).

2.2. Maliyetleme Metodolojisi (Costing Methodology)

Alternatif seçeneklerin maliyet analizi, ECM Referans Dokümanında sunulan maliyetleme metodolojisi esas alınarak hesaplanmıştır. Bu metodolojiye göre maliyet analizi kapsamında "reel fiyatların" kullanılması önerilmektedir (EC, 2006). Bu çalışmada, farklı yıllar için sunulan maliyet verileri, ilgili fiyat endeksleri kullanılarak 2021 reel fiyatlarına dönüştürülmüştür (Eşitlik 8 ve Eşitlik 9). Toplam yıllık maliyetler ise Eşitlik 10 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Fiyat ayarlayıcı} = \frac{\text{Analizin baz yılı için sunulan fiyat endeksi}}{\text{Taslak maliyet verisinin ait olduğu yıl için sunulan fiyat endeksi}} \quad (8)$$

$$\text{Dönüştürülmüş maliyet verileri} = \text{Orijinal maliyet verileri} \times \text{Fiyat ayarlayıcı} \quad (9)$$

$$\text{Toplam yıllık maliyet} = C_0 \left[\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \right] + \text{OC} \quad (10)$$

Buradaki; C_0 malzemenin baz yıldaki maliyetini, r dönemlik faiz oranını, n malzemenin yıllar içindeki ömrünü ve OC ise toplam işletme ve bakım maliyetini ifade etmektedir.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre, 2021 yılı için ortalama yıllık faiz oranı %20 (TÜİK, 2023) kabul edilmiştir. Ayrıca alternatif MET seçenekleri için ortalama birim maliyetler de (Eşitlik 11) hesaplanmıştır.

$$\text{Ortalama birim maliyet} = \frac{\text{Toplam yıllık maliyet}}{\text{Üretim miktarı}} \quad (11)$$

Alternatif MET seçeneklerinin karşılaştırılmasında, ihtiyaç duyulan yatırımın değerini hesaplamak için NBD yöntemi (Eşitlik 12) kullanılarak İVO da hesaplanmıştır (Cakir vd., 2020). Eşitlik 13'te görüldüğü gibi İVO, alternatif seçeneklerden elde edilen tüm nakit akışlarının, NBD değerinin sıfıra eşit olduğu faiz oranı olarak kabul edilmektedir (İbrahim vd., 2017).

$$\text{NBD} = -(\text{Yatırım harcamaları}) + \sum_{t=0}^n \left[\frac{(\text{Net gelir})_t}{(1+r)^t} \right] \quad (12)$$

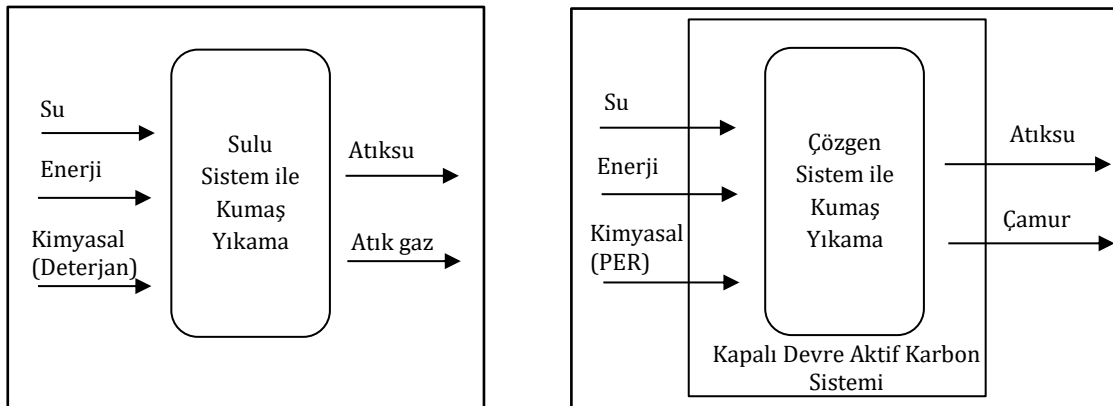
$$0 = \text{NBD} = -(\text{Yatırım harcamaları}) + \sum_{t=0}^n \left[\frac{(\text{Net gelir})_t}{(1+\text{İVO})^t} \right] \quad (13)$$

Burada sunulan t değeri, 0 yılından n yılına kadar olan süreyi ifade ederken; n ise proje süresini temsil etmektedir.

3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

3.1. Çapraz Medya Etkilerin Belirlenmesi (Identification of Cross-Media Effects)

Çapraz medya metodolojisi kapsamında ilk olarak çalışmanın sistem sınırları belirlenmiştir. Kumaş yıkama sistemi temel sistem sınırı olarak kabul edilmiştir. Belirlenen sistem sınırlarından faydalanılarak alternatif kumaş yıkama sistemleri için kaynak kullanımları ve emisyon oluşumları listelenmiştir. İki sistem için de aynı kumaş kalitesi ile aynı üretim hızı baz alınmıştır. Üretim kapasitesi ise saatte 0,8 ton olarak kabul edilmiştir. Tüketim verileri ve üretim kapasitesi dikkate alınarak kg ürün başına spesifik tüketimler ve oluşan emisyonlar hesaplanmıştır. Alternatif kumaş yıkama sistemlerinin (sulu ve çözgen sistemlerin) spesifik su tüketim miktarları sırasıyla $3,59 \times 10^{-6}$ ve $1,00 \times 10^{-2}$ m³/kg ürün olarak bulunmuştur.



Şekil 1. Kumaş Yıkama Proseslerinin Sistem Sınırları (System Boundaries of Fabric Washing Processes)

IPPC Tekstil BREF'inde, 0,5 m³/sa ortalama akış hızına sahip çözgen sistemin 75-125 g/sa'lık PER emisyonuna neden olduğu belirtilmektedir (EC, 2003). Ayrıca, kapalı devre aktif karbon sistemlerinin kullanılması ile atıksudaki PER konsantrasyonu 1 mg/L'nin (suya yükleme $\leq 0,5$ g PER/sa) altına düşürülebilmektedir (EC, 2003). Elde edilen verilerden faydalanılarak, atıksudaki PER konsantrasyonu $3,59 \times 10^{-9}$ kg/kg ürün bulunmuştur. Ayrıca, çözgen sistemde kullanılan kapalı-devre aktif karbon filtreleri ile egzoz çıkışı elimine edilmekte ve arıtılan hava da makinenin kumaş koku giderme/soğutma bölümüne gönderilmektedir (EC, 2003). Böylece, çözgen sistemden dış atmosfere herhangi bir hava akımı gönderilmemektedir (EC, 2003). Bu çalışmada, çözgen sistemin çevresel etkileri belirlenirken PER ve enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonlar dikkate alınmıştır.

Sulu sistem ile kumaş yıkama proseslerinde çeşitli deterjan türleri kullanılmaktadır. Deterjan türleriyle beraber deterjan içerikleri de değişkenlik gösterdiği için malzeme güvenlik bilgi formlarından (material safety data sheet-MSDS) faydalanılarak deterjanların ortalama 900 mg O₂/g KOİ değerine neden olduğu kabul edilmiştir. Bu çalışmada, sulu sistemin çevresel etkileri belirlenirken deterjan türleri için belirlenen ortalama KOİ değeri ve enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonlar dikkate alınmıştır (EC, 2003).

Alternatif kumaş yıkama sistemlerinin enerji tüketim verileri Tablo 1’de sunulmuştur. IPPC Tekstil BREF’ine göre sulu sistemin elektrik tüketimi 252 kW/sa ve buhar tüketimi 3.890 kg/sa’dır (EC, 2003). Çözgen sistemde ise elektrik ve buhar tüketimleri sırasıyla 239 kW/sa ve 3.130 kg/sa’dır (EC, 2003). Alternatif kumaş yıkama sistemlerinin buhar ve enerji tüketim verilerinin hesaplanmasında kullanılan tüketim miktarları “organik çözgenler ile kumaş yıkanmasında (temizlenmesinde) tam kapalı-devre sistemlerin kullanımı” bölümünden elde edilmiştir (EC, 2003). Çarpım faktörleri ise ECM Referans Dokümanının “ANNEX 8-European Energy Mix” bölümünden kabul edilmiştir (EC, 2006). Enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonlar ECM Referans Dokümanının Ek 10’unda sunulan “Avrupa elektrik ve ısı karması” dikkate alınarak hesaplanmıştır. Buna göre, 1 GJ elektrik tüketimi sonucu oluşan emisyonlar ve bu emisyonların çarpım faktörleri sırasıyla SO₂, CO₂ ve NO₂; 0,10, 117 ve 0,16’dır. 1 GJ buhar tüketimi sonucu oluşan emisyonlar ve bu emisyonların çarpım faktörleri ise sırasıyla SO₂, CO₂ ve NO₂; 0,54, 97,20 ve 0,18’dir. Alternatif kumaş yıkama sistemlerinde oluşan emisyonlar ise Tablo 2’de listelenmiştir.

Tablo 1. Kumaş Yıkama Sistemlerinin Enerji Tüketim Verileri (Energy Consumption Data of Fabric Washing Systems)

Enerji Kaynağı	Birim	Sulu Sistem	Çözgen Sistem
Elektrik	GJ/kg ürün	1,13x10 ⁻³	1,08x10 ⁻³
Buhar	GJ/kg ürün	1,22x10 ⁻²	9,83x10 ⁻³

Tablo 2. Kumaş Yıkama Sistemlerinde Oluşan Emisyonlar (Emissions from Fabric Washing Systems)

Emisyonlar		Birim	Sulu Sistem	Çözgen Sistem
Suya salınan	Perkloroetilen (PER)	kg/kg ürün	-	3,59x10 ⁻⁹
	Deterjan	kg/kg ürün	2,00x10 ⁻²	-
	Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)	kg/kg ürün	9,00	-
Enerji tüketiminden kaynaklanan	Kükürt dioksit (SO ₂)	kg/kg ürün	6,71x10 ⁻³	5,41x10 ⁻³
	Karbondioksit (CO ₂)	kg/kg ürün	1,32	1,08
	Azot dioksit (NO ₂)	kg/kg ürün	2,38x10 ⁻³	1,94x10 ⁻³

IPPC Tekstil BREF’ine göre alternatif kumaş yıkama sistemleri (sulu ve çözgen sistemlerin) çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahip olmaktadır (EC, 2003). Örneğin, kumaş yıkama proseslerindeki teknik ve kalitatif problemlerin çözümünde çözgen sistemlerin suya göre daha avantajlı olduğu belirtilirken; çözgen sistemlerdeki PER kullanımının da insanlar ve çevre üzerinde önemli problemlere neden olabileceği belirtilmektedir (EC, 2003). Bu nedenle, kumaş yıkamasında kullanılan sistemler ECM Referans Dokümanında sunulan metodolojiler esas alınarak karşılaştırılmıştır. Kumaş yıkama sistemlerinin toplam çevresel etkileri hesaplanmış ve Tablo 3’de sunulmuştur.

Tablo 3. Kumaş Yıkama Sistemlerinin Toplam Çevresel Etkileri (Total Environmental Impacts of Fabric Washing Systems)

Çevresel Temalar	Birim	Sulu Sistem	Çözgen Sistem
BTP	kg Pb/ kg ürün	5,56x10 ⁻⁴	4,49x10 ⁻⁴
ATP	m ³ / kg ürün	9,00x10 ³	1,09x10 ⁻⁵
KIP	kg CO ₂ / kg ürün	1,32	1,08
ÖP	kg PO ₄ / kg ürün	1,98x10 ⁻¹	-
AP	kg SO ₂ / kg ürün	7,90x10 ⁻³	6,39x10 ⁻³
FOOP	kg C ₂ H ₄ /kg ürün	1,27x10 ⁻³	1,04x10 ⁻³

Çapraz medya analizi kapsamında, muhtemel çevresel etkileri olan bazı emisyonlar, emisyon faktörlerinin mevcut olmaması nedeniyle, ilgili çevresel temalardaki hesaplamalara dahil edilmemiştir. Örneğin, enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonlardan SO₂ ve NO₂’nin KIP faktörü; PER’in ÖP faktörü, CO₂’nin ise AP ve FOOP faktörleri mevcut değildir. Bu nedenle, bu emisyonlar ilgili çevresel temalardaki hesaplamalara dahil edilmemiştir. Ayrıca, CFC-11 eşdeğeri olarak ifade edilen OTİP, kumaş yıkama sistemleri tarafından üretilmeyen kloroflorokarbonlar (CFC’ler) ile ilişkili olduğu için sulu ve çözgen sistemlerin OTİP değerleri hesaplanmamıştır. Alternatif kumaş yıkama sistemleri ECM Referans Dokümanında sunulan metodoloji esas alınarak beş farklı çevresel temada değerlendirilmiştir. Sulu sistem değerlendirilen beş çevresel temada da çözgen sisteme göre daha yüksek çevresel etkiye neden olmuştur. Bu durum sulu sistemin daha yüksek enerji tüketiminden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, çözgen sistemin ATP değerindeki daha düşük çevresel etkisi ise aktif karbon adsorpsiyonu ile atıksudaki PER gideriminden kaynaklanmaktadır.

3.1.1 Çapraz Medya Etkilerin Yorumlanması (Interpretation of Cross-Media Effects)

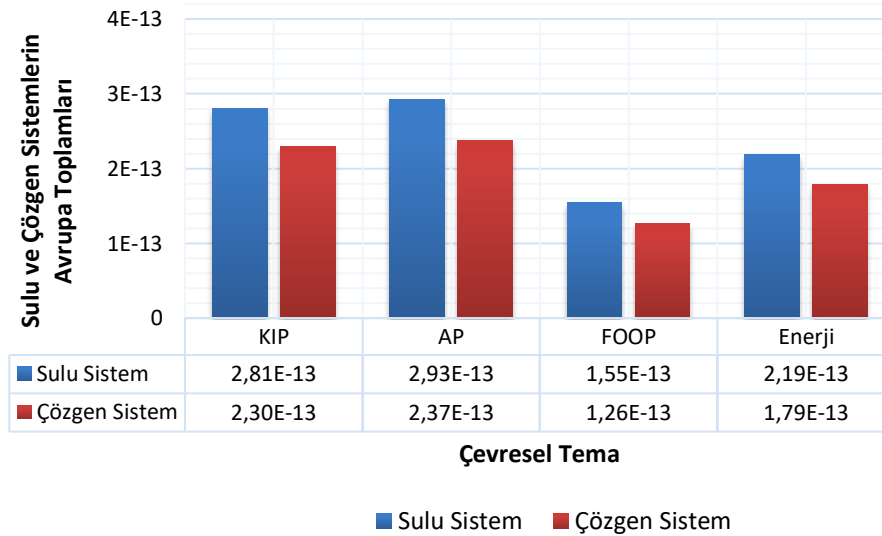
Belirlenen çevresel etkiler, ECM Referans Dokümanında sunulan, iki farklı yöntem (basit karşılaştırma ve Avrupa toplamlarına göre normalizasyon) ile karşılaştırılmıştır. Şekil 2’de sunulan basit karşılaştırma yöntemine göre, çözgen sistemin değerlendirilen her bir çevresel temada (BTP, KIP, ATP, AP, ÖP ve FOOP) daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Ancak basit karşılaştırma yöntemi ile alternatif seçeneklerin sadece genel görüntüsü sunulmuştur. Çevresel etkilerin boyutu hakkında karşılaştırma yapılabilmesi için Avrupa toplamlarına göre normalizasyon yöntemi kullanılmıştır.

Çevresel Temalar	Sulu Sistem	Çözgen Sistem
BTP	2	1
ATP	2	1
KIP	2	1
ÖP	2	1
AP	2	1
OTİP	Değerlendirilmedi	Değerlendirilmedi
FOOP	2	1

1: İyi performans
2: Düşük performans

Şekil 2. Kumaş Yıkama Sistemlerinin Basit Karşılaştırılması (Simple Comparison of Fabric Washing Systems)

Alternatif seçeneklerin çevresel etkileri (KIP, AP, FOOP ve enerji tüketimi) için hesaplanan Avrupa toplamları Şekil 3’te gösterilmiştir. BTP ve ATP parametreleri, normalleştirme faktörleri olmadığı için bu değerlendirmenin dışında tutulmuştur. AP değeri, her iki kumaş yıkama sisteminde de en yüksek çevresel etkiye neden olurken bunu sırasıyla KIP, enerji tüketimi ve FOOP değerleri takip etmiştir. Sulu sistem çözgen sistemden KIP, AP ve FOOP parametrelerinde sırasıyla 1,22, 1,23 ve 1,23 kat daha yüksek çevresel etkiye neden olmuştur. Bu durum, sulu sistemin daha yüksek enerji tüketiminden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3. Kumaş Yıkama Sistemlerinin Avrupa Toplamlarına Göre Normalizasyonu (Normalization of Fabric Washing Systems According to European Totals)

3.2 Maliyetlerin Hesaplanması (Calculation of Costs)

ECM Referans Dokümanında sunulan maliyetleme metodolojisinden faydalanılarak alternatif kumaş yıkama sistemlerinin maliyet analizi hesaplanmıştır. Sulu sistemde işçilik, elektrik, buhar, su, atıksu ve deterjan maliyetleri sırasıyla 32 Euro, 25,2 Euro, 116,7 Euro, 2,4 Euro, 6,24 Euro ve 24,8 Euro’dur (EC, 2003). Çözgen sistemde ise işçilik, elektrik, buhar, su, PER ve çamur maliyetleri sırasıyla 32 Euro, 23,9 Euro, 93,9 Euro, 6,9 Euro, 3,2 Euro ve 12,48 Euro’dur (EC, 2003). Sulu ve çözgen sistemlerin maliyet verileri IPPC Tekstil BREF’inde yer alan “organik çözgenler ile kumaş yıkanmasında (temizlenmesinde) tam kapalı-devre sistemlerin kullanımı” başlıklı bölümden elde edilmiştir (EC, 2003). Bu kapsamda; alternatif kumaş yıkama sistemlerinin baz yıldaki (2021) nominal ve reel fiyatları belirlenerek toplam yıllık maliyetleri hesaplanmıştır. Ayrıca, solvent sistemin NBD ve İVO değerleri hesaplanmıştır.

Alternatif kumaş yıkama sistemlerinin maliyet analizi kapsamında ilk olarak baz yıldaki (2021) fiyatlar hesaplanmıştır. Nominal fiyatların hesaplanmasında kullanılan fiyat dengeleyici oranı 1,37 (1997 ve 2021 yılları için sırasıyla 76,48 ve 104,70) olarak kabul edilmiştir (OECD, 2023). Reel fiyatların hesaplanmasında kullanılan gayri safi yurtiçi hasıla (Gross domestic product-GDP) oranı ise 1,08 (1997 ve 2021 yılları için GDP deflatörü sırasıyla 93,49 ve 101,24) olarak kabul edilmiştir (OECD, 2023). Baz yıldaki fiyatlara göre, sulu ve çözgen sistemin reel fiyatları sırasıyla 0,34 ve 0,29 USD/kg ürün olarak hesaplanmıştır (Tablo 4). Alternatif kumaş yıkama sistemlerinin reel fiyatları dikkate alındığında çözgen sistemin %17 daha tasarruflu olduğu görülmektedir (Balkan, 2022). Bu durum ekonomik açıdan çözgen sistemin tercih edilebileceğini göstermektedir.

Tablo 4. Kumaş Yıkama Sistemlerinin Nominal ve Reel Fiyatları (Nominal and Real Prices of Fabric Washing Systems)

Maliyet Bileşenleri	Sulu Sistem (USD/kg ürün)		Çözgen Sistem (USD/kg ürün)	
	Nominal Fiyat (2021)	Reel Fiyat (2021)	Nominal Fiyat (2021)	Reel Fiyat (2021)
İşçilik	0,06	0,05	0,06	0,05
Elektrik	0,05	0,04	0,04	0,04
Buhar	0,21	0,19	0,17	0,16
Su	0,004	0,004	0,01	0,01
Atıksu	0,01	0,01	-	-
Deterjan	0,04	0,04	-	-
PER	-	-	0,01	0,01
Çamur	-	-	0,02	0,02
Toplam	0,37	0,34	0,31	0,29

IPPC Tekstil BREF'ine göre, 3.000 ton ve üzeri üretim yapan tesislerde çözgen sistem ile kumaş yıkama prosesinin geri ödeme süresinin 2-3 yıl olduğu belirtilmektedir (EC, 2003). Sulu sisteme göre elde edilen yıllık kazanç 0,34 USD/kg ürün; toplam yıllık yatırım maliyeti ise 0,68 USD/kg ürün olarak bulunmuştur. Çözgen sistemin NBD hesaplamasında indirgeme oranı %20 kabul edilmiş ve 25 yıllık NBD değerinin 10.531 USD olduğu hesaplanmıştır. Yatırımın İVO değeri ise %26 olarak bulunmuştur. İVO değerinin, faiz oranından büyük olması yatırım için olumlu kabul edilmektedir.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

ECM Referans Dokümanında sunulan çapraz medya metodolojisine göre, sulu sistemin çözgen sistemden BTP, KIP, AP ve FOOP değerlerinde sırasıyla 1,24, 1,22, 1,24, 1,23 kat daha fazla çevresel etkiye neden olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca, ATP değerine göre çözgen sistem %100 daha düşük çevresel etki sergilemiştir. Bu durum, hem kapalı devre filtrelerin kullanımı ile dış atmosfere herhangi bir hava akımının gönderilmemesinden hem de aktif karbon adsorpsiyonu ile atıksudaki PER'in geri kazanımından kaynaklanmaktadır. Çapraz medya metodolojisinden elde edilen sonuçlara göre, daha düşük çevresel etki ile sonuçlanan çözgen sistemin, sulu sisteme kıyasla tercih edilebileceği görülmüştür.

Maliyetleme metodolojisi kapsamında ise sulu ve çözgen sistemin reel işletme maliyetleri sırasıyla 0,34 ve 0,29 USD/kg ürün bulunmuştur. Ayrıca, çözgen sistemin 25 yıllık kullanım ömrü dikkate alınarak toplam NBD ve İVO değerleri ise sırasıyla 10.531 USD ve %26 olarak hesaplanmıştır. İVO değerinin, faiz oranından büyük olması yatırımın olumlu olduğunu göstermektedir. Maliyetleme metodolojisinden elde edilen sonuçlar ise %17 daha tasarruflu olan çözgen sistemin ekonomik açıdan da tercih edilebileceğini göstermiştir.

Bu çalışmada hem çevresel hem de ekonomik yönleri bulunan alternatif tekniklere karar verme sürecinde yaşanan zorluklar vurgulanmaktadır. ECM Referans Dokümanı temelde yaşanan bu zorlukları kolaylaştırmayı amaçlamaktadır. Ancak, çevresel temalar hesaplanırken kullanılan bazı emisyonların çarpım faktörlerinin olmaması yürütülen çalışmayı zorlaştırmaktadır. Bu doğrultuda, çarpım faktörlerinin eklenerek ECM Referans Dokümanının zenginleştirilmesi ve farklı sektörlerde gerçek tesis verileri ile yapılan çalışmaların/uygulama örneklerinin artırılması önerilmiştir. Böylece veri setleri oluşturulabilir ve ilerleyen süreçte oluşturulan veri setleri derlenerek ECM Referans Dokümanının daha kullanıcı dostu olması sağlanabilir. ECM Referans Dokümanının geliştirilmesi ve zenginleştirilmesi bu konuda çalışan araştırmacılar ve paydaşlar için önemli katkılar sunabilir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Balkan, M., 2022. Tekstil Endüstrisinde Mevcut En İyi Teknikler için Ekonomik ve Çevresel Çapraz Medya Etki Analizi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 73s, Isparta.
- Cakir, N., Alp, E., Yetis, U., 2020. Assessing Technologies for Reducing Dust Emissions from Sintermaking Based on Cross-Media Effects and Economic Analysis. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22:1909-1928. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01933-9>.
- Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB), 2023. Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrolü. Erişim Tarihi: 08.07.2023. <https://ippc.csb.gov.tr>
- Cikankowitz, A., Laforest, V., 2013. Using BAT Performance as an Evaluation Method of Techniques. *Journal of Cleaner Production*, 42, 141-158. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.005>
- Danish Environmental Protection Agency (DEPA), 2022. Photochemical Ozone Formation Erişim Tarihi: 08.07.2023. https://www2.mst.dk/udgiv/publications/2005/87-7614-574-3/html/kap06_eng.htm#6.3.
- Demirel, Y.E., 2019. Entegre Bir Tekstil İşletmesinde Temiz Üretim Uygulamaları. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 226s, Isparta.
- Doğan, B., 2008. Assessment of the Best Available Wastewater Management Techniques for a Textile Mill: Cost and Benefit Analysis. Middle East Technical University, Science Institute, Department of Environmental Engineering, M.Sc. Thesis, 202p, Ankara.
- European Commission (EC), 2003. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques for the Textile Industry. EC IPPC Bureau, Seville, Spain.
- European Commission (EC), 2006. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Economics and Cross-Media Effects. EC IPPC Bureau. Seville, Spain.
- Evrard, D., Laforest, V., Villot, J., Gaucher, R., 2016. Best Available Technique Assessment Methods: a Literature Review from Sector to Installation Level. *Journal of Cleaner Production*, 121, 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.096>
- Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland, 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.
- Ibáñez-Forés V, Bovea MD, Azapagic A, 2013. Assessing the sustainability of Best Available Techniques (BAT): methodology and application in the ceramic tiles industry. *J Clean Prod* 51:162–176. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.01.020>
- Ibrahim, A.Y., Ghallab, A.O., Gadalla, M.A., Makary, S.S., Ashour, F.H., 2017. Technical and Economical/Financial Feasibility Analyses of Flared Gas Recovery in Egypt from Oil and Gas Industry from International/National Oil Companies' Perspectives *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19:1423-1436. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1340-2>.
- Jungbluth, N., 2020. Description of Life Cycle Impact Assessment Methods. ESU-services Ltd., Switzerland, 40p. <http://esu-services.ch/address/tender/>.
- Kim, T. H., Chae, C. U., 2016. Environmental Impact Analysis of Acidification and Eutrophication Due to Emissions from the Production of Concrete. *Sustainability (Switzerland)*, 8(6), 1–20. <https://doi.org/10.3390/su8060578>
- Lameh, M., Al-Mohannadi, D.M., Linke, P., 2022. Minimum Marginal Abatement Cost Curves (Mini-MAC) for CO2 Emissions Reduction Planning. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24:143-159. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02095-y>.
- McKone, T.E., Hertwich, E.G., 2001. The Human Toxicity Potential and a Strategy for Evaluating Model Performance in Life Cycle Impact Assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 6(2):106-109. <https://doi.org/10.1007/BF02977846>.
- Morelli, B., Hawkins, T. R., Niblick, B., Henderson, A. D., Golden, H. E., Compton, J. E., Cooter, E. J., Bare, J. C., 2018. Critical Review of Eutrophication Models for Life Cycle Assessment. *Environmental Science and Technology*, 52(17), 9562–9578. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00967>
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2023. Inflation (CPI) (indicator). Erişim Tarihi: 08.07.2023. <https://data.oecd.org>
- Ozturk E, Koseoglu H, Karaboyacı M, Yigit NO, Yetis U, Kitis M., 2016. Minimization of water and chemical use in a cotton/polyester fabric dyeing textile mill. *J Clean Prod* 130:92–102. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.080>
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), 2023. Tüketici Fiyat İndeksi. Erişim Tarihi: 20.07.2023. <https://data.tuik.gov.tr/>.



KAPALI ALANDA BEACON TABANLI NAVİGASYON UYGULAMASI

Recep ÇAKIR^{1*}, Murat Tanrıverdi², Behlül Sarıkaya², Fatmana Şentürk², Serkan Doğanalp³

¹ Pamukkale Üniversitesi, Çameli Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Denizli, Türkiye

² Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye

³ Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Beacon,
Bluetooth,
Kapalı Alan Konumlandırma
Sistemi,
Üçgenleme Algoritması,
Yakınlık Algoritması.*

Öz

Günlük yaşamda bir adrese ilerlerken veya insanları bir adrese yönlendirirken konum bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bundan dolayı Küresel Konum Belirleme Sistemleri (GNSS-Global Navigation Satellite Systems) gündelik yaşamda oldukça önemlidir. Genel anlamda GNSS alıcısının yeteri kadar uydu görmesi halinde konum belirlenebilmektedir. Ancak GNSS teknolojisinin sinyal yapısından kaynaklı olarak GNSS alıcıları kapalı alanlarda uydu sinyallerini alamamakta ve iyi performans verememektedir. Bu nedenle kapalı alanlarda alternatif konum belirleme teknolojileri kullanılmaktadır. Bu teknolojilerden biri de Bluetooth tabanlı Beacon teknolojisidir. Bu çalışmada Beacon cihazları kullanılarak kapalı alanlarda navigasyona izin veren React Native platformunda Android ve iOS tabanlı bir mobil uygulama geliştirilmiştir. Geliştirilen bu uygulama Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi giriş katında test edilmiştir. Çalışma kapsamında öncelikli olarak test edilecek olan kapalı alanın haritası çıkarılmış ve Beacon cihazları bu test alanı üzerinde algılama mesafelerine göre konumlandırılmıştır. Sonrasında ise; daha önceden çıkarılan harita üzerinde, Beacon cihazlarının gerçek konumları işaretlenmiştir. Bir sonraki aşamada ise; bina girişinden itibaren hedef odaya kadar olan rotanın belirlenmesi ve gerekli yönlendirmelerin yapılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda gidilecek yola en hızlı şekilde ulaşmak için dijkstra algoritması kullanılmıştır. Mobil uygulamada kullanıcılara rota ve anlık olarak katedilen yol Leaflet kütüphanesi ile gösterilmiştir. Yapılan testler sonucunda bina içi navigasyon uygulaması hedeflenen konumların tespitini %90 doğruluğunda elde etmiştir.

BEACON-BASED NAVIGATION APPLICATION IN INDOOR

Keywords

*Beacon,
Bluetooth,
Indoor Positioning System,
Trilateration Algorithm,
Proximity Algorithm.*

Abstract

In daily life, location information is needed when going to an address or directing people to an address. Therefore, Global Positioning Systems (GNSS-Global Navigation Satellite Systems) are very important in daily life. In general, the location can be determined if the GNSS receiver sees enough satellites. However, due to the signal structure of GNSS technology, GNSS receivers cannot receive satellite signals in indoor and therefore cannot give good performance. For this reason, alternative positioning technologies are used in indoor. One of these technologies is Bluetooth-based Beacon technology. The study involved the development of a mobile application for Android and iOS platforms using React Native. The application enables navigation in indoor through the use of Beacon devices. This developed application has been tested on the ground floor of Pamukkale University Engineering Faculty. Within the scope of the study, the map of the indoor area to be tested was drawn and the Beacon devices were positioned on this test area according to their detection distances. Afterwards; On the previously obtained map, the actual locations of the Beacon devices are marked. In the next stage; determining the route from the building entrance to the target room and making the necessary directions. For this purpose, the dijkstra algorithm was used to reach the road to be traveled in the fastest way. In the mobile application developed with React Native, the route and the instantaneous path to the users are shown with the Leaflet library. As a result of the tests, the indoor navigation application achieved 90% accuracy in detecting the targeted locations.

* İlgili yazar / Corresponding author: rcakir@pau.edu.tr, +90-258-571-6161

Alıntı / Cite

Çakır, R., Tanrıverdi, M., Sarıkaya, B., Şentürk, F., Doğanalp, S., (2024). Kapalı Alanda Navigasyon Uygulaması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(1), 118-131.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

R. Çakır, 0000-0002-2395-4769
M.Tanrıverdi, 0009-0005-1760-3873
B. Sarıkaya, 0000-0002-5549-8155
F. Şentürk, 0000-0002-5548-6015
S. Doğanalp, 0000-0001-7229-6355

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	27.03.2023
Revizyon Tarihi / Revision Date	02.02.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	05.03.2024
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

BEACON-BASED NAVIGATION APPLICATION IN INDOOR

Recep ÇAKIR^{1†}, Murat TANRIVERDİ², Behlül SARIKAYA², Fatmana ŞENTÜRK², Serkan DOĞANALP³

¹ Pamukkale Üniversitesi, Çameli Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Denizli, Türkiye

² Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye

³ Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Highlights

- A mobile application was developed for indoor navigation using Beacon technology.
- Preliminary tests were carried out by using trilateration and proximity algorithm for the selection of the positioning algorithm.
- The location accuracy of the mobile application was tested by using the Dijkstra algorithm to find the shortest path algorithm.
- A 90% success rate was achieved in the tests of the mobile application and its weaknesses were determined.

Purpose and Scope

The most important technology that meets people's navigation needs is global navigation satellite systems (GNSS). This technology, which is very useful and popular, does not perform well in indoor. This article aims to use Bluetooth-based Beacon technology for navigation purposes in indoor where GNSS technology is insufficient.

Design/methodology/approach

An indoor suitable for the purpose of the article was determined and the map of the indoor was made in a certain datum and projection. GNSS receiver and total station were used for this process. A preliminary test was carried out for trilateration and proximity algorithms, which are among the positioning algorithms planned to be used in the study. A mobile application was developed for the use of the navigation application. Tests of the mobile application were carried out using the Dijkstra algorithm.

Findings

10 target points were determined for the testing phase of the mobile application. The Dijkstra algorithm was used to find the shortest path to these points. As a result of the tests, 9 target points were reached without any problems. At 1 target point, the designed mobile navigation application failed. Examination of the failed test reveals that the beacon at the target point was 1.5 m higher than the beacons at the other 9 points, and there were numerous reflective surfaces around the beacon's location. It is believed that these factors contributed to the failure of the test. The mobile application has been tested with 90% accuracy.

Originality

This study aims to contribute to the literature by providing preliminary tests for selecting positioning algorithms in Beacon-based indoor navigation studies, procedures for obtaining indoor maps, and procedures for accurately placing Beacon devices in the field.

[†] Corresponding author: rcakir@pau.edu.tr, +90-258-571-6161

1. Giriş (Introduction)

Dünyada insan popülasyonu, kentleşme, teknolojik imkanlar artmaktadır ve bu durumlara bağlı olarak gündelik yaşam farklı boyutlara evrilmektedir. İnsanlar gündelik yaşamda kısıtlı zaman dilimlerinde birçok işi aynı anda yapabilme imkanına sahip olabilmektedir. Bu imkanların oluşmasında Küresel Konum Belirleme Sistemleri (GNSS-Global Navigation Satellite Systems) önemli katkılar sunmaktadır. GNSS teknolojisi 3 boyutlu, yüksek doğrulukla, gerçek zamanlı konum bilgisi sağlayan önemli bir teknolojidir (Kahveci vd., 2019). GNSS teknolojisi navigasyon başta olmak üzere, jeodezik ve jeodinamik çalışmalar, askeri faaliyetler, arama-kurtarma faaliyetleri, mühendislik hizmetleri ve daha birçok alanda küresel anlamda kullanılmaktadır. GNSS teknolojisinin konum belirlemede çok iyi bir teknoloji olmasına rağmen bazı zayıf tarafları da vardır. Bunlardan bir tanesi, kullanıcıların GNSS sinyallerini kapalı alanlarda ulaşamaması veya zayıf almasından dolayı GNSS teknolojisinin kapalı alanlarda iyi performans verememesidir (Marathe vd., 2018; Park vd., 2021). Bu durumdan dolayı kapalı alanlarda konum belirleme amaçlı alternatif çözümler geliştirilmektedir. Bluetooth tabanlı Beacon teknolojisi, Wi-Fi teknolojisi, RFID tabanlı (Radio Frequency Identification Device) uygulamalar, karekod uygulamaları, hibrit uygulamalar (pusula, adımsayar vb.) bu alternatif çözümlere örnek olarak verilebilir (Eroğlu ve Doğan, 2019).

Bluetooth tabanlı Beacon teknolojisi temelinde Bluetooth kavramı yatmaktadır. Günlük yaşamın bir parçası olan Bluetooth teknolojisini insanlar aktif olarak kullanmaktadır. Özellikle nesnelerin bu teknoloji ile birbirine bağlanarak iletişim kurmasından dolayı bu yolla elde edilen veriler günlük yaşamı kolaylaştırmaktadır. Bu teknoloji 1998'de ilk olarak Erickson, Nokia, Intel, IBM ve Toshiba gibi şirketler tarafından oluşturulan SIG (Special Interest Group) isimli grup tarafından geliştirilmiştir (Bisdikian, 2001). Günümüzde Bluetooth ile ilgili olarak Bluetooth Low Energy (BLE) bu alandaki en son gelişmelerden biridir. Nesnelerin interneti; internetin kapsamını, geleneksel ağ bağlantılı cihazların türünden olmayan fiziksel nesnelere de kapsayacak şekilde genişletmekle ilgilidir. BLE teknolojisi de bu amaçla tasarlanan, sensörlerin küçük miktarlardaki verileri uzun süreler boyunca verimli bir şekilde internet gücünü beslemesini sağlayan çok çeşitli iletişim çözümlerinden biridir. Sensörlerin, madeni para büyüklüğündeki bir pili kullanarak uzun yıllar iletişim kurabilmesini vaat eden düşük enerji tüketen, nispeten kısa menzilli bir teknolojidir (Siekkinen vd., 2012). Beacon'lar düşük maliyetli, hafif, küçük ve kurulumu basit cihazlardır (Şekil 1). Beacon'lar BLE altyapısına kullanan kablosuz iletişimi sağlayan cihazlar olmakla birlikte düşük enerji tüketimi sayesinde, küçük piller ile uzunca bir zaman çalışabilmektedir (Kajioka vd., 2014).



Şekil 1. Beacon cihazı (Beacon device)

Beacon teknolojisi tek yönlü bir veri iletişimi sunmaktadır. Beacon protokolü verici temelli olduğundan veri kullanıcıya geldiğinde kullanıcı tarafından veri aktarımı yapılmamaktadır. Kısaca Beacon kullanıcıya veri paketlerini ileten bir yayıncıdır. Veri kullanıcıya ne kadar sık aralıklarla iletilirse kullanıcının veriye ulaşması o kadar kolay olacaktır. Ancak bu durum enerji tüketimini artırdığından pil ömrünü azaltacaktır (Allurwar vd., 2016). Birçok üretici firma tarafından çeşitli boyut ve özelliklerde Beacon cihazları üretilmektedir. Beacon'ları tanımlamak ve iletişim kurmak için beş farklı bileşen vardır. Bu bileşenler UUID (Universally Unique Identifier), Major ve Minor, RSSI ve MPower (Measured power) olarak sıralanır (Allurwar vd., 2016; Gülağız vd., 2016). Bu değerler şu şekilde açıklanabilir;

- UUID (Universally Unique Identifier): 128 bit uzunluğunda bir veri parçası olup Beacon ağını tanımlamak için kullanılır. Her bir Beacon'ın kendine özgü UUID değeri vardır.
- Major: 16 bit uzunluğunda işaretli bir tamsayı değeridir ve Beacon ağına yer alan küçük bir grubu tanımlamak için kullanılır.
- Minor: 16 bit uzunluğunda işaretli bir tamsayıdır ve Beacon cihazlarını ayırt etmek için kullanılır ve her cihaz için ayrı bir minor değeri olmak zorundadır.
- RSSI (Received Signal Strength Indicator): Alınan sinyalin güç göstergesi olarak bilinen RSSI değeri, BLE sinyal gücüyle ilgili olarak Beacon eşleşmesi olan cihazlarla arasındaki tahmini uzaklığı hesaplamak için kullanılır. BLE sinyalinin gücü, Beacon alıcısıyla arasındaki mesafeden etkilenmektedir.

- MPower: Bu değer sabit bir değer olup Beacon üreticisi olan firma tarafından belirlenir ve bir metrelik bir mesafe için beklenen RSSI değerini tanımlamaktadır. Şekil 2'de tasarlanan uygulamada kullanılan Beacon'lar ile ilgili iletişim örneği gösterilmiştir.

```
react-native-kontaktio Example
[{"uniqueId":null,"minor":52915,"firmwareVersion":-1,"txPower":-77,"accuracy":0.09736236134931163,"isShuffled":false,"batteryPower":-1,"major":3984,"uuid":"78282cbd-0f53-4be0-afc0-e8d2beead793","name":null,"rssi":-61,"address":"DC:B1:9D:BD:1B:F7","proximity":"IMMEDIATE"}]
```

Şekil 2. Uygulamada kullanılan Beacon iletişim örneği (Beacon communication example used in the application)

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Kannan vd. (2013), Wi-Fi sinyallerinden yararlanarak Android tabanlı, kapalı alanlar için bir navigasyon uygulaması geliştirmişlerdir. Bu uygulamada konumlandırma algoritması olarak parmak izi algoritması kullanmışlardır. Geliştirdikleri uygulamayı farklı mekanlarda test ederek uygulanabilirliği ve hedeflenen konumu bulma konusunda öneriler sunmuşlardır.

Sátán (2018), yaptığı çalışmada BLE Beacon teknolojisi kullanarak Android tabanlı kapalı alan navigasyon uygulaması geliştirmiştir. Kullanıcı konumu için Beacon sinyallerini mesafe ile ilişkilendirmiştir. Uygulama alanının haritasını akıllı telefonun veri tabanı ile ilişkilendirerek navigasyon uygulamasının çevrimdışı da çalışmasını sağlamıştır. Navigasyon uygulamasının testlerini 3 katlı bir binada dijkstra algoritmasıyla yapmıştır. Çalışma sonucunda en kısa yol için; yolların konumlarla uygun bir şekilde birbirine bağlanması, Beacon konumlarının seçimi, simülasyon sırasında karşılaşılan sorunlar gibi birçok durumu ortaya koymuştur.

Vaščák ve Savko (2018), Beacon teknolojisi kullanarak iç mekân konumlandırma ile ilgili çalışma yapmışlardır. Yaptıkları testlerde mobil bir robot kullanmışlardır. Çalışmalarında konumlandırma algoritması olarak üçgenleme yöntemini seçmişlerdir. Bu yöntemin kullanımında Beacon sinyallerini gürültüden arındırmak için kalman filtresi kullanmışlardır. Konumlandırma performansını gerçek konumla hesaplanan konumu kıyaslayarak ortaya koymuşlardır. Ayrıca Beacon'ları derinlik sensörü ile kullanarak navigasyon haritası elde etmişlerdir. Çalışma sonucunda, Beacon teknolojisinin nesnelerin interneti kavramıyla birlikte robotik çalışmaların da önemli bir parçası olacağını vurgulamışlardır.

Eroğlu ve Doğan (2019), çalışmalarında Android ve iOS tabanlı kapalı alanlarda Beacon teknolojisini kullanan bir navigasyon uygulaması tasarlamışlardır. Önerilen uygulama, görme ve işitme engellilerin kullanımına yönelik geliştirilmiştir. Saha çalışması ve testler için Antalya Büyükşehir Belediyesi iç hizmet binasını kullanmışlardır. Çalışma sonucunda görme ve işitme engelli bireylerin Beacon tabanlı teknolojiler yardımıyla bağımsız hareket edebilmeleri sağlamışlardır.

Uttraphan vd. (2020), çalışmasında kapalı alanlar için konum belirlemede BLE Beacon teknolojinden yararlanmıştır. Konum belirleme yöntemi olarak RSSI sinyallerini değerlendirerek parmak izi algoritmasını incelemiştir. Çalışma, kapalı alanda 3500 m² olan bir konferans salonunda test edilmiştir. Doğrulama yarıçapı ise 14 m olarak seçilmiş ve başarı sağlanmıştır. Çalışmanın sonuç kısmında BLE Beacon teknolojisinin düşük maliyetli ve düşük enerji tükettiği için alışveriş kompleksi veya havaalanları gibi büyük bir kapalı alanda uygulamak için çok uygun olduğu ifade edilmiştir.

El-Sheimy ve Li (2021), yaptıkları çalışmada kapalı alan konumlandırma, yerleştirme ve navigasyon ile ilgili son gelişmeleri ve gelecekteki olabilecek durumunu birçok yönüyle araştırmışlardır. Bu alanda kullanılan teknolojileri, konumlandırma algoritmalarını, haritaları ve daha birçok durumu incelemiştir. Ayrıca kapalı alan konumlandırmayı sosyal ve ekonomik bakış açısı geliştirerek gelecekteki rolü ile ilgili görüşlerini belirtmişlerdir.

Valliappan ve Vikram (2021), robotlar için bir navigasyon sistemi tasarlamışlardır. Çalışma, robotların hassas navigasyonu için gerekli olan bilgileri sağlayan tasarımlar için ihtiyaçları minimize etmeyi amaçlamıştır. Çalışmada kullanılan robotta görüntü sensörü, yakınlık sensörü gibi donanımlar mevcuttur. Sensörler yardımıyla elde edilen veriler derin öğrenme algoritması kullanılarak yön bulma amaçlı kullanılmaktadır. Robot, sensörler yardımıyla bulunduğu alanın haritasını çıkararak ulaşmak istediği hedefe bir yol çizmektedir. Çalışma sonucunda yapılan testlerde robotun hedefe ulaşma doğruluğu %78 düzeyinde çıkmıştır. Çalışma iyi aydınlatılmış kapalı ortamlarda robotlar için bir alternatif oluşturmaktadır.

Guo vd. (2022), kapalı alan konumlandırmada kullanılan fazla sayıdaki Beacon'nın gerçek zamanlı kullanımındaki en uygun seçimi ve ortamdaki insan hareketliliğinin iç mekân konumlandırmaya etkilerini araştırmışlardır. Gerçek zamanlı en uygun Beacon seçimini, Beacon'ların RSSI sinyallerindeki anomaliliklerden yararlanarak "gerçek zamanlı Beacon seçim yöntemi" ile gerçekleştirmişlerdir. Bu yöntemin konumlandırma doğruluğunu farklı yöntemlerle kıyaslayarak konumlandırma için kullanılacak gerçek zamanlı Beacon seçimlerinde hassas sonuç verdiğini göstermişlerdir. Ayrıca iç mekânda bulunan yayaların rastgele bir şekilde yürümesinin iç mekân konumlandırmaya etkilerini gerçek zamanlı Beacon seçimleri için gerçekleştirilen testlerde doğrulamışlardır.

Wakchaure vd. (2022), kapalı alanlarda karekod ve arttırılmış gerçeklik kullanarak bir navigasyon uygulaması tasarlamışlardır. Çalışmalarında, yangın gibi acil durumlarda en kısa kaçış yolunu bulmak için algoritma geliştirmişlerdir. Algoritma verileri için akıllı telefonda bulunan sensörler, adım verileri, binanın acil çıkış tahliyesiyle ilgili bilgileri kullanmışlardır. Uygulamanın test aşamasını ise eğitim için kullanılan bir binada gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda acil bir tahliye sırasında insanlara zaman kazandıracak bir sistem geliştiklerini belirtmişlerdir.

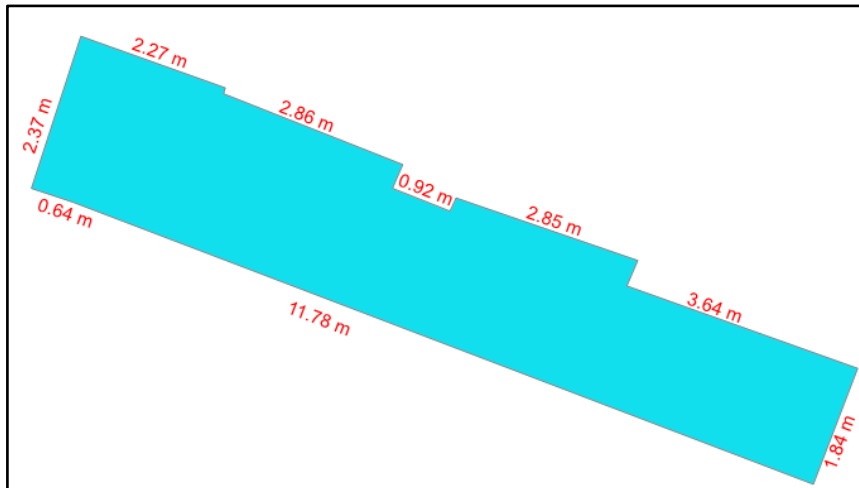
3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Çalışma Alanı (Study Area)

Uygulama alanı olarak Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi seçilmiştir (Şekil 3). Uygulama aşamasına geçilmeden önce Beacon cihazlarının konumlandırma algoritmaları için testleri gerçekleştirilmiştir. Bu test aşaması navigasyon uygulamasının ön aşaması olup hangi konumlandırma algoritmasının kullanılacağına karar verilmiştir. Test aşaması yaklaşık uzunluğu 12.00 m, yaklaşık genişliği 2.00 m ve yüksekliği 2.60 m olan tamamen kapalı alanda bulunan bir koridorda gerçekleştirilmiştir (Şekil 4).



Şekil 3. Çalışma için belirlenen kapalı alan (Indoor area chosen for study)



Şekil 4. Test alanı (Test area)

3.2. Konumlandırma Yöntemleri (Positioning Methods)

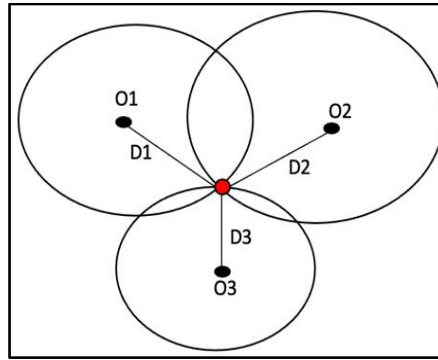
Beacon cihazlarıyla konum bilgisi elde etmek için RSSI değerine bağlı olarak parmak izi (fingerprint), üçgenleme (trilateration), yakınlık (proximity) algoritmalarının yanı sıra bu algoritmalara bağlı olarak geliştirilmiş farklı algoritmalar mevcuttur. RSSI değeri ortam şartlarından etkilenmekle birlikte alıcı ile verici arasındaki mesafeye bağlıdır. Alıcı sinyal kaynağına yaklaştıkça teorik olarak artar, uzaklaştıkça azalır. RSSI değeri “-dBm” olarak ifade edilmektedir. RSSI değerini mesafeyle ilişkilendirmek için kullanılan en yaygın model aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$d_i = 10^{\frac{r_0 - r_i}{10n}} \quad (1)$$

Burada d_i alıcı ile verici arasındaki mesafeyi, r_i anlık algılanan RSSI değerini, r_0 1 m mesafe için hesaplanan RSSI değerini, n ise çevre şartlarına bağlı yol kaybı katsayısıdır (Abhishek vd., 2013; Anagnostopoulos vd., 2014; Guo vd., 2022). Bu çalışmada üçgenleme ve yakınlık algoritması test edilmiştir.

3.2.1. Üçgenleme Yöntemi (Trilateration Method)

Bu teknikte konumu belirli olan üç vericinin (Beacon) hedef nesneye olan mesafelerinden yararlanılarak hedef nesnenin konumu hesaplanır. Verici ile hedef nesne arasındaki mesafe, vericiler tarafından yayımlanan BLE sinyallerinin RSSI değerinden hesaplanır. Bu yöntemde vericilerin mesafeye bağlı olarak BLE sinyallerinin gücünün katlanarak azalacağı veya artacağı dikkate alınmalıdır (Eroğlu ve Doğan, 2019; Özdemir vd., 2014; Pujiharsono vd., 2020; Vaščák ve Savko, 2018).



Şekil 5. Üçgenleme yöntemi (Trilateration method).

Şekil 5’te konumu bulunmak istenen nesnenin üç boyutlu koordinatları x, y, z olmak üzere O_1, O_2, O_3 referans noktalarındaki üç Beacon’ın konumu $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$ ve hedef nokta ile referans noktaları arasındaki uzaklıklar D_1, D_2, D_3 olmak üzere aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hedef noktanın konumu hesaplanır.

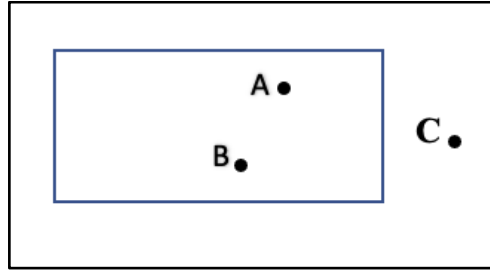
$$D_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \quad (2)$$

$$D_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \quad (3)$$

$$D_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 \quad (4)$$

3.2.2. Yakınlık Yöntemi (Proximity Method)

Yakınlık yöntemi, konumlandırma için basit bir yöntem olarak kabul edilir. Bilinen bir konuma veya alana göre hedef noktanın konumu bulunur. Yakınlık algoritmasında konumu bilinen yerlere vericilerin (Beacon, Wi-Fi vb.) sabitlenmesi gerekir. Konumu bulunmak istenen nesne vericiler ile bağlantı kurduğunda hedef nesnenin konumu belirlenen nokta veya alanın yakınında kabul edilir. Şekil 6’da A vericisinin yakınlık alanı dikdörtgen bölge ile gösterilmiştir. B nesnesi A vericisinin yakınlık alanında, C nesnesi ise dışarıda gösterilmiştir (Khudhair vd., 2016; Kim vd., 2015).



Şekil 6. Yakınlık yöntemi (Proximity method)

3.3. Mobil Uygulama Geliştirme (Mobile Application Development)

Akıllı telefon ve tabletler için piyasaya sunulmuş pek çok işletim sistemi olsa da Android ve iOS en çok kullanıcıya sahip işletim sistemleridir (Statcounter, 2023). Bu çalışmada da kullanım oranları sebebiyle Android ve iOS işletim sistemleri üzerinde çalışabilecek bir uygulama geliştirmek hedeflenmiştir. İki işletim sisteminin gereksinimleri ve uygulama geliştirme aşamaları ise farklıdır. Örneğin Android cihazlar için uygulama geliştirmede Java (Oracle, 2023) ya da Kotlin (Kotlin, 2023) dilleri kullanılırken, iOS cihazlar için uygulama geliştirmede Swift (Apple, 2023a) veya Objective C (Apple, 2023b) dilleri kullanılır. Geliştirmede kullanılacak iki dil, iki farklı geliştirme aşaması anlamına gelmekte ve buna bağlı olarak geliştirme zaman maliyeti artmaktadır. Bununla birlikte bir uygulama geliştirme maliyetinde her iki işletim sisteminde de çalıştırılabilir uygulamalar geliştirmek mümkündür.

3.3.1. Platformlar Arası Uygulama Geliştirme (Cross Platform Application Development)

Platformlar arası uygulamalar, farklı mobil platformlarda çalışabilecek şekilde geliştirilen mobil uygulamalardır. Tek bir kod üzerinden farklı işletim sistemlerine uyumlu şekilde çalışabilirler. React Native (Facebook, 2023) ise cross platform uygulama geliştirme kütüphanelerinden biridir. Geliştirilmiş olan pek çok platformlar arası uygulama geliştirme aracı olsa da React Native geliştiricilere kendi yazdıkları kütüphaneleri dahil etme imkânı ve uygulama render süreleri açısından oldukça avantajlıdır. Avantajlarından dolayı bu çalışmada uygulama geliştirmede React Native Kütüphanesi kullanılmıştır.

3.4. En kısa yol algoritması (Shortest Path Algorithm)

Kişiler kapalı alanlarda hedef noktasına varmak için en kısa yolu tercih etmektedirler. Geliştirilen mobil uygulama içinde kişileri yönlendirmede en kısa yolu bulan bir algoritma tercih edilmelidir. Bu amaç doğrultusunda, bilinen en kısa yol bulma algoritması Dijkstra tercih edilmiştir.

Algoritma 1. Dijkstra Algoritması (Dijkstra algorithm)

```

1 function Dijkstra(Graph, source):
2
3   for each vertex v in Graph.Vertices:
4     dist[v] ← INFINITY
5     prev[v] ← UNDEFINED
6     add v to Q
7   dist[source] ← 0
8
9   while Q is not empty:
10    u ← vertex in Q with min dist[u]
11    remove u from Q
12
13    for each neighbor v of u still in Q:
14      alt ← dist[u] + Graph.Edges(u, v)
15      if alt < dist[v]:
16        dist[v] ← alt
17        prev[v] ← u
18
19  return dist[], prev[]

```

Dijkstra algoritması, bir noktadan başka bir noktaya olan en kısa yolu hesaplayan bir algoritmadır. Algoritmanın temel çalışma prensibi şu şekildedir. İlk önce başlangıç noktasından, gidilebilecek tüm alternatifler için maliyetler hesaplanır ve doğrudan yol olmayan diğer noktalara sonsuz değeri atanır. Sonraki aşamada ise; başlangıç

noktasından gidilebilen ve maliyeti en az olan yol tercih edilir. İkinci noktaya geçildiğinde ise; yine komşu olan yollara ait maliyetler güncellenerek aralarından en düşük olan tercih edilir. Bu işlemler hedef noktaya varılıncaya kadar devam etmektedir (Dijkstra, 1959). Bu algoritmaya ait pseudocode Algoritma 1'de verilmiştir.

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

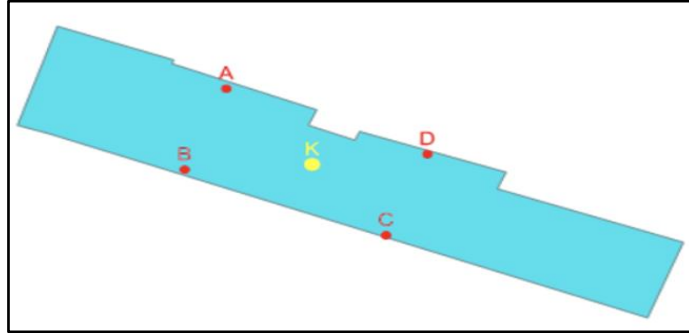
4.1. Test Aşaması (Test Phase)

Bu çalışmada kullanılan konumlandırma algoritmasının performansı test edilmiştir. Test alanı kapalı ortam özelliklerini yansıtan bir koridor olarak seçilmiştir. Koridorun ve uygulama haritasının hassas bir şekilde elde edilebilmesi için, kat planlarının doğrudan kullanımı veya kat planlarından dönüşüm ile harita elde edilmesi gibi işlemler gerçekleştirilmemiştir. Bunu yerine haritalar, kapalı alanın dışarısından içerisine koordinat taşınarak elde edilmiştir. Bu aşama için GNSS alıcısı ile elektronik uzunluk ve açı ölçer kullanılmıştır. Elde edilen haritaların çizimi için ise açık kaynaklı leaflet JavaScript kütüphanesinden yararlanılmıştır.

Haritaların koordinatları International Terrestrial Reference System (ITRF) datumunda ve Universal Transverse Mercator projeksiyonunda (UTM) elde edilmiştir. Haritaların koordinatlarının belirli bir datum ve projeksiyonda elde edilmesi Beacon cihazlarının uygulama alanında aplikasyonunu ve elde edilen verilerin analizini kolaylaştırmaktadır. Bu çalışmada test edilen konumlandırma algoritmalarından üçgenleme ve yakınlık algoritmasına göre Beacon'ların haritada yerleri belirlenmiştir. Elektronik uzunluk ve açı ölçer kullanılarak haritada belirlenen noktalara, test alanında Beacon'ların aplikasyonu yapılmıştır. Yapılan testlerin başarısı hedeflenen konum ile elde edilen konum arasındaki uzaklık baz alınarak değerlendirilmiştir. Aşağıdaki eşitlikte x_1, y_1 hedeflenen konum, x_2, y_2 elde edilen konum S 'ise aralarındaki uzaklık olarak gösterilmiştir.

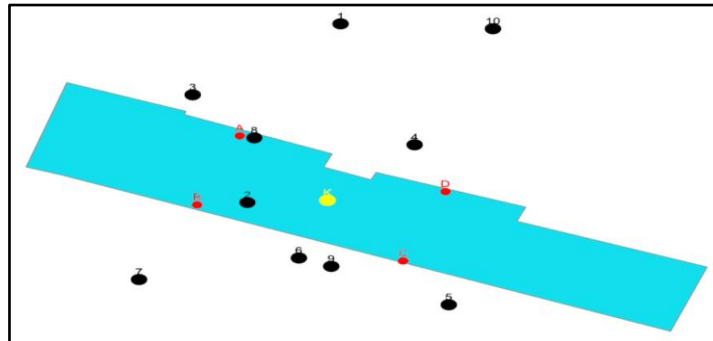
$$S = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (5)$$

Üçgenleme algoritması için yapılan testlerde Beacon'ların yerleştirilmesi koridorun fiziki durumu da baz alınarak iki farklı yerleşim planına göre yapılmıştır. İlk yerleşim planına göre A, B, C ve D noktaları Beacon'ların yerleştirildiği noktalar, K noktası Beacon'lardan alınan sinyale göre konumu bulunmak istenen noktadır (Şekil 7).



Şekil 7. Üçgenleme algoritması ilk konumlandırma planı (Initial positioning plan for Trilateration algorithm)

İlk yerleşim planında A-B noktaları ile C-D noktaları arası 2.00 m A-D noktaları ile B-C noktaları arası 4.00 m olacak şekilde koridorun fiziki durumu da baz alınarak koordinatlandırılmıştır. K noktası ise oluşan dikdörtgen şeklin yaklaşık ortasına gelecek şekilde seçilmiştir. İlk yapılan testte oluşan dikdörtgen şeklin dışından içeriye doğru farklı yön ve açılardan gelinerek K noktasına 10 defa ulaşılmış ve bu noktada telefon ekranındaki değeri okumak için birkaç saniye beklenilmiştir. Bu testin sonucunda 10 farklı konum bilgisi elde edilmiştir (Şekil 8).



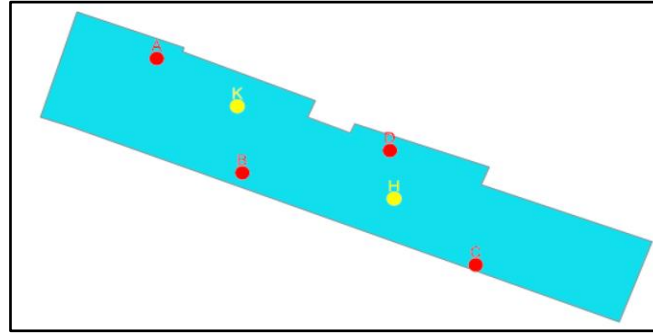
Şekil 8. 1. Test (1st test)

Hedeflenen K noktasının konumu ile yapılan ilk test sonucu elde edilen konum bilgisi arasındaki uzaklık Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. İlk yapılan test sonucu (First test result)

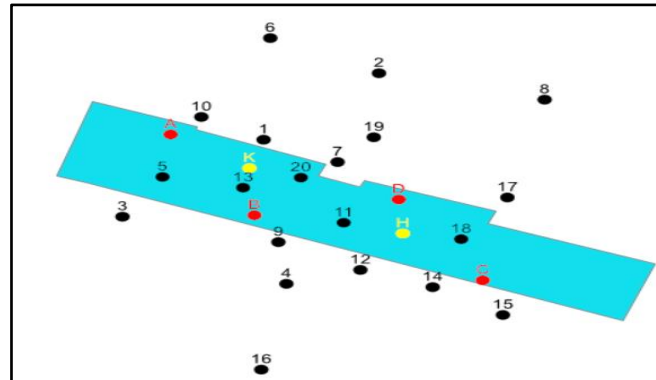
Hedeflenen Konum	Elde Edilen Konum	Uzaklık (m)
K	1	4.73
K	2	1.44
K	3	3.72
K	4	2.16
K	5	3.55
K	6	1.62
K	7	4.00
K	8	2.13
K	9	1.77
K	10	5.48

İkinci yerleşim planına göre A, B, C ve D noktası Beacon'ların yerleştirildiği noktalar, K ve H noktası ise Beacon'lardan alınan sinyale göre konumu bulunmak istenen noktalardır. İkinci yerleşim planında A-B, B-D ve D-C noktaları arası 3.00 m olacak şekilde koridorun fiziki durumu da baz alınarak koordinatlandırılmıştır. K ve H noktası ise oluşan üçgen şekillerin yaklaşık ortasına gelecek şekilde seçilmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. Üçgenleme algoritması 2. konumlandırma planı (2nd positioning scheme for the Trilateration algorithm)

İkinci yapılan testte oluşan üçgen şekillerin dışından içeriye doğru farklı yön ve açılardan gelinerek K ve H noktalarına 10 defa ulaşılmış ve bu noktalarda telefon ekranındaki değeri okumak için birkaç saniye beklenilmiştir. Bu testin sonucunda 20 farklı konum bilgisi elde edilmiştir (Şekil 10).



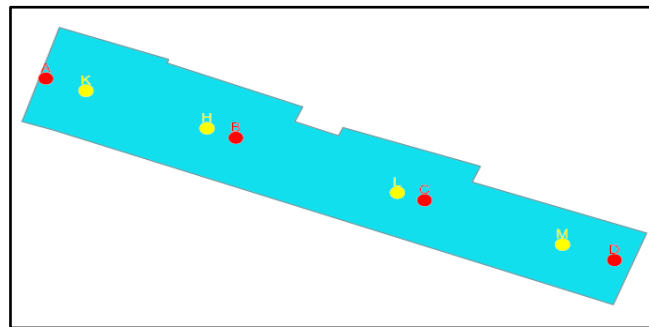
Şekil 10. 2. Test (2nd test)

Hedeflenen K ve H noktasının konumu ile yapılan 2. test sonucu elde edilen konum bilgisi arasındaki uzaklık Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. 2. test sonucu (2nd test result)

Hedeflenen Konum	Elde Edilen Konum	Uzaklık (m)
K	1	0.91
K	2	3.92
K	3	2.99
K	4	3.59
K	5	1.81
K	6	3.98
K	7	1.82
K	8	6.41
K	9	2.32
K	10	1.84
H	11	1.26
H	12	1.41
H	13	3.56
H	14	1.74
H	15	3.22
H	16	5.06
H	17	2.41
H	18	1.21
H	19	2.98
H	20	2.70

Üçüncü yerleşim planı yakınlık algoritmasına göre yapılmıştır. A, B, C ve D noktası Beacon'ların yerleştirildiği noktalar; K, H, I ve M noktası ise Beacon'lardan alınan sinyale göre konumu bulunmak istenen noktalardır (Şekil 11).



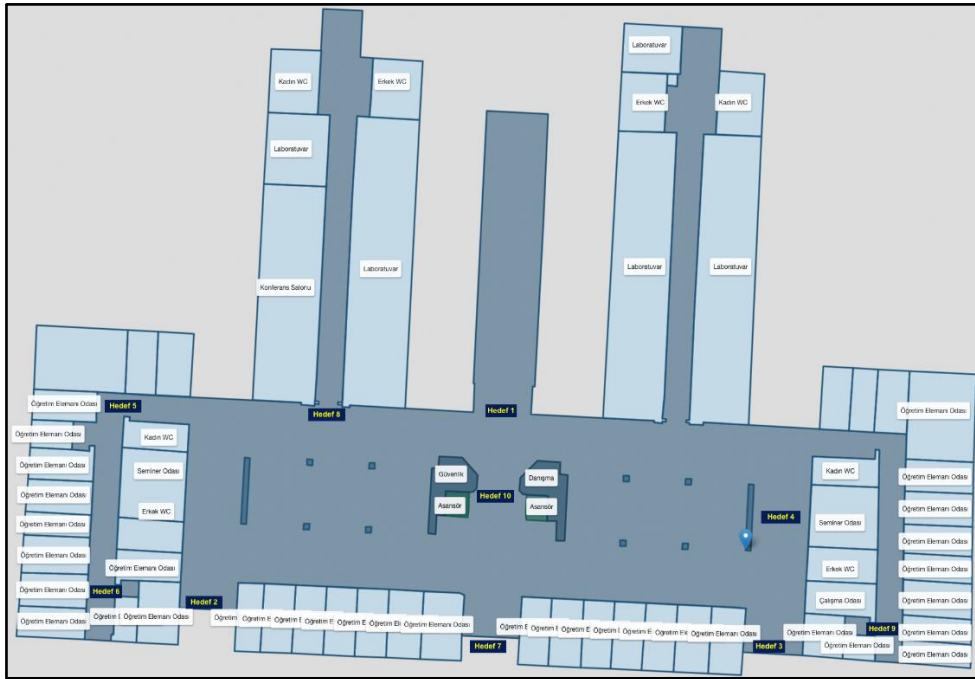
Şekil 11. Yakınlık algoritması konumlandırma planı (Proximity algorithm positioning plan)

Konumu bulunmak istenen noktaların yerleşim planında Beacon'ların bulunduğu noktalara yakın seçilme nedeni yakınlık algoritmasının çalışma prensibinin bir gereğidir. İkinci yerleşim planında A-B, B-C ve C-D noktaları arası 4.00 m olacak şekilde koridorun fiziki durumu da baz alınarak koordinatlandırılmıştır. Noktalar arası mesafe için kısmen de olsa 3.00 m, 3.50 m, 4.50 m, 5.00 m gibi farklı denemeler yapılmış ancak yürüme hızı, Beacon'ların tarama sıklığı ve sinyal karışıklıklarının oluşma durumu da göz önünde bulundurulduğunda 4.00 m'de karar kılınmıştır. Yakınlık algoritmasına göre yapılan testler, Beacon cihazlarının bulunduğu A, B, C ve D noktalarına yakın seçilen K, H, I ve M test noktalarına farklı yön ve açılardan gelinerek gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerde BLE sinyali alan alıcı, test noktalarına geldiğinde Beacon cihazlarının bulunduğu konumlar elde edilmiştir. Yakınlık algoritmasına göre yapılan testlerin tamamında başarı sağlanmıştır.

Bu çalışmada yapılan testler, navigasyon uygulaması için bir ön aşamadır. Bu ön aşamada test sonuçları incelendiğinde üçgenleme algoritması için yapılan ilk testte Tablo 1 incelendiğinde hedeflenen konum ile elde edilen 10 farklı konum arasındaki uzaklıkların ortalaması 3.06 m'dir. Üçgenleme algoritması için yapılan 2. testte Tablo 2 incelendiğinde hedeflenen konum ile elde edilen 10 farklı konum arasındaki uzaklıkların ortalaması K noktası için 2.96 m, H noktası için 2.56 m'dir. Üçgenleme algoritmasının test aşamalarında, test noktalarında BLE sinyali alan alıcı için hedeflenen konum bilgisinden farklı olarak alıcı konumunun koridorun dışında gözlemlendiği durumlar da oluşmuştur. Ayrıca belirlenen test noktalarında konum homojenliği de sağlanamamıştır. Yakınlık algoritması için ise A-B, B-C ve C-D noktaları arası 4.00 m seçilmiş ve alıcı bu noktalar arasında Beacon sinyallerini başarılı bir şekilde alarak konumunu doğru bir şekilde belirlenen noktalarda (A, B, C, D) göstermiştir. Bu nedenle alıcının konum hatası bu test için Beacon'ların yerleşimi için belirlenen noktalar arası mesafenin yarısı olan 2.00 m olduğu söylenebilir. Yani alıcı iki Beacon'ın tam ortasına geldiğinde konumunu maksimum 2.00 m hata ile görecektir. Dolayısıyla ön çalışma sonucunda navigasyon uygulaması için konumlandırma algoritması olarak yakınlık algoritması seçilmiştir.

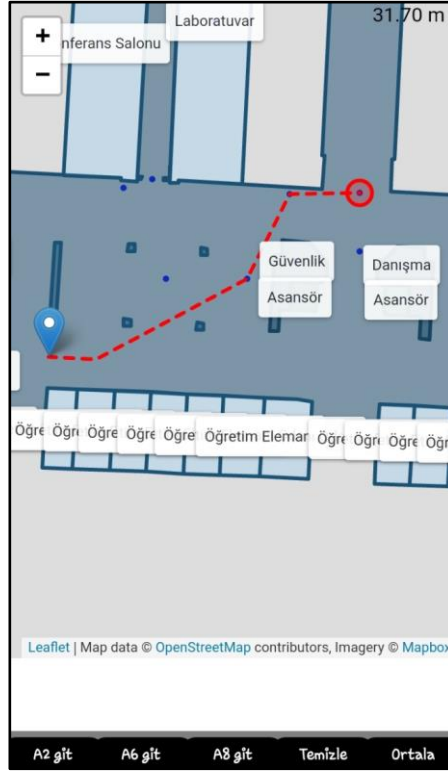
4.2. Navigasyon Uygulaması (Navigation App)

Navigasyon uygulaması için Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi giriş katının haritası yapılmıştır. Haritanın koordinatları ITRF datumunda ve UTM projeksiyonunda elde edilmiştir. Elde edilen harita leaflet JavaScript kütüphanesi ile düzenlenerek mobil uygulamada görüntülenecek hale getirilmiştir. Navigasyon uygulamasının testi için uygulama alanında 10 tane hedef nokta belirlenmiştir (Şekil 12).



Şekil 12. Uygulama haritası ve hedef noktalar (Application map and destinations)

Uygulama haritasında Beacon cihazlarının yerleri 4.00 m aralıklarla yakınlık algoritmasına göre belirlenmiş ve koordinatları çıkarılmıştır. Uygulama alanında belirlenen noktalara Beacon cihazlarının uygulaması GNSS alıcısı ve elektronik uzunluk ve açı ölçer kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra ise uygulama alanında belirlenen noktaların testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 13).



Şekil 13. Uygulamanın test aşaması (Testing phase of the application)

Yapılan mobil uygulamayla farklı konumlardan belirlenen hedef noktalara dijkstra algoritması kullanılarak ulaşılmış ve test aşaması gerçekleştirilmiştir (Tablo 3). Tablo 3'te olumlu değerler hedefe en kısa yoldan ulaşıldığını, olumsuz değerler ise hedefe ulaşmada sorun yaşandığını göstermektedir.

Tablo 3. Navigasyon uygulaması test sonucu (Navigation app test result)

Hedeflenen Konum	Başarı Durumu
Hedef 1	Olumlu
Hedef 2	Olumlu
Hedef 3	Olumlu
Hedef 4	Olumlu
Hedef 5	Olumlu
Hedef 6	Olumlu
Hedef 7	Olumsuz
Hedef 8	Olumlu
Hedef 9	Olumlu
Hedef 10	Olumlu

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada kapalı alanlarda navigasyon uygulamasının BLE tabanlı Beacon cihazlarıyla uygunluğu test edilmiştir. Navigasyon uygulamasından önce yapılan test aşamasında üçgenleme algoritmasının yakınlık algoritmasına göre daha az başarılı olması kapalı alanın fiziki durumu ile ilgilidir. Beacon cihazlarının üçgenleme algoritması baz alınarak kapalı alanda konumlandırılmasında koridorun fiziki durumunun sinyal karışıklıklarını minimize edecek veya engelleyecek genişlikte olmaması bu algoritmanın başarısını düşüren bir etken olduğu bu çalışmada düşünülmektedir. Ayrıca bu nedenden dolayı üçgenleme algoritması için yapılan testlerde konum homojenliğini de sağlanamamaktadır. Beacon cihazlarının yakınlık algoritmasına göre konumlandırılması Beacon

cihazları arasındaki mesafeyi büyütmemektedir. Bu durum sinyal karışıklıklarını azaltmakla birlikte konum doğruluğu bakımından yakınlık algoritmasının üçgenleme algoritmasına göre daha iyi performans göstermesini ve konum homojenliğini sağlamaktadır.

Yapılan çalışmada dijkstra algoritması kullanılarak navigasyon uygulaması için %90 başarı sağlanmıştır (Tablo 3). Başarısızlıkla sonuçlanan "Hedef 7" konumu için navigasyon testinin sonucu irdelendiğinde, öncelikle bu konumun binanın giriş kısmındaki tavanda yer aldığı görülmektedir. Bu konumun tavan yüksekliği, standart kapalı alanın tavan yüksekliğinden yaklaşık 1.5 m daha yüksek olması ve binanın giriş kısmındaki sinyal yansıtıcı yüzeye sahip camekanlı tasarımların bulunması gibi etkenler bu noktada gerçekleştirilen navigasyon testini olumsuz etkilediği düşünülmektedir.

Kapalı alanın haritasının belirli bir datum ve projeksiyonda elde edilmesi elde edilecek verinin analizini, yorumlanmasını ve konum bazlı hatalara müdahaleyi kolaylaştırmaktadır. Doğru ve hassas harita elde edilmesi ve Beacon cihazlarının aplikasyonun daha hassas yapılması için GNSS alıcısı, elektronik uzunluk ve açı ölçer gibi ölçme cihazlarının kullanımı önemlidir. Bu çalışmada, bu tip navigasyon uygulamalarında yüksek bir başarı oranı yakalamak için kullanılacak konumlandırma algoritmalarının kapalı alanın fiziki durumu da göz önünde bulundurularak test edilmesi önerilmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Abhishek, S., Rajesh, M., 2013. Adaptive RLS-received signal strength algorithm in wireless network area for multi-mobile nodes location estimation system. *International Journal of Computer Applications*, 64 (15), 12-15.
- Anagnostopoulos, G., Deriaz, M., 2014. Accuracy enhancements in indoor localization with the weighted average technique. In: *SENSORCOMM - 8th International Conference on Sensor Technologies and Applications*.
- Allurwar, N., Nawale, B., Patel, S., 2016. Beacon for Proximity Target Marketing. *International Journal Of Engineering And Computer Science*.
- Apple. (2023b). About Objective-C. Retrieved March 3, 2023, from <https://developer.apple.com/library/archive/documentation/Cocoa/Conceptual/ProgrammingWithObjectiveC/Introduction/Introduction.html>
- Apple. (2023a). Swift - Apple Developer. Retrieved March 3, 2023, from <https://developer.apple.com/swift/>
- C, Bisdikian., 2001. An overview of the Bluetooth wireless technology. *IEEE Communications Magazine*, 39(12), 86-94.
- Dijkstra, E.W., 1959. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1 (1), 269-271.
- El-Sheimy, N., Li, Y., 2021. Indoor navigation: state of the art and future trends. *Satellite Navigation*, 2.
- Eroğlu, O., Doğan, M., 2019. Konum Tabanlı Hizmetler, Bluetooth Tabanlı İç Mekan Konumlandırma Hizmeti, Antalya İli Örneği. *TMMOB 6. Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi*, Ankara.
- Facebook. (2023). React Native. Retrieved March 3, 2023, from <https://reactnative.dev/>
- Guo, Y., Zheng, J., Di, S., Xiang, G., Guo, F., 2022. A Beacons Selection Method under Random Interference for Indoor Positioning. *Remote. Sens*, 14, 4323.
- Gülağz, F. K., Göz, F., Şahin, E., Albayrak, M. S., Kavak, A., 2016. Beacon Temelli Sanal Etiket Uygulaması, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3 (1), 1-7.
- Kahveci, M., Tuşat, E., Yıldız, F., Sarı, F., Mikailsoy, F., 2019. Ankara-Yozgat Hattında Mühendislik ve CBS Amaçlı Yaklaşık Jeoit Hesabı. *Geomatik*, 4, 92-100.
- Kajioka, S., Mori, T., Uchiya, T., Takumi, I., Matsuo, H., 2014. Experiment of indoor position presumption based on RSSI of Bluetooth LE beacon. *2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, 337-339.
- Kannan, B., Meneguzzi, F., Dias, M. B., Sycara, K., 2013. Predictive indoor navigation using commercial smart-phones. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Applied Computing*, 519-525.
- Khudhair, A.A., Jabbar, S.Q., Sulttan, M.Q., Wang, D., 2016. Wireless Indoor Localization Systems and Techniques: Survey and Comparative Study. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 3(2), 392-409.
- Kim, D. Y., Kim, S. H., Choi, D., Jin, S. H., 2015. Accurate indoor proximity zone detection based on time window and frequency with bluetooth low energy. *Procedia Computer Science*, 56, 88-95.
- Kotlin. (2023). Kotlin Programming Language. Retrieved March 3, 2023, from <https://kotlinlang.org/>
- Marathe, T., Broumandan, A., Pirsivash, A., Lachapelle, G., 2018. Characterization of Range and Time Performance of Indoor GNSS Signals. *2018 European Navigation Conference (ENC)*, 27-37.
- Park, M., Han, J., Kim, O., Kim, J., Kee, C., 2021. One-way deep indoor positioning system for conventional GNSS receiver using paired transmitters. *NAVIGATION*, 68, 601-619.
- Sátán, Á., 2018. Bluetooth-based indoor navigation mobile system. *2018 19th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, 332-337.
- Siekinen, M., Hienkari, M., Nurminen, J.K., Nieminen, J., 2012. How low energy is bluetooth low energy? Comparative measurements with ZigBee/802.15.4. *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, 232-237.

- Statcounter. (2023). Mobile Operating System Market Share Worldwide. Retrieved March 3, 2023, from <https://gs.statcounter.com/os-market-share/mobile/worldwide>
- Oracle. (2023). Java Programming Language. Retrieved March 3, 2023, from <https://docs.oracle.com/javase/8/docs/technotes/guides/language/index.html>
- Özdemir, B. N., Ceylan, A., Alçay, S., Yiğit, C.Ö., 2014. Kapalı Mekanlarda Uygulanan Konum Belirleme Yöntemleri ve Karşılaştırılması. Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu 7. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu 15-17 Ekim 2014, Hitit Üniversitesi, Çorum, 1-9.
- Pujiharsono, H., Utami, D.W., Ainul, R.D., 2020. Trilateration Method For Estimating Location in RSSI-Based Indoor Positioning System Using Zigbee Protocol. JURNAL INFOTEL, 12.
- Uttraphan, C., Abdul Aziz, F.D., Helmy Abd Wahab, M., Zulkarnain Syed Idrus, S., 2020. Bluetooth Based Indoor Navigation System. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 917.
- Valliappan, K.C., R. V., 2021. Autonomous Indoor Navigation for Mobile Robots. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075, 10(7), 122-126.
- Vaščák, J., Savko, I., 2018. Radio Beacons in Indoor Navigation. 2018 World Symposium on Digital Intelligence for Systems and Machines (DISA), 283-288.
- Wakchaure, M.A., Tamboli, M.S., Sonkar, S., 2022. Indoor Navigation System for Public Evacuation in Emergency Situation. Journal of Physics: Conference Series, 2327.



A STUDY ON DETERMINATION OF TOTAL PHENOLIC AND PROTEIN AMOUNTS OF WASTE GREEN ALGAE OF MAMASIN DAM LAKE (AKSARAY-TURKEY)

Behlül KOÇ-BİLİCAN^{1*}, Audrius Sigita MARUŠKA²

¹ Aksaray University, Faculty of Science and Letters, Department of Molecular Biology and Genetics, Aksaray, Turkey

² Vytautas Magnus University, Faculty of Natural Sciences, Instrumental Analysis Open Access Research Centre, Kaunas, Lithuania

Keywords

Algal Proteins,
Phenolic Compounds,
Green Protein Sources,
Waste Algae Utilization.

Abstract

The excessive proliferation of green algae in aquatic ecosystems threatens aquatic life, leading to oxygen depletion and water pollution. This study investigates two common green algae species, *Ulva sp.* and *Cladophora sp.*, with potential in terms of protein and phenolic compounds. *Cladophora sp.* and *Ulva sp.* extracts were analyzed for total phenolic content using the Folin-Ciocalteu method. Despite lower phenolic content compared to specific plant species, both algae species exhibit various phenolic compounds. GC-MS analysis indicates the presence of major compounds such as limonene in *Cladophora sp.* and Tetradec-1-ene in *Ulva sp.*, suggesting potential applications in the pharmaceutical and cosmetic industries. Despite modest protein amounts, the study emphasizes that algae, aligned with the increasing interest in plant-based nutrition, are a promising source for plant-based protein production. *Ulva sp.* and *Cladophora sp.* algae demonstrate potential as alternative protein sources and reservoirs of bioactive phenolic compounds from waste sources. This study pioneers further research in the food, pharmaceutical, and cosmetic industries to contribute to sustainable water resource utilization.

MAMASIN BARAJI GÖLETİ'NİN ATIK YEŞİL ALGLERİNİN TOPLAM FENOLİK VE PROTEİN MİKTARLARININ BELİRLENMESİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA (AKSARAY-TÜRKİYE)

Anahtar Kelimeler

Alg Proteinleri,
Fenolik Bileşikler,
Yeşil Protein Kaynakları,
Atık Yosun Kullanımı.

Öz

Su ekosistemlerinde yeşil alglerin aşırı çoğalması sudaki yaşamı tehdit ederek oksijen tükenmesine ve su kirliliğine yol açmaktadır. Bu çalışma, protein ve fenolik bileşikler açısından potansiyeli olan iki yaygın yeşil alg türü olan *Ulva sp.* ve *Cladophora sp.*'yi incelemektedir. *Cladophora sp.* ve *Ulva sp.* ekstraktları, toplam fenolik içeriği Folin-Ciocalteu yöntemi kullanılarak analiz edildi. Fenolik içerik, belirli bitki türleriyle kıyaslandığında düşük olmasına rağmen, her iki alg türü de çeşitli fenolik bileşiklere sahiptir. GC-MS analizi, *Cladophora sp.*'de limonen ve *Ulva sp.*'de Tetradec-1-en gibi ana bileşiklerin tespit edildiğini göstererek, bunların farmasötik ve kozmetik uygulamalarda kullanılabileceğini işaret etmektedir. Çalışma, beslenme alanındaki artan ilgiye paralel olarak, mütevazı protein miktarlarına rağmen, alglerin bitkisel bazlı protein üretimi için umut verici bir kaynak olduğunu vurgular. *Ulva sp.* ve *Cladophora sp.* algleri, atık kaynaklardan elde edilebilecek alternatif protein kaynakları ve biyoaktif fenolik bileşik rezervuarları olarak potansiyel gösterir. Bu çalışma, sürdürülebilir su kaynakları kullanımına katkı sağlamak amacıyla gıda, ilaç ve kozmetik endüstrilerinde daha fazla keşfe öncülük etmektedir.

Alıntı / Cite

Koç-Bilican, B., Maruška, A.S., (2024). A Study on Determination of Total Phenolic and Protein Amounts of Waste Green Algae of Mamasin Dam Lake (Aksaray-Turkey), Journal of Engineering Sciences and Design, 12(1), 132-139.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

B. Koç-Bilican, 0000-0001-9943-771X
A.S. Maruška, 0000-0002-9267-3805

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	19.01.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	02.02.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	05.03.2024
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: behlulkoc@aksaray.edu.tr, +90-382-288-2214

A STUDY ON DETERMINATION OF TOTAL PHENOLIC AND PROTEIN AMOUNTS OF WASTE GREEN ALGAE OF MAMASIN DAM LAKE (AKSARAY-TURKEY)

Behlül KOÇ-BİLİCAN ^{1†}, Audrius Sigitas MARUŠKA ²

¹ Aksaray University, Faculty of Science and Letters, Department of Molecular Biology and Genetics, Aksaray, Turkey

² Vytautas Magnus University, Faculty of Natural Sciences, Instrumental Analysis Open Access Research Centre, Kaunas, Lithuania

Highlights

- Exploring algae as sustainable protein and phenolic sources.
- Protein isolation from *Ulva sp.* and *Cladophora sp.* for potential industrial use.
- Addressing environmental challenges through algae-based solutions.

Purpose and Scope

The primary purpose of this paper is to explore the potential of marine plants, specifically *Ulva sp.* and *Cladophora sp.*, as valuable sources of both protein and phenolic compounds. The research aims to address the excessive proliferation of green algae in aquatic ecosystems, offering insights into their protein and phenolic content. The scope involves investigating the utilization of waste algae for sustainable industrial applications, particularly in the fields of food, pharmaceuticals, and cosmetics.

Design/methodology/approach

The objectives of the research are achieved through a multi-faceted approach. The study involves collecting samples of green filamentous algae from Mamasin Dam Lake, followed by careful processing and analysis. Methodologies include the determination of total phenolic compounds using the Folin-Ciocalteu method, GC-MS analysis for identifying bioactive components, and protein extraction and concentration using the Bradford assay. The theoretical scope encompasses the potential industrial applications of algae in various sectors.

Findings

The research findings reveal that both *Ulva sp.* and *Cladophora sp.* exhibit phenolic compounds and proteins, making them promising candidates for industrial use. GC-MS analysis identifies specific compounds such as limonene in *Cladophora sp.* and Tetradec-1-ene in *Ulva sp.* These findings contribute to the understanding of the bioactive potential of waste algae and highlight their suitability as alternative protein sources.

Originality

The study introduces valuable insights into the diverse applications of waste algae, emphasizing their potential in sustainable industries. This research adds value to the scientific community by providing a detailed analysis of marine plants' bioactive components, paving the way for further investigations into their environmental and industrial significance.

1. Introduction

The excessive proliferation of green algae can form a detrimental cover on the surface of water ecosystems, posing a danger to other organisms. Additionally, the decomposition of algae by bacteria can lead to high oxygen consumption, consequently reducing the oxygen levels on the water surface (Jousson et al., 2000; Mihranyan, 2011). Disposing of these natural green algae in a waste state, which pollutes water masses and threatens the ecosystem, becomes crucial for preserving aquatic ecosystems. Nowadays, there is a growing interest in natural compounds derived from organisms in aquatic ecosystems. Proteins successfully isolated from algae, particularly those that have attracted attention due to their substantial protein content, have been the subject of extensive research and are currently being produced on an industrial scale for integration into human diets (Rasala and Mayfield, 2015; Geada et al., 2021; Ijaola et al., 2023). Thanks to this, seaweed and microalgae are increasingly being recognized as valid protein sources (Bleakley and Hayes, 2017). Certain varieties of seaweed and microalgae have been discovered to possess protein levels akin to those found in conventional protein sources like meat, eggs, soybeans, and milk (Fleurence, 1999; Sousa et al., 2008).

[†] Corresponding author: behlulkoc@aksaray.edu.tr, +90-382-288-2214

Algal proteins, encompassing a full spectrum of essential amino acids, emerge as a noteworthy alternative protein source (Lourenço et al., 2004; Barbarino and Lourenço, 2005; Becker, 2007; Safi et al., 2014). Algae stand out for their tendency not to be endemic and their abundance. These characteristics make algae a sustainable raw material source for fuel, food, polymer, and pharmaceutical industries (Viegas et al., 2015). Comprising essential components like lipids, proteins, and carbohydrates, algae offer protein concentrates that find applications across various industries, including food, feed, and bulk chemicals (Chacón-Lee and González-Mariño, 2010). The isolation of bioactive secondary metabolites, specifically phenolic compounds, is also possible from these waste-state algae. Secondary metabolites are highly active compounds that enhance the survival chances of the organism they are present in, primarily plants, allowing them to adapt to their environment (Azmir et al., 2013; Santos et al., 2016). The diversity of phenols leads to a focus on plants; other organisms, such as algae, can also synthesize these compounds. (Jimenez-Lopez et al., 2021). These hydroxyl group-based compounds have numerous positive impacts on human health, attributed to their significant effects such as scavenging free radicals and reactive oxygen species (Chisté et al., 2013; Barbosa-Pereira et al., 2014). The discovery, development, and industrial-scale production of these natural metabolites, common in many algal classes, are crucial. Such natural metabolites have the potential to replace synthetic compounds linked to specific health problems or disorders, not only offering benefits but also addressing concerns related to synthetic alternatives (Liu et al., 2011; Al-Saif et al., 2014). Therefore, the isolation and utilization of both protein and phenolic bioactive compounds from waste-state algae, which occasionally contribute to algal blooms, are feasible.

Ulva sp. is a *Chlorophyta* division member and a disk-shaped, thin, and flat species known as sea lettuce. *Cladophora sp.*, on the other hand, is found in various environments, from seas to freshwater, providing habitat and food for organisms. *Ulva sp.* can undergo proliferation by absorbing chemical compounds containing phosphorus or nitrogen in eutrophic waters and has high protein content (Zhang et al., 2015). *Cladophora sp.* has a high metal binding capacity and complex heteropolysaccharides in its green algal cell wall. Both algal species have environmental significance in various ecosystems; *Ulva sp.* stands out as a potential protein source for human nutrition, while *Cladophora sp.* plays a crucial role in understanding environmental impacts due to its high metal binding capacity (Ito and Hori, 1989; Ramelow et al., 1992; Holan and Volesky, 1994). In recent years, the number of studies on algae processing methods and their use as a protein source has rapidly increased (Ghribi et al., 2015; Waghmare et al., 2016; Vernes et al., 2019). These studies aim to isolate high amounts of proteins from algae in waste status and transform them into high-value products.

This study determined the total phenolic components of *Ulva sp.* and *Cladophora sp.* algae and identified bioactive components using the GC-MS device. Additionally, for the first time in this study, the protein concentration of these algae was determined, and their potential for future industrial use was evaluated.

2. Material and Method

2.1. Material

The proliferation of green filamentous algae *Ulva sp.* and *Cladophora sp.* was observed in Mamasın Dam Lake in Gucunkaya (38°22'58" N, 34°2'17" E). Macroalgal mats formed in the riverbed and on the rocks were collected, washed, and left to dry in a shaded environment. The dried filamentous algae were powdered using a waring commercial blender.

2.2. Analysis of Total Phenolic Content

The total phenolic compound content in algae extracts was assessed using the Folin-Ciocalteu method (Wu et al., 2007). Extracting 0.5 g of dried material was achieved using 20 mL of 75% methanol for 24 h with the VWR Mini Shaker. Each 100 µl of the sample extract was combined with 3000 µl of a stock solution (4% sodium carbonate) and 100 µl of Folin-Ciocalteu reagent (2N), followed by two inversions for thorough mixing. The blank was similarly formulated using 100 µl of methanol (75%). After a 30-minute incubation at 25 °C, absorbance measurements at 760 nm were taken for the samples. Total phenolics were then estimated by applying a rutin calibration curve. The concentration range was 0.1-0.8 mg/mL. Total phenolics were determined in milligrams of rutin equivalent per milliliter of extract.

2.3. GC-MS

For the analysis, samples were prepared utilizing Solid-phase Microextraction (Jarmalavičienė et al., 2008) with a Stableflex (TM) 50/30 micrometers layer PDMS/CAR/DVB fiber (Supelco, USA). The GC-MS analysis was conducted using a GC-2010 model (Shimadzu) gas chromatograph and a mass spectrometer with the GC-MS-QP2010 model detector (Shimadzu). Effective separation was achieved using a Restek RTX-5MS column (30 M x

0.25 μ m, 0.25 mm). The GC-MS analysis parameters employed are presented in Table 1, and the temperature gradient is provided in Table 2.

Table 1. Parameters for GC-MS analysis

Mobile Phase	Flow Rate (mL/min)	Injector Temperature (°C)	Mode	Split Ratio	Ion Source (°C)	Ionization Energy (eV)	Mass Scanning Range (m/z)
He gas	1.7	280	Split	1:10	220	70	40-600

Table 2. Oven conditions for GC-MS analysis

	Rate (°C/min)	Value (°C)	Hold Time (min)	Run Time (min)
Initial	-	50	2	2
Ramp 1	5	200	2	34
Ramp 2	20	280	15	52

2.4. Protein Extraction

The experiment was conducted with certain adjustments according to the method outlined by Barbarino and Lourenço (2005). Initially, 4ml of ultra-pure water was added to 50 mg of dry material, and left at 4 °C for 12 h. Following this, the material was ground with a homogenizer for 5 min at 4 °C. Subsequently, the mixture underwent centrifugation at 15000g for 20 min at 4 °C, and the supernatant was gathered and kept at 4 °C. 1.0 mL of 0.1N NaOH was added to the sediment and permitted to stand at 20 °C for 1 h with intermittent stirring. Subsequently, it was subjected to centrifugation at 15000g for 20 min at 20 °C, and the resulting supernatant was amalgamated with the initial one while disregarding the pellets. For the precipitation of proteins, 25% TCA was introduced, and the amalgamation underwent a 30-minute ice bath. After centrifugation at 15000g for 20 min at 4 °C, the supernatant was removed, and the residue was rinsed with cold 10% TCA. This was succeeded by a 2-min centrifugation at 15000g at 4 °C, and once again, the supernatant was removed. The protein was dissolved using 5% TCA (5:1) and then centrifuged at 15000g for 20 min at 20 °C. The final supernatant was discarded, completing the preparation of the protein pellet.

2.5. Protein Concentration via Bradford Assay

The analysis was carried out with certain alterations following the description provided by (Giannakos, 2016). The resuspension of precipitated protein was performed in 0.5 mL of 1.0 N NaOH. To create the dye solution, 100 mg of CBB G-250 was solubilized in 50 mL of 95% ethanol, with the subsequent addition of 100 mL of 85% H₃PO₄. The resulting solution underwent further dilution with ultra-pure water to achieve a final volume of 1.0 L. Using 5 milliliters of the solution for every 0.1 mL sample; the absorbance was gauged at 595 nm, precisely 5 min after instigating the chemical reaction at 20 °C. Calibration curves were generated by employing bovine serum albumin (BSA). The concentration range is 0.1-0.8 mg/mL.

4. Experimental Results

The total phenolic content of methanol extracts from waste green algae species, *Cladophora sp.* and *Ulva sp.* was determined in terms of rutin equivalent using the Folin-Ciocalteu method. The total phenolic content was determined using the rutin standard curve and regression equation shown in Figure 1. As a result of the calculation, the phenolic content for *Cladophora sp.* algae was calculated as 0.35 ± 0.027 RE, while for *Ulva sp.* algae, it was calculated as 0.33 ± 0.018 RE. It has been determined that 0.5 g of *Cladophora sp.* contains approximately 66 mg of total phenolic compounds, and 0.5 g of *Ulva sp.* contains about 7 mg of total phenolic compounds. Total phenolics are lower than those observed in some previously studied plants and microalgae (Tawaha et al., 2007; Saeed et al., 2012; Sirbu et al., 2019). However, we anticipate future potential use for these waste materials. The Folin-Ciocalteu method provides general comparative results, but is not specific for determining different compounds or phenolic classes. Therefore, an attempt was made to determine the phenolic content of methanol extracts of *Cladophora sp.* and *Ulva sp.* algae samples using GC-MS.

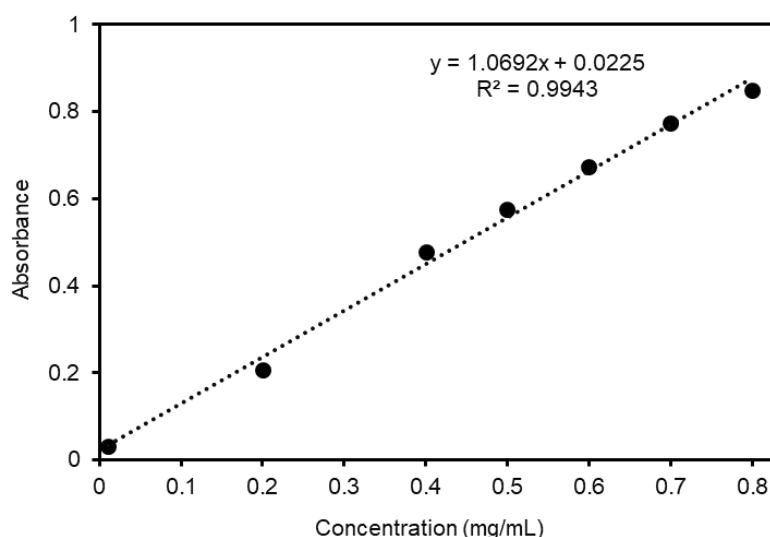


Figure 1. Standard curve using rutin and regression equations for total content of phenolic compounds

Chromatograms of *Cladophora sp.* and *Ulva sp.* extracts are presented in Figure 2. Various phenolic compounds were identified in the extracts, with some notable ones. Majorly, limonene (23.12% Area) was detected in *Cladophora sp.* *Cladophora sp.* also contained high volumes of Oct-3-en-2-ol (12.87% Area) and Tetradec-1-ene (11.7% Area). In the analysis conducted for *Ulva sp.*, Tetradec-1-ene (71.68% Area) stood out among various phenolic compounds. Particularly, limonene, identified as a major component in *Cladophora sp.*, has been the subject of numerous studies due to its valuable properties such as antioxidant, antimicrobial, anti-inflammatory, and anticancer effects (Roberto et al., 2010; Santana et al., 2020; Araújo-Filho et al., 2021; Han et al., 2021). It is foreseeable that this valuable component could be extracted from this waste algae species and commercialized in the future.

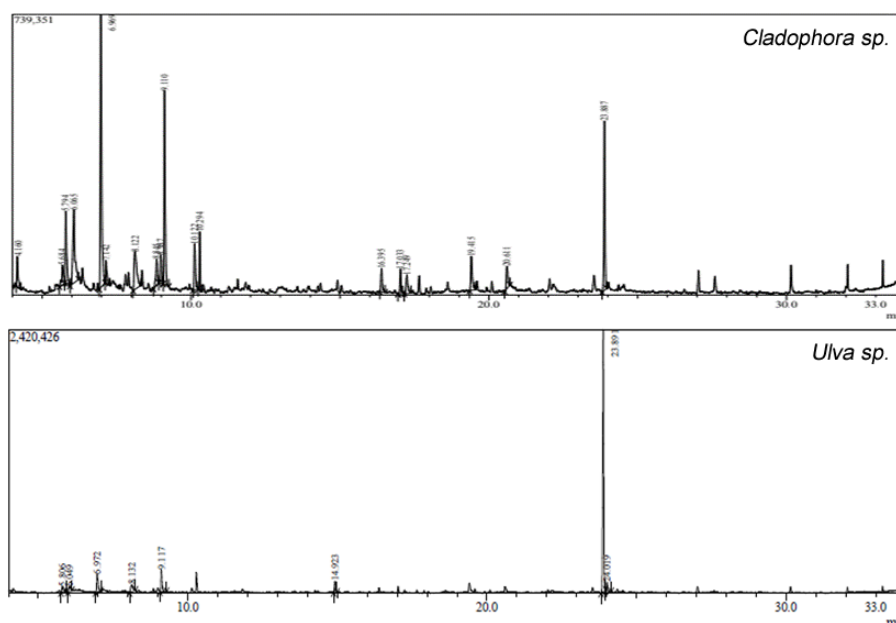


Figure 2. Typical GC-MS chromatogram of *Cladophora sp.* extract and *Ulva sp.* extract

Protein isolation was performed from *Cladophora sp.* and *Ulva sp.* samples, and their concentrations were attempted to be determined using the Bradford method. A calibration curve was established using BSA, and calculations were made using the regression equation. As a result of the analysis, the protein concentration was determined as 0.202 ± 0.04 and 0.265 ± 0.09 mg/ml for *Ulva sp.* and *Cladophora sp.*, respectively. It has been determined that 50 mg of *Cladophora sp.* contains approximately 1.01 mg of protein, and 50 mg of *Ulva sp.* contains about 0.132 mg of protein. The detected protein amounts may seem relatively low compared to many other sources. However, especially in recent years, the increasing concern about climate change and carbon footprint has led to a growing interest in vegan nutrition and plant-based protein products (Heusala et al., 2020; Gaillac and Marbach, 2021). Therefore, proteins produced from sources other than plants, such as algae, are highly valuable. Additionally, algae, particularly compared to plants, have an intriguingly wide range of nutritional qualities,

containing not only proteins but also peptides, carbohydrates, lipids, vitamins, minerals, and other valuable trace elements (Becker, 2007). The waste-state *Cladophora sp.* and *Ulva sp.* algae analyzed in the current study show promise as alternative protein sources.

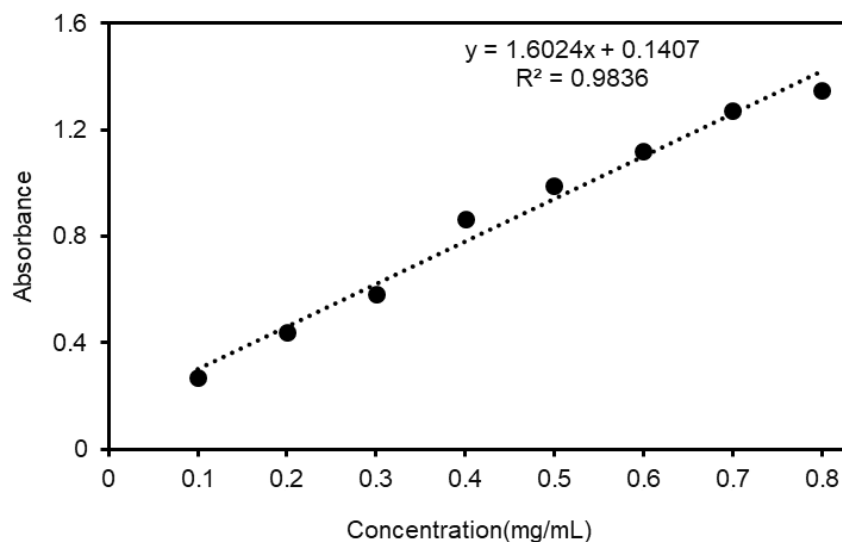


Figure 3. Standard curve using human serum albumin and regression equations for protein concentration

5. Result and Discussion

The excessive proliferation of green algae in aquatic ecosystems poses a significant threat to the overall health and balance of these environments. The detrimental impact includes forming algal covers on water surfaces, leading to oxygen depletion and water pollution. Addressing this issue is crucial for preserving of aquatic ecosystems, and disposing of natural green algae in waste states further exacerbates the problem.

This study focused on two common green algae species, *Ulva sp.* and *Cladophora sp.*, prevalent in the Uluirmak River. It is aimed to investigate the potential of these algae as reservoirs for both protein and phenolic compounds. Despite the relatively lower phenolic content compared to certain plants and microalgae, both *Ulva sp.* and *Cladophora sp.* exhibited various phenolic compounds. GC-MS analysis identified major compounds such as limonene in *Cladophora sp.* and Tetradec-1-ene in *Ulva sp.*, hinting at potential applications in pharmaceuticals and cosmetics.

Protein isolation from *Cladophora sp.* and *Ulva sp.* was carried out, and their concentrations were determined. While the detected protein amounts may appear modest, the study emphasizes the growing interest in plant-based and sustainable nutrition. Algae offer a promising avenue for plant-based protein production with their diverse nutritional qualities. *Ulva sp.* and *Cladophora sp.* algae from waste sources demonstrate potential as alternative protein sources and reservoirs of bioactive phenolic compounds.

This study opens avenues for further exploration of these algae in food, pharmaceuticals, and cosmetics industries, contributing to the sustainable utilization of aquatic resources. The findings encourage ongoing research to unlock the full potential of algae in addressing environmental challenges and meeting the increasing demand for alternative and sustainable resources in various industries.

Acknowledgement

The authors would like to thank the members of the Audrius Maruška Lab for their support in conducting the experiments. Additionally, the authors would like to thank Prof. Dr. Murat KAYA for his support in the collection of samples.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Al-Saif, S.S.A.-I., Abdel-Raouf, N., El-Wazanani, H.A., Aref, I.A., 2014. Antibacterial substances from marine algae isolated from Jeddah coast of Red sea, Saudi Arabia. *Saudi journal of biological sciences* 21, 57-64.
- Araújo-Filho, H.G.d., Dos Santos, J.F., Carvalho, M.T., Picot, L., Fruitier-Arnaudin, I., Groult, H., Quintans-Júnior, L.J., Quintans, J.S., 2021. Anticancer activity of limonene: A systematic review of target signaling pathways. *Phytotherapy research* 35, 4957-4970.
- Azmir, J., Zaidul, I.S.M., Rahman, M.M., Sharif, K., Mohamed, A., Sahena, F., Jahurul, M., Ghafoor, K., Norulaini, N., Omar, A., 2013. Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. *Journal of food engineering* 117, 426-436.
- Barbarino, E., Lourenço, S.O., 2005. An evaluation of methods for extraction and quantification of protein from marine macro- and microalgae. *Journal of Applied Phycology* 17, 447-460.
- Barbosa-Pereira, L., Bilbao, A., Vilches, P., Angulo, I., Lluís, J., Fité, B., Paseiro-Losada, P., Cruz, J.M., 2014. Brewery waste as a potential source of phenolic compounds: Optimisation of the extraction process and evaluation of antioxidant and antimicrobial activities. *Food chemistry* 145, 191-197.
- Becker, E.W., 2007. Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology advances* 25, 207-210.
- Bleakley, S., Hayes, M., 2017. Algal proteins: extraction, application, and challenges concerning production. *Foods* 6, 33.
- Chacón-Lee, T., González-Mariño, G., 2010. Microalgae for “healthy” foods—possibilities and challenges. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 9: 655–675.
- Chisté, R.C., Godoy, H.T., Prado, M.A., 2013. The phenolic compounds and the antioxidant potential of infusion of herbs from the Brazilian Amazonian region. *Food Research International* 53, 875-881.
- Fleurence, J., 1999. Seaweed proteins: biochemical, nutritional aspects and potential uses. *Trends in food science & technology* 10, 25-28.
- Gaillac, R., Marbach, S., 2021. The carbon footprint of meat and dairy proteins: A practical perspective to guide low carbon footprint dietary choices. *Journal of Cleaner Production* 321, 128766.
- Geada, P., Moreira, C., Silva, M., Nunes, R., Madureira, L., Rocha, C.M., Pereira, R.N., Vicente, A.A., Teixeira, J.A., 2021. Algal proteins: Production strategies and nutritional and functional properties. *Bioresource Technology* 332, 125125.
- Ghribi, A.M., Gafsi, I.M., Blecker, C., Danthine, S., Attia, H., Besbes, S., 2015. Effect of drying methods on physico-chemical and functional properties of chickpea protein concentrates. *Journal of Food Engineering* 165, 179-188.
- Giannakos, N.R.O., 2016. Mensuração do perfil redox em hipocampo de ratos reprodutores e não reprodutores ao longo do envelhecimento.
- Han, Y., Chen, W., Sun, Z., 2021. Antimicrobial activity and mechanism of limonene against *Staphylococcus aureus*. *Journal of Food Safety* 41, e12918.
- Heusala, H., Sinkko, T., Mogensen, L., Knudsen, M.T., 2020. Carbon footprint and land use of food products containing oat protein concentrate. *Journal of Cleaner Production* 276, 122938.
- Holan, Z., Volesky, B., 1994. Biosorption of lead and nickel by biomass of marine algae. *Biotechnology and bioengineering* 43, 1001-1009.
- Ijaola, A.O., Akamo, D.O., George, T.T., Sengul, A., Adediji, M.Y., Asmatulu, E., 2023. Algae as a potential source of protein: A review on cultivation, harvesting, extraction, and applications. *Algal Research*, 103329.
- Ito, K., Hori, K., 1989. Seaweed: chemical composition and potential food uses. *Food reviews international* 5, 101-144.
- Jarmalavičienė, R., Szumski, M., Kornyšova, O., Klodzińska, E., Westerlund, D., Krawczyk, S., Mickevičius, D., Buszewski, B., Maruška, A., 2008. Coupling of solid-phase microextraction continuous bed (monolithic) capillaries with capillary zone electrophoresis for direct analysis of drugs in biological fluids. *ELECTROPHORESIS* 29, 1753-1760.
- Jimenez-Lopez, C., Pereira, A., Lourenço-Lopes, C., Garcia-Oliveira, P., Cassani, L., Fraga-Corral, M., Prieto, M., Simal-Gandara, J., 2021. Main bioactive phenolic compounds in marine algae and their mechanisms of action supporting potential health benefits. *Food chemistry* 341, 128262.
- Jousson, O., Pawlowski, J., Zaninetti, L., Zechman, F.W., Dini, F., Di Guiseppe, G., Woodfield, R., Millar, A., Meinesz, A., 2000. Invasive alga reaches California. *Nature* 408, 157-158.
- Liu, M., Hansen, P.E., Lin, X., 2011. Bromophenols in marine algae and their bioactivities. *Marine Drugs* 9, 1273-1292.
- Lourenço, S.O., Barbarino, E., Lavín, P.L., Lanfer Marquez, U.M., Aidar, E., 2004. Distribution of intracellular nitrogen in marine microalgae: calculation of new nitrogen-to-protein conversion factors. *European Journal of Phycology* 39, 17-32.
- Mihriyan, A., 2011. Cellulose from cladophorales green algae: From environmental problem to high-tech composite materials. *Journal of Applied Polymer Science* 119, 2449-2460.
- Ramelow, G., Fralick, D., Zhao, Y.-f., 1992. Factors affecting the uptake of aqueous metal ions by dried seaweed biomass. *Microbios* 72, 81-93.
- Rasala, B.A., Mayfield, S.P., 2015. Photosynthetic biomanufacturing in green algae; production of recombinant proteins for industrial, nutritional, and medical uses. *Photosynthesis research* 123, 227-239.
- Roberto, D., Micucci, P., Sebastian, T., Graciela, F., Anesini, C., 2010. Antioxidant activity of limonene on normal murine lymphocytes: relation to H2O2 modulation and cell proliferation. *Basic & clinical pharmacology & toxicology* 106, 38-44.
- Saeed, N., Khan, M.R., Shabbir, M., 2012. Antioxidant activity, total phenolic and total flavonoid contents of whole plant extracts *Torilis leptophylla* L. *BMC complementary and alternative medicine* 12, 1-12.
- Safi, C., Liu, D.Z., Yap, B.H., Martin, G.J., Vaca-Garcia, C., Pontalier, P.-Y., 2014. A two-stage ultrafiltration process for separating multiple components of *Tetraselmis suecica* after cell disruption. *Journal of applied phycology* 26, 2379-2387.
- Santana, H.S., de Carvalho, F.O., Silva, E.R., Santos, N.G., Shanmugam, S., Santos, D.N., Wisniewski, J.O., Junior, J.S.C., Nunes, P.S., Araujo, A.A., 2020. Anti-inflammatory activity of limonene in the prevention and control of injuries in the respiratory system: A systematic review. *Current pharmaceutical design* 26, 2182-2191.

- Santos, E.S., Abreu, M.M., Saraiva, J.A., 2016. Mutielemental concentration and physiological responses of *Lavandula pedunculata* growing in soils developed on different mine wastes. *Environmental Pollution* 213, 43-52.
- Sirbu, R., Stanciu, G., Tomescu, A., Ionescu, A.M., Cadar, E., 2019. Evaluation of antioxidant and antimicrobial activity in relation to total phenolic content of green algae from Black Sea. *Rev. Chim* 70, 1197-1203.
- Sousa, I., Gouveia, L., Batista, A.P., Raymundo, A., Bandarra, N.M., 2008. Microalgae in novel food products. *Food chemistry research developments*, 75-112.
- Tawaha, K., Alali, F.Q., Gharaibeh, M., Mohammad, M., El-Elimat, T., 2007. Antioxidant activity and total phenolic content of selected Jordanian plant species. *Food chemistry* 104, 1372-1378.
- Vernes, L., Abert-Vian, M., El Maâtaoui, M., Tao, Y., Bornard, I., Chemat, F., 2019. Application of ultrasound for green extraction of proteins from spirulina. Mechanism, optimization, modeling, and industrial prospects. *Ultrasonics sonochemistry* 54, 48-60.
- Viegas, C.V., Hachemi, I., Mäki-Arvela, P., Smeds, A., Aho, A., Freitas, S.P., da Silva Gorgônio, C.M., Carbonetti, G., Peurla, M., Paranko, J., 2015. Algal products beyond lipids: Comprehensive characterization of different products in direct saponification of green alga *Chlorella* sp. *Algal Research* 11, 156-164.
- Waghmare, A.G., Salve, M.K., LeBlanc, J.G., Arya, S.S., 2016. Concentration and characterization of microalgae proteins from *Chlorella pyrenoidosa*. *Bioresources and Bioprocessing* 3, 1-11.
- Wu, C.-H., Murthy, H.N., Hahn, E.-J., Paek, K.-Y., 2007. Improved production of caffeic acid derivatives in suspension cultures of *Echinacea purpurea* by medium replenishment strategy. *Archives of pharmacal research* 30, 945-949.
- Zhang, X., Song, Y., Liu, D., Keesing, J.K., Gong, J., 2015. Macroalgal blooms favor heterotrophic diazotrophic bacteria in nitrogen-rich and phosphorus-limited coastal surface waters in the Yellow Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 163, 75-81.



ŞIRNAK İLİ JEOTERMAL KAYNAKLARI VE ÖZELLİKLERİ

Ayşen DAVRAZ^{1*}, M. Tahir NALBANTÇILAR², Gökhan KADIRHAN³, Aysen ERCAN İŞTİN⁴, Sedat ÇELİK³

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

² Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü Ankara, Türkiye

³ Şırnak Üniversitesi, Turizm ve Otel İşletmeciliği Yüksekokulu, Turizm İşletmeciliği Bölümü, Şırnak

⁴ Şırnak Ün., Turizm ve Otel İşletmeciliği Yüksekokulu, Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü, Şırnak

Anahtar Kelimeler

Termal su,
Hidrojeokimya,
Şırnak.

Öz

Bu çalışmada, Şırnak ili jeotermal alanları tanıtılarak termal su örneklerinin hidrojeokimyasal özellikleri incelenmiştir. Şırnak ilinde Güçlükonak-Belkis Ana, Kumçatı (İkizce), Balveren-Besta ve Beytüşşebap-İlıcak bölgelerinde jeotermal alanlar bulunmaktadır. İlde en önemli Jeotermal kaynak 63 °C'ye ulaşan sıcaklığı ve mevcut tesisi ile Güçlükonak jeotermal alanındaki Belkis Ana (Hista) Kaplıcası kaynağıdır. Diğer önemli jeotermal alan olan Beytüşşebap-İlıcak bölgesindeki Zümrüt Kaplıcasında 43 °C ile termal su elde edilmektedir. İlde farklı yaştaki karbonatlı kayalar jeotermal sistemin rezervuar kayalarını oluşturmaktadır. Marn ve killi litolojiler örtü kaya niteliğindedir. Jeotermal sistem ise tektonik kontrollüdür. Termal suların pH değerleri 6,56-9,46 arasında ve EC değerleri 756-2095 µS/cm arasında değişmektedir. Sularda farklı su tipleri (Ca-Mg-HCO₃-SO₄/ Ca-Mg-SO₄-HCO₃, Na-Ca-Cl-HCO₃/Na-Ca-HCO₃-Cl) tespit edilmiştir. Şırnak ilinde termal suların kimyasını denetleyen temel faktörün kaya-su etkileşimi olduğu görülmektedir. Termal su örneklerinin As içeriği 11-22 µg/l arasında değişmekte olup içme suyu için verilen sınır değerleri aşmaktadır. Ayrıca, Mn, Se ve koliform bakteri içeriklerinin bazı örneklerde sınır değerlerin üzerinde olduğu tespit edilmiştir.

ŞIRNAK PROVINCE GEOTHERMAL RESOURCES AND PROPERTIES

Keywords

Thermal water,
Hydrogeochemistry,
Şırnak.

Abstract

In this study, the geothermal areas of Şırnak province were introduced and the hydrogeochemical properties of thermal water samples were examined. In Şırnak province, there are geothermal areas in Güçlükonak-Belkis Ana, Kumçatı (İkizce), Balveren-Besta and Beytüşşebap-İlıcak regions. The most important geothermal source in the province is the Belkis Ana thermal spring in Güçlükonak geothermal area, with its temperature reaching 63 °C and its existing facility. Thermal water is obtained at 43 °C in the Zümrüt thermal spring in the Beytüşşebap-İlıcak region, which is another important geothermal area. Carbonate rocks of different ages in the province constitute the reservoir rocks of the geothermal system. Marl and clayey lithologies are cover rocks. The geothermal system is tectonic controlled. The pH values of thermal waters vary between 6.56-9.46 and EC values between 756-2095 µS/cm. Different water types (Ca-Mg-HCO₃-SO₄/ Ca-Mg-SO₄-HCO₃, Na-Ca-Cl-HCO₃/Na-Ca-HCO₃-Cl) were detected in the waters. It seems that the main factor controlling the chemistry of thermal waters in Şırnak province is rock-water interaction. The As content of thermal water samples varies between 11-22 µg/l and exceeds the limit values given for drinking water. Additionally, Mn, Se and coliform bacteria contents were found to be above the limit values in some samples.

Alıntı / Cite

Davraz, A., Nalbantçılar, M.T., Ercan İştin, E., Kadirhan, G., Çelik, S., (2024). Şırnak İli Jeotermal Kaynakları ve Özellikleri, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(1), 140-155.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. Davraz, 0000-0003-2442-103X
M.T. Nalbantçılar, 0000-0001-8168-1343
G. Kadirhan, 0000-0001-6011-7786
A. Ercan İştin, 0000-0002-7622-361X
S. Çelik, 0000-0002-4541-6355

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date 26.01.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date 17.02.2024
Yayın Tarihi / Published Date 25.03.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: aysendavraz@sdu.edu.tr, +90-246-211-1326

ŞIRNAK PROVINCE GEOTHERMAL RESOURCES AND PROPERTIES

Ayşen Davraz^{1†}, M.Tahir Nalbantçılar², Gökhan KADIRHAN³, Aysen ERCAN İŞTİN⁴, Sedat ÇELİK³

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

² Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü Ankara, Türkiye

³ Şırnak Üniversitesi, Turizm ve Otel İşletmeciliği Yüksekokulu, Turizm İşletmeciliği Bölümü, Şırnak

⁴ Şırnak Üniv., Turizm ve Otel İşletmeciliği Yüksekokulu, Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü, Şırnak

Highlights

- There are four geothermal areas in Şırnak province.
- Two different water types have been determined in thermal waters and Na⁺, Ca⁺² and SO₄²⁻, HCO₃⁻ are the dominant ions.
- Some trace element and microbiological contents of thermal waters restrict its use as a drinking cure.

Purpose and Scope

In order to introduce the geothermal areas in Şırnak province and ensure that they have modern facilities, the potential of these areas must be revealed through geological, hydrogeological and hydrogeochemical research. In this study, a geothermal resource inventory was made in the geothermal areas in Güçlükonak-Belkıs Ana (Hısta), Kumçatı (İkizce), Balveren-Besta and Beytüşşebap-İlıcak locations in Şırnak province and their detailed geological-hydrogeological properties were examined. Additionally, the hydrogeochemical properties of samples taken from thermal water sources in these regions were examined.

Design/methodology/approach

Thermal waters were taken from thermal waters in the Şırnak in September-2021 and October-2022. The pH temperature and EC values of the thermal waters were measured in-situ using a multi-parameter device. Chemical analyzes of water samples were made. The results of the analysis were evaluated and interpreted with different graphics. Chemical analyzes of water samples were performed and different graphs and standards were used to evaluate and interpret the analysis results.

Findings

The temperatures of the thermal waters taken within the scope of the research ranged between 13.5-63 °C, and the highest temperature was measured in Belkıs Ana thermal springs in Güçlükonak. pH values of water samples vary between 6.56-9.46 and EC values between 756-2095 µS/cm. Ca-Mg-HCO₃-SO₄/ Ca-Mg-SO₄-HCO₃ and Na-Ca-Cl-HCO₃/Na-Ca-HCO₃-Cl water types were determined in thermal waters. The main factor affecting the chemistry of thermal waters in Şırnak province is rock-water interaction. Carbonate rocks of different ages in the province have the characteristics of karstic rocks and constitute the reservoir rocks of the geothermal system. Marl and clayey lithologies are cover rocks. The geothermal system is tectonic controlled. As, Al, Br, Ba, Cr, Cd, Cu, Hg, Fe, Ni, Mn, PO₄, Sb, Pb, Se, Zn, Free Cyanide and Boric Acid (H₃BO₃), Silicate Acid (H₂SiO₃) were analyzed in thermal waters. . The As content of water varies between 11-22 µg/l and exceeds the limit values given using drinking water. According to the results of major anion, trace element and microbiological analysis of thermal water samples taken from Şırnak province, it was determined that it was not suitable for long-term use as drinking water.

Practical implications

Although there are four geothermal areas in Şırnak province, these areas cannot be used under suitable conditions. Detailed geological, hydrogeological and hydrogeochemical analyzes have been carried out in order to benefit from the geothermal areas in the province with modern facilities. According to the results of this analysis, it was determined that the limit values given in the Hot Springs Regulation were exceeded in some water samples in the province. The results obtained revealed which parameters pose risks in ensuring the healthy use of thermal waters with modern facilities. Taking these results into consideration, necessary precautions should be taken and the use of these geothermal areas should be improved.

Originality

The study is an original study examining the geological, hydrogeological and hydrogeochemical properties of different geothermal areas in Şırnak province.

[†] Corresponding author: aysendavraz@sdu.edu.tr, +90-246-211-1326

1. Giriş (Introduction)

Alp-Himalaya orojenik kuşağı üzerinde bulunan Türkiye’de volkanik, mağmatik ve orojenik faaliyetlerin yoğun ve aktif olması ülkemizin jeotermal kaynak potansiyelini arttırmıştır. Afrika ve Avrasya levhaları arasındaki kıtasal çarpışmadan kaynaklanan Akdeniz Deprem Kuşağı’nda yer alan Türkiye’de aktif fay hatları ülkenin pek çok alanında gözlenmektedir (Bozkurt, 2001). Aktif fay hatları su dolaşımına ve ısı akışına olanak sağlayarak jeotermal kaynak ve jeotermal enerji potansiyelini oluşturan ana unsurlardır (Baba ve Sözbilir, 2012). Türkiye’deki kaplıcaların dağılımı kabaca fay sistemleri, genç volkanik alanlar ve modifiye hidrotermal dağılımlarla paralellik göstermektedir. Türkiye’de dört ana jeotermal bölge bulunmaktadır. Bunlar Batı Anadolu, İç Anadolu, Doğu Anadolu ve Kuzey Anadolu fay zonudur (Şimşek, 2002). Batı Anadolu’da Türkiye’nin en yüksek sıcaklığa sahip jeotermal alanlar bulunmakta olup bunlar Gediz ve Menderes grabeni içinde gelişmiştir. Orta Anadolu’da ise Batı Anadolu’ya göre daha düşük sıcaklıklı jeotermal kaynaklar gözlenmektedir. Kuzey Anadolu’da Kuzey Anadolu Fayı boyunca gelişmiş Bursa-Çekirge, Yalova-Terme, Armutlu, Sakarya-Akyazı, Bolu, Tokat-Reşadiye gibi jeotermal alanlar bulunmaktadır (Koçak, 2000).

Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde ise jeotermal alanlar tektonik ve volkanik aktivitelere bağlı olarak gelişmiştir. Bu bölgede bulunan en önemli jeotermal alanlar Ağrı-Diyadin, Van-Erciş, Diyarbakır-Çermik, Bitlis-Nemrut ve Urfa-Karaali sahalarıdır (Koçak, 2000). Doğu Anadolu Bölgesi ve Güneydoğu Anadolu Bölgesinin Dicle bölümünde kalan Şırnak ili jeotermal kaynakların bulunduğu ancak bu alanların geliştirilmesi ve modern kullanım koşullarının sağlanabilmesi açısından kısıtlı kalmış bir ildir. İlde dört adet jeotermal alan bulunmasına rağmen bunlardan sadece Güçlükönak-Belkıs Ana (Hısta) jeotermal alanında kapalı bir kaplıca tesisi bulunmaktadır. Diğer alanlarda ise sadece basit havuzlar şeklinde yararlanılmaktadır. Şırnak ilinde bulunan jeotermal alanların tanıtılabilmesi ve modern tesislere kavuşmasının sağlanabilmesi için bu alanların jeolojik, hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal araştırmalar ile potansiyelinin ortaya konması gerekmektedir. Bu çalışmada, Şırnak ilinde bulunan Güçlükönak-Belkıs Ana (Hısta), Kumçatı (İkizce), Balveren-Besta ve Beytüşşebap-İlicak mevkiilerinde bulunan jeotermal alanlarda jeotermal kaynak envanteri yapılmış ve ayrıntılı jeolojik- hidrojeolojik özellikleri incelenmiştir. Ek olarak, Başağaç mevkiinde bulunan kaynak sularından da örnekler alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca, bu bölgelerde bulunan termal su kaynaklarından alınan örneklerin hidrojeokimyasal özellikleri irdelenmiştir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

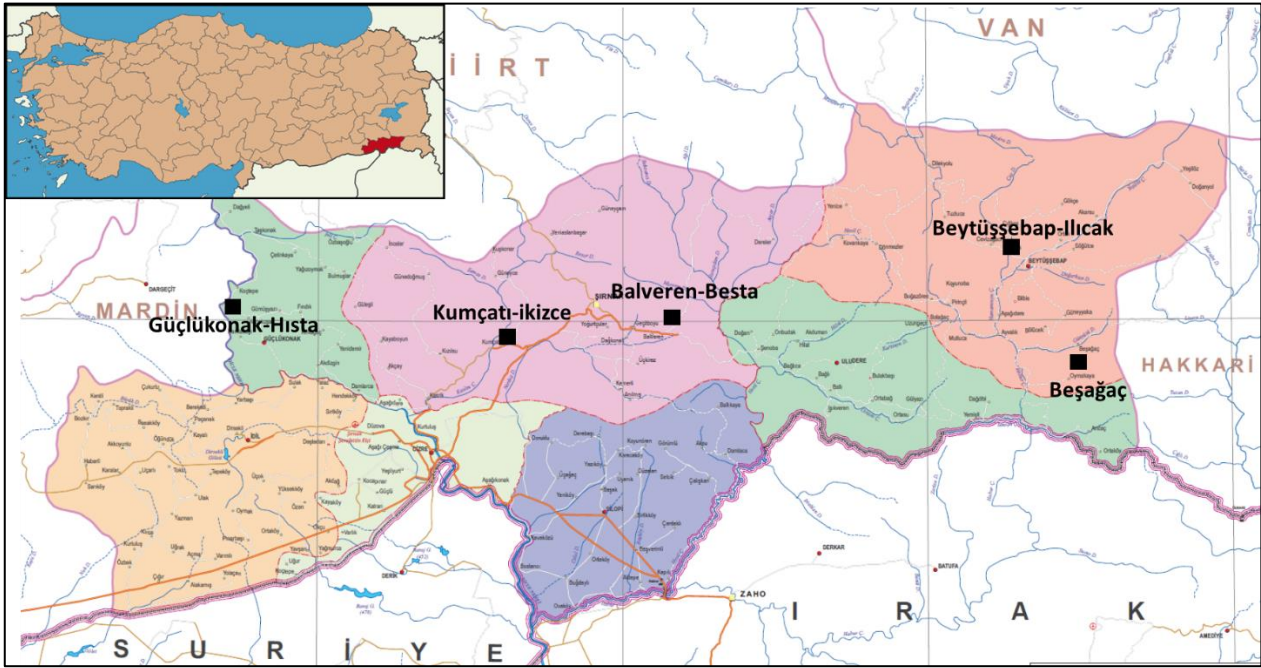
Şırnak ilinin bulunduğu Güney Doğu Anadolu bölgesinde genel olarak aktif tektonik olaylar, doğal kaynaklar ve bölgenin jeolojisine yönelik çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalar Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı ve Maden Tetkik Arama Enstitüsü gibi kurumlar ve üniversiteler tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmalarda ana tema petrol vb. doğal kaynak aramalarına yöneliktir (Çoruh, 1991; Çoruh vd., 1997; Ercan vd., 1991; Sungurlu, 1974; Şaroğlu ve Emre, 1987; Şaroğlu, 1987). Güney Doğu Anadolu ve Doğu Anadolu bölgelerindeki jeotermal kaynaklara yönelik araştırmalar ise kaynakların bulunduğu bazı alanlarda gerçekleştirilen jeolojik, jeofizik etütler, sondaj açım raporları ve kaynak analizleri ile sınırlı kalmıştır (Özel, 2001; Özel ve Bekişoğlu, 2002). Bölgede jeotermal potansiyel araştırılmasına yönelik ilk ve tek araştırma Baba vd. (2015a, b) tarafından gerçekleştirilen GAP idaresi tarafından finanse edilen GAP Jeotermal Kaynakları Geliştirme Projesi kapsamında yapılmıştır. Bu çalışmada, GAP bölgesinin jeolojik ve tektonik özellikleri incelenerek jeotermal kaynak çıkışları bulunan Adıyaman, Gaziantep, Batman, Diyarbakır, Şanlıurfa, Siirt, Mardin, Kilis ve Şırnak illerindeki jeotermal su örneklerinin hidrojeokimyasal özellikleri irdelenmiştir. Çalışmada ayrıca, GAP bölgesinde jeotermal kaynakların geliştirilmesine yönelik önerilerde bulunulmuştur.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Çalışma Alanı (Study Area)

Şırnak Güneydoğu Anadolu Bölgesinde Irak ve Suriye ile sınırı olan bir ildir (Şekil 1). İlde güneydoğu Toroslar ile ilişkili 3000 m’yi aşan yüksek seviyeler gözlenmektedir. Bu seviyelerin en yüksek kesimleri Altın Dağ (3358 m) ve Karacadağ (3275 m)’dir. Silopi, Cizre ve İdil civarındaki alçak düzlükler bitkisel üretim, Faraşın Yaylası gibi yüksek düzlükler hayvancılık için kullanılmaktadır. Silopi Ovası Şırnak ilinin en önemli yeraltısuyu akiferini oluşturmaktadır. Pliyosen formasyonlar önemli akifer birimlerdir. Bu birimler içerisindeki konglomera ve kumtaşı seviyeleri yeraltısuyu bulundurmaktadırlar. Söz konusu akiferin rezervi 155. 10⁶ m³/yıl olup yıllık emniyetli verim 100.10⁶ m³/yıl olarak belirlenmiştir (OSB, 2016). Şırnak ili, Dicle havzası içerisinde bulunmakta olup Dicle havzasını besleyen Kızılsu, Habur, Nerdüş ve Hezil nehirleri il sınırları içerisinde yer almaktadır. Şırnak ili güney ve batı kesimlerinde Tersiyer yaşlı birimler yüzeylenmektedir. Bol miktarda petrol içeren bu oluşumlar İran ve Irak’ta da devam etmektedir. Tersiyer oluşumlarının Türkiye’deki uzantıları ince olup tektonik hareketler

sonucu kıvrılmıştır. Bu kıvrımın Cudi Dağı'nda daha fazla olup, daha yaşlı tortullar güneyde genç birimler üzerine itilmiştir (OSB, 2016).



Şekil 1. Şırnak ilinin Türkiye'deki konumu ve il haritası (Location and provincial map of Şırnak province in Turkey)

3.2. Örneklem ve Analiz Yöntemi (Sampling and Analysis Method)

Şırnak ilinde bulunan termal ve mineralli suların hidrojeokimyasal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Eylül-2021 ve Ekim-2022 dönemlerinde aylarında su örnekleri alınmıştır. Suların fiziksel özellikleri olan pH, elektriksel iletkenlik (EC) ve sıcaklık parametreleri su örneği alımı sırasında çok parametrelili ölçüm cihazı kullanılarak yerinde ölçülmüştür. Global konumlandırma sistemi (GPS) cihazı kullanılarak örnek alım noktalarının konumu kaydedilmiştir. Su örneklerinin anyon, katyon, eser element, nitrat, nitrit, amonyak ve bakteriyolojik analizleri Diyarbakır Halk Sağlığı Laboratuvarı İl Sağlık Müdürlüğü laboratuvarında yaptırılmıştır. Analiz parametreleri 24.07.2001 tarih ve 24472 sayılı Resmî Gazetede yayımlanan "Kaplıcalar Yönetmeliği" hükümlerinde belirtilen parametreler dikkate alınarak seçilmiştir.

4. Araştırma Bulguları (Research Findings)

4.1. Şırnak İli Jeotermal Alanları (Şırnak Province Geothermal Areas)

Şırnak il sınırları içerisinde 4 adet jeotermal alan bulunmaktadır. Bölgenin en yüksek sıcaklığa sahip termal su kaynağı Şırnak merkez ilçe batısında bulunan Güçlükonak ilçesi Düğünürdü Köyü civarındaki Hesta kaynak suyudur. Bu bölgede Hısta-Belkıs Ana Kaplıcası bulunmaktadır. Şırnak il merkezi doğusunda bulunan Beytüşşebap İlçe merkezine 7 km uzaklıktaki İlıcak köyünde Zümrüt Kaplıcası yer alır. Kaplıcada termal kaynak sularından havuzlar ile faydalanılmaktadır. Şırnak il merkezi kuzeydoğusunda yaklaşık olarak 30 km mesafede Besta kaynağı ve Merkez Kumçatı Beldesi kuzeybatısında İkizce Köyü civarında Nasfaran Kaplıcası bulunmaktadır. Besta ve Nasfaran kaplıcalarında çamur ve su banyosu şeklinde yararlanılmaktadır (Şekil 1).

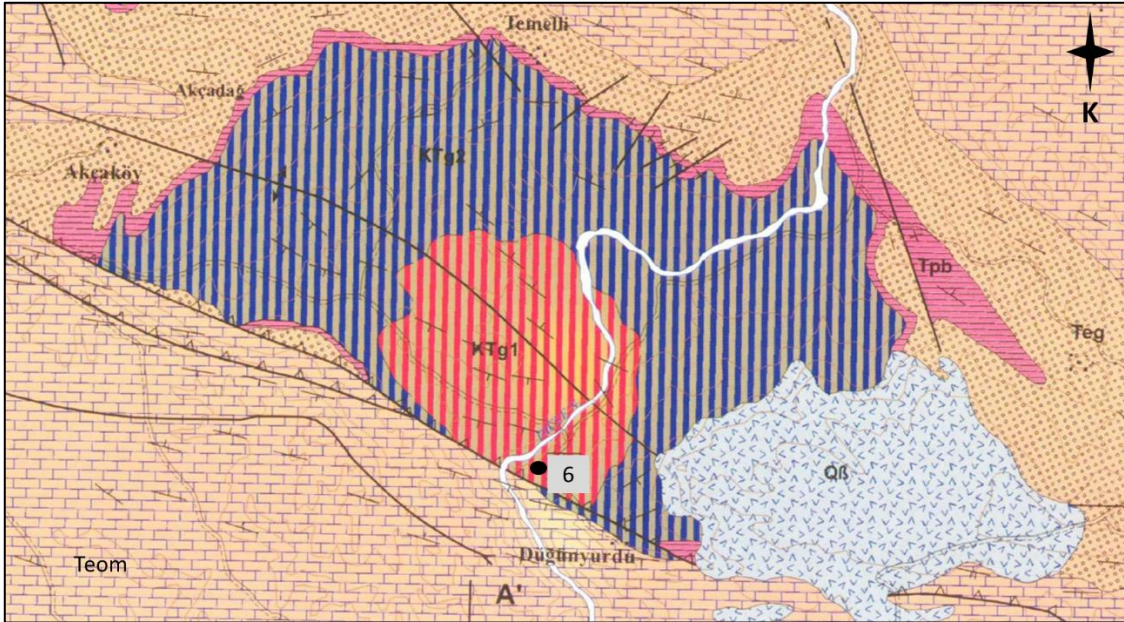
4.1.1. Güçlükonak-Belkıs Ana Jeotermal Alanı (Güçlükonak-Belkıs Ana Geothermal Area)

Belkıs Ana-Hısta Jeotermal alanı Düğünürdü Köyü yakınında Dicle Nehri kıyısında İlisu Barajı'nın mansabında yer almaktadır (Şekil 2). Bu bölgede doğal olarak boşalan termal kaynak suyundan yararlanılmaktadır. Bölgede, Güneydoğu Anadolu otoktonuna ait alttan üste doğru Orta-Geç Maestrihtiyen-Paleosen yaşlı Germav formasyonu, Geç Paleosen yaşlı Becirman formasyonu, Eosen yaşlı Midyat grubu ile Kuvaterner birimler yüzeylenmektedir (Şekil 3). Jeotermal kaynak çıkış bölgesinde geniş alanlarda gözlenen Germav formasyonunun alt seviyeleri mavimsi- yeşilimsi gri, gri renkli, sık dokulu şeyller ile başlar. Formasyonun üst seviyeleri ise ince kumlu marn ara seviyeli şeyllerden oluşmaktadır. Germav formasyonunun Orta-Geç Maestrihtiyen yaşlı ince kırıntılıları -Alt üye, Paleosen yaşlı ince kırıntılıları ise -Üst üye olarak ayrılanmıştır. Germav formasyonunda kireçtaşı, killi kireçtaşı, kumlu kireçtaşı, kalsitürbidit ve konglomera düzeyleri de gözlenmektedir. Bol fosilli olan Germav formasyonu Orta Maestrihtiyen-Paleosen yaşlıdır (MTA, 2008a). Bölgede

Germav formasyonu üyelerinin çevresinde küçük alanlarda gözlenen Becirman formasyonu kireçtaşı, killi kireçtaşı, şeyl ve marnlardan oluşmaktadır. Formasyonda yer yer siltli ve kumlu seviyeler izlenmektedir. Geniş alanlarda yüzeyleyen Midyat grubu genelde Eosen yaşlı karbonatlar ile temsil edilmekte olup farklı alanlarda kireçtaşı fasiyesleri yansıtmaktadır (MTA, 2008a).



Şekil 2. Belkis Ana kaplıcası örnek alım noktasının uydu görüntüsü üzerindeki konumu (Location of the Belkis Ana thermal spring sampling point on the satellite image)



Şekil 3. Belkis Ana (Hısta) jeotermal sahası jeoloji haritası (MTA, 2008a) (Geological map of Belkis Ana (Hısta) geothermal field)

KTg1: Germav formasyonu-Alt Üyesi, KTg2: Germav formasyonu-Üst üyesi, Teom: Midyat grubu, Tmp: Becirman formasyonu, Teg: Gercüş formasyonu, QİB: Adlanmamış bazalt (KTg1: Germav formation-Lower Member, KTg2: Germav formation-Upper member, Teom: Midyat group, Tmp: Becirman formation, Teg: Gercüş formation, QİB: Unnamed basalt)

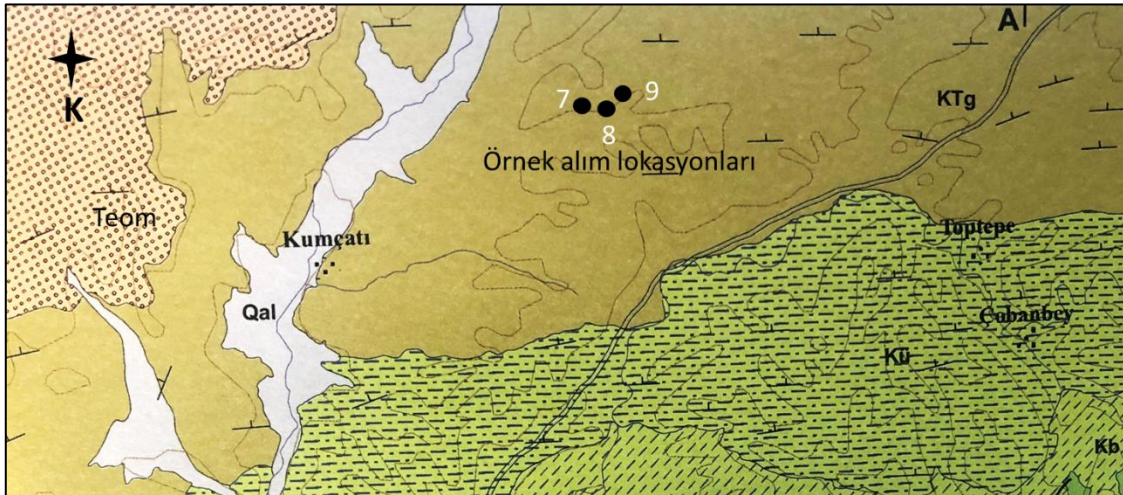
Midyat grubunun genel olarak taban kesiminde yeralan Gercüş formasyonu konglomera, silttaşı, kiltası, marn, kumtaşı gibi kırıntılı kayalardan oluşmaktadır. Birim stratigrafik konumuna göre Erken Eosen yaşlı kabul edilmektedir (MTA, 2008). Kaynak çıkış alanı doğusunda yüzeyleyen Adlanmamış Bazalt birimi koyu renkli bazaltlardan oluşmakta olup bazaltik lav akıntılarının alttaki birimleri örtmesi nedeniyle Kuvaterner yaşlı olarak kabul edilmiştir. Hısta (Belkis Ana) kaplıcası civarında jeotermal akışkan ile ilişkili traverten oluşumları da

Kuvaterner yaşlıdır. Bölgede en genç birim Kuvaterner yaşlı alüvyon olup kil, tutturulmamış kum ve çakıllardan oluşmaktadır (Şekil 3).

Güçlükonak ve çevresinde yoğun tektonik etki sonucu bu alanda yüzeyleyen Midyat Formasyonu'nda ikincil gözeneklilik gelişmiştir. Eosen yaşlı kireçtaşları karstik olup yersel olarak yeraltısını alınamabilmektedir. Bölgede karstik kireçtaşlarından önemli miktarda yeraltısını alınmaktadır. Germav Formasyonunda şeyl ve kilitaşı seviyeleri ağırlıklı olup geçirimsiz özelliktedir. Bu birim jeotermal sistemin örtü kayacı özelliğini taşımaktadır. Dicle Nehri havzasında yüzlek veren alüvyonel birimler ise yeraltısını açısından verimli akiferleri oluşturmaktadır. Bölgede İlisu fayının açılma çatlaklarında çok sayıda sıcak su kaynağı boşalmaktadır. Alandaki jeotermal sistem tektonik kontrollüdür (Baba vd., 2015).

4.1.2. Kumçatı (İkizce) Jeotermal Alanı (Kumçatı -İkizce Geothermal Area)

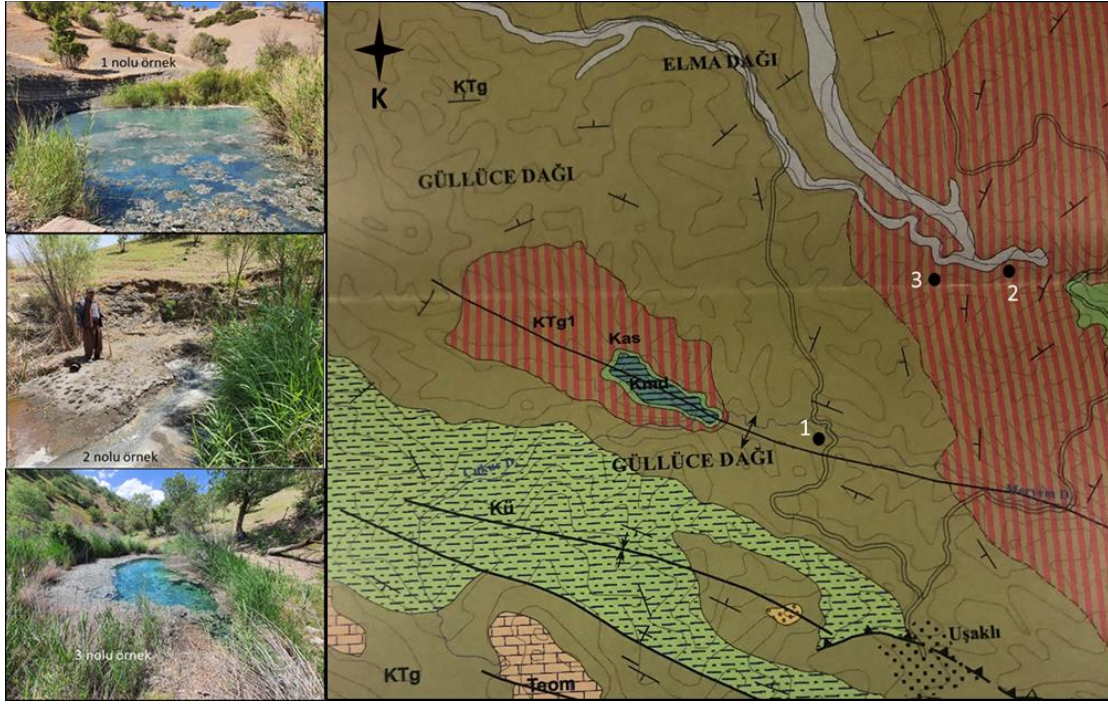
Bu alanda Kumçatı Beldesi kuzeybatısı ve İkizce köyü kuzeyinde 3 lokasyonda kaynak boşalmaları bulunmaktadır. Bu kaynak çıkışlarının olduğu alanlar basit yapılar ile kullanıma sunulmuş olup düzenli bir tesis mevcut değildir. Kumçatı ve çevresinde Güneydoğu Anadolu Otoktonu içerisinde bulunan Adıyaman grubuna ait Üçkiraz, Bozova ve Germav formasyonları, Midyat grubu ile Kuvaterner alüvyon yüzeylenmektedir (Şekil 4). Şeyllerden oluşan Germav formasyonu bölgede geniş alanlarda gözlenmektedir. Yine geniş alanlarda yüzeyleyen Orta Maastrichtiyen yaşlı Üçkiraz formasyonu orta-kalın tabakalı, marn ve killi kireçtaşı seviyelerinden oluşmaktadır. 100-250 m arasında değişen kalınlığa sahip formasyon üstte Germav formasyonu ile uyumludur (MTA, 2007a). Bozova formasyonu ise ince-orta tabakalı, midye kabuğu kırılma yüzeyli marnlardan oluşmaktadır. Birimin üst kesimlerinde marn ve kumlu kireçtaşı seviyeleri de gözlenmektedir. Tektonik kontrollü oluşan jeotermal sistemin rezervuar kayaları bölgede yüzeyleyen karstik kaya özelliğine sahip farklı yaştaki karbonatlı kayalardır. Marn ve killi litolojiler ise örtü kaya niteliğindedir.



Şekil 4. Kumçatı (İkizce) jeotermal alanı jeoloji haritası (MTA, 2008a) (Geological map of Kumçatı (İkizce) geothermal area)
Kb: Bozova formasyonu, KÜ: Üçkiraz formasyonu, KTg: Germav formasyonu, Teom: Midyat grubu, Qal: alüvyon (Kb: Bozova formation, KÜ: Üçkiraz formation, KTg: Germav formation, Teom: Midyat group, Qal: alluvium)

4.1.3. Balveren-Besta Jeotermal Alanı (Balveren-Besta Geothermal Area)

Şırnak il merkezinin yaklaşık olarak 30 km kuzeydoğusunda bulunan Besta Jeotermal alanında 24-29 °C arasında değişen doğal kaynak çıkışları bulunmaktadır (Şekil 5). Bu kaynakların kullanımı bulunmamaktadır. Besta Jeotermal alanında Güneydoğu Anadolu Otoktonu içerisinde bulunan Adıyaman grubuna ait Üçkiraz, Sayındere ve Germav formasyonları, Mardin grubuna ait Derdere formasyonu, Midyat grubu ile Kuvaterner alüvyon yüzeylenmektedir (Şekil 5). Kaynak boşalım noktaları çevresinde Germav formasyonu ve Germav formasyonunun Alt üyesi geniş alanlarda gözlenmektedir. Kalınlığı 50-250 m arasında değişen Senomaniyen yaşlı Derdere Formasyonu dolomitlerden oluşmaktadır. Birim içerisinde seyrek çört yumrulu, yer yer marn ara seviyeli dolomitler de gözlenmektedir (MTA, 2007a). Sayındere Formasyonu ise killi kireçtaşlarından oluşmakta olup marn ve kalkarenit düzeyleri de içermektedir. Kalınlığı 17-365 m arasında değişen birim üstte Bozova formasyonu ile geçişlidir. İnceleme alanındaki farklı yaştaki karbonatlı kayalar karstik kaya özelliğinde olup jeotermal sistemin rezervuar kayalarını oluşturmaktadır. Marn ve killi litolojiler örtü kaya niteliğindedir. Alandaki jeotermal sistem tektonik kontrollüdür.



Şekil 5. Besta Meryema jeotermal alanı örnek alım lokasyonları ve çevresi jeoloji haritası (MTA, 2008b) (Geological map of Besta Meryema geothermal area sampling locations and surroundings)

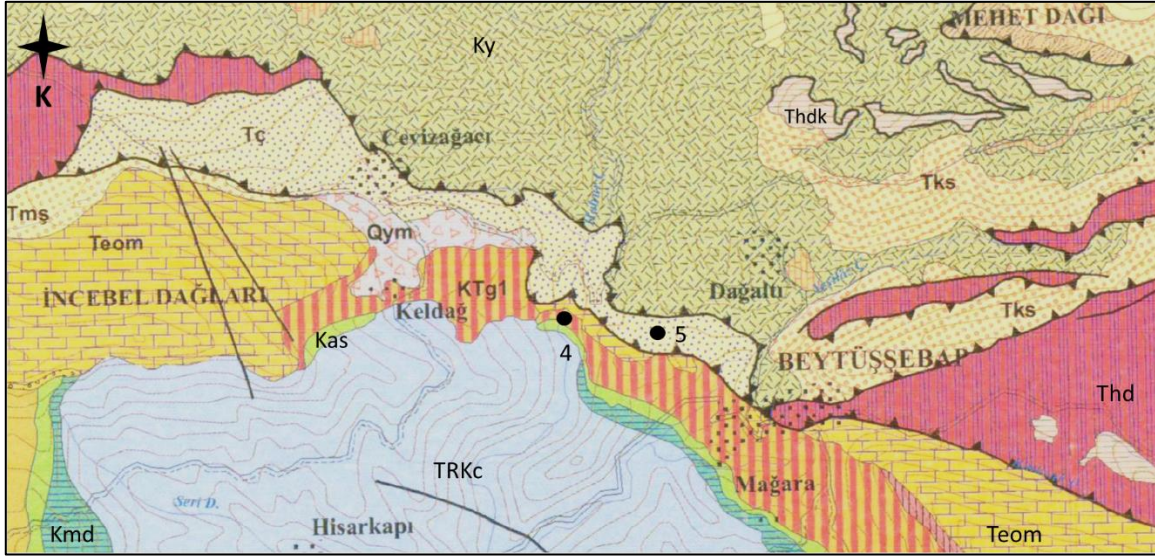
Kmd: Derdere formasyonu, Kas: Sayındere formasyonu, Kü: Üçkiraz formasyonu, KTg :Germav formasyonu, KTg1: Germav formasyonu-Alt Üyesi Teom: Midyat grubu, Qal: alüvyon (Kmd: Derdere formation, Kas: Sayındere formation, Kü: Üçkiraz formation, KTg: Germav formation, KTg1: Germav formation-Lower Member Teom: Midyat group, Qal: alluvium)

4.1.4. Beytüşşebap-Ilıcak Jeotermal Alanı (Beytüşşebap-Ilıcak Geothermal Area)

Beytüşşebap ilçesine 7 km uzaklıkta bulunan Ilıcak köyünde Zümrüt kaplıcası bulunmaktadır. 43 °C civarında sıcaklık ile boşalan kaynak sularından havuzlar ile faydalanılmaktadır. Beytüşşebap ve çevresinde Güneydoğu Anadolu otoktonuna ait Cudi grubu, Mardin grubundan Derdere formasyonu, Adıyaman grubundan Sayındere ve Germav formasyonları, ayrılmamış Midyat grubu ve bu gruba ait Şelmo formasyonu gözlenmektedir. Bölgede allokon birimlerden Çüngüş-Hakkari napına ait Çüngüş ve Durankaya formasyonları, Bitlis-Pötürge-Malatya napları içinde Yüksekova karmaşığı ile Paraallakton birimlerden Kırkgeçit formasyonunun Serizeri üyesi yüzeylenmektedir (Şekil 6). 3790 m kalınlığa ulaşan Cudi Grubu, masif ve orta-kalın tabakalı dolomit, dolomitik kireçtaşı ve kireçtaşlarından oluşmaktadır. Cudi grubunun yaşı Orta Triyas-Erken Kretase yaşlı kabul edilmiştir. 1403 m kalınlığa ulaşabilen Şelmo formasyonu ise konglomera, kumtaşı, çamurtaşı, şeyl ardalanmasından oluşmakta olup Orta-Geç Miyosen yaşlıdır (MTA, 2007b).

Eosen-Erken Miyosen yaşlı Çüngüş Formasyonu şeyl ve az fosilli kumtaşı seviyelerinden oluşmakta olup polijenik konglomera düzeyleri de içermektedir. Aşırı derecede deforme olmuş şeyl ve fillat, pelajik kireçtaşı ve gri renkli kireçtaşı mercek ve bloklarından oluşan Durankaya Formasyonu Erken-Orta Eosen yaşlıdır (MTA, 2007b). Durankaya formasyonu içerisinde gabro, serpantin, metamorfik kireçtaşı, bazik volkanit, amfibolit gibi bloklar bulunmaktadır. Spilit, spilitleşmiş bazalt, kireçtaşı az oranda granit, tuf, granodiyorit, konglomera, şeyl, mermer vb. kaya birimlerini içeren Yüksekova Karmaşığı Senomaniyen-Turoniyen yaşlıdır (MTA, 2007b). Kırkgeçit Formasyonu içerisindeki konglomeralar Serizeri Üyesi olarak ayırtlanmıştır. Bu konglomeralar içerisinde kıvılcımlı çamurtaşı seviyeleri de izlenmektedir. Üye 5-50 m arasında kalınlığa sahiptir.

Beytüşşebap ve çevresinde yüzeylenen dolomitik kireçtaşları karstik akifer özelliğine sahiptir. Bu karstik yapılardan yüksek debili kaynak boşalmaları gözlenmektedir. Marn ve killi kayalarla temsil edilen birimler ise örtü kayacını oluşturmaktadır. Alanda jeotermal kaynak çıkışları tektonik kontrollü olup karstik kaynaktır (Baba vd., 2015b).



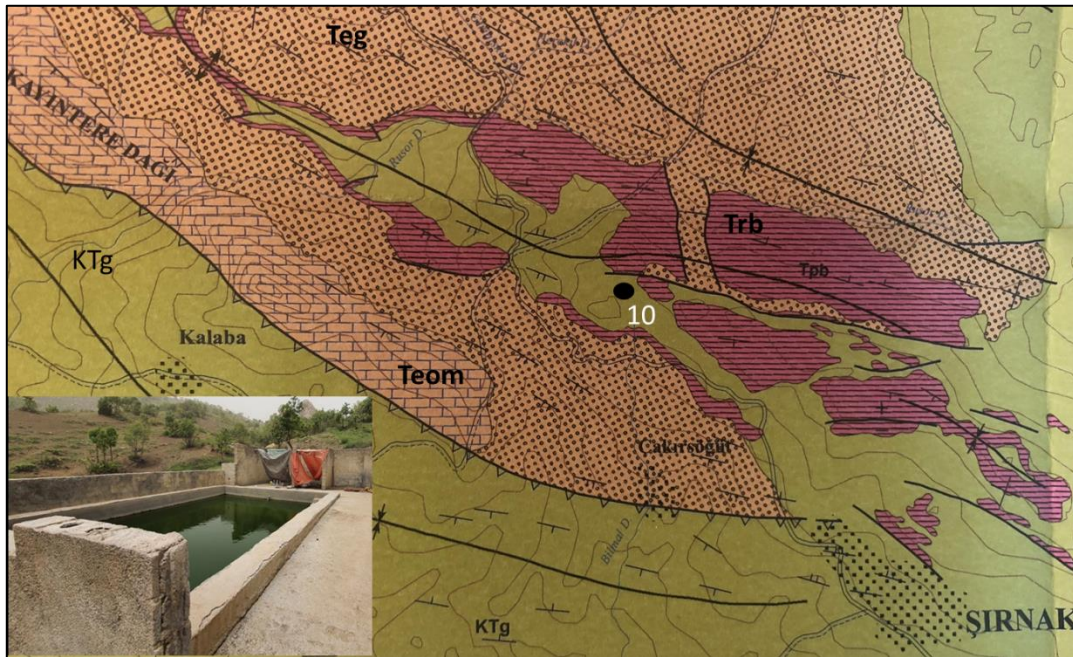
Şekil 6. Beytüşşebap-Zümrüt kaplıcası çevresi jeoloji haritası ve su örneği alım lokasyonları (MTA, 2007b)

(Geological map of Beytüşşebap-Zümrüt hot spring surroundings and water sample collection locations)

TRKc: Cudi Grubu, Kmd: Derdere formasyonu, Kas: Sayındere formasyonu, KTg1: Germav formasyonu-Alt üyesi, Teom: Midyat grubu, Tmş: Şelmo Formasyonu, Tç: Çüngüş Formasyonu, Thd: Durankaya formasyonu, Thdk: Kireçtaşı üyesi, Ky: Yüksekova Karmaşığı, Tks: Serizeri Üyesi; (TRKc: Cudi Group, Kmd: Derdere formation, Kas: Sayındere formation, KTg1: Germav formation-Lower member, Teom: Midyat group, Tmş: Şelmo Formation, Tç: Çüngüş Formation, Thd: Durankaya formation, Thdk: Limestone member, Ky: Yüksekova Complex, Tks: Serizeri Member)

4.1.5. Başağaç Mevkii (Basağaç Location)

Basağaç mevkiinde 13.5 °C sıcaklığa sahip kaynak suyundan basit havuz yapılarak yararlanılmaktadır. Basağaç mevkiinde bulunan kaynak ve çevresinde Güneydoğu Anadolu Otoktonunda Mardin grubuna ait Germav ve Becirman formasyonları ile Midyat grubu ve Gercüş formasyonu yüzylemektedir (Şekil 7). Bölgede geniş alanlarda Germav formasyonu ve Eosen yaşlı karbonatlar ile temsil edilen Midyat grubu gözlenmektedir. Kaynak boşalım noktasına yakın bölgede ise killi kireçtaşı, şeyl ve marn aralanmasından oluşan Becirman formasyonu bulunur (Şekil 7). Bölgede gözlenen tektonik hatlara bağlı olarak boşalan kaynağın alanda yüzeyleyen karbonat kayalardan beslendiği düşünülmektedir.



Şekil 7. Basağaç mevki ve çevresi jeoloji haritası ve su örneği alım lokasyonları (MTA, 2007a)

(Geological map of Basağaç locality and its surroundings and water sample collection locations)

KTg :Germav formasyonu, Teom: Midyat grubu, Trb: Becirman Formasyonu, Teg: Gercüş Formasyonu (KTg: Germav formation, Teom: Midyat group, Trb: Becirman Formation, Teg: Gercüş Formation)

4.2. Termal suların Hidrojeokimyasal Özellikleri (Hydrogeochemical Properties of Thermal Waters)

Şırnak ili ve çevresinde yer alan sıcak ve mineralli su kaynaklarının hidrojeokimyasal özelliklerinin tespiti amacıyla Eylül-2021 ve Ekim-2022 dönemlerinde su örnekleri alınmıştır. Su örneği alınan lokasyonlara ait bilgiler Tablo 1’de verilmiştir. İnceleme alanından alınan su örneklerinin pH değerleri Eylül-2021’de 6,56-9,4 ve Ekim-2022’de 7,15-9,46 arasında değişmektedir. İnceleme alanında yeraltısularının Asit karakterli ile Bazik sular arasında değiştiği söylenebilir. İnceleme alanında suların EC değerleri Eylül-2021’de 795-2095 $\mu\text{S/cm}$, Ekim-2022’de ise 756-1900 $\mu\text{S/cm}$ arasında ölçülmüştür (Tablo 2).

Tablo 1. Su örneği alım noktalarına ait bilgiler (Information about water sample collection points)

Örnek No	Yer	Tanım
1	Besta Meryema 1 /Balveren Köyü	Kaynak 1/Bay tarafı/Havuz
2	Besta Meryema 2 /Balveren Köyü	Kaynak 2/Üst Kottaki
3	Balveren/Germav Siftiye	Kaynak 3 /Havuz
4	Beytüşşebap Zümrüt Kaplıcaları	Kaynak-1
5	Beytüşşebap Zümrüt Kaplıcaları	Kaynak-2
6	Güçlükonak Belkıs Ana Kaplıcaları	Kaynak 2 (Ana Çıkış)
7	Kumçatı Mevkii Kaynak-1	Kaynak 1
8	Kumçatı Mevkii Kaynak-2	Kaynak 2/Hamam
9	Kumçatı Mevkii Kaynak-3	Kaynak 3/Hamam
10	Başagaç Mevkii Taş Ocağı Arkası	Kaynak

Tablo 2. Su örneklerinin yerinde ölçüm sonuçları (On-site measurement results of water samples)

Örnek No	Eylül-2021				Ekim-2022			
	pH	EC ($\mu\text{S/cm}$)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Debi (l/s)	pH	EC ($\mu\text{S/cm}$)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Debi (l/s)
1	7,46	1452	29,3	3	7,82	1159	27,3	3
2	8,09	1138	28,5	1	8,07	1355	29,1	~1
3	7,27	863	23,3	1	8,19	1050	24,5	~1
4	6,79	1881	43,3	1	7,15	1704	43	20-25
5	7,05	1450	42,6	12	7,29	1651	42,8	20-25
6	6,56	2095	62,8	1,7	7,2	1900	63	1,7
7	8,05	1430	21,8	0,1	7,99	1337	20,9	~0,15
8	7,69	795	22,5	0,05	8,12	756	20,8	~0,05
9	9,13	2093	21,7	0,03	9,28	1893	19,7	~0,06
10	9,4	1098	16,5	1,5	9,46	1041	13,5	~0,24

4.2.1. Suların Fiziksel Özellikleri (Physical Properties of Water)

24472 sayılı “Kaplıcalar Yönetmeliği” hükümlerine göre suların koku, renk, bulanıklık ve tat analizleri yapılmıştır. Sıcaklık, suların önemli fiziksel özelliklerinden birisidir. Suların sıcaklığı hem içerisinde yaşayan canlı türlerini ve hem de kullanım alanlarını etkilemektedir. Sıcaklığı 20 $^{\circ}\text{C}$ ’nin üzerinde olan sular sıcak veya termal sular olarak adlandırılır. Su örneklerinin sıcaklık değerleri Eylül-2021’de 16,5-62,8 $^{\circ}\text{C}$ ve Ekim-2022’de 13,5-63 $^{\circ}\text{C}$ arasında değişmiştir. Sıcaklığı en düşük olan örnek su örneği Başagaç mevkiinde bulunan bir kaynaktan alınmıştır. Bu kaynak Neritik kireçtaşları ile ilişkili olarak Üst Kretase-Paleosen yaşlı kırıntılı ve karbonatlı birimler içerisinde boşalmaktadır. En yüksek sıcaklık Güçlükonak’da bulunan Belkıs Ana kaplıcalarında ölçülmüştür.

İçme suları berrak, tortusuz, renksiz olmalı, çürük, yosun, küf, H_2S , amonyak, bataklık vb. kokular bulunmamalıdır. Bulanıklık ise, su içerisinde bulunabilen kil, silt, ince parçalanmış organik maddeler, yosunlar, diatometreler, demir bakterileri ve diğer mikroorganizmalar kaynaklı olabilir (Güler ve Çobanoğlu, 1997). Sularda erimiş halde bulunan maddeler (NaCl_2 , MgCl_2 , CaSO_4 vb.) ve organizmalar (Diyatome, Protozoa, Siyanofitse vb.) yüksek oranda bulunursa sulara koku ve tat vermektedir. İnceleme alanından alınan su örneklerinin fiziksel analiz sonuçları Tablo 3’de verilmiştir. Bu analiz sonuçlarına göre 9 nolu Kumçatı mevkiinde kaynaktan gelen borudan alınan su örneğinin her iki analiz periyodunda da renk ve bulanıklık açısından uygun olmadığı tespit edilmiştir.

Tablo 3. Fiziksel analiz sonuçları (Physical analysis results of water samples)

Örnek No	Koku	Renk	Bulanıklık	Tat
EYLÜL 2021				
1	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
2	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
3	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
4	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
5	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
6	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
7	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
8	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
9	Uygun	Uygun Değil	Uygun Değil	Uygun
10	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
EKİM 2022				
1	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
2	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
3	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
4	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
5	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
6	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
7	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
8	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
9	Uygun	Uygun Değil	Uygun Değil	Uygun
10	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun

4.2.2. Major iyon içerikleri ve suların sınıflandırılması (Major ion contents and classification of waters)

İnceleme alanından alınan su örneklerinin Na içeriği 54,19-472,06 mg/l arasında, Ca içeriği 0,70-410,74 mg/l arasında, K içeriği 4,27-23,46 mg/l ve Mg içeriği 0,23-64,02 mg/l arasında değişmektedir. Suların anyon içeriklerine bakıldığında HCO_3 değerlerinin 165-585 mg/l, SO_4 içeriğinin 2,89-1277,19 mg/l ve Cl içeriği ise 3,07-378,09 mg/l arasında olduğu tespit edilmiştir (Tablo 4). Şırnak ili jeotermal kökenli suların alınmış örneklerde baskın katyonların Na ve Ca olduğu belirlenmiştir. Beytüşşebap Zümrüt Kaplıcasından alınan 4 ve 5 nolu örnekler ile Kumçatı mevkiinden alınan 7 ve 9 nolu su örnekleri ve Başağaç mevkiinden alınan su örneğinde Na iyonunun baskın iyon olduğu görülmektedir. 9 ve 10 nolu örneklerde sodyumdan sonra baskın katyon potasyumdur. Diğer su örneklerinde ise baskın katyonun Ca olduğu görülmektedir. Su örneklerinde baskın anyonun Besta Meryemana kaplıcasında (1 ve 2 nolu örnekler), Germav-Siftiye'de (3 nolu), Güçlükönak Belkıs Ana kaplıcalarında (6 nolu) ve Kumçatı mevkiinde (8 nolu) SO_4 olduğu görülmektedir. Beytüşşebap Zümrüt Kaplıcasında (4 ve 5 nolu örnekler), Kumçatı (7 nolu) ve Başağaç mevkiilerinden (10 nolu) alınan örneklerde baskın anyon Cl'dur (Tablo 4).

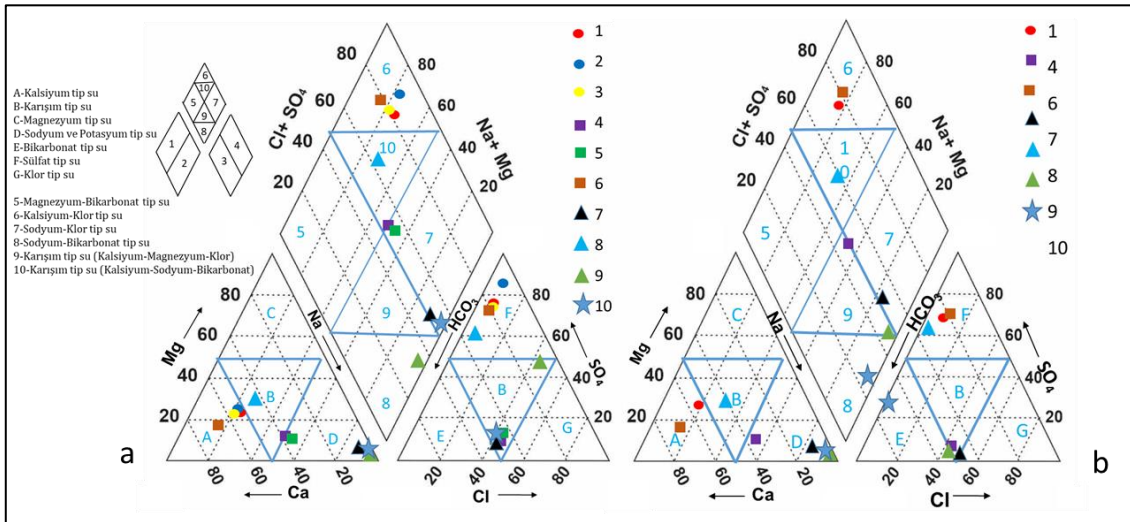
Piper diyagramı sıcak ve soğuk suların hidrokimyasal fasiyelerinin tespitinde genel olarak kullanılmaktadır. İnceleme alanından alınan su örneklerinin majör iyon içerikleri Piper diyagramı üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 8). Piper diyagramında 1,2,3,6 ve 8 nolu örnekler 1. alanda bulunmaktadır. Bu alan alkali toprak elementlerin (Ca+Mg) alkali elementlerden (Na+K) büyük olduğu su örneklerini yansıtmaktadır. 4,5,7,9 ve 10 nolu örnekler 2. alanda yer alıp alkali toprak elementlerin (Ca+Mg) alkali elementlerden (Na+K) küçük olduğu sulardır. 9 nolu örnek hariç su örneklerinin tamamında Güçlü asit kökleri ($\text{Cl}+\text{SO}_4$) Zayıf asit köklerinden (CO_3+HCO_3) daha büyüktür. İnceleme alanında 1,2,3,6 ve 8 nolu örneklerde Ca, Mg ve SO_4 içeriklerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu örneklerdeki Ca, Mg artışı Besta Meryemana, Germav ve Güçlükönak civarında yaygın olarak gözlenen Eosen ve Paleosen yaşlı Neritik kireçtaşları ile dolomitik kireçtaşı ve dolomit birimleri ile temastan kaynaklanmaktadır. Ayrıca, Ca bazalt ve andezit gibi kayalarındaki anortitlerin, Mg ise biyotit, hornblend, ojit ve piroksenin bozulması ile ilişkilendirilebilir. Sülfat, termal sulara pirit, jips ve anhidrit gibi sülfürlü minerallerin çözünmesi ve oksidasyonu ile hidrojen sülfür içeren derin sıvılarla etkileşimi sonucu bulunabilir (Egemeier, 1981; Goldscheider vd., 2010). Sülfat ayrıca evaporit yataklarında, öncelikle jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) olarak bulunur. İnceleme alanında jeotermal sulara SO_4 'daki artış muhtemelen evaporitik birimlerle kaya suyu etkileşimi ile ilişkilidir.

İnceleme alanında 4,5,7,9 ve 10 nolu örneklerde ise Na içeriğinin baskın olduğu görülmektedir. Termal sulara Na artışı volkanik kayalarındaki albitlerin çözünmesi, Na ile Ca arasında iyon değişimi ve derin dolaşım sulara sodik plajiyoklasca zengin andezitik mağmanın varlığı ile ilişkilendirilebilir. Bu örneklerde baskın anyon ise Cl ve HCO_3 'dur. HCO_3 , esas olarak CaCO_3 'ün, yeraltısu akış yolları boyunca sızan CO_2 bakımından zengin meteorik su tarafından çözülmesinden kaynaklanır. Mağmatik kayalardan ofiyolitik oluşumlar gösteren kayalar, yüksek Cl elementi içermekte ve genel yapısı itibarıyla ayrışmalara karşı daha duraysız kayaç tiplerini oluşturmaktadır (Şahinci, 1991).

İnceleme alanındaki sular genel olarak iki su tipine (IAH, 1979; Freeze ve Cherry, 1979) ayrılabilir. Bunlar; (1) Ca-Mg-HCO₃-SO₄; Ca-Mg-SO₄-HCO₃ (2) Na-Ca-Cl-HCO₃/Na-Ca-HCO₃-Cl biçimindedir. (1) su tipi beslenme alanı ve/veya yakınında bulunan nispeten orta dolaşım süresine sahip, iyon miktarı yüksek karışım sularını, (2) su tipi düşük hidrolik iletkenliğe sahip akifer içerisinde yavaş dolaşım nedeniyle kayalarla temas süresi uzadığı için iyon miktarı daha yüksek yaşlı suları temsil etmektedir.

Tablo 4. Su örneklerinin majör iyon analiz sonuçları (Major ion analysis results of water samples)

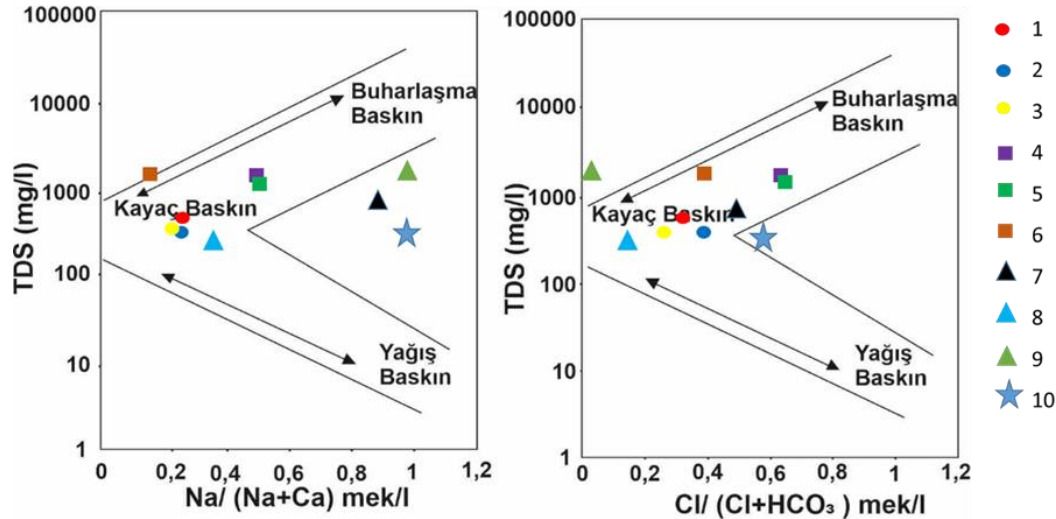
EYLÜL 2021													
Örnek No	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Ca ⁺⁺ mg/l	Mg ⁺⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ⁼ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	F mg/l	NO ₃ mg/l	NO ₂ mg/l	NH ₄ mg/l	Sertlik	Su sınıfı
1	77,11	6,17	189,87	50,06	74,41	708,21	274	1,27	-	-	0,81	67,95	CaMgSO ₄ HCO ₃
4	211,18	17,62	148,36	25,42	378,09	72,58	457	2,22	-	-	0,90	47,46	NaCaClHCO ₃
6	68,96	23,46	410,74	64,02	117,42	1277,19	292	1,62	-	-	-	128,80	CaSO ₄
7	298,99	14,25	26,13	11,57	297,32	2,89	427	3,61	-	-	-	11,27	NaClHCO ₃
8	54,19	6,1	85,60	36,46	14,37	339,94	244	-	-	-	-	36,35	CaMgSO ₄ HCO ₃
9	472,06	14,98	3,37	0,82	311,82	32,89	585	3,19	-	-	-	1,17	NaHCO ₃ Cl
10	253,43	14,35	1,92	0,23	3,07	127,31	537	-	-	-	-	0,57	NaHCO ₃ Cl
EKİM 2022													
1	79,47	5,75	205,18	52,58	58,21	535,03	213	-	0,48	-	0,42	72,81	CaMgSO ₄ HCO ₃
2	95,78	7,10	236,78	61,69	75,44	683	165	-	24,45	-	0,37	84,44	CaMgSO ₄
3	59,99	4,27	154,16	42,92	51,14	418,55	183	-	0,58	-	0,38	56,11	CaMgSO ₄ HCO ₃
4	211,68	17,60	152,52	25,26	343,08	86,95	366	-	11,29	-	-	48,44	NaCaClHCO ₃
5	214,98	17,51	151,45	25,56	337,08	103,94	353,8	-	8,62	-	-	48,29	NaCaClHCO ₃
6	71,87	21,51	410,16	68,50	90,57	971,38	183	-	16,36	0,25	-	130,50	CaSO ₄
7	307,05	13,75	26,66	11,66	220,03	64,43	353,8	-	15,86	0,46	-	11,45	NaClHCO ₃
8	60,80	5,70	87,64	35,38	23,76	265,91	176,9	-	2,94	-	-	36,41	CaMgSO ₄ HCO ₃
9	449,77	15,56	2,20	0	210,98	118,85	469,7	-	2,94	15,89	-	0,55	NaHCO ₃ Cl
10	283,9	14,27	0,70	0	231,68	120,29	341,6	-	3,45	-	-	0,17	NaClHCO ₃



Şekil 8. Piper diyagramı (a:Ekim-2022, b:Eylül-2021) (Piper diagram (a:October-2022, b:September-2021))

Gibbs (1970) diyagramı sudaki iyonik oranlar ile suyun kökeni ve bileşimini tanımlamakta yaygın olarak kullanılmaktadır. Diyagramda suların Cl/Cl+HCO₃ ve Na+K/Na+K+Ca oranları ile TDS değerleri kullanılır. Şırnak ili jeotermal sularından alınan örnekler Gibbs diyagramı üzerinde "Kayaç Baskın" bölgede yer almaktadır. Bu durum, ilde termal suların kimyasını etkileyen temel faktörün kaya-su etkileşimi olduğunu göstermektedir (Şekil 9).

İnceleme alanında sertlik değeri Eylül-2021'de 0,57 -128,8 Fr^o arasında Ekim-2022'de 0,17-130,5 Fr^o arasında değişmektedir (Tablo 4). En yüksek sertlik Güçlükönak Belkıs Ana kaplıcalarından alınan örneklerde tespit edilmiştir. En düşük sertlik derecesine sahip su ise en düşük sıcaklığa sahip Başağaç mevkiinde bulunan bir kaynaktan alınmıştır. Fransız sertlik derecesine göre sular Çok Yumuşak, Yumuşak, Sert ve Çok Sert su sınıfında yer almaktadır.



Şekil 9. Gibbs diyagramı (Ekim 2022) (Gibbs diagram (October 2022))

4.2.3. İz elementler (Trace elements)

İnceleme alanındaki sulara As, Al, Br, Ba, Cr, Cd, Cu, Hg, Fe, Ni, Mn, PO₄, Sb, Pb, Se, Zn, Serbest Siyanür ve çözünmeyen maddeler olarak Borik Asit (H₃BO₃), Silikat Asidi (H₂SiO₃), analizleri yapılmıştır. Örneklerde Cd, Cr, Cu, Pb, Sb, Serbest Siyanür değerleri tespit edilememiştir. Diğer parametrelerin analiz sonuçları Tablo 5’de sunulmuştur. İnceleme alanında suların Al içeriği 0,0097 mg/l (9,7 µg/l) ile 8,89 mg/l (8890 µg/l) arasında belirlenmiştir. Alüminyumun Ekim-2022’de ekstrem değerinin tespit edildiği 1 nolu örnek Balveren köyü Besta Meryema kaplıcası Bay tarafındaki havuzdan alınmıştır. Bu örnekte Eylül-2021’de 0,23 mg/l Al değeri tespit edilmiştir. Çevresel faktörlerin etkisine açık olup ilkel kullanımı olan bu suda Ekim-2022’de tespit edilen yüksek Al içeriğinin antropojenik kökenli olabileceği düşünülmektedir. As doğada doğal veya antropojenik kökenli olarak bulunabilmektedir (Şahinci, 1991). Şırnak ilinden alınan sulara As içeriği 11-22 µg/l arasında değişmektedir. İnceleme alanında suların Ba değerleri Ekim-2022’de sadece 4, 5 ve 7 nolu örneklerde tespit edilebilmiştir. Ba içerikleri 0,22-0,95 mg/l arasında değişmekte olup oldukça düşük değerlerdedir (Tablo 5). Bromun başlıca kaynakları deniz suyu, tuzlu yeraltısuyu, potasyumlu tuz yatakları ve tuz gölleridir. Brom endüstride ve tıpta geniş şekilde kullanılmaktadır (Şahinci, 1991). İnceleme alanından alınan suların Br içeriği 0,31-0,98 mg/l arasında değişmektedir. Suların Fe içeriği 0,023 mg/l (2,3 µg/l) ile 0,73 mg/l (73 µg/l) arasında değişmektedir. Sulardaki Fe içeriklerinin düşük olduğu görülmektedir. Sıcak sulara mangan miktarı çok fazla olabilir (Şahinci, 1991). İnceleme alanında suların Mn içeriği 0,0065 mg/l ile 61,08 mg/l arasında değişmektedir.

Nikel, doğal kökenli ve insan aktiviteleri kaynaklı olarak bulunabilmektedir (Şahinci, 1991; Kartal vd., 2004). Termal suların Ni içeriği 0,011-0,025 mg/l arasında değişmektedir. Çoğu su örneğinde Ni tespit edilememiştir. Proje alanında Zn içeriği sadece 6 nolu örnek olarak verilen Güçlükonak Belkısana kaplıcalarından Eylül-2021’de alınan örnekte 0,021 mg/l olarak analiz edilmiştir. Bor, sulara borik asit (H₃BO₃) olarak bulunur. Andezitlerden gelen sulara diğer volkanik kayalara oranla çok daha fazla bor bulunur (Eroğlu ve Aksoy, 2003). İnceleme alanında borik asit içeriği Eylül-2021’de 0,7-3,61 mg/l, Ekim-2022’de ise 0,68-10,24 mg/l arasında tespit edilmiştir. En yüksek borik asit içeriği Başağaç mevkiinde bulunan kaynak suyunun toplandığı havuzdan alınan su örneğinde tespit edilmiştir. Silika (SiO₂), çeşitli sulara asılı kolloidal partiküller olarak polimer halinde, silis asidi (H₂SiO₃) veya silikat iyonu şeklinde olmak üzere bolca bulunur. İnceleme alanında silikat asit içeriği Eylül-2021’de 24,9-51 mg/l, Ekim-2022’de ise 10,3-62 mg/l arasında tespit edilmiştir.

4.2.4. Mikrobiyolojik Parametreler (Microbiological Parameters)

İçme ve kullanma sularının mikrobiyolojik özellikleri önemlidir. İnsan için yalnızca patojenik mikroorganizmalar önem taşır. Hastalık oluşturan mikroorganizmaların analizler ile tespiti zor olduğu için gösterge (indikatör) organizmaların analizi yapılır. Genel olarak içme ve kullanma sularında 22°C - 37°C arasında koloni sayımı yapılır (MEB, 2011). 24.07.2001 tarih ve 24472 sayılı Resmî Gazetede yayınlanan “Kaplıcalar Yönetmeliği” hükümlerine göre su örneklerinin Koliform Bakteri (kob/100mL), Fekal Koliform Bakteri (kob/100mL), 22°C’de Toplam Koloni Sayımı (kob/mL) ve 37°C’de toplam jerm sayımı (kob/mL) analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına bakıldığında Koliform bakteri açısından 1,2,3,4,8,9 ve 10 nolu örneklerin, Fekal koliform bakteri açısından 1 ve 2 nolu örneklerin yönetmelikte verilen sınır değerleri aştığı görülmektedir. 22°C’de Toplam koloni sayımı değerine bakıldığında 1,2,8,9 ve 10 nolu örneklerin, 37°C de toplam jerm sayımı değerine bakıldığında ise 1,2,4,5,8,9 ve 10 nolu örneklerin sınır değerleri aştığı

görülmektedir (Tablo 6). Bu suların içilmesi durumunda önemli sağlık problemleri ile karşılaşılacağı görülmektedir.

Tablo 5. Su örneklerinin eser element ve diğer parametrelere ait analiz sonuçları (*Analysis results of water samples for trace elements and other parameters*)

EKİM 2022										
Örnek no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Al	8,89	0,036	-	0,017	0,018	0,011	0,0097	0,010	0,028	0,038
As	0,014	0,013	0,011	0,020	0,022	0,013	-	-	-	-
Ba	-	-	-	0,22	0,23	-	0,95	-	-	-
Br	-	-	-	0,40	0,40	0,31	0,60	-	-	0,98
Hg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe	-	0,060	0,057	0,039	0,023	0,024	-	-	-	0,033
Mn	41,0	0,020	0,027	0,030	0,020	0,006	-	-	-	-
Ni	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PO ₄	76,38	72,21	73,29	-	-	-	-	-	-	-
Se	-	0,015	0,017	0,0018	0,001	0,002	0,002	0,002	-	0,013
Zn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Borik Asit	1,11	1,37	1,12	3,15	3,19	0,68	6,5	1,03	9,55	10,24
Silikat Asidi	12,4	11,1	10,3	52	41	62	16	17	15	24
EYLÜL 2021										
Al	0,23			0,117		0,12				
As	0,015			0,022		0,015				
Ba	-			-		-				
Br	-			-		0,45				
Hg	-			-		0,0002				
Fe	0,73			0,14		0,13				
Mn	61,08			0,02		0,012				
Ni	0,022			0,025		0,011				
PO ₄	19,18			-		15,40				
Se	0,0012			0,0012		1,18				
Zn	-			-		0,021				
Borik Asit	1,15			3,61		0,7				
Silikat Asidi	24,9			33,9		51				

*Analiz sonuçları mg/l olarak verilmiştir.

Tablo 6. Mikrobiyolojik analiz sonuçları (*Microbiological analysis results of water samples*)

Örnek No	Koliform bakteri kob/100mL	Fekal Koliform bakteri kob/100mL	22°C'de Toplam koloni sayısı kob/mL	37°C de toplam jerm sayısı kob/mL
EYLÜL 2021				
1	8	82	42	304
4	0	0	0	0
6	0	0	0	0
EKİM 2022				
1	68	8	3	0
2	148	68	736	212
3	25	0	7	0
4	2	0	0	488
5	0	0	8	724
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	46	0	162	864
9	72	0	2288	712
10	120	0	2430	2752
Limit	0	0	30	5

4.2.5. Suların içilebilir özellikleri

Şırnak ilinden alınan su örneklerinin içme suyu olarak kullanıma uygunlukları anyon-kasyon ve iz element içerikleri ile fiziksel analiz sonuçlarının ulusal ve uluslararası standartlar ile karşılaştırılması ile değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede İnsani Tüketim Amaçlı Sular hakkında yönetmelik (TS-266, 2005), Dünya Sağlık Örgütü standartları (WHO, 2017), Amerika İçme suyu standartları (EPA, 2018) ve 25657 sayılı Doğal Mineralli Sular yönetmeliği (2010) kullanılmıştır (Tablo 7). İnceleme alanından alınan su örneklerinin pH değerleri 6,56-9,46 arasında, EC değerleri 756-2095 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında olup tüm standart ve yönetmeliklere uygundur. İnceleme alanında suların Na içeriği 54,19-472,06 mg/l arasında değişmektedir. İnsani Tüketim Amaçlı Sular Yönetmelikte sınır değer 200 mg/l olarak verilmiştir. Zümrüt kaplıcaları, Kumçatı ve Başağaç civarından alınan su örneklerinin Na için verilen sınır değeri aştığı görülmektedir. İnceleme alanında suların Cl

içeriği 3,07-378,09 mg/l arasında değişmekte olup, Zümrüt Kaplıcası, Kumçatı ve Başağaç civarından alınan su örneklerinin sınır değer olan 250 mg/l'yi aştığı belirlenmiştir. Suların SO₄ içeriği 2,89-1277,19 mg/l arasında değişmektedir. Besta Meryema, Germav Siftiye, Güçlükönak Belkıs Ana Kaplıcaları ve Kumçatı mevkiilerinden alınan su örneklerinin SO₄ içeriklerinin içme suyu olarak kullanım için sınır değer olan 250 mg/l'yi aştığı belirlenmiştir.

İnceleme alanında suların As içeriği 11-22 µg/l arasında değişmektedir. Değerlendirilen standart ve yönetmeliklerin tamamında As için standart değer 10 µg/l olarak verilmiştir. Tüm su örneklerinin As için verilen içme suyu sınır değerini aştığı görülmektedir. İnceleme alanında suların Mn içeriği 0,0065 mg/l ile 61,08 mg/l arasında değişmektedir. Proje alanından alınan örneklerde sadece Eylül-2021'de 1 nolu Besta Meryema Kaplıcası kaynak suyundan alınan örneklerde 61,08 mg/l Mn tespit edilmiştir. Bu içerik sınır değerlerin üzerindedir. Proje alanında suların Se içeriği 0,0012-1,18 mg/l arasında değişmektedir. En yüksek Se içeriği sadece Eylül-2021'de 6 nolu Güçlükönak Belkıs Ana kaplıcalarından alınan örnekte tespit edilmiştir. Se için verilen sınır değer yönetmeliklere göre değişmekle birlikte 10-50 µg/l arasında verilmiştir. İlde termal su örneklerinde yaptırılan Ba, Fe, Ni ve Zn konsantrasyonlarının ise sınır değerleri aşmadığı tespit edilmiştir.

Tablo 7. Ulusal ve uluslararası standartlara göre elementlerin sınır değerleri (Limit values of elements according to national and international standards)

	İnsani Tüketim Amaçlı Sular Yön. TS-266, (2005)	WHO (2017)	EPA (2018)	Doğal Mineralli Sular Yönetmeliği 2004
Sıcaklık	25	---	---	---
pH	6.5-9.5	---	6.5-8.5	---
EC (µS/cm)	2500	2500	---	---
Na ⁺ (mg/l)	200	---	---	---
K ⁺ (mg/l)	---	---	---	---
Ca ²⁺ (mg/l)	---	---	---	---
Mg ²⁺ (mg/l)	---	---	---	---
Cl ⁻ (mg/l)	250	---	250	---
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	250	---	250	---
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	---	---	---	---
Al (µg/l)	200	---	50-200	200
As (µg/l)	10	10	10	10
B (µg/l)	1000	2400	---	---
Ba (µg/l)	---	1300	2000	1000
Cd (µg/l)	5	3	5	3
Cr (µg/l)	50	50	100	50
Cu (µg/l)	2000	2000	1000	1000
F (mg/l)	1.5	1.5	2	5
Fe (µg/l)	200	---	300	---
Hg (µg/l)	1	6	2	1
Mn (µg/l)	50	---	50	500
Ni (µg/l)	20	70	---	20
Pb (µg/l)	10	10	---	10
Sb (µg/l)	5	20	---	5
Se (µg/l)	10	40	50	10
U (µg/l)	---	30	30	---
Zn (µg/l)	---	---	5000	---
NO ₃ (mg/l)	50	50	10	50
NO ₂ (mg/l)	0.5	3	1	0.1
Siyanür (µg/l)	50	---	---	70

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Şırnak ilinde Güçlükönak-Belkıs Ana, Kumçatı (İkizce), Balveren-Besta ve Beytüşşebap-İlıcak bölgelerinde jeotermal alanlar bulunmaktadır. Bu alanlarda genel olarak basit kaplıcalar veya havuzlar ile yararlanılmaktadır. Bölgedeki en düzenli kaplıca Güçlükönak jeotermal alanındaki Belkıs Ana kaplıcalarıdır. Burada 63 °C sıcaklıklara ulaşan jeotermal kaynak boşalmaları mevcuttur. Diğer önemli kaplıca ise 43 °C sıcaklıkların ölçüldüğü Beytüşşebap-İlıcak jeotermal alanındaki Zümrüt Kaplıcasıdır. Şırnak ilinde kaynak şeklinde boşalan doğal jeotermal akışkandan yararlanılmaktadır. Şırnak ilinde bulunan jeotermal alanlarda jeotermal sistem tektonik kontrollü olarak gelişmiştir. İnceleme alanında farklı yaştaki karbonatlı kayalar karstik kaya özelliğinde olup jeotermal sistemin rezervuar kayalarını oluşturmaktadır. Marn ve killi litolojiler örtü kaya niteliğindedir.

Araştırma kapsamında alınan su örneklerinin sıcaklıkları 13,5-63 °C arasında değişmekte olup en yüksek sıcaklık Güçlükönak'da bulunan Belkıs Ana kaplıcalarında ölçülmüştür. En düşük sıcaklık ise Başağaç mevkiinde bulunan

doğal kaynaktan alınmıştır. Su örneklerinin pH değerleri 6,56-9,46 ve EC değerleri 756-2095 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişmektedir.

İnceleme alanındaki sular genel olarak iki su tipine ayrılabilir. Bunlar; (1) Ca-Mg-HCO₃-SO₄/ Ca-Mg-SO₄-HCO₃ (2) Na-Ca-Cl-HCO₃/Na-Ca-HCO₃-Cl biçimindedir. (1) su tipi beslenme alanı ve/veya yakınında bulunan nispeten orta dolaşım süresine sahip, iyon miktarı yüksek karışım sularını, (2) su tipi düşük hidrolik iletkenliğe sahip akifer içerisinde yavaş dolaşım nedeniyle kayaçla temas süresi uzadığı için iyon miktarı daha yüksek yaşlı suları temsil etmektedir. Şırnak ilinde termal suların kimyasını etkileyen temel faktörün kaya-su etkileşimi olduğu söylenebilir. Besta-Meryema, Belkıs Ana ve Kumçatı kaplıcalarından alınan sularda Ca, Mg ve SO₄ içeriklerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu örneklerdeki Ca, Mg artışı bölgede yaygın olarak gözlenen Eosen ve Paleosen yaşlı Neritik kireçtaşları ile dolomitik kireçtaşı ve dolomit birimleri ile temastan kaynaklanmaktadır. SO₄ artış ise muhtemelen evaporitik birimlerle kaya suyu etkileşimi ile ilişkilidir. Zümrüt Kaplıcaları, Kumçatı ve Başağaç mevkiilerinden alınan sularda Na içeriğinin baskın olduğu tespit edilmiştir. Bu su örneklerindeki Na artışı kaya-su etkileşimi kaynaklıdır.

İnceleme alanındaki sularda As, Al, Br, Ba, Cr, Cd, Cu, Hg, Fe, Ni, Mn, PO₄, Sb, Pb, Se, Zn, Serbest Siyanür ve çözünmeyen maddeler olarak Borik Asit (H₃BO₃), Silikat Asidi (H₂SiO₃), analizleri yapılmıştır. Örneklerde Cd, Cr, Cu, Pb, Sb, Serbest Siyanür değerleri tespit edilememiştir. Ba, Fe, Ni ve Zn konsantrasyonlarının ise sınır değerleri aşmadığı görülmüştür. İnceleme alanında suların As içeriği 11-22 $\mu\text{g}/\text{l}$ arasında değişmektedir. Değerlendirilen standart ve yönetmeliklerin tamamında As için standart değer 10 $\mu\text{g}/\text{l}$ olarak verilmiştir. Tüm su örneklerinin As için verilen içme suyu sınır değerini aştığı görülmektedir. Besta Meryama kaplıcası kaynak suyunda Mn içeriğinin ve Belkıs Ana Kaplıcasında Se içeriklerinin içme suyu sınır değerlerini aştığı belirlenmiştir. Ayrıca, araştırma kapsamında su örneklerinin koliform ve fekal koliform bakteri analizleri yapılmıştır. Bazı su örneklerinde Kaplıcalar Yönetmeliğinde verilen sınır değerlerin aşıldığı tespit edilmiştir. Şırnak ilinden alınan termal su örneklerinin majör anyon, iz element ve mikrobiyolojik analiz sonuçlarına göre uzun süreli içme suyu olarak kullanımının uygun olmadığı belirlenmiştir. Elde edilen çıktılar termal suların modern tesisler ile sağlığa uygun kullanımının sağlanabilmesi için hangi parametrelerin risk taşıdığını ortaya koymuştur. Bu sonuçlar dikkate alınarak gerekli önlemler alınmalı ve bu jeotermal alanların kullanımı geliştirilmelidir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Şırnak Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2021.ÖNAP.11.03.01 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Baba, A., Gökçen Akkurt, G., Demir, M.M., Yeşilnacar, İ., Nalbantçılar, M.T., Şaroğlu, F., Kuzgunkaya, E., Akkuş, İ., Özel, N., Arslan, Ş., Dursun, N., Yazdanı, H., 2015a. GAP İlleri Jeotermal Kaynakları Araştırma Projesi Sonuç raporu.
- Baba, A., Akkuş, İ., Şaroğlu, F., Özel, N., Yeşilnacar, İ., Nalbantçılar, M.T., Demir, M.M., Gökçen, G., Arslan, Ş., Yazdanı, H., Kuzgunkaya, E., Dursun, N., 2015b. Güneydoğu Anadolu Bölgesindeki (GAP) Jeotermal Kaynakların Hidrojeokimyasal Özellikleri. III. Jeotermal Kaynaklar Sempozyumu- 04-06 Kasım 2015-Ankara, Bildiriler kitabı 207-218
- Baba A., Sözbilir H., 2012. Source of Arsenic Based on Geological And Hydrogeochemical Properties of Geothermal Systems in Western Turkey. *Chemical Geology* 334(12): 364-377.
- Bozkurt, E., 2001, Neotectonics of Turkey-a synthesis. *Geodinamica Acta*, 14, 3-30
- Çoruh, T., 1991. Adıyaman Civarındaki (XI Bölge Kuzeybatısı Ve XII. Bölge) Yüzeyleyen Kampaniyen-Tanesiyen İstifinin Biyostratigrafisi Ve Paleocoğrafik Evrimi, TPAO Araş. Rap. No: 1656, 94 S.
- Çoruh, T., Yakar, H., Ediger, V.Ş., 1997. Güneydoğu Anadolu Bölgesi Otokton İstifinin Çorbiyostratigrafi Atlası. TPAO, Araştırma Merkezi Grubu Bşk., Eğitim Yayınları, No: 30.
- Egemeier, S.J. 1981. Cavern development by thermal waters. *NSS Bulletin*, 43:2, 31-
- EPA, 2018. Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories Tables. EPA 822-F-18-001, Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency Washington, DC
- Ercan, T., Şaroğlu, F., Turhan, N., Matsuda, J., UI, Fujitani, T., Notsu, K., Bağırşakçı, S., Aktimur, S., Can, B., Emre, Ö., Akçay, A.E., Manav, E., Gürler, H., 1991. Karacadağ Volkanitlerinin Jeolojisi Ve Petrolojisi. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, S 6, S. 118-133.

- Eroğlu A., Aksoy N., 2003. Jeotermal Suların Kimyasal Analizi, VI. Ulusal Tesisat Kongresi, Jeotermal Enerji Semineri Kitapçığı. 149-183.
- Freeze, A.R., Cherry A.J., 1979. Groundwater by Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. 07632 London UK.
- Gibbs, R.J., 1970. Mechanisms to Trace Metal Transport in Rivers. Science, 180:71-173.
- Goldscheider, N., Mádl-Szönyi, J., Eróss, A., Schill, E., 2010. Review: thermal water resources in carbonate rock aquifers. Hydrogeology Journal 18(6): 1303-1318. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0611-3>.
- Güler, Ç. ve Çobanoğlu, Z., 1997. Su Kalitesi, Çevre Sağlığı Temel Kaynak Dizisi No: 43, Türkiye Sağlık Bakanlığı yayınları.
- IAH,1979. International association of hydrogeologists, map of mineral and thermal water of Europe. Scale 1:500,000, United Kingdom
- Kartal, G., Kahvecioğlu, Ö., Güven, A., Timur, S., 2004. Metallerin çevresel etkileri-II. Metalurji dergisi, 137, 46-51.
- Koçak, A., 2000. Türkiye’de Jeotermal Enerji Aramaları Ve Potansiyeli. Türkiye 8.Enerji Kongresi. (109-124). Basım Yeri : Ankara
- MEB, 2011. Milli Eğitim Bakanlığı, Çevre Sağlığı, Suların Analiz Parametreleri (850CK0011) kitabı, Ankara,
- MTA, 2007a. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 1/100000 ölçekli Türkiye Jeoloji haritaları, Cizre N-48 paftası, No:59
- MTA, 2007b. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 1/100000 ölçekli Türkiye Jeoloji haritaları, Cizre M-50 paftası, No:56
- MTA, 2008a. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 1/100000 ölçekli Türkiye Jeoloji haritaları, Mardin M-47 paftası, No:66
- MTA, 2008b. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 1/100000 ölçekli Türkiye Jeoloji haritaları, Cizre M-49 paftası, No:57
- OSB, 2016. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, III. Bölge Müdürlüğü Şırnak Şube Müdürlüğü, Şırnak İli Tabiat Turizmi Master Planı 2016-2019
- Özel, N., Bekişoğlu, Ş., 2002. Güneydoğu Anadolu Bölgesi Termal Su Kaynaklarının Seracılık ve Termal Turizmde Değerlendirilmesi. ÇESAV, Yayın No.1, Ankara, 158s.
- Özel, N., 2001. GAP Bölgesi’nin Jeolojisi Maden ve Enerji Kaynakları 2001, Şanlıurfa
- Sungurlu, O., 1974. IV. Bölge Kuzey Saha Jeolojisi: Türkiye 1.Petrol Kongresi Tebliğleri, 85-107.
- Şahinci, A., 1991. Doğal Suların Jeokimyası, Reform Matbaası, Bölüm 2, 33, İzmir.
- Şaroğlu, F., Emre, Ü. 1987. Karacadağ Volkanitlerinin Genel Özellikleri Ve Güneydoğu Anadolu Otoktonundaki Yeri: Türkiye 7.Petrol Kongresi Bildiriler Kitabı, 384-391.
- Şaroğlu, F., 1987. Doğu Anadolu’da Neotektonik Dönemdeki Jeolojik Evrim Ve Havza Modelleri. Mta Dergisi, 107, S.73-94
- Şimşek, Ş., 2002. Potential and Developments of Geothermal Energy in Turkey, ENERGY’2002 Conference, Proceedings İstanbul, 1-10.
- TS-266, 2005. İnsani Tüketim Amaçlı Sular. Türk İçme Suyu Standartları TS 266 Sayılı Standart -Türk Standartları Enstitüsü - Ankara.
- TSE, 2010. Doğal Mineralli Sular, TSE 9130, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- WHO, 2017. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum, ISBN 978-92-4-154995-0



TASARIM, SÜREÇ YENİLİĞİ VE DİJİTAL DÖNÜŞÜM İLE TOPLAM VERİMLİLİĞİN ARTTIRILMASINA İLİŞKİN ÖRNEK BİR UYGULAMA

Erhan ÖZKAN*

Dikkan Ar-Ge Merkezi, İzmir, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Ürün Verimliliği,
Sistem Verimliliği,
Dijital Dönüşüm,
Süreç Yeniliği,
Operasyonel Verimlilik.

Öz

Çalışmanın temel amacı tasarımdan son kullanıma kadar olan süreçlerdeki topyekûn verimlilik artışının detaylı olarak ele alındığı özgün bir çalışmanın literatüre kazandırılmasıdır. Çalışmada tasarım ile ürün verimliliğinin, süreç optimizasyonu ile enerji verimliliğinin, dijital dönüşüm ile operasyonel verimliliğin artırılmasına ilişkin bilgisayar destekli tasarım, simülasyon, sayısal analiz ve dijital dönüşüm yazılımlarından faydalanılmıştır. Elde edilen bulgular neticesinde tasarım iyileştirme ile ürün veriminde %81,5, süreç optimizasyonu ile enerji ve işçilikte %45, operasyonel verimlilikte ise %55 mertebelerinde artış elde edilerek ülke ekonomisine katkıda bulunacak bir sistem kazandırılmıştır. 3D tasarımlar Solidworks katı modelleme ve tasarım programlarında gerçekleştirilmiştir. Mekanik işlemler ANSYS simülasyon programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. ANSYS Fluid modu kullanılarak akış katsayısını ve sıvı direnci katsayısını tanımlamak için hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri yapılmıştır. Üretim parametrelerinin tanımlanması için Anycasting simülasyon programları kullanılmıştır. Dijital dönüşüm kapsamında ülkemizde ilk defa üretim ekipmanları ile hiçbir ara yazılım kullanılmadan haberleşebilen, harici bir yazılım ve lisansa ihtiyaç duyulmadan çalışabilen özgün bir veri izleme sistemi hayata geçirilmiştir.

A SAMPLE PRACTICE ON INCREASING TOTAL EFFICIENCY WITH DESIGN, PROCESS INNOVATION AND DIGITAL TRANSFORMATION

Keywords

Product Efficiency,
System Efficiency,
Digital Transformation,
Process Innovation,
Operational Efficiency.

Abstract

The primary goal of this research is to bring an original study into the literature, in which the overall productivity increase in the processes from design to final use was discussed in detail. In the study, computer aided design, simulation, numerical analysis, and digital transformation software were used to increase product efficiency with design, process optimization and energy efficiency, and operational efficiency with digital transformation. With the findings obtained, an increase of 81.5% in product efficiency with design, 45% in energy and labour through process optimization, and 55% in operational efficiency has been achieved, resulting in a system that will benefit the economy of the nation. 3D designs were realized in Solidworks solid modelling and design programs. Mechanical were carried out with FEA method by using the ANSYS simulation program. CFD analyses were carried out to define flow coefficient, and fluid resistance coefficient by using the ANSYS Fluid mode. Anycasting simulation programs was used to define the production parameters. Within the scope of digital transformation, first time ever in our nation, a unique data monitoring system that can communicate with production equipment without use of any middleware and may run without requiring an external software and license has been implemented.

Alıntı / Cite

Özkan, E., (2024). Tasarım, Süreç Yeniliği ve Dijital Dönüşüm ile Toplam Verimliliğin Arttırılmasına İlişkin Örnek Bir Uygulama, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(1), 156-175.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

E.Özkan , 0000-0002-3849-6713

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	11.05.2023
Revizyon Tarihi / Revision Date	08.09.2023
Kabul Tarihi / Accepted Date	21.02.2024
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: erhan.ozkan@dikkan.com , +90-232-877-1714

A SAMPLE PRACTICE ON INCREASING TOTAL EFFICIENCY WITH DESIGN, PROCESS INNOVATION AND DIGITAL TRANSFORMATION

Erhan ÖZKAN^{1†}

Dikkan R&D Center, İzmir, Türkiye

Highlights

- Net weight was decreased by design operations from 42.4 kg to 29.1kg.
 - Total consumption energy from production to end of lifecycle was decreased from 1800 MJ to 1365 MJ.
 - The increase in the product efficiency was increased %81.5 by computer aided design, analyses, and simulation.
 - Operational efficiency was increased %36 by the help of digital transformation.
-

Graphical Abstract

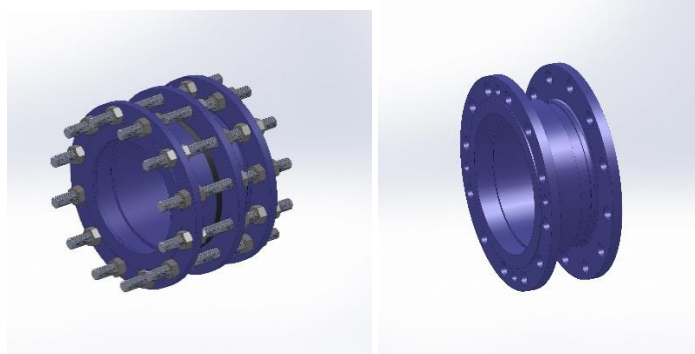


Figure. The Visual of Old Design and Process (left), New Design and Process Optimization

Purpose and Scope

The motivation that started this study was the desire to discuss the overall productivity increase in the process from design to final use in detail.

Design/methodology/approach

Computer aided design, simulation, numerical analysis, and digital transformation software were used to increase product efficiency with design, process optimization and energy efficiency, and operational efficiency with digital transformation.

Findings

With the findings obtained, an increase of 81.5% in product efficiency with design, 45% in energy and labour through process optimization, and 55% in operational efficiency has been achieved, resulting in a system that will benefit the economy of the nation.

Research limitations/implications

The process to fulfil the requirements of EN 1267 and EN 1074 standards by using raw material data in accordance with EN GJS 400-18 LT standard of valves widely used in drinking water, distribution lines, industrial applications, water treatment plants, pumping stations, sea water applications and industrial waste systems.

Practical implications

Reducing the friction on the flap surface in valve systems, which are widely used in water transport systems and whose discovery dates back centuries, to achieve low carbon emissions and high energy efficiency with a unique design. Then, to increase system efficiency with process improvements and finally to develop software systems that will maximize operational efficiency with digital transformation. For this purpose, current products and fluid dynamics calculations with the desired target have been reviewed with simulation studies and the design processes that will minimize the friction on the surface regarding to computer-aided design and prototype manufacturing were explained in detail.

[†] Corresponding author: erhan.ozkan@dikkan.com , +90-232-877-1714

Social Implications

Per capita water consumption in the world is around 800 m³, 1.4 billion people, which corresponds to approximately 20% of the world's population, cannot benefit from adequate drinking water, while 2.3 billion people are completely deprived of drinking water. It is predicted that the number of countries suffering from water shortages will increase to 54 and the number of people who must live under these conditions will increase to 3.76 billion in 2050, which means that 40% of the world's population, expecting to be 9.4 billion in 2050, will suffer from water shortages. In this case, it has become inevitable to use water resources effectively and to prevent water waste. For this purpose, it has become inevitable to minimize water loss in fluid transportation and storage systems.

Originality

Within the scope of digital transformation, first time ever in our nation, a unique data monitoring system that can communicate with production equipment without the use of any middleware and may run without requiring an external software and license has been implemented.

1. Giriş (Introduction)

Verimlilik; üretim, hizmet, servis sistemlerinde meydana gelen çıktı ve bu çıktı için harcanılan girdiler arasındaki ilişkinin en yalın ifadesidir ve çok az veya hiç israf etmeden, minimum kaynaklar ile nihai hedefe ulaşma yeteneği olarak tanımlanabilir (Young ve diğerleri, 2020). Farklı kaynaklarda çeşitli uygulamalar için birden fazla tanımla ile karşılaşılması sebebiyle etkinlik, etkililik, üretkenlik gibi terimlerle çoğunlukla karıştırılmaktadır. Daha sade bir ifadeyle verimlilik, sahip olunan kaynakların mümkün olan en iyi şekilde kullanılmasıyla hedeflenen sonuca ulaşma metodolojisidir (Wang ve diğerleri, 2019).

Önceki senelerde imalat ve üretim terimleri arasındaki farklılıkların anlatıldığı, katma değer ve hizmetin imalatı üretime dönüştürdüğü çalışmalar etkin üretim araştırmalarının temelini oluşturmuştur. Bu da üretkenlik ve verimlilik terimlerinin ortaya çıkmasına sebep olmuştur (Zakari ve diğerleri, 2022). İmalat bir ürünü hammadde ve yarı-mamullerden nihai şekline dönüştürme gibi daha genel bir ifadeyken, üretim bu dönüştürme işlemi somut olmayan tasarım, danışmanlık, insan kaynakları, finans gibi hizmetlerin bütünsel ele alındığı bir süreci kapsamaktadır (Thakur ve diğerleri, 2021). Üretim sistemlerinin geliştirilmesi ile üretkenlik terimi hayatımıza girmiştir. Sade bir ifadeyle üretkenlik; bir ekip, işletme veya birey tarafından üretilen iş miktarıdır. Kalite sistemlerinin gelişmesi, yalın üretim yaklaşımı, azalan doğal kaynaklar ve artan maliyetler ile üretilen iş miktarı için kullanılan kaynakların yüksek oranı verimlilik terimini ortaya çıkartmıştır (Sickers ve Valentin, 2019; Dieppe, 2021: 42; Kazekami 2020; Pan ve diğerleri, 2022; Audretsch ve Maksim, 2020; De Loecker ve Chad, 2021).

Verimlilik çoğunlukla teknik bir terim olarak ele alınmakla birlikte sosyal bir kavram olduğu düşünülerek konu hakkında yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Sosyal verimlilik kavramı, yeni devlet yönetimi paradigması bağlamında ele alınmaktadır. Buna göre sosyal verimlilik; devlet, kurum ve kuruluşların kaynak tahsisi sorununu ekonomik olarak ele almasını içeren politik bir metodolojidir. Bir kararın ve/veya politikanın tüm özel ve sosyal maliyet ve faydalarını dikkate almak anlamına gelmektedir (Çankaya ve Sezen, 2019; Flammer ve diğerleri, 2019; Dubey ve diğerleri, 2019; Brogi ve Valentina, 2019; Xie ve diğerleri, 2019).

Gerek teknik gerekse de sosyal verimlilik konularında ortak olan nokta ekonomik olarak insan ve tabiata fayda sağlayan sistemlerin bütünlük olarak ele alınmasıdır. Ekonomistler fayda sağlayan bu sistemi; tahsis verimliliği, üretken verimlilik ve dinamik verimlilik başlıkları altında değerlendirmektedir (Chen ve diğerleri, 2019). Tahsis verimliliği, üretimin tüketici tercihleriyle uyumlu olduğu ekonomik bir durumdur. Bir malın (ya da bir hizmetin), üretiminden son tüketiciye kadar giden yolda marjinal üretim maliyetlerinin marjinal faydaya eşit olduğu seviyeye kadar sunulmasıdır (Sun ve diğerleri, 2019). Bir başka ifadeyle; bir toplumun ürettiği belirli mal karışımının, toplumun en çok arzuladığı bileşimi temsil etmesi anlamına gelir. Örneğin, daha genç bir nüfusa sahip olan bir toplum sağlık hizmetleri üretimi yerine eğitim üretimini tercih eder. Üretim verimliliği olarak da bilinen üretken verimlilik, bir ekonomideki kaynaklardan mümkün olan en büyük çıktıyı üretmenin iktisadi kavramıdır (Safitri ve diğerleri, 2020). Bir şirketin bir üründeki üretken verimliliğe ulaştığı noktada ya başka bir ürünün üretim seviyesini düşürmesi ya da ek birim oluşturması gerekliliği dinamik verimlilik kavramını ortaya çıkartmıştır. Dinamik verimlilik, zaman içinde tahsis ve üretken verimliliğin iyileştirilmesini içerir. Bu, yeni veya daha iyi ürünler geliştirmek ile mal ve hizmet üretmenin daha iyi yollarını bulmak anlamına gelebilmektedir (Dong ve diğerleri, 2022; Sun ve diğerleri, 2016; Hatfield ve Dold, 2019; Economidou ve diğerleri, 2020; Nuchturee ve diğerleri, 2020; Bimpizas ve diğerleri, 2021).

Verimlilik artırma uçtan uca ele alınması gereken bir kavramdır. Ürün, süreç ve sistemlerdeki verimlilik artırma çalışmaları kurum ve kuruluşların öncelikleri haline gelmiştir. Tüm süreçlerde verimlilik artışı kaliteden ödü

vermeden maliyet düşürme proseslerini içermektedir. Maliyet düşürme; doğal kaynakların, iş gücünün, hammaddenin, enerjinin üretim, nakliye ve depolama süreçlerinde minimum seviyede kullanılmasını içeren sistematığı kapsar. Bunu sağlamak için ürünlerde tasarım, süreçlerde optimizasyon ve üretimde dijital dönüşüm çalışmalarına ağırlık verilmektedir (Wu ve diğerleri, 2020; Xu ve diğerleri, 2020; Guo ve Yijun, 2020; Bampatsou ve Halkos, 2019).

Bu çalışmada; tasarım geliştirme, süreç optimizasyonu ve dijital dönüşüm ile toplam verimlilik değerlerinin artırılması ve operasyonel verimliliğin yükseltilmesine ilişkin gerçekleştirilen araştırmaların detaylarına ait verilerin paylaşılması amaçlanmıştır. Bu nedenle ilk aşamada; günümüzün önemli konularından bir tanesi olan su kaynaklarının verimli kullanılması, suyun israfının ortadan kaldırılması, gereksiz kullanımların minimize edilmesi amacıyla su sistemlerini kontrol eden vanaların tasarımı üzerine gerçekleştirilen araştırmalara yer verilmiştir. Bu amaçla bilgisayar destekli tasarım, simülasyon ve dijital analiz sistemlerinden faydalanılmak suretiyle tasarım geliştirilerek verim artışı sağlanmıştır. Bu çalışmalarda önemli bir diğer konu ise bilgisayar destekli tasarım, simülasyon sistemleri ve analiz programları etkin bir şekilde kullanılarak ürünlerin üretilip sahaya alınmasına gerek kalmadan zaman, malzeme, enerji ve iş gücü tasarrufları sağlanmış, yanlış veya hatalı bir uygulamanın sebep olabileceği maddi kayıpların önüne geçilmiştir. Birinci aşamada malzeme ve enerji değerlerinde elde edilen tasarruflarla verimlilik sağlanmış ancak lojistik ve montaj verilerinde bir iyileşme kaydedilmemiştir. İkinci aşamada süreç optimizasyonu çalışmaları ile ürünlerin sahaya sevki ve sahadaki montaj uygulamalarının iyileştirilmesi ile artan verimlilik çalışmalarının detayları aktarılmıştır. Lojistik verimliliğini arttırmak amacıyla ürünler hafifleştirilmiş, boyları kısaltılmış ve depolama alanı arttırılacak şekilde süreçler iyileştirilmiştir. Montaj verimliliğini arttırmak için ürünlerdeki bağlantı ve sızdırmazlık elemanlarının süreci yeniden ele alınarak minimum enerji ve işçilik ile komponentlerin bir araya getirilebileceği bir süreç geliştirilmiştir. Üçüncü ve son aşamada operasyonel verimlilik değerlerinin yükseltilmesi için dijital dönüşüm süreçlerinin detayları aktarılmıştır. Döküm yöntemi ile üretilen ürünlerin simülasyon programları ile döküm üretiminin veriminin artırılması operasyonel verimliliğin artışına çok büyük bir katkı sağlamamaktadır. Burada esas olan nokta üretim verilerinin dijital olarak kayıt altına alacak yazılımların geliştirilmesi, alınan kayıtların işleneceği otomasyon sistemlerinin devreye alınması ile toplanan verilerin kayıt altına alınarak büyük veri, nesnelere interneti, yapay zekâ çalışmalarının temelini oluşturulmasıdır. Çalışmanın benzer çalışmalara göre fark meydana getiren, tasarım ve süreç iyileştirme aşamalarında elde edilen verimlilik artışını taçlandıran özgün kısmı bu dijital dönüşüm sisteminin geliştirilmesi ve devreye alınmasıdır. Türkiye’de ilk defa üretim ile hiçbir ara yazılıma ihtiyaç duymaksızın veri alış-verişinde bulunabilen, makineler arasında haberleşebilen, ilave bir yazılım ve lisansa ihtiyaç duymadan çalışabilen özgün bir veri izleme sistemi tasarlanmış, entegrasyonu sağlanmış ve canlı uygulamaya geçilmiştir. Özgün vana tasarımının çıktısı olan ürün KOSGEB Ar-Ge İnovasyon Destek Programı neticesinde başarıyla sonuçlanarak iki ulusal, iki uluslararası patent başvurusu ile tescil edilmiştir. Süreç optimizasyon çalışmalarında elde edilen özgün demontaj sistemine ait faydalı model başvurusu gerçekleştirilmiş ve bu çalışmaların operasyonel verimliliğini arttırmaya yönelik dijital dönüşüm için geliştirilen sistem TÜBİTAK tarafından desteklenen “1501-Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı” kapsamında başarıyla tamamlanan bir proje ile sonlandırılmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde bu bilgilerin ana sebepleri anlatılmış, ikinci bölümünde ise literatürde yer alan tasarım geliştirme, süreç optimizasyonu ve dijital dönüşüm araştırmalarının detayları aktarılmış, bu araştırmalar ile verimlilik arttırmaya yönelik olan örnek uygulamalara yer verilmiştir. Bu örneklerin detaylarına inildiğinde uçtan uca verimlilik artışının ele alındığı bir çalışmanın henüz yer almadığının gözlenmesi neticesinde üçüncü bölümde; tasarım ile ürün verimi, optimizasyon ile süreç verimi ve dijital dönüşüm ile operasyonel verimliliği arttıran yöntemlerin detayları aktarılmış, dördüncü bölümde bu yöntemlere ait bulgular ele alınmış, beşinci bölümde ise sonuçlar ve değerlendirmelere yer verilerek çalışma sonlandırılmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

OECD ülkeleri tarafından verimlilik arttırmaya yönelik Ar-Ge faaliyetleri Frascati (TÜBİTAK, 2002), Oslo (TÜBİTAK, 2005) ve Canberra Kılavuzlarında (TÜBİTAK, 1995) tanımlanmış olup Türkiye’de bu faaliyetleri yürütmek adına Bilim ve Teknoloji Yüksek Kurulu tarafından TÜBİTAK’ın görevlendirildiği tebliğ edilmiştir (TÜBİTAK, 2010). Frascati Kılavuzu ile ürünlerde gerçekleştirilen tasarım, araştırma ve geliştirme faaliyetleri tanımlanmıştır. Buna göre ürün tasarımı; temel araştırma (basic research), uygulamalı araştırma (applied research) ve deneysel geliştirme (experiental development) aşamalarından oluşmaktadır. Ürünün temel bilimler ışığında ele alınması ile fizik, kimya, biyoloji ve matematik alanlarının çalışmalarını kapsayan fazların bir bütün olarak ele alınması temel araştırmayı özetlemektedir (Evkaya, 2021). Suyun tasarrufuna ilişkin çalışmalarda biyolojik su döngüsü, kimyasal olarak suyun ayrıştırılması, fiziksel olarak akış karakteristiğinin belirlenmesi ve matematiksel olarak akış hızına göre verimlerinin hesaplanmasından faydalanılmaktadır. Temel araştırma aşamasından elde edilen veriler ele alınarak uygulamalı araştırma kademesine geçilir (Karakuş, 2021). Uygulamalı araştırma kısmında sayısal analiz, simülasyon, akışkanlar mekaniği, sonlu elemanlar analizi, bilgisayar destekli tasarım çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Bilgisayar destekli tasarım İngilizce Computer Aided Desing kelimelerinin baş harflerin kısaltılması ile CAD şeklinde kısaca tanımlanmakta olup tasarım süreçlerine yardımcı

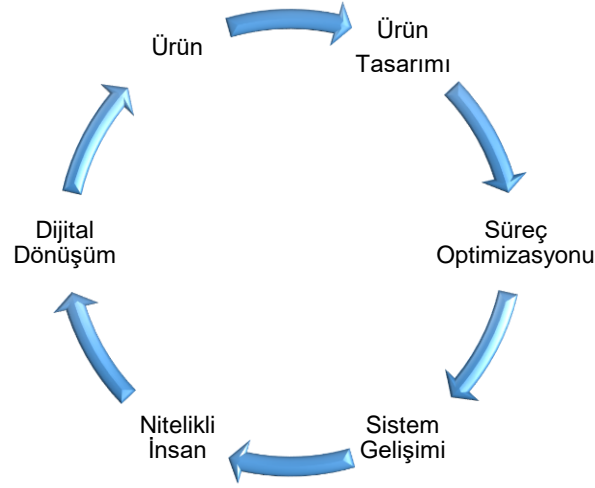
olmak için bilgisayar tabanlı yazılımların kullanılmasıdır (Falivene ve diğerleri, 2019; Jhamb ve diğerleri, 2020; Otte, 2020). CAD yazılımı, farklı türde mühendisler ve tasarımcılar tarafından sıklıkla kullanılmakta olup; iki boyutlu (2D) çizimler veya üç boyutlu (3D) modeller oluşturmak için yaygın olarak tercih edilmektedir. CAD yetenekleri; teknolojik uzmanlık, güçlü bilgisayar becerileri, mühendislik, eleştirel düşünme, iletişim ve endüstri bilgilerinin sentezini kapsar (Hussein ve diğerleri, 2020; Zakoldaev ve diğerleri, 2019). Mekanik ve yapısal tasarım becerileri ile mühendislik ilkelerini anlamayı içerir (Wu ve diğerleri, 2019). Uygulamalı araştırma sürecini takip eden deneysel geliştirme kısmı ise prototip üretim, pilot üretim ve saha uygulamalarının gerçekleştirildiği, uygulamalı araştırma verilerinin geçerli kılındığı prosesleri detaylandırmaktadır. Deneysel geliştirme, ürün tasarımının her türlü gelişmelerinin ve verimlilik değerlerinin elde edildiği nihai kısımdır. Bir sonraki aşamada üründen süreçlere geçişin temelleri sağlanmış olunur. Bu da süreç optimizasyonu ile sağlanmaktadır ve bu süreçle ilgili verimlilik Oslo Kılavuzu'nda detaylandırılmıştır.

Oslo Kılavuzu'na göre yenilik (inovasyon); bir süreçte optimizasyonun sağlanması, verimliliğin yükseltilmesi, lojistik ve montaj sisteminin hayata geçirilmesine ait sistematik çalışmaların bir bütünüdür. Frascati Kılavuzu'nda ürüne ait yenilik verileri ele alınmış olması sebebiyle Oslo Kılavuzu'nda tanımlanan inovasyon, süreçlerde meydana gelen revizyonları içermektedir. TÜBİTAK tarafından tercüme edilen Oslo Kılavuzu'nda bir ürünün üretimine, lojistiğine ve montajına ait birim maliyetlerin azaltılması, kalitenin artırılması veya önemli derecede iyileştirilmiş ürünleri üretmenin ve teslim etmenin detaylarını kapsamaktadır (TÜBİTAK, 2006). Otomasyon sistemlerinin geliştirilmesini takiben süreçleri organize edebilen üretim sistemleri, yazılımlar ve robotik uygulamaların ele alındığı dijital dönüşüm stratejileri ise kritik bir öneme sahiptir (Vishwakarma ve diğerleri, 2019).

Dijital dönüşüm, kurum ve kuruluşların temel değişimini yönlendirmek için teknolojilerini işletmelerine entegre ettiği süreç olarak tanımlanmaktadır (Vial, 2019). Sağladığı faydalar; artan verimlilik, daha fazla iş çevikliği ve nihayetinde çalışanlar, müşteriler ve hissedarlar için yeni değerlerin kilidini açma olarak özetlenebilmektedir. Dijital dönüşüm örnekleri arasında bir bulut ortamına geçiş, uzaktan hazır olma, çalışanlara yeniden beceri kazandırma, müşteri desteğini ve hizmetini hızlandırmak için otomasyon uygulama ve satış verimliliğini artırmak için yapay zekâ güdümlü içgörülerini kullanma gibi bilişim teknolojilerinin modernizasyonu yer alır. Dijital dönüşüm stratejileri 3-D metodu ile ele alınabilir; Doğru sistem, Doğru proses, Doğru insan (Tabrizi ve diğerleri, 2019; Ziyadin ve diğerleri, 2020; Gong ve Vincent, 2021; Correani ve diğerleri, 2020). Sistem Frascati Kılavuzu'nda ve proses Oslo Kılavuzu'nda tanımlanmış olmakla birlikte insan faktörü ise Canberra Kılavuzu'nda net bir şekilde ifade edilmiştir.

Canberra Kılavuzu'nda bilim ve teknolojinin geliştirilmesine, verimliliğin artırılmasına ve refahın yükseltilmesine ilişkin insan kaynağının ölçümü ve verilerin analizini içermektedir. Operasyonel verimlilik çalışmalarının önemli temelini oluşturan insan faktörü bu kılavuzda detayları ile aktarılmış, teknolojik ve ekonomik büyüme, sosyal gelişim, iktisadi ilerleme başlıkları altında detaylandırılmıştır (Santa ve diğerleri, 2019; İris ve Jasmine, 2019; Su ve diğerleri, 2019). Verimin ele alınmasında insan faktörünün sadece bir çıktı olarak değerlendirilmemesi gerektiği, insandan elde edilen katma değer toplam kalite ve verimlilik yönetiminde önemli bir rol oynadığı unutulmamalıdır. Kişisel verimlilik, strese girmeden veya iş dengesine sahip olmadan işleri bir sisteme göre halletmek ve sadece günlük hedeflere odaklanmak yerine, işleri geciktirme veya uzun vadeli hedeflere ulaşabilme nedeniyle asla aşırı yüklenmemek anlamına gelir (Halaç ve Güloğlu, 2019). Günümüzde insana verilen değer artması ile daha katma değerli işlerin insan gücüyle yapılıp, makine ve otomasyon sistemlerine geçişin sağlanması dijital dönüşüm sistemlerinin temelini oluşturmaktadır. Konu detaylı olarak ele alındığında; ürün, süreç, sistem, insan, dijital dönüşüm ve ürün olarak süreç döngüsüne girdiği gözlenmektedir. Şekil 1'de bu döngünün görseli yer almaktadır.

Şirketlerin dijital dönüşüme geçmesinin ana nedeni var oluş sebepleri olan faaliyetlerini sürdürme amacına hizmet etmesidir. Bu da şirketlerin kârlılıklarını artırması ile mümkün olabilmektedir. Genel olarak düşük verimliliğe sahip olan firmaların kârlılıkları da çok hızlı oranda düşüş göstermektedir. Düşük kârlılık seviyelerine sahip olduğunu tespit eden bir işletme bu durumun düşük verimlilikler ile orantılı olduğunu farkına varıp daha fazla veri analizi yaparak gerekli olan düzeltici ve önleyici faaliyetleri hızlı bir şekilde almalıdır çünkü artan verimlilik çok kısa bir sürede kârlılığa yol açmayacağı için kaybedilecek her bir küçük zaman dilimi büyük zararlar olarak geri dönecektir. Tablo 1'de bu durum daha somut ve yalın bir şekilde ifade edilmiştir (Kaya, 2020; Prokopenko, 1987).



Şekil 1. Ürün Dijital Dönüşüm Yaşam Döngüsü (Product Digital Transformation Lifecycle)

Tablo 1. Kârlılık ve Verimlilik İlişkisi (Profitability and Efficiency Relationship)

Vaka	Koşul			Öyleyse	
	Kâr(lılık)	Verim(lilik)		Sonuç	Aksiyon
1	Yüksek	Yüksek	→	Güçlü ve istikrarlı finansal yapı	Verimlilik seviyeni muhafaza et
2	Yüksek	Düşük	→	Yüksek kârlılık uzun süre devam etmeyecektir	Verimliliğini yükseltecek aksiyonları al
3	Düşük	Yüksek	→	Tehlike çok yakında, zararına satış ve kapanma riski mevcut	Pazarlama stratejilerini ve fiyatlandırma politikasını gözden geçir
4	Düşük	Düşük	→	İflas	Verimliliğini arttır ve reklam politikasını iyileştir

Verimlilik ve kârlılık terimleri arasındaki bu ilişkinin gelişmesi ile operasyonel verimlilik tanımı önem kazanmıştır. Topyekûn verimli çalışma olarak da tanımlanan bu terim; işletmeye hizmet etmek için zaman, insan, ekipman, envanter ve para gibi kaynakları optimize edilmiş bir şekilde kullanmak anlamına gelmektedir. Daha yalın ve çevik stratejilere sahip olan ve bu felsefe ile yatırımlarını yapan firmaların daha kârlı faaliyetlerini yürüttükleri ve sürdürülebilirliklerini sağlam temellere dayandırdığı tespit edilmiştir (Cavlak, 2021; Ulusoy, 2021).

2013-2023 yılları arasında gerçekleştirilen literatürler akademik arama portalında tarandığında tasarım ile verimlilik artışına ilişkin 25103, süreç optimizasyonu ile verim artışına dair 14239, operasyonel verimlilik ile ilgili 16002, dijital dönüşüm ile ilgili 13903 makalenin yayımlandığı tespit edilmiş ancak tasarım, süreç optimizasyonu, operasyonel verimlilik ve dijital dönüşüm ile uçtan uca verimliliğin ele alındığı bir yayının bulunmadığı tespit edilmiştir (TÜBİTAK, 2023). Bu amaçla yapılan sistematik çalışmaların yöntemi hakkında detaylı verilerin sunulduğu yöntem aşamasına geçilmiştir.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Doğal su kaynakları verimliliğinin artmasında kritik bir önemi olan ve su taşıma, depolama sistemlerinin kontrolünü sağlayan vanalar ve bu vanaların hatlardaki kurulumunu sağlayan demontaj sistemlerindeki verimlilik artış çalışmaları üç aşamada detaylı olarak ele alınmıştır. İlk aşamada ürün tasarımı ile vanalardaki verimlilik artışı bilgisayar destekli simülasyon ve analiz sistemleri ile değerlendirilmiş, sonrasında süreç yeniliği ile montaj sistemlerindeki verimlilik artışı detaylı olarak aktarılmış ve son olarak dijital dönüşüm ile online veri izleme sistemleri geliştirilerek operasyonel verim artışı verileri ile ispatlanıp kayıt altına alınmıştır.

3.1. Ürün Tasarımı ile Verimliliğin Arttırılması (Increasing Efficiency with Product Design)

Vanada gerçekleştirilen tasarım iyileştirmeleri ile; doğal su kaynaklarının verimli kullanılması, ürünlerin hafifleştirilmesiyle enerjinin verimli kullanılması, nihai ürünlerin montajı esnasındaki işçiliklerin azaltılması ile çalışanların verimliliklerinin arttırılmasına ilişkin çalışmalar ele alınmıştır. Bu çalışmalarda hesaplamalı akışkanlar mekaniğinden faydalanılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar mekaniği vana sektöründe yaygın olarak tercih

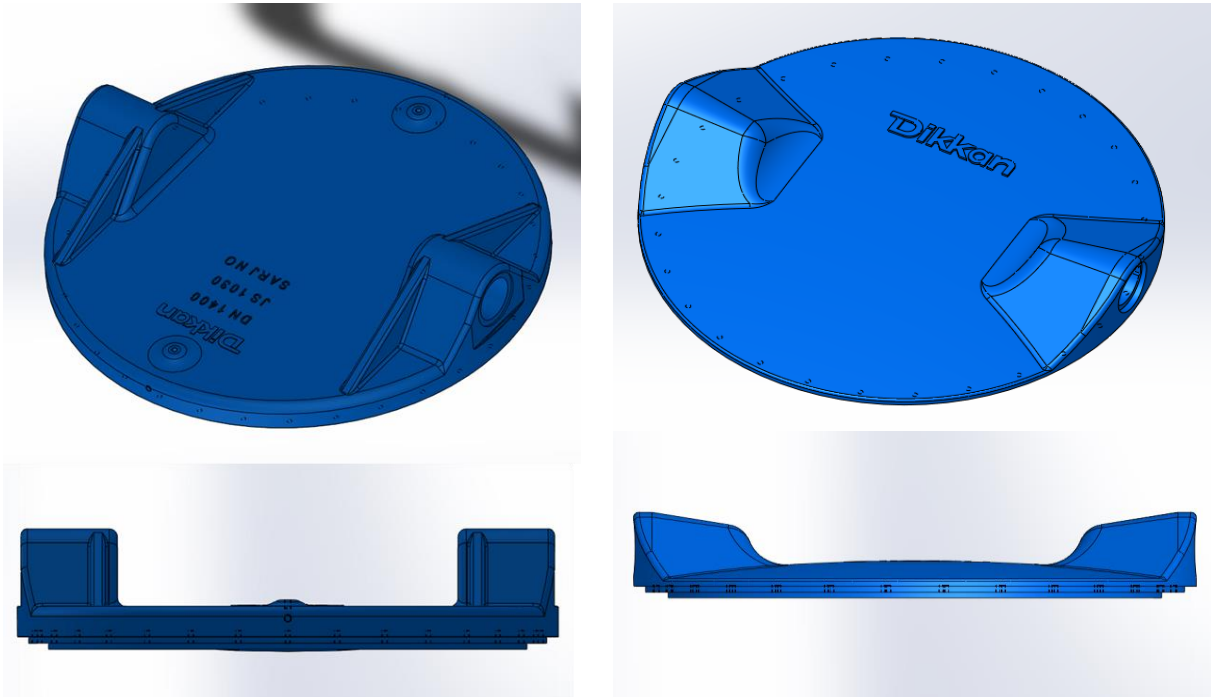
edilen tasarım ve analiz yöntemidir. Bu yöntemde akış şartlarını tanımlayan denklemler kullanılıp suyun vana içerisindeki üç boyutlu akışı simüle edilerek vanaların verimlilikleri hesaplanmaktadır. Bu simülasyon sistemleri ile tasarımlar prototip üretimi yapılmadan sanal ortamda analiz edilerek malzeme ve iş gücünün verimli bir şekilde kullanılmasına olanak sağlanmaktadır.

Vanaların verimlilikleri EN 1267:2012 (E) standardına göre akış katsayısıyla tanımlanmaktadır. Akış katsayısı; standartta K_v , uygulamalarda ise vana kapasite faktörü olarak ifade edilmektedir ve 1 bar basınç farkı altında vana üzerinden geçen suyun $m^3/saat$ cinsinden değeridir. Bu ifadeye göre vana verimlilikleri Eşitlik 1 ile hesaplanmaktadır.

$$K_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p \times \rho_0}} \quad (1)$$

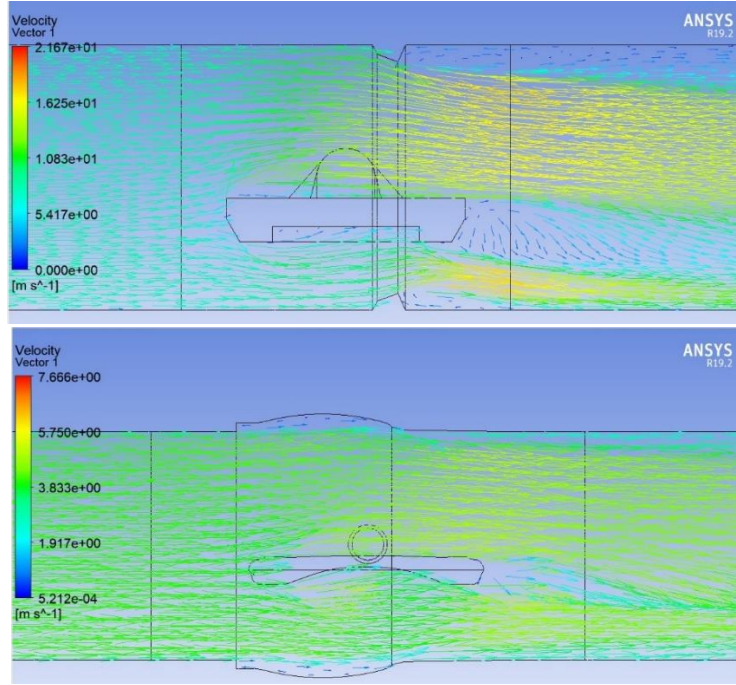
Eşitlikteki K_v ($m^3/saat$) vana verimliliğini, Q $m^3/saat$ cinsinden akış debisini, ρ suyun kg/m^3 cinsinden yoğunluğunu, ρ_0 suyun $15^\circ C$ 'deki kg/m^3 cinsinden yoğunluğunu, Δp bar cinsinden vana üzerindeki basınç kaybını ifade etmektedir.

Vanalardaki verimlilik artışını tasarım ile sağlayabilmek için akışı kontrol eden klape malzemesinin tasarımları detaylı olarak ele alınmış ve mevcut duruma göre iyileştirmeler Solidworks bilgisayar destekli tasarım programı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de Solidworks'te tasarlanan klape tasarımlarının görselleri yer almaktadır.



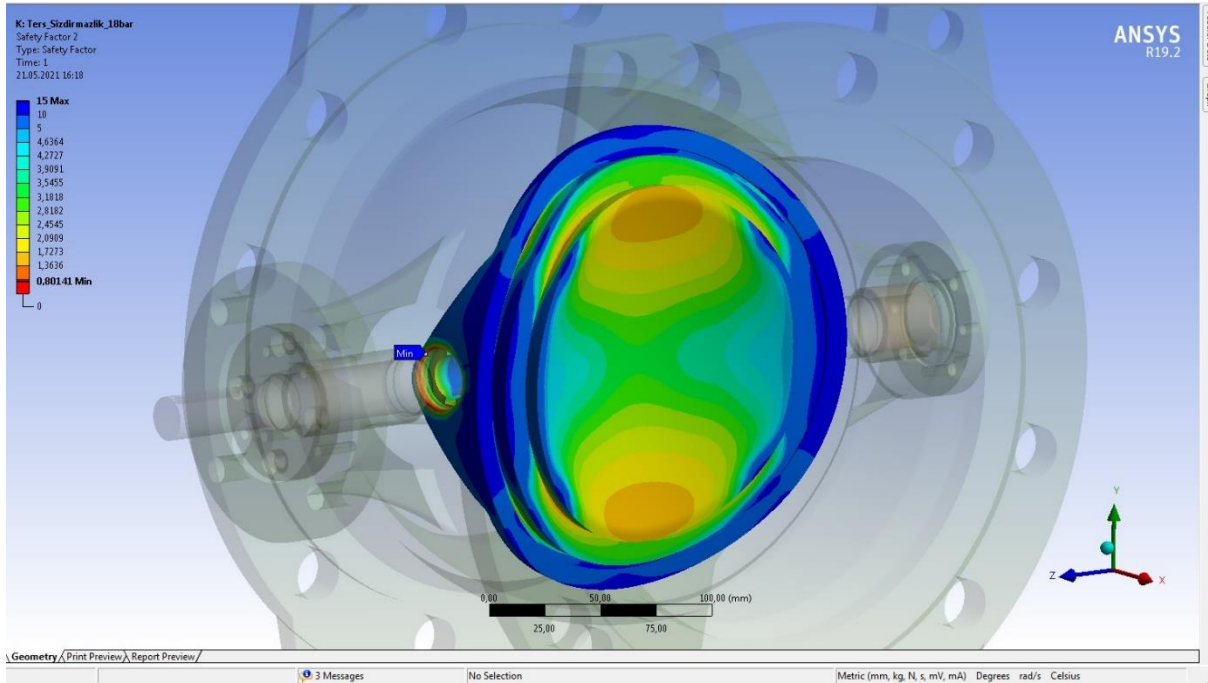
Şekil 2. Mevcut Ürün Klape Tasarımı (Sol), Yeni Tasarım (Sağ) (Existing Product Valve Design (Left), New Design (Right))

Vanaların verimlilikleri suyun klape ile temasına göre hesaplanmaktadır. Bu verimi hesaplamak için ANSYS bilgisayar destekli simülasyon programının CFX modülünden faydalanılarak hesaplamalı akışkanlar mekaniği analizleri gerçekleştirilmiş ve vanaların iyileştirmeleri tespit edilmiştir. Şekil 3'te mevcut ürüne ait su akışından kaynaklanan verimlilik oranı ve yeni geliştirilen ürüne ait su akış simülasyonu yer almaktadır.



Şekil 3. Mevcut Klappe Sisteminin Akış Verimliliği (Üst), Yeni Tasarım Akış Verimliliği (Alt) (Flow Efficiency of Existing Valve System (Top), New Design Flow Efficiency (Bottom))

Klapeleri taşıyacak olan vana gövdesinin hafifleştirilerek malzeme ve enerji verimliliklerinin artırılması hedeflenmiş ve bu amaçla sonlu elemanlar yöntemi ile tasarım geliştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile klapeyi taşıyacak olan gövde malzemesinin tasarım çalışmalarına ait görsel Şekil 4'te yer almaktadır.



Şekil 4. Vana Gövdesinin Hafifleştirilmesi İçin Gerçekleştirilen Sonlu Elemanlar Analizi (Finite Element Analysis for Valve Body Lightening)

Hafifleştirilmiş gövde tasarımlarının; malzeme, üretim, nakliye ve montaj aşamalarında tüketilen toplam enerji verileri Solidworks sürdürülebilirlik modülü ile tanımlanmıştır. Şekil 5'te mavi ile tanımlanan veriler eski ürüne, kırmızı ile tanımlanan veriler ise geliştirilen yeni ürüne ait değerleri ifade etmektedir.

Toplam Tüketilen Enerji

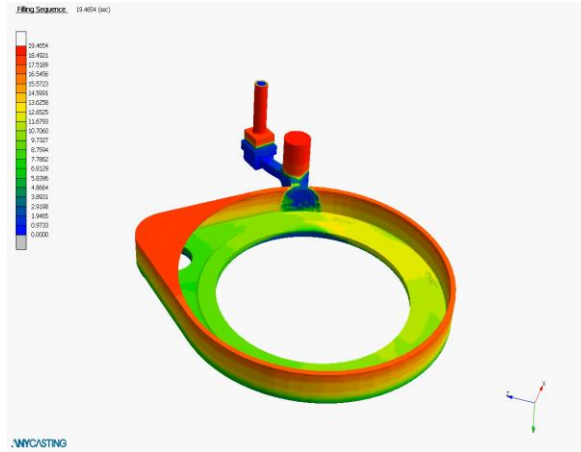


Malzeme:	820 MJ (1085 MJ)
Üretim:	490 MJ (660 MJ)
Nakliye:	27 MJ (27 MJ)
Montaj:	28 MJ (28 MJ)

1365 MJ (1800 MJ)

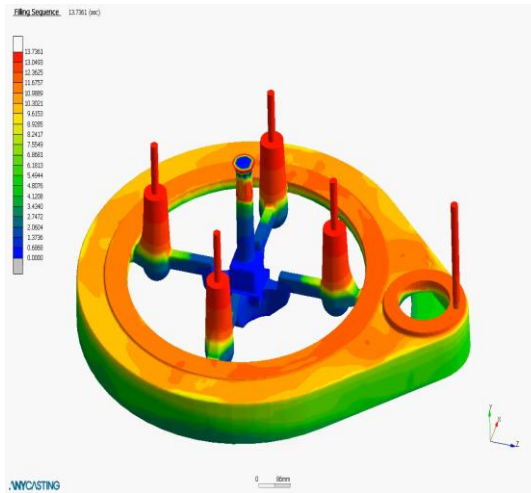
Şekil 5. Tasarımın Geliştirilmesi ile Elde Edilen Toplam Tüketilen Enerji Verileri (Total Consumed Energy Data Obtained by Developing the Design)

Bilgisayar destekli tasarım ile vanaların su akışına göre hesaplanan verimlilik değerlerinden sonra prototip üretimi aşamasına geçilmiştir ve metal gövdeler için yaygın olarak kullanılan kum kalıba döküm yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemdeki iyileştirmeleri arttırmak, üretimde gerçekleştirilecek denemelerin maliyetlerini düşürmek ve daha hızlı bir şekilde ürün sonuçlarını alarak enerji, malzeme ve zaman verimliliklerini yükseltmek amacıyla Anycasting simülasyon programından faydalanılmıştır. Bu aşamada malzeme EN-GJS-500-7 standardında tanımlanan kriterlere göre ele alınmış, optimum sıcaklık ve döküm değerleri simülasyon yardımıyla tespit edilmiştir. Şekil 6'da tek yolluklu besleyici sistemine ait döküm simülasyon dolmuş-zaman grafiği yer almaktadır.



Şekil 6. Tek Yolluklu Tasarım Döküm Simülasyonu Dolmuş Zaman Analizi (One Runner Design Casting Simulation Filling Time Analysis)

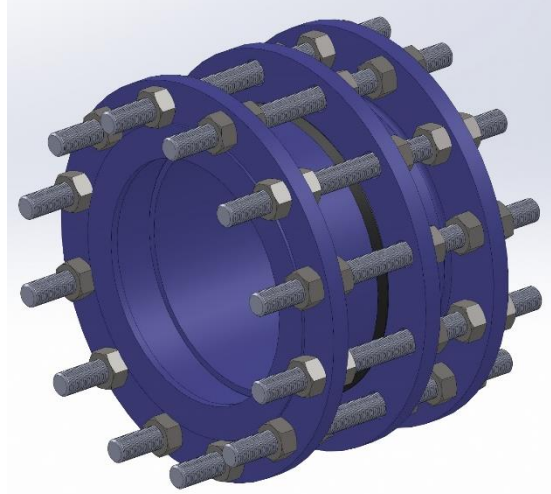
Döküm işleminin verimliliğini tasarım ile arttırmak amacıyla dört yolluklu besleyici sistemi geliştirilmiş ve bu sistemdeki döküm simüle edilmiştir. Şekil 7'de yeni besleyici sisteme ait dolmuş-zaman grafiği gösterilmiştir.



Şekil 7. Dört Yolluklu Tasarım Döküm Simülasyonu Dolmuş Zaman Analizi (Four Runners Design Casting Simulation Filling Time Analysis)

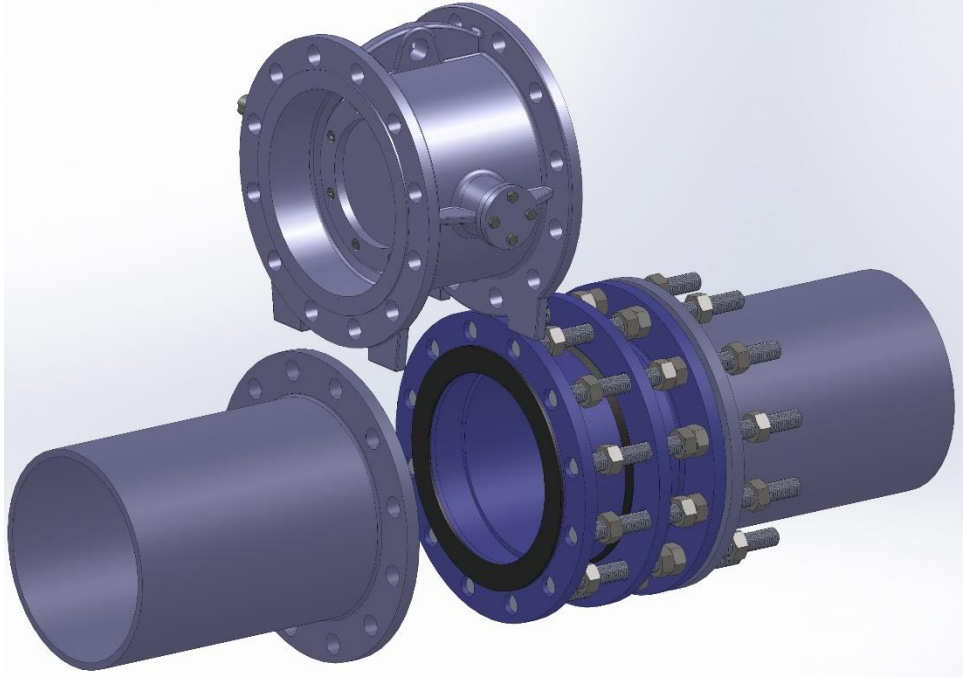
3.2. Süreç Yeniliği ile Verimliliğin Arttırılması (Increasing Efficiency with Process Innovation)

Bileşenlerin alt parçalarına ayrılması esnasında meydana gelen süreçlerin yenilenmesi ile enerji, işçilik, depolama ve lojistik verimliliklerindeki artış süreç yeniliğinde başarının bir göstergesidir. Gerçekleştirilen süreç yeniliği parçaların demontajı ile ilişkilendirilmiştir. Bu durumun tespitini yapılması için geleneksel bir demontaj sistemi ele alınmış ve sonra bu süreçteki yenilik çalışmaları ile verimlilik artışı farklı şekillerde değerlendirilmiştir. Şekil 8'de geleneksel bir parça ayrılma süreci yer almaktadır.



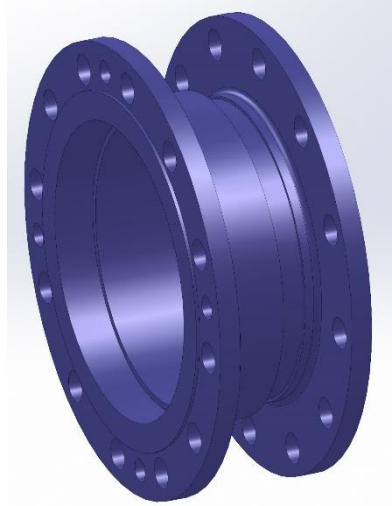
Şekil 8. Geleneksel Parça Ayrılma Süreci (Traditional Separating Process)

Bu sistemde çok sayıda bağlantı ve sızdırmazlık elemanı kullanılmaktadır. Ayrıca tüm elemanların sökölüp takılması oldukça uzun bir zaman almakla birlikte vana ve su akış sistemlerinin verimliliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu olumsuz etkiyi daha somut bir şekilde gösterebilmek için Şekil 9'da geleneksel demontaj sisteminin uygulama görseli sunulmuştur.



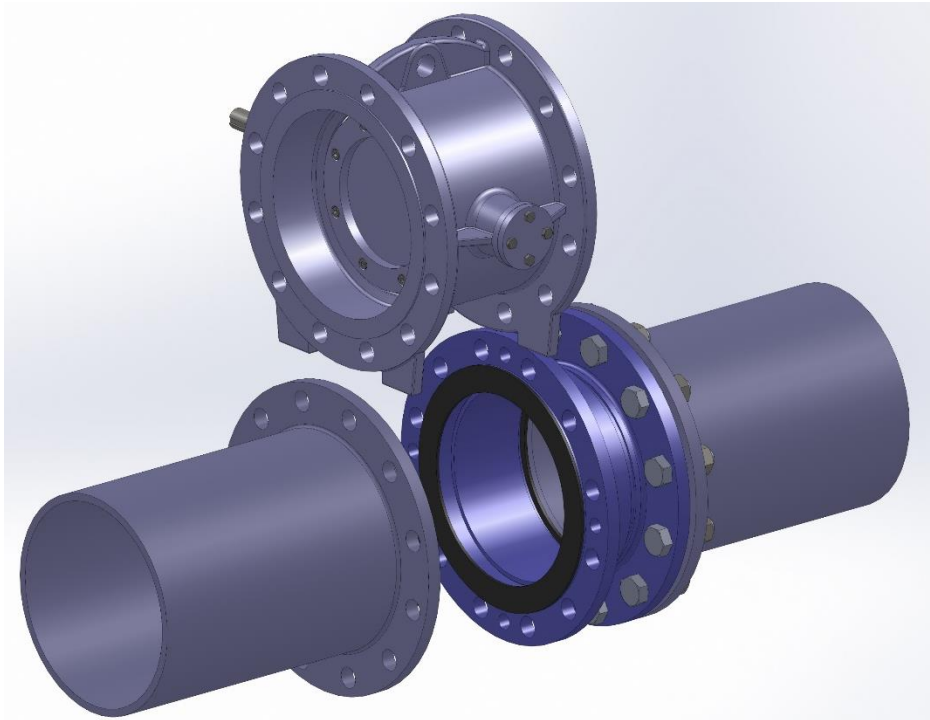
Şekil 9. Geleneksel Demontaj Sistemi (Traditional Disassembly Process)

Süreç optimizasyonu aşamasında öncelikle bağlantı ve sızdırmazlık elemanlarını minimum seviyeye indirecek çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde demontaj süresinin kısaltılması amaçlanmış ve daha kısa olan sistemler ile depolama avantajı, hafifletilmesi ile esnek üretim ve daha düşük lojistik maliyeti hedeflenmiştir. Şekil 10'da süreç optimizasyonu ile elde edilen nihai demontaj sistemi gösterilmiştir.



Şekil 10. Süreç Optimizasyonu ile Elde Edilen Demontaj Sistemi (Disassembly System Obtained by Process Optimization)

Bağlantı ve sızdırmazlık elemanlarının minimize edilmesi, demontaj sisteminin hafifleştirilmesi ve mesafe olarak azaltılması kademelerini içeren süreç iyileştirme çalışmalarının sonucunda elde edilen enerji ve işçilik verimlilik artışının tespit edileceği sisteme ait görsel Şekil 11’de yer almaktadır.

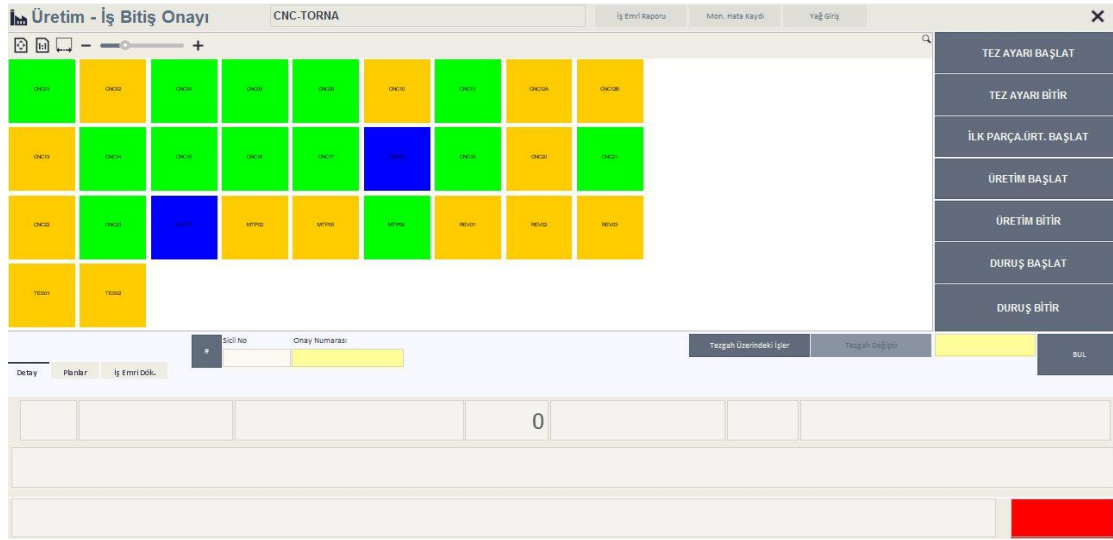


Şekil 11. Süreç Optimizasyonunun Tespit Edildiği Sistem Görseli (System Image with Process Optimization Detected)

3.3. Dijital Dönüşüm ile Verimliliğin Arttırılması (Increasing Efficiency with Digital Transformation)

Ürünlerin tasarımları ile arttırılan vana verimlilikleri, süreçlerin iyileştirilmesi ile artan enerji verimliliklerinin desteklenmesi için taşıyıcı su sistemlerinin üretimi esnasında operasyonel verimliliklerin arttırılmasına ilişkin çalışmalar gerçekleştirilmiş ve bu amaçla dijital dönüşüm ile operasyonel verimliliğin yükseltilmesi hedeflenmiştir. Üretim hatlarından; fire, arıza oranı, çevrim süresi, anlık sıcaklık, basınç vb. verileri kayıt altına alarak raporlayabilen ve bu verileri analiz ederek üretim takibini sağlayan, sektörde yaygın olarak kullanılan konvensiyonel analiz sistemlerinin aksine endüstride sıklıkla tercih edilen Programlanabilir Mantıksal Denetleyici (PLC-Programmable Logic Controller) markaları ile uyumlu çalışabilecek özellikte veri toplama ve analiz sistemi geliştirilmiştir. Bu üretim yönetimi; üretimde çalışan personellerin veri girme inisiyatifi kaldırıp, dijital kontrol sistemlerinin tercih edilerek yüksek verimli ve daha rekabet edebilir maliyetler sunan ve dijital dönüşümü sağlayan bir otomasyon sistemidir. Bu sistemdeki gelişmeler mevcutta kullanılmakta olan ERP [Enterprise (Kurumsal) Resource (Kaynak) Planning (Planlama)] sistemleri üzerinden barkod okuma ile izlenen üretim takip sisteminin geliştirilmiş ve dijital dönüşümü sağlanmış versiyonudur. Şekil 12’de kullanılan sistemin ekran

görüntüsü gösterilmiştir. Burada işlemler ERP üzerinden izlenebilmekte ve buna göre üretim başlangıç, bitiş, parametre, duruş, arıza gibi veriler takip edilebilmektedir.



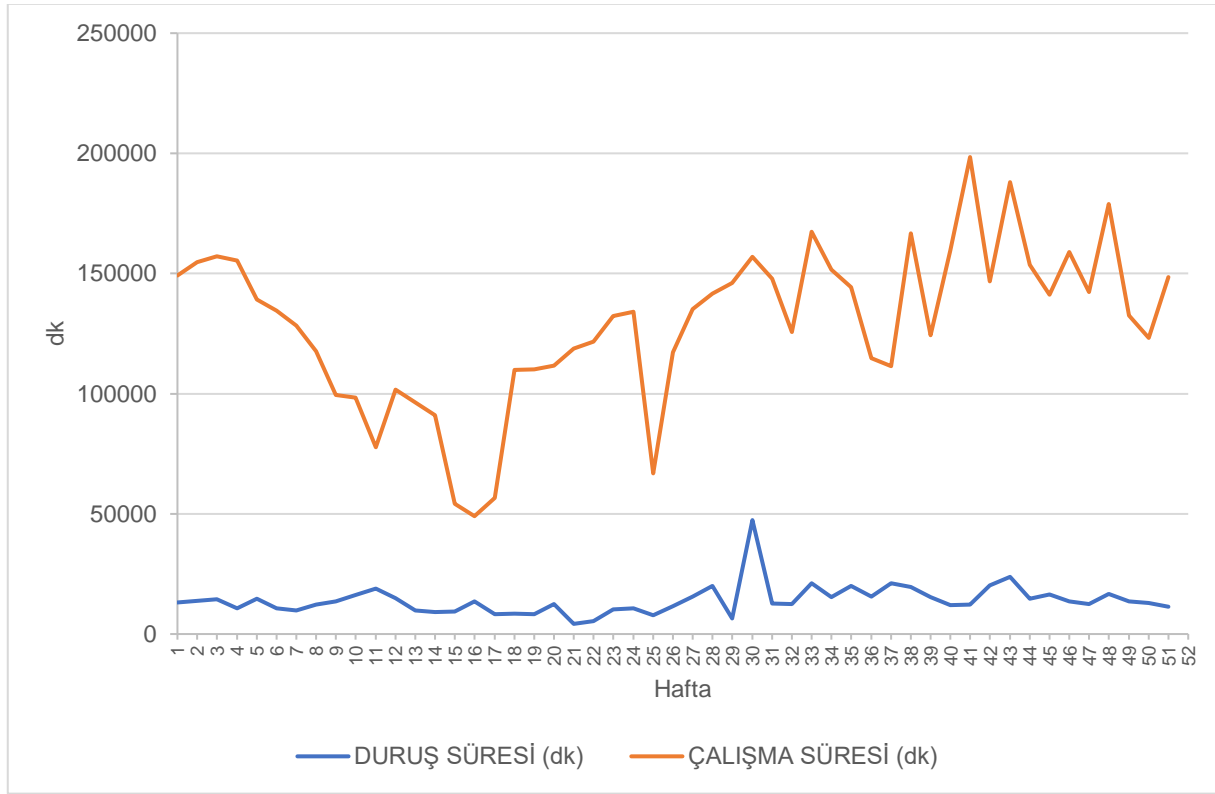
Şekil 12. Mevcut Üretim Takip Sistemi Ekran Görüntüsü (Current Production Tracking System Screenshot)

Şekil 13'te bu sistemlerin sahadaki uygulamasına ait görsel yer almaktadır. Şekil 12'de verilen ekran görüntüsü; sahada operasyonu yapan personelin barkod ile iş emrini, duruşları, kalite verilerini okutması neticesinde ERP üzerinden takip edilmektedir.



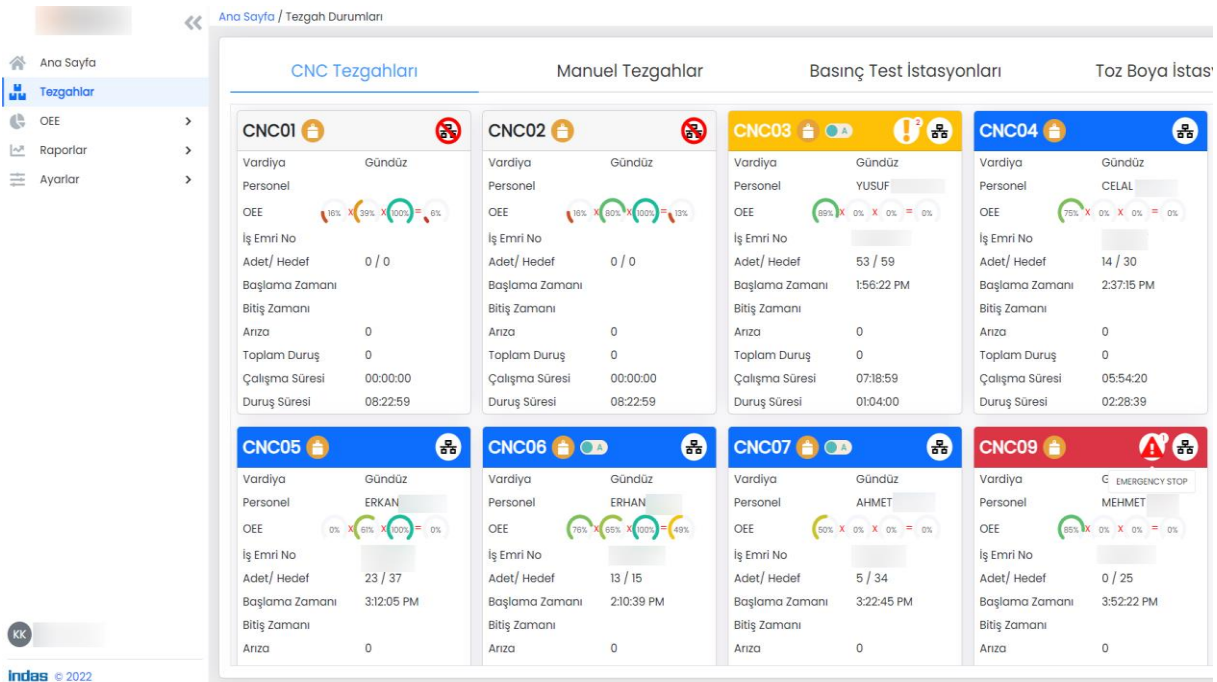
Şekil 13. Barkod Okuma Sisteminin Saha Uygulamasına Ait Görsel (Visual of the Field Application of the Barcode Reading System)

Şekil 14'te ERP üzerinden alınan verilerden elde edilen çalışma ve duruş sürelerine ait rapor gösterilmektedir. Bu rapor sadece çalışma ve duruş sürelerini içermekte olup kalite verileri ve duruş detayları için sistemden ayrıca bir rapor çekilmesi gerekmektedir.



Şekil 14. 2021 Yılına Ait Çalışma ve Duruş Süreleri Grafiği (Working and Downtime Chart for 2021)

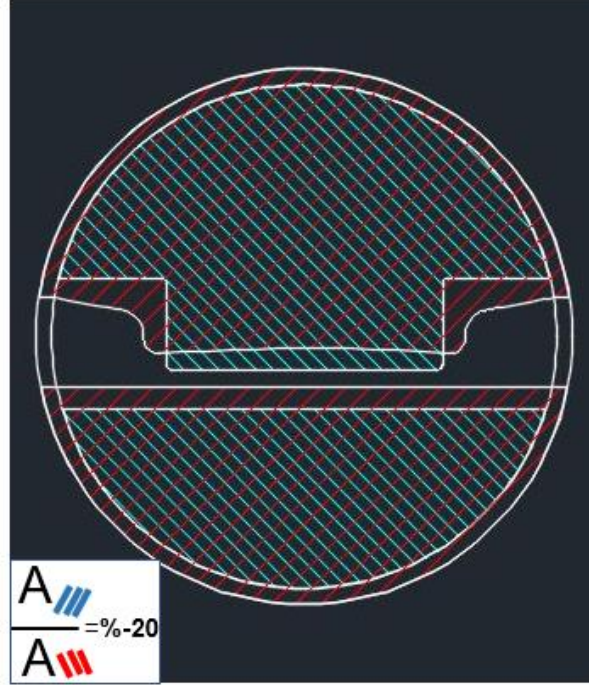
Dijital dönüşüm çalışmaları için çevrimiçi veri izleme sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemde geliştirilen yazılım ile çalışan personelin herhangi bir müdahalesine ihtiyaç duyulmadan online olarak veriler sisteme aktarılıp verilerin otomatik olarak tanımlanması sağlanmıştır. Şekil 15'te geliştirilen dijital dönüşüm sistemine ait görsel yer almaktadır.



Şekil 15. Geliştirilen Dijital Dönüşüm Sistemi Ekran Görüntüsü (Developed Digital Transformation System Screenshot)

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Tasarım ile vana verimini arttırmak amacıyla suyun daha büyük bir alandan geçişinin sağlanması amaçlanmıştır. Vanalarda verim, suyun birim zamanda birim alandan daha yüksek bir debide geçmesinin sağlanması suretiyle artış göstermektedir. Şekil 16'da mevcut tasarım ve verim arttırmak için geliştirilen yeni tasarımın vana içerisinde üst üste getirilmesine ilişkin görsel yer almaktadır. Burada Solidworks'te iki yüzey aynı düzleme getirilmiş; kırmızı bölge yeni tasarıma ait suyun geçiş alanını, mavi bölge ise eski tasarıma ait suyun geçiş alanını temsil etmektedir. Bu analize göre eski tasarım yeni tasarıma göre %20 daha az alana sahiptir. Bir başka ifadeyle yeni tasarımda %20 oranında suyun geçiş alanı artırılmıştır.



Şekil 16. Ürün Tasarımı ile Elde Edilen Alan Kazancı (Space Gain Through Product Design)

%20 alan artışının vana verimine etkisinin hesaplanmasında ANSYS CFX modülü ile hesaplamalı akışkanlar mekaniği analizleri yardımıyla vanaların verimlilikleri tespit edilmiştir. Tablo 2'de mevcut ürün ile geliştirilen ürünlere ait olarak tespit edilen verim değerleri verilmiştir. Buna göre 54890 m³/s olan verimlilik değeri 99624 m³/s'e yükselmiştir. Özetle %20'lik alan artışı verimde %81,5'luk bir artışa sebep olmuştur.

Tablo 2. Akış Katsayısı (Flow Coefficient)

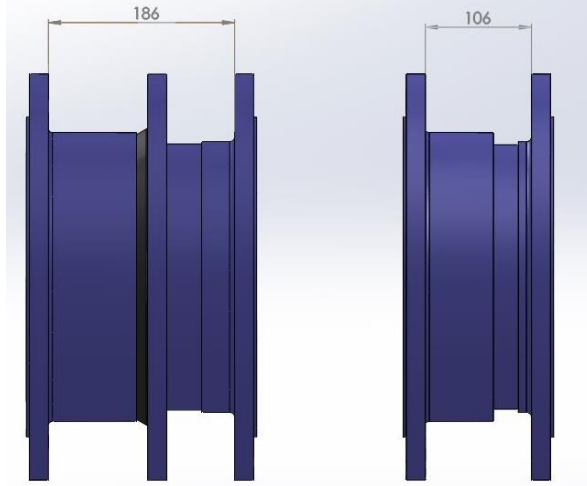
Ürün Grupları	Birim	Verim
Eski tasarım	Kv (m ³ /s)	54890
Yeni tasarım	Kv (m ³ /s)	99624

Klapeleri taşıyan gövdelerin hafifleştirilmesi için sonlu elemanlar yöntemi ile mekanik dayanım analizleri gerçekleştirilmiş ve bu hafifleştirmenin toplam tüketilen enerjiye olan etkisi ele alınarak enerji verimliliği Solidworks sürdürülebilirlik modülü ile tespit edilmiştir. Solidworks Sustainability, çevresel etki faktörlerine ilişkin gerçek zamanlı geribildirim sağlar. Sonuçlar, herhangi bir değişiklik ile dinamik olarak güncellenen Çevresel Etki Panosu'nda görünür. Bu değerler ürünün tasarımı esnasında tüketilen enerji, sevkiyatta belirlenecek olan güzergâh ve ulaşım şeklinde göre harcanan enerji olmak üzere farklı başlıklar altında değerlendirmeye alınır ve sistem sonuçları ölçtüğü ve topladığı çevresel etki faktörleri haline getirir. Toplam tüketilen enerji 1800 MJ'den 1365 MJ'e düşürülerek %31,87 oranında verim artışı sağlanmıştır. Buradaki hesaplama yöntemi Solidworks Flow Simulation modülünden hesaplamaya dayalı tanım alanındaki simetri ve periyodik seçenekleri ile sağlanmıştır.

Tasarımsal olarak hafifleştirilip maliyetleri düşürülen ürünlerin prototip üretimine geçmeden önce döküm parametrelerinin iyileştirilmesi için Anycasting simülasyon programından faydalanılmıştır. Simülasyondan elde edilen dolum-zaman analizine göre 19 saniye olan tek yolluklu tasarım geliştirilip 4 yolluklu tasarıma geçilerek aynı brüt ağırlığa sahip ürünün 15 saniyede dökümü sağlanmıştır. Bu işlem üretimin uçtan uca ele alındığı

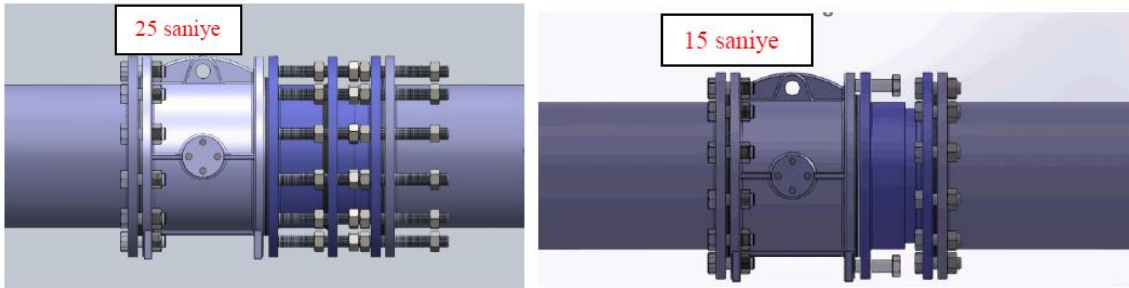
hammaddeden nihai ürüne kadar süreci kapsamamakta olup toplam ekipman etkinliği (OEE- Overall Equipment Effectiveness) ele alındığında %16'lık bir iyileşme olarak kayıt altına alınmıştır.

Süreç yeniliği ile verimliliğin artırılması kapsamında demontaj sistemlerinin verimliliklerini arttırmaya yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiş ve bu iyileştirmeler ile 186 mm olan vana akış mesafesi 106 mm'ye düşürülmüştür. Yine bu kısalmanın etkisi ile 42,4 kg olan ürün ağırlığı, 29,1 kg'a düşerek alana göre %27, ağırlığa göre toplam montaj süresinde %31 verim artışı sağlanmıştır. Şekil 17'de bu değişim gösterilmiştir.



Şekil 17. Eski Tasarımın (Sol) Süreç Optimizasyonu ile Uzunluğunda Elde Edilen Kazanım (Sağ) (Gain in Length by Process Optimization of the Old Design (Left) (Right))

Süreç optimizasyonu sağlanan ürünlerin montaj sürelerinin tespit edilmesi için Solidworks montaj modülü kullanılmıştır. Şekil 18'de mevcut süreçteki demontaj sistemi ile geliştirilen süreçte gerçekleştirilen montaja ait karşılaştırma yer almaktadır. Elde edilen sonuca göre ürün montajı için harcanan süre 25 saniyeden 15 saniyeye düşürülerek işçilik ve enerjide %45'lik verimlilik artışı sağlanmıştır.



Şekil 18. Eski Süreç (Sol) Optimize Edilmiş Süreç (Sağ) Montaj Süresi Karşılaştırması (Previous Process (Left) Optimized Process (Right) Assembly Time Comparison)

Dijital dönüşüm kapsamında ülkemizde ilk defa CNC tezgâhları ile hiçbir ara yazılım kullanılmadan haberleşebilen, harici bir yazılım ve lisansa ihtiyaç duyulmadan çalışabilen çevrimiçi veri izleme sistemi hayata geçirilmiştir. Bu dijital üretim yönetimi sistemi; üretimde çalışan personellerin veri girme inisiyatifi ortadan kaldırıp, dijital kontrol sistemlerinin devreye alınması ile fabrikaları daha yüksek verimlilik ve rekabet edebilir maliyetlerle buldukları sektörde daha üst seviyelere taşımayı hedefleyen otomasyon sisteminin özet tanımıdır. Geliştirilen dijital sistem sayesinde üretim kapasitesi ve hızına ek olarak verimlilik de önemli ölçüde artış göstermiş, hata oranları düşürülerek standart ürünlerin üretimi sağlanmış, karşılaşılan problem ve arızalar en aza indirgenerek hızlı çözüm imkanları sunulabilen, detaylı sistem analizi ile genel durum kontrolü yapılabilen ve operatörden bağımsız olarak arıza kayıt bilgileri alınabilecek duruma gelinmiştir. Şekil 19'da dijital dönüşümün sağlandığı yazılım sisteminin ekran görüntüsü yer almaktadır. Bu ekranda daha önceki uygulamaların ekranlarında görülemeyen kalite, performans, kullanılabilirlik ve operasyonel verimlilik değerleri de anlık olarak takip edilebilmekte ve bakım faaliyetleri planlanabilmektedir.



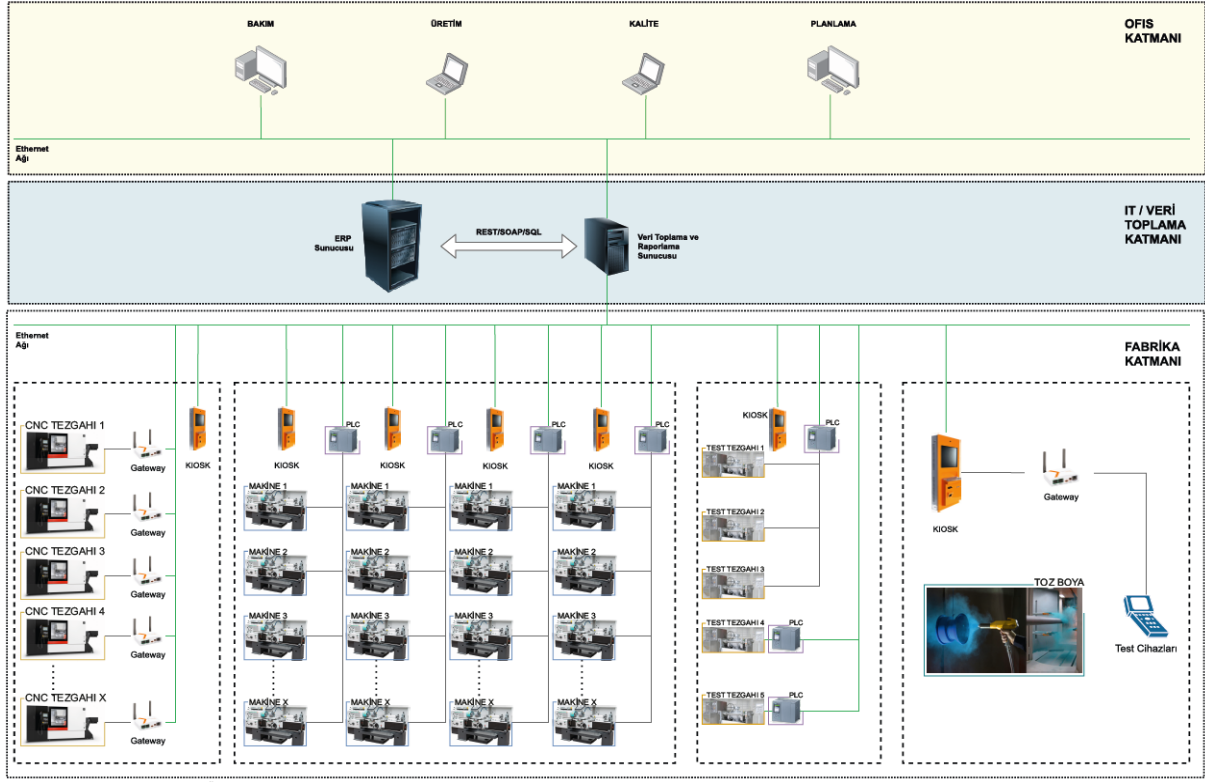
Şekil 19. Dijital Dönüşüm Yazılım Sistemi Ekran Görüntüsü (Digital Transformation Software System Screenshot)

Sistemin daha yaygın kullanılması ile %44 olan kullanılabilirlik %90'a, %55 olan performans %70'e, %31 olan operasyonel verimlilik değeri %50'ye yükseltilmiştir. Bu değerlerin tespit edildiği bir üst versiyon yazılım sistemine ait ekran görüntüsü Şekil 20'de gösterilmiştir.



Şekil 20. Online Veri İzleme Yazılım Ekran Görüntüsü (Online Data Monitoring Software Screenshot)

Sistemin dijital dönüşüme hizmet vermesi ve %50 olan operasyonel verimliliğin yükseltilmesi için cep telefonu ve tablet uygulamaları sisteme entegre edilmiştir. Şekil 21'de sistem entegrasyonu ve dijital dönüşüm akışı gösterilmiştir.



Şekil 21. Dijital Dönüşüm Sistem Analizi ve Veri Akışı (Digital Transformation System Analysis and Data Flow)

Dijital dönüşümün hayata geçirilmesi ile operasyonel verimlilik değeri %86'ya yükseltilmiştir. Tablo 3'te dijital dönüşüm ile elde edilen operasyonel verim artış verileri ve bunu destekleyen alt veriler yer almaktadır. Buradaki hesaplama yöntemi ise sistemin toplam bitiş ve başlangıç değerleri arasındaki oranın ele alınmasıdır.

Tablo 3. Dijital Dönüşüm ile Geliştirilen Üretim Operasyonel Verimlilik Verileri (Production Operational Efficiency Data Improved by Digital Transformation)

Kullanılabilirlik Oranı		Zaman (dk)
A	Haftalık çalışma saati	258.300
B	Planlı duruşlar	3.000
C	Planlanan Üretim Zamanı (A-B)	255.300
D	Plansız duruşlar	10.157
E	Net çalışma süresi	245.143
F	Kullanılabilirlik oranı (C-D)	%96,0
Performans Oranı		Zaman (dk)
G	Toplam ideal süre	108.125
I	Toplam gerçekleşen süre	120.461
H	Performans Oranı (G/H)	% 89,8
Kalite Oranı		Adet
J	Üretilen parça sayısı	15.392
K	Hatalı parça sayısı	40
L	Kalite oranı (J-K)/J	% 99,7
Operasyonel Verimlilik		
F x I x L		% 86,0

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu makalede su kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması ile enerji, işçilik, süreç ve operasyonel verimliliklerin artırılmasına yönelik metodoloji ve ölçüm sistemleri üzerine örnek bir çalışma sunulmuştur. Su kaynaklarının verimini daha net bir şekilde ortaya koyabilmek adına vana ürününe ait çalışmalar üç aşamada ele alınarak toplam verimlilik iyileştirmelerine ait veriler detaylı bir şekilde okuyucular ile paylaşmıştır. Birinci

aşamada vana ürünlerinin tasarımları ile verimlilik arttırıcı çalışmalar gerçekleştirilmiş olup klape yüzey alanındaki %20'lik bir alan büyümesinin toplam vana veriminde %81,5'lik bir artışa sebep olduğu gözlenmiştir. Burada akışın laminar (düzlemsel) olması, herhangi bir türbülansa sebep olan bir engele maruz kalmayacak şekilde tasarlanması bu büyük artışın olumlu bir sonucudur. Ürünün verimliliğinin artmasının yanında bu üründe kullanılan malzeme ve üretim için harcanılan enerjide düşüş sağlanmış, aynı bölgeye ve montaja sahip olması sebebiyle nakliye ve montaj için tüketilen enerjilerde herhangi bir verimlilik sağlanmadığı için "Süreç Yeniliği ile Verimliliğin Arttırılması" çalışmaları ile montaj ve lojistik veriminin arttırılması hedeflenmiştir.

Süreç yeniliği ile verimlilik artışını sağlamak için demontaj sistemlerinde bağlantı ve sızdırmazlık elemanlarının işlem ve miktarını minimuma indirecek süreçler ile ürünler %27 daha kısa ve %31 daha hafifletilerek depolama, lojistik ve montaj için harcanılan enerji ve işçiliklerin verimlilikleri arttırılmış, tasarımda iyileştirilen malzeme ve üretim için sarfedilen toplam enerji verilerine ilave olarak %45 montaj verimliliği sağlanmıştır.

Seri üretime geçmeden önce döküm tasarımında aynı brüt ağırlıktaki ürünün döküm akış süresi ortalama ürün başına 4 saniye kısaltılarak %26,7 oranında enerji verimliliği sağlanmıştır. Bu verileri daha sistematik takip etmek ve operasyonel verimliliği yükseltmek için dijital dönüşüm aşamasına geçilmiştir. Tasarım ve süreç yeniliği ile gerçekleştirilen verimlilik artışlarının anlam kazanması için operasyonel verimliliğin de arttırılması sağlanmalıdır. Bu amaçla; en hızlı, en modern ve en gerçekçi çözümün çevrimiçi veri izleme sisteminin adaptasyonu olacağı stratejisi ile yazılımlar geliştirilmiş ve sisteme adaptasyonu sağlanmıştır. Bu sistemin ilk uygulaması ile operasyonel verimlilik %19 oranında artış göstermiş, sistemin mobil uygulamalar ile hayata geçirilmesi ile %36'lık ilave bir operasyonel verimlilik artışı elde edilmiştir.

Ürün verimliliğinden operasyonel verimliliğe kadar olan uçtan uca verimlilik artışına ait olan veriler Tablo 4'te özetlenmiştir. Tablo 4'teki verilerin ürün ile ilgili olan kısımları iki tasarım arasındaki Solidworks sürdürülebilirlik raporu ve hesaplamalı akışkan mekaniği analizlerinden, ürüne ait fiziksel özellikler son hali ile ilk halinin ölçüm farkından, operasyonel verimlilik, hat kullanım oranı ve personel etkisi ise geliştirilen online veri izleme sistem verileri ile metot mühendisi ölçümlerinin birebir uyuşan verilerinin karşılaştırılması neticesinde elde edilmiştir.

Tablo 4. Uçtan Uca Verimlilik ve Operasyonel Verimlilik Verileri (End-to-End Productivity and Operational Efficiency Data)

Parametreler	Önce	Sonra
Vana Verimi Kv (m ³ /h)	54890	99624
Toplam Tüketilen Enerji (MJ)	1800	1365
Brüt Ağırlık (kg)	43,3	43,3
Net Ağırlık (kg)	42,4	29,1
Flanş mesafesi (mm)	186	106
Demontaj Süresi (saniye)	25	15
Döküm süresi (saniye)	19	15
Operasyonel Verimlilik	31	86
Hat Kullanılabilirlik Oranı (%)	44	90
Personel Etkisi (%)	70	55

Bu çalışmanın önemli bir noktası ise yeni bir proje başlatma potansiyeline sahip olmasıdır. Projenin ikinci fazında yapılacak olan metot faaliyetleri ve değer akış haritalama (VSM-Value Stream Mapping) çalışmaları ile daha detaylı veriler ele alınarak çalışma daha ileri seviyede bir kaynak olarak kayıt altına alınabilecek duruma gelmiş olacaktır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Çalışmanın dijital dönüşüm aşamasında gerçekleştirdiğimiz projede destek veren TÜBİTAK'a, tasarım aşamasında Ar-Ge İnovasyon Destek Programı kapsamında destek sağlayan KOSGEB'e, verimliliği düşürülmüş özgün tasarım için alınan patent ve süreç iyileştirme aşamasında alınan faydalı model süreçlerinde verdiği destek sebebiyle Türk Patent ve Marka Kurumu'na teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 3210662 numaralı proje ve KOSGEB tarafından E-509607 numaralı proje kapsamında değerlendirilmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Audretsch, David B., and Maksim Belitski. (2020). "The role of R&D and knowledge spillovers in innovation and productivity.", *European economic review*, 123: 103391.
- Bampatsou, Christina, and George Halkos. (2019). "Economic growth, efficiency and environmental elasticity for the G7 countries.", *Energy Policy*, 130: 355-360.
- Bimpizas-Pinis, Meletios, et al. (2021). "Is efficiency enough for circular economy?." *Resources, Conservation and Recycling*, 167.
- Brogi, Marina, and Valentina Lagasio. (2019). "Environmental, social, and governance and company profitability: Are financial intermediaries different?." *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 26.3: 576-587.
- Cavlak, Hakan. (2021). "Etkinlik, Etkililik, Verimlilik, Kârlılık, Performans: Kavramsal Bir Çerçeve ve Karşılaştırma", *Journal of Research in Business*, 6.1: 99-126.
- Chen, Ying, et al. (2019). "Energy efficient dynamic offloading in mobile edge computing for internet of things", *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 9.3: 1050-1060.
- Correani, Alessia, et al. (2020). "Implementing a digital strategy: Learning from the experience of three digital transformation projects.", *California Management Review*, 62.4: 37-56.
- De Loecker, Jan, and Chad Syverson. (2021). "An industrial organization perspective on productivity", *Handbook of industrial organization*, Vol. 4. No. 1. Elsevier, 141-223.
- Dieppe, Alistair, ed. *Global productivity: Trends, drivers, and policies*. (2021). World Bank Publications.
- Dong, Kangyin, Yue Dou, and Qingzhe Jiang. (2022). "Income inequality, energy poverty, and energy efficiency: Who cause who and how?", *Technological Forecasting and Social Change*, 179: 121622.
- Dubey, Rameshwar, et al. (2019). "Can big data and predictive analytics improve social and environmental sustainability?." *Technological Forecasting and Social Change*, 144: 534-545.
- Economidou, Marina, et al. (2020). "Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings", *Energy and Buildings*, 225: 110322.
- Evkaya, Bilal. (2021). "Araştırma ve Geliştirme Harcamalarının Ekonomik Büyüme Etkisi: Oecd Ülkeleri İçin Ampirik Bir Analiz", *Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Birimler Fakültesi, Ankara*.
- Falivene, Laura, et al. (2019). "Towards the online computer-aided design of catalytic pockets", *Nature Chemistry*, 11.10: 872-879.
- Flammer, Caroline, Bryan Hong, and Dylan Minor. (2019). "Corporate governance and the rise of integrating corporate social responsibility criteria in executive compensation: Effectiveness and implications for firm outcomes", *Strategic Management Journal*, 40.7: 1097-1122.
- Gong, Cheng, and Vincent Ribiere. (2021). "Developing a unified definition of digital transformation", *Technovation*, 102: 102217.
- Guo, Ran, and Yijun Yuan. (2020). "Different types of environmental regulations and heterogeneous influence on energy efficiency in the industrial sector: Evidence from Chinese provincial data", *Energy Policy*, 145: 111747.
- Halaç, Duygu Seçkin, and Cansu Güloğlu. (2019). "İşyerinde Psikolojik Yıldırma Olgusunun Çalışan Verimliliği Üzerine Etkisi: MOSB'de Bir Saha Araştırması", *Yönetim ve Ekonomi Dergisi*, 26.1: 157-180.
- Hatfield, Jerry L., and Christian Dold. (2019). "Water-use efficiency: advances and challenges in a changing climate", *Frontiers in plant science*, 10: 103.
- Hussein, Nabil, et al. (2020). "Simulation of semilunar valve function: computer-aided design, 3D printing and flow assessment with MR", *3D Printing in Medicine*, 6: 1-9.
- Iris, Çağatay, and Jasmine Siu Lee Lam. (2019). "A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112: 170-182.
- Jhamb, Spardha, et al. (2020). "A review of computer-aided design of paints and coatings", *Current Opinion in Chemical Engineering*, 27: 107-120.
- Karakuş, Güzide. (2021). "Ar-Ge/Tasarım Merkezi Nedir? Türkiye'de Ar-Ge ve Tasarım Merkezi Kurulum Sürecine İlişkin Bir Araştırma", *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 23.3: 1381-1404.
- Kaya, A. Ğ. I. N. (2020). "Toplam kalite yönetimi bağlamında kaizen felsefesinin örgütlerin maliyet, verimlilik ve kalite düzeylerine etkileri", *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 24.3: 1191-1207.
- Kazekami, Sachiko. (2020). "Mechanisms to improve labor productivity by performing telework", *Telecommunications Policy*, 44.2: 101868.
- Kim, Jin Young, et al. (2020). "High-efficiency perovskite solar cells", *Chemical Reviews*, 120.15: 7867-7918.
- Nuchturee, Chalermkiat, Tie Li, and Hongpu Xia. (2020). "Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships—A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134: 110145.
- Otte, Andreas. (2020). "3D computer-aided design reconstructions and 3D multi-material polymer replica printings of the first "iron hand" of Franconian knight Gottfried (Götz) von Berlichingen (1480–1562): an overview", *Prosthesis*, 2.4: 27.
- Pan, Wenrong, et al. (2022). "Digital economy: An innovation driver for total factor productivity", *Journal of Business Research*, 139: 303-311.
- Prokopenko, Joseph. (1987). "Productivity management: A practical handbook", *International Labour Organization, Moscow*.
- Safitri, Vera Apridina, Lindriana Sari, and Rindu Rika Gamayuni. (2020). "Research and Development (R&D), Environmental Investments, to Eco-Efficiency, and Firm Value", *The Indonesian Journal of Accounting Research*, 22.3.
- Santa, Ricardo, Jason B. MacDonald, and Mario Ferrer. (2019). "The role of trust in e-Government effectiveness, operational effectiveness and user satisfaction: Lessons from Saudi Arabia in e-G2B", *Government Information Quarterly*, 36.1: 39-50.
- Sickles, Robin C., and Valentin Zelenyuk. (2019). "Measurement of productivity and efficiency", *Cambridge University Press, Cambridge*.

- Su, Shuai, et al. (2019). "An energy-efficient train operation approach by integrating the metro timetabling and eco-driving", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21.10: 4252-4268.
- Sun, Huaping, et al. (2020). "Estimating environmental efficiency and convergence: 1980 to 2016", *Energy Policy*: 208, 118224.
- Sun, Huaping, et al. (2019). "Institutional quality, green innovation and energy efficiency", *Energy Policy*, 135: 111002.
- Tabrizi, Behnam, et al. (2019). "Digital transformation is not about technology", *Harvard Business Review*, 13.March: 1-6.
- Thakur, Madhav P., et al. (2021). "Plant-soil feedbacks and temporal dynamics of plant diversity-productivity relationships", *Trends in Ecology & Evolution*, 36.7: 651-661.
- TÜBİTAK (1995). "Bilim ve Teknolojiye Ayrılmış İnsan Kaynaklarının Ölçümü Hakkında Kılavuz: Canberra Kılavuzu", https://www.tubitak.gov.tr/tubitak_content_files/BTYPD/kilavuzlar/canberra_tr.pdf, (Erişim Tarihi: 06.05.2023).
- TÜBİTAK (2002). "Frascati Kılavuzu: Araştırma ve Deneysel Geliştirme Taramaları İçin Önerilen Standart Uygulama", https://www.tubitak.gov.tr/tubitak_content_files/BTYPD/kilavuzlar/frascati_tr.pdf, (Erişim Tarihi: 06.05.2023).
- TÜBİTAK (2005). "Oslo Kılavuzu Işığında Yenilik", https://www.tubitak.gov.tr/tubitak_content_files/BTYPD/kilavuzlar/Oslo_Presentation.pdf, (Erişim Tarihi: 06.05.2023).
- TÜBİTAK (2006). "Oslo Kılavuzu Yenilik Verilerinin Toplanması ve Yorumlanması İçin İlkeler", https://www.tubitak.gov.tr/tubitak_content_files/BTYPD/kilavuzlar/Oslo_3_TR.pdf, (Erişim Tarihi: 06.05.2023).
- TÜBİTAK (2010). "TÜBİTAK: Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı Uygulama Esaslarında Değişiklik Yapılmasına Dair Uygulama Esasları", https://www.tubitak.gov.tr/sites/default/files/208_sayili_bilim_kurulu_karari.pdf, (Erişim Tarihi: 06.05.2023).
- Ulusoy, Ahmet. (2021). "Türk bankacılık sisteminde kârlılık üzerinde etkili olan faktörlerin belirlenmesi", *Bankacılık ve Sermaye Piyasası Araştırmaları Dergisi*, 5.11: 20-48.
- Vial, Gregory. (2019). "Understanding digital transformation: A review and a research agenda", *The Journal of Strategic Information Systems*, 28.2: 118-144.
- Vishwakarma, Satyendra K., et al. (2019). "Smart energy efficient home automation system using IoT", 2019 4th international conference on internet of things: Smart innovation and usages (IoT-SIU), IEEE, 18th -19th April 2019, Ghaziabad.
- Wang, Li, J. E. Dykstra, and Shihong Lin. (2019). "Energy efficiency of capacitive deionization", *Environmental Science & Technology*, 53.7: 3366-3378.
- Wu, Haitao, Yu Hao, and Siyu Ren. (2020). "How do environmental regulation and environmental decentralization affect green total factor energy efficiency: Evidence from China", *Energy Economics*, 91: 104880.
- Wu, Wenwang, et al. (2019). "Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review", *Materials & Design*, 180: 107950.
- Xie, Jun, et al. (2019). "Do environmental, social, and governance activities improve corporate financial performance?", *Business Strategy and the Environment*, 28.2 (2019): 286-300.
- Xu, Zhenyuan, et al. (2020). "Ultrahigh-efficiency desalination via a thermally-localized multistage solar still", *Energy & Environmental Science*, 13.3: 830-839.
- Yildiz Çankaya, Sibel, and Bulent Sezen. (2019). "Effects of green supply chain management practices on sustainability performance", *Journal of Manufacturing Technology Management*, 30.1: 98-121.
- Zakari, Abdulrasheed, et al. (2022). "Energy efficiency and sustainable development goals (SDGs)", *Energy*, 239: 122365.
- Zakoldaev, D. A., et al. (2019). "Computer-aided design of technical documentation on the digital product models of Industry 4.0", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 483. No. 1. IOP Publishing.
- Ziyadin, S., Saltanat Sueubayeva, and A. Utegenova. (2020). "Digital transformation in business", *Digital Age: Chances, Challenges and Future*, 7. Springer International Publishing.



SWEEP SİNYALİ PARAMETRE SEÇİMİNDE ÖNERİLEN TEST ATIŞLARI, FARKLI KAYAÇ TÜRLERİ ÜZERİNDE YAPILAN BİR UYGULAMANIN PERSPEKTİFİNDEN VİBROSİSMİK PARAMETRELERİ İÇİN BİR METODOLOJİ

Türker KARAKAŞ¹, Attila AYDEMİR^{2,3*}, Funda BİLİM¹

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

² Atılım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

³ Orta Doğu Teknik Üniversitesi-KKK, Mühendislik Fakültesi, Petrol ve Doğalgaz Müh. Bölümü, Kuzey Kıbrıs

Anahtar Kelimeler Öz

Vibrosismik, Sweep, Sweep Frekans Aralığı, Test atışı, Sweep Uzunluğu. Hidrokarbon aramacılığında en çok kullanılan yöntem, sismik yansıma yöntemidir. Bu yöntemde kaynak seçimi oldukça önemlidir. Sismik ekipler tarafından dünyaca en çok tercih edilen kaynak türü ise kontrollü bir kaynak oluşu nedeniyle vibratör olmuştur. Vibratörün yere gönderdiği sinyal "sweep sinyali" olarak adlandırılmaktadır. Bu sinyalin özellikleri, kullanıcı tarafından yeraltındaki tabakaların özelliklerine göre farklı bir parametre ile tanımlanır. Her saha, aynı jeolojik özelliklere sahip olmayacağı için parametre seçimleri de yüzeyin topoğrafik koşulları, yer içinin jeolojik şartları, sinyalin sönümlenme ya da yayılma durumu, hedef derinliğe ulaşması gibi birçok faktöre bağlı olacaktır. Bu nedenle sweep sinyalinin parametre seçimi için yürütülmesi gereken saha test çalışmaları veri toplama aşamasından önce yapılmalıdır. Bu çalışmada, hidrokarbon aranması için vibrosismik yöntem kullanılarak seçilebilecek bütün parametreler irdelenmiş, her bir parametrenin alabileceği değerler ve bunların etkileri tartışılmış olup Güneydoğu Anadolu'da seçilen bir çalışma sahasında örnek bir sweep test parametre çalışmasında en uygun kaynak parametreleri tespit edilmiştir. Böylece, yüzeyde bulunan, özellikle de sismik kalite için bozucu litolojilere sahip formasyonlar üzerinde seçilen parametrelerin gösterdiği farklılıklar ortaya konularak nedenleri tartışılmıştır. Bu çalışmanın önemi, sweep test çalışmalarında dikkate alınması gereken parametreler ve bunların hangi tip litolojilerde, ne gibi sonuçlar verdiğinin gösterilmesi açısından sismik endüstrisinde görev alacak jeofizikçilere referans teşkil etmesi şeklinde açıklanabilir.

TEST PROPOSALS IN SWEEP SIGNAL PARAMETER SELECTION, A METHODOLOGY FOR VIBROSEISMIC PARAMETERS FROM THE PERSPECTIVE OF AN APPLICATION ON DIFFERENT ROCK TYPES

Keywords

Vibroseismic, Sweep, Sweep Frequency Range, Test shoot, Sweep Length.

Abstract

The most widely used method in the hydrocarbon exploration is the seismic reflection. Source selection is very important in this method. The most preferred worldwide source type is the vibrator because it is a controlled source. The signal sent by the vibrator to the ground is called as the "sweep signal". Properties of this signal are defined by the user with different parameters according to the properties of the underground layers. Since every site will not have the same geological characteristics, the selection of parameters will depend on many factors such as the topographic conditions, subsurface geology, propagation of the signal and the target depth. For this reason, field test studies for the parameter selection of the sweep signal should be done before data acquisition begins. In this study, all parameters that can be selected by using the vibroseismic method for hydrocarbon exploration were examined, the values to be assigned for each parameter and their effects were discussed, and the most suitable source parameters were determined in a sample sweep test parameter study performed in Southeastern Anatolia. Thus, the differences in the parameters selected on different formations with different dispersive lithologies were revealed and the reasons were discussed. The importance of this study can be explained by the fact that it will be a reference for geophysicists who will work in the seismic industry in terms of parameters in the sweep test studies for different type of lithologies and their responses.

Karakaş, T., Aydemir, A., Bilim, F., (2024). Sweep Sinyali Parametre Seçiminde Önerilen Test Atışları, Farklı Kayaç Türleri Üzerinde Yapılan Bir Uygulamanın Perspektifinden Vibrosismik Parametreleri İçin Bir Metodoloji, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(1), 176-189.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. Aydemir, 0000-0001-8590-214x
T. Karakas, 0009-0001-8393-2019
F. Bilim, 0000-0003-1098-4755

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	15.12.2023
Kabul Tarihi / Accepted Date	22.02.2024
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: attila.aydemir@metu.edu.tr, attila.aydemir@gmail.com, attila.aydemir@atilim.edu.tr +90-505-660 3433

TEST PROPOSALS IN SWEEP SIGNAL PARAMETER SELECTION, A METHODOLOGY FOR VIBROSEISMIC PARAMETERS FROM THE PERSPECTIVE OF AN APPLICATION ON DIFFERENT ROCK TYPES

Türker KARAKAŞ¹, Attila AYDEMİR^{2,3†}, Funda BİLİM¹

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

² Atılım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

³ Orta Doğu Teknik Üniversitesi-KKK, Mühendislik Fakültesi, Petrol ve Doğalgaz Müh. Bölümü, Kuzey Kıbrıs

Highlights

- Sweep signal parameters for vibroseis are defined for HC exploration according to the field tests
- In this study, sweep parameter types are explained in detail
- Optimum sweep parameters were determined in a test study performed in Southeastern Anatolia.
- That parameters are suitable for data acquisition on different lithologies in SE Anatolia

Graphical Abstract

SWEEP PARAMETERS	
SWEEP LENGTH	16 s
LOW-CUT FILTER	OUT
HIGH-CUT FILTER	200 Hz, % 80 Nyquist
NUMBER OF SWEEPS/SHOT POINT	4
STARTING FREQUENCY	6 Hz
END FREQUENCY	72 Hz
SWEEP TYPE	LINEAR
TAPER	250 ms

Figure. Determined Sweep Parameters

Purpose and Scope

The main reason for this study is to explain the field tests defining the sweep parameters. We also determined the optimum parameters for different lithologies in SE-Anatolia.

Design/methodology/approach

The objectives are provided using an example and comprehensive test study that was performed on the different geological formations. Results were also confirmed by using a pilot seismic section that indicates the seismic quality differences and characteristic tectonic structures in the SE-Anatolia.

Findings

Optimum sweep parameters for these formations are indicated in a table within the manuscript and the graphical abstract of this paper.

Research limitations/implications

Because the seismic method is quite expensive, these tests were limited in a region but they may be performed on the other formations in SE-Anatolia. In addition, all test study results may be collected from all companies operating in this region by constructing a consortium to prevent these operations being repeated.

Practical implications

These results will be used many seismic / petroleum companies and will save the operation time and reduce the costs of seismic data acquisitions.

Social Implications

Vibroseis is an eco-friendly seismic source and it will mitigate or lower the dynamite usage that may create problems for people, for animals, for plants and for buildings. In addition, the results of this study indicating the best parameters will provide more reliable seismic sections that will lead more accurate seismic interpretation and more accurate well-drilling. Therefore, it will accelerate the oil discoveries to cut the oil importing costs and will help the economical development of the country.

Originality

This study will fill the gap about the knowledge of sweep parameters in Turkey and SE-Anatolia.

[†] İlgili yazar / Corresponding author: attila.aydemir@metu.edu.tr, attila.aydemir@gmail.com, attila.aydemir@atilim.edu.tr +90-505-660 3433

1. Giriş (Introduction)

Petrol aramacılığında en yaygın olarak kullanılan sismik yöntem sayesinde yeraltı yapısı, sedimanter basenlerdeki tabakalar, temel seviyenin taban topoğrafyası, tabaka kalınlıkları ve hatta bu tabakaların litolojik özelliklerinin belirlenmesi mümkündür. Dahası hidrokarbon rezervuarlarının, rezervuar parametrelerinin tespit edilmesi bile günümüzde kolaylıkla yapılabilmektedir. Sismik yöntemler; sismik kırılma (refraction) ve sismik yansımaya (reflection) olarak iki ana başlık altında incelenebilir. Sismik yöntemlerin bu türlerinden hangisi kullanılırsa kullanılsın, yeraltına sinyal göndermek üzere mutlaka bir sismik kaynak kullanılmak durumundadır. Zemin etüdüleri, su aramaları ve mühendislik yapılarının zemin etüdü çalışmalarında kullanılan sismik kırılma yöntemi, genellikle sığ derinliklere ve sığ hedeflere odaklandığından kullanılacak sismik kaynağın çok güçlü, çok kontrollü olmasına ve çok derinlere nüfuz edebilme özelliğinin olmasına gerek yoktur. Bunun aksine, petrol-doğal gaz, jeotermal ve maden aramacılığı gibi daha derin hedeflere yönelik çalışmalarda ise sismik yansımaya yöntemi kullanılır. Yeraltının daha derinleri hedef alındığı için sismik yansımaya çalışmalarında daha güçlü ve frekans içeriği daha geniş sinyallere ihtiyaç duyulduğundan sismik kaynak seçimi de çok önemli hale gelmektedir. İstenilen anda ve istenilen sürede yeraltına sinyal enerjisini göndermek doğal deprem dalgalarıyla sağlanamayacağından yapay enerji kaynakları kullanmak zaruri bir durumdur. Bu yapay kaynaklardan petrol endüstrisi tarafından en çok tercih edileni, kontrollü bir kaynak olması sebebiyle vibrosismik çalışmalarda kullanılan vibratörlerdir.

Vibratörler sayesinde yeraltına gönderilen sinyalin genliği (amplitüdü) ve frekans içeriği kontrol edilebildiğinden, yeraltındaki tabakalar ve yapısal özelliklerin beklentilerine uygun sismik sinyal üretmek mümkündür (Sheriff, 1990). Yeraltına gönderilen sinyal enerjisinin önemli bir bölümü yüzeye yakın formasyonlarca soğurulacağından sinyal enerjisinin uzun süreli tutulması ideal bir durumdur. Ancak bu uzun sinyalin kısa bir puls içerisine sıkıştırılması gerekmektedir. Böylece çevreye ve yakındaki yapılara zarar verecek oranda büyük bir enerjiye sahip, keskin bir sinyal piki yaratmak yerine buna eşdeğer uzun bir sinyal yayıp bu sinyali kaydettikten sonra mümkün olduğunca kısa bir sinyal piki içerisine sıkıştırmak daha uygun bir çözümdür. Bunu sağlamak için gönderilecek sinyal, belirli bir zaman aralığında sınırlı bir frekanstan diğerlerine geçiş yapacak şekilde birbirini takip eden sinüsoidal dalgacıklardan meydana gelecek şekilde düzenlenmektedir. Bu dalgacıklar bir başlangıç frekansından bitiş frekansına doğru tarama yaptığından "sweep (tarama) sinyali" olarak adlandırılır.

Hidrokarbon rezervuarlarının aranmasında kullanılacak bu sweep sinyalinin başlangıç-bitiş frekansları, sinyalin amplitüdü, sinyalin uzunluğu, taramanın başlangıç ve bitişinde sinyale dereceli bir artış veya azalış verecek olan törpüleme parametreleri gibi karakteristik özellikleri; çalışma yapılacak alanın topoğrafik koşulları, yüzeydeki formasyonların ve yeraltındaki tabakaların litolojik özelliklerine bağlı olarak önceden tespit edilmelidir. Oldukça maliyetli olan vibrosismik çalışmalarda bu parametrelerin doğru bir biçimde belirlenmesi ve uygulanması için veri toplama çalışmaları öncesi oldukça kapsamlı bir test programı yürütülmelidir. Böylelikle, yeraltındaki jeolojik yapılar ve birimler doğru olarak tariflenebilir.

Bu makalede önce vibrosismik yöntemin gelişimi hakkında çok genel bir tarihsel gelişim süreci bilgileri verilerek yola çıkılacaktır. Özellikle literatürde daha ulaşılabilir olması sebebiyle ülkemizdeki vibrosismik ve sweep parametrelerine yönelik çalışmaları konu alan literatür bilgisine ağırlık verilecektir. Daha sonra kullanılan cihazlar ve bunların çalışma prensipleri anlatılacak, bu cihazlar yardımıyla üretilen sweep parametrelerinin neler olduğu açıklanacaktır. Takip eden bölümde bu parametrelerin tespiti için yürütülecek test çalışmaları aşama aşama anlatılacak ve yüzeydeki jeolojik formasyonların sweep parametrelerine doğrudan etkileri detaylı olarak, sismik kaliteyi ise dolaylı olarak nasıl etkiledikleri tartışılacaktır. Bu amaçla, ülkemizin petrol sahalarının bulunduğu Güney Doğu Anadolu (GDA) bölgesinde yapılan bir örnek saha test çalışmasının kayıtları ve deneysel sonuçları kullanılarak izah edilmeye gayret edilecektir. Nihayetinde, bu özel test çalışmasının sonuçlarından yola çıkılarak gelecekte veri toplama (Data Acquisition) çalışmalarında görev alacak yer bilimcilere ve yorumculara bir dizi test edilmiş ve denemiş parametre sonuçları sunulacaktır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Vibrosismik yöntemi ilk olarak 1952 yılında Continental Oil Company (Conoco) tarafından kullanılmış ve geliştirilmiştir (Crawford vd., 1960). Ancak 1970'li yılların başından itibaren, teknolojik imkanların da gelişmesi ile birlikte vibrosismik yöntemin hem ekipmanları, hem de teorisi geliştirilerek günümüzde en çok kullanılan sismik veri toplama yöntemi olarak sismik endüstrisindeki yerini almıştır (Telford vd., 1991). Özellikle 1990'lı yıllara gelindiğinde vibrosismik, tüm dünya genelinde yapılan iki-boyutlu (2D) ve üç-boyutlu (3D) sismik çalışmaların yarısından fazlasında kullanılan tek yöntem olmuştur (Newman, 1994).

Vibrosismik yöntemlerin, veri toplama aşamasında en çok tercih edildiği 90'lı yıllara kadar kullanılan sweep tipi "lineer sweep" iken bu tarihlerden sonra "non-lineer sweep" türlerinin kullanımı da yaygınlaşmıştır (Pritchard, 1994). İlk yıllarda sweep oluşturmak için tek bir vibratör kullanılırken ilerleyen yıllarda çoklu vibratör

düzenekleri geliştirilerek gürültülerin bastırılması amacıyla atış kaynak patternleri (düzenekleri) oluşturulmuş ve çok daha yüksek kaliteli sismik kesitler elde etmek mümkün olmuştur (Belcher vd., 1986; Costain ve Coruh, 1989). Benzer şekilde, farklı frekans bant genişlikleri denenerek daha başarılı sonuçlara ulaşıldığı da ortaya çıkmıştır (Domoracki vd., 1989). Frekans bant genişliğine ek olarak, yaratılmak istenen sinyal dalgacığının kenar salınımlarının (oscillations) azaltılması için vibratörlerin meydana getirdiği sweep sinyalinin başlangıcı ve sonuna bir törpüleme (taper) işlemi uygulanması gerekliliği de görülmüştür (Domoracki vd., 1989; Gresko ve Costain, 1985). Böylece vibrosismik tekniğinde test edilmesi gereken parametreler daha da çeşitli hale gelmiştir.

Bu parametrelerin tespiti için yapılan öncül çalışmalar Atlantik kıyı düzlüklerinde sürdürülmüş ve birçok farklı parametre test edilmiştir (Örneğin; Costain ve Coruh, 1989; Scott, 1987; Hubbard vd., 1991). 1990'lı yılların hemen öncesinde ve ilk yarısında bu yöntem üzerine yeni bazı kitapların yazıldığı da görülmektedir; Geyer (1989), Anstey (1991) ve Baeten ve Ziolkowski (1990) bunların başında gelir. Daha sonraki yıllarda vibrosismik yöntemi direkt olarak anlatmalar dahi, birçok çalışmada bu yöntemden bahsedildiği ya da jeolojik bazı problemlerin çözümünde vibrosismik kullanıldığı anımsanabilir.

Günümüzde bütün bu beklentileri karşılayabilecek şekilde dizayn edilmiş birçok vibratör çeşidi vardır (Anstey, 1991; Baeten ve Ziolkowski, 1990). Bunlar, yine birçok petrol şirketi tarafından kullanılırlar. Bu vibratörlerin çalışma prensipleri, mekanizmaları, elektrik-elektronik kontrol sistemleri üretici firmalar tarafından hazırlanan kılavuzlarda detaylı olarak anlatılmaktadır. Bundan başka, bu bilgilere yine üretici firmaların, operatörleri eğitmek amacıyla hazırladıkları kurs notlarından ulaşabilmekteyiz. Örneğin, en büyük üretici firma olan Sercel firmasının kurs notları oldukça kapsamlı bir örnektir (Sercel 408 UL Training Course Manual, 2001). Ancak, ticari gizlilik gerekçeleriyle literatürde bu teknik detaylar akademik makaleler veya tebliğler içerisinde yer almamaktadır. Yine maalesef, ülkemizde bu konularda yazılmış kitap veya makale sayısının çok sınırlı sayıda olmaları sebebiyle (Sakallıoğlu vd., 2012; Güreli, 2021), Türkçe kaynak olarak, vibrosismik kullanılan projelerde görev almış jeofizik mühendislerinin, bu kurs notlarından da yararlanarak yapmış oldukları tez çalışmaları (Sakallıoğlu, 1992; Başar, 2007; Gültekin, 2010; Karaca, 2015; Toksoy, 2019) ulaşılacak yegane referans çalışmalar olarak karşımıza çıkmaktadır ki bu makale de Türker Karakaş'ın yüksek lisans (Master-MSc) tez çalışmasından derlenerek yazılmıştır.

Yukarıda bahsedilen tez çalışmalarından ilki Sakallıoğlu (1992) tarafından hazırlanmıştır. İlgili çalışmada Güney Doğu Anadolu (GDA), binik yapı kuşağındaki en zorlu problem olan sismik veri kalitesinin artırılması için kullanılan vibrosismik yönteminde, farklı sweep türlerinin (lineer, nonlineer ve kombi sweep) sonuçları irdelenerek bindirme kuşağının sismik veri kalitesi sorunu çözülmeye çalışılmıştır. Bu çalışmadan yaklaşık 15 yıl sonra Başar (2007), sweep parametrelerini, bunlarla yapılan test çalışmaları üzerinde kalite kontrol işlemlerini, çoklu vibratör kullanım gerekçelerini ve yüksek güvenilirlikli-yüksek ayrımıcılıklı (HFVS) vibrosismik veri toplama yöntemini içeren tez çalışmasını tamamlamıştır. Gültekin (2010) ise bu parametrelerin yüksek çözünürlük elde edilmesindeki etkilerini tartışmıştır. Karaca (2015), ülkemiz için önemli bir enerji kaynağı olan jeotermal alanların araştırılmasında kullanılan vibrosismik yöntemde, veri toplama öncesi yapılan test atışlarının önemi, veri kalitesi açısından incelenmesi ve değerlendirilme süreçlerini detaylı olarak anlatmıştır. Toksoy (2019), Diyarbakır-Batman arasında kalan ve tümüyle klastiklerden oluşan Şelmo Formasyonu üzerinde yürütülen vibrosismik çalışmasının sonuçlarını incelediği çalışmada, sulama kanallarının yoğun olduğu ve yaygın bir biçimde tarımsal faaliyet yürütülen alanlarda karşılaşılan sorunları da ele alarak, Şelmo Formasyonu'nun parametre testlerine göstermiş olduğu tepkileri detaylı olarak incelemiştir. Bu konuda yapılan en son tez çalışmasında Karakaş (2024), yukarıda anılan tüm tez çalışmalarından daha kapsamlı olarak vibrosismik yöntemlerdeki bütün parametreleri ve kullanılan cihazları anlatarak, günümüzde kullanılan en son ve en modern teknikleri vermiş ve bunlarla yürütülen test çalışmalarını bütün detaylarıyla ortaya koymuş, en nihayetinde de GDA bölgesinde yürütülen bir test çalışmasından örnekler vererek farklı litolojilere sahip üç değişik jeolojik formasyonun vibrosismik veri toplama çalışmasına göstermiş olduğu yanıtlar eşliğinde hangi parametrelerin kullanılması gerektiği konusunda bir genellemeye ulaşmıştır. Bundan başka, GDA bölgesinde şariyaj kuşağının hemen önünde jips-anhidrit-şeyl ardalınması, klastikler ve karbonatlar şeklinde sıralanan ve GDA'nın genel jeolojik çatısı altındaki en bilinen litolojilerde kullanılması gereken parametre değerlerini tespit etmiştir. Böylece, GDA bölgesinde bundan sonra yürütülecek 2-B ve 3-B sismik veri toplama çalışmalarında oldukça maliyetli olan parametrelerin tespitine yönelik olarak yapılacak test çalışmaları için yol gösteren ve bu süreci en az maliyetle tamamlamaya yarayacak sonuçları ortaya çıkarmıştır. Aşağıda, öncelikle bu parametrelerin neler olduğu kısaca anlatılacak, sonrasında ise ilgili parametreler için kullanılacak değerlerin tespitine yönelik olarak GDA'da yapılan sweep test çalışmalarının görsel gösterimleri eşliğinde elde edilen sonuçlar, nedenleriyle birlikte tartışılacaktır.

3. Vibrosizmin Çalışma Prensipleri (Working Principles of Vibroseismic)

Vibratör sistemini bileşenleri bakımından üç ana başlıkta toplayabiliriz. Bunlar; Yere gönderilecek olan sinyali üretmek amacıyla sweep üretici, Sweep sinyalinin yere gönderilebilmesi için vibratör ve Çapraz ilişki (cross-correlation) operatörüdür.

Kontrollü sismik kaynak olan vibratörün, kontrolsüz bir kaynak çeşidi olan dinamitten farklı olarak, yere gönderdiği sinyal anlık bir sinyal değildir, zaman cinsinden belirli bir süreye sahiptir. Vibrolar özel donanım ve hidrolik sistemlerden oluşmuş iş makineleridir. Ağlıkları yaklaşık 7.5-45 ton arasında değişmektedir. Birden fazla vibratör çeşitli düzenlerle sıralanarak kaynak dizilimini oluştururlar (Şekil 1). Vibro gücünün artışı sağlamak amacıyla birden fazla vibratör, eş zamanlı olarak kullanılarak yeraltına gönderilecek enerji istenilen düzeye çıkarılır. Genellikle bir fleet için vibro sayısı 5 adettir. Bir adedi yedek tutulup, genellikle 4 vibro ile enerji açığa çıkarılır. Atış noktasına yanaşan vibrolar, çelik tablasını (base plate) yer yüzeyine temas edecek şekilde indirir (Şekil 1). Bu tablalar sert çelikten yapılmıştır. Daha sonra bu tablalar aracılığıyla yer içerisine belirli frekanslarda titreşim gönderme işlemi başlar. Tabla tekrar yukarı kaldırılır ve her atış noktası için bu işlem tekrarlanır.



Şekil 1. Atış düzeni (sismik enerji kaynak düzeni) oluşturan vibratörler (üstte) ve yer yüzeyine temas eden vibro çelik tablası (Vibrator pattern in operation (above) and base plate coupling with the surface (below)).

Bir vibro için yere uygulanan güç, vibratörün maksimum gücü değildir. Eğer enerji ortaya çıkarmak için maksimum güç uygulanır ise vibrolar zarar görebilir. Bu nedenle vibrolar maksimum gücünün %80' ini kullanarak enerji açığa çıkarır ve kayıt alınır. Vibratörün gücü kontrol edilebilir olduğu için, arazinin eğimli ve engebeli olması durumunda gücü azaltılabilir ve herhangi bir kazaya sebebiyet verilmesi engellenir. Vibratörlerin gücünü artırmak, yere gönderilen sweep sinyalinde değişikliğe sebep olmaz ya da bu değişiklikler de isteğe bağlı olarak düzenlenebilen değişikliklerdir. Vibratörün gücü ve/veya sweep sayısı arttıkça sweep sinyalinin genliği de aynı oranda artar. Vibratör sayısının azaltılması durumunda, her atış noktası için planlanandan daha fazla sweep yapılarak yere gönderilen sinyalin güç kaybı önlenir.

Kayıt aracının (recorder) elektronik sistemi, tanımlanmış sweep sinyalini radyo frekansları şeklinde telsiz vasıtasıyla vibratör üzerinde bulunan elektronik sisteme gönderir. Vibratörün elektronik sistemi ise gelen sinyali hidrolik sistemin servo cihazına gönderir. Servo, gelen sinyaller doğrultusunda sisteme basınçlı hidrolik giriş-

çıkışını temin ederek tablanın (Şekil 1) istenilen frekanslarda titreşmesini sağlar. Vibratörün yere göndermek istediği sinyalin değerinin istenilen sinyal ile aynı olup olmadığından emin olmak amacıyla, tabla üzerine tamamen jeofon prensipleri ile aynı şekilde çalışan, jeofona benzeyen bir alıcı monte edilmiştir. Tablanın hareketlerini bu alıcı kaydeder ve tablanın hareketlerini kayıt sistemine aktararak vibratörün yere gönderdiği sinyalin güvenilirliğini kontrol eder. Bu sayede, vibratör hareketleriyle yere iletilmek istenen referans sinyali (sweep sinyali) kıyaslanabilir ve genlik ile fazda oluşabilecek aykırılıklar veya istenmeyen etkiler giderilerek referans sinyale olabildiğince yakın bir sinyalin yeraltına aktarımı sağlanır. Hidrolik sistem aracılığıyla mekanik hareketlere çevrilerek yer içine gönderilen sinyal, yansıtıcı tabaka yüzeylerinden yansıyarak aktif durumdaki alıcılara ulaşır. Jeofon adı verilen alıcılar tarafından kaydedilen yansıma verileri, kayıt cihazında referans sinyal ile çapraz ilişki (cross-correlation) işlemine tabi tutularak sismik kayıt (iz) elde edilir. Bütün bu işlemlerin sonucunda, yer içerisindeki tabakaları gösteren, zaman ortamındaki yansıma serileri elde edilir.

4. Sweep Parametreleri (Sweep Parameters)

Bir sweep sinyalini belirleyen veya sweep sinyaline etki eden parametreler şunlardır; Sweep tipi, Sweep sayısı, Sweep uzunluğu, Sweep yönü, Taper (törpüleme), Sweep frekans bandı, Vibratör gücü, Vibratör düzeni. Bu parametreler aşağıda kısaca anlatılacaktır ancak, vibratör gücü sabit olduğundan sadece sweep sayısı test edilecektir. Vibratör düzeni için sismik endüstrisinde en çok kullanılan ve 4 vibratörün ard arda (inline) şeklinde dizildiği düzenek bu çalışmada da tercih edilmiştir.

4.1 Sweep Tipleri (Sweep Types)

Yer altına gönderilen sweep sinyali farklı tiplerde olabilir. Endüstride en çok tercih edilen iki sweep tipi; doğrusal sweep (linear sweep) ve doğrusal olmayan sweep (non-linear sweep)'tir. Doğrusal olmayan sweep'ler: logaritmik sweep, Sabit dB/Oct, Sabit dB/Hz ve T^n tipi sweep'lerdir. Hedeflenen seviyeler yeterince tanımlanabiliyorsa ve her frekansın eşit şekilde taranması isteniyor ise tercih edilecek olan sweep tipi doğrusal sweep olmalıdır. Zamanla anlık frekansı değişen, sabit genlikli ve sürekli salınım gösteren doğrusal sweep' in tercih edilmesi demek, uzunluğu belirlenen sweep frekans aralığının her saniye için eşit olarak taranması anlamına gelir.

Yüzeye yakın tabakalar için daha net bilgi elde edilmek isteniyor ise yani sığ tabakalar hedefleniyor ise doğrusal olmayan sweep tipi seçilerek yüksek frekanslı bileşenlerde daha uzun süre tarama yapılabilir ya da daha derin seviyelerden, düşük frekans içeriği ile bilgi edinilecek ise doğrusal olmayan sweep seçilerek düşük frekanslı bileşenler daha fazla sürede taranır. Doğrusal olmayan sweep ile hedeflenen seviyelere bağlı olacak şekilde sweep (tarama) süresince frekanslara çok daha uzun süreler ayırma olanağı sağlar. Bilinen sweep çeşitleri dışında bazı firmaların geliştirmiş oldukları sweep çeşitleri de mevcuttur. Bunlar; poly sweep, combi sweep ve encoded sweeplerdir. Bu sweep tipleri farklı amaç ve hedefler doğrultusunda kullanılmış olmalarına rağmen devamlılık sağlayamamıştır. Ancak petrol endüstrisinde en çok tercih edilen sweep türü Doğrusal (Linear) sweep'tir. Bu sismik çalışmanın da amacı derinlerdeki petrol rezervuarlarının tespiti olduğu için test çalışmasında ve sonrasındaki veri toplama aşamasında doğrusal (linear) sweep tercih edilmiştir.

4.2 Sweep Sayısı (Number of Sweeps)

Vibratörün her bir atış noktasında kaç defa yeraltına sweep (tarama) sinyali göndermesi gerektiğinin belirlendiği sayıdır. Sayının belirlenmesi vibronun yere gönderdiği enerjiye yeraltı tabakalarının karşı cevabı ile alakalıdır. Enerji zayıf bir şekilde iletiliyor ise sweep sayısı artırılmalıdır. Buradaki kriter hedef seviye ve uzak ofsetlere enerji iletiminin sağlıklı bir şekilde iletilmesi ile alakalıdır. Sweep sayısı maliyeti etkileyen bir faktördür çünkü sweep sayısının fazla seçilmesi maliyeti ve en önemlisi zaman kaybının artması anlamına gelmektedir. Bu durum saha çalışmalarında istenmeyen bir olgudur. Bundan dolayı, yeraltını en uygun şekilde tanımlayacak kadar az sayıda sweep sayısını belirlemeye gayret edilmelidir. Sweep sayısının artması, yansımaları daha net göstermektedir, özellikle daha derindeki yansımalar bakımından oldukça iyidir. Sweep sayısının artması ile yani zaman ortamında toplanması sebebiyle harmonikler de bir miktar elimine olmaktadır.

4.3 Sweep Uzunluğu (Sweep Length)

Bir sweep sinyalinin yere gönderilmesi için geçen süreye sweep uzunluğu denir. Sinyalde frekans farklılıkları olmasına rağmen genlik değişimi yoktur. Diğer bir deyişle, sweep süresinin uzunluğu sweep sinyalinin genliğini etkilemez fakat kros-korelasyon dalgacığının genliğini etkiler. Sahadaki hedef seviyeler derin olarak belirlenmiş ise derinlere daha fazla enerji göndermek ve derin yansımaları kaydedebilmek için sweep uzunluğunun da yeterince uzun olması gerekecektir. Uzun sweep sinyalinin olumsuz tarafları da vardır. Kayıt sonlarında hayalet yansımaların meydana gelmesi, uzun sweeplerin daha pahalı olması, bazı vibratörlerde uzun sweeplerin mekanik problemler yaratması, korelasyon gürültü seviyesini arttırması sayılabilir.

4.4 Sweep Yönü (Sweep Direction)

Sweep sinyalin frekans bandı, zamanda alçak frekanslardan yüksek frekanslara doğru gidiyor ise bu yukarı yönlü veya artan sweep (up-sweep) olarak adlandırılır. Eğer yüksek frekanslardan alçağa doğru gidiyor ise buna da azalan sweep (down-sweep) denir. Sweep lineer ve frekans bantları aynı ise her iki sweep de yaklaşık olarak aynı spektrumu verecektir. Buna karşılık, azalan sweep başlangıçta yüksek frekanslar içerdiğinden sinyal derinlere iletilmeden sönmülmeye başlar. Sığ tabakalar yüksek frekanslı sweepleri daha çabuk sönmümler. Bu sönmüleme, istenilen frekanslardaki bileşenlerin tam olarak aktarılamamasına sebep olur. Bir diğer husus; yukarı sweep (Up-sweep) kros-korelasyon yapıldığında, harmonikler negatif zamanda olur. Aşağı sweep (down-sweep) kros-korelasyon yapıldığında ise harmonikler pozitif zamanda olur. Bu durumda kaydı daha fazla bozar. Bu amaçla yukarı sweep tercih edilir. Bu nedenlerle artan sweep tercihi daha fazla kullanılmaktadır. Ayrıca, azalan sweep tercih edildiğinde korelasyon işlemi sonrasında hayalet yansımalar olur. Bu sebeplerle bu test çalışmasında artan sweep (up-sweep) kullanılmıştır.

4.5 Törpüleme (Taper)

Sweep band genişliği ve sweep uzunluğu kararlaştırıldıktan sonra, yaklaşık sweep boyunun %4-5' i kadar bir süre için sweep sinyalinin başlangıç ve bitişinde referans sinyali genişliği en yüksek seviyede kullanılmaz (Evans 1997). Bu işlemin adı taper (törpüleme) olarak adlandırılır. Sinyalin genel kullanımında başlangıcı ve bitişindeki taper süresi aynıdır. Bu durumda törpüleme tipi de aynı olacaktır. Taper işleminin amacı, vibratörün harekete düşük güçte başlayıp düşük güçte bitirmesidir. Bu durumda vibratörün mekanik aksamında ortaya çıkabilecek zararların minimuma indirilmesi hedeflenir. Taper tipleri farklılık gösterir. Bu tipler; lineer, cosinüs, sinüs ve Gaussian olarak adlandırılır. Zemine bağlı olarak farklı boylarda seçilebilir ancak Taper tipleri içerisinde en çok tercih edileni cosinüs tipidir. Nedeni ise diğer taper tiplerine oranla yan salınımların etkilerini daha iyi azaltabilmesi ve daha kolay uygulanabilmesidir. Taper boyu uzadıkça sinyalin yan salınımları azalacak ve iğnecik fonksiyonuna yaklaşacaktır. Bu çalışmada da cosinüs törpüleme tercih edilmiştir.

4.6 Sweep Frekans Bandı (Sweep Frequency Band)

Sismik çalışmalarda frekans bandı ve ona bağlı diğer parametreler olan “Bant genişliği (başlangıç ve bitiş frekansları arasındaki fark)”, “Merkez frekansı (başlangıç ve bitiş frekanslarının toplamının yarısı)” ve “Oktav (bant genişliğinin oranı)” iyi tespit edilmelidir. Elbette, bunun için sweep başlangıç ve bitiş frekanslarının öncelikle belirlenmesi gerekmektedir.

Teorik olarak düşünüldüğünde frekans bandının geniş olması en iyi durum olarak nitelendirilir. Sismik çalışmalarda bu nedenle genellikle en uzun frekans bantları ile çalışılır. Bu tercihler neticesinde hem düşük frekans, hem de yüksek frekans bileşenlerinden sinyal elde edilir. Bitiş frekansları arttırılmış olan sinyallerin genellikle genlik spektrumları çok daha geniş olur ve özilişkili sinyalleri iğnecik fonksiyonuna yaklaşır, buna ek olarak yan salınımları azalır. Bununla beraber, sweep bant genişliği en az 2 Octav olmalıdır.

Sweep frekansları seçilirken göz önünde bulundurulması gereken en önemli durum, çalışılacak sahanın jeolojik ve jeofizik özellikleridir. Bu özellikler; yeraltı yapılarının jeolojik özellikleri, değişik frekanslar seçildiğinde yerin vereceği cevap, yapıların büyüklüğü ve kapladığı alanın genişliği, sahadaki yapıların derinliği, yüzey dalgaları ve özellikleri, minimum bant genişliği ve sahadaki hakim frekanstır. Ancak, bunların hepsinden daha çok sismik kaliteyi etkileyen, yüzeydeki formasyonların litolojisidir.

5. Farklı litolojiler için en uygun parametrelerin tespitine yönelik bir sweep test çalışması (A sweep test study to determine the optimum parameters for different lithologies)

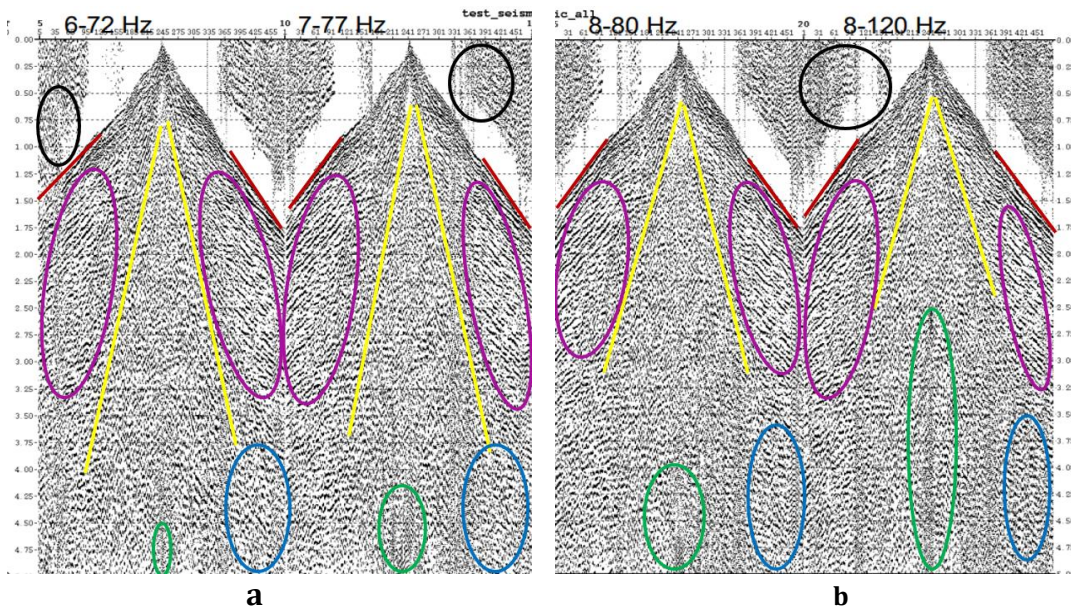
Ülkemiz birçok formasyonu bir arada barındıran, spesifik farklılıklara sahip bir jeolojik ve tektonik konuma sahiptir. Özellikle petrol aramacılığının aktif olarak yapıldığı Güneydoğu Anadolu (GDA) bölgesi yüzeyinde birçok jeolojik formasyon mevcuttur. Sismik yansıma çalışmalarında formasyon etkisi, özellikle sismik kaydın yorumlanması aşamasında çok önemlidir. GDA genelinde, yüzeyde çok geniş alanlarda mostra veren Senozoik yaşlı formasyonlardan bazıları; Gercüş Formasyonu, Hoya Formasyonu, Germik Formasyonu, Fırat Formasyonu, Şelmo Formasyonu, Yeniköy Formasyonu adlarıyla anılan formasyonlardır (Aydemir vd., 2006).

Bu formasyonların bazıları sismik kayıt üzerinde bozucu etkiye sahip kireçtaşı, jips, bazalt ve anhidrit gibi birimleri içlerinde barındırırlar. Gercüş Formasyonu çakıltası, kumtaşı ve marnlardan oluşan formasyondur (Aydemir vd., 2006). Sismik kayıt üzerinde bu formasyonda yapılan çalışmalarda bozucu etkiler çok görülmez. Fakat Hoya Formasyonu; kısmen dolomitik, erimeli kireçtaşlarından oluşan bir formasyon olması nedeniyle sismik kayıta çok fazla bozucu etkiye sahiptir. Germik Formasyonu da yer yer dolomitik, tebeşirli kireçtaşı, killi kireçtaşları ile başlar, yukarıya doğru ise kalın jips ve anhidrit ile devam eder. Bu formasyon üzerinde yapılan sismik çalışmalardan elde edilen sismik kayıta da bozucu etkiler net şekilde gözlemlenmektedir. Fırat

Formasyonu da tıpkı Germik Formasyonu gibi sismik kayıt üzerinde bozucu etkiye sahip birimleri bünyesinde bulundurur. Karacadağ Volkanitleri ise olivin toleyit, olivin bazalt, olivin ojit bazaltlar ve piroklastiklerden oluşmaktadır ve bazalt yoğunluğunun en fazla olduğu formasyondur. Bazalt da yapısı gereği sismik kayıta bozucu etkiye sahiptir. Özellikle Diyarbakır yakınlarındaki Karacadağ eteklerinde sismik kayıt üzerinde bozucu etkileri çok daha fazladır (Toksoy, 2019). Şelmo Formasyonu ise kumtaşı, şeyl, konglomera, çamurtaşı gibi birimlerden oluşmaktadır ve sismik kayıt açısından bozucu etkileri çok azdır (Aydemir vd., 2006).

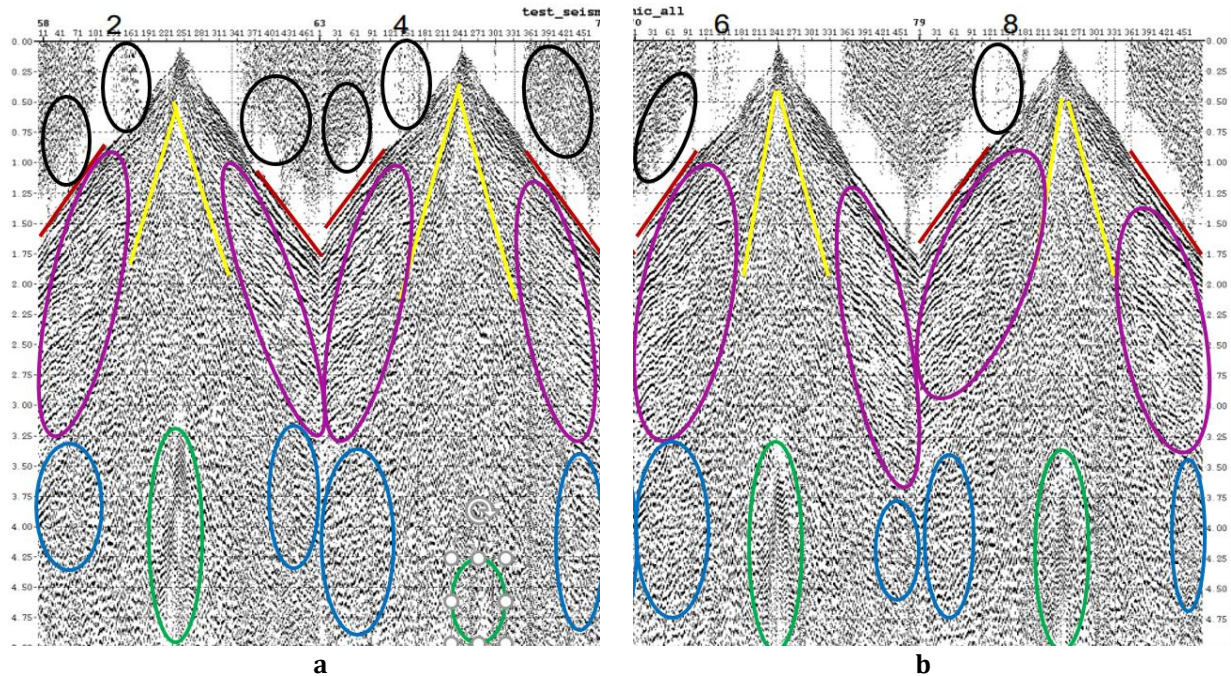
Bu çalışmada, vibrosismik yöntem kullanılarak, en uygun sweep parametrelerini tespit etmek için yukarıdaki formasyonların önemli bir kısmı üzerinde (bazaltlar hariç) bir test çalışması yürütülmüş ve bunun sonucunda GDA genelinde kullanılabilecek parametreler belirlenmiştir. Bunun için öncelikle frekans bant aralığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Başlangıçta, 16 sn sweep uzunluğu ve her bir atış noktasında 4 adet doğrusal, artan sweep yapılması kabul edilerek farklı frekans aralığında, farklı sismik kayıt örnekleri alınmıştır. Test edilen frekans bant aralıkları şöyledir: 6-72, 7-77, 8-80 ve 8-120 Hz. Aynı noktada alınan ve bu farklı frekans aralıkları için tarama yapılan kayıtlar yan yana konularak karşılaştırma yapmak daha kolay ve doğru bir yöntem olacaktır. Bu kayıtlar Şekil-2'de gösterilmektedir.

Şekil-2 incelendiğinde siyah renk ile gösterilen yerlerde çevresel gürültüler gözlenmektedir. Tüm frekans aralıklarında çevresel gürültüler kısmen baskılanmıştır. Kırmızı renk ile işaretlenmiş olan yerler, ilk varış sinyallerini göstermektedir. İlk varış süreleri hemen hemen tüm frekans aralığında aynıdır. Mor renk ile gösterilen alanlar ise yansımaları göstermektedir ve mavi renk ile belirlenmiş alanlar derin yansımaların olduğu kesimlerdir. 6-72 Hz, lineer, 16 sn ve 4 sweep parametreleriyle alınan sismik kayıt incelendiğinde yansımaların 4.5 sn seviyelerine kadar belirgin olduğu görülmektedir. Çevresel gürültüler bastırılmış, veri bozulmamıştır. Hava dalgaları (Air blast) 3.5 sn civarlarında gözlenmektedir. Yüzey dalgaları (Ground roll) ve ilk varış (first break) süreleri belirgin olmakla birlikte genel itibarıyla düzgün bir sismik kesittir. 7-77 Hz, lineer, 16 sn, 4 sweep parametrelerine sahip sismik kayıt incelendiğinde gürültülerin fazla olduğu, fakat sweep sırasında bastırıldığı görülmektedir. Derinlerde yansımalar net şekilde görülmektedir. Ground roll belirgin olmakla birlikte buna karşılık yansımalar ise bozulmamıştır. 4.5 sn seviyelerinde bozulmalar görülmekte olsa da genel olarak iyi bir kayıt örneğidir. 8-80 Hz, lineer, 16 sn, 4 sweep parametrelerine sahip sismik kayıt incelendiğinde gürültülerin daha belirgin olduğu, gürültünün tam anlamıyla bastırılmadığı görülmektedir. Air blast belirgin ve veri üzerinde bozucu etkisi görülmektedir. Yansımalar ve ilk varış belirgindir. Genel hatlarıyla iyi bir kayıt örneğidir. 8-120 Hz, lineer, 16 sn, 4 sweep parametrelerine sahip sismik kayıta yansımalar belirgin olmasına rağmen air blast 2.25 sn civarlarında gözlemlenmektedir. Derinlerde yansımalar bozulmakta, ground roll belirginliğini kaybetmektedir. 3 sn civarlarına kadar yansımalar belirgin fakat derinlerde bozulmalar gözlemlenmektedir. Özetle; tüm kayıtlarda derin yansımalar mevcuttur. Sarı renkli çizgilerin arasında kalan yüzey dalgaları, 8-120 Hz frekans aralığı olarak belirlenen kayıt hariç diğer frekans aralıklarındaki kesitlerde belirgindir. Yeşil renk ile gösterilen ve hava dalgasının (air-blast) temsil edildiği kesimlerde, özellikle 8-120 Hz frekans aralığındaki sismik kayıta bozucu etkisi görülmektedir. Bu durumlar göz önüne alındığında 6-72 Hz frekans aralığında seçilen sismik kayıt, maliyet ve veri işlem aşamaları düşünüldüğünde tercih edilebilir bir aralık olacaktır.



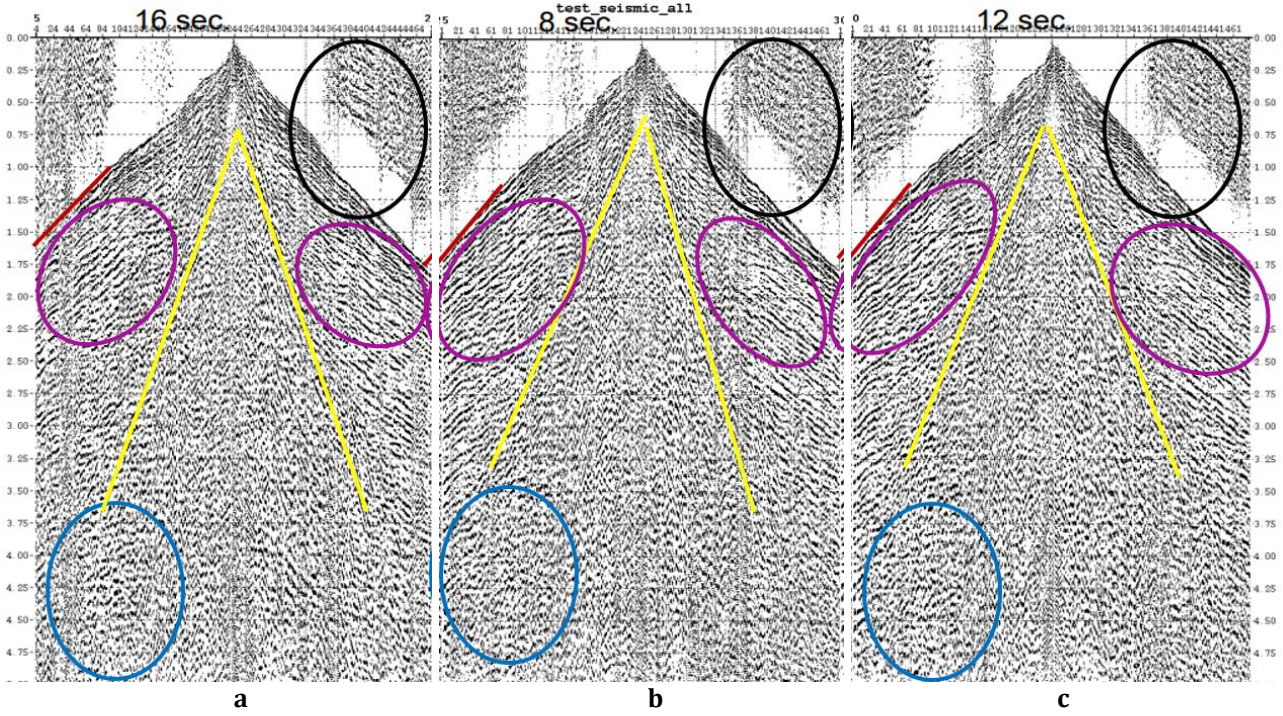
Şekil 2. a) 6-72 ve 7-77, **b)** 8-80 ve 8-120 Hz frekans aralıklarındaki lineer, 16 sn uzunluğunda ve 4 adet up-sweep tarama yapılarak kayıt edilen atışlar (Linear, 16-s long shot gathers in the frequency ranges of **a)** 6-72 and 7-77, **b)** 8-80 and 8-120 Hz, recorded by 4 sweeps.

Sweep parametre seçiminde önemli olan bir diğer konu da sweep sayısıdır. Sweep sayısı yer içerisine gönderilen enerjinin miktarını arttırmak için oldukça önemlidir. Şekil 3' de, bir önceki test sonucu elde edilmiş olan en iyi frekans aralığı 6-72 Hz ile alınan kayıtlar verilmiştir. Bu kayıtlarda, 12 sn kayıt uzunluğu standart kabul edilmiş ve aynı atış noktasında sırasıyla 2, 4, 6 ve 8 adet sweep yapılarak kayıt alınmıştır. Şekil incelendiğinde burada da siyah renk ile gösterilen yerlerde çevresel gürültüler gözlenmektedir. Özellikle 2 adet sweep ile alınan kayıt haricindeki bütün çoklu sweep sayılarında, gürültüler baskılanmış olup 2 sweep ile alınan kaydın başarısız olduğu söylenebilir. Bu şekilde de kırmızı renk ile işaretlenmiş olan yerler ilk varış (first break) sinyallerini göstermektedir. İlk varış süreleri tüm sweep sayıları için yaklaşık aynıdır. Mor renk ile gösterilen alanlar ise yansımaları göstermektedir. Aynı noktada 4 sweep tarama ile alınan kayıt ve sonraki kayıtlarda yansımaların daha derinlere indiği ve daha net olduğu görülmektedir. Yine mavi renk ile belirlenmiş alanlar derin yansımaları göstermektedir. Sweep sayısını arttırmak derinlerden veri alma olanağı sağlamakla birlikte, topoğrafya ve zemine bağlı olarak bu durum değişkenlik gösterebilir. Öyle ki 8 adet sweep ile yapılan çalışmaya bakılırsa, derinlerde yansımaların bozulduğu sanki bir gürültü kaynağı varmış gibi reaksiyonu verdiği söylenebilir. Sweep sayısını arttırmak, yer içine gönderilen enerjiyi arttırmak anlamına gelir ki bu durum uzak ofsetlerden veri alımını kolaylaştırır. Sarı renkli çizgilerin arasında kalan aralıklar ise yüzey dalgalarıdır (ground roll) ve tüm sweep sayılarında belirgindir. Yeşil renk ile sınırlanan alanlar yine hava dalgasını (air-blast) temsil etmektedir. Özellikle 4 sweep ile yapılan çalışmada air blast 4.25 sn civarlarında (çok daha derinlerde) ve çok daha az belirgin olarak gözlemlenmektedir. Diğer kayıtlarda ise air-blast çok bariz ve baskın bir gürültü şeklinde kendini göstermektedir. Sweep sayısı sismik çalışmalarda hem maliyeti artıran, hem de zaman kaybı oluşturan nedenlerden biridir. Bir atış noktası için 4 sweep parametresinde yapılan çalışma ile 6 veya 8 sweep parametresinde yapılan çalışmanın maliyeti ve bir atış için geçen sürenin sweep sayısı ile doğru orantılı olarak artması bu tür çalışmalarda istenilen bir durum değildir. Veri işlem aşamaları, maliyet ve zaman parametreleri de göz önüne alındığında bu test çalışmasında makul olan parametrelerin 6-72 Hz frekans bandına sahip, lineer up-sweep kullanımı ile aynı noktada 4 adet sweep yapılmasının uygun olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.



Şekil 3. 6-72 Hz frekans aralığında, lineer, 12 sn uzunluğunda, ve aynı atış noktasında **a)** 2 ve 4, **b)** 6 ve 8 adet up-sweep yapılarak alınan atışlar (Shot gathers in the frequency range of 6-72 Hz, linear, 12 s long, and taken by **a)** 2 and 4, **b)** 6 and 8 sweeps at the same shot point).

Sismik yorumcular, parametreye karar verirken sweep uzunluklarının çevresel gürültüleri bastırıp bastırmadığına, yansımaların ilk varışlarının belirginliğine, hedef seviyede belirgin yansımaların olup olmadığına ve maliyet parametrelerini düşünerek karar verirler. Bir sonraki adımda, belirlenmiş olan başlangıç ve bitiş frekansları (6-72 Hz) ile sweep sayıları aynı tutulmuş (her bir atış noktasında 4 sweep), fakat sweep uzunluğu farklı olan test atışları yapılmıştır. Böylelikle en uygun sweep uzunluğu belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 4' te 6-72 Hz frekans aralığında, 4 adet, lineer, up-sweep ve 8, 12 ve 16 sn uzunluğundaki kayıtlar yine yan yana konularak korelasyon yapılmıştır.



Şekil 4. 6-72 Hz frekans aralığında, lineer, 4 adet up-sweep tarama yapılarak kayıtları kaydedilen **a)** 8, **b)** 12 ve **c)** 16 sn uzunluklarındaki atışlar (Shot gathers with lengths of **a)** 8, **b)** 12 and **c)** 16 seconds recorded by making 4 linear up-sweeps in the frequency range of 6-72 Hz).

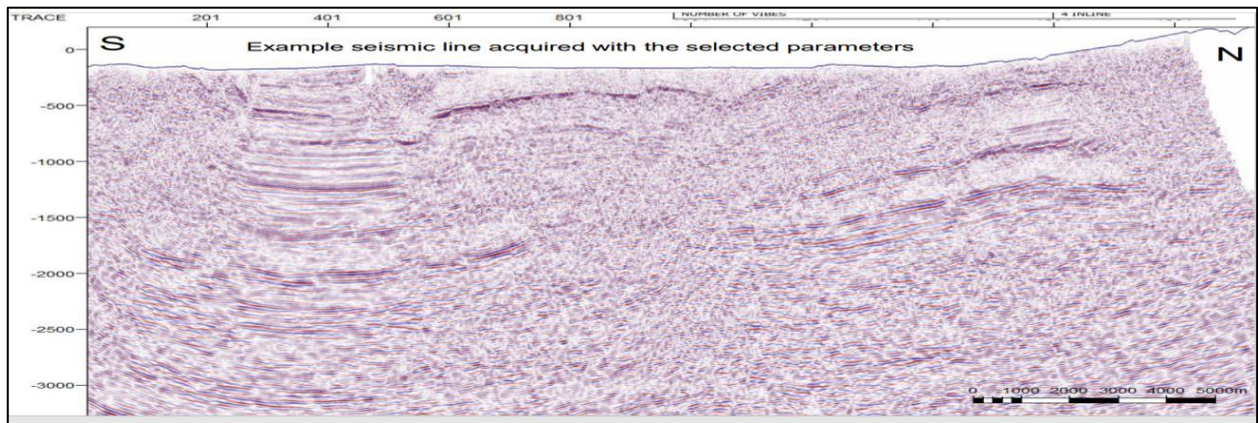
Bu şekilde de (Şekil 4) siyah renk ile gösterilen yerlerde çevresel gürültüler gözlenmektedir. Şekil dikkatle incelendiğinde, 8 sn uzunluğundaki sweep' in çevresel gürültüleri bastıramadığı, yansımaların ise derinlerde sönümlendiği gözlemlenmektedir. 12 sn uzunluğundaki kayıta ise gürültüler baskılanmış, derinlerden yansıma daha net alınmış ve ilk varış süreleri ise daha belirgin olarak gözlenmiştir. Fakat 16 sn uzunluğundaki kesitte ise gürültüler tamamen baskılanmış, ilk varışlar daha net ve daha derinlerden daha iyi veri alındığı görülmektedir. Yine daha detay verilecek olursa, kırmızı renk ile işaretlenmiş ilk varış sinyalleri ele alındığında; 16 sn uzunluğundaki kayıta ilk varış zamanlarının 1.5 saniyelere yaklaştığı çok net şekilde görülmektedir. Sweep uzunluğu 8 saniye olan kayıta ise bu sürenin 1.75 saniyeler civarında olduğu görülmektedir. Mor renk ile gösterilen alanlar ise yansımaları göstermektedir ve 16 sn sweep uzunluğu sismik veride yansımaların daha derinlere indiği ve daha net olduğu fark edilmektedir. Mavi renk ile belirlenmiş alanlara dikkatle bakıldığında, diğer kayıt uzunluklarında derin yansımalar için gözlenen flu görüntüler, 16 sn sweep uzunluğu olan kayıta yerini daha net bir görüntüye bırakmıştır. Sarı renk ile belirlenen aralıklar ise yüzey dalgalarının olduğu aralıklardır ve 16 sn sweep uzunluğundaki kayıta yansımaları bozmamıştır. Bu durumlar göz önüne alındığında 16 sn sweep uzunluğunun tercih edilmesi en sağlıklı seçenek olacaktır.

GDA'da bu örnek parametre test çalışması yapılırken frekans aralığı, sweep sayısı ve sweep uzunluğu değerleri test edilmiş, diğer tüm parametreler aynı tutulmuştur. Bunlar; vibro sayısı, taper süresi, sweep yönü ve vibratör gücüdür. Parametre test çalışmasında kullanılan ve sonunda belirlenen parametreler Tablo 1' de verilmiştir.

Güneydoğu Anadolu (GDA) bölgesinde yapılan test çalışması neticesinde tespit edilen ve Tablo-1' de verilen parametreler sadece tek bir formasyon üzerinde değil, farklı litolojik özelliklere sahip formasyonlar üzerinde de denenerek bulunan en uygun parametrelerdir. Bu parametreler kullanılarak elde edilen iki-boyutlu (2-D) bir sismik kesit Şekil 5' de gösterilmiştir.

Tablo 1. GDA'da yürütülen sweep parametre test çalışması neticesinde belirlenen ve kullanılan parametreler (Parameters determined and used as a result of the sweep parameter test study in SE-Anatolia).

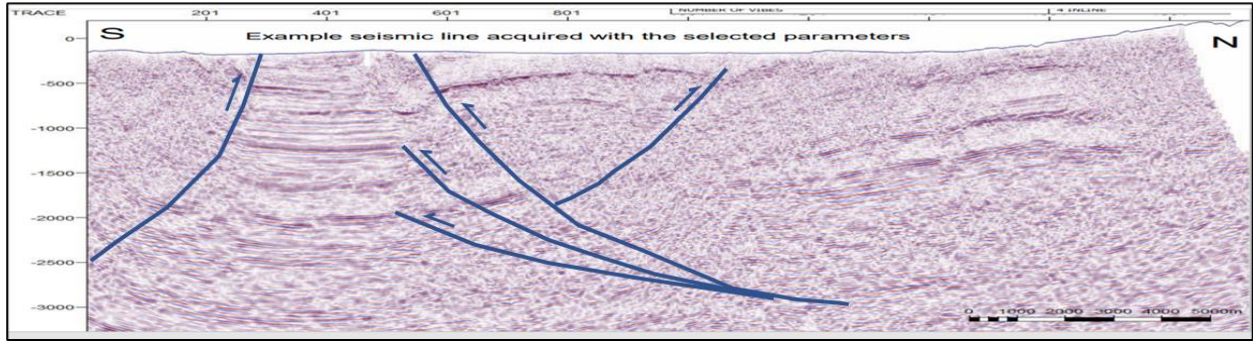
ALICI GEOMETRİSİ	
ATIŞ NOKTA ARALIĞI	25 M
ALICI NOKTA ARALIĞI	25 M
AKTİF SPREAD (SERİM)	480 KANAL (SİMETRİK)
JEOFON SAYISI	2 STRING (12 JEOFON)
JEOFON ARALIĞI	2.08 M
VİBRATÖR DİZİSİ ARALIĞI	12.5
MİN. OFSET / MAKS. OFSET	37.5 M / 6012.5 M
KATLAMA SAYISI (FOLD)	240
SWEEP PARAMETRELERİ	
SWEEP UZUNLUĞU	16 SN
KAYIT UZUNLUĞU	5 SN
ÖRNEKLEME ARALIĞI	2 MSN
DÜŞÜK KESME FİLTRESİ	OUT
YÜKSEK KESME FİLTRESİ	200 Hz, % 80 Nyquist
SWEEP SAYISI	4
BAŞLANGIÇ FREKANSI	6 Hz
BİTİŞ FREKANSI	72 Hz
SWEEP TÜRÜ	LİNEER
TAPER	250 MSN
VİBRATÖR SAYISI	4

**Şekil 5.** Güneydoğu Anadolu bölgesinde yapılmış olan test çalışması neticesinde elde edilen sismik kesit (Seismic section obtained as a result of the sweep test results in SE Anatolia).

Şekil 6'da, bu kesitin üzerine, yüzeyde yer alan ve farklı litolojilere sahip formasyonların sınırları işlenmiştir. Özellikle litolojik farklılıkların belirtilmesinin sebebi ise bu litolojilerin sismik kalite üzerine etkilerini daha net olarak göstermektir. Bir diğer sebep ise sismik kaliteyi çok bozan birimlerde (örneğin karbonatlarda) ve tektonizma açısından oldukça kırıklı ve sismik enerjinin, dolayısıyla yansımaların bolca saçılım gösterdiği (dispersive) ortamlarda dahi seçilen parametrelerle yorumlanabilir nitelikte bir kalite elde edilebileceğini

göstermektedir. Kesitin güneyinde, jips-şeyl ağırlıklı bir litolojiye sahip formasyon üzerinden başlayarak kuzeye doğru önce klastiklerin baskın olduğu, daha sonra ise karbonatlar ile tanımlanan formasyonlara geçildiği gözlenmektedir. Buna göre, jipsli birimlerde (Germik Formasyonu) sismik kalitenin çok bozulduğu aşıkardır. Bunun hemen önünde, kuzeye doğru yer alan ve Güneydoğu Anadolu' da en iyi sismik kaliteyi veren Şelmo Formasyonu üzerinde beklendiği üzere çok iyi bir sismik kalite artışı gözlenmektedir (Aydemir vd., 2006).

Jips-Şeyl-Anhidrit Genç kırıntılılar Bindirme zonu - yaşlı kırıntılılar Karbonatlar – Muhtelif yaşlardaki kireçtaşları



Şekil 6. Atış parametrelerini belirlemek üzere yapılan sweep test çalışması sonucu elde edilen sismik kesitin (Şekil 5) yorumlanmış gösterimi (Interpreted seismic section (Figure 5) obtained as a result of the sweep test results in SE Anatolia).

Şekil 6' da, sismik kesit üzerine tektonik yapıyı gösterir bir yorumlama yapılmıştır. Buna göre Güneydoğu Anadolu' da görülen ve kuzeyden güneye bir tektonik bindirmenin ana unsurları ile bu bindirmenin üzerinde yer alan, kuzeye doğru geri bindirme (back-thrust) fayları çizilmiştir. Kesitin en güneyinde ise bindirme önü back-thrust' a tam olarak dönüşmemiş ters fay görülmektedir. Her ikisinin arasında Şelmo Formasyonu' nun yer aldığı üçgen zon (triangle zone) çok net görülmektedir. Güneydeki jips-anhidrit ve şeyl litolojisi ile yüzeyde temsil edilen birim (Germik Formasyonu), bu back-thrust ile güneyden kuzeye doğru Şelmo Formasyonu üzerine itilmiştir. Back-thrust' ın hemen altındaki iyi kalite ile ifadesini bulan alanın derinlerde güneye doğru genişlemesi bu sebepten dolayıdır. Buna karşılık, kuzeydeki asıl bindirme yapısının üzerinde yer alan ve çakıltası-kumtaşı-marn ardalanması ile karakterize olan Gercüş Formasyonu da Şelmo Formasyonu üzerine itilerek bindirmiştir. Bu formasyon da ağırlıklı olarak klastiklerden meydana gelmesine rağmen, Şelmo Formasyonu' na nazaran çok daha heterojen bir litolojiye sahip olması nedeniyle sismik kaliteyi olumsuz etkilemektedir. Buna ek olarak, bu yorumda sadece ana tektonik unsurlar işlenmiştir. Ancak Gercüş Formasyonu' nun olduğu alanda üstüne bir de çok yoğun tektonizma gelişmiştir. Hatta Gercüş Formasyonu' nun, ana bindirmenin üzerinde tıpkı sörf yapar gibi çok daha genç olan Şelmo üzerine bindirmesi, sismik kalite açısından neredeyse en kuzeydeki karbonatlar kadar, hatta onlardan da kötü bir sismik görüntü kalitesi üretmesini de beraberinde getirmiştir. Dahası, bu kötü sismik kalite üzerinde, tektonik zonda Gercüş Formasyonu' nun tek başına değil, karbonat nitelikli Hoya ve Fırat Formasyonları ile karışık bir biçimde itilmiş olması görüntü kalitesini beklenenden daha kötü hale getirmiştir. Kesitin kuzey kesimlerinin tektonik açıdan daha sade bir alana karşılık gelmesi sebebiyle, her ne kadar yüzeyde karbonat litolojisi baskın birimler olsa da (ki bu karbonatlar da kötü sismik görüntü üretirler), tektonik bindirme zonuna göre nispeten biraz daha düzelmiş bir görüntü sunmaktadırlar.

6. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Petrol ve doğalgaz araştırmalarında sismik yansıma yöntemi tüm dünyada vazgeçilmez ve en önemli jeofizik arama yöntemidir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte bu önemli yöntemin kaynak kullanımında dinamit yerine vibrosismik kaynağının keşfi, çalışmaların daha ekonomik olmasını, operasyon kolaylığını, çevreye en az zarar ve rehabilitasyon anlamındaki avantajlarını ve kontrol edilebilir olmasıyla elde edilen sonuçların başarılarını bambaşka bir seviyeye ulaştırmıştır.

Kara sismik araştırmalarında, deniz sismiği çalışmalarından farklı olarak sismik kalitenin elde edilmesi çok fazla parametreye bağlı olduğundan kontrollü bir kaynak olması nedeniyle vibrosismik yöntemini teknik anlamda da çok önemli bir yere taşımaktadır. Çalışılan bölgelerdeki yüzey jeolojisi, elde edilmek istenilen sismik kesitin temsil edeceği jeolojinin stratigrafik ve tektonik yapısı, hedeflenen derinlik, görüntülenmek istenilen tabaka kalınlıkları, sismik çalışmalarda uygulama ve netice açısından çok büyük önem arz etmektedir.

Vibrosismik yöntemde yer içerisine gönderilen enerjinin büyüklüğü, kaynağın frekans aralığı ve genliği gibi sinyalin kontrol edilebilir özellikleri sayesinde; bölgesel gürültüler, yüzey dalgaları ve bunun gibi sinyal/gürültü oranını olumsuz etkileyen öğelerin de testlerle gözlemlenerek sahaya uygun şekilde belirlenmesiyle kalitenin önemli ölçüde artırılması sağlanabilmektedir. Bahsedilen tüm bu konuların önemi ve vibrosismik yöntemin

avantajları değerlendirildiğinde, bu çalışmada vibrosismik kaynak kullanımı ve sweep sinyali parametre seçimi ile yüzey jeolojisi arasındaki ilişkilerin belirlenmesi konuları detaylı olarak incelenmiştir. Veri toplama öncesi testler için önemli ölçüde bütçe ve zaman ayrılması sırasıyla; kalitenin artmasını, artan kalite ile sismik kesitlerin daha iyi ve doğru yorumlanmasını, petrol ve doğalgaz hedeflerinin daha doğru bir şekilde tespit edilmesini, bu olumlu sonuçların çalışanlar ve ülke açısından ekonomik anlamda çok büyük artı değerler sağlanmasını da beraberinde getirmektedir.

Yüzey koşulları, yoğun tektonizma ve mostra veren formasyonlar ele alındığında iyi kaliteli sismik veri elde edilmesi oldukça zor olan Güneydoğu Anadolu bölgesi, ironik bir şekilde ülkemizin petrol üreten tek bölgesidir. Bu sebeple sismik veri kalitesini artırmak, doğrudan petrol arama çalışmalarını, dolayısıyla da ülke ekonomisini etkileyen bir süreçtir. Bu sürece olumlu katkılar sağlamak, bu alanda gelecek zaman dilimlerinde yapılacak sismik çalışmalara yön göstermek, işleri kolaylaştırmak ve zaman kayıplarını en aza indirmek, buna karşılık yeni petrol yataklarının tespiti için doğru ve en optimal parametrelerin belirlenmesi amacıyla GDA'da yapılan bu vibrosismik çalışmada, sweep sinyal parametrelerinin belirlenmesi adına öncelikle parametre test atışları yapılmıştır. Farklı frekans aralıklarında, farklı sweep sayılarında ve farklı kayıt uzunluklarında birçok test atışı yapılmıştır. Amaç, jeolojik formasyonlar ve çalışmanın hedefine en uygun parametrelerin belirlenmesi olmuştur. Seçilen tüm parametreler için hakim jeoloji, çalışmanın amacı ve maliyet durumu göz önüne alınarak karar verilmiştir. Özellikle sweep uzunluğu ve sweep sayısı maliyeti artırıcı parametrelerin başında gelmektedir.

Bu çalışmanın önemli amaçlarından birisi de Güneydoğu Anadolu' da yapılan ve yapılacak olan vibrosismik çalışmalarda veri kalitesini etkileyen jeolojik formasyonların veri üzerindeki etkileri hakkında bilgi vermek olmuştur. Bundan dolayı test çalışması, tek bir formasyon üzerinde değil, GDA genelinde yüzeyde en çok mostra veren birimlerin neredeyse tümünün bir arada olduğu bir bölgede yürütülmüştür. Çalışmamızın sonucunda tespit edilen en uygun parametreler Tablo-1'de verilmiştir. Bu parametrelerin tespitinden sonra bunlarla toplanan veriler kullanılarak elde edilen iki-boyutlu bir sismik kesit (Şekil 5), örnek olarak ve parametrelerin doğruluğunu ispat için bu çalışmada verilmiştir. İlgili sismik kesit üzerinde yer yer sismik kalitenin göreceli olarak kötü kaliteye sahip olmasına rağmen yine de Güneydoğu Anadolu' da geçmiş yıllarda toplanan sismik verilerle karşılaştırıldığında adeta yan yana bile getirilmeyecek kadar iyi ve yorumlanabilir bir sismik görüntü kalitesi sunması sebebiyle seçilen parametrelerin ne kadar doğru olduğu ortaya çıkmıştır. Zira, geçmiş yıllarda Güneydoğu Anadolu' da toplanan sismik verilerden elde edilen kesitler neredeyse hiç yorumlanamayacak düzeydedirler. Bu çalışmayla önerilerin parametrelerin kullanılmasıyla yürütülecek vibrosismik çalışmalar neticesinde iyi kalitede sismik veriler toplanacak, bu verilerin yorumlanmasıyla yeni petrol rezerv sahaları bulunacak, yeni sondaj noktaları önerilebilecektir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmada kullanılan veriler N.V. Turkse Perenco şirketinden temin edilmiştir. Verilerin temini konusunda yardımlarını esirgemeyen ve parametre seçimlerinde geniş tecrübelerinden yararlandığımız Arama Müdürü, Sayın Şule Yılmaz ve Sayın İştah İşler'e teşekkürlerimizi bir borç biliriz.

Bu makaleye kaynak olan ve yazarlardan Türker Karakaş'ın tez çalışması aşamasında çalışma ve zaman desteği sağlayan Turkish Petroleum International Corporation (TPIC) Genel Müdürlüğü'ne, başta Genel Müdür Sayın Halim ÇAKMAK ve ilgili tüm amirlere sonsuz teşekkürlerimizi sunarız.

Bu yayın, Türker Karakaş'ın Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Ana Bilim Dalı bünyesinde yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasının bir kısmından yararlanılarak hazırlanmıştır. Çalışmamızın yayın sürecinde emeklerinden dolayı alan editörüne ve yapıcı eleştiri-kritik ve önerileriyle katkı sağlayan iki anonim hakeme özel olarak teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Anstey, N.A., 1991. Vibroseis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
 Aydemir, A., Bahtiyar, I., Korpe, L., Soyhan, O., 2006. Petroleum generation potential of the Karabogaz Formation in Kahta Depression, Adiyaman, Southeastern Anatolia. TAPG Bull., 18, 1-15.
 Baeten, G., Ziolkowski, A., 1990. The Vibroseis Source. Elsevier Sci. Publ. Co. Inc., Amsterdam.

- Başar, H.S., 2007. Vibrosismik yöntem ve yüksek güvenilirlikli, ayrımlılıklı vibrosismik veri toplama. Yayınlanmamış Yüksek lisans Tezi. A.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Anabilim Dalı, Ankara.
- Belcher, S.W., Prat, T.L., Costain, J.K., Coruh, C., 1986. Alternative processing techniques and data improvement provided by single-sweep recording. *Geophysics*, 51, 1736-1742.
- Costain, J.K., Çoruh, C., 1989. Tectonic Setting of Triassic Half-Grabens in the Appalachians: Seismic Data Acquisition, Processing, and Results. In: Tankard, A.J., Balkwill, H.R. (Eds.) *Extensional Tectonics and Stratigraphy of the North Atlantic Margins*. AAPG Memoir, 46. Tulsa, Oklahoma, USA.
- Crawford, J.M., Doty, W.E.N., Lee, M.R., 1960. Continuous signal seismograph. *Geophysics*, 25, 95-105.
- Domoracki, W.J., Costain, J.K., Coruh, C., 1989. Processing and interpretation of seismic reflection data near the Bane Dome in Bland County, Virginia. Technical Report, US Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR 5417.
- Evans, B.J., 1997. *A Handbook for Seismic Data Acquisition in Exploration*. Society of Exploration Geophysicists, Geophysical Monograph Series No. 7.
- Geyer R.L. 1989. *Vibroseis*. Geophysics Reprint Series No. 11. SEG
- Gresko, M.J., Costain, J.K., 1985. Compressional (p-wave) and shear (sh-wave) reflection seismic case history over the Bane Dome, Giles County, Virginia. 55th Annual International SEG Meeting. Extended Abstracts, 339-402.
- Gültekin, C., 2010. Yansımali sismikte vibro atış düzeninin ve saha parametrelerinin sismik çözünürlüğe etkisi. Yayınlanmamış Yüksek lisans Tezi. İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Anabilim Dalı, İstanbul.
- Gureli, O., 2021. The effect of sweep signal parameters on correlation wavelet. *Yerbilimleri* 42, 199-231.
- Hubbard, S.S., Coruh, C., Costain, J.K., 1991. Paleozoic and Grenvillian structures in the southern Appalachian, Extended interpretation from seismic reflection data. *Tectonics*, 10, 141-170.
- Karaca, Ş.O., 2015. Jeotermal aramalarda vibrosismik kaynak kullanarak uygun sweep parametrelerinin belirlenmesi. Yayınlanmamış Yüksek lisans Tezi. Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Anabilim Dalı, Adana.
- Karakaş, T., 2024. Petrol aramacılığında vibrosismik kaynak kullanımı ve sweep sinyal parametre seçimi ile yüzey jeolojisi arasındaki ilişkilerin belirlenmesi. Yayınlanmamış Yüksek lisans Tezi. C.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Anabilim Dalı, Sivas.
- Newman, B.J., 1994. The vibroseis exploration method, a processor's perspective. *The Leading Edge*, 13, 664-668.
- Pritchard, W.C., 1994. Why waste money with linear sweeps? *The Leading Edge*, 13, 943-948.
- Sakallıoğlu, Y., 1992. Vibrosismik tekniğinde sweep sinyali seçimi. Yayınlanmamış Yüksek lisans Tezi. A.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Anabilim Dalı, Ankara.
- Sakallıoğlu, Y., Güreli, O., ve Başar, H. S., 2012. Vibrosismik. Altan Özyurt Matbaacılık Ltd. Şti. Ankara, 396 sayfa.
- Scott, S.M., 1987. The processing and extended interpretation of seismic reflection data recorded over the Hayesville-fries thrust sheet in southwestern North Carolina. MSc Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, Virginia, USA.
- Sercel 408UL traning course manual, 2001. *Vibroseis operations*.
- Sheriff, R.E., 1990. *Encyclopedia dictionary of exploration*. Geophysics Society of Exploration Geophysicists, Houston, TX, USA.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1991. *Applied geophysics*, 2nd edn. Cambridge University Press, New York, USA.
- Toksoy, A.Y., 2019. Diyarbakır sahasında hidrokarbon araştırmasında Üç Boyutlu vibrosismik yöntemi ile veri toplama ve kaynak parametresinin seçimi. Yayınlanmamış Yüksek lisans Tezi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Anabilim Dalı, Kocaeli.



SENTETİK ATIKSULARDAN REAKTİF SARI 145 BOYASININ UZAKLAŞTIRILMASI: YER FISTIĞI KABUKLARININ ADSORBAN OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Hakan ÇELEBİ^{1*}, İsmail BİLİCAN², İsmail ŞİMŞEK¹, Tolga BAHADIR¹, Şevket TULUN¹

¹Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Aksaray, Türkiye

²ASUBTAM-Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Aksaray Üniversitesi, 68100, Aksaray, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Adsorpsiyon,
Boyar Madde,
Fıstık Kabuğu,
Reaktif Sarı 145,
Tarımsal Atık.*

Öz

Hem sektörel hem de evsel kullanımlarla açığa çıkan tarım ve gıda atıkları besin zincirinin en önemli atıklarındandır. Tüm dünyada değerli özelliklere sahip bu atıklar doğrudan çöp alanlarına atılmaktadır. Bu çalışmada, atık olarak çöpe atılan yer fıstığı kabukları toz formda Reaktif Sarı 145'in sentetik çözeltiden giderimi amacıyla kullanılmıştır. Değerlendirme için, sabit karıştırma hızı (150±5 rpm) ve 10±3 mg/L Reaktif Sarı 145 dozunda; pH, temas süresi, fıstık kabuğu dozu ve sıcaklık faktörlerinin etkileri incelenmiştir. Fıstık kabuğunun yapısı ve yüzey kimyası FTIR, pH_{ZPC}, ve SEM ile ortaya konulmuştur. FTIR pikleri, fıstık kabuğu yüzeyi üzerinde Reaktif Sarı 145'in tutunabildiğini gösteren spesifik fonksiyonel grupların varlığını ispatlamıştır. Fıstık kabuğu yüzeyindeki gözenekli yapının Reaktif Sarı 145 giderimi için avantajlı olduğu görülmüştür. Optimum şartlarda (Fıstık kabuğu dozu: 0,5 g, pH: 2,0, süre: 30 dakika, sıcaklık: 20 °C) Fıstık kabuğu için yaklaşık %75 Reaktif Sarı 145 verimi elde edilmiştir. Fizisorpsiyonun ön planda olduğu ve tek katmanlı adsorpsiyonun gerçekleştiği sürecin Langmuir ve yalancı ikinci derece modellerine uyduğu görülmektedir. Termodinamik verileri sürecin kendiliğinden ve endotermik gerçekleştiğini göstermiştir. Maksimum adsorpsiyon kapasitesi Reaktif Sarı 145 için 9,438 mg/g olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar, fıstık kabuğunun, Reaktif Sarı 145 giderimi için hem umut verici hem de alternatif çevre dostu bir adsorbent olduğunu desteklemektedir.

REMOVAL OF REACTIVE YELLOW 145 DYE FROM SYNTHETIC WASTEWATER: EVALUATION OF PEANUT SHELLS AS AN ADSORBENT

Keywords

*Adsorption,
Dyestuff,
Peanut Shell,
Reactive Yellow 145,
Agricultural Waste.*

Abstract

Agricultural and food waste is one of the most important wastes in the food chain, generated by both industrial and domestic use. All over the world, these wastes with valuable properties are directly disposed of in landfills. In this study, peanut shells discarded as waste were used for the removal of Reactive Yellow 145 in powder form from synthetic solution. For the evaluation, the effects of pH, contact time, peanut shell dose and temperature factors were investigated at constant stirring speed (150±5 rpm) and Reactive Yellow 145 dose of 10±3 mg/L. The structure and surface chemistry of the peanut shell were revealed by FTIR, pH_{ZPC}, and SEM. FTIR peaks proved the presence of specific functional groups on the peanut shell surface, indicating that Reactive Yellow 145 can bind to it. The porous structure on the peanut shell surface was found to be advantageous for the removal of Reactive Yellow 145. Under optimum conditions (Peanut shell dose: 0.5 g, pH: 2.0, time: 30 minutes, temperature: 20 °C), about 75% Reactive Yellow 145 yield was obtained for peanut shell. It is seen that the process in which physisorption is at the forefront and monolayer adsorption takes place fits the Langmuir and pseudo-second order models. Thermodynamic data showed that the process was spontaneous and endothermic. The maximum adsorption capacity was determined as 9,438 mg/g for Reactive Yellow 145. The results support that peanut shell is both a promising and alternative environmentally friendly adsorbent for Reactive Yellow 145 removal.

* İlgili yazar / Corresponding author: hakanaz.celebi@gmail.com, +90-382-288-3598

Alıntı / Cite

Çelebi, H., Bilican, İ., Şimşek, İ., Bahadır, T., Tulun, Ş., (2024). Sentetik Atıksulardan Reaktif Sarı 145 Boyasının Uzaklaştırılması: Yer Fıstığı Kabuklarının Adsorban Olarak Değerlendirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(1), 190-204.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H. Çelebi, 0000-0002-7726-128X
İ. Bilican, 0000-0002-4415-6803
İ. Şimşek, 0000-0003-1950-5159
T. Bahadır, 0000-0001-9647-0338
Ş. Tulun, 0000-0002-0570-7617

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	01.03.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	15.03.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	15.03.2024
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

REMOVAL OF REACTIVE YELLOW 145 DYE FROM SYNTHETIC WASTEWATER: EVALUATION OF PEANUT SHELLS AS AN ADSORBENT

Hakan ÇELEBİ^{1†}, İsmail BİLİCAN², İsmail ŞİMŞEK¹, Tolga BAHADIR¹, Şevket TULUN¹

¹Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Aksaray, Türkiye

²ASUBTAM-Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Aksaray Üniversitesi, 68100, Aksaray, Türkiye

Highlights

- The adsorption process fits the Langmuir and pseudo-second order models.
- According to thermodynamic data, adsorption occurs spontaneously and endothermically.
- The maximum adsorption capacity of peanut shell is 9.438 mg/g.
- Peanut shell is both a promising and eco-friendly adsorbent for the removal of Reactive Yellow 145.

Purpose and Scope

This research article aims to reveal the usability of peanut shells as an adsorbent in the removal of Reactive Yellow 145 dye from synthetic wastewater.

Design/methodology/approach

The effects of peanut shells on Reactive Yellow 145 removal by adsorption method were investigated in the scope of the waste removal with waste approach. In this context, removal performance was evaluated according to basic factors such as pH, dose, temperature and time. Additionally, the surface structure of the peanut shell, optimum thermodynamics, isotherm and kinetic models were determined.

Findings

The optimum adsorption conditions for peanut shells were determined as follows: Peanut shell dose: 0.5 g, pH: 2.0, contact time: 30 min., temperature: 20 °C. It has been observed that peanut shell and Reactive Yellow 145 are compatible with Langmuir isotherm and pseudo-second order kinetics in terms of isotherm and kinetics. The maximum adsorption capacity and correlation coefficient (R^2) are 9.438 mg/g and 0.9966 respectively. According to factors such as FTIR, thermodynamics and pH, it can be said that adsorption is physisorption. The data obtained in the study show that peanut shell has the potential to be used as an efficient and economically applicable adsorbent in the removal of Reactive Yellow 145.

Originality

The low dye removal efficiency causes a limiting effect in the use of raw wastes as adsorbents. Considering these negativities, modification of adsorbents comes to the fore. Modification processes can increase the adsorption performance for the removal of pollutants by changing various physicochemical properties of agricultural wastes. However, in some cases, the structure of the adsorbent may be negatively affected, the pores are deformed and the purification efficiency is still not at the desired level. Since modified materials are preferred in the literature, especially in the adsorption of Reactive Yellow 145, peanut shell in raw form without any processing was preferred in this study. This situation reveals the originality of the study. Thus, negativities such as the cost of activating chemicals, secondary pollution and chemical toxicity in dye removal are prevented.

[†] İlgili yazar / Corresponding author: hakanaz.celebi@gmail.com, +90-382-288-3598

1. Giriş (Introduction)

Ekosistemin en değerli ve vazgeçilmez unsurunun su olduğu bilinen bir gerçektir. "Su hayattır" sözü, hem geniş uygulama alanlarında kullanımı hem de tüm canlı yaşamını desteklemesi açısından suyun önemini gözler önüne sermektedir (Kenda vd., 2024). Ancak antropojenik evsel ve endüstriyel aktiviteler, uluslararası ölçekte belirlenen standartları aşan olumsuz su kalite kriterlerine zemin hazırlamaktadır (Bailey vd., 2022). Su ve atık sularda boyar maddelerin varlığı toksik ve kanserojen olup, insan sağlığı da dâhil olmak üzere trofik zincirdeki tüm canlı organizmalar için risk oluşturmaktadır. Boyar maddeler, en başta tekstil endüstrisi olmak üzere kâğıt, ilaç, gıda, deri üretimi, kişisel bakım ürünleri gibi birçok sektörde de kullanılmaktadır (Kanwal vd., 2023). Tekstil üretim sürecinde 300 L'ye kadar su gereksinimi olabilmektedir ve bu suyun yaklaşık %80'i atıksuya dönüşmektedir (Meili vd., 2019). Bu atıksuyun içeriğinde ise uygulanan boyar maddelerin ürüne sabitlenmemesinden dolayı %50 oranında boyar madde yer almaktadır (da Silva vd., 2023). Sektörde kullanım kolaylığı ve uzun süre kalıcı renk sağlayarak ürün kalitesini arttırmak için sentetik boyar maddeler geliştirilmiştir (Rose vd., 2023). Uluslararası ölçekte her yıl oluşan 800.000 ton boyar maddenin yaklaşık %70'i reaktif azo boyar maddelerdir (Hatimi vd., 2023). Azo boyar maddeler karmaşık aromatik yapılara sahip olmasına rağmen kovalent bağ etkisinden dolayı uygulanabilirliği en çok tercih edilen tehlikeli boyar madde grubudur.

Reaktif boyar maddeler azo, antrakinin, oksazin ve ftalosiyenin gibi çeşitli fonksiyonel grupların varlığı nedeniyle çeşitli yapılara sahiptirler. Özellikle, reaktif azo boyar maddelerin yapısındaki aromatik halkalara bağlı azo grupları (R1-N=N-R2) onları toksik ve dirençli yapmaktadır (da Silva vd., 2023; Patel vd., 2023). Ayrıca karboksil, hidroksi, amino veya sülfonil fonksiyonel gruplarının varlığı nedeniyle amfoterik özelliklere de sahip olabilirler (Barciela vd., 2023). Bu nedenle ham boyar madde içeriğine sahip tekstil atıksuları insanlar ve diğer organizmalarla biyolojik çeşitlilik için risk oluşturmaktadır (El Messaoudi vd., 2022; Farajzadeh-Dehkordi vd., 2023). Alıcı su ortamlarına karışan renkli atıksular, çözünmüş oksijen düşüşüne, fotosentezin engellenmesine yol açmaktadır (Adar & Acar, 2021). Anaerobik koşullar altında, bazı boya türlerinin ayrışması, potansiyel olarak kanserojen olan aromatik aminler gibi ara bileşiklerin oluşumuna yol açar (Hatimi vd., 2023). Azo boyar maddeleri düşük parçalanabilirliklerinden, gün ışığında bozulmaya ve yüksek etkili asimilasyona karşı son derece dirençli olduklarından dolayı geleneksel arıtım süreçlerine dayanıklıdır. Bu nedenle atık sudaki azo boyar maddelerini gidermek için yaratıcı ve uygun maliyetli metotların araştırılması gereklidir (Jinendra vd., 2019; Tanattı, 2021). Bu yöntemlerin yüksek maliyetli olması, düzenli bakım gereksinimleri, kompleks işletme ve ikincil kirlilik gibi dezavantajları bulunmaktadır (Fatima vd., 2023). Farklı atıksu arıtma yöntemleriyle karşılaştırıldığında adsorpsiyon, düşük maliyetli, tasarımı, bakımı ve çalıştırılması kolay, kirletici toksisitesine karşı duyarsız ve yeniden kullanımı mümkün (desorplama kapasitesi) kılan bir süreçtir. Şimdiye kadar, atıksudan boyar maddelerin uzaklaştırılması için çok çeşitli adsorbentler kullanılmıştır (Raji vd., 2023). Ancak aktif karbon gibi adsorbentlerin yüksek maliyet ve düşük rejenerasyon durumlarından dolayı performansı yüksek, ucuz adsorbentler alternatif olarak araştırılmaktadır (Selvaraj vd., 2021). Adsorpsiyonun başarısı büyük ölçüde adsorbentin türüne ve atıksudaki kirleticinin kimyasal yapısına bağlıdır. Çevre dostu adsorbent olarak çöp döngüsüne katılan doğal atıkların boyar madde gideriminde kullanılabilme potansiyeli son araştırmalarda sıklıkla karşımıza çıkmaktadır (Pamukoğlu vd., 2022; Tunc Dede, 2019). Üstelik bunların değerlendirilmesi birçok bölgede katı atık sorununun çözümüne katkı sağlamaktadır. Bu atıklar içerisindeki fıstık yan ürünleri arasında yer alan yer fıstığı kabukları, yapısal özelliklerinden dolayı enerji, sağlık gibi birçok sektörde potansiyel uygulamaya sahiptir ve adsorbent olarak iyi bir seçimidir (Lu vd., 2023). Yer fıstığı kabukları esas olarak lignin, hemiselüloz ve selüloz ile çeşitli hidroksil grupları, karboksil grupları ve diğer fonksiyonel gruplardan oluşur ve bu da onları su arıtımı için uygun biyosorbentler haline getirir (Khiaophong vd., 2022; Kushwaha vd., 2023). Yer fıstığı kabukları aktif yüzey alanlarına göre düşük veya yüksek yoğunluklu adsorbent madde olarak sınıflandırılabilir (Hosseini Taheri vd., 2024; Ungureanu vd., 2023).

Bu çalışma, yer fıstığı kabuklarının (FK), reaktif sarı 145 (RS145) için sentetik atıksudan kesikli deneylerle giderim performansı üzerine yoğunlaşmaktadır. Atıksu arıtımının yanında katı atıkların da etkili yönetimi alıcı ortamlar için önemli bir konudur. Tarımsal gıda atıkları içerisinde yer alan kabuklar atık döngüsünün vazgeçilmez bir parçasıdır ve lifli/lignoselülozik yapıya sahiptirler. Yer fıstığı atıklarının/yan ürünlerinin toplanması ve geri dönüştürülmesi, depolama alanı eksikliği nedeniyle arzu edilen bir seçenek haline geldiğini belirtmek önemlidir. Lignin, hemiselüloz, selüloz ve çeşitli hidroksil, karboksil ve diğer fonksiyonel gruplara sahip FK, yer fıstığının ağırlığının yaklaşık %25-30'unu oluşturur. Dolayısıyla FK aktif yüzey alanlarına göre düşük veya yüksek yoğunluklu adsorbent kullanımı açısından araştırılmaya değerdir. Ayrıca, FK bolluğu, yerelde kolay bulunabilirliği ve potansiyel olarak tehlikeli kirletici maddelere karşı yüksek bağlanma eğilimi nedeniyle son yıllarda daha fazla ilgi görmektedir. Diğer tarımsal atıklardan en önemli farkı, onlara göre çöp sahalarında biyolojik bozunmasının yavaş olmasıdır. Ham formdaki atıkların adsorbent olarak kullanımında boyar madde giderme verimliliğinin düşük olması sınırlayıcı bir etkiye neden olmaktadır. Çoğunlukla laboratuvar ölçekli sentetik atıksuların arıtımı için kullanılan bu atıkların, gerçek ölçekli bir atıksu için uygulanabilirliği hala endişe konusudur. Son zamanlarda, bu olumsuzluklar göz önüne alınarak adsorbent modifikasyonunun ön plana çıktığı görülmektedir. Modifikasyon

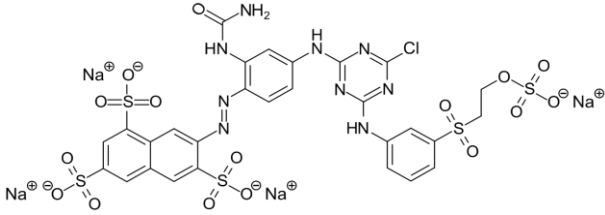
işlemleri tarımsal atıkların hidrofilik/hidrofobik özellikler, yüzey alanı, gözeneklilik, reaktif fonksiyonel gruplar, mikrobiyolojik saldırıya karşı direnç ve termal stabilite gibi çeşitli fizikokimyasal özelliklerini değiştirerek kirleticilerin uzaklaştırılması için adsorpsiyon performansını artırmasına rağmen adsorbentın yapısı olumsuz etkilenebilmekte, gözenekler deformasyona uğramakta ve arıtım verimi yine istenen düzeyde olmamaktadır. Özellikle RS145'in adsorpsiyonunda modifiye edilmiş materyallerin tercih edilmesinden dolayı bu çalışmada hiçbir işleme uğramamış ham formdaki FK'nin tercih edilmesi bir avantaj olarak görülmektedir. Çünkü boya gideriminde aktifleştirici kimyasalların maliyeti gibi ekonomik veriler ve ikincil kirlilik, kimyasal toksisite gibi diğer faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu dezavantajları minimize etmek ve maliyeti sifıra yakın FK gibi atıkların ham performansını tespit etmek için bu çalışma tasarlanmıştır. Bu çalışmada, kullanımları sonucunda kirlilik oluşturmeyen ham adsorbentlere odaklanılarak çöp döngüsünün etkili bileşenleri arasında yer alan FK'nin adsorpsiyon metodu ile RS145 giderimindeki etkileri pH, doz, sıcaklık ve zaman gibi temel faktörlere göre değerlendirilmiştir. Ayrıca, FK'nin yüzey yapısı, optimum termodinamik, izoterm ve kinetik modeller belirlenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Boyar Madde Çözeltisi Hazırlama ve Analitik Ölçüm (Dyestuff Solution Preparation and Analytical Measurement)

RS145 ile pH ayarlaması için kullanılan sodyum hidroksit (NaOH) ve hidroklorik asit (%37 HCl) analitik saflıkta Merck KGaA, Darmstadt, Almanya firmasından temin edilmiştir. Bütün çözeltiler Millipore Elix Advantage 5-Synergy UV marka cihaz ile elde edilen ultra saf su (*kimyasal direnci: 18 mΩ-cm*) ile hazırlanmıştır. 10 mg/L RS145 konsantrasyonuna sahip çalışma çözeltileri için 1000 mg/L'lik stok çözelti kullanılmıştır. RS145'in genel özellikleri ve kimyasal yapısı Tablo 1'de sunulmuştur. RS145 konsantrasyonunu ölçmek için 415 nm maksimum adsorpsiyon dalga boyunda (λ_{max}) UV-Vis Spektrofotometresi (Shimadzu UV-1280) kullanılmıştır.

Tablo 1. RS145 boyar maddesinin spesifik özellikleri (Specific properties of RS145 dyestuff)

Özellikler	RS145 Boyar Maddesi
*C.I. genel adlandırma	*C.I. RY145 dye
Molekül formülü	C ₂₈ H ₂₀ ClN ₉ Na ₄ O ₁₆ S ₅
Molekül ağırlığı	1026.25 (g/mol)
Ticari İsmi	Remazol Yellow 3RS
Kimyasal Yapısı	

*C.I.: Colour Index (renk indeksi)

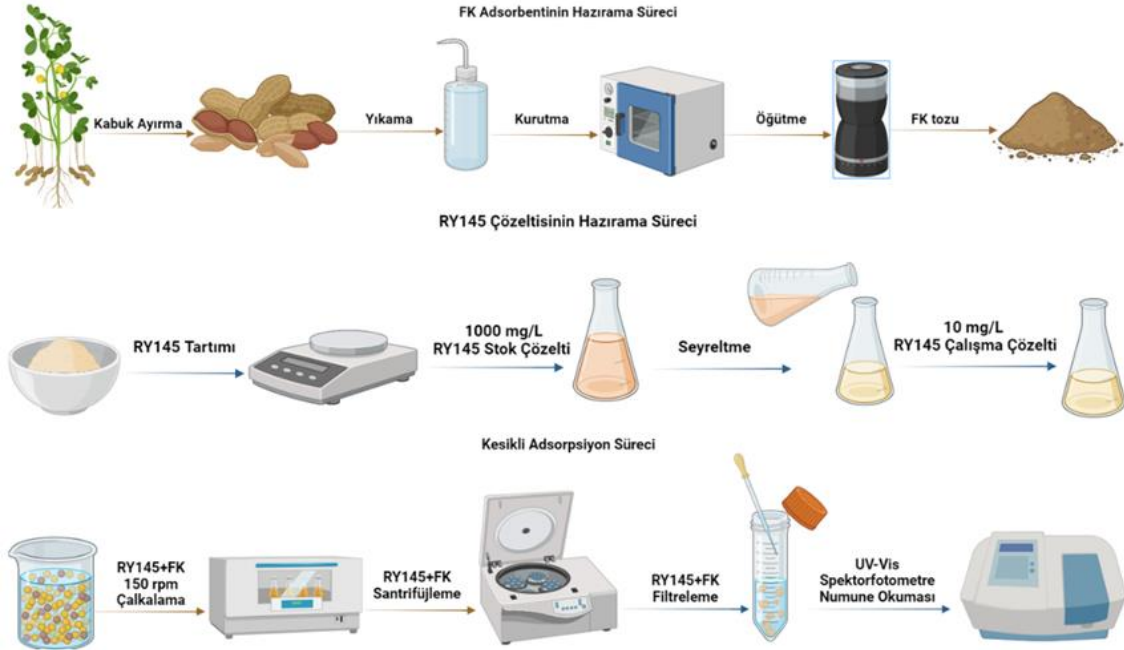
2.2. FK Hazırlanması ve Karakterizasyonu (FK Preparation and Characterization)

Adsorbent olarak tercih edilen FK, Aksaray ilindeki ev, kafe, pazar yeri ve restoranlardan temin edilmiştir. FK başlangıçta bol miktarda saf su ile yıkama işlemine tabi tutulmuştur. Yıkama sürecinden sonra FK Memmert marka etüvde 60°C'de 48 saat kurutulmuştur. FK parçalayıcıda öğütüldükten sonra elekten geçirilerek (Göz no:10) maksimum 2 mm çapında toz formda FK elde edilmiştir. FK'nin yüzeyindeki morfolojik ve elementel analiz, Enerji Dağıtıcı X-ışınları spektroskopisi (EDX, Octane Pro, EDAX, AMETEK, Inc.) ile birleştirilmiş Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM; Fei Quanta FEG 250, 10 kV voltaj) ile gerçekleştirilmiştir. FK yüzeyinde RS145 adsorpsiyonundan önce ve sonra mevcut fonksiyonel grupları karakterize etmek için 4000 ila 500 cm⁻¹ spektral aralıkta Fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR, Perkin Elmer Spectrum FTIR C96108) spektroskopisi kullanılmıştır. do-Nascimento vd. (2019) tarafından bildirilen metodolojiye göre FK'nin sıfır şarj noktası (pH_{ZPC}), 1 M HCl ve 1 M NaOH titrasyonları ile belirlenmiştir.

2.3. Kesikli Adsorpsiyon Süreci (Batch Adsorption Process)

Kesikli modda yapılan deneyler, 20±2 °C'lik sabit sıcaklıkta 50 mL'lik çalışma hacminde 10±3 mg/L'lik sabit RS145 konsantrasyonuna sahip Erlenmeyer şişeleri ile gerçekleştirilmiştir. 150±5 rpm'lik sabit karıştırma hızına sahip ZHICHENG marka platform çalkalayıcıda homojen çalkalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Temel adsorpsiyon

parametrelerinin etkinliğini belirlemek için; FK dozu (0,1–5 g), pH (2-12), temas süresi (5-150 dakika), ve sıcaklık (20-40 °C) farklı değerlerde uygulanmıştır. Tüm deneylerde pH izlemesi ve ayarlaması HACH HQ440D marka multimetre ile sağlanmıştır. RS145 molekülerinin FK yüzeyine tutunma sürecinin ve FK hazırlama aşamasının şematik olarak gösterimi Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi (*BioRender ile oluşturulmuştur*) (Schematic representation of the experimental study) (created with BioRender)

Adsorpsiyondan sonra FK+RS 45 numuneleri, FK’yi çözülden ayırmak ve analize hazır hale getirmek için 3000 rpm’de 10 dakika santrifüj edilmiştir. Kesikli deneyler sonucunda santrifüjlenen numuneler Shimadzu UV-1280 marka spektrofotometresi ile analiz edilmiştir. Kesikli çalışmalar üç tekrarlı ve %95 (standart sapma \leq %5) güven limitinde gerçekleştirilmiştir. RS145 adsorpsiyon kapasitesi (q_e) (mg/g) ve giderim verimliliği (%), sırasıyla denklemler (1) ve (2) kullanılarak belirlenmiştir.

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{1000 \times m} \quad (1)$$

$$\text{Verim (\%)} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

Burada C_0 ve C_e (mg/L cinsinden) sırasıyla başlangıç ve son RS145 konsantrasyonlarıdır ve V (L) çözeltinin hacmidir ve m (g) FK miktarıdır.

Adsorpsiyon sürecinde optimum deneysel koşullar altında izoterm ve kinetik model değerlendirmeleri yapılmıştır. q_e için, kesikli deney sonuçlarını tanımlayan Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich (D-R) ve Temkin izoterm modelleri ile Yalancı birinci derece, Yalancı ikinci derece, intrapartikül difüzyon ve Evolich gibi kinetik modelleri kullanılmıştır. Deneysel veriler Tablo 2’de açıklanan ilgili adsorpsiyon modellerine göre değerlendirilmiştir. Ayrıca, Langmuir ile bağlantılı olan boyutsuz ayırma faktörü R_L ($R_L > 1$ elverişsiz; $R_L = 1$ doğrusal; $0 < R_L < 1$ uygun, $R_L = 0$ geri döndürülemez) değeri de hesaplanmıştır. Bu çalışmada farklı sıcaklık koşullarında çalışılan adsorpsiyon prosesi için serbest enerji değişimi ΔG° , entalpi değişimi ΔH° ve entropi değişimi, ΔS° gibi termodinamik parametreler Denklemler (3)-(5) kullanılarak hesaplanmıştır (Lavado-Meza vd., 2023).

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_d \quad \Delta G^\circ = -RT \ln K_d \quad (3)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (4)$$

$$\log \left(1000 \frac{Q_e}{C_e} \right) = \frac{\Delta S^\circ}{2.303R} - \frac{\Delta H^\circ}{2.303RT} \quad (5)$$

Burada, R: Evrensel gaz sabiti (8,314 J/mol/K); T: çözelti sıcaklığı (K), Kd: adsorpsiyon afinitesi, ΔH° : entalpi, ΔS° : entropi, ΔG° : Standart serbest enerjiyi ifade etmektedir.

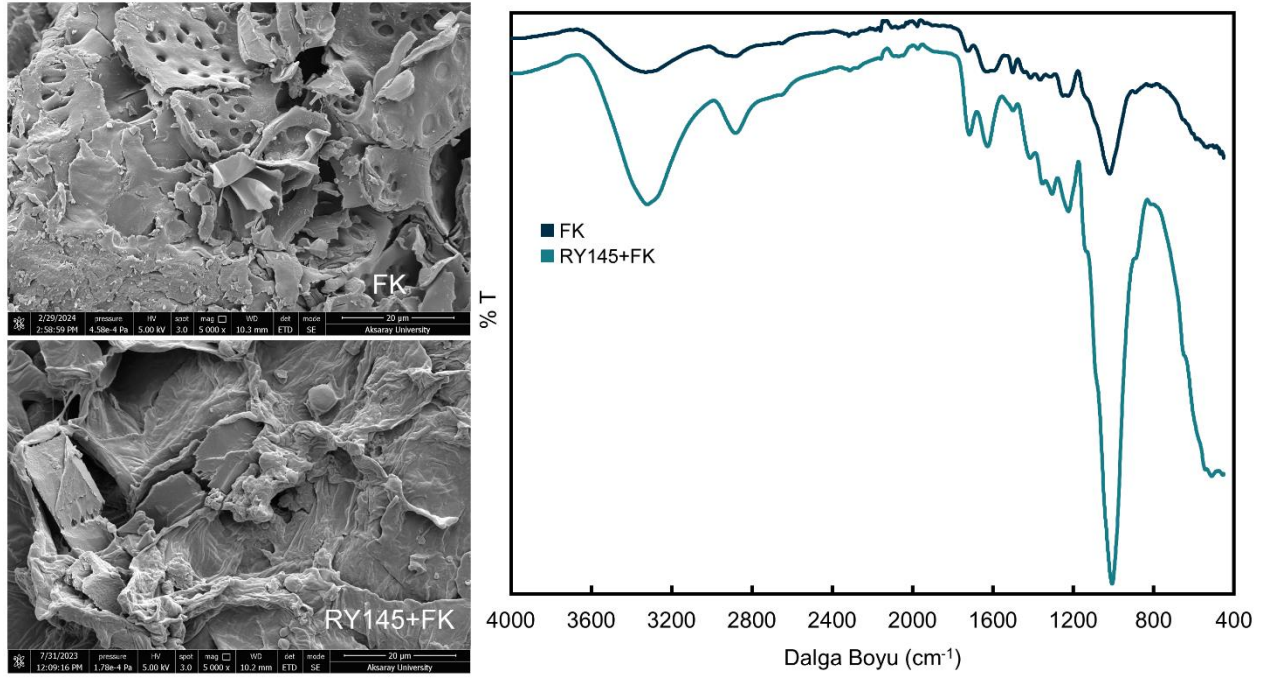
Tablo 2. İzoterm ve kinetik model eşitlikleri (Isotherm and kinetic model equations)

İzoterm	Lineer eşitlikler
Langmuir	$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0}$ $\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \left(\frac{1}{q_m K_L}\right) \frac{1}{C_e}$
Freundlich	$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e$
Dubinin-Radushkevich	$\ln q_e = \ln q_m - K_{DR} (\epsilon^2)$
Temkin	$q_e = \frac{RT}{b_T} \ln K_T + \frac{RT}{b_T} \ln C_e$
<p><i>C₀: RS145'in giriş konsantrasyonu (mg/L), C_e: RS145'in çıkış konsantrasyonu (mg/L), q_e: Adsorpsiyon kapasitesi (mg/g), q_m: maksimum adsorpsiyon kapasitesi, K_L: Langmuir sabiti (L/mg), K_F: Freundlich sabiti (mg/g), n: Heterojenite faktörü, K_T: Temkin sabiti (L/mg), b_T: Temkin sabiti (J/mol), K_{DR}: spesifik D-R sabiti, ϵ: Polanyi potansiyeli, R_L: denge parametresi</i></p>	
Kinetik modeller	Lineer eşitlikler
Yalancı Birinci Derece	$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t$
Yalancı İkinci Derece	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$
Elovich	$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(1 + \alpha \beta t)$
İntrapartikül Difüzyon	$q_t = K_{ip} t^{1/2} + C$
<p><i>k₁: Yalancı birinci derece kinetik sabiti (1/min), k₂: Yalancı ikinci derece kinetik sabiti (1/min), α: başlangıç adsorpsiyon hızı (mg/g/dak) ve β: yüzey kaplama sabiti (g/mg), K_{ip}: İntrapartikül Difüzyon sabiti (mg/g·min^{0.5})</i></p>	

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma (Research Results and Discussion)

3.1. Karakterizasyon Çalışmaları (Characterization Studies)

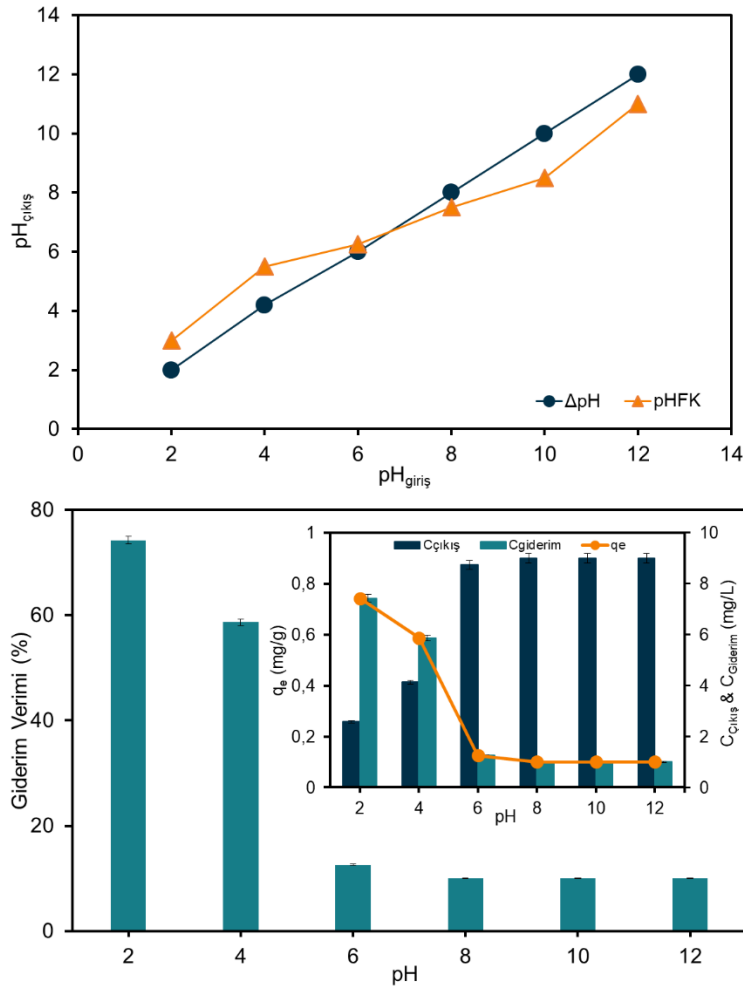
RS145 ile FK'ye ait yüzey morfolojisi görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir. SEM görüntüleri yüzeyde çok sayıda büyük ve orta ölçekli gözeneklerin varlığını göstermektedir. FK bu yapısal özellikleri sayesinde çeşitli boyar maddenin gideriminde etkili olmaktadır (Banerje 2019). Bu gözenekler sayesinde RS145'i adsorbe etmek kolaydır. RS145 yüklü FK görüntüleri yüzeyin RS145 ile kaplandığını açıklamaktadır. FK, EDS'ye göre ağırlıkça; C (%47.09), N (%8.66), O (%42.4), K (%0.77) ve Ca (%1.08) elementlerinden oluşmaktadır. RS145 tutunduğunda ise C(%52.22), N (%5.28), O (%42.5) iken K ve Ca tespit edilememiştir. Şekil 2, FK'nın yüzey kimyasını ortaya koyan FTIR spektrumlarını göstermektedir. FK'nın yüzey aktifliği lignoselülozik yapısına bağlı olarak yüksektir. Selüloz, hemiselüloz ve lignin bileşenlerindeki çeşitli fonksiyonel gruplardan dolayı FK'nın spektrumu karmaşıktır. Karakteristik olarak FK'nın karboksil, karbonil, hidroksil ve amino gibi birçok fonksiyonel gruba sahip olduğu söylenebilir. Şekil 2'den, FK'nın 3337, 1633, 1425, 1225 ve 1025 cm⁻¹ gibi temel piklere sahip olduğu görülmektedir. Bu pikler O-H, C-H, C-N, S=O, karboksil grubu ve C-O-C grubunun simetrik ve asimetric gerilmelerine işaret etmektedir. Adsorpsiyon sonrası RS145+FK numunesinde FTIR dağılımları 3337, 1639, 1233 ve 1017 cm⁻¹ spesifik pikleri ile adsorpsiyon öncesinde olduğu gibi O-H, C-H, C-N, S=O, karboksil grubu ve C-O-C gruplarını göstermektedir. Adsorpsiyon sonrası bazı spektrum değişiklikleri değişimleri RS145'in FK yüzeyine tutunduğunu kanıtlamaktadır. Pik şiddetlerindeki farklılıklar daha önceki çalışmalarla da benzerlik taşımaktadır (Paçzkowski vd., 2021; Yakout ve El-Zaidy, 2023).



Şekil 2. SEM görüntüleri ve FTIR spektrumları (SEM images and FTIR spectra)

3.2. pH Etkisi (pH Effect)

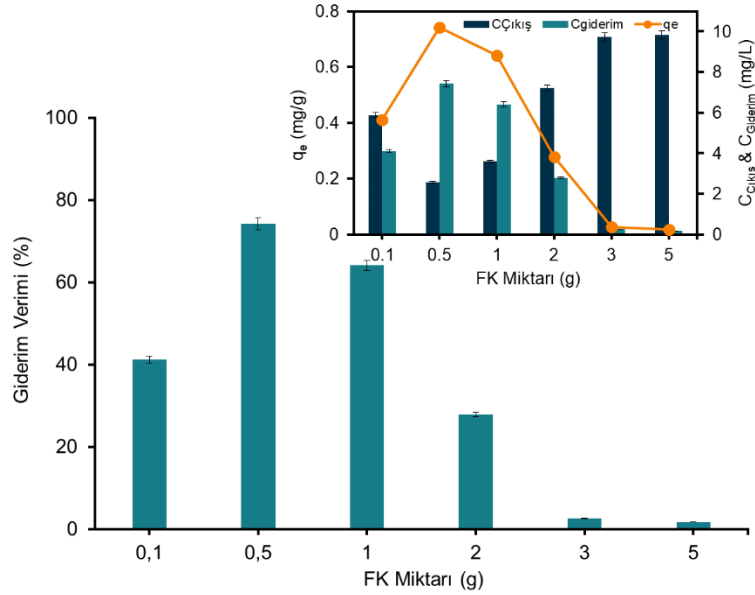
Çözelti pH'ındaki değişimler seçilen adsorbentin yüzey kimyasını ve kirleticilerin farklılaşmasını (çözeltideki farklı kimyasal tepkimeler) etkileyen önemli bir faktördür. Bu faktör de hidrojen (H^+) ve hidroksil (OH^-) iyonlarının varlığı önem arz etmektedir. Çözelti pH'ındaki değişiklikler, hidroliz, yüzey kompleksleşmesi, redoks reaksiyonları ve çökeltme gibi adsorbent bölgesinin ayrışmasını ve kirleticinin kimyasını kolaylaştırır (Sen, 2023). Asidik (pH=2-6) koşullardan bazik (pH=8-12) koşullara doğru değişen pH'larda FK'nin RS145 molekülleri üzerindeki etkiler Şekil 3'te verilmiştir. RS145 moleküllerinin FK'ye adsorbe olma eğilimi 2-12 gibi geniş bir pH aralığında izlenmiştir. RS145 iyonlarının giderim oranı pH 2'de yüksek iken pH 4-12 arasında hızla düşüşe geçmiştir. Elde edilen sonuçlar, pH 2 değerinde RS145'in FK tarafından hızlı adsorbe edildiğini göstermektedir. pH 2'de RS145 için q_e 7.25 mg/g ve %74.20 giderim verimi sağlanmıştır. RS145, $pH \leq 2$ 'de fonksiyonel grupların yüksek oranda protonlanmasından dolayı FK ile RS145 arasında bir elektrostatik çekim gerçekleşmesine neden olur ve bu da RS 145'in giderimini artırır. Zaten RS145 anyonik bir boya olduğundan, pozitif yüklü ($-OH^{+2}$ ve $-NH^{+3}$) bir adsorbent yüzeyi, asidik pH değerinde iyi bir adsorpsiyon sürecini destekler niteliktedir. Ancak $pH \geq 4$ 'de ise fonksiyonel gruplar protondan arınmaya başlar ve FK ile RS145 arasında elektrostatik çekim azalarak RS145'in giderim verimi düşüşe geçer. Bu düşüş ise FK yüzeyinin negatif yüklü gruplara etkili bir şekilde bağlanamamasından kaynaklanmaktadır. Cui vd. (2015)'e göre düşük pH, adsorbent içindeki iyon değişim bölgelerinde şiddetli rekabete neden olan çok sayıda H_3O^+ 'ı beraberinde getirmiş ancak pH arttıkça, adsorbent içindeki protonlanmış fonksiyonel grupların protonu giderilmiştir, böylece adsorbent adsorpsiyon kapasitesi artmıştır. Ofudje vd. (2021) görüşüne göre, yapılarında RS145 boyası gibi sülfonatlı organik azo bileşikleri içeren anyonik boyalar yüksek pH değerlerinde, sulu çözeltilerde sodyum tuzları üretir. pH'ın pH_{zpc} yüzey yükünün sıfır (pozitif yük=negatif yük) olduğu, belirli bir pH olarak tanımlanır. Genel olarak $pH < pH_{zpc}$ durumunda adsorbent yüzeyi pozitif yüklü olacağından kirletici ve yüzey etkileşimi artar. Oysa $pH > pH_{zpc}$ 'de yüzey negatif yüklü hale gelir ve kirletici ile yüzey arasında zayıf bir bağ kurulur. Bu nedenle, katyonik boyar maddelerin giderimi, OH^- ve COO^- gruplarının varlığından dolayı $pH > pH_{zpc}$ 'de tercih edilirken, anyonik azo grup boyar maddelerde adsorpsiyon süreci, H^+ iyonlarının varlığından dolayı $pH < pH_{zpc}$ 'de tercih edilir (Sen, 2023). FK'nin pH_{zpc} 'sinin 6,25 olduğu Şekil 3'te görülmektedir. FK'nin yüzeyi $pH < 6.25$ değerlerinde protonlanır ve bu sayede negatif yüklü kirleticilerin adsorpsiyonu kolaylaşır. İncelenen RS145'in fonksiyonel grupları 6,25'ten düşük pH'ta maksimum giderim verimi elde edilmesine imkân sunmaktadır. FK üzerindeki yük dengesini daha katyonik bir yapıya dönüştürmek için asidik pH'ta deneyler yapılması gerekir.



Şekil 3. pH etkisi (pH effect)

3.3. FK Miktarının Etkisi (Effect of FK Amount)

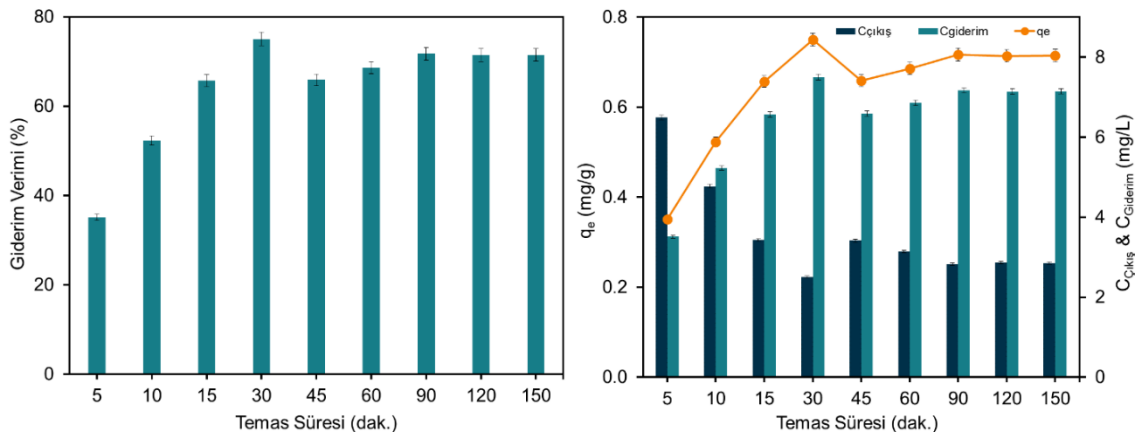
Adsorbentler, doğaları gereği (gözenek yapısı, yüzey alanı gibi) ve fonksiyonel grupların etkinliğinden dolayı adsorpsiyon sürecinde kilit bir parametredir. pH faktöründe olduğu gibi sürecin etkinliği için RS145'in hem ekonomik hem de verimli gideriminin sağlanması için optimum FK dozunun belirlenmesi gerekmektedir. RS145'in giderim yüzdeleri ve q_e değerleri 10 mg/L başlangıç konsantrasyonu, 150 rpm karıştırma hızı ve 25 °C sabit sıcaklık altında, FK dozunun, 0,1 ile 5 g aralığındaki değişiminde Şekil 4'teki gibi değerlendirilmiştir. Şekil 4'te verilen sonuçlar, denge koşullarına ulaşıncaya kadar FK dozu ile birlikte artan RS145'in hızla giderildiğini göstermektedir. Bunun nedeni, FK yüzeyinde birim zaman başına tutulan RS145'in miktarını artıran boş aktif noktaların bulunmasıdır (Ebrahim ve El-Asasery, 2023). FK'nin dozu 0,1 g'dan 0,5 g'a artırıldığında RS145 boyar maddesinin verimi %41,2'den %74,2'ye çıktığı tespit edildi. 0,5 g'lık FK dozundan sonra RS145'in giderim verimliliğinde %64,1'den %1,74'e kadar düşüş gözlenmiştir ve bu durum, FK yüzeyindeki aktif boş noktaların doygunluğundan ileri gelmektedir. Genel olarak adsorpsiyon kapasitesi q_e (mg/g) FK dozunun artmasıyla azalırken RS145'in giderilme yüzdesi FK dozunun artmasıyla birlikte yükselmektedir. Yüksek adsorpsiyon kapasitesi, adsorpsiyon işleminin daha düşük bir FK dozu ile çalıştığını gösterir (Ahmad ve Danish, 2022). Bu davranış diğer adsorpsiyon araştırmalarında da gözlemlenmiştir (Kenda vd., 2024; Ramírez-Gómez vd., 2024).



Şekil 4. FK miktarının etkisi (Effect of FK amount)

3.4. Temas Süresinin Etkisi (Effect of Contact Time)

Şekil 5, RS145'in hazırlanan FK yüzeyine adsorbe olmasında temas süresinin rolünü açıklamaktadır. Grafiğe göre RS145 adsorpsiyonu iki aşamada gerçekleşebilir: İlk aşamada FK'nın yüzeyindeki mevcut boş alanlardan dolayı ilk 30 dakikada meydana gelen hızlı adsorbe olma süreci söz konusudur. İkinci aşamada ise 45 dakikalık temas süresinden itibaren dengeye ulaşana kadar yavaş bir adsorpsiyon gerçekleşmektedir. RS145 ve FK arasındaki temas süresinin etkisini ortaya koymak için 25 °C sıcaklıkta, 150 rpm çalkalama hızında, 10 mg/L'lik RS145 konsantrasyonunda, 5-150 dakika aralığında çalışılmıştır. 5 ile 150 dakika arasındaki zaman dilimlerinde, dengeye ulaşılan temas süresinin 45. dakikadan itibaren başladığı gözlenmiştir (Şekil 5). RS145 giderim verimi 5. dakikadan itibaren 30. dakikaya kadar hızla artmış ve 30 dakikalık temas süresinde maksimum %75 değerine ulaşmıştır. Temas süresinin 30 dakika gibi kısa bir zamanda maksimum RS145 giderim ulaşması FK'nın yüzeyinde daha fazla aktif fonksiyonel gruplardan, aktif tutunma alanlarının yoğunluğundan ve RS145'in sıvı/katı arasındaki kütle transfer sınırını aşmasından kaynaklanabilir (Munagapati vd., 2022; Saravanan vd., 2020). Adsorpsiyon zaman içerisinde devam ettikçe, boş alanlar azalır ve FK yüzeyinde tutulan moleküller ile tutunmaya çalışanlar arasında itici bir kuvvet oluşur ve adsorpsiyon hızı yavaşlar. Literatürdeki birçok çalışmanın bulguları bu çalışmanın sonuçları ile uyumludur (Gharbani, 2018; Prasad vd., 2023).

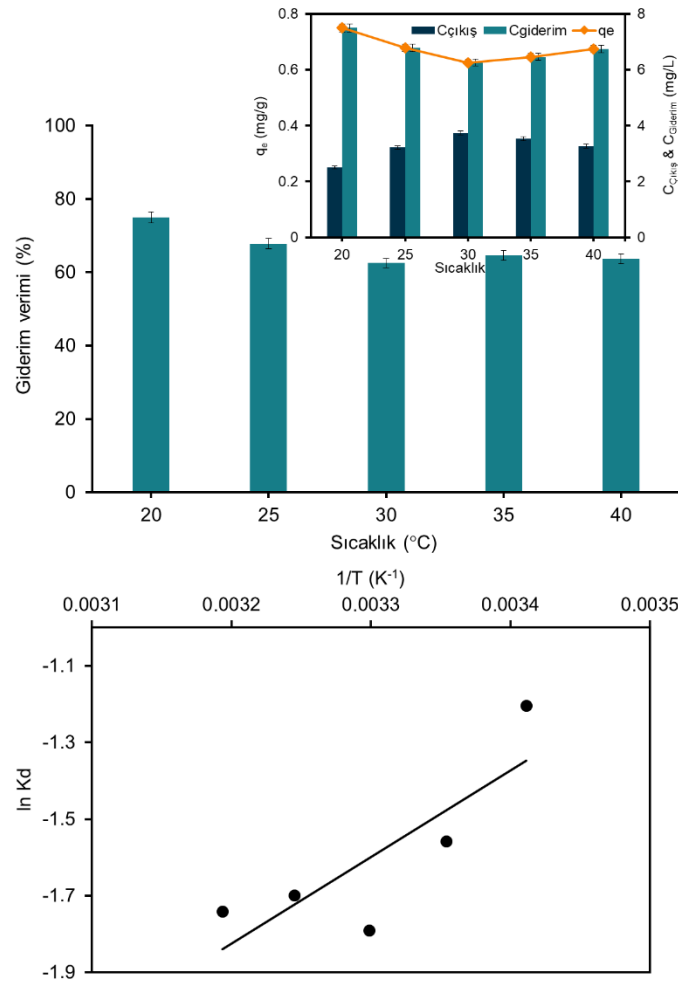


Şekil 5. Temas süresinin etkisi (Effect of contact time)

3.5. Sıcaklığa Bağlı Termodinamik Çalışmalar (Temperature-Dependent Thermodynamic Studies)

Sıcaklık, adsorpsiyon sürecinde termodinamiği ve moleküllerin etkileşimini açıklayan kilit bir parametredir. Sıcaklık, adsorpsiyon reaksiyon sürecinin ekzotermik veya endotermik yapısının önemli bir göstergesidir (Mondal vd., 2019). RS145'in FK'ye adsorbe olma yeteneği 20 °C ≤ RS145 ≤ 40 °C aralığında değişen sıcaklık değerlerine göre termal kontrollü çalkalayıcıda gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'ya göre elde edilen sonuçlar sıcaklığın 20 °C'nin

üzerine çıktığında RS145'in veriminde ve q_e değerindeki azalma boyar maddenin FK'ye olan afinitesinin azalmasından kaynaklanabilir. 20 °C'de yüksek tutunma oranı ($q_e=7.5$ mg/g), adsorbente boyanın hızlı difüzyonun ve yayılma hızının sonucu olabilir (Yadav ve Dasgupta, 2022). Silva vd. (2020), hedef boyar madde ile adsorbent yüzeyi arasındaki bağların zayıflamasının yüksek sıcaklığa bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 6'dan optimum sıcaklığın 20 °C olduğu görülmektedir. Optimum sıcaklıkta RS145'in giderim yüzdesi %75'e ulaşmıştır. Termodinamik açıdan sürecin ekzotermik veya endotermik yapısını tespit etmek için $\ln(K_d)$ 'ye karşı $1/T$ grafiğiyle 5 farklı sıcaklıkta izleme yapılmıştır (Şekil 6). RS 145 için ΔH° , ΔS° ve ΔG° sonuçları Tablo 3'te yer almaktadır. Negatif ΔS° reaksiyonun uygulanabilirliğinin sıcaklığa bağlı olduğunu göstermektedir. RS145'in FK ile adsorpsiyonu pozitif ΔG° değerlerinde kendiliğinden gerçekleşmemekte ve sürecin fizibil olmadığını göstermektedir. ΔG° değerleri 40 kJ/mol'den düşük olduğu için, fizisorpsiyonun gerçekleştiği söylenebilir (Pérez-Calderón vd., 2018; Chauhdary vd., 2022). Negatif ΔS° , RY145+FK arasındaki molekül tutunma türlerinin serbestlik derecelerini dengelemektedir (Kifetew vd., 2023). Pozitif ΔH° değerlerinde süreç endotermik meydana gelmekte ve sıcaklık faktöründeki artışlar RS145'in bağlanmasını kolaylaştırmaktadır. Bununla birlikte, sıcaklık artışı ile q_e 'nin kısmi azalması, reaksiyonun ekzotermik hale geldiğini gösterebilir ve bu, kirletici ile adsorbent arasındaki etkileşim bağlarının sıcaklıkla değişiminden kaynaklanmaktadır (Sen, 2023). Ayrıca, q_e üzerindeki sıcaklığın etkisi yüzey fonksiyonel gruplarına da atfedilebilir.



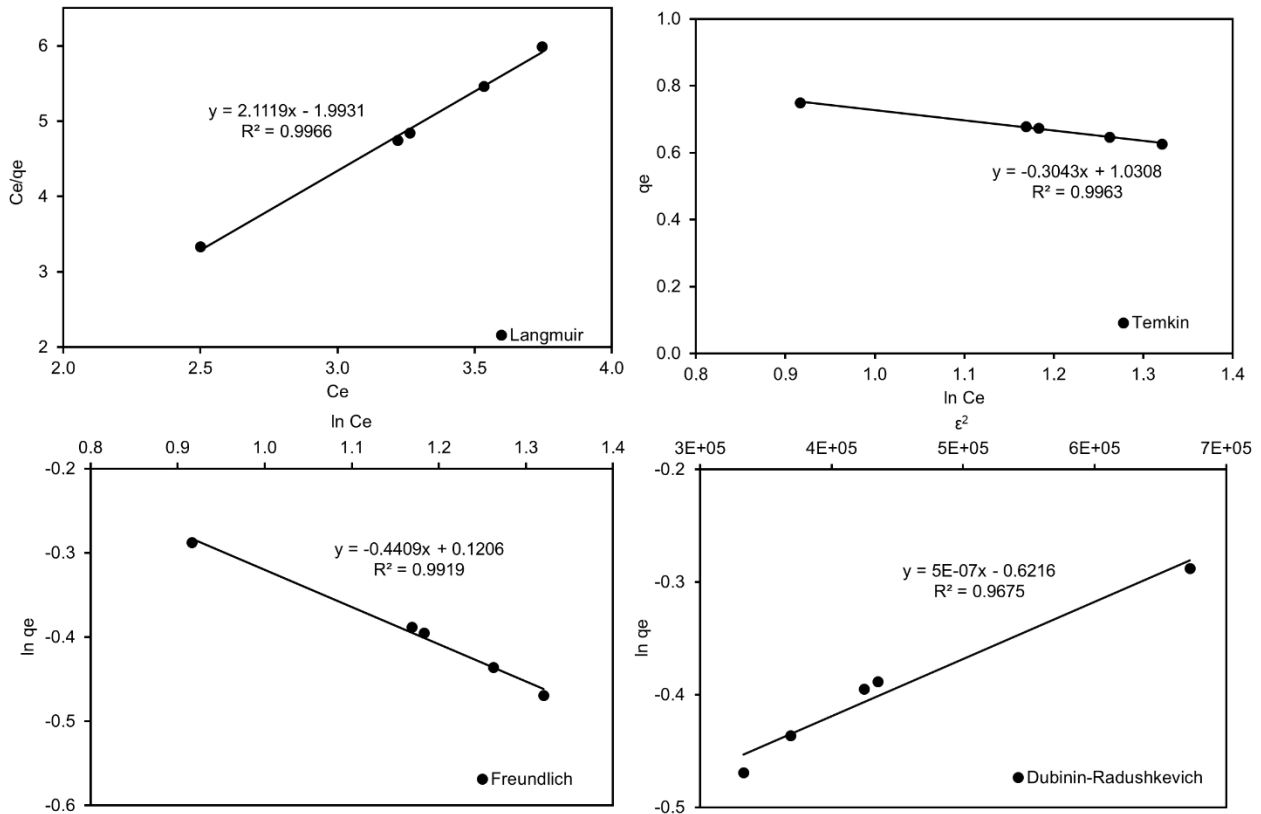
Şekil 6. Sıcaklığın etkisi (Temperature Effect)

Tablo 3. ΔH° , ΔG° ve ΔS° sonuçları (ΔH° , ΔG° and ΔS° results)

Parametreler	Birim	RS145
ΔH°	(kJ/mol)	9.06
ΔS°	(J/mol/K)	-7.48
$\Delta G^\circ_{293.15}$	(kJ/mol)	2.93
$\Delta G^\circ_{298.15}$	(kJ/mol)	3.68
$\Delta G^\circ_{303.15}$	(kJ/mol)	4.51
$\Delta G^\circ_{308.15}$	(kJ/mol)	4.35
$\Delta G^\circ_{318.15}$	(kJ/mol)	4.17

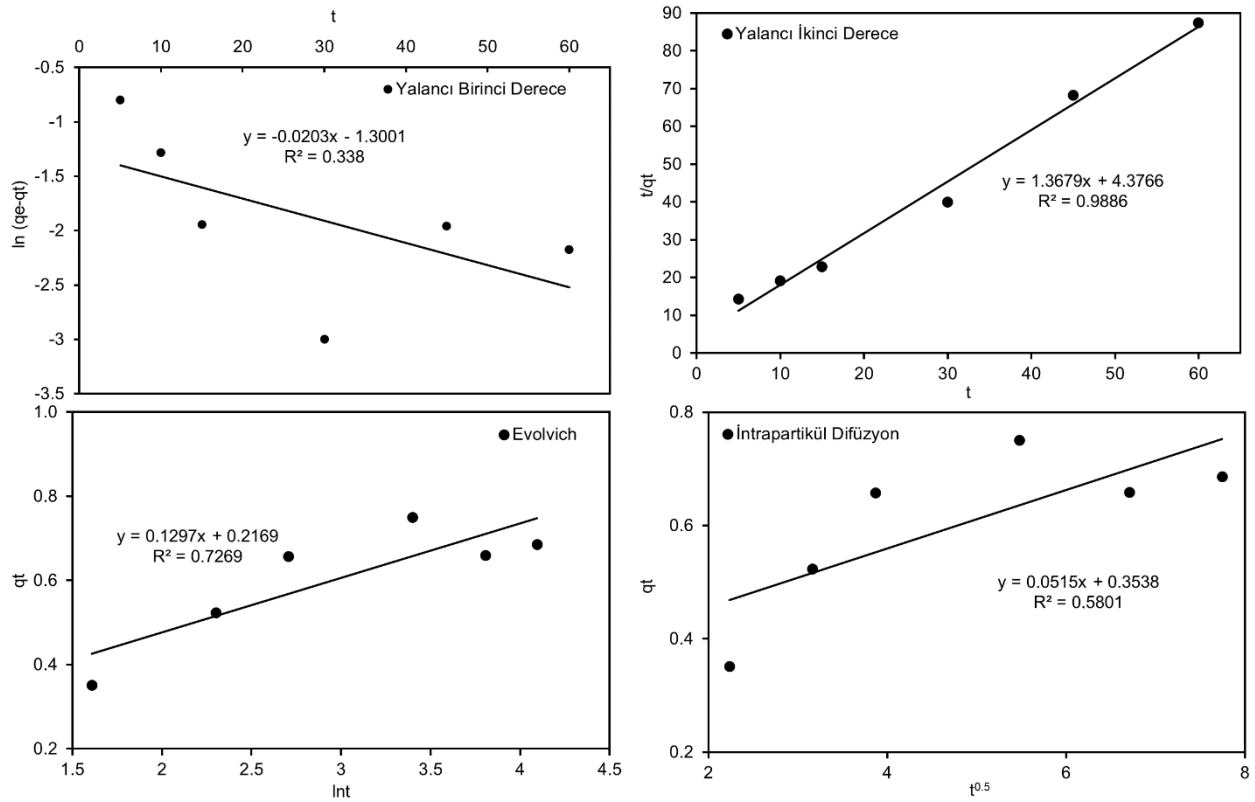
3.6. Kesikli Adsorpsiyonun İzoterm ve Kinetik Model Değerlendirmesi (Isotherm and Kinetic Model Evaluation of Batch Adsorption)

Bu çalışmada, FK ile RS145 arasındaki adsorpsiyon davranışını tanımlamak için Langmuir, Freundlich, Temkin ve D-R (Dubinin-Radushkevich) modelleri kullanılmıştır. Uygulanan izotermelerin hesaplanan katsayıları Tablo 4'te verilmektedir. q_m değeri 150 rpm, 20 °C'de ve 10 mg/L'lik RS145 konsantrasyonuna göre 9,438 mg/g olarak elde edilmiştir. K_L değeri 1,063 olarak belirlenmiştir. Mevcut çalışmada, R_L değeri $0 < R_L < 1,0$ arasındadır. Bu, RS145 için FK'ye tutunmanın başarılı olduğunu göstermiştir. Korelasyon katsayısına (R^2) göre, Langmuir'den sonra en iyi izoterm Temkin olduğu görülmektedir. Temkin modeline göre, sabitlerdeki değişim, RS145 için adsorpsiyon sürecinin enerji dağılımının etkilendiğini ve dolayısıyla Khan vd. (2022)'nin yaptıkları çalışmaya göre de fizisorpsiyon ile bağlantılı olduğu söylenebilir. Mevcut R^2 değerlerine göre, izoterm sıralaması Langmuir>Temkin>Freundlich>D-R şeklindedir. Şekil 7, FK üzerindeki RS145'in adsorpsiyon izotermelerini ve Langmuir, Freundlich, D-R ve Temkin adsorpsiyon modellerinin deneysel verilere uygunluğunu göstermektedir. FK'nin RS145'e karşı adsorpsiyon performansını değerlendirmek için, farklı araştırmacıların yaptıkları çalışmalar Tablo 5'te özetlendiği gibi karşılaştırılmıştır. Farklı adsorbentlerle FK'nin karşılaştırılması, FK'nin, katyonik ve anyonik boyar maddelerin giderilmesi için potansiyel bir adsorbent olarak kabul edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 7. Adsorpsiyon izotermeleri (Adsorption isotherms)

Sürecin tutunma hızını tespit etmek için, Yalancı Birinci Dereceden, Yalancı İkinci Dereceden, Elovich ve İntrapartikül Difüzyon modelleri denenmiştir. Şekil 8 ve Tablo 4, kinetik denklemlerine göre elde edilen model grafiklerini ve katsayıları göstermektedir. Yüksek (≥ 10 mg/L) ve düşük (< 10 mg/L) boyar madde konsantrasyonlarında Yalancı Birinci Dereceden ve Yalancı İkinci Dereceden modeller için daha uygun profil çizmektedirler (Grigoraş vd., 2023). Sonuçlar, Elovich ve İntrapartikül Difüzyon modellerinin RS145 adsorpsiyon sürecini yürütemediğini göstermektedir. R^2 değerleri Yalancı İkinci Dereceden diğer kinetiklere göre bir adım önde olduğunu göstermektedir (Kifetew vd., 2023; Krishnasamy vd., 2022). Boyaların adsorpsiyon kinetiği açısından, farklı adsorbentler için benzer uyum sonuçları elde edilmiştir. Grafik dağılımında, RS145 için Yalancı İkinci Derece > Elovich > Yalancı Birinci Derece > İntrapartikül Difüzyon sıralamasının oluşturulabileceği görülmektedir.



Şekil 8. Kinetik modeller (Kinetic models)

Tablo 4. Kinetik, izoterm katsayıları ve R² değerleri (Kinetics, isotherm coefficients and R² values)

Parametre		RS145
Optimum Kinetik Sonuçları		
Yalancı ikinci derece	k_2 (g/mg/min)	0,038
	R^2	0,9992
Yalancı birinci derece	k_1 (1/min)	0,0196
	R^2	0,6888
Elovich	α	40,995
	β	0,892
	R^2	0,6772
İntrapartikül difüzyon	k_p	5,998
	R^2	0,2004
Optimum İzoterm Sonuçları		
Langmuir	q_m , mg/g	9,438
	K_L , 1/mg	1,063
	R_L	0,086
	R^2	0,9966
Freundlich	$K_F, ((\text{mg/g})(\text{L/mg})^{1/n})$	1,128
	n	2,268
	$1/n$	0,441
	R^2	0,9919
Dubinin-Radushkevich	$K_{DR}, (\text{mol k})^{-1/2}$	0,506
	E , (kJ/mol)	0,994
	R^2	0,9669
Temkin	K_T , L/mg	29,590
	R^2	0,9963

Tablo 5. RS145'in performansının karşılaştırılması (Comparison of the performance of the RS145)

Adsorbent	q _e (mg/g)	% Giderim	Kaynaklar
Karpuz çekirdeği	7,58	84,48	(Benkaddour vd. 2018)
Narenciye kabukları	-	87,52	(Kenda vd. 2024)
Eğreltiotu yaprağı	32	50	(Ramirez Gomez vd. 2024)
Delonix negra tohumları	24,15	-	(Saravanan vd. 2020)
Moringa oleifera tohumları	-	87,77	(Tran vd. 2023)
Yerfıstığı kabuğu	7,33	53,80	(Krishnasamy vd. 2022)
Teff samanı	-	98,53	(Kifetew vd. 2022)
FK	9,438	75	Bu çalışma

4. Sonuç ve Öneriler (Conclusion and Recommendations)

RS145'in FK yüzeyine adsorbe olma süreci kesikli sistemde pH, temas süresi, FK dozu ve sıcaklık faktörlerine göre araştırılmıştır. FK için optimum adsorpsiyon şartları şu şekildedir: FK dozu: 0,5 g, pH: 2,0, temas süresi: 30 dakika, sıcaklık: 20 °C. FK ile RS145'in izoterm ve kinetik açısından Langmuir izotermi ve yalancı ikinci derece kinetik ile uyumlu olduğu görülmüştür. Maksimum adsorpsiyon kapasitesi ve korelasyon katsayısı (R²) 9,438 mg/g ve 0,9966 şeklindedir. FTIR, termodinamik, pH gibi faktörlere göre adsorpsiyonun fizisorpsiyon olduğu söylenebilir. FK birçok sektör için önemli bir hammadde olmakla birlikte adsorpsiyon sürecinde düşük maliyetli adsorbent olarak ön plana çıkmaktadır. Çalışmada elde edilen veriler FK'nin, RS 145'in laboratuvar ölçekli giderimi için verimli ve ekonomik olarak uygulanabilir bir adsorbent olarak kullanılma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Aksaray Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2023-032 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Adar, E., Acar, F. N., 2021. Tekstil atıksuyundan astrazon black boyasının giderimi: taguchi metodu ile modelleme. Müh. Bil. Tas. Dergisi, 9, 768-784. <https://doi.org/10.21923/jesd.808176>
- Ahmad, T., Danish, M., 2022. A review of avocado waste-derived adsorbents: Characterizations, adsorption characteristics, and surface mechanism. Chemosphere 296, 134036. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134036>
- Bailey, K., Basu, A., Sharma, S., 2022. The Environmental Impacts of Fast Fashion on Water Quality: A Systematic Review. Water 14, 1073. <https://doi.org/10.3390/w14071073>
- Barciela, P., Perez-Vazquez, A., Prieto, M.A., 2023. Azo dyes in the food industry: Features, classification, toxicity, alternatives, and regulation. Food Chem. Toxicol. 178, 113935. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2023.113935>
- Chauhdary, Y., Hanif, M.A., Rashid, U., Bhatti, I.A., Anwar, H., Jamil, Y., Alharthi, F.A., Kazerooni, E.A., 2022. Effective Removal of Reactive and Direct Dyes from Colored Wastewater Using Low-Cost Novel Bentonite Nanocomposites. Water 14, 3604. <https://doi.org/10.3390/w14223604>
- Cui, L., Wang, Y., Hu, L., Gao, L., Du, B., Wei, Q., 2015. Mechanism of Pb(ii) and methylene blue adsorption onto magnetic carbonate hydroxyapatite/graphene oxide. RSC Adv. 5, 9759-9770. <https://doi.org/10.1039/C4RA13009J>
- da Silva, B.C., Delgobo, E.S., Corrêa, J., Zanutto, A., da Silva Medeiros, D.C.C., Lenzi, G.G., Matos, E.M., de Abreu Pietrobelli, J.M.T., 2023. Recovery of a synthetic dye through adsorption using malt bagasse, a by-product of brewing industry: Study in batch and continuous systems. J. Water Process Eng. 56, 104366. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104366>
- do Nascimento, J.M., de Oliveira, J.D., Leite, S.G.F., 2019. Chemical characterization of biomass flour of the babassu coconut mesocarp (*Orbignya speciosa*) during biosorption process of copper ions. Environ. Technol. Innov. 16, 100440. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100440>
- Ebrahim, A. Allah M., El-Asasery, M.A., 2023. A Facile Route for Removal of Reactive Dye Yellow 145 and Cu (II) by Using Bentonite/slag-based geopolymer. Egypt. J. Chem. 66, 0-0. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2023.214609.8062>
- El Messaoudi, N., El Khomri, M., El Mouden, A., Bouich, A., Jada, A., Lacherai, A., Iqbal, H.M.N., Mulla, S.I., Kumar, V., Américo-Pinheiro, J.H.P., 2022. Regeneration and reusability of non-conventional low-cost adsorbents to remove dyes from wastewaters in multiple consecutive adsorption-desorption cycles: a review. Biomass Convers. Biorefinery. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03604-9>

- Farajzadeh-Dehkordi, N., Farhadian, S., Zahraei, Z., Asgharzadeh, S., Shareghi, B., Shakerian, B., 2023. Insights into the binding interaction of Reactive Yellow 145 with human serum albumin from a biophysics point of view. *J. Mol. Liq.* 369, 120800. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120800>
- Fatima, S.K., Ceeseay, A.S., Khan, M.S., Sarwar, R., Bilal, M., Uddin, J., Ul-Hamid, A., Khan, A., Riaz, N., Al-Harrasi, A., 2023. Visible Light-Induced Reactive Yellow 145 Discoloration: Structural and Photocatalytic Studies of Graphene Quantum Dot-Incorporated TiO₂. *ACS Omega* 8, 3007–3016. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05805>
- Gharbani, P., 2018. Modeling and optimization of reactive yellow 145 dye removal process onto synthesized MnO_x-CeO₂ using response surface methodology. *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 548, 191–197. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.03.046>
- Grigoras, C.-G., Simion, A.-I., Favier, L., 2023. Exploration of Reactive Black 5 Dye Desorption from Composite Hydrogel Beads—Adsorbent Reusability, Kinetic and Equilibrium Isotherms. *Gels* 9, 299. <https://doi.org/10.3390/gels9040299>
- Hatimi, B., Loudiki, A., Mouldar, J., Hafdi, H., Joudi, M., Bensemlali, M., Aarfane, A., Nasrellah, H., El Mhammedi, M.A., Bakasse, E.M., 2023. Physicochemical and statistical modeling of reactive Yellow 145 enhanced adsorption onto pyrrhotite Ash-Based novel (Catechin-PG-Fe)-Complex. *Mater. Sci. Energy Technol.* 6, 65–76. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2022.11.007>
- Hosseini Taheri, S.E., Bazargan, M., Rahnama Vosough, P., Sadeghian, A., 2024. A comprehensive insight into peanut: Chemical structure of compositions, oxidation process, and storage conditions. *J. Food Compos. Anal.* 125, 105770. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105770>
- Jinendra, U., Bilehal, D., Nagabhushana, B.M., Reddy, K.R., Reddy, C.V., Raghu, A. V., 2019. Template-free hydrothermal synthesis of hexa ferrite nanoparticles and its adsorption capability for different organic dyes: Comparative adsorption studies, isotherms and kinetic studies. *Mater. Sci. Energy Technol.* 2, 657–666. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.08.005>
- Kanwal, A., Rehman, R., Imran, M., Samin, G., Jahangir, M.M., Ali, S., 2023. Phytoremediative adsorption methodologies to decontaminate water from dyes and organic pollutants. *RSC Adv.* 13, 26455–26474. <https://doi.org/10.1039/D3RA02104A>
- Kenda, G.T., Fotsop, C.G., Tchuifon, D.R.T., Kouteu, P.A.N., Fanle, T.F., Anagho, S.G., 2024. Building TiO₂-doped magnetic biochars from Citrus sinensis peels as low-cost materials for improved dye degradation using a mathematical approach. *Appl. Surf. Sci. Adv.* 19, 100554. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100554>
- Khan, Idrees, Saeed, K., Zekker, I., Zhang, B., Hendi, A.H., Ahmad, A., Ahmad, S., Zada, N., Ahmad, H., Shah, L.A., Shah, T., Khan, Ibrahim, 2022. Review on Methylene Blue: Its Properties, Uses, Toxicity and Photodegradation. *Water* 14, 242. <https://doi.org/10.3390/w14020242>
- Khiaophong, W., Jaroensan, J., Kachangoon, R., Vichapong, J., Burakham, R., Santaladchaiyakit, Y., Srijaranai, S., 2022. Modified Peanut Shell as an Eco-Friendly Biosorbent for Effective Extraction of Triazole Fungicide Residues in Surface Water and Honey Samples before Their Determination by High-Performance Liquid Chromatography. *ACS Omega* 7, 34877–34887. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03410>
- Kifetew, M., Alemayehu, E., Fito, J., Worku, Z., Prabhu, S.V., Lennartz, B., 2023. Adsorptive Removal of Reactive Yellow 145 Dye from Textile Industry Effluent Using Teff Straw Activated Carbon: Optimization Using Central Composite Design. *Water* 15, 1281. <https://doi.org/10.3390/w15071281>
- Krishnasamy, S., SaiAtchyuth, B.A., Ravindiran, G., Subramanian, B., Ramalingam, M., Sai Vamsi, J.U.B., Ramesh, B., Razack, N.A., 2022. Effective Removal of Reactive Yellow 145 (RY145) using Biochar Derived from Groundnut Shell. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2022, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2022/8715669>
- Kushwaha, R., Singh, R.S., Mohan, D., 2023. Comparative study for sorption of arsenic on peanut shell biochar and modified peanut shell biochar. *Bioresour. Technol.* 375, 128831. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128831>
- Lavado-Meza, C., De la Cruz-Cerrón, L., Asencios, Y.J.O., Marcos, F.C.F., Dávalos-Prado, J.Z., 2023. Alkaline Modification of Arabica-Coffee and Theobroma-Cocoa Agroindustrial Waste for Effective Removal of Pb(II) from Aqueous Solutions. *Molecules* 28, 683. <https://doi.org/10.3390/molecules28020683>
- Lu, A., Yu, X., Ji, Q., Chen, L., Yagoub, A.E.-G., Olugbenga, F., Zhou, C., 2023. Preparation and characterization of lignin-containing cellulose nanocrystals from peanut shells using a deep eutectic solvent containing lignin-derived phenol. *Ind. Crops Prod.* 195, 116415. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116415>
- Meili, L., Lins, P.V.S., Costa, M.T., Almeida, R.L., Abud, A.K.S., Soletti, J.I., Dotto, G.L., Tanabe, E.H., Sellaoui, L., Carvalho, S.H.V., Erto, A., 2019. Adsorption of methylene blue on agroindustrial wastes: Experimental investigation and phenomenological modelling. *Prog. Biophys. Mol. Biol.* 141, 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2018.07.011>
- Mondal, M., Mukherjee, R., Sinha, A., Sarkar, S., De, S., 2019. Removal of cyanide from steel plant effluent using coke breeze, a waste product of steel industry. *J. Water Process Eng.* 28, 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.01.013>
- Munagapati, V.S., Wen, H.-Y., Wen, J.-C., Gollakota, A.R.K., Shu, C.-M., Lin, K.-Y.A., Wen, J.-H., 2022. Adsorption of Reactive Red 195 from aqueous medium using Lotus (Nelumbo nucifera) leaf powder chemically modified with dimethylamine: characterization, isotherms, kinetics, thermodynamics, and mechanism assessment. *Int. J. Phytoremediation* 24, 131–144. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1929060>
- Ofudje, E.A., Sodiya, E.F., Ibadin, F.H., Ogundiran, A.A., Alayande, S.O., Osideko, O.A., 2021. Mechanism of Cu²⁺ and reactive yellow 145 dye adsorption onto eggshell waste as low-cost adsorbent. *Chem. Ecol.* 37, 268–289. <https://doi.org/10.1080/02757540.2020.1855153>
- Pączkowski, P., Puzska, A., Gawdzik, B., 2021. Effect of Eco-Friendly Peanut Shell Powder on the Chemical Resistance, Physical, Thermal, and Thermomechanical Properties of Unsaturated Polyester Resin Composites. *Polymers (Basel)*. 13, 3690. <https://doi.org/10.3390/polym13213690>
- Pamukoğlu, Y., Kırkan, B., Yoldaş, B., 2022. Lavanta bitkisi özütü kullanılarak SiNH₂@FeNP nanokompozitinin yeşil sentezi ile sulu çözeltilen metilen mavisinin giderimi: deneysel tasarım yaklaşımı. *Müh. Bil. Tas. Dergisi*, 10, 272–285. <https://doi.org/10.21923/jesd.1005031>
- Patel, M.J., Tandel, R.C., Sonera, S.A., Bairwa, S.K., 2023. Trends in the synthesis and application of some reactive dyes: A review. *Brazilian J. Sci.* 2, 14–29. <https://doi.org/10.14295/bjs.v2i7.350>

- Pérez-Calderón, J., Santos, M. V., Zaritzky, N., 2018. Reactive RED 195 dye removal using chitosan coacervated particles as bio-sorbent: Analysis of kinetics, equilibrium and adsorption mechanisms. *J. Environ. Chem. Eng.* 6, 6749–6760. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.10.039>
- Prasad, K., Veluru, S., Himaja Pamu, S., Rao Poiba, V., Talib Hamzah, H., Seereeddi, M., 2023. Potential efficacy of a fruit waste - Manila tamarind seed powder for the adsorption of hazardous dyes from aqueous solution: Batch studies. *Mater. Today Proc.* 80, 1334–1340. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.082>
- Raji, Z., Karim, A., Karam, A., Khalloufi, S., 2023. Adsorption of Heavy Metals: Mechanisms, Kinetics, and Applications of Various Adsorbents in Wastewater Remediation—A Review. *Waste* 1, 775–805. <https://doi.org/10.3390/waste1030046>
- Ramírez-Gómez, W.M., Garzón-Cucaita, V., Carriazo, J.G., 2024. Synthesis of iron oxide microparticles with fern leaf morphology: Assessment of the RY-145 azo-dye adsorption. *Surfaces and Interfaces* 44, 103661. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103661>
- Rose, P.K., Kumar, Rajat, Kumar, Rakesh, Kumar, M., Sharma, P., 2023. Congo red dye adsorption onto cationic amino-modified walnut shell: Characterization, RSM optimization, isotherms, kinetics, and mechanism studies. *Groundw. Sustain. Dev.* 21, 100931. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100931>
- Saravanan, A., Karishma, S., Jeevanantham, S., Jeyasri, S., Kiruthika, A.R., Kumar, P.S., Yaashikaa, P.R., 2020. Optimization and modeling of reactive yellow adsorption by surface modified Delonix regia seed: Study of nonlinear isotherm and kinetic parameters. *Surfaces and Interfaces* 20, 100520. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100520>
- Selvaraj, V., Swarna Karthika, T., Mansiya, C., Alagar, M., 2021. An over review on recently developed techniques, mechanisms and intermediate involved in the advanced azo dye degradation for industrial applications. *J. Mol. Struct.* 1224, 129195. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129195>
- Sen, T.K., 2023. Agricultural Solid Wastes Based Adsorbent Materials in the Remediation of Heavy Metal Ions from Water and Wastewater by Adsorption: A Review. *Molecules* 28, 5575. <https://doi.org/10.3390/molecules28145575>
- Silva, C.E. de F., Gama, B.M.V. da, Gonçalves, A.H. da S., Medeiros, J.A., Abud, A.K. de S., 2020. Basic-dye adsorption in albedo residue: Effect of pH, contact time, temperature, dye concentration, biomass dosage, rotation and ionic strength. *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.* 32, 351–359. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2019.04.006>
- Tanattu, P.N., 2021. Treatability of Wastewater Containing Reactive Yellow 145 Dyestuff by Ozonation Process. *Sak. Univ. J. Sci.* 25, 995–1002. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.876926>
- Tunç Dede, Ö., 2019. Potential use of hazelnut processing plant wastes as a sorbent for the simultaneous removal of multi-elements from water. *Müh. Bil. Tas. Dergisi*, 7(2), 301-312. <https://doi.org/10.21923/jesd.486065>
- Ungureanu, E.L., Mocanu, A.L., Stroe, C.A., Panciu, C.M., Berca, L., Sionel, R.M., Mustatea, G., 2023. Agricultural Byproducts Used as Low-Cost Adsorbents for Removal of Potentially Toxic Elements from Wastewater: A Comprehensive Review. *Sustainability* 15, 5999. <https://doi.org/10.3390/su15075999>
- Yadav, B.S., Dasgupta, S., 2022. Effect of time, pH, and temperature on kinetics for adsorption of methyl orange dye into the modified nitrate intercalated MgAl LDH adsorbent. *Inorg. Chem. Commun.* 137, 109203. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109203>
- Yakout, S.M., El-Zaidy, M.E., 2023. Depollution of industrial dyes by nanocrystalline Ti_{0.95}Bi_{0.025}X_{0.025}O₂ (X = Zr, Nb): visible light harvesting, charge separation and high efficiency. *J. Sol-Gel Sci. Technol.* 107, 417–429. <https://doi.org/10.1007/s10971-023-06124-8>



ÖN-EĞİTİLMİŞ DERİN SİNİR AĞLARI KULLANILARAK ULTRA GENİŞ BANT RADAR TABANLI EL HAREKETİ TANIMA

Nurullah ÇALIK*

İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>El Hareketi Tanıma, Ultra Geniş-Bant, Radar, Derin Öğrenme, Ön-eğitilmiş Model.</i>	Ultra geniş-bant (UGB) radar sensörleri insan hareketlerinin tanınmasında kritik bir öneme sahiptir. Sahip oldukları yüksek frekans özelliği ile hassas hareketlerin ayırt edilmesinde kullanılabilirler. Ayrıca bu özellik, sensör boyutlarının portatif olmasına ve birçok alanda kolay kullanımına imkân tanır. Her ne kadar RGB kameralar üzerinden bu işlem yapılabilse de özellikle mahremiyet gizliliği konusunda problemler ile karşılaşmaktadır. UGB sensörlerden elde edilen verilerde kişiler anonimleştiği için sadece hareket örüntüsü ele alınabilmektedir. Dolayısıyla, ev içi izleme ve yaşlı takibi gibi konularda önemli bir potansiyeli bulunmaktadır. Bu çalışmada, üç farklı sensör üzerinden toplanan radar verilerinden el hareketlerinin sınıflandırılması yapılmaktadır. Radar görselleri sağ, sol ve üst olacak şekilde arka arkaya bir araya getirilerek 3 kanallı bir görüntü elde edilmiştir. Ardından bu görüntüler üzerinden ön-eğitilmiş modeller eğitilmiş ve test edilmiştir. Eğitim ve test oranı 50:50 olduğu durumda %97.93 (DenseNet201) 75:25 oranında ise %97.65 (EfficientNetB0) oranında bir başarımlar elde edilmiştir. Tek sensör kullanımı yerine öne sürülen strateji ile modellerin eğitilmesinin önemli bir iyileştirme yaptığı ortaya koyulmuştur.

ULTRA WIDEBAND RADAR-BASED HAND GESTURE RECOGNITION USING PRE-TRAINED DEEP NEURAL NETWORKS

Keywords	Abstract
<i>Hand Gesture Recognition, Ultra Wide-Band, RADAR, Deep Learning, Pre-trained Model.</i>	Ultra-wideband (UWB) radar sensors play a pivotal role in recognizing human movements. They can be used to distinguish sensitive movements with their high frequency feature. In addition, this feature allows the sensor dimensions to be portable and easy to use in many areas. Although this process can be done via RGB cameras, problems are encountered, especially regarding privacy. Since people are anonymized in the data obtained from UWB sensors, only their movement patterns can be considered. Therefore, it has significant potential in issues such as in-home and elderly monitoring. In this study, hand movements are classified from radar data collected through three different sensors. A 3-channel image was obtained by combining radar images one after the other, right, left, and top. Then, pre-trained models were trained and tested on these images. When the training and testing ratio was 50:50, a performance rate of 97.93% (DenseNet201) was achieved, and when the ratio was 75:25, a performance rate of 97.65% (EfficientNetB0) was achieved. It has been shown that training models with the proposed strategy instead of using a single sensor makes a significant improvement.

Alıntı / Cite

Çalık, N., (2024). Ön-Eğitilmiş Derin Sinir Ağları Kullanılarak Ultra Geniş Bant Radar Tabanlı El Hareketi Tanıma, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(1), 205-216.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
N. Çalık, 0000-0002-7351-4980	Başvuru Tarihi / Submission Date	11.01.2024
	Revizyon Tarihi / Revision Date	10.02.2024
	Kabul Tarihi / Accepted Date	26.02.2024
	Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: nurullah.calik@medeniyet.edu.tr, +90-216-280-3333

ULTRA WIDEBAND RADAR-BASED HAND GESTURE RECOGNITION USING PRE-TRAINED DEEP NEURAL NETWORKS

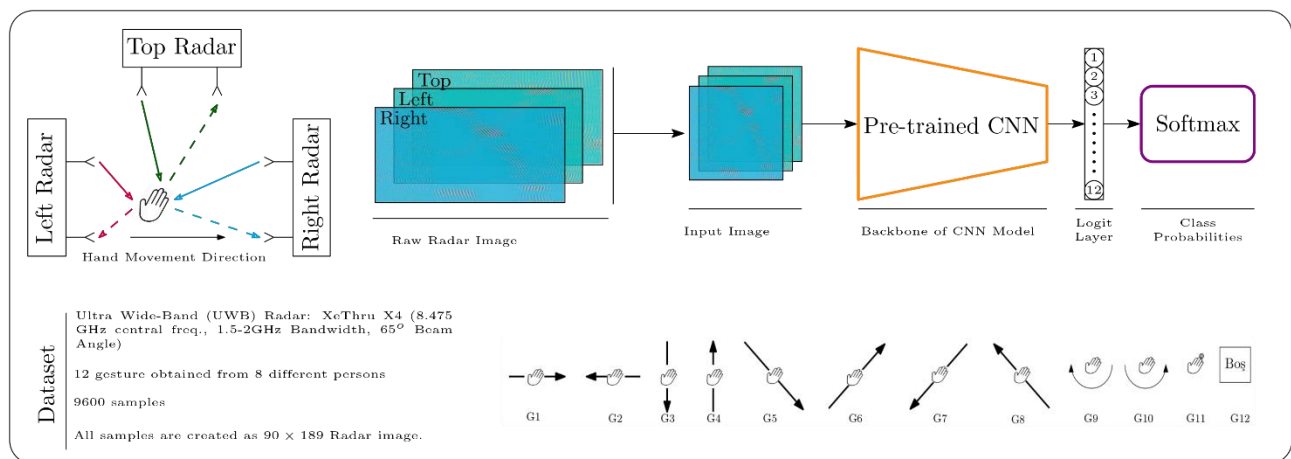
Nurullah CALIK[†]

Istanbul Medeniyet University, School of Engineering and Natural Sciences, Department of Biomedical Engineering, Istanbul, Turkiye.

Highlights

- Recognition of hand gesture with ultra-wideband radar sensors
- Converting data from 3 different sensors into a 3-channel image
- Conducting 5 random experiments for each models and training-test ratios of 50:50 and 75:25
- Achieving superior accuracy of 97.93% by training pre-trained models with fine tuning.

Graphical Abstract



Purpose and Scope

The aim of the paper is that the 3D images produced by combining images collected from different UWB sensors contribute to the recognition of hand gesture.

Design/methodology/approach

For this purpose, using the UWB hand gesture data set (Ahmed et al., 2021), radar images of 90×189 dimensions were gathered channel-wise and resized to 224×224 to feed the input of pre-trained models. Then the models were trained using the fine tuning methodology.

Findings

In the experimental setup section, each model was tested by separating random training and test samples 5 times for training and test ratios of 50:50 and 25:75. This process was also performed for single-channel images. It is seen that the proposed approach significantly increases the recognition performance achieved through a single channel.

Originality

The novel contribution of the article is the classification of UWB images as multi-channel instead of single channel and using pre-trained models for this purpose.

[†]Corresponding author: nurullah.calik@medeniyet.edu.tr, +90-216-280-3333

1. Giriş (Introduction)

Son yıllarda, insan hareketlerinin takibi alanında yaşanan teknolojik gelişmeler, sağlık, güvenlik ve bireysel yaşam kalitesi gibi önemli konularda çeşitli çözümler sunmaktadır. Özellikle görüntü işleme ve yapay zekâ teknolojilerinin entegrasyonu, bu alandaki potansiyeli büyük ölçüde artırmış ve insan hareketlerinin analizi konusunda yeni ufuklar açmıştır. Günümüzde, görüntü işleme teknikleri, kameralar aracılığıyla elde edilen video verilerini analiz ederek insan hareketlerini anlamak ve izlemek amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu teknikler, gelişmiş algoritmalar sayesinde karmaşık ve dinamik hareketleri hassas bir şekilde tespit edebilmekte, bu durum çeşitli sektörlerde önemli uygulama alanları yaratmaktadır. Özellikle sağlık, güvenlik ve otomasyon alanlarında, insan hareketlerinin detaylı bir şekilde takip edilmesi, önceden belirlenmiş hedeflere ulaşma süreçlerini optimize etmekte ve toplumsal fayda sağlamaktadır. Sağlık sektöründe, yaşlı veya engelli bireylerin hareketlerini izlemek, onların günlük aktivitelerini değerlendirmek ve olası sağlık sorunlarını önceden belirlemek için görüntü işleme teknikleri oldukça etkili bir araçtır. Bu teknikler, kameralar aracılığıyla elde edilen video verilerini işleyerek, yaşlıların normal hareket örüntülerini belirlemekte ve anormal durumları tespit etmektedir. Örneğin, bir yaşlı bireyin düşmesi durumunda, görüntü işleme algoritmaları bu durumu tespit edebilir ve acil durum ekiplerine otomatik bir uyarı gönderebilir. Fakat görüntü işleme sistemlerinin mahremiyet konusunu egale etme potansiyeline sahip olmalarından dolayı, kişilerin evlerine yerleştirmekte tereddüt ettiği sistemlerdir. Bunun yerine ultra geniş-bant radar sistemleri yüksek frekans çözünürlüğü sayesinde insan hareketlerini hassas bir şekilde ayırt edebilmektedir. Dolayısıyla, kamera sistemleri yerine böylesi yenilikçi çözümlerin kullanılması daha elverişlidir.

Ultra geniş-bant (UGB) radar sensörleri, çok geniş bir frekans bandında çalışabilme özelliği olan radar sistemleridir. Bu sensörler, milimetrik ve santimetrik dalga boylarında yüksek çözünürlük ve hassasiyet sağlayarak, çeşitli nesnelerin, özellikle de insanların hareketlerini tanıma yeteneğine sahiptir (Ahmed ve Kallu vd., 2021). Gelişmiş işaret işleme algoritmaları ve veri analizi yöntemleri ile birleştirildiğinde, UGB radardan gelen çok sayıda veri aynı anda işlenebilmektedir. Bu sayede, insan hareketi tanıma konusunda daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilebilmektedir. Yüksek çözünürlük ve düşük güç tüketimi avantajları, UGB radarlarının endüstriyel uygulamalarda da büyük ilgi görmesini sağlamaktadır (Jiang vd., 2011). Bu avantajlar, endüstriyel sistemlerin hassas ve etkili bir şekilde çalışmasını destekleyerek, üretim süreçlerindeki verimliliği artırmaktadır. Yüksek çözünürlük, radar sensörlerinin nesnelere arasındaki küçük farklılıkları dahi ayırt edebilme yeteneğini sağlar. Bu özellik, endüstriyel ortamlarda çok sayıda nesnenin ve bileşenin aynı anda takip edilmesinde, hataların hızlı bir şekilde tespit edilmesinde ve üretim süreçlerinin optimize edilmesinde kritik bir öneme taşır. Özellikle radar sinyallerinin toplanmasıyla elde edilen görüntülerin anonim bir yapıda olması nedeniyle kişilerin izlenmeden sadece hareketlerinin belirlenmesi UGB radar uygulamasının önemli bir avantajını oluşturmaktadır.

UGB sensörlerden elde edilen radar imgeleri RGB görüntüler kadar net bir bilgi sunmazlar. Sensörlerin hesaplayabildiği mesafe ve hız bilgileri üzerinden oluşturulan görüntüler ayrıca birçok arkaplan gürültüsünü de içermektedir. Bu gibi problemler ile başa çıkmak için son zamanlarda derin öğrenme yöntemlerinin kullanılması revaçtadır. Evrimsel sinir ağlarının (Convolutional Neural Network - CNN) kullanılmasıyla ham olan radar görüntülerinden sınıflandırma için etkili özellikler çıkarılabilmektedir. CNN'lerin görüntü çıkarmadaki kabiliyetleri sayesinde UGB görüntüleri de işlenebilmektedir. Bu görüntüler tek sensör kullanılarak elde edilebileceği gibi birden fazla sensör tarafından toplanan imgeler de olabilmektedir. Çoklu görüntülerin bir arada değerlendirilip sınıflandırma için kullanılması incelenmesi gereken kayda değer bir alandır.

Bu çalışma kapsamında, UGB radar görsellerinin sınıflandırılması için yeni bir yaklaşım öne sürülmektedir. Literatürde tek sensör veya üç kanal için ayrı model tasarımı gibi maliyetli çözümlere alternatif olarak sensörlerden gelen görüntüleri arka arkaya birleştirerek 3-kanallı bir görüntü elde edilmektedir. Ardından bu görüntü ön-eğitilmiş bir model üzerinden sınıflandırılmaktadır. 3-sensör kullanılarak elde edilen görüntü el hareketinin örüntüsünü içermektedir. RGB katmanlar yerine sağ, sol ve üst radardan elde edilen ölçüm değerleri eklenen bu yöntem dört farklı ön-eğitilmiş ağ üzerinde test edilmiş ve hepsinde diğer sensörlerden gelen sınıflandırmalara nazaran üstün bir performans sergilemiştir.

1.1. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

UGB radar sensörleri özellikle kişi mahremiyetini koruyarak gözlem yapabileme imkânı vermesi nedeniyle üzerine yoğun çalışılan konulardan biridir. Saçılma verileri üzerinden elde edilen görseller, hareketin kendisini betimlemek için net bir bilgi sunmazlar. Arkaplan gürültülerinin de işin içine girmesiyle birlikte klasik özellik çıkartma ve sınıflandırma algoritmalarının baş edemeyeceği karmaşıklıkta bir problem ortaya çıkar. Bu nedenle, UGB radarlar için literatürde CNN tabanlı birçok çalışma yürütülmüştür.

Ahmed vd., 2021 çalışmasında UGB darbe radarı kullanılarak toplanan yeni bir el hareketleri veri kümesinin oluşturulmasını ve tanımlanmasını içermektedir. Veri seti, sekiz farklı insan gönüllüden toplanan 9.600 örnekten oluşmakta ve bu veriler hem .mat hem de .csv dosya formatlarında saklanmaktadır. Yalnızca sol radar sensöründen gelen girdiyi kullanan 4 katmanlı CNN modeliyle sınıflandırma doğruluğu, %94 seviyelerinde elde edilmiştir.

Mekruksavanich vd., 2023 çalışmasında (Ahmed vd., 2021)'de sunulan 12 el hareketini içeren veri seti kullanılarak bir model geliştirilmiştir. Modelin amacı, her 3 sensörden gelen veriyi kullanarak sınıflandırma yapan bir CNN modeli tasarlamaktır. Ortaya koyulan CNN mimarisi dört katmanlıdır. Makalede yazarlar 5-kat çapraz doğrulama (eğitim test oranı 80:20) %97.19 F1 skor değerine ulaşmışlardır.

Hendy vd., 2022'de ise yazarlar tek UGB radar sensörü kullanarak havaya yazılan sayıların sınıflandırmasına odaklanmışlardır. [0,9] arasında rakamların kullanıldığı veri seti 1800 örnekten oluşmaktadır. 1200 eğitim 300 validasyon ve 300 test örneği olarak ayrılmıştır. Makalede UGB sensörden gelen veriler görsel hale getirilmiş ve 3D CNN yapısına verilmiştir. Ayrıca çalışmada LSTM modelleri de kullanılarak başarı %98.5 seviyelerine çıkarılmıştır.

Park vd., 2023'te UGB sensör kullanılarak işaret dili tanıma uygulaması geliştirilmiştir. 50 cm uzaklıktan 5 farklı işaret için her işaretten 500 tane örnek toplanarak özgün bir veri seti oluşturulmuştur. Çalışmada yazarlar çift kanallı bir CNN yapısı geliştirmişlerdir. Ayrıca, doğruluğun artırılması için hem radar görüntülerinden hem de bu görüntülerin 2D Fourier dönüşümü olan görsellerden de faydalanmışlardır. Geliştirilen modellerin yanı sıra AlexNet (Krizhevsky vd., 2012), VGG-19 (Simonyan vd., 2014) ve ResNet-50 (He vd., 2016) gibi ön-eğitilmiş modeller de kullanılarak %98.98 oranında bir başarı elde etmişlerdir. Modellerin eğitimi için 70:30 oranı tercih edilmiştir.

Ahmed ve Cho, 2020 çalışmasında, Ahmed vd., 2021'da olduğu gibi 12 farklı hareketten üst ve sağ olmak üzere 2 radar kullanarak Xethru-X4 UGB sensörü ile veri toplamışlardır. Bu çalışmada yazarlar ön-eğitilmiş model kullanabilmek için iki görseli satır bazlı üst üste birleştirmişler, ardından 3 kanallı hale getirmek için gri seviye görüntülere MATLAB'ın "ind2rgb8" fonksiyonu uygulanmıştır. Ön-eğitilmiş model olarak GoogleNet (Szegedy vd., 2015) kullanılmıştır. Çalışmada iki sensörden alınan verinin birlikte işlenmesiyle %95 oranında bir başarının elde edildiği ortaya koyulmuştur.

Skaria tarafından kaleme alınan makalede (Skaria vd., 2020), derin öğrenme tekniklerinin radar sinyalleri üzerinden el jesti tanıma uygulamalarında önemli bir role sahip olduğu vurgulanmıştır. Çalışmada, ultra geniş bant (UGB) darbe radarından el jesti imzalarını sınıflandırmak için bir yöntem sunulmuştur. Bu çerçevede, 14 farklı el hareketinin işaretleri çıkarılmış ve her jestin bir menzil-Doppler çerçeve dizisi olarak temsil edildiği belirtilmiştir. Hareketlerden öznitelikleri çıkarmak için CNN modelleri kullanılmış ve ardından sınıflandırıcıya iletilmiştir. k-NN, SVM ve LSTM gibi farklı sınıflandırma mimarileri karşılaştırılmış ve sınıflandırma doğruluğunu maksimize etmek için tensör şekli ve sınıflandırıcı parametrelerinin optimize edildiği belirtilmiştir. Önerilen mimarilerin %96'nın üzerinde yüksek bir doğruluk seviyesine ulaşılmıştır.

Lai vd., 2023'te ise uyku pozisyonu izleme, obstrüktif uyku apne hastaları için önemli bir değerlendirme olarak belirtilmiştir. Bu çalışmanın amacı, çift ultra geniş bant radar sistemi kullanarak bir makine öğrenimi tabanlı uyku pozisyonu tanıma sistemi geliştirmektir. Makale kapsamında, dört uyku pozisyonunu (sırt üstü, sol ve sağ yan yatış ve eğimli) gerçekleştiren 16 hastadan gelen radyo frekansı verileri iki radar tarafından yatak üzerine ve yanına yerleştirilerek toplanmıştır. Önerilen ve değerlendirilen derin öğrenme yaklaşımları, öznitelik çıkarımı ve sınıflandırma süreçlerini optimize eden yöntemler içermekte olup, ayrıca farklı öznitelik çıkarıcılar ve sınıflandırıcıların kombinasyonlarını içeren geleneksel makine öğrenimi yaklaşımları da değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonunda, çift radar sisteminin tek bir radardan daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Ahmed vd., 2024'te yürütülen çalışmada, radar sensörlerinin temas ve invaziv olmayan doğası nedeniyle köpeklerde hayati belirtilerin izlenmesinde yaygın olarak kullanıldığı belirtilmektedir. Ancak, köpeklerden veri toplamanın özel eğitim ve onay gerektirmesi nedeniyle, köpeklerin hayati belirtilerine yönelik genel bir veri seti henüz bu zamana kadar önerilmemiştir. Ele alınan çalışmada, ilk kez ultra geniş bant radar tabanlı köpek hayati belirti (UWB-DVS) veri setini iki senaryo bağlamında sunulmuştur. İlk senaryoda, bayılmış köpeklere klinik referans sensörler takılmış, UGB radar ve referans sensörlerden veriler eşzamanlı olarak toplanmıştır. İkinci senaryoda ise köpekler serbestçe hareket edebilmektedir. Hareket tespiti ve solunum çıkarımı için referans olarak video kayıtları da toplanmıştır. Teknik doğrulama için, Senaryo 1'de hem kalp atış hızı hem de solunum hızı ölçümleri için radar ile klinik referans sensörler arasında yüksek bir korelasyon (0.9) bulunmuştur.

1.2. Makalenin Özgün Katkıları (Novel Contributions of the Paper)

Kaynak araştırmasında sunulduğu üzere, bu zamana kadar önerilen yöntemler ya bir yön üzerinden sınıflandırma yapmaya çalışmışlar (Ahmed vd., 2021) ya da 3 yönden çekilmiş radar görüntüleri için 3 girişi değerlendiren farklı model kurarak çalışmalarını yürütmüşlerdir (Mekruksavanich vd., 2023). Bu makalede önerilen çerçeve ise, her 3 harekete ait radar görüntüsü arka arkaya bir araya getirilerek 3-kanallı bir hareket görüntüsü elde edilmiş ve bu görsel doğrudan ön-eğitilmiş modellere verilmiştir. Çalışmada ele alınan diğer özellikler şu şekilde listelenebilir:

- Ön-eğitilmiş modeller kullanılarak az sayıda devir (epoch) ile model eğitimi yapılmıştır.
- Eğitim ve test oranında 50:50 ve 25:75 oranları kullanılarak zor durumlar altında bile önerilen yöntemin gürbüz (robust) çalıştığı sergilenmiştir.
- Öne sürülen yaklaşımın etkili çalıştığı için dört farklı ön-eğitilmiş model (GoogleNet, ResNet50, DenseNet201 (Huang vd., 2017) ve EfficientNetB0 (Tan vd. 2019)) kullanılmıştır.
- Bu modeller, rastgele ayrılmış 5 farklı eğitim ve test kümeleri üzerinden denenmiş ve bu denemelerin ortalamaları olarak sonuç tabloları oluşturulmuştur.

1.3. Çalışmanın Organizasyonu (Outline of the Paper)

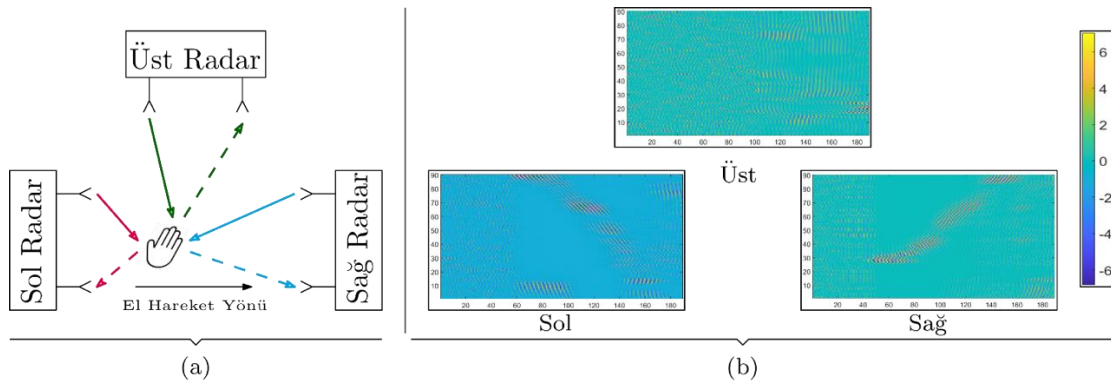
Makale toplam 4 bölümden oluşmaktadır. 2. bölüm (Materyal ve Yöntem) kapsamında çalışmada kullanılan materyal ve ortaya koyulan özgün yaklaşım sunulmuştur. 3 bölümde (DeneySEL Sonuçlar) ise modellerin karşılaştırmalı sonuçları sergilenmiş ve 4. bölümde burada ortaya çıkan bulguların tartışması yürütülmüştür.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. El Hareketi Tanıma İçin UGB Radar Veri Kümesi (UWB Radar Dataset for Hand Gesture Recognition)

El hareketlerinin tanınması için radar dalgaları ile toplanan veri seti genellikle tek sensör üzerindedir. (Ahmed vd., 2021)'deki çalışmada çoklu sensör kullanımı ile üretilen veri seti bu makalenin materyal tarafını oluşturmaktadır.

Ahmed vd., 2021'deki çalışmada, 3 adet UGB radar kullanılarak Şekil 1(a)'da verilen düzenek oluşturulmuştur. Sensör olarak, 8.745 GHz merkez frekansına ve 1.5 GHz-2 GHz bant genişliğine sahip olan XeThru X4 tercih edilmiştir. Sensörün kendi üzerinde 23 GHz'lik bir örnekleme frekansı da bulunmaktadır. Saniyede 20 çerçeve (frame) gönderim kapasitesine ve 65° bir hüzme genişliğine sahiptir. Üzerinde bir alıcı ve bir verici anten bulunmaktadır. Üç radarın arasında 12 farklı en hareketi icra edilmiş ve buradan örnekler toplanmıştır. Her el hareketinin kendisine özgü karakteristiği, radar sensörleri tarafından algılanarak Şekil 1(b)'de verilen radar görüntülerini oluşturmaktadır. Bu görseller üzerinde oluşan dalgalanmalar hareketin örüntüsünü ortaya koyar. Her bir yön hareketin farklı bir bileşenini oluşturmaktadır.



Şekil 1. (a) El hareketleri veri setinin toplanması. (b) Radar saçılım görüntülerinin oluşturulması ((a) Collection of hand gestures dataset. (b) Creation of radar scatter images)

UGB radar sistemi geniş bir frekans spektrumuna sahip bir sinyali çok kısa bir süre boyunca iletebilmektedir. Gönderilen darbe benzeri işaretlere karşılık alınan sinyal Denklem (1)'de verilmiştir.

$$x[n, k] = \sum_{j=1}^{\Phi_{yol}} A_{nj} \times s[n, k - T_j] + G \quad (1)$$

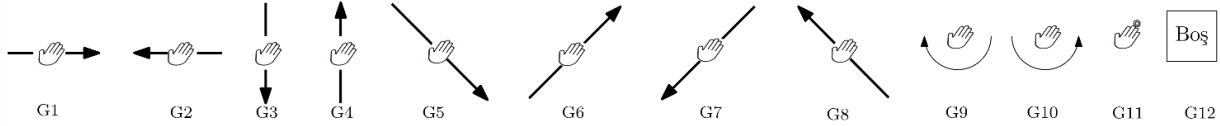
Burada $x[n, k]$ anten tarafından alınan Φ farklı yol üzerinden gelmiş ve üzerine G gürültüsü eklenmiş işareti temsil etmektedir. $x[n, k]$ işareti üzerinden ilgili indislere (n, k) ait bir sayısal değer elde edilmektedir. $n \in [1, N]$ ve $k \in [1, K]$ olan bir aralık için tarama yapılmaktadır ve Denklem (2)'de ifade edilen matris yapısı elde edilmektedir.

$$X = \begin{bmatrix} x[N, 1] & \dots & x[N, K] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x[1, 1] & \dots & x[1, K] \end{bmatrix} \quad (2)$$

X matrisinde satırlar yavaş zaman (slow time), sütunlar ise hızlı zaman (fast time) durumlarını göstermektedir. İlgili veri kümesi oluşturulurken $N = 90$ ve $K = 189$ olarak seçilmiştir. Her hareketin sonunda üç radarda Şekil.1(b)'de verilen görseller oluşmaktadır. Radar işareti toplanırken çevresel saçılmalardan (clutter) kaynaklı bozucu arkaplan gürültüsü de meydana gelir. Gürültünün giderilmesi için geri-döngü (loopback) filtresi olarak adlandırılan Denklem (3)'te verilen filtre kullanılmıştır. Bu filtreden geçen görüntüler veri kümesinde "ClutterRemoved" klasörüne ham verinin haricinde ayrıca kaydedilmiştir. Bu çalışma kapsamında, temizlenmiş görseller üzerinden deneyler yapılmıştır.

$$z_n[k] = \alpha z_n[k-1] + (1 - \alpha)x_n[k] \quad (3)$$

12 farklı hareketin bulunduğu veri kümesinin oluşturulması için farklı yaş ve kilolarda toplam 8 farklı kişiden veriler toplanmıştır. Her gönüllüden bir hareket için toplam 100 örnek alınmıştır. Bu bağlamda, her sınıfta 800 örnek, toplamda 9600 örnekten oluşan bir veri kümesi ortaya çıkmıştır. 12 sınıfa ait görseller Şekil.2'de sunulmuştur. Hareket kümesinin içerisinde, sağ-sol ve yukarı-aşağı doğrusal hareketlerden 4 tane (G1-G4), çapraz (diagonal) hareketlerden 4 tane (G5-G8) ve saat yönünde ve tersinde olmak üzere 2 tane de dönme hareketi (G9-G10) bulunmaktadır. Ayrıca elin içe doğru gelmesi (G11) ile birlikte boşluğun tespit edilmesi için hareketsizlik durumu da (G12) ek birer sınıf olarak ele alınmıştır.



Şekil 2. Veri setinde bulunan 12 el hareketi (12 hand gestures included in the dataset)

Veri seti içinde her gönüllü için ayrı bir klasör bulunmaktadır. Bu klasörün altında da "ClutterRemovedData" ve "RawData" isimlerine alt klasörler mevcuttur. Veriler temizlenmiş ve ham olan klasörlerin altında ".mat" formatında tutulmaktadır. Her ".mat" dosyası kaydedilirken "HV_<Gönüllü ID>_<Hareket ID>_ClutterRemoved.mat" isimlendirilmektedir.

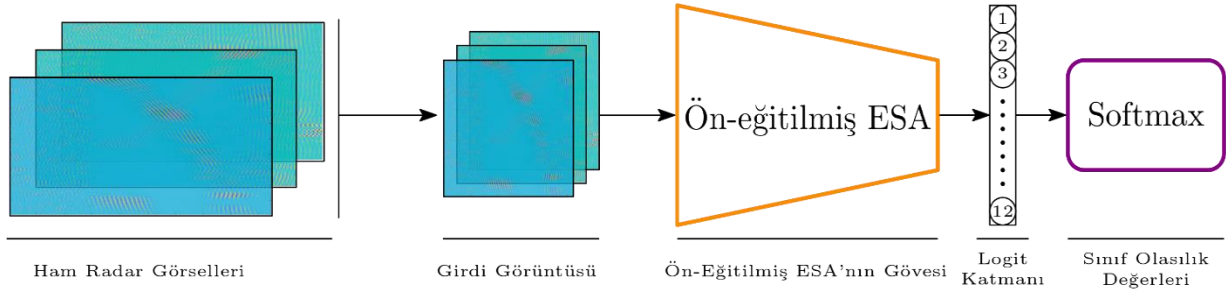
2.2. 3-Sensör Hareket Görüntüsünün Sınıflandırılması (Classification of 3-Sensor Gesture Images)

Derin öğrenme tekniklerini kullanarak eğitilen ön-eğitilmiş (pre-trained) Evrişimli Sinir Ağı (Convolutional Neural Network-CNN) modelleri, bilgisayarlı görü, nesne tanıma ve sınıflandırma gibi görevlerde geniş bir uygulama alanı bulmuştur (Chen vd., 2021; Yuan vd., 2021; Qiu vd., 2020). Son yıllarda yapılan çalışmalarda sadece bilgisayarlı görü alanı değil aynı zamanda farklı disiplinlerde de kendisini göstermektedir (Kozziel vd., 2022; Mahouti vd. 2022). Bu modeller, önceden büyük veri kümesi üzerinde eğitilmiş ve genel özellikleri öğrenmiş olduğu için, çeşitli görevlerde daha yüksek performans ve verimlilik sağlama potansiyeline sahiptir. Ön-eğitilmiş CNN modellerini, büyük veri kümesindeki eğitiminden öğrendiği genelleme kabiliyeti sayesinde başka veri kümelerine olan adaptasyon daha hızlı ve verimli bir şekilde gerçekleşir (Bouaafia vd., 2021; Han vd., 2021). Ayrıca, genel özelliklere odaklanan bu modeller, özel bir görev için daha az eğitim verisine ihtiyaç duyabilir ve böylece eğitim maliyeti daha az olabilmektedir. Modelin küçük veri setlerine uyarlanması için gerekli olan devir (epoch) sayısı büyük veri setlerine göre daha azdır.

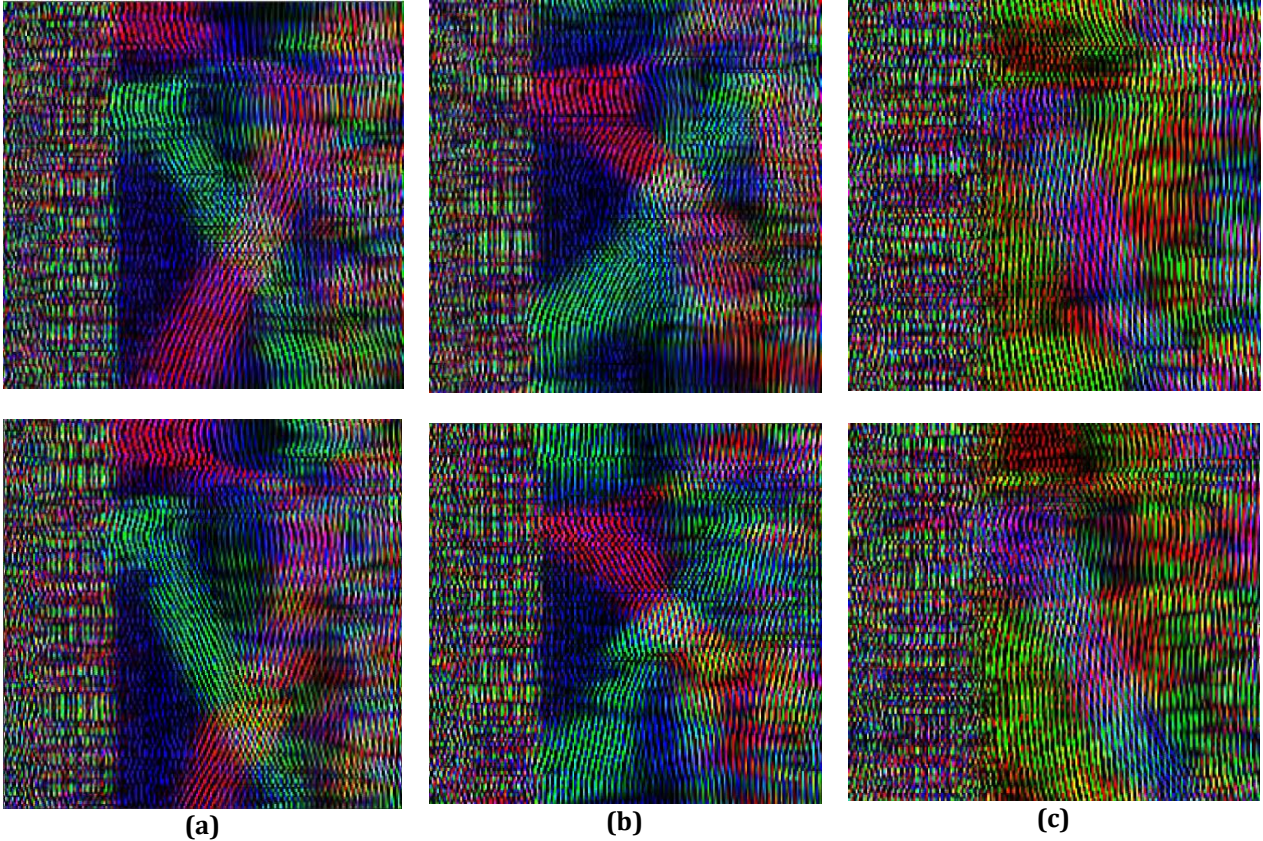
Ön-eğitilmiş modellerin az sayıda örnek içeren veri kümeleri ile eğitiminde transfer öğrenimi (transfer learning) ve ince ayar (fine tuning) (Ding vd., 2023) eğitim stratejileri vardır. Bu çalışmada ince ayar eğitim stratejisi kullanılmıştır. Bu yöntemde, modelin son katmanı olan ve sınıf skorlarının üretildiği nöronların bulunduğu logit katmanı temel modelden çıkarılarak yerine yeni veri kümesinin sınıf sayısı kadar bir nörona sahip logit katmanı eklenmektedir. Bu katman tam-bağlı (fully-connected) olarak modelin içinde bulunmaktadır. Sonrasında, yeni model düşük bir öğrenme oranı ile yeni görev için eğitilir. Öğrenme oranının düşük olmasının sebebi, temel modeldeki genelleme yeteneğinin ilgili veri kümesi için sadece adapte olmasının istenmesidir. Katsayılarına rastgele değerler atanmış bir CNN yapısı tercih edilseydi öğrenme oranının yüksek tutulması gerekirdi. Ön-eğitilmiş modeller incelendiğinde farklı mimariye sahip birçok CNN yapısı ile karşılaşılmaktadır. Her bir modeli özgün kılan taraf, katmanlar arasındaki bağlantı yapıları ve katmanlar için kullanılan farklı aktivasyon

fonksiyonları, konvolüsyon çeşitleri ve havuzlama (pooling) katmanındaki değişikliklerdir. Örnek vermek gerekirse, GoogleNet (Szegedy vd., 2015) ilk defa "inception" yapısını ortaya atmıştır. Bu katman kendisine gelen tensör verisine farklı boyutlardaki filtreleri paralel olarak uygular ve elde edilen aktivasyon haritalarını kanal bazında bir araya getirerek bir sonraki katmana aktarır. Buradaki amaç, hangi filtre çıkışının daha anlamlı olduğuna modelin kendisinin karar vermesidir. Bir diğer ön-ēğitilmiş model yapısı ise ResNet (He vd., 2016) mimarisidir. Bu model, diğerlerinden farklı olarak atlamalı bağlantı yapısı ile tensör akışını tek bir kanal üzerinden yapılmaya zorlamaz. t . katman kendi içinde $F(x^t)$ ile x^t tensör verisini işler ve bir sonraki katmana $x^{t+1} = F(x^t) + x^t$ olarak veriyi sunar. Eğer model içerisinde ilgili katman gereksiz ise $F(\cdot)$ içinde bulunan parametreler sıfıra doğru gitmektedir. Bu sayede gradyanların sönümlenmesi probleminin önüne geçilir. Diğer birçok ön-ēğitilmiş modellerde kendilerine has mimari yapıları ile çeşitli görevlerde farklı başarımlar sergilerler.

Ele alınan bu çalışmada, el hareketi tanıma için UGB radardan toplanan görüntülerin sınıflandırılması için Şekil 3'te gösterilen yeni bir eğitim modeli önerilmiştir. Ortaya koyulan bu yapıda, sağ, sol ve üst sensörden edinilen verilerin ($90 \times 189 \times 1$) ayrı ayrı sınıflandırılması yerine, ön-ēğitilmiş modelin girişine uygun olarak şekillendirildikten sonra kanal ekseninde bir araya getirilerek modele ($90 \times 189 \times 3$) boyutlarında verilmiştir. 3-sensör görüntüsü oluşturulmadan önce her görsel kendi içinde normalize edilmektedir. Aksi takdirde, farklı radarlardan elde edilen değerler kendi aralarında ölçekleme problemine sebebiyet verecektir. Bu durumun önüne geçmek için MATLAB'ın "normalize" komutu kullanılmıştır. Ardından, görüntüler ön-ēğitilmiş modelin girişine uygun olması için $224 \times 224 \times 3$ boyutlarına getirilmiştir.



Şekil 3. 3 sensör üzerinden alınan görüntülerin ön-ēğitilmiş modeller üzerinden işlenmesi (Processing of images taken from 3 sensors through pre-trained models)



Şekil 4. 3-sensör üzerinden kanal boyunca bir araya getirilen görüntüler (Images combined across the channel via 3-sensors)

Logit katmanı için veri setinde bulunan 12 sınıf sebebiyle 12 nöronlu bir yapı tercih edilmiştir. Buraya eklenen nöronlara atanan değerler rastgele olduğu için öğrenme çarpan oranı (learning rate) CNN içindeki katmanlar için 1 iken bu katman için çarpan 10 olarak seçilmiştir. Eğitim için toplamda 5 devir kullanılmıştır. Mini-yığın (mini-batch) miktarı 32 olarak tercih edilmiştir. Öğrenme oranı 0.001'den başlatılarak, modeller Adam (Kingma ve Ba, 2014) uyarlayıcısı ile eğitilmiştir. Her 2 devirde öğrenme oranı 0.65 katsayısı ile çarpılarak kademeli olarak azaltılmıştır.

Ön-eğitilmiş modellerin hareketleri algılaması Şekil.4'te gösterilmektedir. Farklı sensörlerden gelen görseller bir araya getirildiğinde her ne kadar karmaşık örüntüler oluştursalar da CNN'ler tarafından tanınabilecek desenlere sahiptirler. Şekil.4(a)(b) ve (c) G1, G2 ve G3 hareketlerinden verilen ikişer örnek içermektedir. Görüntülerin bir araya getirilme sırası sağ, sol ve üst olduğu için kırmızı (R), yeşil (G) ve mavi (B) renkleri ilgili sensörlere karşılık gelmektedir. CNN mimari ilk katmanlarda $3 \times 3 \times 3$ veya $5 \times 5 \times 3$ boyutlarında çekirdekler (kernel) kullanarak bu ham bilgiyi işlerler ve edindikleri örtüntü bilgisini damıtarak sınıflandırma bloguna aktarırlar. Bunları yaparken modeller ayrıca görsellerin sağ ve sol tarafında oluşan kargaşadan da etkilenmemeleri gerekmektedir. Ön-eğitilmiş modeller bu zorlukların üstesinden gelerek üç bilgi kullanımıyla üstün bir başarıyı sergilemektedir.

Her ne kadar Şekil 4'teki görsellerden göz ile belli bir örüntü çıkarılamasa bile CNN modelleri sahip olduğu karmaşık ilişki yakalama kabiliyetleri neticesinde sınıf içi benzerlikleri üç boyutlu uzayda renk uzayında elde edebilmektedirler. Buradan damıtılan düşük seviyeli bilgi, tüm-bağlı (fully-connected) katmana aktarılır. Saklı uzayda (latent space) oluşan öznitelik vektörü hareketlerin sınıflandırılması için gerekli yapılandırılmış değerleri barındırmaktadır.

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Önerilen yöntemin performansının gösterilmesi için 4 farklı ön-eğitilmiş model kullanılmıştır. Karşılaştırma için bu modeller her üç sensörden gelen veriler (tek kanallı) üzerinden ayrı ayrı eğitilerek test edilmiş. Ön-eğitilmiş modellere tek kanal görsellerinin verilmesi için bunların da 3 kanal haline getirilmesi gerekmektedir. Bunun için ele alınan görüntü çoğullanarak 3-kanal formatına dönüştürülmüştür.

Eğitim ve testler 50:50 ve 25:75 eğitim ve test oranları üzerinden 5 rastgele denemenin ortalaması olarak yapılmıştır. Her rastgele denemede modellerin aynı eğitim ve test örnekleri üzerinden çalışması için özen gösterilmiştir. Tablo.1 ve Tablo.2'de verilen değerler bu 5 denemenin ortalaması ve standart sapması üzerinden verilmiştir. 25:75 oranının denemesinin sebebi, zor şartlar altında modellerin gürbüzlüğünün test edilmesidir. Değerlendirmeler doğruluk (accuracy) ve makro F-Skor üzerinden yapılmıştır.

Tablo 1. Ön-eğitilmiş modellerin farklı sensörler üzerinden test edilmesi. Eğitim-test oranı: 50-50. Deneme sayısı: 5 (Testing pre-trained models on different sensors. Training-test ratio: 50-50. Number of trials: 5)

Sensör	Modeller							
	GoogleNet		ResNet50		DenseNet201		EfficientNetB0	
	Doğruluk	F-Skor	Doğruluk	F-Skor	Doğruluk	F-Skor	Doğruluk	F-Skor
Sağ	89.39±0.83	89.39±0.82	95.30±0.35	95.30±0.36	96.14±0.30	96.14±0.31	95.67±0.09	95.66±0.09
Sol	88.36±0.96	88.28±1.07	96.64±0.26	96.64±0.26	97.24±0.13	97.21±0.14	96.89±0.24	96.89±0.24
Üst	82.40±2.72	82.29±2.74	94.09±0.32	94.10±0.32	94.47±0.87	94.48±0.88	94.22±0.43	94.25±0.46
3-Sensör*	95.28±0.61	95.29±0.61	97.83±0.18	97.84±0.16	97.93±0.14	97.93±0.14	97.89±0.14	97.90±0.14

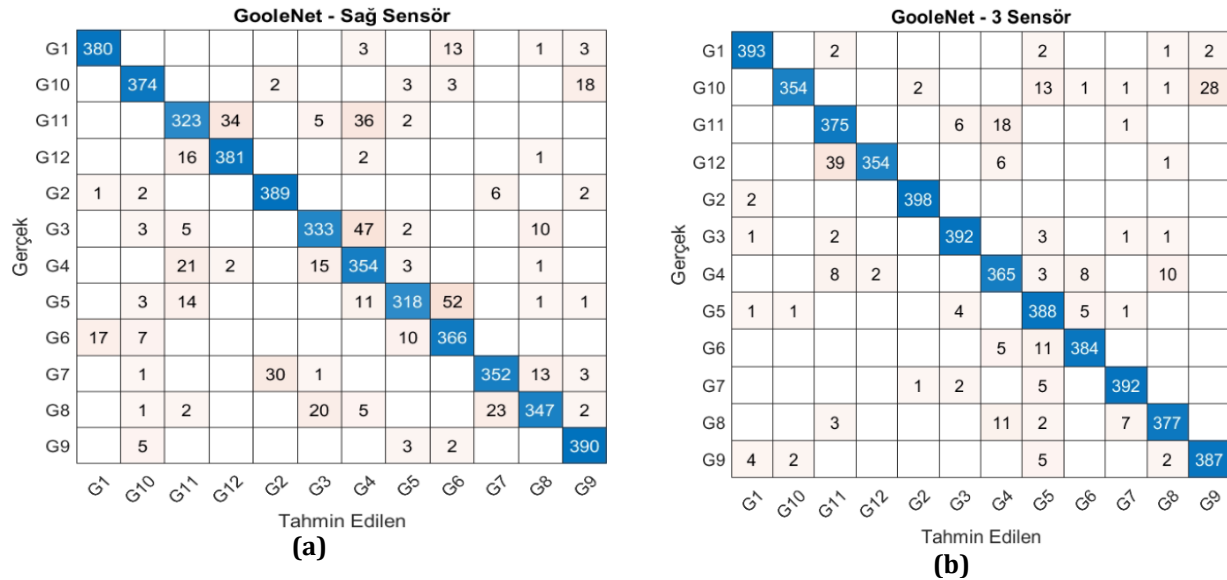
Tablo 1'de verilen sonuçlar 50:50 eğitim test oranı altında ortaya çıkan değerlerdir. Her dört modele önerilen yöntemin uygulanması diğer kanallardan yapılan sınıflandırmalara göre önemli bir iyileştirme sağlamıştır. GoogleNet modeller arasında en düşük performansa sahipken en yüksek değer DenseNet201'de ortaya çıkmıştır. Diğer kayda değer durum ise modellerin standart sapma oranlarıdır. Ortaya koyulan tanıma başarısı sadece bir denemenin değil, 5 ayrı eğitim-test süreci üzerinden olduğu için standart sapma, modellerin gürbüzlüğü için önemli bir göstergedir. 3 sensör bilgisi kullanılarak yapılan çalışmada, sapmanın diğer kanallar üzerinden yapılan sınıflandırmalara nazaran daha düşük olması diğer bir önemli bulgudur.

Tablo 2. Modellerin 25:75 eğitim ve test ayırım oranında gösterdikleri başarımlar. En iyi skor * ile gösterilmiştir. (Performances of the models at 25:75 training and test ratio. The best score is indicated by “*”.)

Sensör	Modeller							
	GooleNet		ResNet50		DenseNet201		EfficientNetB0	
	Doğruluk	F-Skor	Doğruluk	F-Skor	Doğruluk	F-Skor	Doğruluk	F-Skor
Sağ	81.20±3.99	81.33±3.94	93.19±0.36	93.21±0.37	93.24±0.14	93.25±0.15	93.48±0.14	93.49±0.14
Sol	78.97±0.96	78.83±0.76	94.98±0.42	94.96±0.46	95.38±0.32	95.33±0.30	95.71±0.23	95.72±0.23
Üst	76.03±3.96	75.58±4.17	90.18±0.51	90.19±0.53	90.35±0.59	90.36±0.59	90.49±0.22	90.50±0.22
3-Sensör*	90.08±2.06	90.11±2.08	97.14±0.25	97.12±0.26	97.55±0.27	97.55±0.22	97.65±0.21	97.66±0.22

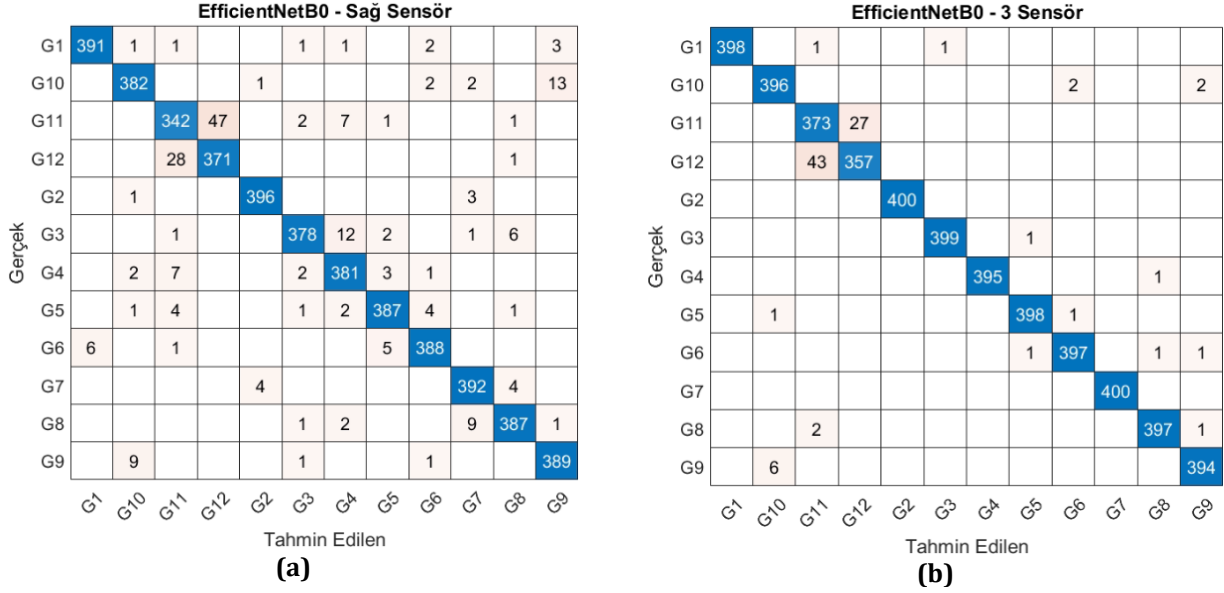
Tablo 2’de verilen değer ise 25:75 oranı çerçevesinde elde edilen başarımlardır. Eğitim verisi düştüğünde özellikle üst sensörün başarımlarında %4'lere diğer modellerde ise %2 civarında düşüşler yaşanmıştır. Özellikle GooleNet üzerinden yapılan denemelerde tüm yöntemlerde dramatik düşüşler görülmektedir. Fakat bu durum model mimarisinin kendisinden ileri gelmektedir. 3-sensör yaklaşımının diğer modeller altında elde ettiği değerler 50:50 durumuna nazaran kayıplar %0.5 civarlarındadır. Dolayısıyla, önerilen yaklaşımın düşük eğitim oranlarında bile üstün bir başarımlar sergilediği ortaya koyulmuştur.

Şekil 5 ve Şekil 6, 3-sensör yaklaşımının hangi sınıflarda iyileştirmeye katkı sağladığı görülmektedir. 50:50 oranlar için gösterilen karışım matrislerinde (confusion matrix) GooleNet ve EfficientNetB0 modelleri tercih edilmiştir. Şekil 5(a)'da GooleNet'in sağ sensörden gelen görseller üzerinden yapılan sınıflandırma başarımları görülmektedir. Model, özellikle G11-G12, G3-G4 ve G5-G6 sınıflarında karışım yaşamaktadır. 3-sensör görüntüsü kullanıldığında ilgili sınıflardaki başarımlar önemli ölçüde arttığı için doğruluk ve F-skor metriklerinde bir yükselme görülmektedir.



Şekil 5. GooleNet üzerine önerilen yöntemin ortaya çıkardığı katkı. (a) Sadece sağ sensörün kullanımı (b) Her üç sensörün kullanımı. (Contribution of the proposed method over GooleNet. (a) Use of right sensor only (b) Combination of all three sensors)

EfficientNetB0 modeline ait karışım matrisi ise Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6(a) ile Şekil 5(a) karşılaştırıldığında EfficientNetB0 mimarisinin GooleNet'e olan üstünlüğü görülmektedir. Şekil 6(b) incelendiğinde ise 3-sensör görüntü sınıflandırmanın edindiği iyileştirme gözler önüne serilmiştir. Şu not edilmelidir ki, özellikle modeller G11 ve G12 sınıflarını sınıflandırmada zorlanmaktadır. Şekil 6(b)'de neredeyse tüm sınıflarda önemli derecede bir iyileştirme söz konusu iken G11 ve G12 sınıflarında aynı oranda bir iyileştirme yakalanamamıştır.



Şekil 6. EfficientNetB0 modeli üzerinden 3 sensör yaklaşımının karışım matrisleri üzerinden değerlendirilmesi (Evaluation of 3 sensor approaches through confusion matrices over the EfficientNetB0 model)

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

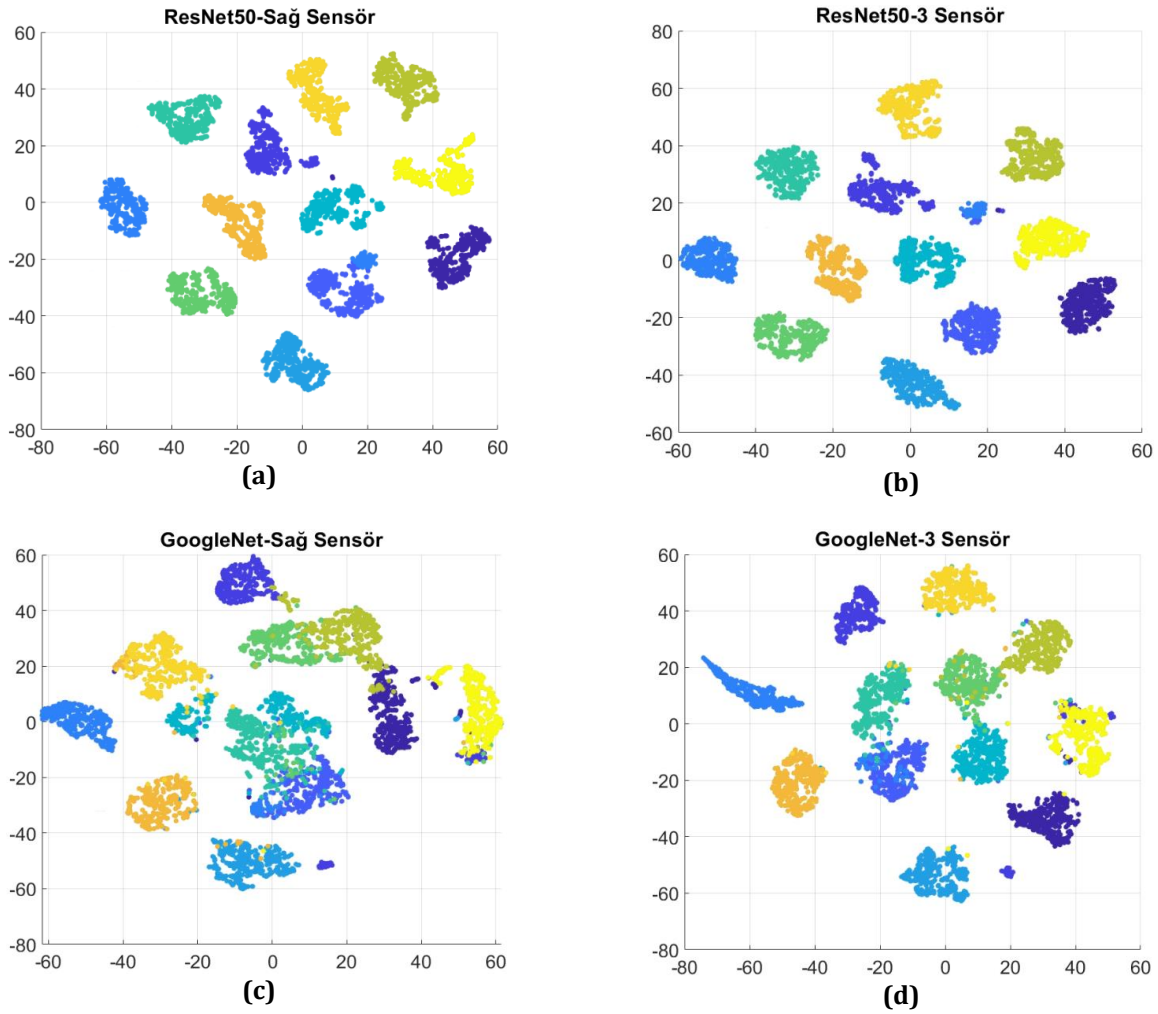
Ön-ēitilmiş modellere kanal bazlı birleştirme yöntemiyle verilen UGB radar görselleri üzerinden yüksek doğruluk oranıyla sınıflandırma yapılabildiği gösterilmiştir. Farklı sensörlerden gelen bilgiler el hareketinin tanınmasına olanak kılan örüntüyü barındırmaktadır. Sensörler tekil olarak ele alındığında belli bir başarımın üzerine çıkamazlarken bir arada kullanılması hem doğruluğu arttırmış hem de daha kararlı sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Modellerin başarımının neden arttığına dair önemli bir araştırma olarak Şekil.7 verilmiştir. CNN modellerinin amacı girdi olarak verilen görüntülerin olabildiğince sınıflar arası varyansın yüksek sınıf içi varyansın düşük olduğu bir vektör uzayına haritalandırmaktır. Sınıf skorlarının oluştuğu logit katmanından önce modellerde sıklıkla Global Ortalama Havuzlama (Global Average Pooling) katmanı bulunmaktadır. Bunun amacı, kendisine gelen $N \times M \times C$ boyutlarında tensör yapısını, kanal bazında ortalama olarak $1 \times 1 \times C$ boyutlarında bir vektöre dönüştürmektir. Bu vektör C boyutlu uzayda girdi görüntüsünü temsil etmektedir. Bu bağlamda, önerilen yaklaşımın neden daha iyi çalıştığı, eğitim verileri üzerinden elde edilen bu öznelik vektörlerinin tSNE algoritması ile görselleştirilmesi ile tartışılmıştır.

Şekil 7(a)(b) ve Şekil.7(b) ResNet50 modeli için tSNE (Van der Maaten ve Hinton, 2008) grafikleridir. tSNE algoritması, veri setinin dağılım gösterdiği uzaydaki (C uzayı) örnekler arasındaki komşuluk metriklerini koruyabilecek bir D boyutlu uzay arar. Eğer iki örnek C boyutlu uzayda uzaksa, haritalandırılmış D boyutlu uzayda da uzaktır. Eğer D 2 veya 3 seçilirse, verinin kendi dağılımını sergilediği C boyutlu uzaydaki manifoldu gözler önüne serilmiş olur. Sınıfların C boyutlu öznelik uzayında nasıl bir dağılıma sahip olduklarını gösteren bu grafikler 3 sensör verisinin kullanılmasının ne gibi bir katkı sunduğunu ön plana çıkarmaktadır. Şekil 7(b) incelendiğinde önerilen yöntem ile eğitilen modellerin sınıfları daha bütünleşik olarak bir arada tuttuğu görülmektedir.

Özellikle bu durum sarı, mor ve turuncu sınıflar için net bir şekilde görülmektedir. Şekil.7(c)(d) ise 3 sensör yaklaşımının GoogleNet'e eklediği başarımın kaynağı incelenmiştir. Yine bu model için de Şekil.7(d) incelendiğinde birleştirilmiş görüntü üzerinden oluşturulan öznelik uzayında sınıfların kendi içinde daha bir arada olduğu incelenebilmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışmada UGB sensörler üzerinden el hareketlerinin sınıflandırması yapılırken her sensörden gelen verilerin bir arada değerlendirilmesinin daha avantajlı olacağı ortaya koyulmuştur. Özellikle ön-ēitilmiş ağların sağladığı güçlü modelleme yeteneği sayesinde az sayıda eğitim adımı ile problemin üzerinden yüksek doğruluk oranlarında bir başarımın elde edileceği incelenmiştir.



Şekil 7. tSNE algoritması kullanılarak GoogleNet ve ResNet50 üzerinden elde edilen özneliklerin görselleştirilmesi (Visualization of features obtained via GoogleNet and ResNet50 using the tSNE algorithm)

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Ahmed, S., & Cho, S. H. (2020). Hand gesture recognition using an IR-UWB radar with an inception module-based classifier. *Sensors*, 20(2), 564.
- Ahmed, S., Kallu, K. D., Ahmed, S., & Cho, S. H. (2021). Hand gestures recognition using radar sensors for human-computer-interaction: A review. *Remote Sensing*, 13(3), 527.
- Ahmed, S., Wang, D., Park, J., & Cho, S. H. (2021). UWB-gestures, a public dataset of dynamic hand gestures acquired using impulse radar sensors. *Scientific Data*, 8(1), 102.
- Ahmed, S., Yoon, S., & Cho, S. H. (2024). A public dataset of dogs vital signs recorded with ultra wideband radar and reference sensors. *Scientific Data*, 11(1), 107.
- Bouaafia, S., Messaoud, S., Maraoui, A., Ammari, A. C., Khriji, L., & Machhout, M. (2021, March). Deep pre-trained models for computer vision applications: traffic sign recognition. In *2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)* (pp. 23-28). IEEE.
- Chen, H., Wang, Y., Guo, T., Xu, C., Deng, Y., Liu, Z., ... & Gao, W. (2021). Pre-trained image processing transformer. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 12299-12310).
- Ding, N., Qin, Y., Yang, G., Wei, F., Yang, Z., Su, Y., ... & Sun, M. (2023). Parameter-efficient fine-tuning of large-scale pre-trained language models. *Nature Machine Intelligence*, 5(3), 220-235.
- Han, X., Zhang, Z., Ding, N., Gu, Y., Liu, X., Huo, Y., ... & Zhu, J. (2021). Pre-trained models: Past, present and future. *AI Open*, 2, 225-250.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 770-778).
- Hendy, N., Fayek, H. M., & Al-Hourani, A. (2022). Deep Learning Approaches for Air-Writing Using Single UWB Radar. *IEEE Sensors Journal*, 22(12), 11989-12001.

- Huang, G., Liu, Z., Van Der Maaten, L., & Weinberger, K. Q. (2017). Densely connected convolutional networks. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (pp. 4700-4708).
- Jiang, S., Skibniewski, M. J., Yuan, Y., Sun, C., & Lu, Y. (2011). Ultra-wide band applications in industry: a critical review. *Journal of Civil Engineering and Management*, 17(3), 437-444.
- Kingma, D. P., & Ba, J. (2014). Adam: A method for stochastic optimization. arXiv preprint arXiv:1412.6980.
- Koziel, S., Çalık, N., Mahouti, P., & Belen, M. A. (2022). Reliable computationally efficient behavioral modeling of microwave passives using deep learning surrogates in confined domains. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 71(3), 956-968.
- Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 25.
- Lai, D.K., Zha, L., Leung, T.Y., Tam, A.Y., So, B.P., Lim, H., Cheung, D.S., Wong, D.W., & Cheung, J.S. (2023). Dual ultra-wideband (UWB) radar-based sleep posture recognition system: Towards ubiquitous sleep monitoring. *Engineered Regeneration*.
- Mahouti, P., Belen, M. A., Çalık, N., & Koziel, S. (2022). Computationally efficient surrogate-assisted design of pyramidal-shaped 3-D reflectarray antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(11), 10777-10786.
- Mekruksavanich, S., Jantawong, P., Tanchaen, D., & Jitpattanakul, A. (2023, June). A Convolutional Neural Network for Ultra-Wideband Radar-Based Hand Gesture Recognition. In *2023 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers, and Communications (ITC-CSCC)* (pp. 1-4). IEEE.
- Park, G., Chandrasegar, V. K., & Koh, J. (2023). Accuracy Enhancement of Hand Gesture Recognition Using CNN. *IEEE Access*, 11, 26496-26501.
- Qiu, X., Sun, T., Xu, Y., Shao, Y., Dai, N., & Huang, X. (2020). Pre-trained models for natural language processing: A survey. *Science China Technological Sciences*, 63(10), 1872-1897.
- Simonyan, K., & Zisserman, A. (2014). Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. arXiv preprint arXiv:1409.1556.
- Skaria, S., Al-Hourani, A., & Evans, R.J. (2020). Deep-Learning Methods for Hand-Gesture Recognition Using Ultra-Wideband Radar. *IEEE Access*, 8, 203580-203590.
- Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., ... & Rabinovich, A. (2015). Going deeper with convolutions. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 1-9).
- Tan, M., & Le, Q. (2019, May). Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In *International conference on machine learning* (pp. 6105-6114). PMLR.
- Van der Maaten, L., & Hinton, G. (2008). Visualizing data using t-SNE. *Journal of machine learning research*, 9(11).
- Yuan, L., Chen, D., Chen, Y. L., Codella, N., Dai, X., Gao, J., ... & Zhang, P. (2021). Florence: A new foundation model for computer vision. arXiv preprint arXiv:2111.11432.



ANTALYA BÖLGESİNDEKİ KONAKLAMA TESİSLERİNDE DOĞRUDAN SU KULLANIMININ İNCELENMESİ

Handan ŞAHİN^{1,2}, Bülent TOPKAYA³, Gökhan CİVELEKOĞLU^{2,3*}

¹ Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya, Türkiye

² Novotech Çevre Teknolojileri Ar-Ge ve Danışmanlık Ltd. Şti., Antalya Teknokent, Antalya, Türkiye

³ Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Sürdürülebilir Su Yönetimi,
Turizm,
Doğrudan Su Tüketimi,
Antalya.*

Öz

Bu çalışmada Türkiye'nin turizm sektöründe çok önemli yere sahip olan Antalya'da sektörün doğrudan su tüketimi, belirlenen turizm tesislerinde incelenmiştir. Doğrudan su tüketimine çamaşırhane, mutfak, odalar, genel mekanlar ve sulama suyu vb. alanlardaki faaliyetler neden olmaktadır. Bu çalışmada, tesis tipine bağlı olarak doğrudan su tüketimi farklılıkları tespit edilmiştir. Bu kapsamda Antalya'da farklı ilçelerde bulunan, 2 tane 5 yıldızlı tatil köyü, 8 tane 5 yıldızlı otel, 8 tane 4 yıldızlı otel, 1 tane müstakil apart otel ve 1 tane apart otel olmak üzere toplam 20 tane konaklama tesisinde aylara göre doğrudan su tüketimi verileri temin edilerek, geceleme başına su tüketimi hesaplamaları yapılmıştır. Doğrudan su tüketiminin değerlendirilmesi amacıyla, 5 yıldızlı bir konaklama tesisinde, portatif ultrasonik debimetre ile 3 gün boyunca 15 dakika arayla debi ölçümü gerçekleştirilmiştir. Tesis doğrudan tüketimi bölümlere göre ölçülmekte olup, birimlere göre dağılımı ayrıca değerlendirilmiştir. Doğrudan su tüketiminin farklı tip tesislerde 103-1209 L/geceleme arasında değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir.

INVESTIGATION OF DIRECT WATER USE IN TOURISTIC FACILITIES IN ANTALYA REGION

Keywords

*Sustainable Water
Management,
Tourism,
Direct Water Consumption,
Antalya.*

Abstract

This study examines the direct water consumption in the tourism facilities of Antalya, which holds a crucial position in Turkey's tourism sector. Direct water consumption is determined by activities in areas such as laundry, kitchen, rooms, common areas, and irrigation water. The main objective of this work is to identify variations in direct water consumption based on the type of facility. For this purpose, water consumption calculations per overnight stay were performed based on data collected from a total of 20 accommodation facilities located in different districts in Antalya, including two 5-star resorts, eight 5-star hotels, eight 4-star hotels, one independent apartment hotel, and one regular apartment hotel. To assess direct water consumption, flow measurements were conducted over three days with a 15-minute interval using a portable ultrasonic flowmeter in a 5-star accommodation facility. The direct consumption of water was measured based on sections within the facility and the distribution of direct water consumption by sections was also evaluated. We concluded that direct water consumption varies between 103 - 1209 L per overnight stay in different type of facilities.

Alıntı / Cite

Şahin, H., Topkaya, B., Civelekoğlu, G. (2024). Antalya Bölgesindeki Konaklama Tesislerinde Doğrudan Su Kullanımının İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(1), 217-229.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H. Şahin, 0000-0002-4634-7902
B. Topkaya, 0000-0003-3082-7415
G. Civelekoğlu, 0000-0001-5508-1918

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	17.02.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	01.03.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	05.03.2024
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: gcivelekoglu@akdeniz.edu.tr, +90 242 310 6316

INVESTIGATION OF DIRECT WATER USE IN TOURISTIC FACILITIES IN ANTALYA REGION

Handan ŞAHİN^{1,2}, Bülent TOPKAYA³, Gökhan CİVELEKOĞLU^{2,3†}

¹ Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya, Türkiye

² Noventech Çevre Teknolojileri Ar-Ge ve Danışmanlık Ltd. Şti., Antalya Teknokent, Antalya, Türkiye

³ Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye

Highlights (At least 3 and maximum 4 sentences)

- Water consumption in accommodation facilities was evaluated based on both data and measurement.
- Differences in water consumption per night were determined to type of accommodation facility.
- It has been determined that irrigation water use has the largest share in accommodation facilities.

Purpose and Scope

The main objective of this work is to determine the direct water consumption per overnight stay and the share of water usage areas based on the type of facility in tourism accommodation facilities in total water consumption.

Design/methodology/approach

The characteristics of, water consumption data, and the number of overnight stays were obtained from accommodation facilities to calculate the monthly variation in water consumption per overnight stay. Measurements with ultrasonic flowmeters were conducted on water pipes leading to different sections within a designated facility.

Findings

The differences in water consumption per overnight stay have been identified based on the type of facility, and it has been observed that these values do not show significant seasonal variations. In tourism accommodation facilities, the largest shares in water consumption are found to be water use in irrigation and rooms, followed by kitchen water usage.

Originality

No comprehensive study has been identified to evaluate the direct water consumption of tourism facilities in Turkey and Antalya. Through this study, differences of direct water consumption in accommodation facilities in Antalya, where tourism activities are intense, were determined according to the type of facility, season and areas of water usage in the facilities.

[†] Corresponding author: gcivelekoglu@akdeniz.edu.tr, +90-242-310-6316

1. Giriş (Introduction)

Antalya iklim koşulları, arkeolojik zenginlikleri ile Türkiye'nin turizm sektöründe faaliyet gösteren en önemli illerinden birisidir. Kültür ve Turizm Bakanlığı belgeli konaklama tesisleri 2021 yılı verilerine göre Türkiye genelinde 4801 tesis bulunmakta olup yatak kapasitesi yaklaşık 1 milyondur. Antalya'da yer alan bakanlık belgeli konaklama tesislerinin 2021 yılı yatak kapasitesi 477.476 ile Türkiye genelinin yaklaşık % 45'ini oluşturmaktadır. (Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2024a). Özellikle yağışın çok düşük olduğu yaz aylarında, turizm faaliyetlerine bağlı olarak Antalya'nın nüfusu yaklaşık olarak iki katına çıkmaktadır. Bu da su kaynaklarına olan baskının artmasına neden olmaktadır.

Kültür ve Turizm Bakanlığı, (2024) verilerine göre Türkiye ve Antalya'da yer alan tesislere gelen yerli ve yabancı turist sayısının 2015 ile 2022 yılları arasındaki değişimi Tablo 1'de verilmiştir. Son 5 yılın verileri değerlendirildiğinde, Antalya'daki konaklama tesislerine gelen toplam turist sayısı ortalaması Türkiye ortalamasının % 34'ünü oluşturmaktadır. 2022 yılında Antalya'daki konaklama tesislerine gelen yabancı turist sayısının 19 milyonu aştığı, bunun da Türkiye genelinde yer alan konaklama tesislerine gelen toplam yabancı turist sayısının yaklaşık % 52'sini oluşturduğu görülmektedir (Tablo 1).

Tablo 1. Tesislere gelen turist sayısının yıllara göre değişimi (The annual variation of incoming tourists) (Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2024b)

Yıl	Tesis Geliş Sayısı					
	Yabancı		Yerli		Toplam	
	Türkiye	Antalya	Türkiye	Antalya	Türkiye	Antalya
2015	23.138.428	11.257.311	20.221.542	3.256.199	43.359.970	14.513.510
2016	14.269.381	6.440.920	22.676.261	4.887.490	36.945.642	11.328.410
2017	18.868.600	10.039.062	24.178.981	3.813.811	43.047.581	13.852.873
2018	25.042.076	12.960.549	25.302.742	3.655.224	50.344.818	16.615.773
2019	30.934.386	16.077.147	25.179.991	3.060.162	56.114.377	19.137.309
2020	10.346.727	5.835.903	16.836.683	2.460.169	27.183.410	8.296.072
2021	22.530.341	12.989.618	24.750.798	3.669.437	47.281.139	16.659.055
2022	36.929.375	19.147.515	30.849.458	3.939.694	67.778.833	23.087.209

Kültür ve Turizm Bakanlığı, (2024) verilerine göre Türkiye ve Antalya'da yer alan tesislere gelen yerli ve yabancı turistlerin geceleme sayılarının 2015 ile 2022 yılları arasındaki değişimi Tablo 2'de verilmiştir. 2022 yılı verilerine Antalya'daki konaklama tesisleri toplam geceleme sayısı yaklaşık 86 milyon ile Türkiye ortalamasının % 48'ini oluşturmaktadır.

Tablo 2. Konaklama tesisleri geceleme sayısının yıllara göre değişimi (The annual variation of overnight stays in accommodation facilities)(Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2024b)

Yıl	Geceleme Sayısı					
	Yabancı		Yerli		Toplam	
	Türkiye	Antalya	Türkiye	Antalya	Türkiye	Antalya
2015	96.400.316	61.418.288	37.480.990	9.108.898	133.881.306	70.527.186
2016	65.793.316	41.621.666	46.752.171	14.978.938	112.545.487	56.600.604
2017	68.921.870	44.922.472	47.305.826	11.174.350	116.227.696	56.096.822
2018	95.109.378	62.928.381	49.305.889	10.760.725	144.415.267	73.689.106
2019	112.178.562	73.772.317	46.970.422	8.624.957	159.148.984	82.397.274
2020	33.287.905	21.540.134	31.541.279	6.333.719	64.829.184	27.873.853
2021	75.521.703	50.537.706	48.133.008	10.066.394	123.654.711	60.604.100
2022	121.855.425	75.667.328	59.214.164	10.603.223	181.069.589	86.270.551

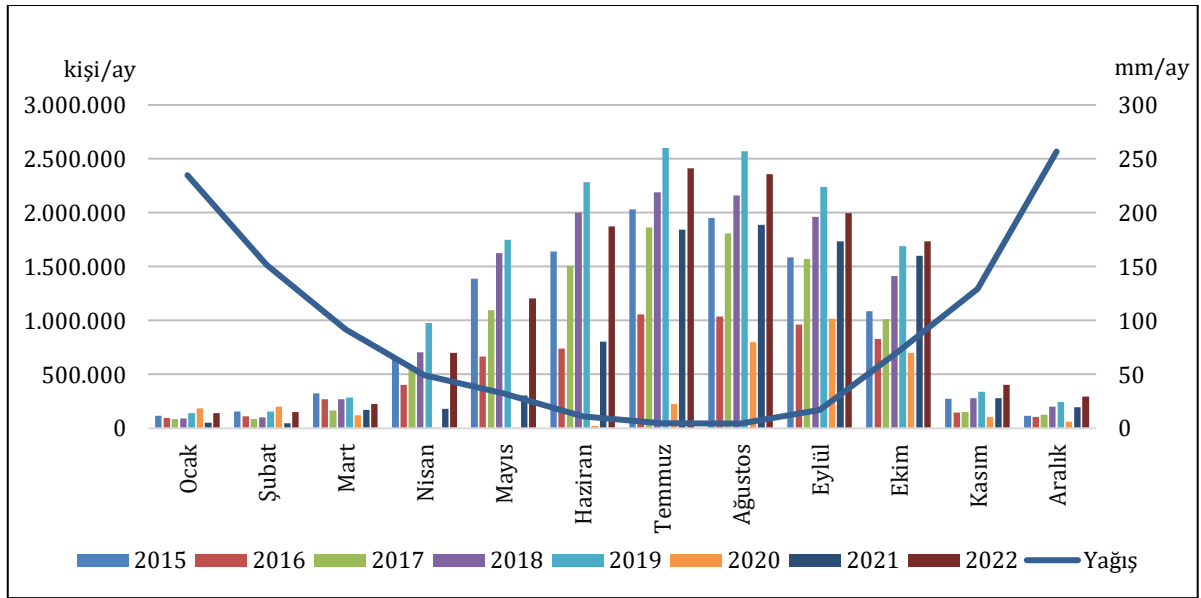
Kültür ve Turizm Bakanlığı (2024) verilerine göre, Antalya'da bakanlık belgeli turizm tesisleri ve yatak kapasitesinin yılları göre değişimi Tablo 3'de verilmiştir. Antalya'da bulunan bakanlık belgeli tesislerin yatak kapasitesi, Türkiye geneli yatak kapasitesinin yaklaşık % 45'ini oluşturmaktadır.

Tablo 3. Antalya’da bulunan bakanlık belgeli tesislerin ve yatak kapasitelerinin sayısı ve Türkiye’ye göre durumu (The number and status of ministry-certified facilities and bed capacities in Antalya compared to the rest of Turkey) (Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2024a)

Yıl	Tesis	Oda	Yatak	Türkiye'deki Toplam Yatak Sayısına Oranı (%)
2015	734	186.245	402.153	47,3
2016	755	193.506	418.395	46,5
2017	779	202.175	435.734	46,6
2018	791	209.792	451.950	46,4
2019	800	213.305	459.569	46,3
2020	875	221.780	477.476	46,8
2021	875	221.780	477.476	44,8

Turizm yoğunluğunun yüksek olduğu Antalya, yazları sıcak ve kurak, kışları ılık ve yağışlı olarak ifade edilen iklim tipi olan Akdeniz iklimi özelliklerini taşımaktadır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2024) verilerine göre, Antalya’da uzun yıllar iklim verileri değerlendirildiğinde, kış aylarında yağış miktarının yüksek olmasına rağmen, yaz aylarında oldukça düşük olduğu görülmektedir (Şekil 1).

Türkiye İstatistik Kurumu adrese dayalı nüfus verilerine göre 2022 Antalya nüfusu 2.688.004’tür. (Türkiye İstatistik Kurumu, 2024a). Aylara göre yerli ve yabancı turist sayısındaki artışa bakıldığında, bu değer yaz aylarında yaklaşık iki katına çıkmaktadır. Antalya iklim diyagramında verilen değerler göz önüne alındığında, yaz aylarında yağışın düşük olması ve turizm yoğunluğunun artması, su kaynaklarındaki baskının artmasına sebep olmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Antalya gelen turist sayısının ve yağışın aylara göre değişimi (The monthly variation of incoming tourists and precipitation in Antalya) (Türkiye İstatistik Kurumu, 2024b) (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2024)

Bu çalışmada Antalya Bölgesindeki turizm sektörünün su tüketiminin belirlenmesi amaçlanmıştır. Su tüketimine neden olan faaliyetler incelendiğinde doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki ana gruba ayırmak mümkündür. Doğrudan su tüketimi tesislerde bulunan havuzlar, mutfak, çamaşırhane, odalar ve sulama amaçlı gerçekleşirken dolaylı su tüketimi; yiyecek-icecek gibi tüketim malzemeleri, bunların tesislere gelişi, oluşan atıklar ve bunların tesisten gidişi, ziyaretçilerin ve çalışanların ulaşımı vb. faaliyetlerden oluşmaktadır. Bu çalışma kapsamında doğrudan su tüketimi incelenmiştir. Doğrudan su tüketiminin tesis tipine göre farklılıklarının belirlenmesi amacıyla 5 farklı tipteki 20 adet konaklama tesisinin yıl boyunca aylara göre su tüketim verileri değerlendirilmiştir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Gössling (2001) Tanzanya'nın Zanzibar adasının doğu kıyısında turizm faaliyetlerine bağlı su tüketimini değerlendirmiştir. Bu çalışmada yüksek sezonda, otellerde kişi başı günlük su tüketimi ortalama 931 L/kişi iken az yataklı pansiyon tarzı turizm tesislerinde bu değer ortalama 248 L/kişi olduğu belirtilmiştir. Bazı turistik

tesislerde kontrolsüz yeraltı suyu çekildiği, bunların mutlak surette izlenerek aylık ücrete tabii tutulması gerektiği önerilmiştir.

Warnken vd. (2005) Avustralya, Queensland'da 3 temel turizm alanında çeşitli tesislerde kişi başı enerji ve su tüketimi değerlerini karşılaştırmıştır. Yapılan değerlendirmelere göre ölçüm yapılabilen 10 otelde kişi başı günlük su tüketimi 390 – 1410 L arasında tespit edilmiştir.

Rico-Amoros vd. (2009) tarafından yapılan ve İspanya'da yer alan Benidorm turizm merkezi ve Alicante sahili örnek olarak ele alındığı bir çalışmada yüksek yoğunluklu turizm merkezlerindeki kaynak tüketiminin, düşük yoğunluklu yayılı turizm alanlarına göre daha az olduğu belirtilmiştir. Tesis tipine göre turist günlük su tüketiminin 140 – 600 L/kişi aralığında değiştiği hesaplanmıştır. Su tüketiminin kamp alanları ve otellerde daha düşükken, apart evler ve tatil köylerinde oldukça yüksek olduğu belirtilmiştir. Yaygınlaşan golf otelleri, tatil evleri, apart daireler, özel havuzlu ve bahçeli evlerin sadece su tüketimi açısından değil aynı zamanda su ihtiyacını karşılamak için gerekli olan hizmetin götürülmesi için de ekonomik olmadığı rapor edilmiştir.

Hof ve Schmitt (2011) tarafından Mallorca Adasında yapılan çalışmada, kitlesele turizm ve lüks turizm ile sabit nüfusun bulunduğu bölgeler belirlenerek 6 farklı çalışma alanı seçilmiş ve bu bölgelerde kişi başı su tüketimi hesaplanmıştır. Bahçe, havuz, arazi kullanımı gibi kriterler belirlenerek, havuz kullanımı, bahçe sulamasına bağlı su tüketimi ile toplam kişi başı su tüketimi verileri hesaplanmıştır. Buna göre örneğin kitle turizminin yoğun olduğu bölgelerde bahçe sulaması ve havuz kullanımı da dahil kişi başı su tüketimi 210 L/kişi-gün olarak hesaplanırken, lüks turizm alanı olarak nitelenen yazlık tipinin yoğun olduğu bölgelerde bu değer 1181 L/kişi-gün olarak hesaplanmıştır.

Tortella ve Tirado (2011) tarafından yapılan çalışmada, İspanya, Mallorca'da bulunan 196 otel, bölge ve yıldız sayısına göre iki ayrı kategoride değerlendirilmiştir. Yapılan hesaplamalara göre kişi başı günlük su tüketiminin 156 L –2425 L arasında değiştiği ortalama tüketimin ise 541 L/kişi-gün olduğu belirtilmiştir. 3 yıldızlı otellerde ortalama su tüketimi 541 L/kişi-gün iken 4 ve 5 yıldızlı otellerde bu değer sırasıyla 548 L/kişi-gün ve 701 L/kişi-gün olduğu rapor edilmiştir.

Yang vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada, Çin'de Yunnan'ın kuzeybatısında yer alan 316 km² genişliğindeki Liming Vadisi'nde turizmin su tüketimi değerlendirilmiştir. Doğrudan su tüketimi kişi başı ortalama 144,1 L/gün olarak hesaplanmış, bunun en büyük kısmını % 28,3 ile duş/banyoda su kullanımının oluşturduğu belirtilmiştir. Tuvaletlerde su tüketimi % 20,3 ile ikinci sırada yer alırken mutfak ve çamaşırhanenin % 18,9 ile üçüncü sırada yer aldığı belirtilmiştir. Lavabolarda su tüketiminin toplam içindeki payı % 9,8 olarak belirtilirken, içme suyunun % 1,2 ve oda temizliği, araç yıkama, sulama faaliyetleri için % 2,2 su talebi olduğu görülmüştür.

Gössling vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada, turizmde doğrudan ve dolaylı su kullanımı incelenmiştir. Turizmin doğrudan su kullanımının küresel ölçekte kullanılan toplam suyun yaklaşık % 1'ini oluşturduğu bu sebeple yeterli derecede önemli görülmediği, ancak dolaylı su kullanımının doğrudan su kullanımından daha fazla olduğu vurgulanmıştır. Dolaylı su tüketiminin de dahil edilerek değerlendirme yapılması sonucu su tüketiminin 2000 -7500 L/kişi-gün arasında değişiklik gösterdiği ortaya çıkmıştır. Çalışmada gıda ve yakıt tüketiminden kaynaklı su ayak izinin oldukça yüksek miktarlarda olduğu belirtilmiştir.

Becken (2014), 21 ülkede turizmde günlük kişi başı su tüketimi verilerini değerlendirilmiştir. İspanya'da kamp tatil tipinde en düşük 84 L/kişi-gün olan su tüketiminin Filipinler'de otelde konaklamalı tatil tipine göre 1802 L/kişi-gün'e kadar geniş bir aralıkta değişim gösterdiği belirtilmiştir. Bu durumun tesis tipine, havuz, mutfak ve su tasarruf yöntemlerine ve özellikle iklim koşullarına göre farklılık gösterdiği belirtilmiştir. Avrupa ülkelerinde tipik olarak yaklaşık 200 L/kişi-gün efektif su kullanımı olduğu, fakat Asya ülkelerinde bu değer 900 L/kişi-gün'ü bulduğu ifade edilmiştir. Turizmin günlük kişi başı su tüketiminin yerel halkın günlük kişi başı su tüketimine göre 3 ila 8 kat daha fazla olduğu hesaplanmıştır. Çalışmada ülkelerde turizmde su kullanımının daha verimli olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

Styles vd. (2015), turizm işletmelerinde kullanılan su yönetimi uygulamalarını karşılaştırılarak en iyi performansın alındığı kriterleri belirlemiş ve en iyi metoda göre toplam su tüketimini her şey dahil otellerde ≤140 L/kişi-gün, pansiyonlarda ≤100 L/kişi-gün, her şey dahil 4 ve 5 yıldızlı kamp alanlarında ≤94 L/kişi-gün, diğer kamp alanlarında ise ≤58 L/kişi-gün olduğunu hesaplamıştır. Çalışmada otel ve kamp alanında sırasıyla en az 228 L/kişi-gün ve 127 L/kişi-gün su tasarrufu sağlanabileceği ve bu değer tüm Avrupa'da toplamda 422 milyon m³ su tasarrufuna imkan vereceği vurgulanmıştır.

Rico vd. (2020) İspanya Benidorm'da yer alan 2 tane 5 yıldızlı, 9 tane 4 yıldızlı ve 11 tane 3 yıldızlı olmak üzere 22 otelin 2005-2014 yılları arasındaki su tüketim verilerindeki değişimi değerlendirmiştir. Ortalama su tüketiminin, 3 yıldızlı oteller için kişi başına 225 L/gün, 4 ve 5 yıldızlı oteller için kişi başına 276 L/gün olarak hesaplanmıştır.

Yoon vd. (2022) tarafından İspanya Benidorm'da yapılan bir çalışmada otellerde su ve enerji tüketimini değerlendirmek amacıyla anket ve görüşmeler ile veriler temin edilmiştir. Çalışma sonucunda geceleme başı ortalama su tüketiminin 3 yıldızlı oteller için 225,4 L, 4 yıldızlı oteller için 205,2 L olduğu tespit edilmiştir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde, turizm konaklama tesislerindeki su tüketiminin geniş aralıkta salındığı ve birçok faktöre bağlı olduğu görülmektedir. Sektörel su yönetimi planlarının oluşturulması için daha çok veriye ihtiyaç bulunmaktadır. Ülkemizde turizm sektörüne yönelik su temini ve kullanımı ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu nedenle çalışma kapsamında konaklama tesislerinin su tüketimi hem veri hem de ölçüm bazlı değerlendirilmiştir. Bu çalışma ile turizm faaliyetlerinin yoğun olarak gerçekleştiği Antalya'da yer alan konaklama tesislerinde doğrudan su tüketiminin tesis tipine, sezona ve tesislerde suyun kullanım alanlarına göre farklılıklarının tespit edilerek literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Doğrudan su tüketimi; mutfak, çamaşırhane, duş ve tuvalet kullanımı vb. alanları belirtmektedir. Yapılan çalışmada, tesis tipine bağlı olarak doğrudan su tüketimi farklılıkları tespit edilmiştir. Bu kapsamda Antalya'da farklı ilçelerde bulunan, 2 tane 5 yıldızlı tatil köyü, 8 tane 5 yıldızlı otel, 8 tane 4 yıldızlı otel, 1 tane müstakil apart otel ve 1 tane apart otel olmak üzere toplam 20 tane konaklama tesisinde aylara göre doğrudan su tüketimi verileri tesislerden temin edilmiştir. Toplam su tüketimi değerleri, geceleme sayısına bölünerek, geceleme başına su tüketimi hesaplamaları yapılmıştır.

Doğrudan su tüketiminin değerlendirilmesi amacıyla, Antalya Kundu Bölgesi'nde bulunan 5 yıldızlı bir konaklama tesisinde, TFM1100-P modeli portatif ultrasonik debimetre (Şekil 2) kullanılarak 3 gün boyunca 15 dakika arayla debi ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçümlere ait fotoğraflar Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 2. TFM1100-P modeli portatif ultrasonik debimetre (TFM1100-P model portable ultrasonic flowmeter)



Şekil 3. Ölçümlere ait fotoğraflar (The photographs of the measurements)

Tesiste mevcut ekipman ile 3 ayrı boru üzerinde ölçüm yapılmış olup bunlar; çamaşırhane ve mutfak bölümlerine giden ortak su borusu, odalara giden sıcak ve soğuk su borularıdır. Boru dağılımının gerçekleştiği kazan dairesinde çamaşırhane ve mutfak su borusu ortak olup, bölüm girişlerinde su boruları ayrılmakta ve tesis bünyesinde ayrıca

ölçümler yapılmaktadır. Bu bölümde çamaşırhane ve mutfak su tüketimi birlikte değerlendirilmiştir. Odalara giden sıcak ve soğuk su boruları üzerinde ayrı ayrı eş zamanlı ölçüm yapılmış olup odalardaki toplam su tüketimi olarak tanımlanmıştır. Tesis bünyesinde gün ve ay bazında su tüketimi bölümlere göre ölçülmekte olup, bu veriler otelden temin edilmiş, doğrudan su tüketiminin bölümlere göre dağılımı ayrıca değerlendirilmiştir.

4. Bulgular (Findings)

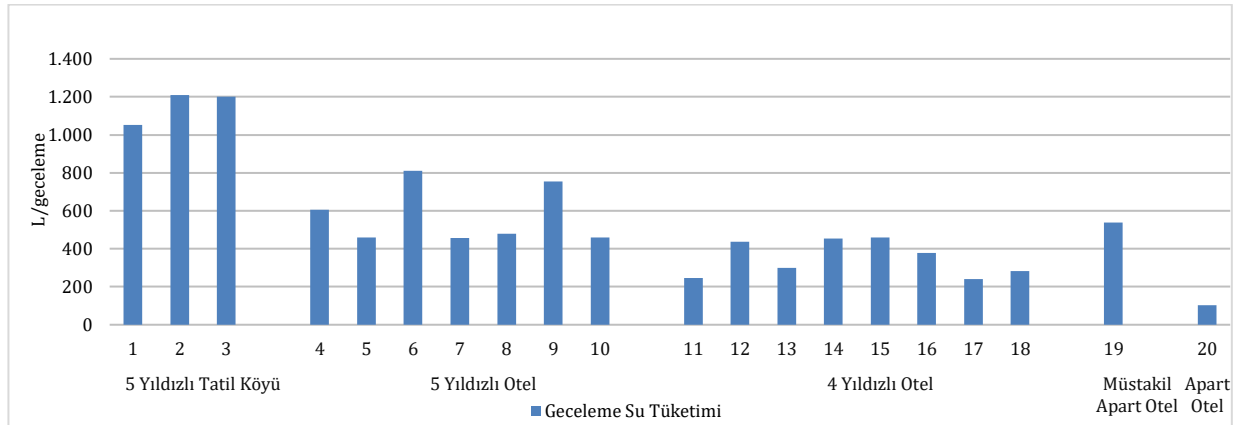
4.1. Farklı Tip Konaklama Tesislerinde Veri Bazlı Doğrudan Su Tüketimi (Direct Water Consumption According To Collected Data In Different Type Of Accommodation Facilities)

Çalışmaya esas olan 20 farklı turizm konaklama tesisine ait tesis tipi ve kapasite bilgileri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Tesis tipi ve kapasiteleri (Facility type and capacities)

No	Mevkii	Tesis tipi	Yatak Havuz	
			adet	
Otel 1	Kemer	5 Yıldızlı Tatil Köyü	1034	2
Otel 2	Manavgat		1184	4
Otel 3	Alanya		1138	9
Otel 4	Kundu	5 Yıldızlı Otel	785	8
Otel 5	Manavgat		800	4
Otel 6	Kemer		330	2
Otel 7	Kemer		508	2
Otel 8	Kemer		1090	2
Otel 9	Kemer		478	3
Otel 10	Antalya		388	2
Otel 11	Alanya		336	2
Otel 12	Kundu		544	2
Otel 13	Alanya		412	2
Otel 14	Manavgat	4 Yıldızlı Otel	498	2
Otel 15	Manavgat		288	3
Otel 16	Alanya		450	4
Otel 17	Alanya		144	1
Otel 18	Kemer		196	1
Otel 19	Alanya		Müstakil Apart Otel	346
Otel 20	Antalya	Apart Otel	164	-

Doğrudan su tüketimi, tesislerde aylara göre doğrudan toplam su tüketiminin geceleme sayılarına bölünmesi ile elde edilmiştir (Şekil 4). 5 farklı tip tesisin bulunduğu 20 tane otel için yapılan hesaplamalar değerlendirildiğinde, otel başına hesaplanan geceleme başı doğrudan su tüketiminin yıl ortalamasının 103 L ile 1209 L arasında değişiklik gösterdiği görülmektedir.

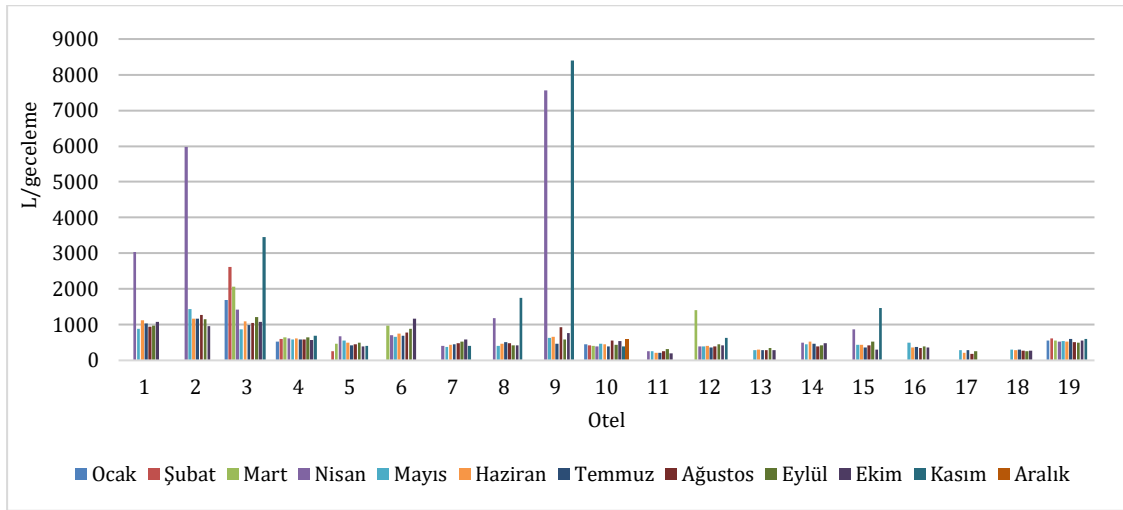


Şekil 4. Geceleme başı su tüketiminin tesislere göre değişimi (Variation of water consumption per night in facilities)

Alanya'da bulunan Otel 3 olarak adlandırılan konaklama tesisi, tesis tipi işletme belgesinde 5 yıldızlı otel olarak belirtilmiştir. Ancak kapasitesi ve doğrudan su tüketim değerleri 5 yıldızlı tatil köyü su tüketim değerleri ile benzerlik göstermektedir. Otel 1, Otel 2 ve Otel 3 için, yıl ortalaması geceleme başı doğrudan su tüketim değerleri sırasıyla 1052 L, 1209 L ve 1202 L olarak bulunmuştur. Otel 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 olarak adlandırılan 5 yıldızlı konaklama tesislerinde, yıl ortalaması geceleme başı doğrudan su tüketiminin ise 458 L ile 810 L arasında değiştiği

gözlenmiştir. Çalışma kapsamında incelenen 4 yıldızlı otellerde, yıl ortalaması geceleme başı doğrudan su tüketim değerleri ise, 240 L ile 459 L arasında değişmektedir. Alanya'da bulunan Otel 19 müstakil apart otelde yıl ortalaması geceleme başına doğrudan su tüketimi 539 L olarak hesaplanırken, Antalya merkezde bulunan Otel 20 apart otelde bu değer 103 L olarak tespit edilmiştir.

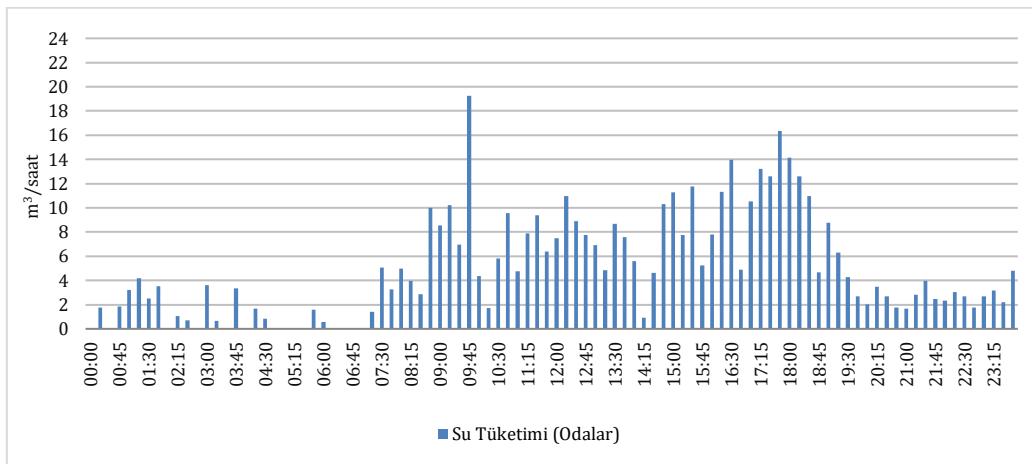
Turizm sezonunun düşük olduğu kış sezonunda bazı oteller faaliyet göstermediğinden 12 aylık su tüketim verileri bulunmamaktadır. Tesislerin faaliyet gösterdiği aylara ait geceleme başı su tüketim değerleri Şekil 5'de verilmiştir. Otel 1, 2, 6, 8, 9, 12, 15 ve 16'nın açılış ve kapanış dönemlerinde geceleme başı doğrudan su tüketimi değerlerinin diğer aylara göre oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu aylarda su tüketimindeki artışın otellerin havuz doldurma, boşaltma ve geri yıkama işlemlerinin genelde kış aylarında yapılmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Tesisler ile görüşülerek bu bilgi teyit edilmiştir. Yıl ortalaması geceleme başı doğrudan su tüketimi hesabı yapılırken bu değerler de toplam içerisinde değerlendirilmiştir. Otel 20 olarak belirtilen apart otelin geceleme başı su tüketimi aylara göre 86 L –115 L arasında değişiklik göstermekte olup ortalama 103 L'dir ve diğer otellere göre karşılaştırılabilir olmadığından Şekil 5'de gösterilmemiştir.



Şekil 5. Geceleme başı su tüketimlerinin tesislere ve aylara göre değişimi (Variation of water consumption per night by facilities and months)

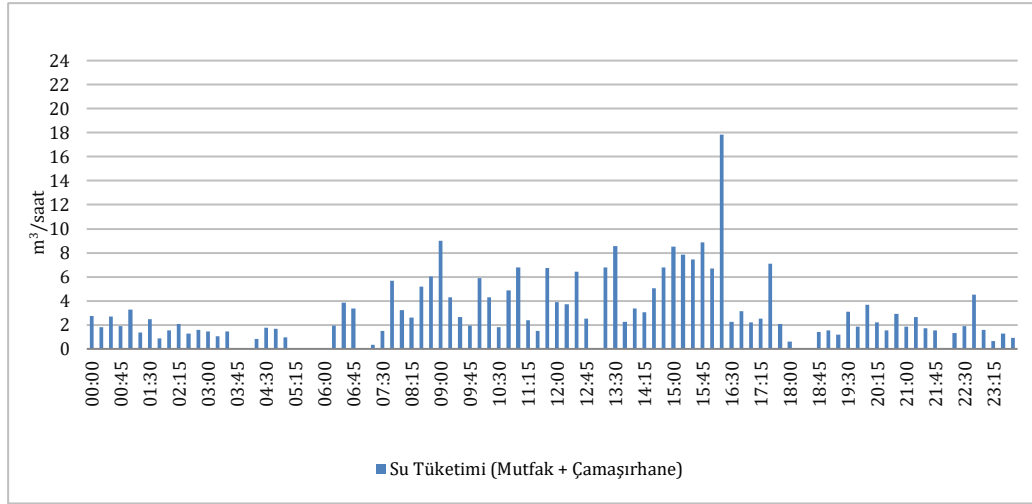
4.2. Ölçüm Bazlı Doğrudan Su Tüketimi (Measured Direct Water consumption)

Antalya Kundu bölgesinde yer alan Otel 4 için portatif ultrasonik debimetre yardımıyla doğrudan su tüketimi ölçümleri yapılmıştır. Çalışma, yılbaşı programı sebebiyle otelin doluluk oranının yüksek olduğu 3 gün boyunca gerçekleştirilmiştir. Odalara giden su boruları-sıcak ve soğuk su boruları olmak üzere ikiye ayrılmakta olup, ölçümler bu su boruları üzerinde yapıp, odalardaki toplam su tüketimi olarak ifade edilmiştir. Çamaşırhane ve mutfak bölümlerine giden su borusu ortak olup, bölüm girişlerinde ayrılmaktadır. Çalışmada mutfak ve çamaşırhane ortak su borusu üzerinde ölçüm yapılmış ve birlikte değerlendirilmiştir. Ölçüm sonuçları Şekil 6 ve Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 6. Odalardaki su tüketimi (1 Ocak) (Water consumption in rooms, 1 January)

Odalarda su tüketimi 08:00–10:00 ile 17:00–18:30 arasında artış göstermektedir. 1 Ocak tarihinde geceleme sayısı 31 Aralık tarihine göre yaklaşık 2 kat artmıştır. Su tüketimi de paralel olarak artmıştır. Bu nedenle 1 Ocak tarihinde yapılan ölçümler esas alınmıştır. Bu tarihte çamaşırhane ve mutfak toplam su tüketiminin gece saatlerinde, diğer günlere göre daha yoğun olduğu görülmektedir. Yılbaşı programına bağlı olarak mutfakta su tüketiminde artış olduğu sonucuna varılmıştır. Genel olarak, ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde, su tüketimi günlere göre benzerlik arz etmektedir.



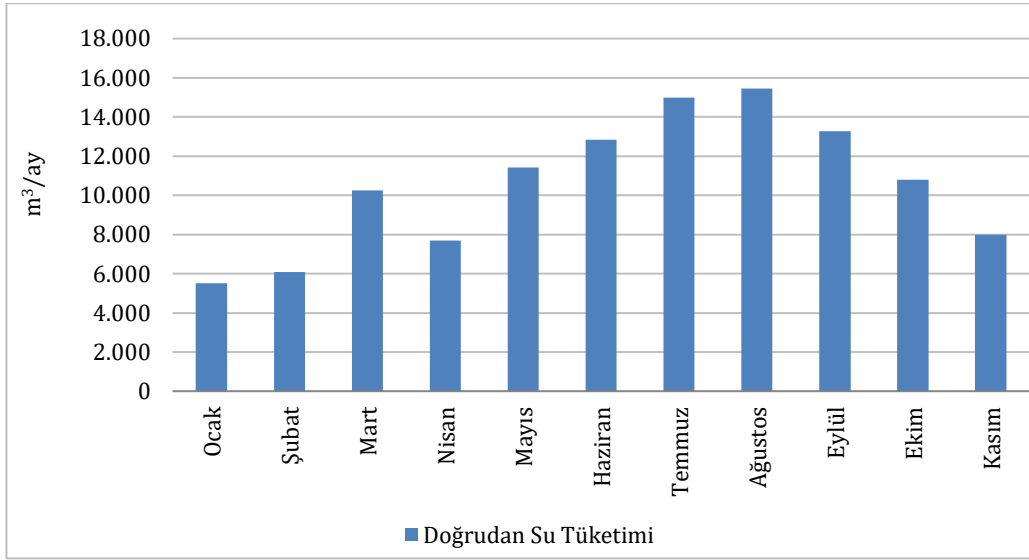
Şekil 7. Mutfak ve çamaşırhane su tüketimi (1 Ocak) (Water consumption in kitchen and laundry, 1 January)

Otel içerisinde bölümlere göre yıl boyunca günlük su tüketim değerleri ölçülmektedir. Aylık su tüketimi verileri, otelin Aralık ayında kapalı olmasından dolayı Ocak-Kasım ayları için mevcuttur. Temin edilen veriler bölümlere göre gruplandırılmıştır. Daha sonra aylara göre toplam doğrudan su tüketimi hesaplanarak Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5. Kullanım alanlarına göre doğrudan su tüketim miktarları (Direct water consumption quantities based on usage areas)

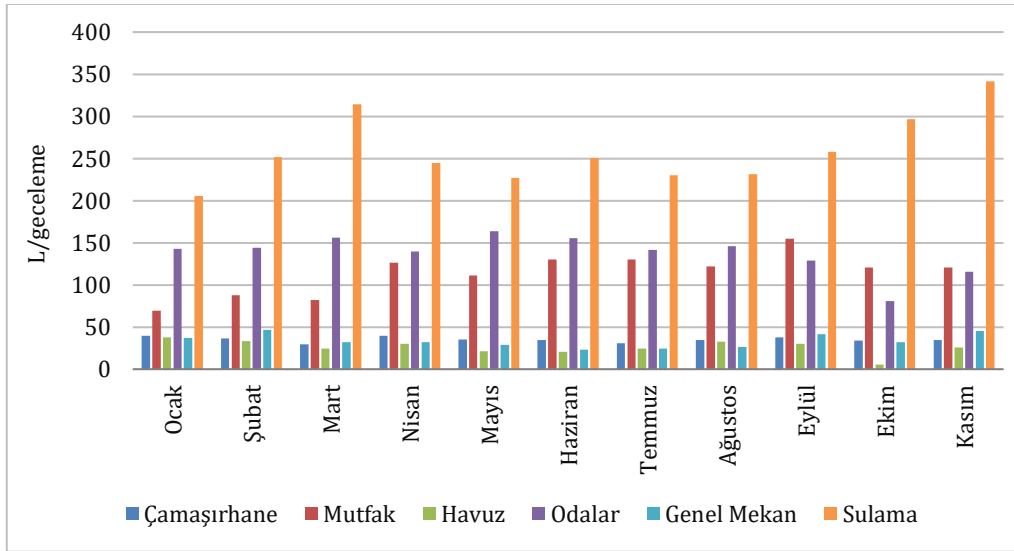
Ay	Geceleme	Çamaşırhane	Mutfak	Havuz	Odalar	Genel Mekan	Sulama	Toplam
Ocak	10380	411	718	392	1485	383	2131	5520
Şubat	10140	369	888	341	1464	475	2551	6088
Mart	16065	470	1316	398	2504	520	5051	10259
Nisan	12588	497	1589	377	1755	403	3082	7703
Mayıs	19444	691	2156	413	3189	556	4418	11423
Haziran	20881	728	2714	437	3240	489	5222	12830
Temmuz	25784	787	3350	626	3643	637	5932	14974
Ağustos	26045	904	3172	847	3804	693	6023	15442
Eylül	20391	772	3160	618	2622	843	5257	13272
Ekim	18962	642	2284	101	1528	606	5623	10784
Kasım	11675	401	1412	301	1352	529	3984	7980
Toplam	192355	6671	22759	4851	26586	6134	49274	116274

Aylara göre toplam su tüketimi değerleri incelendiğinde yaz sezonunda tüketimin yükseldiği görülmektedir (Şekil 8). Ocak ayında doğrudan su tüketimi 5.220 m³/ay iken, Ağustos ayında bu değer 15.442 m³/ay kadar çıktığı görülmektedir.



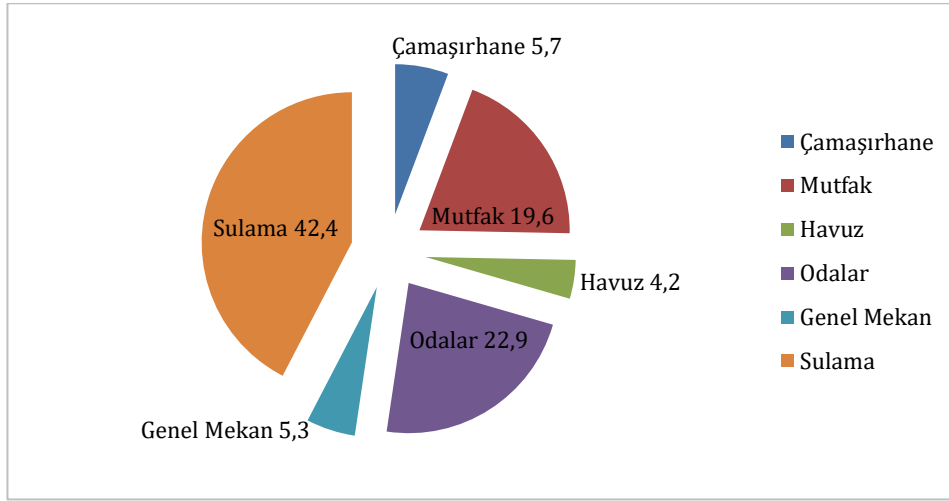
Şekil 8. Konaklama tesisinde doğrudan su tüketiminin aylara göre değişimi (The monthly variation of direct water consumption in the accommodation facility)

Doğrudan su tüketiminin bölümlere göre dağılımı incelendiğinde; sulama suyu % 42,4 ile en üst sırada yer almaktadır. Odalarda duş ve tuvalet kullanımından kaynaklı su tüketimi % 22,9 ile ikinci sırada yer alırken, mutfaktan kaynaklı su tüketimi % 19,6 ile üçüncü, çamaşırhane % 5,7 ile dördüncü, genel mekan % 5,3 ile beşinci, havuz ise % 4,2 ile son sırada yer almaktadır. Aylara göre doğrudan su tüketim değerlerinin, geceleme sayısına bölünmesi ile ay bazında, geceleme başı doğrudan su tüketiminin, bölümlere dağılımı yapılmıştır (Şekil 9).



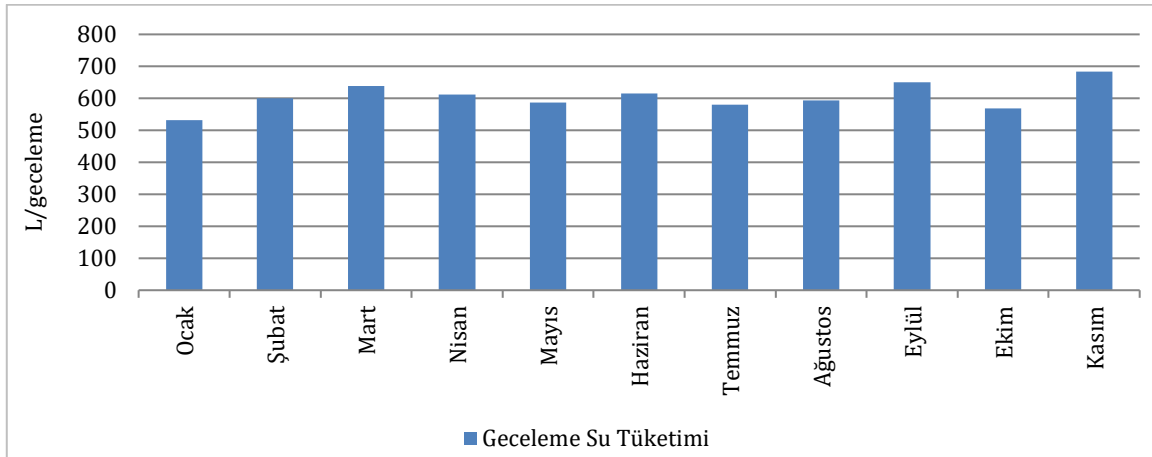
Şekil 9. Kullanım alanlarına göre geceleme başı doğrudan su tüketiminin aylara göre değişimi (Monthly change of direct water consumption per night according to usage areas)

Çalışma kapsamında doğrudan su tüketiminin tesis içerisinde kullanım alanları belirlenmiştir (Şekil 10). Doğrudan su tüketiminde en büyük paya % 42,4 ile sulama suyunun sahip olduğu görülmektedir. Bunu % 22,9 ile odalarda su tüketimi takip ederken, mutfak % 19,6 ile üçüncü sırada yer almaktadır.



Şekil 10. Doğrudan su tüketiminin bölümlere göre dağılımı

Aylara göre geceleme başına doğrudan su tüketim miktarlarının değişimi Şekil 11’de verilmiştir. Konaklama tesisi için yapılan hesaplamalar neticesinde, geceleme başı doğrudan su tüketiminin 531,8 L ile 683,5 L arasında değiştiği gözlenmiştir. Yıl boyunca toplam doğrudan su tüketiminin, geceleme sayısına bölünmesi ile ortalama doğrudan su tüketimi ise geceleme başı 604,5 L olarak hesaplanmıştır.



Şekil 11. Geceleme başı su tüketiminin aylara göre değişimi (The monthly variation in water consumption per overnight stay)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Akdeniz Bölgesi’nde turizm sektöründe doğrudan su tüketiminin belirlenmesi amacıyla yapılmış olan çalışmalarda belirtilen değerler Tablo 6’da verilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen veriler, 5 yıldızlı ve 4 yıldızlı konaklama tesislerinde literatürde belirlenen ortalama doğrudan su tüketim değerleri ile tutarlılık göstermektedir. Çalışma kapsamında incelenen 5 yıldızlı konaklama tesislerindeki geceleme başı doğrudan su tüketim değerleri 458 – 810 L arasında değişiklik göstermekte olup, ortalama 575 L olarak hesaplanmıştır. Literatürde bu değerler 276 – 701 L arasında değişmekte olup ortalama 515 L olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada incelenen 4 yıldızlı oteller için ise geceleme başı doğrudan su tüketim miktarı ortalama 349 L olarak hesaplanmıştır. Literatürdeki çalışmalarda 4 yıldızlı otellerde geceleme başı doğrudan su tüketim miktarı ortalaması 337 L’dir. Bu çalışma kapsamında yer alan Otel 19 olarak adlandırılan müstakil apart otel geceleme başı su tüketim değeri 539 L, Otel 20 olarak adlandırılan apart otel için ise 103 L olarak hesaplanmıştır. Yapılan çalışmada 5 yıldızlı tatil köyü konseptinde değerlendirilen konaklama tesislerinin geceleme başı su tüketim miktarının 1052–1209 L aralığında, ortalamasının 1154 L olduğu hesaplanmıştır.

Literatürde 5 yıldızlı tatil köyü su tüketimi için yapılan bir çalışmaya rastlanmamıştır. 5 yıldızlı tatil köyü ve 5 yıldızlı otellerde su tüketiminin diğer türdeki tesislere göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Özellikle yeşil alan büyüklüğüne ve bitki desenine bağlı sulama suyu ihtiyacının, havuz sayısı ve hacimlerinin diğer türdeki tesislere göre yüksek olmasından dolayı doğrudan su tüketim miktarlarının daha yüksek olduğu düşünülmektedir.

Tablo 6. Farklı çalışmalara göre, turizm sektöründe doğrudan su tüketimi (Direct water consumption in the tourism sector according to different studies)

Tesis Tipi	Doğrudan Su Tüketimi (ortalama) L/geceleme	İl/Ülke	Kaynak
5 Yıldızlı Otel	276	Benidorm, İspanya	Rico vd. (2020)
	338	Rodod, Yunanistan	Gössling (2015)
	675		
	500	Fas	Gössling vd. (2012)
	600		
	701	Mallorca, İspanya	Tortella ve Tirado (2011)
4 Yıldızlı Otel	205	Benidorm, İspanya	Yoon vd. (2022)
	276	Benidorm, İspanya	Rico vd. (2020)
	234	Rodod, Yunanistan	Gössling (2015)
	400	Fas	Gössling vd. (2012)
	548	Mallorca, İspanya	Tortella ve Tirado (2011)
	361	Benidorm, İspanya	Rico-Amoros vd. (2009)
3 Yıldızlı Otel	225	Benidorm, İspanya	Yoon vd. (2022)
	225	Benidorm, İspanya	Rico vd. (2020)
	300	Fas	Gössling vd. (2012)
	516	Mallorca, İspanya	Tortella ve Tirado (2011)
	287	Benidorm, İspanya	Rico-Amoros vd. (2009)
2 Yıldızlı	194	Benidorm, İspanya	Rico-Amoros vd. (2009)
1 Yıldızlı	174	Benidorm, İspanya	Rico-Amoros vd. (2009)
Apart Otel	250	Fas	Eurostat (2009)
5 Yıldızlı Tatil Köyü	1154		
5 Yıldızlı Otel	575		
4 Yıldızlı Otel	349	Antalya, Türkiye	Bu çalışmada hesaplanan değerler
Müstakil Apart Otel	539		
Apart Otel	103		

Aylara göre hesaplanan değerler tesis bazında incelendiğinde, özellikle sezon açılış kapanış zamanlarında havuz doldurma boşaltma gibi işlemlere bağlı olarak bazı tesislerde su tüketiminin arttığı bu sebeple bu işlemlerin yapıldığı dönemlerde geceleme başına düşen su tüketiminde artış olduğu görülmektedir. Ancak tesislere ait geceleme başı su tüketim ortalamalarının sezona göre önemli bir farklılık göstermediği, tesis tipine göre farklılık gösterdiği görülmektedir.

Turizm sektörünün geceleme başı doğrudan su tüketimi günlük olarak bir bireyin su tüketiminin 4-5 katı kadardır. Tesis çeşidine göre bu değer farklılık göstermektedir. Bu çalışmada sulama suyu ihtiyacının toplam doğrudan su tüketimindeki payı yaklaşık % 42 olarak hesaplanmıştır. Bu, tesislerin yeşil alan büyüklüğüne, yeşil alan bitki desenine ve sulama yöntemine göre farklılık gösterebilir. Antalya bölgesinde kitle turizmüne odaklı turizm konaklama tesislerinde sulama suyu ihtiyacı önemli bir paya sahiptir. Bu sebeple sulama suyu ihtiyacının doğrudan su tüketimlerine bağlı atıksuların artırılması ile elde edilerek karşılanması su kaynakları üzerindeki baskıyı azaltacaktır.

Su kaynaklarına olan baskının azaltılması için, su tüketiminin azaltılması gerektiği aşıkardır. Turizm sektörünün su tüketiminin anlaşılması için yapılan bu çalışma doğrultusunda; turizm faaliyetlerinin ekonomik faydasının yanında, su kaynaklarına olan baskısının da göz önünde bulundurulması gerektiği düşünülmektedir. Turizm sektörünün su tüketimi doğrudan ve dolaylı su tüketimi olarak birlikte değerlendirildiğinde su kaynaklarına olan etkisinin daha iyi anlaşılması sağlanabilir.

Doğrudan ve dolaylı su ayak izi hesapları, tüm sektörler için karşılaştırılabilir bir metrik özelliği taşımaktadır. Bu nedenle çalışma kapsamında elde edilen çıktıların sektöre ve literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Turizm alanında stratejik su yönetimi planlanmasına veri altlığı oluşturacak benzer çalışmaların artarak devam etmesi gerekmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Becken, S. 2014. "Water equity – contrasting tourism water use with that of the local community". *Water Resources and Industry*, 7-8: 9-22.
- Eurostat. (2009). MEDSTAT II: 'Water and Tourism' Pilot Study. Luxembourg: EUROSTAT, European Commission
- Gössling, S. 2001. "The Consequences of Tourism for Sustainable Water Use on a Tropical Island: Zanzibar". *Journal of Environmental Management*, 61(2), 179-191.
- Gössling, S. 2015. "New Performance Indicators for Water Management in Tourism". *Tourism Management*, 46, 233-244.
- Gössling, S., Peeters, P., Hall, C. M., Ceron, J., Dubois, G. ve Scott, D. 2012. "Tourism and Water Use: Supply, Demand, and Security. An International Review". *Tourism Management*, 33(1), 1-15.
- Hof, A. ve Schmitt, T. 2011. "Urban and Tourist Land Use Patterns and Water Consumption: Evidence From Mallorca, Balearic Islands". *Land Use Policy*, 28(4), 792-804.
- Kültür ve Turizm Bakanlığı. Tesis İstatistikleri. <https://yigm.ktb.gov.tr/TR-201140/yillik-istatistikler.html> (Son erişim tarihi: 10.02.2024)
- Kültür ve Turizm Bakanlığı. Turizm İstatistikleri. <https://yigm.ktb.gov.tr/TR-201120/konaklama-istatistikleri.html> (Son erişim tarihi: 10.02.2024)
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=ANTALYA> (Son erişim tarihi: 08.02.2024)
- Rico-Amoros, A. M., Olcina-Cantos, J. ve Saurí, D. 2009. "Tourist Land Use Patterns and Water Demand: Evidence from the Western Mediterranean". *Land Use Policy*, 26(2), 493-501.
- Rico, A., Olcina, J., Baños, C., Garcia, X. ve Sauri, D. 2020. "Declining Water Consumption in the Hotel Industry of Mass Tourism Resorts: Contrasting Evidence for Benidorm, Spain". *Current Issues in Tourism*, 23:26, 770-783.
- Styles, D., Schoenberger, H. ve Galvez-Martos, J. L. 2015. "Water Management in the European Hospitality Sector: Best Practice, Performance Benchmarks and Improvement Potential". *Tourism Management*, 46, 187-202.
- Tortella, B. D. ve Tirado, D. 2011. "Hotel Water Consumption at A Seasonal Mass Tourist Destination. The Case of The Island of Mallorca". *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2568-2579.
- Türkiye İstatistik Kurumu. Nüfus İstatistikleri. <https://nip.tuik.gov.tr/> (Son erişim tarihi 08.02.2024)
- Türkiye İstatistik Kurumu. Turizm İstatistikleri. <https://biruni.tuik.gov.tr/turizmapp/menuturizm.zul> (Son erişim tarihi 08.02.2024)
- Warnken, J., Bradley, M. ve Guilding, C. 2005. "Eco-Resorts vs. Mainstream Accommodation Providers: An Investigation of The Viability of Benchmarking Environmental Performance". *Tourism Management*, 26(3), 367-379.
- Yang, M., Hens, L., De Wulf, R. ve Ou, X. 2011. "Measuring Tourist's Water Footprint in a Mountain Destination of Northwest Yunnan, China". *Journal of Mountain Science*, 8(5), 682-693.
- Yoon, H., Sauri, D. ve Rico, A. 2022. "The Water-Energy Nexus in Hotels and Recreational Activities of a Mass Tourism Resort: The Case of Benidorm". *Current Issues in Tourism*, 25:24, 592-610.



GÜL İŞLEME ATIK SUYUNUN SU BÖRÜLCESİ (*SALVANIA NATANS*) BİTKİSİ İLE ARITIMI

Özlem SELÇUK KUŞÇU*, Perihan KÜÇÜK

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Doğal Arıtma,
Gül İşleme Atıksuyu,
Su Börülcesi.

Öz

Gül işleme sonrasında meydana gelen gül atık suyu yüksek debilere ve kirlilik yüküne sahiptir. Bu tür atık suların farklı bölgelere yayılmış olması arıtma tesislerinde arıtımı zorlaştırmaktadır. Bu nedenle mevcut arıtım yöntemlerinden farklı olarak alternatif arıtım yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada gül işleme sonrası açığa çıkan gül atık suyunun farklı renk led ışık kaynaklarında su börülcesi su bitkisi ile doğal arıtımı araştırılmıştır. Çalışma, altı farklı renk led ışık ortamında, 20 °C'de ve 200 mL hacminde kavanozlarda gerçekleştirilmiştir. Gül atık suyu arıtım verimleri, önemli deşarj parametreleri olan kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), çözülmüş kimyasal oksijen ihtiyacı (ÇKOİ), toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) parametreleri ölçülerek değerlendirilmiştir. Optimum süre olan 14 günün sonunda beyaz led ışık ortamında su börülcesi ile arıtım sonrası atık suyun KOİ giderim verimi %69, ÇKOİ giderim verimi %71, azot giderim verimi %72 ve fosfor giderim verimi %83 olarak bulunmuştur. Araştırmalar beyaz led ışık altında diğer ışık kaynaklarından daha yüksek arıtım verimi elde edildiğini göstermiştir. Su börülcesi ile gül atıksuyu arıtım verimleri farklı renk led ışık kaynaklarına göre sırası ile beyaz > mavi > yeşil, > sarı > kırmızı > karanlık şeklindedir.

TREATMENT OF ROSE PROCESSING WASTEWATER WITH *SALVANIA NATANS* PLANT

Keywords

Natural Treatment,
Rose Processing Wastewater,
Salvania Natans.

Abstract

Rose wastewater generated after rose processing has high flow rates and pollution load. The fact that such wastewater is spread over different regions makes treatment in treatment facilities difficult. Therefore, alternative treatment methods are needed, unlike existing treatment methods. In this study, the natural treatment of rose processing wastewater released during the processing of rose flowers in the rose processing industry was investigated with the aquatic plant *Salvania natans* under different color led light sources. The study was carried out in six different color led light environments, at 20 °C and in 200 mL jars. Rose wastewater treatment performance was evaluated by measuring the discharge parameters: chemical oxygen demand (COD), dissolved chemical oxygen demand (DCOD), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP). At the end of 14 days, the COD removal efficiency of the wastewater after treatment with *Salvania natans* in the white led light environment was found to be 69%, DCOD removal efficiency 71%, nitrogen removal efficiency 72% and phosphorus removal efficiency 83%. Research has shown that white led light has higher efficiency than other light sources. It has been determined that the efficiency order according to different color led light sources is white > blue > green, > yellow > red > dark.

Alıntı / Cite

Selçuk Kuşçu, Ö., Küçük, P., (2024). Gül İşleme Atıksuyunun Su Börülcesi (*Salvania Natans*) Bitkisi ile Arıtımı, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(1), 230-240

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Ö Selçuk Kuşçu, 0000-0001-9172-8619
P. Küçük, 0000-0002-3380-8239

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	11.12.2023
Revizyon Tarihi / Revision Date	06.03.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	06.03.2024
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

* İlgili yazar/Corresponding author: ozlemkuscu@sdu.edu.tr, +90-246-211-1288

TREATMENT OF ROSE PROCESSING WASTEWATER WITH SALVANIA NATANS PLANT

Özlem SELÇUK KUŞÇU[†], Perihan KÜÇÜK

Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering, Dep. of Environmental Engineering, Isparta, Turkey

Highlights (At least 3 and maximum 4 sentences)

- Different LED light sources affected the treatment efficiency of *Salvania Natans* plant
 - COD, DCOD, TN and TP efficiency were highest in white LED light
 - Efficiency increased slightly in two-stage treatment
 - Rose wastewater was treated on-site and effectively with *Salvania Natans* plant
-

Purpose and Scope

The purpose of this study is to provide an effective treatment that is easy to operate, does not require energy, and is low cost, in the treatment of rose processing wastewater, which is difficult and costly to treat. For this purpose, the treatment performance of rose wastewater with *Salvania natas* plant was evaluated under different LED light conditions. Furthermore, the effect of two-stage treatments on efficiency was tested in this study.

Design/methodology/approach

An incubator dedicated to six different color LED light environments was used in this study. The incubator was kept at a constant temperature of 20°C throughout the experiment. A continuous air flow was provided to the glass jars with the aeration system installed inside the incubator. Different color LED lights used in the study were placed on top of each compartment and at equal distances. 5 g of *Salvania natas* plant was added to each of 6 glass jars with a volume of 500 mL and initial and post-COD, DCOD, TN and TP values were determined.

Findings

COD, DCOD, TN and TP removal efficiencies are 69%, 71%, 72% and 83%, respectively, under white light at the end of the 14-day treatment period. Removal efficiencies under different color lights are listed as white > yellow > green > red > blue > dark environment. In the first stage treatment, which lasted 14 days, the COD removal efficiency was 67%, while in the second stage, the COD removal efficiency increased by 7%. At the end of the 14th, the TN and TP removal efficiencies were 71% and 69%, respectively. With the addition of the second stage, TN removal efficiency increased by 3% and TP increased by 11%.

Research limitations/implications

Although the treatment efficiency is quite high, When the process efficiency meets discharge standards, it may be insufficient when used alone. It can be applied as preliminary treatment or secondary treatment. The amounts of rose wastewater resulting from real-time production are much higher than those used in laboratory studies. In order for the study to be translated into practice, it needs to be analyzed on a large scale. Future studies can be done in large pools equipped with LED light sources and with real wastewater amounts.

Practical implications

Rose wastewater can be treated naturally with high purification efficiencies under white light using *the Salvania Natans* plant. To increase treatment efficiency, two-stage treatment can be performed and discharge standards can be achieved in this way.

Social Implications (if applicable)

This study provides an effective and practical process for treating rose wastewater, which causes significant environmental problems during rose processing. As a result of this study, a solution has been found for the treatment of rose wastewater, which is an important problem of rose processing facilities, and social contribution will be made in this regard.

Originality

Studies on the treatment of rose waste with *Salvania Natans* plant using LED light sources of different colors have not yet been found in the literature. This study is the first in the literature regarding its subject and will make significant contributions to the literature.

[†] Corresponding author: ozlemkuscu@sdu.edu.tr, +90-246-211-1282

1. Giriş (Introduction)

Gül çiçeği üretimi yapan en önemli ülkeler Türkiye ve Bulgaristan'dır. Dünya gül yağı talebinin %50'si Türkiye'den, %40'ı Bulgaristan'dan ve geri kalan %10'u Hindistan, İran, Fas, Afganistan gibi diğer ülkelerden karşılanmaktadır (Güler, 2010). Isparta Türkiye'de üretilen yağ gülü üretiminin %80'nini karşılamaktadır (Bilir, 2010). Üretilen gül çiçeklerinin yaklaşık %90'ı gül yağı, gül suyu, konkret ve absolüt üretmek için distilasyon veya ekstraksiyon işlemlerine tabi tutulmaktadır. Gül çiçeğinin işlenmesi esnasında kullanılan suyun yaklaşık 2/3'ü atıksu olarak prosesten çıkmaktadır. Proses sonrası atık suyun KOİ 9500 mg/L ve Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ) 950 mg/L, Toplam Kjeldahl Azotu (TKN) 100 mg/L ve TP 5 mg/L mertebesindedir (Avşar vd., 2005).

Gülyağı işletimi sonrasında oluşan atıksular hiçbir önlem alınmaksızın deşarj edilmekte ya da biriktirme çukurlarında toplanarak sızma ve buharlaştırma yoluyla uzaklaştırılmaktadır (Tosun vd., 2002). Türkiye'de gülyağı üretimi sonrası oluşan atıksular bahar mevsiminde yılda sadece 45 gün oluşmaktadır. Gülyağı üretim tesislerinin günlük konumları ve sezonluk çalışmaları süreç sonrası oluşan atıksuların artırılmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle bu tür atıksuların artırılmasında kesikli ya da yerinde arıtım modellerinin uygulanması daha akılcı bir yaklaşım olmaktadır. Gül atık sularının arıtımına yönelik çalışmalar oldukça sınırlıdır. Çeşitli arıtım uygulamaları araştırmacılar tarafından çalışılmasına rağmen bu konudaki araştırmalar oldukça yetersizdir. Avşar vd., 2007; gül atıksularının artırılmasında klasik kimyasal ve elektrokimyasal metotları uygulamışlar ve elektrokimyasal yöntemin oldukça etkili olduğunu bulmuşlardır. Elektrokimyasal yöntemle KOİ de % 79,8 ve bulanıklıkta 81,4 % verim elde etmişlerdir. İleri arıtım teknikleri bu tür atıksuların arıtımında etkili bir performans göstermesine rağmen yüksek ilk yatırım maliyeti ve işletme masrafları, enerji ve kimyasal gereksinimi, nitelikli eleman ihtiyacı gibi dezavantajları nedeniyle tam ölçekte kullanımları oldukça sınırlıdır. Bu olumsuz koşullar günümüzde enerji ve personel ihtiyacı gerektirmeyen düşük maliyetli doğal arıtma sistemlerinin kullanılması gerekliliğini düşündürmektedir (Demirörs, 2006; Akten vd., 2008).

Atıksuların arıtılmasında maliyeti en düşük ve çevre dostu arıtma şekli olarak bilinen biyolojik sistem doğal arıtmadır (Akten vd., 2008; Lee vd., 2010). Yeşil bir arıtma teknolojisi olarak inşa edilmiş sulak alanlar (Saeed ve Sun, 2012) birçok avantaja sahiptir: Düşük inşaat ve bakım maliyeti, düşük enerji gereksinimleri, düşük çamur üretimi, organik yüklemelerdeki değişiklikleri tolere edilebilmesi gibi avantajları onları geleneksel atıksu arıtma sistemlerine kıyasla daha üstün kılmıştır (Yavaş, 2017; Dan vd., 2011). Ayrıca, inşa edilmiş sulak alan sistemleri, yaban hayatı değerleri ve kullanılabilir bitki biyokütlesinin üretimi de dahil olmak üzere çok işlevli olabilmektedir (Dan vd., 2011). Doğal arıtma sistemleri, atık sudaki AKM, N, P, BOİ ve KOİ gibi parametreleri arıtmanın yanı sıra çıkış suyunun özellikle tarımsal sulamada kullanımı gibi avantajları da sunmaktadır (Erol, 1997). Su bitkileri ile doğal arıtma sistemleri ayrıca patojen gideriminde de etkilidir (Uysal, 1998). Tüm bu avantajlara rağmen en büyük dezavantajı büyük araziler gerektirmeleridir (Karagöz, 1998). Özellikle arıtılmış suyun hedef deşarj kriterlerine ulaşmak için birden fazla sulak alanın bulunduğu durumlarda alan ihtiyacı artmaktadır (Bruch vd., 2011). Doğal olarak arıtılan atık su, alıcı ortama doğrudan arıtılmış su olarak verilmektedir (Yavaş, 2017). Ülkemizde doğal arıtma tesislerinden çıkan atık suların AKM ve KOİ giderimi yeterli olabilmekte, ancak azot fosfor içerikli atık suların alıcı ortamda ötrofikasyona neden olması sebebiyle doğal arıtma tesislerinin azot-fosfor giderimi önemli bir kriter olmaktadır (Yavaş, 2017). Sulak alanlar sudaki kirletici maddeleri uzaklaştırmak için biyolojik süreçlerin yanı sıra fiziksel ve kimyasallar da dahil olmak üzere çok sayıda mekanizmayı içinde barındırır (Lee vd., 2010). Su bitkileri kullanılarak arıtma genellikle serbest yüzey akımlı atıksu arıtma sistemlerine benzemektedir. Bu sistemlerde arıtma, bitki köklerine yapışık olarak yaşayan aerobik mikroorganizmaların çözünmüş organikleri ayrıştırmasıyla veya bitkilerin kökleri vasıtasıyla inorganik formdaki kirleticileri kullanmasıyla sağlanmaktadır (Tübitak MAM, 2011). Su bitkileri tarafından nütrient uzaklaştırma etkinliği ışık, sıcaklık, mevsim, hidrolik yükleme, pH, bitki hasadı ve diğer besin maddelerinin mevcudiyeti gibi parametrelere bağlıdır. Bu faktörler çeşitli bitki türlerine göre farklılık gösterebilir (Ansari vd., 2011). Bu nedenle, belirli bir atık su arıtımı için bitki seçiminin yapılması ve çevresel faktörlerin belirlenmesi önemli bir yaklaşımdır. Uzun yıllardan beri bahçe bitkileri ve tarımsal üretimde yapay ışık kaynaklarından yararlanılmaktadır. Bitkisel üretimde verim ve kaliteyi artırmak, bitki büyümesini teşvik etmek, kalite ve verimde homojenlik sağlamak, bitkilerin vejetatif ve generatif dönemlerinde fotoperiyot zamanlarını ayarlamak, bitkilerin morfolojik ve fitokimyasal olaylarını düzenlemek gibi birçok farklı amaçla ışık kaynakları kullanılabilir (Çakırcı vd., 2017). Ayrıca bitkiler ışık renklerine karşı da farklı duyarlılığa sahiptir. Bitkisel üretimde çeşitli ışık kaynakları bu amaç için kullanılmasına rağmen son yıllarda yaygın olarak kullanılan ışık kaynağı bazı avantajlarından dolayı led lambalardır (Çakırcı vd., 2017). Önder (2019), yapmış olduğu çalışmada tarımsal aydınlatmada led ışık kaynaklarının kullanım olanaklarını araştırmıştır. Çalışmada diğer lamba aydınlatma sistemlerinin yerine led sistemlerinin kullanılmasının önemli bir enerji tasarrufu sağlayacağı ve işletme maliyetlerini azaltacağı sonucuna varmıştır. Farklı led ışık kaynaklarını kullanarak bitki gelişimi üzerine etkilerinin incelendiği çalışmalar literatürde mevcuttur. Bu çalışmada mevcut literatürlerden farklı olarak gül işleme sonrası açığa çıkan gül atık suyunun farklı led ışık kaynakları etkisi altında su bürülcesi bitkisi kullanılarak arıtım performansı incelenecektir. Literatürde gül atık suyunun arıtılması konusunda yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Farklı renkte led ışık kaynakları kullanılarak gül atık suyunun

bitkilerle arıtımına yönelik çalışmalara literatürde henüz rastlanılmamıştır. Bu çalışmada özellikle Isparta ili için katma değeri olan gülün işlenmesi sırasında açığa çıkan atık suyun su bürülcesi bitkisi kullanılarak doğal arıtma yöntemiyle arıtılması hedeflenmektedir. Gül işleme sonrasında meydana gelen gül atık suyu yüksek debilere sahiptir ve kirlilik yükü evsel atık suya kıyasla daha fazladır. Bu bakımdan bu çalışmada arıtımı zor ve maliyetli olan gül işleme atık suyunun arıtılmasında işletimi kolay, enerji ihtiyacı gerektirmeyen, maliyeti düşük ve etkili arıtım sağlayan yeni bir arıtım modeli önerilmektedir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Gül İşleme Atık Suyunun Temini ve Karakteristik Özelliği (Supply of Rose Processing Wastewater and Characteristic Features)

Çalışmada kullanılan gül atıksuyu Isparta ili Senir Kasabası'nda bulunan Çamlı Gülyağı Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Gül atık suyu temini için bu tesisin seçilmesinin nedeni konumunun Isparta'ya yakın olmasıdır. Bu tesiste, Isparta'nın kuzeyinde bulunan yaklaşık 200.000 m²'lik alanı kapsayan tarlalardan toplanan gül çiçeği işlenmektedir. Tesis, 1000 kg gül çiçeğine 3 m³ su olacak şekilde işletilmektedir. Bu tesiste senelik ortalama 160.000 kg gül çiçeği işlenirken 480 m³ civarı gül atık suyu çıkmaktadır.

Laboratuvara getirilen gül atık suyu örneğinin pH, KOİ, ÇKOİ ve iletkenlik analizleri yapılarak gül atık suyunun karakteristik özellikleri belirlenmiştir. Yapılan karakteristik analizler üç tekerrür şeklinde yapılmış ve ortalama değerleri alınmıştır (Tablo 1). Karakteristik özelliklerinin belirlenmesinin hemen ardından gül atık suyu +4 °C'de muhafaza edilmiştir.

Tablo 1. Gül atık suyunun karakteristik özellikleri (Characteristic features of rose processing wastewater)

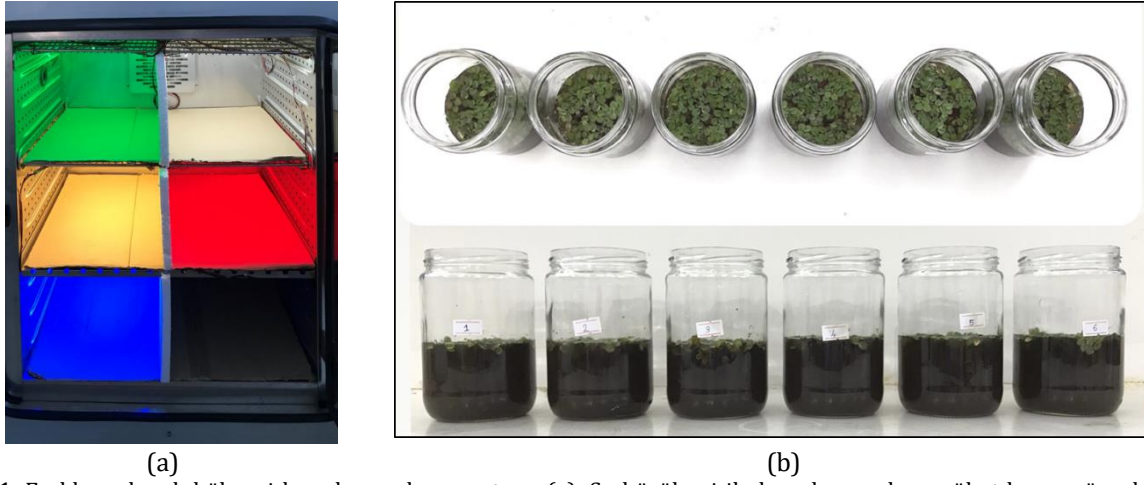
Parametreler	Değeri
pH	4,5±0,5
KOI (mg/L)	8391±640
ÇKOİ (mg/L)	8184±450
İletkenlik (µs/cm)	2,53±0,3
TN (mg/L)	81,4±8,2
TP (mg/L)	7,58±1,6

2.2. Su Bürülcesi Bitkisinin Temini (Supply of *Salvania Natans* Plant)

Bitkiler İstanbul'da su bitkileri satan bir firmadan temin edilmiştir. Temin edilen bitkiler tel süzgülere süzülerek suyunun çekilmesi beklenmiştir. Daha sonra su bitkileri aynı miktarda olacak şekilde tartımları yapılarak gül atık suyu bulunan cam kavanozların her birine eklenmiştir.

2.3. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

Deneme, Süleyman Demirel Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü Katı Atık ve Arıtma Çamurları Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Katı Atık ve Arıtma Çamurları Laboratuvarı'nda bulunan Binder marka KB serisi 240 model inkübatör modifiye edilerek deney düzeneği hazırlanmıştır. İnkübatör, yeşil, beyaz, sarı, kırmızı, mavi ve karanlık ortam olmak üzere altı farklı ışık ortamına ayrılmıştır. Denemede kullanılan inkübatör düzeneği Şekil 1 (a)'da gösterilmiştir. İnkübatör, deneme boyunca sabit sıcaklıkta, 20°C'de tutulmuştur. İnkübatörün içine kurulmuş olan havalandırma sistemi ile cam kavanozlara sürekli olarak hava akışı sağlanmıştır. Çalışmada kullanılan farklı renk led ışıkları her bölmenin üstüne ve eşit uzaklıklarda yerleştirilmiştir. 500 mL hacime sahip olan 6 adet cam kavanozların her birine 5'er gr su bürülcesi bitkisi eklenmiştir. Su bürülcesi bitkisi ile hazırlanan deney kavanozları Şekil 1 (b)'de verilmiştir. Gül atık suyu ve *Su bürülcesi* bitkisi eklenen kavanozlar, farklı led ışık kaynakları bulunan inkübatöre yerleştirilmeden önce her birinden numune alınmıştır ve başlangıçtaki KOİ, ÇKOİ, TN ve TP değerleri belirlenmiştir. İnkübatöre yerleştirildikten sonra 14 gün boyunca beklemeye bırakılmıştır. 14 günlük bekleme süresi boyunca her iki günde bir KOİ analizi yapılarak giderim verimi değerlendirilmiş ve 14. günün optimum değer olduğu tespit edilmiştir. 14. günün sonunda kavanozlardan alınan örneklerde KOİ, ÇKOİ, TN ve TP analizleri yapılmıştır.



(a)

(b)

Şekil 1. Farklı renk ışık bölmesi hazırlanan deney ortamı (a), Su bürülcesi ile hazırlanmış ham gül atık suyu örnekleri (b) (Experimental environment prepared with different color light chambers (a), Raw rose wastewater samples prepared with *Salvinia natas* (b))

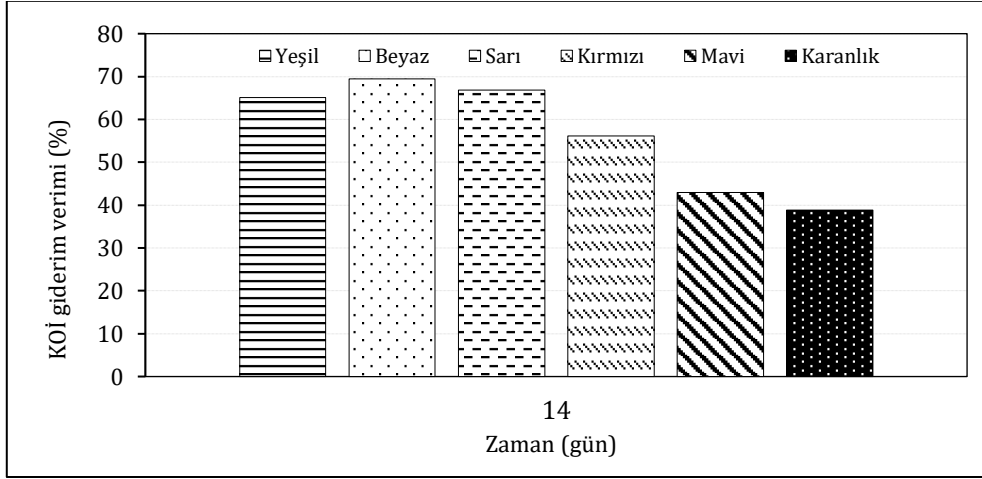
2.4. Analitik Metot (Analytical Method)

Çalışmanın değerlendirilmesi amacıyla TKOİ, ÇKOİ, TN, TP, pH, iletkenlik ve atıksu sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. TKOİ, ÇKOİ analizleri, APHA, 2005 metoduna göre, TN (LCK 338) ve TP (PO₄ - P) (LCK 350) Lange marka kitler kullanılarak Hach Lange marka DR6000 spektrofotometrede yapılmıştır (APHA, 2005). Analizler üç tekrerrür şeklinde yapılmış olup ortalama değerleri alınmıştır.

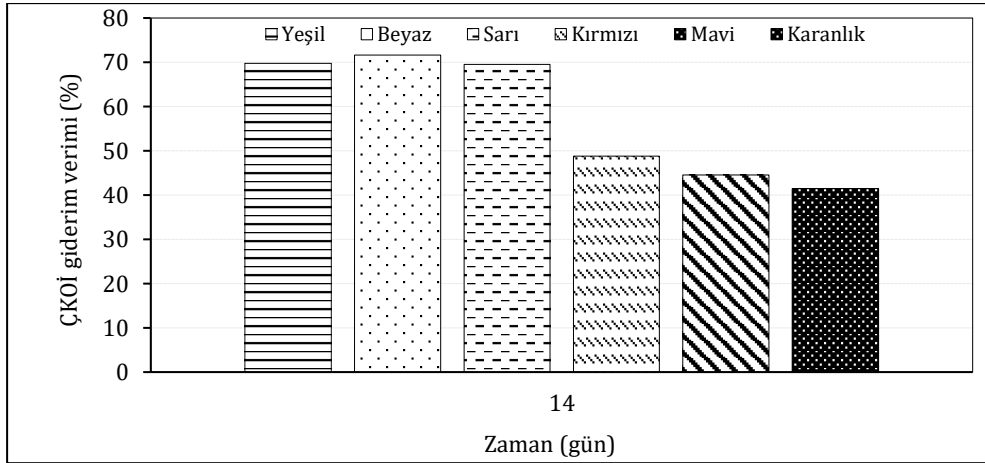
3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

3.1. TKOİ ve ÇKOİ Giderimi (TCOD and SCOD Removal)

Su bürülcesi bitkisi ile farklı renk ışık kaynakları altında elde edilen KOİ ve ÇKOİ giderim verimleri sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir. Gül atık suyunun başlangıç (0.gün) KOİ değeri 8391 mg/L'dir. 14. günün sonunda KOİ değeri, yeşil ışıkta 2926 mg/L, beyaz ışıkta 2559 mg/L, sarı ışıkta 2784 mg/L, kırmızı ışıkta 3677 mg/L, mavi ışıkta 4787 mg/L ve karanlık ortamda 5128 mg/L'ye düşmüştür. 14. günün sonunda elde edilen KOİ giderim verimleri yeşil, beyaz, sarı, kırmızı, mavi ve karanlık ortamda sırasıyla %65, %69, %66, %56, %42 ve %38 olarak bulunmuştur. Sonuçlar incelendiğinde TKOİ giderim veriminin en yüksek beyaz ışıkta gerçekleştiği tespit edilmiştir. Beyaz ışıktan sonra en iyi TKOİ giderim verimi %66 ile sarı ışıkta gerçekleşmiştir. En düşük verim ise %38 ile karanlık ortamda gözlenmiştir. ÇKOİ giderim verimleri incelendiğinde, 14. günün sonunda %71 verim ile en yüksek giderim verimi beyaz ışıkta tespit edilmiştir. Yeşil ve sarı ışıkta %69, kırmızı ışıkta %48, mavi ışıkta %44 ve karanlık ortamda ise %41 ÇKOİ giderim verimi elde edilmiştir. En düşük verim yine karanlık ortamda gözlenmiştir. Çalışmada görüleceği üzere ışık rengi arıtım verimini etkilemektedir. Farklı dalga boylarında bitkilere uygulanan aydınlatmaların; bitkinin yaprak alanı, taze sürgün ağırlığı ve kök ağırlığını önemli ölçüde etkilediği belirtilmektedir (Çakırer vd., 2017). Bu çalışmada Su bürülcesi ile gül atık suyunun arıtımında ışık renginin etkisi KOİ ve ÇKOİ giderim verimleri açısından değerlendirildiğinde büyükten küçüğe doğru beyaz > sarı > yeşil > kırmızı > mavi > karanlık ışık ortamları şeklinde sıralanabilmektedir.



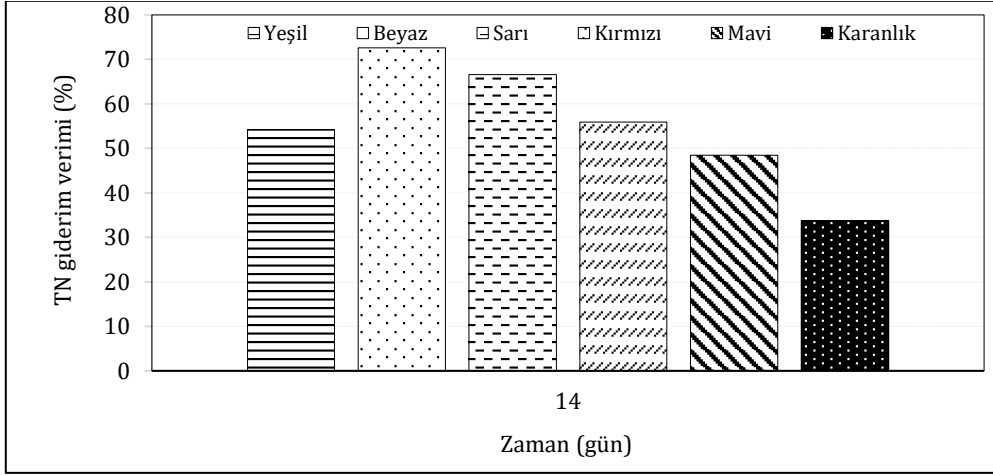
Şekil 2. KOİ giderim verimi (%) (COD removal efficiency %)



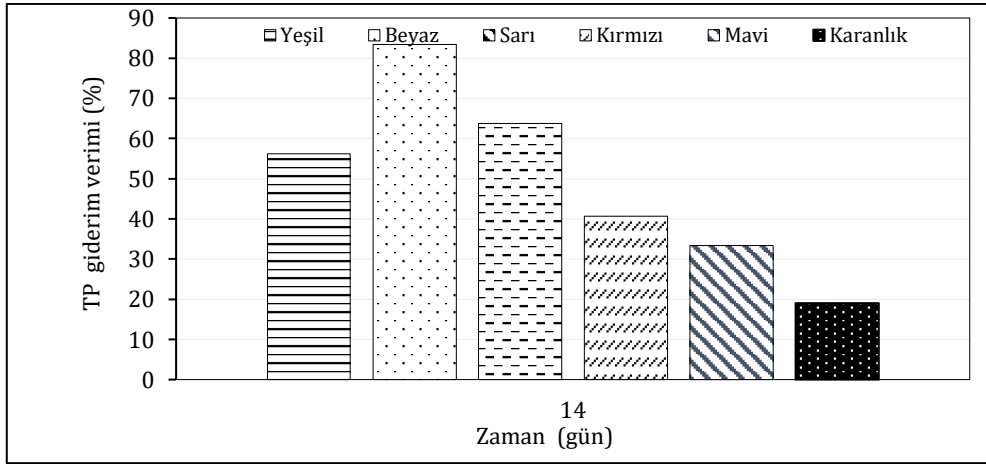
Şekil 3. ÇKOİ giderim verimi (%) (SCOD removal efficiency %)

3.2. TN ve TP giderimi (TN and TP removal)

Gül işleme atık suyunun başlangıç TN ve TP konsantrasyonu sırasıyla 80,5 mg/L ve 7,09 mg/L olarak ölçülmüştür. Su börülcesi bitkisi ile TN giderim verimleri Şekil 4'te, TP giderim verimleri ise Şekil 5'de verilmiştir. 14 günlük bekleme süresi sonunda en yüksek TN ve TP giderim verimleri beyaz ışıkta tespit edilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü üzere 14. günün sonunda su börülcesi bitkisiyle beyaz ışıkta %72 ile en yüksek azot giderim verimi elde edilirken karanlık ortamda %33 ile en düşük azot giderim verimi elde edilmiştir. Yüzde olarak fosfor giderim verimleri ise sırasıyla yeşil ışıkta %56, beyaz ışıkta %83, sarı ışıkta %63, kırmızı ışıkta %40, mavi ışıkta %33 ve karanlık ortamda %19'dur. Başlangıçta 7,09 mg/L olan fosfor değeri, 14. günün sonunda beyaz ışıkta 1,18 mg/L değerine düşmüştür. Laabassi vd. (2019) 75 lt' lik biofiltrasyon tankında 36,5 gr Su börülcesi bitkisi kullanarak evsel atık suyun arıtımını gerçekleştirdikleri çalışmada, %79 NH₄-N ve %37 PO₄-N giderim verimlerine ulaşmışlardır. Su vd. (2019) yaptıkları çalışmada Su börülcesi bitkisi kullanarak evsel atık suda 46 gün sonunda %67,3 TN giderimi ve %14,2 TP giderimi elde etmişlerdir. Gül atık suyunun evsel atıksuya göre daha fazla kirlilik yükü içerdiği düşünüldüğünde su börülcesi bitkisi kullanılarak gül atık suyunun arıtıldığı bu çalışmada %72 TN ve %83 TP giderim verimleri literatür ile karşılaştırıldığında oldukça yüksek bulunmuştur.



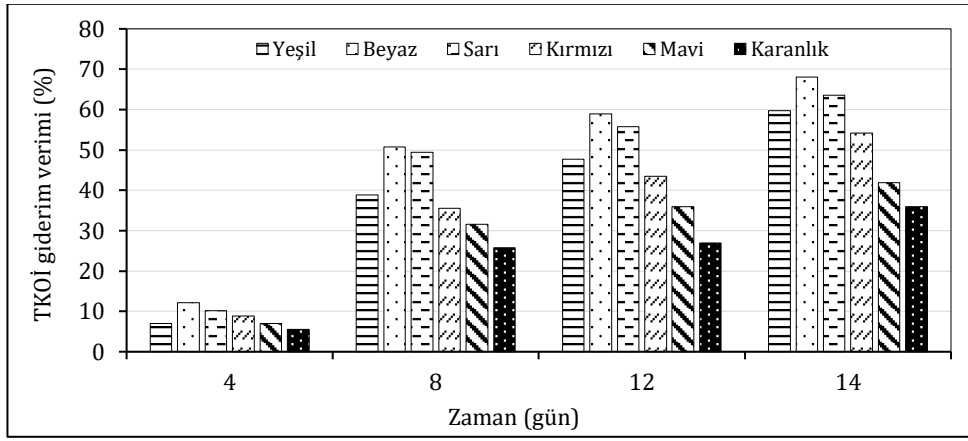
Şekil 4. TN giderim verimi (%) (TN removal efficiency %)



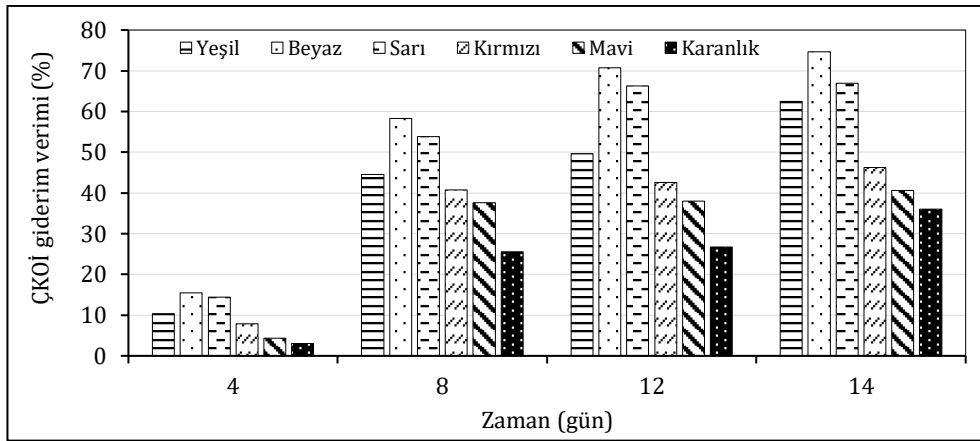
Şekil 5. TP giderim verimi (%) (TP removal efficiency %)

3.3. Zamana Bağlı Arıtılabilirlik Çalışması (Time-Dependent Purification Study)

Bu çalışmada su bürülcesi bitkisinin ham gül atık suyunun arıtılmasında zamana bağlı KOİ ve ÇKOİ giderim verimleri incelenmiştir. Zamana bağlı KOİ giderim verimi değişimi Şekil 6 ve ÇKOİ giderim verimi değişimi Şekil 7'de gösterilmiştir. KOİ ve ÇKOİ giderim verimleri açısından değerlendirildiğinde 14. günde en yüksek KOİ ve ÇKOİ giderim verimi göstermiştir. 14.günün sonunda bitkide deformasyon ve ölüm gerçekleştiği için 14. gün sonrası analiz gerçekleştirilememiş ve bitkinin bozulması nedeniyle KOİ ve ÇKOİ de artış gözlenmiştir. Çalışma sonucunda 12. ve 14. günlerin çalışma süresi olarak seçilebileceği görülmektedir. 12. ve 14. gün KOİ ve ÇKOİ giderim verimleri değerlendirildiğinde beyaz ışıpta maksimum değere ulaşmıştır. 12. günde beyaz ışıpta KOİ giderim verimi %59 iken 14. günde bu değer %69'a ulaşmıştır. 14. Gün de KOİ giderim veriminde artış %10 civarındadır. ÇKOİ giderim verimi açısından incelediğimizde 12. günde beyaz ışıpta %71, 14. günde ise %75 olarak bulunmuştur. 14. gün de ÇKOİ giderim veriminde artış %4 civarındadır. Bu sonuçlar dikkate alındığında %69 KOİ ve %75 ÇKOİ giderim verimine ulaşabilmek için 14 gün bekleme süresinin yeterli olduğu görülmektedir.



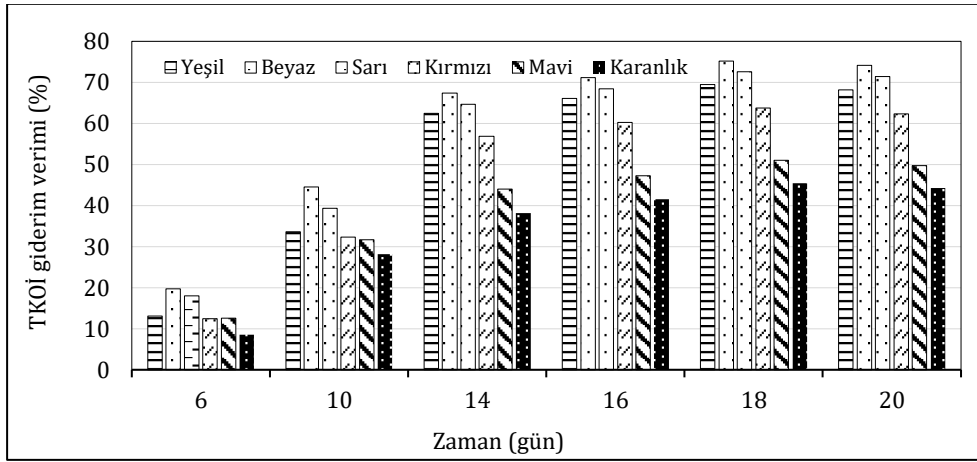
Şekil 6. Zamana bağlı TKOİ giderim verimi değişimi (%) (Time-Dependent COD removal efficiency %)



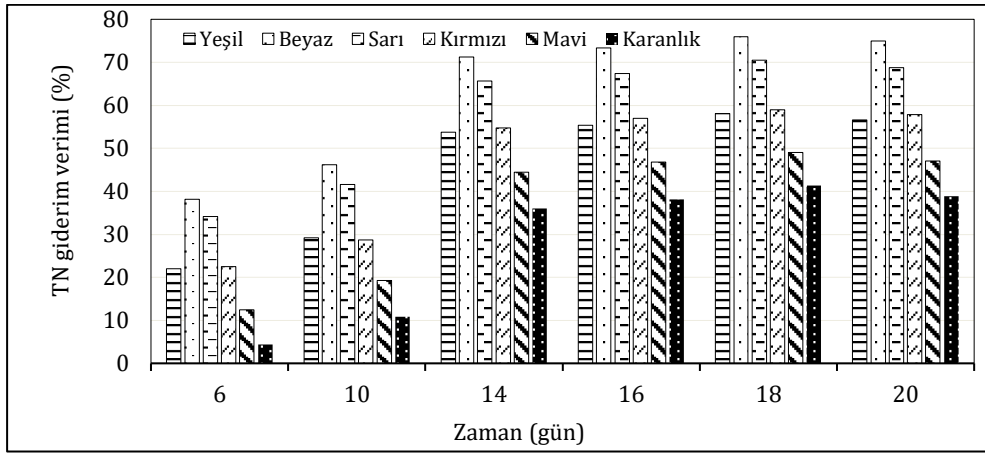
Şekil 7. Zamana bağlı ÇKOİ giderim verimi değişimi (%) (Time-Dependent SCOD removal efficiency %)

3.4. Verim Artırma Çalışması (Efficiency Increase Study)

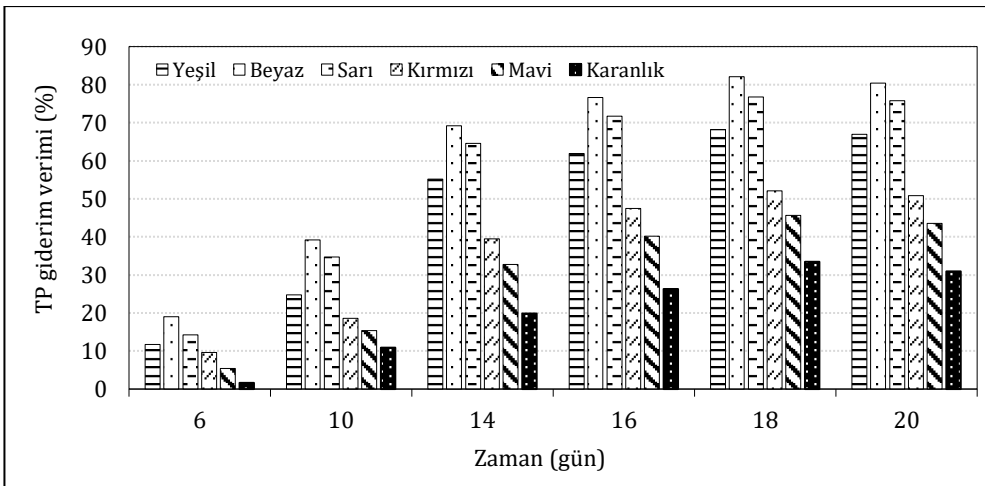
Çalışmada KOİ, TN ve TP giderim verimini artırmak için su bürülcesi bitkisi ile iki kademeli arıtım gerçekleştirilmiştir. Çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada atıksu 14 gün boyunca su bürülcesi bitkisiyle arıtıma tabi tutulmuş, ikinci aşamada ise bu bitkiler eleklerle su içinden alınarak tamamen ortamdaki temizlenmiş ve ortama yeni su bürülcesi bitkisi eklenerek ikinci kademe arıtım gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı seri bağlı arıtım sistemi olması durumunda arıtım verimindeki değişimleri incelemektir. Çalışma aynı ortam şartlarında gerçekleştirilmiş olup sadece 14. günün sonunda bitkilerin temizlenip tekrar ortama aynı miktarda su bürülcesi bitkisinin eklenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Su bürülcesi bitkisi ile farklı renk ışık kaynakları altında iki kademeli arıtım sonrası elde edilen KOİ, azot ve fosfor giderim verimleri sırasıyla Şekil 8, 9 ve 10'da gösterilmiştir. Çalışma sonuçları incelendiğinde KOİ, TN, TP açısından yine beyaz ışık altında diğer ışık kaynaklarına göre en yüksek verim gözlenmiştir. İki kademeli arıtım yönünden bakıldığında ikinci kademe olan 14. gün sonrası arıtım birinci arıtıma göre verimi bir miktar artırmıştır. KOİ giderim verimi ilk kademede beyaz ışıkta 14. günde %67, 16. gün sonunda %71 ve 18. gün sonunda %75 olarak bulunmuştur. KOİ giderim verimi ikinci kademe arıtım yapılması durumunda %67 den %75'e yükselmiştir. 18. günün sonunda KOİ giderim verimindeki artış %8 civarındadır. TN ve TP giderim verimleri açısından değerlendirdiğimizde 14. günde TN %71 den 18. günde %76, TP ise 14. günde %69 dan 18. günde %82 değerine yükselmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki TN ve TP arıtım verimleri ikinci kademeden eklenmesi ile TN için %5, TP için ise %13'lük bir artış göstererek maksimum arıtım verimine ulaşılmıştır. Analiz sonuçlarından da görüleceği üzere 20. gün de KOİ, TN ve TP değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Bu durumun su bürülcesi bitkisinin bozulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 8. Seri arıtmıda TKOİ giderim verimi (%) (TCOD removal efficiency % in serial purification)



Şekil 9. Seri arıtmıda TN giderim verimi (%) (TN removal efficiency % in serial purification)



Şekil 10. Seri arıtmıda TP giderim verimi (%) (TP removal efficiency % in serial purification)

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada gül işleme tesisinden açığa çıkan atık suyun Su börülcesi (*Salvania natans*) bitkisi kullanılarak arıtılabilirliği, bununla beraber farklı ışık ortamlarında arıtım performansları KOİ, TN ve TP giderim verimleri açısından değerlendirilmiştir. Çalışma da ayrıca verim artırmak amacıyla kademeli arıtım yapılmış ve kademeli arıtımın arıtım performansı değerlendirilmiştir.

Su börülcesi bitkisi için KOİ, ÇKOİ, azot ve fosfor giderim verimleri 14 günlük arıtım süresi sonunda en yüksek beyaz ışıktaki sırasıyla, %69, %71, %72 ve % 83 olarak bulunmuştur. Farklı renk ışık altında giderim verimleri beyaz > sarı > yeşil > kırmızı > mavi > karanlık ortam olarak sıralanmaktadır. *Su börülcesi* bitkisinin zamana karşı arıtım verimi incelendiğinde arıtım zamanı arttıkça giderim verimi de artmıştır. 4, 8, 12 ve 14. günde beyaz ışıktaki KOİ

giderim verimleri sırasıyla %12, % 50, % 58 ve % 68, ÇKOİ giderim verimleri ise %15, % 58, % 70 ve % 72 olarak bulunmuştur.

Su bürülcesi bitkisi ile kademeli olarak arıtma uygulandığı çalışmada 14. Günün sonunda sistemden bitkinin alınıp tekrar Su bürülcesi bitkisinin eklenmesi durumunda verimde artış gözlenmiştir. 14 gün süren birinci kademe arıtımda beyaz ışıkta, KOİ giderim verimi %67 iken ikinci kademedeki KOİ giderim verimi %7 artış göstererek 20 günlük bir bekleme süresi sonunda verim %74'e yükselmiştir. İkinci kademenin kullanılması 6 günlük bekleme süresi sonunda %7'lik bir artış meydana getirmiştir. 14. ve 20. günün sonunda beyaz led ışık altında elde edilen azot giderim verimleri sırasıyla %71 ve %74, fosfor giderim verimleri ise sırasıyla %69 ve %80 olarak bulunmuştur. İkinci kademenin eklenmesi ile azot gideriminin de %3, fosfor gideriminin de ise %11 artış gerçekleştirilmiştir. Bu konuda yapılan literatür çalışmaları ile kıyaslandığında (evsel atık suda 46 gün sonunda % 67,3 TN giderimi ve %14,2 TP) bizim çalışmamızda elde edilen verimlerin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu çalışma göstermiştir ki özellikle azot ve fosfor giderim açısından 14 gün gibi çok kısa sürede yüksek arıtım verimlerine ulaşılmıştır. Yüksek arıtım verimlerine ulaşılmasında beyaz led ışık kaynağı pozitif bir etki göstermiştir.

Gül atık suyunun arıtılmasında mevcut arıtma sistemleri göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen arıtma şekliyle gül atık suyunun yerinde arıtılması ve KOİ, TN ve TP gibi deşarj parametrelerinde yüksek giderim verimi açısından çevreye verilen kirliliğin azaltılması önemlidir.

Her ne kadar önerilen sistemin arıtma verimi oldukça yüksek olsa da deşarj standartlarını sağlamadığı göz önünde bulundurulduğunda bitkilerle arıtma yönteminin gül atık suyu arıtımında; ön arıtım ya da ikincil arıtım olarak uygulanabilir olduğu düşünülmektedir.

Çalışma laboratuvar ölçeklidir. Gerçek ölçekte üretimden çıkan gül atık suyu miktarları çok daha fazla olacaktır. Çalışmanın uygulamaya dönüşmesi için büyük ölçekte analizlenmesi gerekmektedir. Daha sonraki çalışmalarda yerinde ve led ışık kaynaklarıyla donatılmış büyük havuzlarda laboratuvar ölçekteki bu çalışmalar temel alınarak araştırmalar gerçekleştirilebilir.

Tesekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FYL-2019-7408 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Akten, M., Akten, S., 2008. Kentsel Atıksu Yönetimi ve Atıksuların Yeniden Kazanımında Yapay Sulak Alanların Çevresel Sürdürülebilirlik Üzerindeki Etkileri. TMMOB 2. Su Politikaları Kongresi, 483-491.
- Ansari, A.A., Gill, S.S., Lanza, G.R. Rast, W., 2011. Eutrophication: Causes, Consequences and Control, Volume 2. Book. Springer Dordrecht, ISBN: 978-94-007-7814-6 Published: 19 November 2013.
- APHA, AWWA, WEF., 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st ed. American Public Health Association, American Water Work Association. Water Environment Federation: Washington, DC.
- Avsar Y., Kurt U., Gönüllü T., 2007. Comparison of Classical Chemical and Electrochemical Processes for Treating Rose Processing Wastewater, Journal of Hazardous Materials, 148 , 340-345.
- Avşar Y., Kurt U. , Tosun İ., Günay A., 2005. Isparta Yöresinden Kaynaklanan Gülyağı Atıksularının Kimyasal Olarak Arıtılabilirliği, Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, Antalya, Türkiye.
- Bilir, S., 2010. Isparta İlinde Gülcülük ve Ekonomik Önemi. İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya Ana Bilim Dalı, Beşeri ve İktisadi Coğrafya Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Bruch, I., Fritsche, J., Bänninger, D., Alewella, U., Sendelov, M., Hürlimann, H., Hasselbach, R., Alewell, C., 2011. Improving The Treatment Efficiency of Constructed Wetlands with Zeolite-Containing Filter Sands. Bioresource Technology, 102 (2), 937-941.
- Çakırer G., Akan S., Demir K., Yanmaz R., 2017. Bahçe Bitkilerinde Kullanılan Işık Kaynakları. Akademik Ziraat Dergisi, Cilt 6, Özel Sayı:63-70.
- Dan, T.H., Quang, L.N., Chiem, N.H., Brix, H., 2011. Treatment Of High-Strength Wastewater in Tropical Constructed Wetlands Planted with Sesbania Sesban: Horizontal Subsurface Flow Versus Vertical Downflow. Ecological Engineering, 37(5), 711-720.
- Demirörs, B., 2006. Çukurova Bölgesinde Yapay Sulak Alan Teknolojisinin Kırsal Alanda Kullanımının Araştırılması, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.

- Erol, B., 1997. Yüzen Aquatik Bitki Sistemlerinde Azot Giderim Prensipleri. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- T.C. Ticaret Bakanlığı Esnaf, Sanatkârlar ve Kooperatifçilik Genel Müdürlüğü, 2019 Yılı Gül Çiçeği Raporu.
- Güler, 2010. Süleyman Demirel Üniversitesi Gül ve Gül Ürünleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Isparta. <http://gular.sdu.edu.tr>.
- Karagöz, S., 1998. Çöp Sızıntı Sularının Su Bitkileriyle Oluşturulan Sistemlerle Arıtılması. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Laabassi A., Boudehane A., 2019. Wastewater Treatment by Floating Macrophytes (*Salvinia Natans*) Under Algerian Semi-Arid Climate. *European Journal of Engineering and Natural Sciences*, 3(1), 103-110.
- Lee, S., Maniquiz, M.C., Kim, L.H., 2010. Characteristics Of Contaminants in Water and Sediment of a Constructed Wetland Treating Piggery Wastewater Effluent. *Journal of Environmental Sciences*, 22 (6) 940-945.
- Önder U., 2019. Gül İşleme Atıksuyunun *Chlorella Sp.* İle Arıtımı ve Sonrasında Biyogübre ve Sulama Suyu Açısından Değerlendirilmesi, Yayınlanmış Doktora Tezi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta
- Saeed, T., Sun, G., 2012. A Review on Nitrogen And Organics Removal Mechanisms in Subsurface Flow Constructed Wetlands: Dependency On Environmental Parameters, Operating Conditions And Supporting Media. *Journal of Environmental Management*, 112: 429-448.
- Su F, Li Z.,1,3, Li Y., 1, Xu L., Li Y., Li S., Chen H., Zhuang P., Wang F., 2019. Removal of Total Nitrogen and Phosphorus Using Single or Combinations of Aquatic Plants. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 16, 4663.
- TEPGE, 2022. GÜL, Tarım Ürünleri Piyasaları, Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü.
- Tosun, İ., Gönüllü, M.T. ve Arslankaya, E., 2002. Gülyağı Sanayi Proses Atıkları Özelliklerinin Belirlenmesi. I. Ulusal Çevre Sorunları Sempozyumu. Atatürk Üniversitesi, 16-18 Ekim 2002, Erzurum, 864-873.
- TÜBİTAK, MAM Çevre Enstitüsü, Yapay Sulak Alanlar El Kitabı, 2011.
- Uysal, Y., 1998. Atık Su Arıtım Sistemlerinde Yüzen Su Bitkilerinden *Lemna Minör (L)*'nin Besi Maddesi Giderimindeki Etkinliğinin Araştırılması. Yayınlanmış Yüksek Lisan Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin.
- Yavaş, Ö. 2017. Doğal Atıksu Arıtma Tesislerinin Verimliliğinin Değerlendirilmesi: Bursa İli Örneği. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.



MERMER ATIKLARININ PARKE TAŞI ÜRETİMİNDE AGREGA OLARAK KULLANILMASI

Ayşe BÜYÜKÜNSAL*, Bilgen AKKUŞ

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Mermer Atık, Beton Parke, Sürdürülebilirlik.</i>	<p>Bu çalışmada atık mermerlerin, beton kilitli parke taşlarında agrega olarak kullanılması yöntemi ile yeniden işlevsel hale getirilmesi, kısmen de olsa bu atıkların yönetilerek sürdürülebilirliğinin sağlanması hedeflenmiştir. Deneyler sırasında ilgili TSE Standartları ve Karayolları Teknik Şartnamesinden faydalanılmıştır. Beş farklı (%20 %40, %60 , %80 ve %100) karışım oranında toplamda 60 adet beton parke taşı ve buna ilave olarak 20 adet bir kenarı 10 cm olan küp numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin yarısı tuzlu suda yarısı da normal suda bekletilerek priz aldırılmıştır. Beton parke taşı numunelerine su emme oranını belirleme, aşınma direnci, yarmada çekme dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Küp numunelere ise basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Su emme oranını belirleme, basınç dayanımı, aşınma direnci deney verilerinin standartların içerisinde kaldığı görülmüştür. Yarmada çekme dayanımı deneyinin sonuçları incelendiğinde ise %20, %40 ve %60 oranında mermer agregası bulunan numunelerin yeterli dayanıma haiz olduğu; ancak %80 ve %100 oranında hazırlanan numunelerin ise dayanımının yetersiz olduğu görülmüştür. Sonuç olarak beton parke taşlarında atık mermerlerin agrega olarak %60 oranına kadar kullanılabilceği tespit edilmiştir.</p>

USE OF MARBLE WASTE AS AGGREGATE IN PAVEMENT STONE PRODUCTION

Keywords	Abstract
<i>Marble Waste, Concrete Paving, Sustainability.</i>	<p>In this study, it is aimed to re-functionalize waste marbles by using them as aggregate in concrete interlocking paving stones and to ensure the sustainability of these wastes by managing them. A total of 80 samples were prepared in five different mixture ratios. Half of the samples were kept in salt water and half in normal water to allow them to set. Water absorption rate determination, abrasion resistance and splitting tensile strength tests were applied to concrete paving stone samples. Compressive strength tests were performed on cube samples. It has been observed that the test data for determining water absorption rate, compressive strength and abrasion resistance are within the standards. When the results of the splitting tensile strength test are examined, it is seen that the samples containing 20%, 40% and 60% marble aggregate have sufficient strength; However, it was observed that the strength of the samples prepared at 80% and 100% was insufficient. As a result, it has been determined that up to 60% of waste marble can be used as aggregate in concrete paving stones.</p>

Alıntı / Cite

Büyükünsal, A., Akkuş, B., (2024). Mermer Atıklarının Parke Taşı Üretiminde Agrega Olarak Kullanılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(1), 241-254.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. Büyükünsal, 0000-0002-1689-5967
B. Akkuş, 0009-0005-8518-6397

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	08.01.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	27.02.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	11.03.2024
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: aysekacar@isparta.edu.tr, +90-246-211-1404

USE OF MARBLE WASTE AS AGGREGATE IN PAVEMENT STONE PRODUCTION

Ayşe Büyükinsal†, Bilgen Akkuş

Isparta University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, Isparta, Turkey

Highlights

- Sustainable construction and marble wastes.
- Sustainable construction pavement stone production
- Sustainable construction durability

Purpose and Scope

In the research conducted on the mass use of marble waste in concrete paving stones, it was also examined how concrete paving stones would be affected if exposed to salt, acid and different chemicals resulting from the sea, rain and various environmental effects.

Design/methodology/approach

In the research on the mass use of marble waste in concrete paving stones, a comprehensive literature review was made and similar studies were briefly mentioned. Later, under the leadership of Materials and Methods, whether the waste marbles generated in marble workshops and factories are suitable for mass cleaning in concrete paving stones. Portland cement and tap water were used in the concrete mortar. At the same time, natural aggregate with a diameter of 8 mm and waste marble pieces with a diameter exceeding 5 mm were evaluated collectively in concrete mixtures. A total of 60 concrete paving stones were prepared in five different mixture ratios (20%, 40%, 60%, 80% and 100%), which were subjected to four separate tests, and an additional 20 cube samples with a length of 10 cm along one side were prepared. In this way, a total of 80 samples were used in the experiment. The samples were set by keeping them in semi-saline water and then in normal water for 28 days.

Findings

As a result, it has been determined that up to 60% of waste marble can be used as aggregate in concrete paving stones. However, it has been observed that concrete paving stone with marble waste addition will not be negatively affected by salting against icing, salt, acid and various chemicals coming from the sea and rain. Thus, it was concluded that concrete paving stones can be used in residential areas close to Turkey's coastline and in cold climate regions.

Originality

In the study, a total of 60 concrete paving stone samples and 20 cube samples were prepared in sample groups with five different mixture ratios (20%, 40%, 60%, 80% and 100%). All experiments were carried out in two curing environments, normal water and salt water, for 28 days each.

† Corresponding author: aysekacar@isparta.edu.tr, +90-246-211-1404

1.Giriş (Introduction)

Modern dünyanın öne çıkan sorunlarının başında çevre meselesi gelmektedir. Dünya, orman tahribatı, küresel ısınma ve doğa kirliliği gibi önemli çevresel problemlerle karşı karşıyadır. Çevresel sorunlar arasında, doğal kaynakların aşırı kullanımı ve bunların gelecek nesillere yeterli miktarda devredilememesi öne çıkmaktadır. Bu bağlamda sürdürülebilirlik konusu önemli bir hale gelmiş, kaynakların yetersizliğini gidermek için atıkların geri dönüştürülebilir şekilde kullanılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Özellikle geri dönüştürülebilen malzemelerin, düşük enerji sarfiyatıyla, farklı şekillerde kullanılması, sürdürülebilir kalkınma ilkesine olumlu katkılarda bulunacaktır (Kaçar, 2018).

Agrega, su, çimento ve bazen katkı malzemelerinin birleşimiyle oluşturulan bir kompozit malzeme olan beton, Romalılardan bu yana kullanılmaktadır. Joseph Aspdin'in 1824'te Portland Çimentosunu bulmasıyla başlayan süreç, betonun vazgeçilmez bir yapı malzemesi haline gelmesini sağlamıştır. Betonarme yapılar 1800'lerin sonlarına doğru ortaya çıkmış, 1930'larda ise önerilmeli beton yapı sistemleri geliştirilmeye başlanmıştır. Özel parke makinelerinde kalıplar yardımıyla üretilen kilitli beton parke blokları hazır betonla benzer karışımlara sahip bir yapı malzemesidir. (Çelik vd, 2016).

Parke taşları, özellikle kentleşmenin gelişmesiyle ağır taşıt trafiğinin bulunmadığı yollarda ulaşım ve peyzaj amaçlı olarak kullanımı her geçen gün artan doğal veya yapay olarak elde edilen zemin kaplama malzemesidir. Doğal ve yapay olarak elde edilen bir zemin kaplama malzemesi olan parke taşlarının kullanımı, kentleşmenin ilerlemesiyle ağır taşıt trafiğinin olmadığı yollarda ulaşım ve peyzaj amacıyla hızla artmakta ve gün geçtikçe daha fazla talep görmektedir (Filiz vd, 2010).

Parke taşlarının kullanımının tercih sebepleri şunlardır: özel ağır araç ve donanıma duyulan ihtiyaç olmaksızın her türlü iklim koşulunda döşenebilmesi, kolay ve ekonomik bir şekilde onarılabilmesi, su ve don olaylarından etkilenmemesi özelliği, kış şartlarında kaymayı önleme, nakliyatının farklı araçlarla gerçekleştirilebilmesi, ekolojik dengeye katkı sağlama (yağmur sularının toprağa ulaşması), blokların tekrar kullanılabilir olması ve asfalt ile betona göre daha uygun maliyetli ve ekonomik bir şekilde üretilebilmesi gibi özellikler sayılabilir (Tekmen, 2006).

Çevre duyarlılığının arttığı günümüzde, mermer atıklarının plansızca bertaraf edilmesi ve bu atık depolama alanlarının giderek genişlemesi, toplum nezdinde olumsuz bir algı oluşturmaktadır. Hem maden işletmelerinde hem de üretim tesislerinde mermer üretimi devam ettiği sürece, bu atıkların miktarının artması kaçınılmaz bir gerçektir. Oluşan büyük parça, plaka ve ince toz halindeki bu doğal taş atıklarının değerlendirilmesi konusunda bulunabilecek çeşitli alternatifler, sadece ülke ekonomisine katkı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda çevresel sorunu ortadan kaldıracaktır (Göktaş, 2013). Ayrıca, hızla büyüyen inşaat sektörünün agrega talebinin sürekli arttığı bir gerçektir. Betonarme yapıların inşasında kullanılan betonun büyük bir kısmını oluşturan agrega ihtiyacı, gün geçtikçe yükselmektedir. Bu talebin karşılanması için mermer parça atıklarının alternatif bir kaynak olarak kullanılması, inşaat sektörünün gereksinimlerine cevap verirken, aynı zamanda doğal taş sektörünün karşılaştığı önemli bir atık sorununu çözmeye katkıda bulunacaktır (Arsoy vd., 2019).

Türkiye, mermer yataklarının en zengin olduğu Alp kuşağında konumlanan, 5,1 milyar m³ - 13,9 milyar ton potansiyel mermer rezervine sahip bir ülkedir (Erdemoğlu ve Göktaş, 2018). Bu miktar, tahmini olarak dünya yer alan rezervlerin %33'üne karşılık gelmektedir, bu da Türk doğal taş sektörünün küresel arenadaki önemini vurgulamaktadır. Çeşitlilik, rezerv zenginliği, sektör deneyimi, bol ham madde kaynağı, deniz taşımacılığında lojistik avantajlar, dinamik sektör yapısı, yeni teknolojilerin kullanımı ve geniş renk skalası gibi faktörlerle Türk doğal taş sektörü, dünya pazarında kayda değer bir konuma sahiptir (TCTB, 2021). Mermer işletmelerinin üretim kapasitesine bağlı olarak ortaya çıkan mermer çamuru ve parça mermer atıkları, çevreye olan olumsuz etkileriyle dikkat çeker. Bu atıkların tarım arazilerine veya dere kenarlarına bırakılması, doğal çevre ortamını tahrip etmektedir. Ayrıca, mermer fabrikalarında atıkların depolanması için geniş arazi gereksinimi, önemli bir maliyet unsuru oluşturmaktadır (Erdemonar, 2022).

Sürdürülebilir çevre hedefleri doğrultusunda, sınırlı kaynakların kullanımının azaltılması, inşaat sektöründe diğer sektörlerde olduğu gibi öne çıkan bir konudur (Çolakoğlu, 2022). Atık yönetimi, çevre koruma politikaları arasında büyük bir öneme sahiptir. Üretilen atıkların çevre ve insan sağlığına olan riskini ortadan kaldırarak, ekonomik bir kaynağa dönüştürülmesini amaçlayan atık yönetim stratejileri, ülkemizde de dünya genelinde olduğu gibi önemli bir politika haline gelmektedir. Bu önlemler için gerekli yatırımların yapılmasıyla hem çevre korunmuş olacak hem de uzun vadede sanayi kuruluşlarına fayda sağlanacaktır (Keskin ve Şahmaran, 2018).

Hızlı endüstrileşme ve şehirleşme, buna paralel olarak artan nüfus, gelişen teknoloji ve inşaat sektöründeki ilerlemeler nedeniyle, katı atık kontrolü ve yönetimi, modern toplumların karşılamak durumunda olduğu önemli bir sorun haline gelmiştir. Katı atıklar, sınırlı doğal kaynakların azalması ve çevresel kirlilik gibi bir dizi çevresel

ve ekonomik zorluğa sebep olmaktadır (İmiş, 2022).

Mermer atıklarının beton parke taşı içerisinde agrega olarak kullanılmasına yönelik yapılan araştırmada öncelikli olarak literatür taraması yapılmış olup bu ve benzer konularda yapılan çalışmalardan kısaca bahsedilmiştir. Sonrasında. Materyal ve Yöntem başlığı altında, mermer atölye ve fabrikalarında meydana gelen atık mermerlerin, beton parke taşlarında agrega olarak kullanımının uygun olup olmadığı incelenmiştir. Beton harcında Portland çimento ve şebeke suyu kullanılmıştır. Aynı zamanda beton karışımlarında çapı 8 mm'yi geçmeyen doğal agrega ile çapı 5 mm'yi geçmeyen atık mermer parçaları agrega olarak değerlendirilmiştir. Dört ayrı deneye maruz bırakılan beş farklı (%20 %40,%60, %80 ve %100) karışım oranında toplamda 60 adet beton parke taşı ve buna ilave olarak 20 adet bir kenarı 10 cm olan küp numuneler hazırlanmıştır. Bu şekilde toplamda 80 adet numune deneylerde kullanılmıştır. Numunelerin yarısı tuzlu suda yarısı da normal suda 28 gün oda sıcaklığında bekletilerek priz aldırılmıştır.

Ülkemiz de hava şartlarından kaynaklı buzlanmayı engellemek için tuzlama çalışması yapılmaktadır. Ayrıca sahil kenarlarında beton parke taşı kullanım oranı gün geçtikçe artmaktadır. Bu sebeple çalışmada beton parke taşlarının, denizden, yağmur ve çeşitli çevresel etkilerden kaynaklanan tuz, asit ve farklı kimyasallara maruz kalması durumunda nasıl etkileneceği incelenmiştir. Bu tür doğal etkilerin ikamesi için numunelerin yarısı tuzlu suda bekletilerek deneyler yapılmıştır. Numunelere su emme oranını belirleme deneyi, aşınma direnci deneyi, yaramada çekme dayanımı deneyi ve basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Bu tür doğal etkilerin ikamesi için numunelerin yarısı tuzlu suda bekletilerek deneyler yapılmıştır. Numunelere su emme oranını belirleme deneyi, aşınma direnci deneyi, yaramada çekme dayanımı deneyi ve basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Su emme oranını belirleme deneyi, aşınma direnci deneyi ve basınç dayanımı deneyi verilerinin şartnamede bahsi geçen limitleri sağladığı görülmüştür. Yarmada çekme dayanımı deneyinin sonuçları incelendiğinde ise %20 ,%40 ve %60 oranında mermer agregası bulunan numunelerin yeterli dayanıma haiz olduğu; bunun yanında %80 ve %100 oranında hazırlanan atık mermer agregalı numunelerinin ise dayanımının yetersiz olduğu görülmüştür. Buna ilave olarak basınç dayanımı deney verileri kullanılarak elastisite modülü hesaplanmıştır.

Sonuç olarak beton parke taşlarında atık mermerlerin agrega olarak %60 oranına kadar kullanılabilceği tespit edilmiştir. Yapılan deneylerde TSE'nin ilgili standartları ve Karayolu Teknik Şartnamesi (2013) Prefabrik beton parke numunelerine yapılacak deneyler ve uygunluk kriterlerinden faydalanılmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Ülkemiz ve dünya literatüründe parke taşlarıyla ilgili çalışmalar, beton ve beton özellikleriyle ilgili çalışmalara göre sınırlıdır. Beton üretiminde ve parke taşlarında ikame ürün kullanımı konusunda ülkemizde yapılan çeşitli çalışmalar bu başlıkta özetlenmiştir.

Tekmen (2006), araştırmasında, ülkemizde yaygın olarak kullanılan kireçtaşlarından üretilen kilitli beton parke bloklarını mekanik özellikleri açısından değerlendirmiştir. Maliyeti düşürmek için agrega miktarının artırılabilceği veya çimento miktarının azaltılması için kilitli parke taşı bileşimine uçucu kül, cüruf gibi atık malzemelerin eklenebileceğini belirtmiştir. Bu malzemelerin ülkemizde bol miktarda bulunmasından dolayı, atık malzemelerden üretilen kilitli parke taşlarının ülke ekonomisine önemli derecede katkılar sağlayabileceğini öne sürmüştür.

Açıkgöz (2008)'ün Uçucu Küllerin (UK) Beton Kilitli Parke Taşı Üretiminde Kullanımını Araştırılması çalışmasına göre, yüksek oranda UK kullanımı genel olarak dayanım oranını düşürmüştü, ancak erken yaşta (28 gün) tuz etkisi altında daha yüksek bir dayanım sergilemiştir. UK ikame oranındaki artış, taze betonun su ihtiyacını artırmış, yüksek UK oranına sahip numunelerin s/b oranı sabit tutulduğu için iyi sıkışmamış olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada sabit s/b oranı uygulandığı için, farklı UK ikame oranlarıyla işlenebilirlikte farklı parke taşları üretilmiştir. UK kullanılan numunelerin aşınma direnci ve su emme oranı, tuzlu su kürü altında daha düşük bulunmuştur. Ayrıca, mermer atıklarının beton içinde ikame agrega olarak kullanılması deneylerinde, aşınma direnci ve su emme oranı yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Ceylan ve Mança (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışma, mermer parça atıklarının beton üretiminde agrega olarak kullanılması hedefiyle gerçekleştirilmiş ve elde edilen deney sonuçları olumlu bir tabloyu ortaya koymuştur. Kontrol grubu olarak tercih edilen kırmataş agregası ile parça mermer atıkları arasında yapılan karşılaştırmalı analizler, Kuru Birim Hacim Ağırlığı (KBHA), Los Angeles aşınma direnci, özgül ağırlık, don kaybı ve don kaybı sonrası aşınma deneylerinde standartlara uygun sonuçlar elde edilmiştir. Mermer atık agregalarına ait değerler, kontrol grubu olan kırmataş agregalarına oldukça benzer sonuçlar sergilemiştir.

Bu sonuçlar, mermer agrega olarak atıklarının kullanılabilirliğini somut bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu verilere dayanarak, mermer atıklarının iri ve ince agrega olarak beton üretiminde etkili bir şekilde kullanılabilmesi düşünülmektedir. Elde edilen bu bulgular, yapılan deneylerin güvenilirliğini destekleyen niteliktedir.

Çelik vd. (2016)'nin yaptığı araştırmada, doğaltaş kırmataşların kilitli beton parke bloklarının mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, bazalt, andezit ve mermer numuneleri belirli fraksiyonlara ayrılmış (0-4 mm ve 4-12 mm), ardından bu numuneler beton karışımında agrega olarak kullanılmıştır. Deneylerin sonuçlarına göre, mermer ve bazalt kökenleri farklı olsa da dayanım sonuçları birbirine oldukça yakındır. Ancak, andezit numuneleri geç dayanım almakta ve aynı zamanda yüksek dayanım değerlerine ulaşmamaktadır. Bu durum, andezitin üretimde kullanılmasının zaman açısından dezavantajlı ve dayanım sonuçları bakımından daha düşük olacağını göstermektedir. Yapılan deneylere göre, TSE ölçütlerine uygun sonuç veren mermerler, maliyet ve kalite kapsamında üretim için en uygun hammadde olarak önerilmektedir. Bu çalışma, tezin konusu olan mermer atıklarının agrega olarak geri dönüşüme kazandırılmasının ekonomik ve uygulanabilirlik açısından isabetli bir seçenek olduğunu göstermektedir.

Durmuş ve Şimşek (2008)'in ifadesine göre, beton kilit parke taşı üretiminde Uçucu Kül (UK) kullanıldığında, beton kilit taşının dayanımında standart ve tuzlu kürlerde beton kilit taşının yaşı arttıkça dayanımında da artış gözlenmektedir. Tuzlu su kürü, yarmada çekme dayanımında standart küre göre dayanımının daha düşük olduğu görülmüştür. Kilitli parke taşlarının üzerine yapılan aşınma dayanımında genel olarak tuzlu su kürüne maruz kalmış numunelerin aşınma kaybı değerleri daha yüksektir. Kilitli parke taşında mermer agregaların kullanılması durumunda elde edilen veriler, tuzlu suda priz aldırılmış olan numunelerin dayanımının standartlarda kaldığı ve dış etkilerden etkilenmediği şeklinde gözlemlenmiştir.

Erdemonar (2022)'in çalışmasına göre, Mermer atıklarının ekonomiye kazandırılabilmesi için geri kazanım politikaları geliştirilmeli ve desteklenmelidir. Mermerin ocaktan çıkarma ve fabrikada işleme yöntemleri doğal yapısına uygun olarak belirlenmelidir. Mermer ocaklarının işlevini tamamlaması durumunda, içinde bulunduğu doğal ortama uygun bir şekilde restore edilmelidir. Bahsedilen geri kazanım politikalarının geliştirilebilmesi için bilimsel araştırmalara ve deneysel çalışmalara ihtiyaç vardır.

Topçu ve Uygunoğlu (2010)'nun yaptıkları araştırmada, agrega ocaklarından elde edilen kırmataşın yerine atık mermer agregalarının kırılarak betonda kullanılması incelenmiştir. Farklı su bağlayıcı oranlarıyla üretilen betonların basınç dayanımları, mermer atığı kullanılması durumunda ve en düşük su bağlayıcı oranında kırmataş agregası kullanılan betonlara göre %12 oranında düşük bir değer elde edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, mermer agregalarının kırmataş agregaları yerine tercih edilmesi durumunda dayanım kaybı gözlemlenmemiştir. Bu çalışmada aynı yöntem kullanılarak kilitli parke taşlarında atık mermer parçalarının agrega olarak kullanılması önerilmiş ve atık sorununun ekonomik bir yöntemle çözülmesine katkı sağlanmıştır.

Filiz ve diğerleri (2010)'nin çalışmasına göre, atık mermer tozunun parke taşlarında kullanılmasıyla ilgili elde edilen bulgular, çimento çeşidinin s/ç oranı ve mermer tozu (MT) yer değiştirme oranının değişimine göre incelenmiş ve ilgili standarda göre (TS 2824 EN 1338) değerlendirilmiştir. Parke taşları kullanımları sırasında aşınma, çekme, basınç ve donma-çözülme etkilerine oldukça fazla maruz kalmaktadır. MT'nun endüstriyel bir atık olarak parke taşlarında kullanılabilirliğinin araştırılmış, TS 2824 EN 1338'e göre mermer tozunun parke taşı imalatında kullanılabilmesi ve elde edilen numunelerin mekanik ve fiziksel performansını artırdığı sonucuna varılmıştır.

Babalık (2022) tarafından yapılan çalışmada, geri dönüştürülmüş agrega kullanımının çevresel etkileri, yaşam döngü değerlendirme (YDD) yöntemi ile incelenmiştir. Çalışmada, 1 m³ genleştirilmiş dolgu agrega betonu (GDAB) ve normal betonun (NB) üretiminin çevresel etkileri değerlendirilip karşılaştırılmış, ayrıca sadece çevresel etkilerin hesaplanmasında kullanılan madde ve enerji girdileri temel alınarak basit bir maliyet analizi yapılmıştır. İncelemede GDAB üretiminde taşıma mesafeleri ve kullanılan süper akışkanlaştırıcı malzemenin değiştirilmesinin çevresel etkileri azaltılabileceği belirlenmiştir. Çalışma, atık mermerlerin sadece beton ve kilitli parke taşlarında değil, aynı zamanda çimento üretiminde de kullanılabilmesini destekler niteliktedir.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Çalışma da uygulanan deneyler Türk standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Deneyler Özkul Beton Elemanları A.Ş. ye ait laboratuvarlarda yapılmıştır. Çalışmada Ankara ili ve çevresinde faaliyet gösteren mermer fabrikalarından çıkan mermer atıklarından elde edilen kırılmış agregalar kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Beton karışım suyu olarak fabrika şebeke suyundan faydalanılmıştır. Çalışmada agrega olarak; "4-8 mm" boyutlarında doğal agrega ile atık mermerden elde edilen "3-5 mm" boyutlarında mermer agregalar ikame olarak kullanılmıştır. Ayrıca yarmada çekme deneyi , tuzlu su emme deneyi aşınma direnci deneyi ve basınç dayanımı deneyi yapılmıştır.

3.1. Materyal (Material)

3.1.1. Mermer agrega (Marble aggregate)

Deneysel materyal olarak kullanılan doğal agregalar, fabrikada beton parke taşlarının imalatında kullanılan ve kırılmış olarak hazır gelen malzemelerden sağlanmıştır. Mermer agregaları ise Ankara'da bulunan mermer atölyelerinden temin edilmiştir. Yapılan deneylerde atık mermer parçaları, fabrikada bulunan kırıcı makinesi vasıtası ile 3-5 mm boyutlarına getirilerek, ince agrega olarak kullanılmıştır. Bu işlemler için fabrikadaki büyük ve küçük çeneli iki farklı ağız açıklığına sahip kırıcılar kullanılmıştır. Kırma işlemi esnasında agregalar ilk önce 9-5 mm sonra 5-3 mm çaplarına sahip iki farklı oyuta getirilmiştir. Daha sonra elde edilen agregalar elek analizine tabi tutularak deneylerde kullanılacak olan standartlardaki boyutlar sağlanmıştır.

3.1.2. Çimento (Cement)

Deneyler de bağlayıcı olarak kullanılan çimento CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu olup, fabrikada kilitli parke üretimin de kullanılmaktadır. Bu çimentonun özellikleri şu şekildedir: Priz Başlama Süresi ≥ 60 dakika, Genleşme $\leq \%10,2$ Günlük Dayanım $\geq 20,0$ MPa, 28 Günlük Dayanım $\geq 42,5$ N/mm² $\leq 62,5$ N/mm², Özgül Yüzey 3400-3900 c m²/g.

Karışımlarda kullanılan su, Ankara'da halkın kullanımına sunulan şehir şebekesinden temin edilmiştir.

3.1.3. Deney numunelerinin hazırlanışı (Preparation of test samples)

Numunelerin hazırlanması esnasında kum ile birlikte, %80 doğal agrega ile %20 oranında mermer agrega ve çimento mikserde koyularak kuru halde karıştırılmıştır. Homojen bir yapıya geldikten sonra mikserde su konularak karıştırılmaya devam edilmiştir. Buradan elde edilen harç kalıplara dökülerek kilit taşı şekli verilmiştir. Kalıplara dökülen numuneler, priz alması için fırına gönderilmiştir. Fırınlanmış numuneler bu işleminden sonra deneylerdeki standartları sağlaması için 28 er gün normal ve tuzlu suda bekletilmiştir. Aynı işlemler söz konusu süreç dahilinde %40, %60, %80 ve %100 oranlarında mermer agregası kullanılarak tekrarlanmıştır. Buna ilave olarak basınç dayanım deneyinde kullanılmak üzere bir kenarı 10 cm olan küp şeklinde numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelerde de bahsi geçen oranlarda mermer agregası ikame olarak kullanılarak aynı süreçlerde tuzlu ve normal suda bekletilip priz aldırılmıştır (Şekil 1). Bahsedilen sürenin sona ermesi akabinde hazırlanan numuneler deneylerde kullanılmak üzere laboratuvara sevk edilmiştir. Hesaplamalar doğrultusunda deneyde kullanılan malzeme miktarları Tablo 1' de aşağıda verilmiştir.



Şekil 1. Deney hazırlıkları (Experimental preparations)

Tablo 1. Deneide kullanılan malzeme miktarları (Amounts of materials used in the experiment)

NO- İKAME YÜZDESİ (%)	ÇİMENTO (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Kum (kg/m ³)	Doğal Agregası (kg/m ³)	Mermer Agregası (kg/m ³)	Toplam Ağırlık (Kg)
1 0	250	375	625	1.250	-	2.500
2 20	250	375	625	1.000	270	2.520
3 40	250	375	625	750	540	2.540
4 60	250	375	625	500	850	2.600
5 80	250	375	625	250	1.170	2.670
6 100	250	375	625	-	1.440	2.690

3.2.Deney Yöntemleri (Test Methods)

Çalışmada uygulanan tüm deneyler Türk Standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Deneyler Özkul Beton Elemanları A.Ş. ye ait laboratuvarlarda yapılmıştır (Şekil 2). Agregası olarak tane çapı en fazla 8 mm olan kalker kökenli kırmataş agregası ile tane çapı en fazla 5 mm olan atık mermer agregası kullanılmıştır. Karışımlarda şebeke suyu kullanılmış olup herhangi bir kimyasal katkı malzemesi kullanılmamıştır. Çalışma kapsamında Karayolları Teknik Şartnamesi (2013) beton parke taşları özelliklerine uygun olarak doğal agregası gradasyonu hazırlanmıştır. Bu gradasyon sabit tutularak atık mermerler agregası karışım grubuna kütlece %20, %40, %60,%80 ve %100 oranında ikame edilmiştir. Dört ayrı deneye tabi tutulan beş farklı (%20,%40,%60,%80 ve %100) karışım oranına sahip numune gruplarında toplamda 60 adet beton parke taşı numunesi ve 20 adet küp numunesi hazırlanmıştır. Deney raporlarında katkısız şahit numuneler %0 olarak gösterilmiştir. Bu şahit numuneler için daha önceden fabrikada üretilen doğal agregalı kilit parke taşları kullanılmıştır. Tüm deneyler normal su ve tuzlu su olmak üzere iki adet kür ortamında 28 er gün bekletilerek yapılmıştır. Deneylerde, beton tasarımında beton sınıfı C25 seçilmiştir.



Şekil 2. Laboratuvar ortamı (Laboratory)

3.2.1. Yarmada çekme dayanımı deneyi (Splitting tensile strength test)

Yarmada çekme deneyi TS 2824 EN 1338'e göre yapılmıştır. Klasik 8 cm kalınlığında kilit taşı şeklinde hazırlanan numuneler (20-25) °C sıcaklıktaki suda yirmi sekiz gün süreyle bekletilmiştir. Sudan çıkarılan numuneler kurutularak (sadece yüzeyindeki sular giderilene kadar) deneye tabi tutulmuştur. Bu deney için öncelikle numuneler arasından rastgele seçilen 5 adet katkısız şahit numune yarmada çekme deneyine tabi tutularak ortalama değerler bulunmuştur. Aynı deney tuzlu su küründe bekletilen şahitli numunelerde tekrarlanmıştır. Bundan sonra normal suda bekletilen katıksız numuneler ile tuzlu suda bekletilen katıksız numuneler üzerinde deneyler tekrarlanmıştır. Bu deneyde numuneler test makinesine, kilit taşının uzun kenarına paralel olacak şekilde yerleştirilmiştir. Test makinesi yükü saniyede 0,01 MPa ile başlayarak saniyede 0,05 MPa yı geçmeyecek şekilde uygulanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Yarmada çekme dayanımı deneyi (Splitting tensile strength test)

3.2.2. Su- Tuzlu su emme deneyi (Water- Salt water absorption test)

Deneye tabi tutulan numuneler, oda sıcaklığında (yaklaşık 20-25°C) 28 gün süre ile su dolu havuzda bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda su havuzunda bekletilen numuneler çıkartılarak bir bez yardımı ile kurulanmış ve ilk tartımı yapılmıştır. Tartılan numune 3 gün süre ile 105°C sıcaklıkta sabit kuru kütleye ulaşınca kadar kurutulmuştur. Kurutulan numuneler tekrar tartılmıştır. Standartlara göre son tartılan değer ile ilk tartılan değer arasındaki kütleli değişim en fazla % 6 olması gerekmektedir. Aynı işlemler tuzlu suda bekletilen numunelere de yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen değerler bu sınırın altında kalmıştır.

3.2.3. Aşınma direnci deneyi (Wear resistance test)

Parke taşının üst yüzünü standart şartlar altında aşındırıcı çark ile aşındırması yapılarak aşınma direnci deneyi uygulanmıştır. Aşındırma makinesi 200 dev/dk'da çalışan ve bir mil etrafında dönmesini sağlayan iki başlı bir mekanizmadan oluşmaktadır. Deney, hazırlanmış olduğumuz (normal su ve tuzlu su küründe bekletilmiş) orijinal ölçülerdeki beton kilit taşları üzerinde yapılmıştır (Şekil 4). Deneyden hemen önce, işlem yapılacak numune yüzeyi, tel fırça ile temizlenmiştir. Numuneler deneye tabi tutulmadan önce hassas kumpasla ölçülmüştür. Numune taşıyıcı teşkilata yerleştirilerek, aşındırma makinesi çalıştırılmıştır. Aşındırıcı dişler numunenin üzerinde 200 dev/dk ya çıkana kadar uygulanmıştır. Bu aşamadan sonra aşınmaya maruz kalmış numuneler yerinden çıkarılarak, tel fırça ile temizlenmiştir. Bu aşındırma işlemi aynı şekilde dört kere uygulanmıştır. Son işlem olarak makineden alınan numuneler temizlenerek kumpasla ölçüm yapılmıştır. Deneyden çıkan numune ölçümleri sonucunda, ilk ölçümle son ölçüm arasındaki fark mm cinsinden tespit edilmiştir.



Şekil 4. Aşınma direnci deneyi (Wear resistance test)

3.2.4. Basınç dayanımı deneyi (Compressive strength test)

Basınç dayanımı deneyi TS EN 12390-3'e göre yapılmıştır. Bir kenarı 10 cm olan küp şeklinde 20 adet numune hazırlanmıştır. Bu numunelerde de kilit parke numunelerinde uygulanan mermer agregası ikame yüzde oranları aynı şekilde uygulanmıştır. Hazırlanan numuneler (20-25) °C sıcaklıktaki normal ve tuzlu suda yirmi sekiz gün süreyle bekletilmiştir. Sudan çıkarılan numuneler kurutulularak (sadece yüzeyindeki sular giderilene kadar) deneye

tabi tutulmuştur. Bu deneyde küp numune test makinasına beton dökme yönüne dik bir şekilde, merkezleme aparatı yardımı ile konumlandırıldıktan sonra teste başlanmıştır. Test makinası 300 ton basınç kapasiteli bir pres olup numunelere uygulanan yük düşük seviyede başlayıp numune kırılana kadar periyodik olarak otomatik bir şekilde arttırılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Basınç dayanımı deneyi (Compressive strength test)

3.2.5. Elastisite modülü tayini (Determination of Elasticity Modulus)

Betonun elastisite modülü literatürde çeşitli şekillerde tanımlanmıştır. Bunlardan en yaygın olanlar şunlardır:
1- Başlangıç elastisite modülü, $(\sigma-\epsilon)$ eğrisinin başlangıç noktasına çizilen teğetin eğimini ifade eder. Bu modül aynı zamanda dinamik modül olarak adlandırılır. Beton düşük gerilmelere maruz kaldığında, başlangıç modülü kullanılarak daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilir.

2-Teğet modülü, $(\sigma-\epsilon)$ eğrisine herhangi bir noktada çizilen teğetin eğimini ifade eder.

3-Sekant modülü, orijinden geçen $(\sigma-\epsilon)$ eğrisine herhangi bir noktada çizilen sekantın eğimini tanımlar. Genellikle sekant modülü, gerilme düzeyini belirlemek için $(0,5f_c)$ noktasına göre hesaplanır. Bu tanımlamalar, betonun mekanik özelliklerini tanımlamak ve analiz etmek için farklı perspektifler sunar (Yüksel, 2001).

Betonun elastisite modülünü doğru ve kesin bir şekilde tanımlamak mümkün olmadığı için, pratikte kullanılan elastisite modülü değerleri genellikle belirli bir yükleme durumuna ve süreye bağlı olarak değişir. Aşağıda TS-500/2000 yönetmeliğinde önerilen elastisite modülü hesap formülü verilmiştir. Ancak bu değerler, kalıcı yük durumunda zamanla yarı yarıya veya üçte birine kadar azalacaktır. Aşağıdaki (1) denklem, SI birimleri cinsinden yazılmış olup, metrik eşdeğeri parantez içinde verilmiştir.

$$E_{cj} = 3250 \sqrt{f_{cj}} + 14000 \quad (\text{metrik, } 10270 \sqrt{f_{cj}} + 140000) \quad (1)$$

E_{cj} : j günlük betonun elastisite modülü

f_{cj} : j günlük betonun basınç dayanımı

Genelde elastisite modülü denince, 28 günlük betonun ani yükleme altındaki elastisite modülü anlaşılır. E_{c28} yönetmeliklerdeki değerler, "sekant" elastisite modülleridir (Dandin, 2009).

4. Araştırma Bulguları (Research Findings)

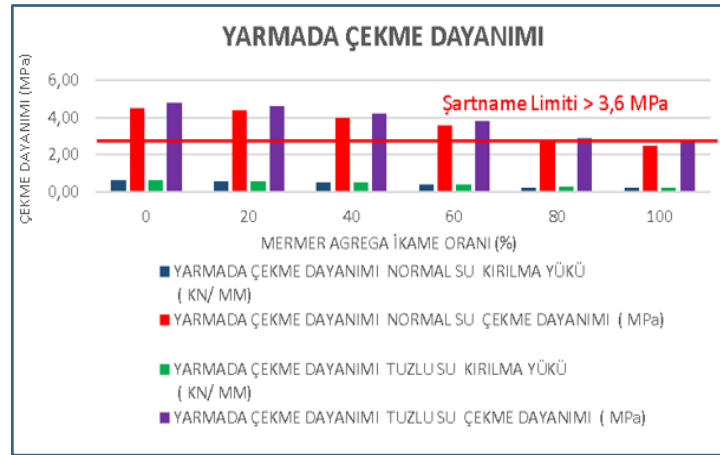
4.1. Yarmada Çekme Dayanımı Bulguları (Splitting Tensile Strength Findings)

Numunelere uygulanan yarmada çekme deneyine ait sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Yarmada çekme dayanımı deneyi sonucu (Splitting tensile strength test result)

NO- İKAME YÜZDESİ (%)	YARMADA ÇEKME DAYANIMI			
	NORMAL SU		TUZLU SU	
	KIRILMA YÜKÜ (KN/ MM)	ÇEKME DAYANIMI (MPa)	KIRILMA YÜKÜ (KN/ MM)	ÇEKME DAYANIMI (MPa)
1 0	0,61	4,50	0,62	4,80
2 20	0,55	4,40	0,58	4,60
3 40	0,50	4,00	0,53	4,20
4 60	0,40	3,60	0,42	3,80
5 80	0,25	2,80	0,27	2,90
6 100	0,22	2,50	0,24	2,70

Deney verileri ışığında; normal ve tuzlu suda bekletilen numunelerin yarmada çekme dayanım testlerinde hazırlanan numunelerde %20 , %40 ve %60 oranında ikame edilen mermer agregasının yeterli dayanım gösterdiği ve asgari standart olan 3,6 MPa'nın üzerinde değerler verdiği görülmüştür. Buna karşın %80 ve %100 oranında ikame edilen mermer agregası ile hazırlanan numunelerin ise yeterli dayanımı sağlamadığı ve standardın altında (2.9 ve 2.7 MPa) kaldığı tespit edilmiştir (Şekil 6).

**Şekil 6.** Yarmada çekme dayanımı deney sonuç grafiği (Splitting tensile strength test result chart)

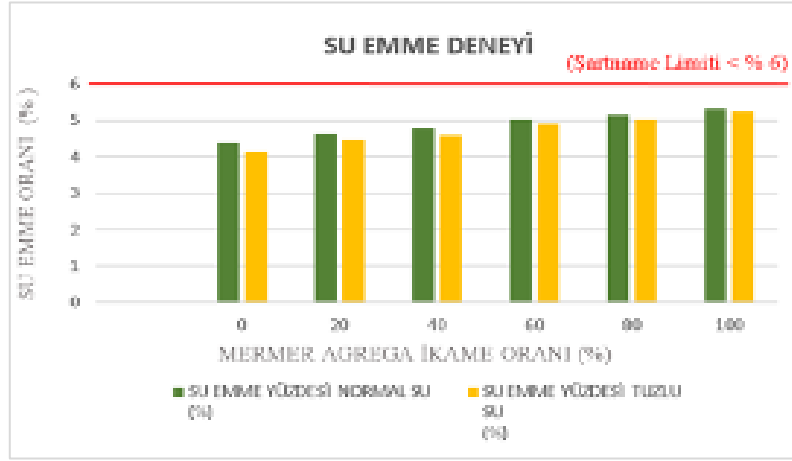
4.2. Su-Tuzlu Su Emme Bulguları (Water-Salt Water Absorption Findings)

Numunelere uygulanan normal su ve tuzlu su emme deneyi sonuçları Tablo 3'de yer almaktadır.

Tablo 3. Su emme deneyi sonuçları (Water absorption test results)

NO- İKAME YÜZDESİ (%)	SU EMME YÜZDESİ	
	NORMAL SU (%)	TUZLU SU (%)
1 0	4,37	4,12
2 20	4,62	4,45
3 40	4,78	4,57
4 60	5,02	4,89
5 80	5,15	5,02
6 100	5,31	5,25

Deney verileri ışığında; normal ve tuzlu suda bekletilen numunelerin su emme oranı % 6 üst sınırının altında kalmış olup, istenilen standardı sağladığı gözlemlenmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Su emme deneyi sonuç grafiği (Water absorption test result graph)

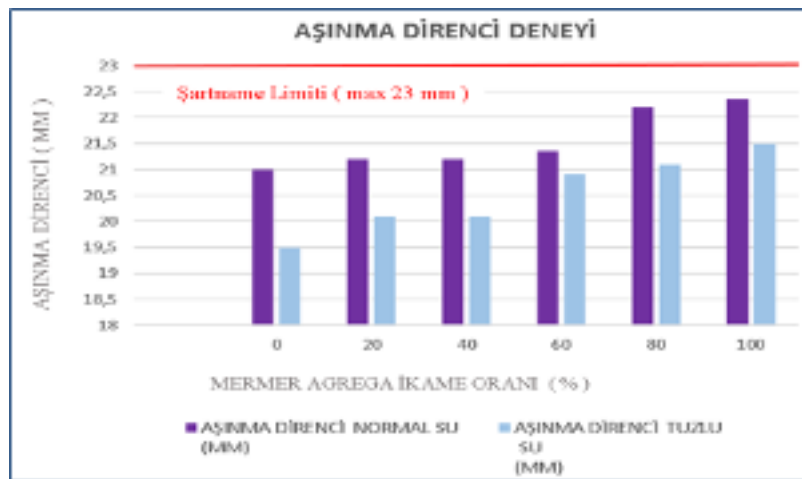
4.3. Aşınma Direnci Bulguları (Wear Resistance Findings)

Aşınma direnci deneyinden elde edilen ölçümler Tablo 4' de yer almaktadır.

Tablo 4. Aşınma direnci deneyi sonuçları (Wear resistance test results)

NO- İKAME YÜZDESİ (%)	AŞINMA DİRENCİ	
	NORMAL SU (MM)	TUZLU SU (MM)
1 0	21,0	19,5
2 20	21,2	20,1
3 40	21,2	20,1
4 60	21,4	20,9
5 80	22,2	21,1
6 100	22,4	21,5

Deney verileri ışığında; normal ve tuzlu suda bekletilen numunelerin aşınma testleri 23 mm üst sınırını aşmadığı gözlemlenmiştir. Tüm numuneler gerekli standartları sağlamıştır (Şekil 8).



Şekil 8. Aşınma direnci deneyi sonuç grafiği (Wear resistance test result chart)

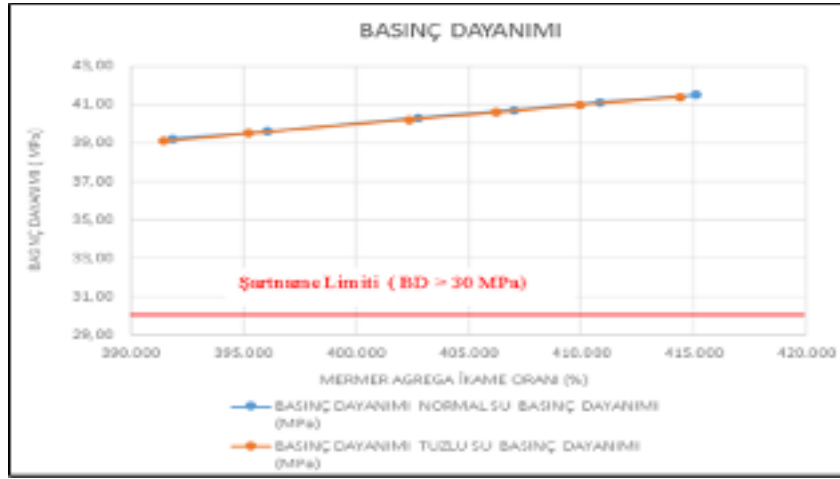
4.4. Basınç Dayanımı Bulguları (Compressive Strength Findings)

Numunelerden elde edilen basınç dayanımı deneyi sonuçları aşağıdaki Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Basınç dayanımı deneyi sonuçları (Compressive strength test results)

NO- İKAME YÜZDESİ (%)	BASINÇ DAYANIMI			
	NORMAL SU		TUZLU SU	
	UYGULANAN YÜK (N)	BASINÇ DAYANIMI (MPa)	UYGULANAN YÜK (N)	BASINÇ DAYANIMI (MPa)
1 0	391.876	39,2	391.475	39,1
2 20	396.054	39,6	395.278	39,5
3 40	402.756	40,3	402.362	40,2
4 60	407.012	40,7	406.203	40,6
5 80	410.846	41,1	409.978	41,0
6 100	415.102	41,5	414.371	41,4

Deney verileri ışığında; normal ve tuzlu suda bekletilen numunelerin basınç dayanım alt sınır standardı olan 30 MPa'yı geçtiği ve gerekli standartları sağladığı gözlemlenmiştir. Numuneler basınç dayanım standartlarının oldukça üstünde (39,5-41,5 MPa) dayanım sergilemiştir. Normal ve tuzlu suda bekleyen numunelerin basınç dayanımlarında çok küçük farklar gözlemlenmiştir. Sonuçlardan da görüleceği üzere numunelerdeki mermer agrega oranı arttıkça az da olsa basınç dayanımının arttığı tespit edilmiştir (Şekil 9).

**Şekil 9.** Basınç dayanımı deney sonuç grafiği (Compressive strength test result chart)

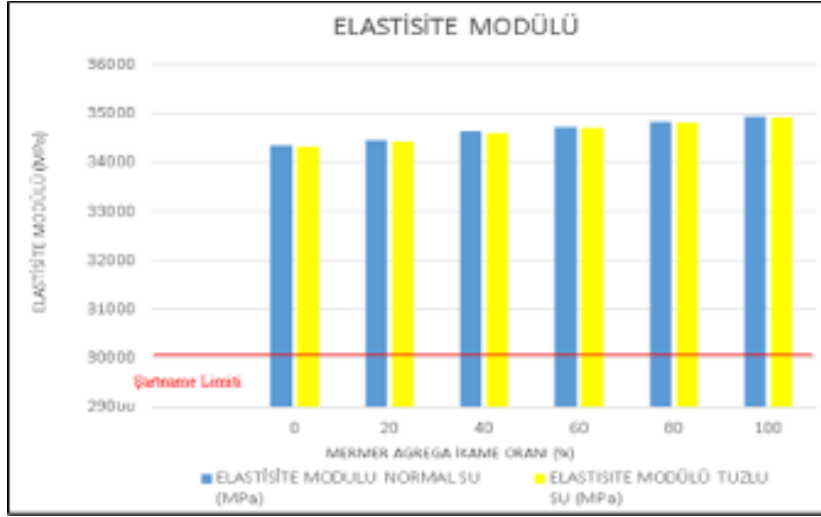
4.5. Elastisite Modülü Tayini Sonuçları (Elasticity Modulus Determination Results)

Çalışmada Elastisite Modülünü tayin yöntemi olarak TS-500/2000 de geçen sekant yönteminden faydalanılmıştır. Bu hesaplama yönteminde numunelerin basınç dayanımı sonuçları ilgili denklemde geçen f_c değeri olarak kullanılmıştır. Bu denklemde kullanılan veriler ve elde edilen sonuçlar Tablo 6' da gösterilmiştir.

Tablo 6. Basınç dayanımı ve elastisite modülü (Compressive strength and modulus of elasticity)

NO- İKAME YÜZDESİ (%)	BASINÇ DAYANIMI VE ELASTİSİTESİ MODÜLÜ				TS 500 E GÖRE ELASTİSİTE SINIRI
	Normal Su		Tuzlu Su		
	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite (MPa)	
1 0	39,2	34.348	39,1	34.322	30.000
2 20	39,6	34.452	39,5	34.426	30.000
3 40	40,3	34.632	40,2	34.606	30.000
4 60	40,7	34.734	40,6	34.708	30.000
5 80	41,1	34.836	41,0	34.810	30.000
6 100	41,5	34.937	41,4	34.911	30.000

Yapılan hesaplamalar sonucunda basınç dayanımının elastisite modülü değerleriyle paralellik arz ettiği ve basınç dayanımı arttıkça elastisite modülünün arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Elastisite modülü grafiği (Elastic modulus chart)

5. Sonuç ve Öneriler (Conclusion And Recommendations)

Farklı oranlarda atık mermerlerin agrega olarak kullanıldığı, tuzlu su ve normal su da priz alacak şekilde hazırlanan numunelerle yapılan deneylerin sonuçları, TSE standartları ve Karayolları Teknik Şartnamesi (2013) göre değerlendirilmiştir. Yapılan deneyler incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1-Normal agrega ve atık mermer kullanılarak hazırlanan, tuzlu su ve normal suda bekleyen numunelerde görünüş bakımından bir farklılık gözlemlenmemiştir.

2-Hazırlanan numunelerde, agrega oranı %20 , %40 ve %60 oranında atık mermer kullanılarak elde edilen numunelerin, yarmada çekme dayanımını sağladığı görülmüştür. Ancak agrega olarak %80 ve %100 oranında atık mermer kullanılan numunelerin standartta belirtilen dayanım sınırının altında kaldığı ve istenilen mukavemeti sağlamadığı görülmüştür.

3-Deneye tabi tutulan tüm numunelerin , %6 olan maksimum su emme oranının altında kaldığı gözlemlenmiş olup standardı sağlamıştır.

4-Aşınma direnci deneyi yapıldığında, tuzlu suda ve normal suda bekletilerek hazırlanan tüm numunelerin, şahit numune ile benzer aşınma direncine sahip olduğu görülmüştür.

5- Normal ve tuzlu suda bekleyen numunelerin basınç dayanımlarında küçük farklar gözlemlenmiş olup, numunelerdeki mermer agrega oranı arttıkça az da olsa basınç dayanımının arttığı tespit edilmiştir.

6-Elastisite modülünün basınç dayanımı değerleriyle paralellik arz ettiği ve basınç dayanımı arttıkça elastisite modülünün arttığı gözlemlenmiştir.

Yapılan deney sonuçları incelendiğinde atık mermerlerin doğal agrega yerine ikame olarak % 60 oranına kadar beton parke taşlarında kullanılmasının mümkün ve standartlara uygun olduğu görülmüştür.

Bahse konu mermer atıklarının doğal agrega ikamesi olarak kullanılması amacıyla yapılan bu deneyler ile farklı boyutlarda ve oranlarda agrega kullanılarak, daha değişik Su / Çimento oranlarında hazırlanan numunelerle yapılacak deneylerde daha faydalı ve farklı sonuçlarla karşılaşılacağı düşünülmektedir. Dolayısıyla bu ve benzeri çalışmaların doğal atıkların dönüştürülmesi ve çevreye verdikleri zararın azaltılması konusunda katkıda bulunacağı umulmaktadır.

Tuzlu suda ve normal suda bekletilerek elde edilen numunelere uygulanan deneylerden çıkan sonuçların birbirine yakın değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre beton parke taşının gerek buzlanmalara karşı yapılacak tuzlamalardan ve gerek denizlerden ve yağmurdan gelen tuz, asit ve çeşitli kimyasallardan olumsuz etkilenmeyeceği ön görülmektedir. Bu veriler ışığında Türkiye'nin sahil şeridinde yakın yerleşim bölgelerinde ve de soğuk iklim bölgelerinde de beton parke taşı kullanımının bir sorun teşkil etmeyeceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak atık malzemeler için problem olan depolama alanı temini, nakliye edilmesi ve çevre kirliliği gibi süre gelen sorunların bu tarz yöntemler kullanılarak minimize edileceği ve artık yönetimi ve sürdürülebilirliği açısından faydalı olacağı düşünülmektedir. Yapılacak benzer çalışmalarla, mermer gibi atık sorunu büyük olan malzemelerin fiziksel olarak geri dönüşümünün sağlanabileceği öngörülmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Açıkgöz, Y. (2008). Uçucu Küllerin Beton Kilitli Parke Taşı Üretiminde Kullanımının Araştırılması .(Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Arsoy,Z., Çiftçi,H., Ersoy, B., Uygunoğlu, T., Arslan, B.(2019). Afyonkarahisar Bölgesi Mermer Parça Atıklarının Beton Agregası Olarak Değerlendirilebilirliğinin Araştırılması. ECJSE,6 (3),503-516.
- Babalık, Ö. (2022). Geri Dönüştürülmüş Agreganın Kullanımının Çevresel Etkilerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirme (YDD) Yöntemi ile Değerlendirmesi. (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü)
- Ceylan, H., Mança, S., (2013). Mermer Parça Atıklarının Beton Agregası Olarak değerlendirilmesi. SDU Teknik Bilimler Dergisi,3(2), 21-25
- Çelik, M.Y., Ersoy, M.A., Şahbaz, A. (2016). Değişik Doğaltaş Kırmataşların Kilitli Beton Parke Bloklarının Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, 8.Uluslararası Kırmataş Sempozyumu. 13-14 Ekim 2016,Kütahya, 38-45.
- Çolakoğlu, H. (2022). Çeşitli Geri Dönüşümlü Agregaların Kayma Dayanımları. (Yüksek Lisans Tezi, Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Dandin, Z. (2009). Betonarme Kolon Performansına Çelik Lif Etkisinin İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Durmuş, G., Şimşek, O.,(2008). Uçucu Küllerin Beton Kilitli Parke Taşı Üretiminde Kullanımının Araştırılması .TÜBAV Bilim Dergisi, 1(1), 1-6
- Erdemoğlu, M., Göktepe, M. (2018). Mermer Artıklarından Katma Değeri Yüksek İleri Seramik Tozlarının Üretimi, Mermer Madenciliğinde Çevresel Yaklaşımlar, Ocak 2018, Muğla, 235-252.
- Erdemonar, M., (2022). Mermer Atıklarının Yapı Malzemesi Olarak Kullanımı. (Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Filiz, M., Özel, C., Soykan, O., Ekiz, Y., (2010).Atık Mermer Tozunun Parke Taşlarında Kullanılması. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi,6(2), 57-72. www.teknolojikarastirmalar.com
- Göktepe, M., (2013). Mermer Sanayi Atıklarından Yapay Kalsiyum Silikat Üretiminde Aşırı Öğütmenin Etkilerinin Seramik Malzemeler Üzerinde Araştırılması. (Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- İmiş, T. (2022). Geri Kazanılmış Agregalı Betonlarda Beton Dayanımının Regresyon Analizi Yöntemi İle İstatistiksel Olarak İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Kaçar, A. (2018). Atık Kağıt Katkılı Çimento Harçlarının Bazı Mekanik Özellikleri. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi ,6(1), 1-6.
- Keskin, S.B., Şahmaran, M., (2018). Mermer Atıklarının Yapı Malzemeleri Alanında Yüksek Hacimlerde Kullanılabilirliği. Mermer Madenciliğinde Çevresel Yaklaşımlar, Ocak 2018, Muğla, 219-234.
- TCTB (2021), Doğal Taşlar Sektör Raporu, Ticaret Bakanlığı Yayını, Ankara. [https:// ticaret.gov.tr/data/5b87000813b8761450e18d7b/Do%C4%9Ffal%20Ta%C5%9Flar%20Sekt%C3%B6r%20Raporu%202021.pdf](https://ticaret.gov.tr/data/5b87000813b8761450e18d7b/Do%C4%9Ffal%20Ta%C5%9Flar%20Sekt%C3%B6r%20Raporu%202021.pdf)
- Tekmen,T. (2006). Kireçtaşlarından Üretilen Kilitli Beton Parke Bloklarının Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi.(Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Topçu, İ.B., Uygunoğlu, T. (2010). Atık Mermerlerin Agregası Olarak Betonda Kullanılmasıyla Çevre Kirliliğinin Azaltılması. International Sustainable Buildings Symposium. 26-28 May, Ankara.36-40.
- Yüksel, İ., (2001). Deprem Yükleri Etkisindeki Sünek Bina Sistemlerinde Yapısal Davranışın İrdelenmesi, Bildiri, ZKÜ Bilim Haftası, Z.K.Ü. Mühendislik Fakültesi.



ENDÜSTRİYEL ATIKSULARIN KİLLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Ömür ÇİMEN^{1*}, Ebru YALVAÇ²

¹Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

²Ekinoks Tehlikeli Madde Güvenlik Danışmanlığı, Antalya, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Zemin İyileştirme,
Killer,
Endüstriyel Atıksular,
Kıvam Limitleri,
Şişme Basıncı.

Öz

Bu çalışmada, Isparta ve civarında bulunan dört farklı endüstriyel atıksuyun iki farklı kil zeminin bazı mühendislik özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla kıvam limitleri, standart kompaksiyon ve sabit hacimli şişme deneyleri musluk suyu kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra aynı deneyler dört farklı endüstriyel atıksu kullanılarak tekrar yapılmıştır. Yapılan deneylere göre killerin kıvam limitlerinin, kompaksiyon parametrelerinin ve şişme basıncı değerinin kullanılan atıksularla değiştiği görülmüştür. Atıksular kullanıldığında her iki zemin türü için de, maksimum kuru birim hacim ağırlığının arttığı, likit limitin, plastik limitin, plastisite indisinin, optimum su muhtevasının ve şişme basıncının azaldığı görülmüştür. Endüstriyel atıksuların özelliklerinin her gün değişiklik göstermesi sebebiyle deney sonuçlarının değerlendirilmesinde daha fazla deney sonucuna ihtiyaç olduğu göz önünde tutulmalıdır.

AFFECTION TO ENGINEERING PROPERTIES OF CLAYS AT INDUSTRIAL WASTEWATERS

Keywords

Soil Improvement,
Clays,
Industrial Wastewater,
Consistency Limits,
Swelling Pressure.

Abstract

In this study, the effects of four different industrial wastewaters in Isparta and its surroundings on some engineering properties of two different clay soils were investigated. For this purpose, consistency limits, standard compaction and constant volume swelling experiments were carried out using tap water. Later, the same experiments were conducted again using four different industrial wastewater. According to the experiments, it has been observed that the consistency limits, compaction parameters and swelling pressure values of clays vary with the wastewater used. It was observed with the experiments that liquid limit, plastic limit, plasticity indices, optimum water content and maximum dry unit volume weight depends on used wastewater. Since the characteristics of industrial wastewater change every day, it should be taken into consideration that more test results are needed when evaluating the test results.

Alıntı / Cite

Çimen, Ö., Yalvaç, E., (2024). Endüstriyel Atıksuların Killerin Mühendislik Özelliklerine Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(1), 255-264.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Ö. Çimen, 0000-0002-6138-6029
E. Yalvaç, 0000-0002-3805-8764

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	24.10.2023
Revizyon Tarihi / Revision Date	13.02.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	06.03.2024
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: omurcimen@sdu.edu.tr, +90-246-211-1202

AFFECTION TO ENGINEERING PROPERTIES OF CLAYS AT INDUSTRIAL WASTEWATERS

Ömür ÇİMEN[†], Ebru YALVAÇ²

¹ Suleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Civil Engineering, Isparta, Türkiye

² Ekinoks Dangerous Goods Safety Consultancy, Antalya, Türkiye

Highlights

- Effect of wastewater on engineering properties of clays
- Industrial wastewater in Isparta and its surroundings
- Investigation of the use of wastewater in soil stabilization

Purpose and Scope

It is known that the engineering behavior of clays varies depending on the amount of water they contain and the properties of the water. It has been stated in many studies that when pure water or tap water is used to determine the geotechnical characteristics of clays, very different results are obtained from the field conditions, and therefore, it is necessary to investigate the changes in engineering properties with chemical water in determining the engineering properties of compressed clays.

Design/methodology/approach

In this study, the effects of four different industrial wastewaters on the engineering properties of high and low plasticity clay soils in Isparta were investigated. These wastewaters are identified with the symbols A, B, C, D. A: Wastewater generated during marble cutting from the marble factory, B: The outlet water of the facility where Organized Industrial Wastewater, which contains the wastewater of 40 different factories, is collected and treated, C: Wastewater treatment plant effluent where Isparta city wastewater is collected, D: Kovada Canal water contaminated with agricultural pesticides. For this purpose, the consistency limits, standard compaction, and constant volume swelling test results made with tap water were compared with the test results made with four different industrial wastewater. Values of pH, conductivity, Chemical Oxygen Demand (COD) together with anion and cation analysis values of the water used were determined. Soil classes of the used soils were determined according to the Unified Classification System. Maximum dry unit weight and optimum water content were determined by standard compaction tests. Constant volume swelling experiments were performed on samples prepared under compaction conditions. All experiments were repeated using wastewater.

Findings

It has been determined that wastewater reduces the liquid limit, plastic limit, plasticity index, optimum water content, and swelling pressure of high plasticity clay, and increases the maximum dry unit volume weight. It has been observed that the wastewater that has the most impact on the consistency limits and swelling pressure of high plasticity clay is the marble factory wastewater shown as A. The wastewater that increased the maximum dry unit volume weight the most and reduced the optimum water content the most was Organized Industrial Wastewater, indicated by B. While it is thought that Ca and HCO₃ ions, which are abundant in Organized Industrial wastewater, are effective in increasing dry unit volume weight and reducing the optimum water content; It is thought that Mg, Na, K, Si, Cl and SO₄ ions, which are abundant in marble wastewater, reduce the consistency properties and swelling pressure. It has been determined that wastewater reduces the liquid limit, plastic limit, plasticity index, optimum water content and swelling pressure of low plasticity clay, and increases the maximum dry unit volume weight. In the consistency limits tests of low plasticity clay, the most effective wastewater was the Organized Industrial wastewater shown as B, while the most effective wastewater on the swelling pressure was the marble factory wastewater shown as A.

Originality

There is no detailed study on the effects of wastewater on the ground in Isparta and its surroundings. It is clear that the use of wastewater in soil stabilization will also contribute to the environment. It is thought that this study, conducted on a limited number of samples, will contribute to the literature.

[†] İlgili yazar / Corresponding author: omurcimen@sdu.edu.tr, +90-246-211-1202

1. Giriş (Introduction)

Esas mineralin türü, çökelme ortamındaki özellikler (iyon miktarı, sıcaklık, pH vb.) kil minerallerinin oluşumunu etkilemektedir. Özgül yüzeylerinin büyük olması nedeniyle kil minerallerinin su tutma kapasitesi de büyüktür. Montmorillonit kil mineralinin en yüksek su tutma kapasitesine sahip olduğu bilinmektedir. Bu mineralin kil içerisinde bulunma durumu ve çokluğu da kilin suya maruz kalması durumundaki davranışını çok fazla etkilemektedir (Shoaib vd., 2022).

Kil zeminlerin su muhtevsındaki değişiklikler ve suyun özellikleri kilin mühendislik davranışının değişmesine neden olmaktadır. Killerin geoteknik karakteristiklerinin belirlenmesinde saf su veya musluk suyu kullanıldığında arazideki durumlardan çok farklı sonuçlar elde edildiği, bu sebeple sıkıştırılmış killerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde kimyasal sular ile mühendislik özelliklerin değişiminin araştırılmasının bir gereklilik olduğu belirtilmiştir (Yılmaz vd., 2008; Arasan, 2010).

Killi zeminler inşaat mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kullanım sırasında zemin çeşitli maddelerin etkisinde kalmaktadır. Bu maddelerin başında sıvı ve katı atıklar ile zemin özelliklerini iyileştirmek için kullanılan katkı malzemeleri gelmektedir. Katı atık depo alanlarında kullanılan kil tabakaları da atık sulara maruz kalarak kirlenmekte ve killerin mühendislik özellikleri değişmektedir (Taşköy, 2006). Akyıldız (2011), katı atık düzenli depolama alanlarında taban geçirimsizliğine etki eden parametrelerin araştırılması amacıyla yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli zeminler üzerinde permeabilite deneyleri yapmıştır. Bu malzemelerin farklı sıvılara (saf su, katı atık sızıntı suyu) maruz kaldıklarında ve farklı sıkıştırma durumunda göstermiş oldukları geçirimsizlikler tespit edilmiştir. Katı atık düzenli depolama alanlarında en iyi permeabilitenin sağlanması için sıkıştırmanın da en uygun şekilde yapılması gerektiğini vurgulamıştır. Temiz suya ulaşmak her geçen gün zorlaşmaktadır. Atıksuların farklı alanlarda değerlendirilmesinin araştırılmasıyla daha az temiz suyun kullanılmasının amaçlanması gerekmektedir. Killerin mühendislik özelliklerinin suyun özelliklerinden etkilendiği bilinmektedir. Atıksulara maruz kalan killerin veya dolguda kullanılan killerin sıkıştırılmasında atıksuların kullanılmasında mühendislik özelliklerindeki olumlu/olumsuz değişimlerin tahmin edilmesi de bir gerekliliktir.

Atıksuların killerin mühendislik özelliklerine olan etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada; Tekstil, tabakhane ve pil endüstriyel atıksuları farklı oranlarda karıştırılarak kullanılmıştır. Tekstil ve tabakhane atıksularıyla yapılan likit limit deneylerinde atıksu konsantrasyonunun artmasıyla likit limitin, plastik limitin ve şişme basıncının azaldığı, pil atıksuyu ile yapılanlarda ise konsantrasyonun artmasıyla likit limitin, plastik limitin ve şişme basıncının arttığı belirlenmiştir. Tekstil atıksuyundaki kloritin kilin çift tabakasını azalttığı bu azalmanın da kıvam limitlerinde azalmaya neden olduğu, tabakhane atıksuyunun kıvam limitlerini azaltması ise atıksuda bulunan kromyum iyonlarının adsorbsiyonundan kaynaklandığı belirtilmiştir. Pil atıksuyu kullanıldığında kıvam limitlerinin artması ise atıksuda bulunan sülfatın adsorbsiyonundan kaynaklandığı, bunun sonucunda çift tabakanın genişlemesinin kıvam limitlerinde artmaya neden olduğu şeklinde açıklanmıştır (Rao ve Chittaranjan, 2012). Kemerköy çöp suyunun değişik konsantrasyonlarda kullanıldığı bir çalışmada, zemindeki çöp suyu konsantrasyonu yükseldikçe likit limit ve plastisite indisinin de yükseldiği belirtilmiştir (Erken vd., 2006).

Tuz solüsyonunun konsantrasyonu artarken düşük plastisiteli kilerde likit ve plastik limitin arttığı gösterilmiştir (Arasan ve Yetimoğlu, 2006; 2008). Bu çalışmalardan farklı olarak, kaolinin likit limitinin CaCl solüsyonunun konsantrasyonundan etkilenmediği, plastisite indisini ise azalttığı belirtilmiştir (Park vd., 2006). NaCl konsantrasyonunun artmasıyla bentonitin likit limiti çok fazla azalırken, plastik limiti çok az artmaktadır (Shirazi vd., 2011). NaCl-Na₂SO₄ çözeltileri kullanıldığında, bentonit-kum karışımının likit ve plastik limitinin artan çözelti konsantrasyonu ile azaldığı gösterilmiştir (Zhang vd., 2012). Magnezyum hidroksit, deniz suyu ve zeytinyağı fabrikası atıksuyunun bentonitin şişme potansiyeli ve plastisitesini azalttığı belirtilmiştir (Urena vd., 2013). Etilen glikol, toulen ve doğal deniz suyunun plastisite ve şişme potansiyeline etkisinin araştırıldığı çalışmada ise saf toulen ve deniz suyunun plastisitenin ve şişme potansiyelinin azalmasına neden olduğu gösterilmiştir (Mosavat ve Nalbantoglu, 2013).

Bu çalışmada, Isparta ve civarında bulunan endüstriyel atıksuların yüksek ve düşük plastisiteli killi zeminlerin bazı mühendislik özellikleri üzerindeki olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, kıvam limitleri, standart kompaksiyon ve standart kompaksiyon şartlarında hazırlanan numuneler üzerinde sabit hacimli şişme deneyleri yapılmıştır. Atıksular kullanılarak yapılmış deney sonuçları, temiz su kullanılarak yapılan deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Killerin şişme davranışı; kil minerallerinin cinsleri ve bulunma miktarları, çökelme ortamlarındaki oluşum farklılıkları gibi özelliklerden etkilenmektedir. Montmorillonit ve kaolinit, her ikisi de magmatik kayalardan ayrışmasına rağmen ayrışma koşullarındaki farklılıklar nedeniyle montmorillonitin yüksek, kaolinitin ise düşük şişme potansiyeline sahip olduğu bilinmektedir. Şişme genellikle kristallerarası şişme ve ozmotik şişme olarak iki bölümde görülür. Kristallerarası şişmeye kildeki değişebilir katyonların hidratasyonu sebep olurken, ozmotik şişmeye boşluk suyu ve kil yüzeyleri arasındaki iyon konsantrasyonları sebep olur (Savage, 2005; Quainoo vd., 2022).

Şişme özelliklerinin sıvının kimyasal özelliklerinden etkilendiği birçok çalışmada belirtilmiştir. Düşük yoğunluklarda sıkıştırılmış bentonitin şişme basıncının yeraltı suyunun tuzluluğundan çok etkilenirken, 1,5 Mg/m³ den daha yüksek yoğunluklarda sıkıştırıldığında çok az etkilendiği gösterilmiştir (Dixon, 2000). Bentonitin maksimum şişme oranının 0-1 M NaCl konsantrasyonlarında hızla azaldığı, 1-4 M NaCl konsantrasyonlarında ise yavaş bir şekilde azaldığı belirtmiştir (Shirazi vd., 2011). Bentonitin şişme basıncının farklı CaCl₂ konsantrasyonlarına bağlı olarak belirlendiği çalışmada konsantrasyondaki CaCl₂ artmasıyla şişme basıncının azaldığı belirtilmiştir (Jia ve Yang, 2010). Farklı Ca(NO₃)₂ ve NaNO₃ konsantrasyonları kullanarak şişme deneyleri yapıldığında, şişme potansiyelinin, şişme basıncının ve şişme zamanının azaldığı gösterilmiştir (Alawaji, 1999). Yüksek plastisiteli killerde tuz solüsyonunun konsantrasyonu arttıkça şişme basıncının azaldığı gösterilmiştir (Arasan vd., 2007). Bentonitin tuzlu suyla yapılmış şişme basıncı deneylerinde elde edilen şişme basıncının saf suyla yapılandırından daha düşük olduğu gösterilmiş, potasyum ve magnezyum değişiminin şişme basıncına olan etkisinin araştırıldığı çalışmada magnezyum miktarının artmasıyla şişme basıncının azaldığı belirtilmiştir (Herbert ve Moog, 2000). Şişme basıncındaki bu azalma elektriksel çift tabakaya bitişik kuasi kristal yüzeyinin artan NaCl konsantrasyonlarıyla sıkıştırıldığı için agrega şişmesinin azalabileceği şeklinde açıklanmıştır. NaCl solüsyonu için agrega şişmesinin, hem kristal şişmesi hem de kuasi kristaller arasındaki çift tabaka şişmesi tarafından kontrol edildiği belirtilmiştir (Suzuki vd., 2005). Sıkıştırılmış bentonitin şişme basıncının değişiminin farklı Na₂SO₄, NaCl ve CaCl₂ konsantrasyonları kullanılarak araştırıldığı çalışmalarda, konsantrasyon oranı arttıkça şişme basıncının azaldığı, şişme basıncı üzerinde aynı konsantrasyondaki Na₂SO₄ çözeltilisinin diğerlerine göre daha etkili olduğu gösterilmiştir. NaCl ve CaCl₂ kendi aralarında değerlendirildiğinde NaCl çözeltilisinin şişme basıncını azaltmada daha etkili olduğu, bu duruma CaSO₄ çökmesinin neden olabileceği belirtilmiştir (Shirazi vd., 2011; Zhang vd., 2012; Zhu vd., 2013; Chen ve Huang, 2013). Yüksek yoğunluklarda ve düşük tuz konsantrasyonlu suyla sıkıştırılmış bentonitin kısa süreli (100 saat) şişme basıncına suyun kimyasal özelliklerinin değişiminin etkisi görülmezken, uzun süreli (700 saat) şişme basıncının bütün yoğunluklarda, suyun kimyasal özelliklerinin değişiminden çok etkilendiği gösterilmiştir (Wang vd., 2014). Doygun olmayan zemin davranışına atıksuyun etkisinin araştırıldığı bir çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak, düşük plastisiteli kilde atıksuyun numunenin kayma mukavemetini, şişme basıncını ve şişme yüzdesini çok fazla etkilemediği belirtilmiştir (Maaita ve Tarawneh, 2003). Boşluk suyu tuzluluğunun ve tuz değerliğinin artışıyla, killerin likit limiti azalmakta, permabilite katsayısı, konsolidasyon katsayısı, kayma dayanımı ve içsel sürtünme açısı artmakta, e-logp grafikleri aşağı yönde baskılanmaktadır (Jiang vd., 2020; Yurtcan, 2023). İyonik güçteki bir artışın, kilin Young modülünde bir azalmaya neden olduğu gösterilmiştir (Dor vd., 2020).

Abdallh (2018), kentsel atık su arıtma tesisi arıtılmış atık sularını ve stabilize arıtma çamurlarını tuzlu-sodyumlu zeminlerin stabilizasyonunda kullanmıştır. Çalışmasında, Tuzlu-sodyumlu zemin iyileştirilmesinde stabilize arıtma çamuru ve arıtılmış atık suların kullanım etkinliğinin belirlenmesi kapsamında, arıtılmış atık suların temiz su uygulamalarıyla benzer etki göstermiş olması, yıkama aşamasında temiz su kaynaklarının korunması adına orta tuzluluk ve düşük sodyumlulukta arıtılmış atık suların rahatlıkla kullanılabilmesini göstermiştir. Karabash vd. (2023), ham petrol, dizel, benzin ve gazyağı ile kirlenmiş yüksek plastisiteli kilin mühendislik özelliklerini araştırmışlardır. Bu kirleticilerin etkisiyle maksimum kuru birim hacim ağırlıkta, kohezyonda ve serbest basınç mukavemetinde azalma meydana geldiğini, zeminin içsel sürtünme açısının, plastisitesinin, şişme yüzdesinin ve şişme basıncının arttığını belirtmişlerdir. Kuru tarafta sıkıştırıldığında permeabilite katsayısı azalırken, ıslak tarafta sıkıştırıldığında artmıştır. Yin vd. (2022), kömür suyu bulamaç gazlaştırma cürufunun Tuzlu-Alkali zeminlerine olan etkisini araştırmışlardır. Bu tür zeminlere gazlaştırma cürufunun eklenmesinin doymuş su içeriğini, kılcal su tutma kapasitesini ve saha su tutma kapasitesini artırdığını ve su tutma performansını iyileştirdiğini göstermişlerdir. Zalacain vd. (2019), çalışmalarında arıtılmış atık suyun zeminin bazı özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Zeminin penetrasyon dayanımının ve üst tabakadaki mikroagrega stabilitesinin arttığını belirtmişlerdir. Baykuş ve Karpuzcu (2021), ince taneli zeminlerin kimyasal ve fiziksel özelliklerine atık suyun etkilerini incelemişlerdir. Atık su sızdırılan zeminlerin, N ve H içeriği azalırken, Mg, Ca, P, Al, Pb, Zn ve C içerikleri, zemin tipine göre farklılık göstermiştir. Zeminlerin ince dane yüzdesi arttıkça, Na absorpsiyon kapasiteleri artmıştır. Arıtılmış atıksuların tarımsal sulamaya yönelik kullanımının, (Çay ve Kanber, 2021; Sdiri vd., 2023; Alsanad, 2023), çimento harcı üretiminde kullanımının (Yılmaz, 2016) araştırıldığı çalışmalar da mevcuttur. Atıksularla kirlenmiş zeminlerden ağır metallerin geri kazanılması ve zararlı elementlerin zeminden

uzaklaştırılmasıyla ilgili çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda kirlenmiş zeminlerin zararlı etkileri, ağır metal kaynakları ve ağır metallerle kirlenmiş zeminlere yönelik iyileştirme teknolojileri araştırılmaktadır (Li vd., 2019; Tarekegn vd., 2020; Ghiyas ve Bagheripour, 2020; Estabragh vd., 2022; Sistani vd., 2023). Brezilya'da Santo Amaro bölgesindeki kritik derecede kirlenmiş bir alanın toprak kazısı, yenileme ve stabilizasyon yoluyla iyileştirilmesinin tahmini maliyetinin yaklaşık 20 ila 30 milyon Amerikan Doları olduğu belirtilmiştir (Andrade Lima vd., 2018).

Atıksularla yapılan çalışmalar incelendiğinde dört gruba ayrıldığı görülmüştür. Birinci gruba gerçek atıksuların killerin mühendislik özelliklerine olan etkilerinin araştırıldığı çalışmalar girmektedir. Bu çalışmaların bir kısmında atıksular farklı konsantrasyonlarda olacak şekilde hazırlanmıştır. Bazılarında ise direkt olarak kullanılmıştır. Killerin kıvam limitleri, kompaksiyon parametreleri, dane birim hacim ağırlık, dane çapı değişimi, serbest basınç mukavemeti, kayma mukavemeti parametreleri, konsolidasyon katsayısı, permeabilite katsayısı gibi temel mühendislik parametrelerinin atıksularla değişimleri araştırılmıştır. İkinci gruba yapay olarak hazırlanmış tuzlu veya asitli suların kullanıldığı çalışmalar girmektedir. Bu çalışmalarda da genellikle aynı mühendislik parametreler çalışılmıştır. İlave olarak bu çalışmalarda mikroanalizlerin daha fazla olduğu görülmüştür. Üçüncü grupta atıksularla kirlenmiş zeminlerin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar gelmektedir. Bu çalışmalarda ağır metallerin uzaklaştırılması, zeminin mekanik özelliklerini arttırmak için farklı katkı malzemeleri kullanılması gibi konular ele alınmaktadır. Dördüncü grupta ise atıksuların farklı alanlarda kullanımının araştırıldığı çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışma birinci gruba girecek bir araştırmadır. Isparta ve civarında bulunan endüstriyel atıksuların killerin bazı mühendislik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Atıksular zemine direkt olarak karıştırılarak kıvam limitleri, standart kompaksiyon ve standart kompaksiyon şartlarında hazırlanan numuneler üzerinde sabit hacimli şişme deneyleri yapılmıştır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

DeneySEL çalışmalarda Isparta ve civarında bulunan endüstriyel atıksular kullanılmıştır. Atıksuların kaynağından alınması ve deneylerde kullanılması sırasında maske ve eldiven kullanılmıştır. Bu atıksular A, B, C, D simgeleri ile tanımlanmıştır. A: Mermer fabrikasından alınan mermer kesimi sırasında ortaya çıkan atıksu, B: içerisinde 40 farklı fabrikasının atıksularının bulunduğu Organize Sanayi Atıksuyunun toplandığı ve arıtma uygulanan tesisin çıkış suyu, C: Isparta şehir atıksularının toplandığı atıksu arıtma tesisi çıkış suyu, D: Tarımsal ilaçlarla kirlenmiş Kovada Kanalı suyu. Bu atıksular ile yapılan deneyler musluk suyu ile yapılan deneylerle karşılaştırılmıştır. Kullanılan suların pH, iletkenlik ve Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) değerleri Isparta Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü Laboratuvarında APHA, (1999) standartlarına belirlenmiştir. Deney sonuçları Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan suların pH, iletkenlik ve KOİ analiz sonuçları
(Results of conductivity, pH and KOİ of used water) (Yalvaç, 2011)

SULAR	pH	İLETKENLİK ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	KOİ (mg/l)
MUSLUK SUYU	7.33	691	5
A ATIKSUYU	7.84	2350	476
B ATIKSUYU	7.12	1817	115
C ATIKSUYU	7.13	1158	59
D ATIKSUYU	7.63	475	142

Kullanılan suların anyon ve katyon analizleri, Süleyman Demirel Üniversitesi Jeotermal Enerji, Yeraltısu ve Mineral Kaynakları Laboratuvarında, Ca, Mg, Na, K, Si, Al, Fe katyonlarının analizi Perkin Elmer Optima 2100 DV ICP-DES cihazıyla, Cl, SO₄ anyonlarının analizi Dionex ICS 3000 IC cihazıyla, HCO₃ katyonu Merck Alkalinity Test Kiti (titrasyon yöntemiyle) 1.11109 kodlu kit kullanılarak yapılmıştır. Katyon analizi deney sonuçları (Ca, Mg, Na, K, Si, Fe, Al) ve anyon analizi deney sonuçları (HCO₃, Cl , SO₄) Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Kullanılan suların katyon ve anyon analiz sonuçları
(Results of cation and anion analyses of samples)(Yalvaç, 2011)

SULAR	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Si (mg/l)	Fe (mg/l)	Al (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)
MUSLUK SUYU	79.25	22.77	8.12	1.59	-	<0.01	<0.01	420.90	7.26	23.54
A ATIKSUYU	47.25	80.6	232.8	81.9	14.17	<0.01	<0.01	122.00	404.80	227.41
B ATIKSUYU	51.86	67.38	215.6	27.08	12.89	<0.01	<0.01	518.50	269.12	70.56
C ATIKSUYU	44.52	24.34	92.26	27.2	8.48	<0.01	<0.01	530.70	68.36	54.69
D ATIKSUYU	35.7	32.99	12.03	3.57	2.65	<0.01	<0.01	292.80	8.36	13.76

Çalışmada iki farklı kil kullanılmıştır. Kullanılan yüksek plastisiteli kil Muğla Fethiye İlçesinden (Kalay, 2010), düşük plastisiteli kil ise Isparta Gönen İlçesinden alınmıştır (Yalvaç, 2011). ASTM D1140 ve ASTM D422'ye uygun olarak elek ve hidrometre analizleri, ASTM D4318'ye uygun olarak kıvam limitleri deneyleri yapılmıştır. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre Sınıflandırma deney sonuçları Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Sınıflandırma deney sonuçları (Results of classification tests)

ÇAKIL (%)	KUM (%)	SİLT (%)	KİL (%)	WL (%)	WP (%)	PI (%)	ZEMİN CİNSİ
0	2	38	60	108	38	70	CH
15	34	24	27	38	36	2	CL

Kil numunelerin X-Ray Analizleri ve Kimyasal Analizleri Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Laboratuvarlarında yapılmıştır. Tablo 4'de zemin numunelerinin kimyasal analiz sonuçları görülmektedir.

Tablo 4. Zemin numunelerinin kimyasal analiz sonuçları (Results of chemical analyses)

NUMUNE	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
CH	< 0.1	17.4	4.3	47.1	< 0.1	0.3	2.8	0.2	0.1	16.6
CL	0.7	4.2	10.5	41.7	0.2	2.2	16.3	0.6	0.2	6.3

X-Ray analizi deneyleri ile hakim kil mineralleri belirlenmiştir. Muğla numunesinde (CH) çokluk sırasına göre; Simektit, Serpantin, Kuvars, Kalsit, Amorf Silika minerallerinin bulunduğu, çok az olarak da Amfibol, Feldispat ve Klorit grubu minerallerin bulunduğu; Isparta numunesinde (CL) çokluk sırasına göre, Kalsit, Klorit Grubu Kil Minerali, İllit, Feldispat, Kuvars, Dolomit minerali, az miktarda amorf malzeme ve çok az karışık tabakalı kil minerali bulunduğu belirlenmiştir.

Yüksek ve düşük plastisiteli kil numuneler üzerinde farklı endüstriyel atıksular kullanılarak ASTM D698'ya uygun olarak standart kompaksiyon deneyleri ve sıkıştırılmış numuneler üzerinde ödometre deney tekniği kullanılarak ASTM D4546 şartlarında sabit hacimli şişme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları dördüncü bölümde değerlendirilmiştir.

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Bu çalışmada yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli olan iki farklı kil zemine Isparta ve civarındaki farklı endüstriyel atıksuların etkisi araştırılmıştır. Kıvam limitleri, standart kompaksiyon ve sabit hacimli şişme deney sonuçları bu atıksularla ve musluk suyu kullanılarak yapılan deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Atıksular kullanılarak yapılan deneylerde atıksuyun deneyde kullanılacağı gün tesislerden alınmasına ve uzun süre bekletilmemesine dikkat edilmiştir. Sabit hacimli şişme deneyleri yapılırken No 40 elek altına geçen numuneler standart kompaksiyon deney şartlarında sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Bu deneylerde numune hazırlama aşamasında karışım suyu olarak her bir su ayrı ayrı kullanılmış ve ödometre hücresi de bu su ile doldurulmuştur. Yüksek plastisiteli kil numune ve farklı atıksular kullanılarak yapılan kıvam limitleri, standart kompaksiyon ve sabit hacimli şişme deney sonuçları Tablo 5' de görülmektedir.

Tablo 5. Yüksek plastisiteli kil numunesine ait olan deney sonuçları
(Experiments results of high plasticity sample) (Yalvaç, 2011)

SULAR	WL (%)	WP (%)	PI (%)	γ_{kmax} (gr/cm ³)	W _{opt.} (%)	P _s (kg/cm ²)
MUSLUK SUYU	108	38	70	1.16	38	0.90
A ATIKSUYU	27	8	19	1.39	24	0.04
B ATIKSUYU	31	6	25	1.44	22	0.50
C ATIKSUYU	33	3	20	1.40	25	0.40
D ATIKSUYU	35	3	32	1.43	22	0.60

Tabloda; WL : Likit Limit, WP : Plastik Limit, PI : Plastisite İndisi, γ_{kmax} : Maksimum kuru birim hacim ağırlık, W_{opt} : Optimum su muhtevasını, P_s ise sabit hacimli şişme basıncını göstermektedir.

Tablo 5 'den yararlanılarak elde edilen sonuçlara göre atıksuların yüksek plastisiteli kilin likit limitini, plastik limitini, plastisite indisini, optimum su muhtevasını ve şişme basıncını azalttığı, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise arttırdığı belirlenmiştir. Yüksek plastisiteli kilin kıvam limitleri ve şişme basıncı üzerinde en etkili olan atıksuyun A ile gösterilen mermer fabrikası atıksuyu olduğu görülmüştür. Maksimum kuru birim hacim ağırlığı en fazla arttıran, optimum su muhtevasını en fazla azaltan atıksu ise B ile gösterilen Organize Sanayi Atıksuyu olmuştur. Organize Sanayi atıksuyunda fazla bulunan Ca ve HCO₃ iyonlarının kuru birim hacim ağırlığı arttırmada ve optimum su muhtevasının azaltılmasında etkili olduğu düşünülürken; Mermer atıksuyunun içerisinde çok fazla bulunan Mg, Na, K, Si, Cl ve SO₄ iyonlarının kıvam özelliklerini ve şişme basıncını azalttığı düşünülmektedir.

Düşük plastisiteli kil numune ve farklı atıksular kullanılarak yapılan Atterberg limitleri, standart proktor ve sabit hacimli şişme deney sonuçları Tablo 6'da görülmektedir.

Tablo 6. Düşük plastisiteli kil numunesine ait olan deney sonuçları
(Experiments results of low plasticity sample) (Yalvaç, 2011)

SULAR	WL (%)	WP (%)	PI (%)	γ_{kmax} (gr/cm ³)	W _{opt} (%)	Ps (kg/cm ²)
MUSLUK SUYU	38	2	36	1.88	11	0.35
A ATIKSUYU	18	3	15	1.76	12	0.01
B ATIKSUYU	12	2	10	2.05	7	0.02
C ATIKSUYU	14	3	11	2.05	8	0.02
D ATIKSUYU	18	3	15	1.97	8	0.03

Tablo 6 'dan yararlanılarak elde edilen sonuçlara göre atıksuların düşük plastisiteli kilin likit limitini, plastik limitini, plastisite indisini, optimum su muhtevasını ve şişme basıncını azalttığı, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise arttırdığı belirlenmiştir. Düşük plastisiteli kilin kıvam limitleri deneylerinde en etkili atıksu B ile gösterilen Organize Sanayi atıksuyu olurken, şişme basıncı üzerinde en etkili olan atıksuyun A ile gösterilen mermer fabrikası atıksuyu olduğu görülmüştür.

Buna göre her iki kil zeminde de likit limit, plastik limit ve plastisite indisinin musluk suyu ile yapılan deney sonuçları ile karşılaştırıldığında atıksular kullanıldığında kıvam limitlerinin azaldığı görülmüştür. Atıksular kendi içinde değerlendirildiğinde yüksek plastisiteli kil için likit limit, plastik limit ve plastisite indisini en fazla azaltan mermer fabrikası atıksuyu (A), düşük plastisiteli kil için ise organize sanayi atıksuyu (B) olmuştur. Sistani vd. (2023), şehir atıksularıyla yaptıkları çalışmada kilin likit limitinin %30.4'den 35.2'ye yükseldiğini, plastik limitinin 15.6' dan 27.4' e yükseldiğini ve plastisite indisinin %14.8' den 7.8 'e düştüğünü göstermişlerdir. Likit ve plastik limit deneyleri İnce daneli zeminlerin mühendislik davranışları hakkında bilgi veren çok önemli geoteknik deneylerdendir. Likit limit çift tabaka suyu olarak tutulan suyun kalitesinin bir göstergesidir. Likit limitteki bir değişiklik çift tabaka kalınlığındaki bir değişiklik ile ilgilidir (Sridharan vd., 2002). Izdebska-Mucha and Trzcinski (2021), sıvı petrol yakıtları tarafından uzun süreli kirlenmeye maruz kalan killi zeminlerin daha düşük su muhtevası, plastisite indisi, pH ve zeta potansiyeli ve daha yüksek kütle yoğunluğu ile karakterize edildiğini göstermişlerdir.

Kompaksiyon parametreleri açısından değerlendirildiğinde atıksuların her iki kil zemin için de kuru birim hacim ağırlığı arttırdığı, optimum su muhtevasını azalttığı belirlenmiştir. Organize sanayi atıksuyu her iki zeminde de maksimum kuru birim hacim ağırlığı en fazla arttıran, optimum su muhtevasını en fazla azaltan atıksu olmuştur. Organize sanayi atıksuyunda fazla bulunan Ca ve HCO₃ iyonlarının kuru birim hacim ağırlığı arttırmada ve optimum su muhtevasının azaltılmasında etkili olduğu düşünülmektedir. Artan NaCl konsantrasyonunun kilin maksimum kuru birim hacim ağırlığını arttırdığını, optimum su muhtevasını azalttığını belirtmişlerdir. Kil partiküllerini çevreleyen çift tabaka suyunun buna neden olduğunu, çift tabaka kalınlığının azalmasının maksimum kuru birim hacim ağırlığı arttırdığı, optimum su muhtevasını azalttığı açıklanmıştır (Nayak vd., 2010). Sistani vd. (2023), şehir atıksularıyla yaptıkları çalışmada kilin maksimum kuru birim hacim ağırlığının 17.3kN/m³'den 15.6kN/m³'e düştüğünü, optimum su muhtevasının %18.7'den %24.1'e yükseldiğini göstermişlerdir.

Atıksularla yapılan şişme basıncı deney sonuçları değerlendirildiğinde atıksuların şişme basıncını azalttığı görülmüştür. Her iki zemin türü için de şişme basıncındaki en fazla azalma mermer fabrikası atıksuyunun kullanıldığı deneylerde elde edilmiştir. Pek çok kimyasalın kilin yayımlı çift tabakasını azaltma eğiliminde olduğu, bunun itki kuvvetlerindeki bir azalmaya ve büzülme neden olacağı, böylece kil partiküllerinin flokülasyona teşvik edileceği belirtilmiştir (Bowders ve Daniel, 1987; Shi vd., 2015; Massat vd., 2016). Kimyasal

konsantrasyonunun artmasının yayımlı çift tabakayı küçülttüğü, bunun sonucunda kil partiküllerinin floküle olduğu ve şişmenin azaldığı belirtilmiştir (Alawaji, 1999; Kolstad vd., 2004; Lee vd., 2005; Asaad vd., 2021).

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada dört farklı endüstriyel atıksu (mermer fabrikası, Organize Sanayi Arıtma Tesisi çıkış suyu, Isparta Atıksu Arıtma tesisi çıkış suyu ve Kovada Kanalı suyu) ve musluk suyunun düşük ve yüksek plastisiteli killerin kıvam limitine, kompaksiyon özelliklerine ve kompaksiyon şartlarında sıkıştırılarak hazırlanmış numuneler üzerinde yapılan sabit hacimli şişme basıncına olan etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda kıvam limitleri, standart kompaksiyon ve sabit hacimli şişme deneyleri yapılmıştır. Çalışmadan şu sonuçlar elde edilmiştir:

1. Yüksek plastisiteli kilin kıvam limitlerinin ve sabit hacimli şişme basıncının azaltılmasında mermer suyunun diğerlerine göre daha etkili olduğu görülmüştür.
2. Düşük plastisiteli kilin kıvam limitlerinin azaltılmasında Organize Sanayi Atıksuyunun diğerlerine göre daha etkili olduğu görülmüştür. Düşük plastisiteli kilin sabit hacimli şişme basıncının azaltılmasında ise mermer suyunun diğer atıksulardan daha etkili olduğu görülmüştür.
3. Her iki kil zeminde de yapılan kompaksiyon deneylerine göre en yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlık ve en düşük optimum su muhtevası Organize Sanayi atıksuyu kullanılarak elde edilmiştir.
4. Atıksulardaki K, Na, Mg ve Si katyon miktarları arttıkça plastisite indisindeki ve şişme basıncındaki azalmanın arttığı görülmüştür. Cl, SO₄ anyon miktarlarının artması ve HCO₃ katyonunun azalması ve iletkenlik değerinin artması plastisite indisini ve şişme basıncını azaltmaktadır.
5. Yapılan deneylerde kullanılan atıksuların Kimyasal Oksijen İhtiyaçları (KOİ) ile kıvam limitleri, standart proktor ve sabit hacimli şişme deney sonuçları karşılaştırıldığında KOİ değeri yükseldiğinde kilin özelliklerinin daha fazla etkilendiği görülmüştür. KOİ değeri yükseldikçe kıvam limitlerinin, optimum su muhtevasının ve şişme basıncının azaldığı, maksimum kuru birim hacim ağırlığının arttığı görülmüştür.
6. Atıksuların kimyasal Oksijen ihtiyaçları, anyon ve katyon değerleri, kimyasal yapıları alındığı güne göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışma kirlenmiş suların zeminin mühendislik özelliklerinden bazılarının değişimini incelemek için sınırlı sayıda numune üzerinde yapılmıştır. Sonuçların daha fazla numune üzerinde yapılarak teyit edilmesi ileriki çalışmalarda düşünülmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Abdallh, A.H.M., 2018. Tuzlu-Sodyumlu Toprak İslahında Stabilize Arıtma Çamuru ve Arıtılmış Atık Suların Kullanım Etkinliğinin Belirlenmesi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 72 sayfa, Erzurum.
- Akyıldız, M.H., 2011. Katı Atık Düzenli Depolama Alanlarında Taban Geçirimsizliğine Etki Eden Parametrelerin Araştırılması, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora tezi, 180 sayfa, Sakarya.
- Alawaji, H.A., 1999. Swell and Compressibility Characteristics of Sand - Bentonite Mixtures Inundated with Liquids, Appl. Clay Sci. 15, 411-430.
- Alsanad, M.A., 2023. The environmental assessment of soil chemical properties irrigated with treated wastewater under arid ecosystem of Al-Ahsa, Saudi Arabia, Arab Gulf Journal of Scientific Research, 25 July 2023.
- Asaad, A., Hubert, F., Ferrage, F., Dabat, T., Paineau, E., Porion, P., Savoye, S., Gregoire, B., Dazas, B., Delville, A., Tertre, E., 2021. Role of interlayer porosity and particle organization in the diffusion of water in swelling clays, Applied Clay Science, Volume 207, 15 June 2021, 106089.
- ASTM D1140, 2017. Standard Test Methods for Determining the Amount of Material Finer than 75-µm (No. 200) Sieve in Soils by Washing, West Conshohocken, PA, A.B.D.
- ASTM D422, Standard Test Method for Particle- Size Analysis of Soils, West Conshohocken, PA, A.B.D., 2014.
- ASTM D4318, 2010. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D698, 2007. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D4546, Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils, West Conshohocken, PA, A.B.D.
- Andrade Lima, L.R.P., Bernandez, L.A., Santos, M.G., Souza, R.C., 2018. Remediation of Clay Soils Contaminated with Potentially Toxic Elements: The Santo Amaro Lead Smelter, Brazil, Case, Soil and Sediment Contamination: An International Journal Volume 27, Issue 7.

- APHA, AWWA, WEF, 1999. Standart methods For the Examination of Water and Waste Water, 20th Ed. (Clesceri, L.S., Greenberg, A.E., Eaton, A.D. Ed.), Washington DC.
- Arasan, S., 2010. Effect of Chemicals on Geotechnical Properties of Clay Liners: A Review, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2(8), 765-775.
- Arasan, S., Yılmaz, G., Akbulut, R.K., Yetimoglu, T., 2007. Engineering Properties of Compacted Clay Liners Contaminated by Salt Solution, Adana, Turkey, 415-425.
- Arasan, S., Yetimoglu, T., 2008. Effect of Inorganic Salt Solutions on the Consistency Limits, *Turk. J. Eng. Environ. Sci.*, 32, 107-115.
- Arasan, S., Yetimoglu, T., 2006. Effect of Leachate Components on the Consistency Limits of Clay Liners, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi*, 439-445.
- Baykuş, N., Karpuzcu, M., 2021. İnce Taneli Zeminlerin Kimyasal ve Fiziksel Özelliklerine Atık Suyun Etkilerini, *European Journal of Science and Technology No. 31 (Supp. 1)*, pp. 771-775.
- Bowders, J.J., Daniel, D.E., 1987. Hydraulic Conductivity of Compacted Clay to ilute Organic Chemicals, *ASCE J. Geotech. Eng.*, 113 (12), 1432-1448.
- Chen, W.C., Huang, W.H., 2013. Effect of Groundwater Chemistry on the Swelling Behavior of a Ca- Bentonite for Deep Geological Repository ,*Physics and Chemistry of the Earth*, 65, 42-49.
- Çay, Ş., Kanber, R., 2021. Atık Su ile Sulanan Mısır Bitkisinde Makro ve Mikro Element ve Ağır Metal Birikimi, *Toprak Su Dergisi, Cilt Özel Sayı*, 67 – 75.
- Estabragh, A.R., A mini, M., Javadi, A.A., Noguera, C.L., 2022. Remediation of a clay soil contaminated with phenanthrene by using mixture of bentonite and cement, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 29 November 2022.
- Dixon, D. A., 2000. Porewater Salinity and the Development of Swelling Pressure in Bentonite Based Buffer and Backfill Materials, *POSIVA 2000-04*, Posiva Oy, Helsinki, Finland.
- Dor, M, Levi-Kalisman, Y, Day-Stirrat, R, Mishael, Y, Emmanuel, S., 2020. Assembly of Clay Mineral Platelets, Tactoids, and Aggregates: Effect of Mineral Structure and Solution Salinity. *J Colloid Interface Sci.*, 566.
- Erken, A., Alp, K., Er, N., Yıldırım, H., Eldem, N.Ö., Kaya, Z., Tasköy, A., 2006. İnce Daneli Zeminlerin Davranışları Üzerinde Çöp Suyunun Etkisi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi*.
- Ghiyas, S.M.R., Bagheripour, M.H., 2020. Stabilization of Oily Contaminated Clay Soils Using New Materials:Micro and Macro Structural Investigation, *Geomechanics and Engineering*, Volume 20, Number 3, pages 207-220.
- Herbert, H.J., Moog, H. C., 2000. Modeling of Saturation and Swelling Effects in Clays Under Different Saline Conditions, In *Eurosafe*, Cologne, Germany.
- Izdebska-Mucha, D., Trzcinski, J., 2021. Clay Soil Behaviour Due to Long-Term Contamination by Liquid Petroleum Fuels: Microstructure and Geotechnical Properties, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Volume 80, pages 3193–3206.
- Li, C., Zhou, K., Qin, W., Tian, C., Qi, M., Yan, X., 2019. A Review on Heavy Metals Contamination in Soil: Effects, Sources, and Remediation Techniques, *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* Volume 28, Issue 4.
- Jia, J.C., Yang, Q., 2010. Influence of Pore Water Chemistry on the Swelling Pressure of Compacted Bentonite-Clays, *EJGE*, 15, Bund. C, 321-326.
- Jiang N, Wang C, Wu Q, Li S., 2020. Influence of Structure and Liquid Limit on The Secondary Compressibility of Soft Soils. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8:627.
- Kalay, E., 2010. Sıkıştırılmış Yüksek Plastisiteli Kil Zemin Stabilizasyonunda Pomza, Mermer Tozu ve Kirecin Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 54s.,Isparta.
- Karabash, Z., Al-Obaydi, M.A., Awad, M.A., Al-Khashab, M.N., 2023. Geotechnical Properties of Clay Soil Contaminated with Different Types of Oil, *Geotech Geol Eng.*, 41:2677–2689.
- Kolstad, D.C., Benson, C.H., Edil, T.B., Jo, H.Y., 2004. Hydraulic Conductivity of a Dense Prehydrated GCL Permeated with Aggressive Inorganic Solutions, *Geosynth. Int.*, 11, 3, 233-241.
- Lee, J.M., Shackelford, C.D., Benson, C.H., Jo, H.Y., Edil, T.B., 2005. Correlating Index Properties and Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 131 (11), 1319-1329.
- Maaitah, O., Tarawneh, S.A., 2003. Effect of Treated Waste Water on the Behavior of Unsaturated Soil, *Pakistan Journal of Applied Sciences* 3, 5, 360-3693.
- Massat, L., Cuisinier, O., Bihannic, I., Claret, F., Pelletier, M., Masroui, F., Gaboreau, S., 2016. Swelling Pressure Development and Inter-Aggregate Porosity Evolution Upon Hydration of a Compacted Swelling Clay, *Applied Clay Science*, Volumes 124–125, May 2016, Pages 197-210.
- Mosavat, N., Nalbantoglu, Z., 2013. The Impact of Hazardous Waste Leachate on Performance of Clay Liners, *Waste Management & Research*, 31(2), 194–202.
- Nayak, S., Sunil, B.M., Shrihari, S., Sivapullaiah, P.V., 2010. Interactions Between Soils and Laboratory Simulated Electrolyte Solution, *Geotech. Geol. Eng.*, 28 (6), 899-906.
- Urena, C., Azanon, J.M., Corpas, F., Nieto, F., Leon, C., Perez, L., 2013. Magnesium Hydroxide, Seawater and Olive Mill Wastewater to Reduce Swelling Potential and Plasticity of Bentonite Soil, *Construction and Building Materials*, 45, 289-297.
- Park, J., Vipulanandan, C., Kim, J.W., Oh, M.H., 2006. Effects of Surfactants and Electrolyte Solutions on the Properties of Soil, *Environ. Geol.*, 49, 977-989.
- Quainoo, A.K., Bavoh, C.B., Duarte, K.O., Alhassan, D., 2022. Clay Swelling Inhibition Mechanism Based on Inhibitor-water Interaction; A COSMO-RS Molecular Simulation Approach, *Upstream Oil and Gas Technology*, Vol.9, 100080.
- Rao, A.V.N., Chittaranjan, M., 2012. Effect of Certain Industrial Effluents on Plasticity and Swelling Characteristics of an Expansive Soil- a comparative Study, *Int. Journal of Engineering Science and Technology*, 10, 4390-4397.
- Savage, D., 2005. The Effects of High Salinity Groundwater on the Performance of Clay Barriers, *SKI Report*, 54.
- Sdiri, W., AlSalem, H.S., Al-Goul, S., Binkadem, M.S., Mansour, H.B., 2023. Assessing the Effects of Treated Wastewater Irrigation on Soil Physico-Chemical Properties, *Sustainability*, 15(7), 5793.

- Shirazi, S.M., Wiwat, S., Kazama, H., Kuwano, J., Shaaban, M.G., 2011. Salinity Effect on Swelling Characteristics of Compacted Bentonite, *Environment Protection Engineering*, 37, 2, 65-74.
- Shoib, M., Cruz, N., Bobicki, E.R., 2022. Effect of pH-Modifiers on the Rheological Behaviour of Clay Slurries: Difference Between a Swelling and Non-Swelling Clay, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol.643, 128699.
- Sistani, S.V.M., Negahdar, H., Bamoharram, F.F., Shakeri, M.R., 2023. Geotechnical properties and microstructure of clay contaminated with urban wastewater and remediated with α -Aluminum oxide/ α -Iron oxide nanohybrid, *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, Volume 32, Issue 7.
- Sridharan, A., El-Shafei, A., Miura, N., 2002. Mechanisms Controlling The Undrained Strength Behavior of Remolded Arieke Marine Clays, *Georeso. Geotech.*, 20, 21-50.
- Suzuki, S., Prayongphan, S., Ichikawa, Y., Chae, B.G., 2005. In Situ Observations of The Swelling of Bentonite Aggregates in NaCl Solution, *Appl Clay Sci* 29, 89-98.
- Taşköy, A., 2006. Düşük Plastisiteli Zeminlerin Davranışları Üzerinde Çöp Suyunun Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 204 sayfa, İstanbul.
- Tarekegn, M.M., Salilih, F.Z., Ishtu, A.I., Yıldız, F., 2020. Microbes used as a tool for bioremediation of heavy metal from the environment, *Cogent Food & Agriculture*, Volume 6, Issue 1.
- Wang, Q., Cui, Y.J., Tangi A.M., Delage, P., Gatmiri, B., Ye, W.M., 2014. Long-Term Effect of Water Chemistry on the Swelling Pressure of a Bentonite- Based Material, *Applied Clay Science*, 87, 157-162.
- Yalvaç, E., 2011. Kilin Mühendislik Özelliklerine Atıksuların Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi - Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 54 sayfa, Isparta.
- Yılmaz, A., 2016. Bor İçeren Atık Suların Portlant Çimentosu Harcı Üretiminde Kullanılması, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt 18, Sayı 54, 481-490.
- Yılmaz, G., Yetimoğlu, T., Arasan, S., 2008. Hydraulic Conductivity of Compacted Clay Liners Permeated with Inorganic Salt Solutions, *Waste Manage. Res.*, 26, 464-473.
- Yin, C., Zahao, J., Liu, X., Yu, Z., Liu, H., 2022. Effect of Coal Water Slurry Gasification Slag on Soil Water Physical Characteristics and Properties in Saline-Alkali Soil Improvement, *Advanced Sensor Technologies in Agricultural, Environmental, and Ecological Engineering 2021*, *Journal of Sensors*.
- Yurtcan, U.E., 2023. Kil Zeminlerin Mekanik Davranışına Tuz Çözeltileri Etkisi, *MAUN Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 4(1), 11-22.
- Zhang, H.Y., Cui, S.L., Zhang, M., Jia, L.Y., 2012. Swelling Behaviors of GMZ Bentonite- Sand Mixtures Inundated in NaCl-Na₂SO₄ Solutions, *Nuclear Engineering and Design*, 242, 115-123.
- Zhu, C.M., Yewei, M., Chen, Y.G., Chen, B., Cui, Y.J., 2013. Influence of Salt Solutions on The Swelling Pressure and Hydraulic Conductivity of Compacted Gmz01 Bentonite, *Engineering Geology*, 166, 74-80.
- Zalacain, D., Bienes, R., Santre-Merlin, A., Martinez-Perez, S., Garcia-Diaz, A., 2019. Influence of reclaimed water irrigation in soil physical properties of urban parks: A case study in Madrid (Spain), *Catena*, Volume 180, Pages 333-340.